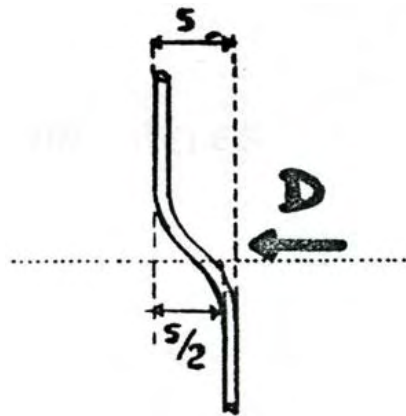
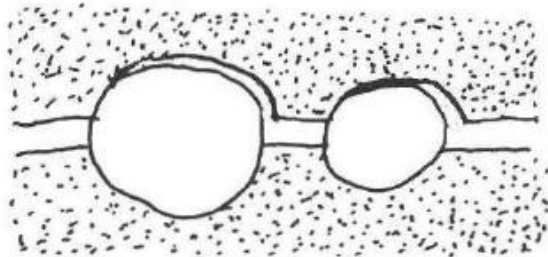




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
«ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ  
ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΠΑΛΑΙΟΥ – ΝΕΟΥ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ»

ΦΕΚΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ



ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ:  
ΜΩΡΕΤΤΗ ΜΑΡΙΝΑ, Επίκουρος Καθηγήτρια Π.Θ.

ΒΟΛΟΣ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2013



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

*Διπλωματική εργασία*  
**«ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ  
ΣΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΠΑΛΑΙΟΥ – ΝΕΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ»**

**Φέκας Κωνσταντίνος**

Επιβλέπουσα:  
Μωρέττη Μαρίνα, Επίκ. Καθηγήτρια Π.Θ.

ΒΟΛΟΣ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2013



## Περιεχόμενα

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1.	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	6
1.2.	ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	7
2.	ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.....	9
2.1.	ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ.....	9
2.2.	ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ.....	11
3.	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ.....	13
3.1.	ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΚΑΙ ΑΛΛΗΛΕΜΠΛΟΚΗ ΑΔΡΑΝΩΝ.....	13
3.2.	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΡΙΒΗΣ.....	14
3.3.	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΡΑΣΗΣ ΒΛΗΤΡΟΥ.....	15
3.4.	ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΠΑΝΩ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ.....	18
4.	ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟΥΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ.....	19
4.1.	ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ (ΚΑΝ.ΕΠΕ.).....	19
4.2.	ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 2 (EN 1992.01.01:2004).....	26
4.3.	ACI Building code requirements (318 – 11).....	27
4.4.	ASCE STANDARD – ASCE/SEI 41-06 SEISMIC REHABILITATION OF EXISTING BUILDINGS.....	29
5.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	31
5.1.	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΛΛΗΛΕΜΠΛΟΚΗΣ ΑΔΡΑΝΩΝ.....	31
5.2.	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΡΑΣΗΣ ΒΛΗΤΡΟΥ.....	42
6.	ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΠΟΥ ΔΡΟΥΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΜΙΑΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΥΠΟ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	75
6.1.	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΡΙΒΗΣ.....	75
6.2.	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΛΛΗΛΕΜΠΛΟΚΗΣ ΑΔΡΑΝΩΝ.....	76
6.3.	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΡΑΣΗΣ ΒΛΗΤΡΟΥ.....	84
6.4.	ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ.....	95
6.5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	104
7.	ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΠΟΥ ΔΡΟΥΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΜΙΑΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	105
7.1.	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΛΛΗΛΕΜΠΛΟΚΗΣ ΑΔΡΑΝΩΝ.....	106
7.2.	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΡΑΣΗΣ ΒΛΗΤΡΟΥ.....	115
7.3.	ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΑΛΛΗΛΕΜΠΛΟΚΗΣ ΑΔΡΑΝΩΝ ΚΑΙ ΔΡΑΣΗΣ ΒΛΗΤΡΟΥ	
	121	

8. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	123
A) Μονοτονική φόρτιση .....	123
8.1. «Effect of reinforcing bar size on shear transfer across a crack in concrete», Alan H. Mattock .....	124
8.2. «Shear transfer under monotonic loading, across an interface between concretes cast at different times», Alan H. Mattock .....	135
8.3. «Shear transfer under cyclically reversing loads, across an interface between concretes cast at different times», Alan H. Mattock.....	150
8.4. «Shear transfer in concrete at an angle to the shear plane», Alan H. Mattock...	157
8.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	169
B) Ανακυκλιζόμενη φόρτιση .....	184
8.6. «Shear transfer under cyclically reversing loads, across an interface between concretes cast at different times», Alan H. Mattock.....	185
8.7. «Shear Transfer across New and Existing Concrete Interfaces», Robert A. Bass, Ramon L. Carrasquillo, and James O. Jirsa.....	192
8.8. «Shear Transfer – Reversing along cracks», A. H. Mattock .....	201
8.9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	208
8.10. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	210
9. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΕ ΕΜΦΑΤΝΟΥΜΕΝΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ.....	211
9.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	211
9.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	214
9.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΑΝΩ ΚΑΙ ΚΑΤΩ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ – ΠΛΑΙΣΙΟΥ	219
9.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ .....	226
9.5 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	244
9.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	246
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	247
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	251

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ασφάλεια των κατασκευών είναι αναμφίβολα πρωταρχικής σημασίας για την προστασία της ζωής και της περιουσίας των πολιτών σε περίπτωση σεισμού.

Η χώρα μας παρουσιάζει την υψηλότερη σεισμικότητα στην Ευρώπη. Ο παράγοντας αυτός χρήζει ιδιαίτερης προσοχής όσον αφορά το σχεδιασμό νέων κτιρίων, και γενικά νέων κατασκευών, καθώς και στη διατήρηση της ακεραιότητας των υφιστάμενων κατασκευών. Ειδικά στον τομέα που σχετίζεται με τις επεμβάσεις σε υπάρχοντα κτίρια θα πρέπει να τονιστεί ότι η πολυπλοκότητα του θέματος αυτού σε συνδυασμό με την απουσία επαρκούς βιβλιογραφίας και την απαίτηση ωριμότητας επιστημονικής γνώσης καθιστούν το έργο του μηχανικού αρκετά δύσκολο και κοπιαστικό.

Οι περισσότερες οικοδομές στην Ελλάδα έχουν κατασκευαστεί πριν το 1980 κάτι που σημαίνει ότι δεν πληρούν τις σύγχρονες προδιαγραφές των κανονισμών έναντι σεισμού (ΕΑΚ2000, EC8). Το γεγονός αυτό ανέδειξε την ανάγκη σύνταξης οδηγιών και κανονισμών προκειμένου να εκτιμηθεί και στη συνέχεια να αυξηθεί η μειωμένη απομένουσα αντοχή των υφιστάμενων κατασκευών μέσω επεμβάσεων στα φέροντα στοιχεία τους.

Προς αυτή την κατεύθυνση κινούνται σύγχρονα κανονιστικά κείμενα όπως είναι οι αμερικάνικες οδηγίες της FEMA, ο Ελληνικός Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.), το τρίτο μέρος του Ευρωκώδικα, κλπ. που υιοθετούν το σχεδιασμό και την αποτίμηση βάσει δεδομένης στάθμης επιτελεστικότητας.

Στα πλαίσια των παραπάνω κανονισμών, υπάρχουν πολλές μέθοδοι επέμβασης σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος μέσω της προσθήκης νέου σκυροδέματος. Η συμπεριφορά της διεπιφάνειας μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος μπορεί να αποδειχθεί κρίσιμη στη συνολική συμπεριφορά της κατασκευής εξαιτίας της σημαντικής μείωσης της απόκρισης σε τέμνουσα της διεπιφάνειας με την πάροδο των ανακυκλίσεων. Γενικότερα υπάρχει η τάση ένα επισκευασμένο στοιχείο να θεωρείται μονολιθικό. Παρόλα αυτά επιβάλλεται να υπάρχει μία σχετική ολίσθηση κατά μήκος της διεπιφάνειας έτσι ώστε να ενεργοποιούνται οι μηχανισμοί αντίστασής της.

Οι διεπιφάνειες θα πρέπει να σχεδιάζονται με βάση την επιστρατευόμενη διατμητική αντίσταση για συγκεκριμένη στάθμη ολίσθησης. Η αντίσταση της διεπιφάνειας εξαρτάται από το μέγεθος της ολίσθησης και από το πλήθος των αναμενόμενων κύκλων. Εξάλλου, προκειμένου να υπολογιστεί η αντίσταση της διεπιφάνειας, δεν μπορεί να γίνει απλή άθροιση των μέγιστων αντιστάσεων των βασικών μηχανισμών που δρουν σε αυτήν (αλληλοεμπλοκή αδρανών, διατμητική τριβή και δράση βλήτρου). Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση των παραπάνω μηχανισμών και ο διαφορετικός ρυθμός ενεργοποίησης συναρτήσει της

ολίσθησης. Όλα τα παραπάνω έγιναν η αφορμή για πειραματικές έρευνες όπου βασικές παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν το ποσοστό και το μήκος αγκύρωσης του οπλισμού της διεπιφάνειας, η προετοιμασία της διεπιφάνειας και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

## **1.1.ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί η συνεισφορά των διαφόρων μηχανισμών στην αντοχή μιας διεπιφάνειας κατά μήκος της οποίας δρουν διατμητικές τάσεις. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι δύσκολο να γίνουν κατανοητοί εξαιτίας της εξάρτησής τους από παράγοντες που δεν ποσοτικοποιούνται εύκολα, όπως για παράδειγμα η τραχύτητα των επιφανειών, που έρχονται σε επαφή, ο βαθμός χημικής πρόσφυσης που τυχόν υφίσταται, η σχέση ανοίγματος και ολίσθησης κατά μήκος της ρωγμής ή διεπιφάνειας, καθώς και οι πραγματικές συνθήκες συνάφειας των οπλισμών (βλήτρων), που διατρέχουν τη διεπιφάνεια. Η δυσκολία ποσοτικής περιγραφής της διατμητικής αντοχής διεπιφανειών και ρωγμών οφείλεται επίσης στην ποικιλομορφία των πειραματικών διατάξεων που έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί, αλλά και στον περιορισμένο αριθμό μετρήσεων που ανακοινώνονται στη σχετική βιβλιογραφία, γεγονός που καθιστά ενίοτε δύσκολη την εκ των υστέρων εκτίμηση της πραγματικής συμβολής των επιμέρους μηχανισμών συμπεριφοράς στην αντοχή της διεπιφάνειας.

Στην παρουσία εργασία γίνεται προσπάθεια παρουσίασης των σημαντικότερων πειραματικών προγραμμάτων που αφορούν τον προσδιορισμό της αντοχής μιας διεπιφάνειας. Επιπλέον, εκτίθενται αριθμητικά προσομοιώματα που έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές, η αξιοπιστία των οποίων αξιολογείται μέσα από την εφαρμογή τους σε δοκίμια της παγκόσμιας βιβλιογραφίας.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Μαρίνα Μωρέττη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και για τη βοήθεια που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Θέλω, επίσης να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που ήταν πάντα δίπλα μου αλλά και τους φίλους και συμφοιτητές μου που συνέβαλαν στο να γίνει η διαμονή μου στο Βόλο αυτά τα χρόνια ευχάριστη.

## **1.2.ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια σύντομη περιγραφή των βασικών τρόπων ενίσχυσης υφιστάμενων κτιρίων και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από κάθε ένα, προκειμένου να γίνει κατανοητή η έννοια των ενισχύσεων. Στο Κεφάλαιο 3 επεξηγούνται οι βασικοί μηχανισμοί που ενεργοποιούνται σε μια διεπιφάνεια για τη μεταφορά διατμητικών δυνάμεων. Το Κεφάλαιο 4 περιλαμβάνει τις διατάξεις κανονισμών που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως για το σχεδιασμό των διεπιφανειών μεταξύ στοιχείων σκυροδέματος. Στο Κεφάλαιο 5 εκτίθενται οι σημαντικότερες πειραματικές έρευνες με τις διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν. Στα Κεφάλαια 6 και 7 περιγράφονται θεωρητικά προσομοιώματα υπολογισμού της αντοχής σε διάτμηση μιας διεπιφάνεια που υποβάλλεται σε μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση αντίστοιχα. Στο Κεφάλαιο 8 γίνεται εφαρμογή των προσομοιωμάτων σε πειράματα της βιβλιογραφίας και αξιολόγηση των προβλέψεων που δίνουν. Τέλος, στο Κεφάλαιο 9 γίνεται εφαρμογή ενός προσομοιώματος στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε εμφαντούμενα τοιχώματα, στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος που ανατέθηκε από τον Ο.Α.Σ.Π. στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, ώστε να γίνει αποτίμηση της συμπεριφοράς των δοκιμών βάσει του προσομοιώματος αυτού.





## 2. ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

### 2.1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ

Τρεις είναι οι βασικοί λόγοι που δικαιολογούν την ενίσχυση μια κατασκευής έναντι σεισμού:

1. Ένα κτίριο που έχει υποστεί βλάβες σε ένα σεισμό πρέπει να επισκευαστεί προκειμένου να ανακτήσει τη λειτουργικότητά του και πιθανόν να βελτιωθεί η απόκρισή του σε ένα μελλοντικό σεισμό.
2. Ένα υπάρχον κτίριο μπορεί να χρειάζεται ενίσχυση για το λόγο ότι δεν ικανοποιεί τα πρότυπα των σύγχρονων κανονισμών σε περίπτωση που αλλάξει η χρήση του.
3. Η προστασία της ακεραιότητας της ιδιοκτησίας ενός ατόμου μπορεί να τον παρακινήσει να ενισχύσει μια κατασκευή.

Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι η ενίσχυση ενός κτιρίου μπορεί γενικά να βελτιώσει πολύ την απόκρισή του σε ενδεχόμενο σεισμό αλλά αυτό σε καμία περίπτωση δεν εγγυάται την απουσία βλαβών στο κτίριο. Άλλωστε, μέσω των βλαβών διαχέεται η εισαγόμενη από το σεισμό ενέργεια, αρκεί αυτές οι βλάβες να είναι ελεγχόμενες πάντα.

Όταν πρόκειται για επέμβαση σε ένα υφιστάμενο κτίριο, θα πρέπει να μελετώνται σε βάθος τα αίτια αλλά και τα αίτια των βλαβών που συνέβησαν. Η εκτίμηση της απόκρισης της κατασκευής αλλά και το είδος της αστοχίας (αν είναι διατμητική, καμπτική, αστοχία αγκύρωσης, κλπ.) είναι ο ακρογωνιαίος λίθος για την επιλογή και την κατάστρωση ενός επιτυχημένου σχεδίου ενίσχυσης.

Ο μηχανικός που έρχεται αντιμέτωπος με την ανάγκη ενίσχυσης ενός υπάρχοντος κτιρίου πρέπει να είναι σε θέση να αποφασίσει αν χρειάζεται:

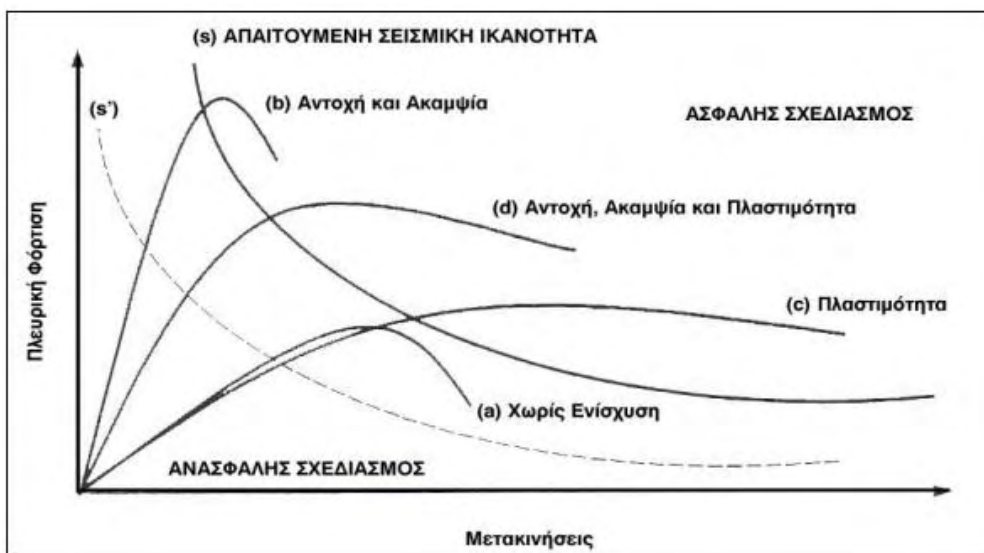
- A) Ενίσχυση μεμονωμένου στοιχείου του κτιρίου ή
- B) Ενίσχυση ολόκληρου του κτιρίου

Η ενίσχυση μεμονωμένων στοιχείων γίνεται στην περίπτωση που τα στοιχεία αυτά, λόγω σεισμού, έχουν υποστεί βλάβες με συνέπεια να έχουν χάσει μεγάλο ποσοστό της φέρουσας ικανότητάς τους. Γίνεται επαναδιαστασιολόγηση τους με βάση την νέα εντατική πραγματικότητα ολόκληρης της κατασκευής έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι τροποποιήσεις που έγιναν λόγω της επέμβασης (π.χ. αύξηση της διατομής κάποιων στοιχείων με αποτέλεσμα αύξηση της δυσκαμψίας τους). Γενικότερα η πρόκληση ζημιών σε στοιχεία του φέροντα οργανισμού της κατασκευής οφείλονται και σε άλλες αιτίες πέραν του σεισμού όπως είναι:

- Συνεργασία μελών με μεγάλη διαφορά δυσκαμψίας
- Δράση τοιχοπληρώσεων
- Παρεμπόδιση μετακινήσεων τοπικά (π.χ. 'θέσει' κοντά υποστυλώματα)

Η ενίσχυση ολόκληρου του κτιρίου επιλέγεται στην περίπτωση που μεγάλος αριθμός από φέροντα στοιχεία του έχουν υποστεί βλάβες και επιδιώκεται η βελτίωση συνολικών χαρακτηριστικών του φορέα. Η αντισεισμική ενίσχυση της κατασκευής επιτυγχάνεται με τέσσερις στρατηγικές επεμβάσεων ανάλογα με την επιδιωκόμενη σεισμική συμπεριφορά της κατασκευής:

- Αύξηση δυσκαμψίας και αντοχής της κατασκευής με ενίσχυση υφιστάμενων στοιχείων (περίπτωση b)
- Αύξηση πλαστιμότητας της κατασκευής και βελτίωση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας με ενίσχυση υφιστάμενων στοιχείων (περίπτωση c)
- Αύξηση δυσκαμψίας, αντοχής και πλαστιμότητας της κατασκευής με ενίσχυση υφιστάμενων στοιχείων ή/και με προσθήκη νέων φερόντων στοιχείων (περίπτωση d)
- Μείωση εισαγόμενης σεισμικής δράσης στην κατασκευή μέσω ενσωμάτωσης στην κατασκευή παθητικών μηχανικών συστημάτων απορρόφησης ενέργειας ιξώδους ή υστερητικής συμπεριφοράς (π.χ. σεισμική μόνωση).



Σχήμα 2.1.1: Επιδιωκόμενο αποτέλεσμα από τις διάφορες στρατηγικές επεμβάσεων [39]

## 2.2.ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ

Διάφορες μέθοδοι και τεχνικές χρησιμοποιούνται σήμερα στην πράξη για την αντισεισμική ενίσχυση μιας κατασκευής στο σύνολό της. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής μεθόδους, ανάλογα με το είδος των πρόσθετων στοιχείων που χρησιμοποιείται σε κάθε μέθοδο [40]:

α) **Κατασκευή εμφατνούμενων τοιχωμάτων** (μεγάλη αύξηση της δυσκαμψίας και της αντοχής της κατασκευής)

β) **Κατασκευή δικτυωτών συστημάτων εντός πλαισίων του φέροντα οργανισμού** (μέτρια αύξηση της αντοχής, μεγάλη αύξηση της δυσκαμψίας και της πλαστιμότητας του φορέα)

γ) **Κατασκευή τοιχωμάτων πτερυγίων από Ο/Σ σε συνέχεια και σύνδεση με υπάρχοντα υποστυλώματα** (μέτρια αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας, βελτίωση της πλαστιμότητας)

δ) **Προσθήκη νέων κατακόρυφων στοιχείων** (μεγάλη αύξηση της αντοχής, της πλαστιμότητας και της δυσκαμψίας του φορέα)

ε) **Επιλεκτική ενίσχυση αδύναμων στοιχείων** όπως είναι για παράδειγμα υποστυλώματα που ενισχύονται από μανδύες από ινοπλισμένα πολυμερή, χαλύβδινα στοιχεία ή μανδύες Ο/Σ (αποφυγή πρόωρων τοπικών αστοχιών και αύξηση της πλαστιμότητας της κατασκευής)

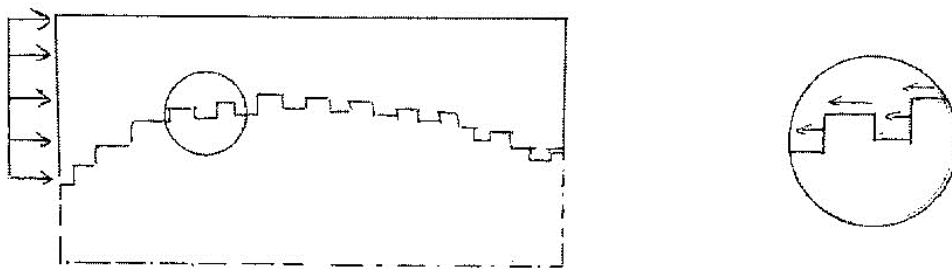
στ) **Ενσωμάτωση στην κατασκευή συστημάτων απορρόφησης σεισμικής ενέργειας** (μείωση εισαγόμενης στο δόμημα κινητικής ενέργειας λόγω σεισμικής διέγερσης)



### 3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

#### 3.1.ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΚΑΙ ΑΛΛΗΛΟΕΜΠΛΟΚΗ ΑΔΡΑΝΩΝ

Ο μηχανισμός αυτός μπορεί να συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στη μεταφορά τέμνουσας κατά μήκος μιας διεπιφάνειας με την προϋπόθεση ότι δεν έχει χρησιμοποιηθεί κάποιο μέσο για την καταστροφή της χημικής συνάφειας στη διεπιφάνεια. Η συνάφεια οφείλεται σε δυνάμεις που αναπτύσσονται εξαιτίας του χημικού και φυσικού δεσμού ανάμεσα των υλικών των παρειών της διεπιφάνειας. Αντίθετα, προκειμένου να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός αλληλοεμπλοκής αδρανών, είναι απαραίτητο η διεπιφάνεια να έχει μια ελάχιστη τραχύτητα. Ο μηχανισμός συνάφειας και αλληλοεμπλοκής αδρανών συμβάλλει τη μεταφορά τέμνουσας μόνο για μικρές τιμές της ολίσθησης ( $s < 0.05\text{mm}$ ). Για μεγαλύτερες τιμές παύει να υπάρχει συνάφεια και το προεξέχοντα τμήματα των αδρανών θρυμματίζονται και οι περιοχές επαφής τους μειώνονται.



Σχήμα 3.1.1: Απλοποιημένη παρουσίαση του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών και συνάφειας

Οι παράμετροι που επηρεάζουν το μηχανισμό αλληλοεμπλοκής αδρανών και συνάφειας είναι:

- Η επεξεργασία της διεπιφάνειας (εκτράχυνση, κλπ.) και η απομάκρυνση κάθε είδους ξένου σωματιδίου από αυτή
- Η αντοχή του παλαιού και του νέου σκυροδέματος
- Η ποιότητα του παλαιού σκυροδέματος που βρίσκεται στο επίπεδο ολίσθησης
- το πορώδες και η υγρασία του παλαιού σκυροδέματος
- η ποιότητα, η σύνθεση και οι ιδιότητες του νέου σκυροδέματος
- η ηλικία των σκυροδεμάτων

Χαρακτηριστικές τιμές των διατμητικών τάσεων αντίστασης που αναπτύσσονται στην επιβαλλόμενη ολίσθηση είναι:

*Εκτράχυνση με αμμοβολή*

$\approx 1.5-2.5 \text{ MPa}$

*Εκτράχυνση με υψηλή πίεση νερού*

$\approx 2.5-3.5 \text{ MPa}$

### 3.2.ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΡΙΒΗΣ

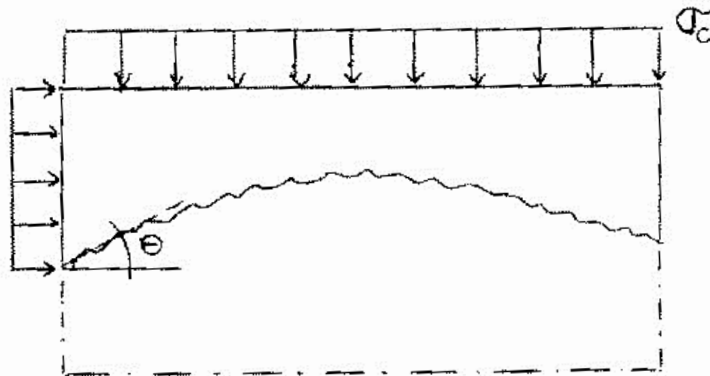
Στην περίπτωση που δρουν κάθετες δυνάμεις στη διεπιφάνεια, η μεταφορά διατμητικών τάσεων επιτυγχάνεται μέσω της τριβής που αναπτύσσεται και εξαρτάται από την τραχύτητα της διεπιφάνειας. Οι δυνάμεις αυτές μπορεί να προέρχονται από τον σπλισμό που ενδεχομένως να διαπερνά τη διεπιφάνεια παλαιού – νέου σκυροδέματος, καθώς η διατμητική ολίσθηση συνοδεύεται κατά κανόνα από αύξηση της αποκόλλησης που οδηγεί στην αξονική ένταση των ράβδων.

Ο συντελεστής τριβής  $\mu$ , ανάλογα με το είδος της διεπιφάνειας, παίρνει τις ακόλουθες τιμές:

<i>Λεία διεπιφάνεια</i>	0.5-0.7
<i>Σκληρή διεπιφάνεια</i>	0.7-1.0
<i>Πολύ σκληρή διεπιφάνεια</i>	1.0-1.4

Όταν επιστρατεύεται μόνον ο μηχανισμός τριβής για την ανάληψη διατμητικών τάσεων τότε η μέγιστη αντίσταση αντιστοιχεί σε τιμή της σχετικής ολίσθησης ίση με  $s=2.0$  mm. Στις περισσότερες, όμως, περιπτώσεις, επιστρατεύονται και οι υπόλοιποι μηχανισμοί, οπότε η μέγιστη τιμή της αντίστασης που επιστρατεύεται από το μηχανισμό τριβής αντιστοιχεί σε ολίσθηση ίση με  $s=1.0$  mm.

Για αναμενόμενες τιμές της ολίσθησης (μικρότερες από  $s=1.0$  mm) πρέπει η διατμητική τάση που οφείλεται στην τριβή να λαμβάνεται μικρότερη από τη μέγιστη.

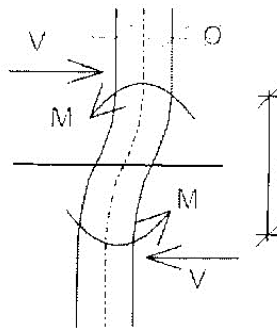


Σχήμα 3.2.1: Απλοποιημένη παρουσίαση του μηχανισμού τριβής

### 3.3.ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΡΑΣΗΣ ΒΛΗΤΡΟΥ

Ο μηχανισμός δράσης βλήτρου αναφέρεται στην καμπτική αντίσταση των ράβδων οπλισμού που διαπερνούν τη διεπιφάνεια παλαιού – νέου σκυροδέματος. Η διατμητική ολίσθηση κατά μήκος της διεπιφάνειας έχει ως αποτέλεσμα τη σχετική μετακίνηση του άνω και κάτω άκρου της ράβδου και έτσι αναπτύσσονται καμπτικές τάσεις ενώ παράλληλα αναπτύσσονται και αξονικές τάσεις στη ράβδο εξαιτίας της διεύρυνσης της ρωγμής. Αυτές οι αξονικές τάσεις δεν επιτρέπουν στη ράβδο να αναπτύξει την ροπή πλήρους πλαστικοποίησης που θα ανέπτυξε αν καταπονούνταν μόνο σε κάμψη.

Η μέγιστη δράση βλήτρου επιστρατεύεται για τιμές της ολίσθησης περίπου  $(0.1-0.2)d_b$  όπου  $d_b$  είναι η διάμετρος του οπλισμού.



Σχήμα 3.3.1: Απλοποιημένη παρουσίαση του μηχανισμού δράσης βλήτρου

Διακρίνονται οι τρεις ακόλουθοι τρόποι αστοχίας [43]:

**A) Αστοχία χάλυβα στη διεπιφάνεια:** Θραύση του χάλυβα του βλήτρου λόγω υπέρβασης της χαρακτηριστικής εφελκυστικής αντοχής του στη θέση της διεπιφάνειας. Είναι ο πιθανότερος τύπος αστοχίας στην περίπτωση που το βλήτρο αγκυρώνεται σε σκυρόδεμα καλής ποιότητας και βρίσκεται σε ικανή απόσταση από το άκρο του στοιχείου. Η τιμή σχεδιασμού της μέγιστης τέμνουσας  $V_{ud,a}$  που μπορεί να μεταφερθεί από ένα βλήτρο δίνεται από την σχέση 3.3.1:

$$V_{ud,a} = \frac{A_s f_{yd}}{\sqrt{3}} \quad (3.3.1)$$

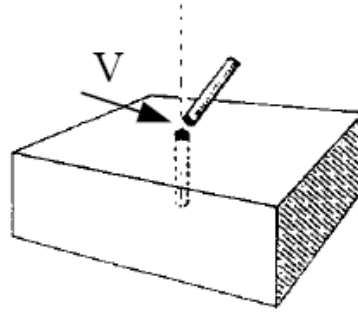
όπου

$A_s$ : εμβαδό της διατομής του βλήτρου

$\frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$ : το όριο διαρροής σχεδιασμού του χάλυβα σύμφωνα με το κριτήριο

Von Mises





Σχήμα 3.3.2: Τρόπος αστοχίας τύπου A [43]

B) **Σύνθλιψη του περιβάλλοντος σκυροδέματος και δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στο βλήτρο:** Τοπική αστοχία του σκυροδέματος που περιβάλλει το βλήτρο λόγω της θλιπτικής δύναμης που ασκεί το βλήτρο στο σκυρόδεμα στη διεύθυνση του διατμητικού φορτίου με ταυτόχρονο σχηματισμό πλαστικής άρθρωσης στο βλήτρο. Προσομοιάζοντας αυτόν τον τύπο αστοχίας με την περίπτωση πλαστικής αστοχίας πασσάλου εμπηγμένου στο έδαφος καταλήγουμε στην σχέση 3.3.2 για την τιμή της τέμνουσας:

$$V_{ud,\beta} = \gamma_m d_b^2 [\sqrt{1 + (1.3\varepsilon)^2} - 1.3\varepsilon] \sqrt{f_{cd} f_{yd}} \quad (3.3.2)$$

όπου

$$\varepsilon = 3 \frac{e}{d_b} \sqrt{\frac{f_{cd}}{f_{yd}}}$$

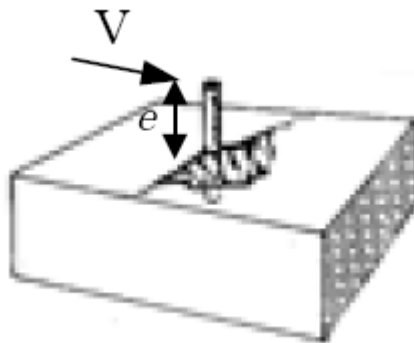
$d_b$ : η διάμετρος του βλήτρου

$\gamma_m = 1.3$  για στατική φόρτιση και  $\gamma_m = 1.0$  για ανακυκλιζόμενη φόρτιση

$e$ : η εκκεντρότητα του διατμητικού φορτίου

$f_{cd}$ : η θλιπτική αντοχή σχεδιασμού του σκυροδέματος

$f_{yd}$ : η τάση διαρροής σχεδιασμού του χάλυβα



Σχήμα 3.3.3: Τρόπος αστοχίας τύπου B [43]

Γ) **Απόσχιση πλευρικού κώνου σκυροδέματος λόγω ανεπαρκούς επικάλυψης είτε κατά τη διεύθυνση της φόρτισης είτε κάθετα προς αυτή:** Συγκεκριμένα όταν η επικάλυψη σκυροδέματος είναι μικρότερη από κάποιες ελάχιστες τιμές που αναφέρονται παρακάτω, ο μηχανισμός αστοχεί με απόσχιση του σκυροδέματος, η οποία συμβαίνει για χαμηλή τιμή του διατμητικού φορτίου, πολύ μικρή ολίσθηση κατά μήκος των παρειών της διεπιφάνειας και είναι εξαιρετικά ψαθυρή. Για τους λόγους αυτούς η αστοχία τύπου Γ' πρέπει να αποφεύγεται και να προτιμάται η αστοχία τύπου Β' που χαρακτηρίζεται από ελαστοπλαστική συμπεριφορά του βλήτρου και μεγάλες τιμές σχετικής ολίσθησης.

Οι ελάχιστες τιμές επικάλυψης για να αποφευχθεί αστοχία τύπου Γ' είναι οι ακόλουθες:

- Κατά τη διεύθυνση της φόρτισης:
  - ❖ Ελάχιστη κάτω επικάλυψη =  $6 d_b$
  - ❖ Ελάχιστη άνω επικάλυψη =  $5 d_b$
- Κάθετα στη διεύθυνση της φόρτισης:
  - ❖ Ελάχιστη πλευρική επικάλυψη =  $3 d_b$

Η αστοχία τύπου Γ εξαρτάται επίσης από το πάχος του στοιχείου στην αξονική διεύθυνση του βλήτρου. Η τιμή σχεδιασμού της μέγιστης τέμνουσας γι' αυτόν τον τύπο αστοχίας μπορεί να εκτιμηθεί από την σχέση 3.3.3:

$$V_{ud,\gamma} = k_1 a_1 a_2 \sqrt{d_b f_{cd}} \left(\frac{l_b}{d_b}\right)^{1/5} c_p^2 \quad (3.3.3)$$

όπου

$d_b$ : η διάμετρος του βλήτρου [mm]

$l_b$ : το μήκος αγκύρωσης του βλήτρου [mm]

$c_p$ : η επικάλυψη του βλήτρου στη διεύθυνση της φόρτισης [mm]

$k_1=0,28$  [ $N^{1/2}/mm$ ]

Οι συντελεστές  $a_1$  και  $a_2$  χρησιμοποιούνται για να εισάγουν στο φορτίο αστοχίας μείωση στην περίπτωση που δεν ικανοποιείται κάποια από τις ελάχιστες τιμές της επικάλυψης που αναφέρθηκαν παραπάνω:

$$a_1 = \left(\frac{t}{1,4c_p}\right)^{\frac{2}{3}} \leq 1,0 \quad (3.3.4)$$

$$a_2 = \max\left[\frac{0,3+0,7c_n^{min}}{1,5c_p}; \frac{(c_n^{max}+c_n^{min})}{3,5c_p}\right] \leq 1,0 \quad (3.3.5)$$

$t$ : το πάχος του στοιχείου κατά τη διεύθυνση του άξονα του βλήτρου

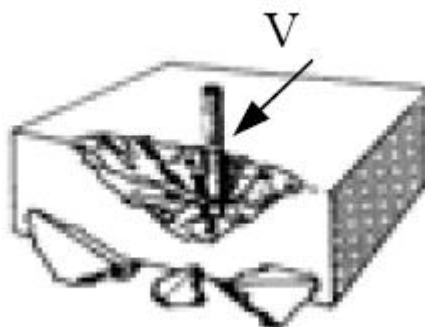
$c_n$ : η πλευρική επικάλυψη σκυροδέματος σε διεύθυνση κάθετη σε αυτή του φορτίου

Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν  $n$  βλήτρα σε σειρά για την παραλαβή του διατμητικού φορτίου και η μεταξύ τους απόσταση είναι  $s \geq s_{cr}$  με  $s = 2c_p$  για  $n=2$  και  $s = 3c_p$  για  $n \geq 3$  το συνολικό φορτίο σχεδιασμού προκύπτει από άθροιση του φορτίου σχεδιασμού κάθε βλήτρου χωριστά:

$$V_{ud,\gamma}^n = \sum V_{ud,\gamma} \quad (3.3.6)$$

Αν όμως τα βλήτρα είναι τοποθετημένα σε απόσταση μεταξύ τους  $s < s_{cr}$  η τέμνουσα σχεδιασμού των βλήτρων θα πρέπει να μειωθεί λόγω της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης. Έτσι έχουμε:

$$V_{ud,\gamma}^n = \left(1 + \frac{(n-1)s}{s_{cr}}\right) V_{ud,\gamma} \quad (3.3.7)$$



Σχήμα 3.3.4: Τρόπος αστοχίας τύπου Γ [43]

### 3.4.ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΠΑΝΩ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ

Σε μια πραγματική κατασκευή η οποία καταπονείται από τέμνουσα δύναμη οι παραπάνω μηχανισμοί αλληλεπιδρούν και επηρεάζουν ο ένας τον άλλον ως συνάρτηση της τιμής της ολίσθησης. Από τη στιγμή που η ολίσθηση ξεπεράσει την τιμή για την οποία η συνεισφορά του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών μεγιστοποιείται, η δράση του μηχανισμού αυτού φθίνει γρήγορα. Ο μηχανισμός τριβής φθίνει και αυτός με μικρότερο ρυθμό, ενώ ο μηχανισμός δράσης βλήτρου είναι αυτός που ενεργοποιείται για μεγαλύτερες τιμές της ολίσθησης.

Αν δεν υπάρχει οπλισμός που να διαπερνά τη ρωγμή, ο τρόπος αστοχίας είναι περισσότερο ψαθυρός. Η αστοχία επέρχεται για τιμή της ολίσθησης περίπου ίση με 0.05 mm, δηλαδή όταν αρχίζει να μειώνεται η αντίσταση από το μηχανισμό αλληλοεμπλοκής αδρανών.

Διεπιφάνειες με ποσοστό οπλισμού  $\rho > 0.05\%$  παρουσιάζουν πιο πλάστιμη συμπεριφορά μέχρι την αστοχία, η οποία συμβαίνει για τιμές της ολίσθησης 0.5-1.5 mm.

#### **4. ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟΥΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΠΑΛΑΙΟΥ – ΝΕΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

Στο κεφάλαιο περιέχονται οι προβλέψεις ορισμένων κανονισμών σχετικά με τους μηχανισμούς μεταφοράς δυνάμεων σε διεπιφάνειες μεταξύ στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Γίνεται αναφορά στους μηχανισμούς που λαμβάνονται υπόψη από κάθε κανονιστικό κείμενο για το σχεδιασμό των διεπιφανειών καθώς και τα αντίστοιχα προσομοιώματα, δηλαδή σχέσεις για τον υπολογισμό της μέγιστης διατμητικής δύναμης που μπορεί να αναπτυχθεί. Οι κανονισμοί που θα αναφερθούν στη συνέχεια είναι οι εξής:

1. Ελληνικός κανονισμός επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.)
2. Ευρωκώδικας 2 (EN 1992.01.01:2004), παράγραφος 6.2.5
3. ACI Provisions (Committee 318 – section 11)
4. ASCE Standard – ASCE/SEI 41-06 Seismic rehabilitation of existing buildings

##### **4.1.ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ (ΚΑΝ.ΕΠΕ.)**

Οι μηχανισμοί που προβλέπονται ότι συμμετέχουν στην ανάληψη διατμητικών δυνάμεων διακρίνονται ανάλογα αν αναπτύσσονται ανάμεσα σε παλιό και νέο σκυρόδεμα και ανάμεσα σε χάλυβα και σκυρόδεμα:

1. Μηχανισμοί από σκυρόδεμα σε σκυρόδεμα
  - 1.1 Συνοχή παλαιού και νέου σκυροδέματος
  - 1.2 Τριβή μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος
2. Μηχανισμοί μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος
  - 2.1 Μηχανισμός δράσης βλήτρου
    1. Μηχανισμοί από σκυρόδεμα σε σκυρόδεμα σε σκυρόδεμα
      - 1.1 Συνοχή παλαιού και νέου σκυροδέματος

Συνοχή είναι η μέγιστη διατμητική τάση που μπορεί να μεταφερθεί κατά μήκος της διεπιφάνειας, όταν η ορθή θλιπτική τάση είναι μηδενική και όταν δεν υπάρχει εκατέρωθεν της διεπιφάνειας καλά αγκυρωμένος οπλισμός. Η μέγιστη τιμή της συνοχής επιστρατεύεται για πολύ μικρές τιμές της σχετικής ολίσθησης, 0.01 – 0.02 mm. Μπορεί να πάρει τις ακόλουθες τιμές:

- a)  $0.25f_{ct}$ , για λείες διεπιφάνειες που δεν έχουν υποστεί επεξεργασία

- b)  $0.75f_{ct}$ , για διεπιφάνειες στις οποίες έχει γίνει εκτράχυνση τεχνητά (π.χ. με αμμοβολή, υδροβολή κλπ.)
- c)  $1.00f_{ct}$ , όταν το νέο σκυροδέμα τοποθετείται πάνω στο παλιό με έντονη πίεση ή στην περίπτωση που στη διεπιφάνεια έχει προηγουμένως διαστρωθεί ισχυρό συνδετικό υλικό (π.χ. εποξεική κόλλα)

όπου  $f_{ct}$  η εφελκυστική αντοχή του ασθενέστερου σκυροδέματος.

## 1.2 Τριβή μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος

Η διατμητική τάση που μεταφέρεται λόγω τριβής κατά μήκος ενός επιπέδου ολίσθησης είναι συνάρτηση της τιμής της σχετικής ολίσθησης,  $s$ , των δύο παρειών, της ορθής θλιπτικής τάσης,  $\sigma_o$ , και της τραχύτητας. Δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$\tau_{fu} = \mu \sigma_o \quad (4.1.1)$$

όπου:  $\mu$  ο συντελεστής τριβής που σχετίζεται με την τραχύτητα της διεπιφάνειας και είναι συνάρτηση της ορθής θλιπτικής τάσης,

- Για λείες διεπιφάνειες ισχύει ότι  $\mu=0.4$ . Έτσι η μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης λόγω τριβής είναι

$$\tau_{fu} = 0.4 \sigma_{cd} \quad (4.1.2)$$

όπου:  $\sigma_{cd}$  είναι η τιμή σχεδιασμού της ελάχιστης θλιπτικής τάσης που δρα κάθετα στη διεπιφάνεια

Η μέγιστη απόκριση του μηχανισμού τριβής γίνεται για τιμή της ολίσθησης ίση με  $s_{fu} = 0.15\sqrt{\sigma_{cd}}$  [mm, MPa]. Για τιμές μεγαλύτερες από  $s_{fu}$  η δράση της τριβής δεν αυξάνεται αλλά λαμβάνεται ίση με τη μέγιστη.

Στην περίπτωση ανακυκλιζόμενης φόρτισης, λόγω των μεγάλων ολισθήσεων, χρειάζεται να εισάγουμε μείωση στην τιμή της διατμητικής τάσης της τριβής. Στην περίπτωση αυτή έχουμε:

$$\tau_{fud,n} = \tau_{fud}(1 - \delta\sqrt{n-1}) \quad (4.1.3)$$

όπου:  $\tau_{fud,n}$  η διατμητική αντίσταση μετά από  $n$  κύκλους  
 $\tau_{fud}=0.4\sigma_{cd}$   
 $\delta=0.15$

- Για τραχείες διεπιφάνειες η μέγιστη διατμητική τάση λόγω τριβής δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{fud} = 0.4(f_{cd}^2 \sigma_{cd})^{1/3} \quad (4.1.4)$$

όπου  $f_{cd}$  η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής αντοχής του ασθενέστερου σκυροδέματος

Η μέγιστη τιμή της ολίσθησης για την οποία επιστρατεύεται η μέγιστη τάση λόγω τριβής όταν είναι ο μοναδικός μηχανισμός που δρα στη διεπιφάνεια είναι ίση με  $s_{fu}=2.00$  mm. Διαφορετικά όταν συμμετέχουν και άλλοι μηχανισμοί στη διεπιφάνεια λαμβάνεται  $s_{fu}=1.00$  mm. Στην περίπτωση μικρότερης ολίσθησης από την παραπάνω μέγιστη τιμή η διατμητική αντίσταση υπολογίζεται σύμφωνα με τα επόμενα:

$$\alpha) \text{ για } \frac{s_f}{s_{fu}} \leq 0.5 \quad \left( \frac{\tau}{\tau_{fud}} \right) = 1.14 \sqrt[3]{\frac{s_f}{s_{fu}}} \quad [\text{mm, MPa}] \quad (4.1.5)$$

$$\beta) \text{ για } \frac{s_f}{s_{fu}} > 0.5 \quad \left( \frac{\tau}{\tau_{fud}} \right) = 0.81 + 0.19 \frac{s_f}{s_{fu}} \quad [\text{mm, MPa}] \quad (4.1.6)$$

Στην περίπτωση ανακυκλιζόμενης φόρτισης η μείωση της τάσης της τριβής σε κάθε κύκλο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{\Delta \tau_n}{\tau_1} = 0.05 \sqrt{\frac{f_c}{\sigma_o}} \sqrt{n-1} \left( \frac{s_f}{s_{fu}} \right)^{1/3} \quad (4.1.7)$$

όπου:  $s_f$  η μέγιστη επιβαλλόμενη ανακυκλιζόμενη ολίσθηση ( $< s_{fu}$ )  
 $\tau_1(s)$  η διατμητική αντίσταση κατά τον πρώτο κύκλο φόρτισης για επιβαλλόμενη ολίσθηση  $s_f$   
 $\sigma_o$  η ορθή θλιπτική τάση στη διεπιφάνεια

Στην περίπτωση που υπάρχει οπλισμός που διαπερνά κάθετα τη διεπιφάνεια τότε η μέγιστη τάση λόγω τριβής δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{fud} = 0.4(f_{cd}^2[\sigma_{cd} + \rho f_{yd}])^{1/3} \leq 0.3f_{cd} \quad (4.1.8)$$

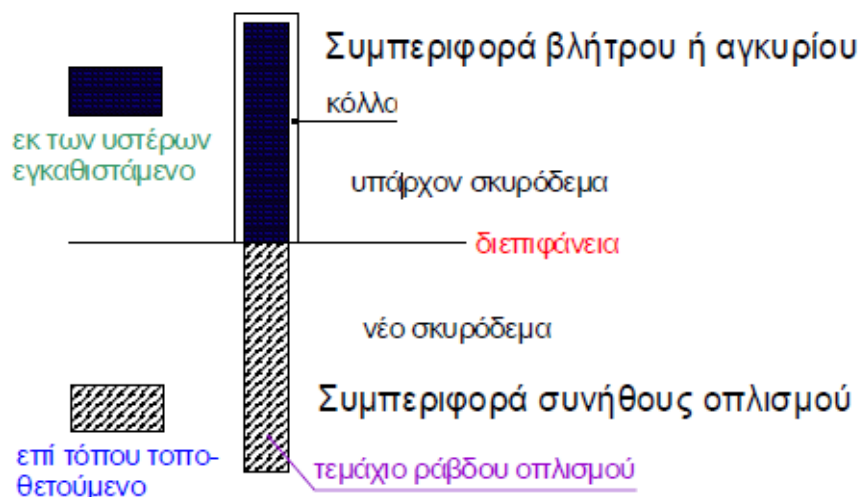
όπου:  $\rho$  το ποσοστό οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια  
 $f_{yd}$  η τιμή σχεδιασμού της τάσης διαρροής του οπλισμού

## 2. Μηχανισμοί μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος

### 2.1 Μηχανισμός δράσης βλήτρου

Για τη μεταφορά διατμητικών δυνάμεων στις διεπιφάνειες παλιού και νέου σκυροδέματος χρησιμοποιούνται μεταλλικοί σύνδεσμοι, τα βλήτρα. Γι' αυτόν τον σκοπό, χρησιμοποιούνται είτε βιομηχανικά βλήτρα διαφόρων τύπων, είτε τεμάχια ράβδων οπλισμού (χάλυβας με νευρώσεις), αγκυρωμένα στο σκυρόδεμα μέσω κόλλας. Όταν χρησιμοποιούνται τεμάχια ράβδων οπλισμού για την σύνδεση παλαιού σκυροδέματος με νέο, η συμπεριφορά των βλήτρων θα υπαγορεύεται εν μέρει απ'

την συνήθη συμπεριφορά μηχανισμού βλήτρου ή/και εξόλκευσης και εν μέρει από την συμπεριφορά του εκ των υστέρων εγκαθιστάμενου στοιχείου. Η μέγιστη διατμητική δύναμη, την οποία μπορεί να μεταφέρει ένα τέτοιο χαλύβδινο στοιχείο θα είναι η μικρότερη απ' τις δυνάμεις που είναι δυνατόν να μεταφερθούν μέσω του τμήματος της ράβδου που είναι πακτωμένο στην μία ή στην άλλη πλευρά της διεπιφάνειας.



**Σχήμα 4.1.1:** Λειτουργία ράβδου οπλισμού κατά τη σύνδεση παλιού με νέο σκυρόδεμα

Όσον αφορά τη χρήση κοντών τεμαχίων χάλυβα με νευρώσεις, το τμήμα το βλήτρου που είναι τοποθετημένο στο νέο σκυρόδεμα συμπεριφέρεται ως προς τη συνάφεια του με το περιβάλλον σκυρόδεμα όπως ακριβώς ο συμβατικός οπλισμός.

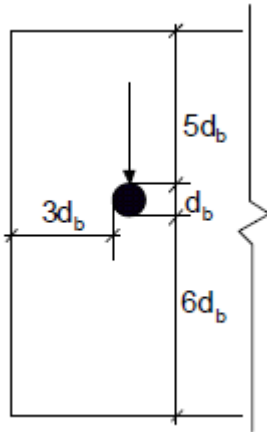
### Τρόποι αστοχίας

Οι τρόποι αστοχίας των βλήτρων έχουν αναφερθεί σε άλλο κεφάλαιο και απλά αναφέρονται παρακάτω ξανά:

- Αστοχία χάλυβα στη διεπιφάνεια
- Σύνθλιψη του περιβάλλοντος σκυροδέματος και δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στο βλήτρο
- Απόσχιση πλευρικού κώνου σκυροδέματος λόγω ανεπαρκούς επικάλυψης είτε κατά τη διεύθυνση της φόρτισης είτε κάθετα προς αυτή

### Ελάχιστες επικαλύψεις βάσει του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Στην περίπτωση που δεν είναι επαρκής η επικάλυψη επέρχεται αστοχία λόγω εμφάνισης ρωγμής απόσχισης (ρωγμής κατά μήκος του βλήτρου). Η μορφή αστοχίας είναι ιδιαιτέρως ψαθυρή καθώς για πολύ μικρές τιμές της ολίσθησης κατά μήκος της διεπιφάνειας πέφτει απότομα η ικανότητα μεταφοράς τέμνουσας δύναμης από το βλήτρο. Για τον λόγο αυτό προβλέπονται από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. οι ακόλουθες ελάχιστες επικαλύψεις:



- Κατά την διεύθυνση φορτίσεως:  
Ελάχιστη εμπρός επικάλυψη= $6d_b$   
Ελάχιστη πίσω επικάλυψη= $5d_b$
- Κάθετα στην δ/νση φορτίσεως:  
Ελάχιστη πλευρική επικάλυψη= $3d_b$

Οι παραπάνω τιμές μπορεί βέβαια να μην εφαρμόζονται κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες προϋποθέσεις όπως είναι για παράδειγμα η σκόπιμη τοποθέτηση στο νέο σκυρόδεμα κατάλληλου οπλισμού (είτε υπό μορφή πυκνής σχάρας είτε με τη μορφή αναβολέων) σε επαφή με το βλήτρο και κοντά στη διεπιφάνεια (σε απόσταση από αυτήν το πολύ ίση με δύο διαμέτρους του χρησιμοποιούμενου βλήτρου).

Στην περίπτωση που τοποθετούνται βλήτρα σε σειρά η καθαρή απόσταση μεταξύ τους πρέπει να είναι ίση με τουλάχιστον πέντε φορές τη διάμετρό τους. Διαφορετικά, αν δεν πληρείται η παραπάνω συνθήκη θα πρέπει να μειώνεται η υπολογιζόμενη τέμνουσα δύναμη που μπορούν να αναλάβουν τα βλήτρα.

### Μήκος βλήτρου (Βάθος έμπηξης)

Προκειμένου να μπορούν να μεταφερθεί τέμνουσα δύναμη θα πρέπει το βάθος έμπηξης των βλήτρων να είναι ίσο με τουλάχιστον οχτώ φορές τη διάμετρό του ( $8d_b$ ).

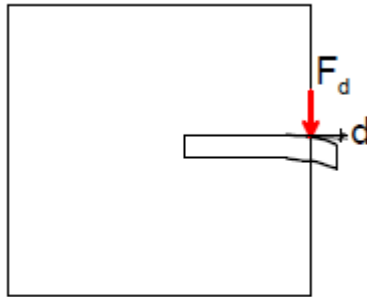
Όταν δεν ικανοποιείται η παραπάνω προϋπόθεση τότε η δύναμη που υπολογίζεται ανάλογα με τον αναμενόμενο τρόπο αστοχίας πρέπει να λαμβάνεται απομειωμένη. Πιο συγκεκριμένα, ελλείψει ακριβέστερων στοιχείων προβλέπονται τα εξής:

- Απαιτείται μήκος έμπηξης τουλάχιστον ίσο με έξι φορές τη διάμετρο του βλήτρου, για το οποίο, όμως θα λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της μέγιστης τέμνουσας ίση με 25%.
- Για μήκος έμπηξης μεταξύ  $6d_b$  και  $8d_b$  η εισαγόμενη στους υπολογισμούς μείωση θα προκύπτει με γραμμική παρεμβολή.

### Αντοχή βλήτρου

Η μέγιστη αντοχή που υπολογίζεται ανάλογα με τον τρόπο αστοχίας του βλήτρου επιστρατεύεται για τιμή μετακίνησης στη διεπιφάνεια ίση με  $0.05d_b$ . Θα πρέπει στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι, για διαμπερές βλήτρο η ολίσθηση στη διεπιφάνεια είναι διπλάσια της μετακίνησης,  $d$ , της κεφαλής βλήτρου μονόπλευρα εμπηγμένου.

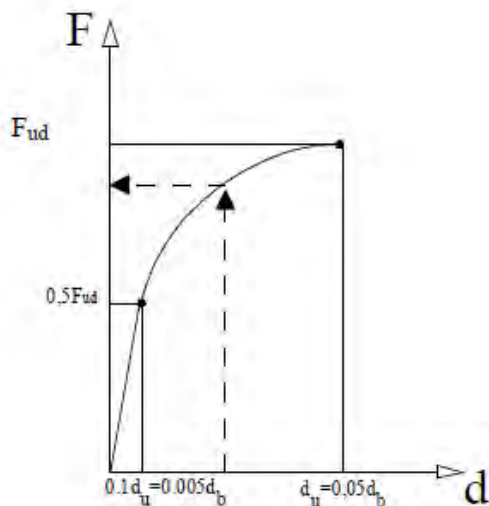




Σχήμα 4.1.2: Παραμόρφωση βλήτρου

Στην περίπτωση που δεν επέρχεται ολίσθηση στη διεπιφάνεια έτσι ώστε να επιστρατεύεται όλη η αντοχή του βλήτρου, τότε η αντίσταση του βλήτρου θα πρέπει να λαμβάνεται αναλόγως μειωμένη.

Ελλείψει ακριβέστερων δεδομένων ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. προβλέπει τη χρήση του ακόλουθου διαγράμματος:



Σχήμα 4.1.3: Σχέση δύναμης δράσης βλήτρου με τη σχετική ολίσθηση

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Για τιμές της επιβαλλόμενης ολίσθησης μικρότερες ή ίσες από  $0.005d_b$  η σχέση μεταξύ της ολίσθησης και της μέγιστης αντοχής χαρακτηρίζεται από γραμμικότητα.
- Για τιμές της σχετικής ολίσθησης μεταξύ  $0.005d_b$  και  $0.05d_b$  η σχέση μεταξύ ολίσθησης και της αντίστασης του μηχανισμού βλήτρου δίνεται από την εξίσωση 4.1.8:

$$d = 0.1d_u + 1.80d_u \left[ \left( \frac{F_d}{F_{ud}} \right)^4 - 0.5 \left( \frac{F_d}{F_{ud}} \right)^3 \right] \quad (4.1.9)$$

Πέρα από το μηχανισμό δράσης βλήτρου, συνεισφορά στη μεταφορά τέμνουσας έχει και ο μηχανισμός τριβής που αναπτύσσεται επίσης, λόγω της σχετικής ολίσθησης παλιού και νέου σκυροδέματος. Από τους παραπάνω μηχανισμούς, το ποσοστό που αναπτύσσεται ο καθένας εξαρτάται από παράγοντες όπως:

- Το μέγεθος της αναμενόμενης ολισθήσεως κατά μήκος της διεπιφάνειας
- Την διάμετρο και το μήκος των ράβδων του οπλισμού που διαπερνά την διεπιφάνεια
- Την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος
- Την ανακύκλιση της ολισθήσεως, κλπ.

Η αντίσταση μιας διεπιφάνειας, για συνδυασμό μηχανισμού δράσης βλήτρου και μηχανισμού τριβής, υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{Rd,int} = \tau_{Rd,int} b l \quad (4.1.10)$$

όπου

b: το πλάτος της οπλισμένης διεπιφάνειας

l: το μήκος της οπλισμένης διεπιφάνειας

$\tau_{Rd}$ : η τιμή σχεδιασμού της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tau_{Rd} = \beta_D \tau_D + \beta_F \tau_{fd} \quad (4.1.11)$$

όπου:

$\beta_D$  και  $\beta_F$  είναι οι συντελεστές συμμετοχής του μηχανισμού βλήτρου και του μηχανισμού τριβής στην αντοχή της διεπιφάνειας σε διάτμηση

$\tau_D$  είναι η αντίσταση του μηχανισμού βλήτρου που προκύπτει από τη διαίρεση της μέγιστης τέμνουσας  $F_d$  (η οποία είναι συνάρτηση της σχετικής ολίσθησης) με το εμβαδόν της διεπιφάνειας και

$\tau_{fd}$  είναι η αντίσταση του μηχανισμού τριβής που αντιστοιχεί στην σχετική ολίσθηση που έχουμε κάθε φορά

Ελλείψει ακριβέστερων δεδομένων οι επιμέρους συντελεστές συμμετοχής μπορούν να ληφθούν ως εξής:

- Για τιμές της ανεκτής σχετικής ολίσθησης  $s \leq 1.00\text{mm}$ ,  $\beta_D=0.7$  και  $\beta_F=0.4$
- Όταν η τιμή της αναμενόμενης σχετικής ολίσθησης είναι αβέβαιη ή όταν η εξωτερική θλιπτική δύναμη στην διεπιφάνεια είναι σχεδόν μηδενική,

επιτρέπεται να λαμβάνονται υπ' όψη οι ακόλουθες συντηρητικές τιμές των συντελεστών συμμετοχής:  $\beta_D = \beta_F = 0.5$

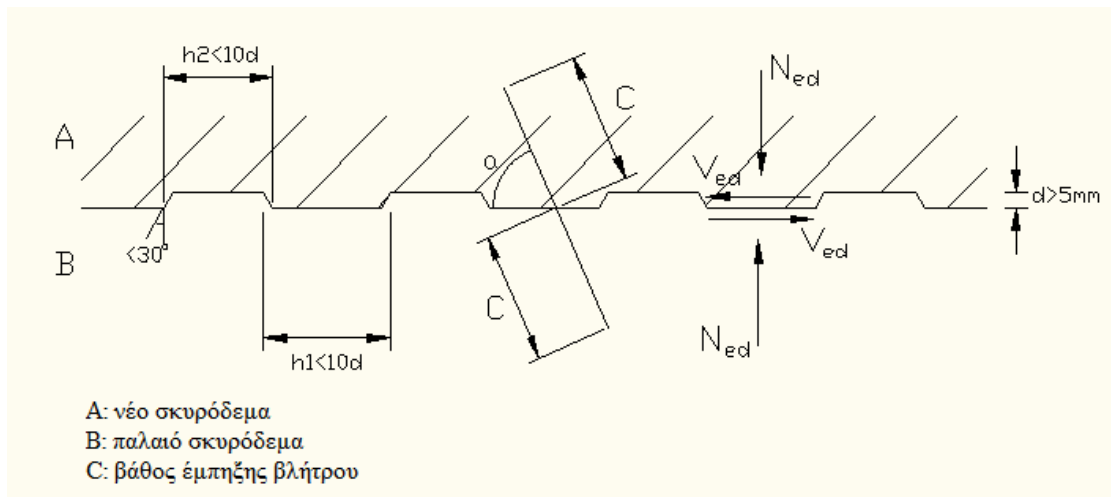
Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η συνεισφορά του μηχανισμού βλήτρου είναι πολύ σημαντική στην φέρουσα ικανότητα μιας διεπιφάνειας. Ουσιαστικά, η διεπιφάνεια μεταξύ παλιού και νέου σκυροδέματος είναι ρωγμή μηδενικού εύρους. Όσο αυξάνεται η σχετική ολίσθηση το εύρος της «ρωγμής» μεγαλώνει. Για πολύ μικρές τιμές της ολίσθησης βασική συνεισφορά έχει ο μηχανισμός τριβής. Όσο αυξάνεται το άνοιγμα της «ρωγμής», με ταυτόχρονη παρουσία αξιόλογης θλιπτικής δύναμης κάθετα στη διεπιφάνεια, ενεργοποιείται σημαντικά ο μηχανισμός βλήτρου.

#### 4.2.ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 2 (EN 1992.01.01:2004)

Η παράγραφος 6.2.5 του Ευρωκώδικα 2 αναφέρεται στον υπολογισμό της αντοχής σε τέμνουσα διεπιφανειών παλαιού και νέου σκυροδέματος. Η σχέση που δίνει την αντοχή σε τέμνουσα είναι η ακόλουθη:

$$v_{Rdi} = c f_{ctd} + \mu \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0.5 v f_{cd} \quad (4.2.1)$$

όπου  $c$ : συντελεστής που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας  
 $\mu$ : ο συντελεστής τριβής  
 $f_{ctd}$ : η εφελκυστική τάση σχεδιασμού του σκυροδέματος  
 $\sigma_n$ : τάση ανά μονάδα επιφανείας που οφείλεται σε εξωτερική κάθετη δύναμη στη διεπιφάνεια και δρα ταυτόχρονα με την τέμνουσα δύναμη, θετική για θλίψη, τέτοια ώστε  $\sigma_n < 0.6 f_{cd}$ , και αρνητική για εφελκυσμό. Όταν η  $\sigma_n$  είναι εφελκυστική τότε λαμβάνεται  $f_{ctd}$  ίση με μηδέν  
 $\rho$ : το ποσοστό οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια  
 $\alpha$ : η γωνία, όπως ορίζεται στο σχήμα 4.2.1 ( $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )  
 $v$ : μειωτικός συντελεστής



Σχήμα 4.2.1: Οδοντωτή διεπιφάνεια παλαιού – νέου σκυροδέματος

Όταν δεν υπάρχουν πιο λεπτομερείς πληροφορίες για την τραχύτητα της διεπιφάνειας, τότε διακρίνονται οι επόμενες περιπτώσεις:

- Πολύ λεία: επιφάνεια μετάλλου, πλαστικού ή ιδιαίτερα επεξεργασμένες επιφάνειες ξύλου:  $c=0.25$  και  $\mu=0.5$
- Λεία: επιφάνεια χωρίς να έχει υποστεί καμία επεξεργασία:  $c=0.35$  και  $\mu=0.6$
- Εκτραχυμένη: επιφάνεια η οποία έχει υποστεί τεχνητή εκτράχυνση με απομάκρυνση μιας εξωτερικής στρώσης σκυροδέματος μέχρι να εμφανιστούν τα πρώτα αδρανή:  $c=0.45$  και  $\mu=0.7$
- Οδοντωτή: επιφάνεια σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1:  $c=0.50$  και  $\mu=0.9$

### 4.3.ACI Building code requirements (318 - 11)

Ο κανονισμός του ACI θεωρεί ότι ο βασικός μηχανισμός μεταφοράς διατμητικών τάσεων σε μια διεπιφάνεια είναι ο μηχανισμός τριβής που οφείλεται στην ορθή δύναμη που εισάγεται από τον οπλισμό, από την τραχύτητα της διεπιφάνειας και από τμήματα των αδρανών που προεξέχουν και έρχονται σε επαφή με την απέναντι παρειά της διεπιφάνειας.

Η πιο απλή σχέση που υιοθετείται από τον κανονισμό είναι:

$$V_n = A_{vf} f_y \mu \quad (4.3.1)$$

όπου:  $A_{vf}$  είναι το εμβαδόν του οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια  
 $f_y$  η τάση διαρροής του οπλισμού  
 $\mu$  ο συντελεστής τριβής

Στην περίπτωση ρωγμής στο σκυρόδεμα, λόγω της εξωτερικής τέμνουσας που δρα κατά μήκος της, οι δύο παρειές της ολισθαίνουν η μια σχετικά με την άλλη.

Εξαιτίας του γεγονότος ότι η ρωγή αυτή σχηματίζεται γύρω από τα αδρανή που έχουν μεγαλύτερη αντοχή από το μητρικό υλικό, η ολίσθηση συνοδεύεται και από διεύρυνση της ρωγμής, με αποτέλεσμα να προκαλείται αξονική ένταση στον οπλισμό. Έτσι κάθετα στο επίπεδο ολίσθησης θα δρα και η δύναμη  $A_{vf}f_y$ , θεωρώντας ότι ο οπλισμός διαρρέει.

Η προηγούμενη σχέση είναι αρκετά συντηρητική. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στην πρόβλεψη της δύναμης αντίστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση (4.3.2):

$$V_n = 0.8A_{vf}f_y + A_cK_1 \quad [\text{N}] \quad (4.3.2)$$

όπου:  $A_{vf}$  είναι το εμβαδόν του οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια [ $\text{mm}^2$ ]  
 $f_y$  η τάση διαρροής του οπλισμού [MPa]  
 $A_c$  το εμβαδόν του επιπέδου ολίσθησης [ $\text{mm}^2$ ]  
 $K_1=2.8$  MPa για κανονικό σκυροδέμα

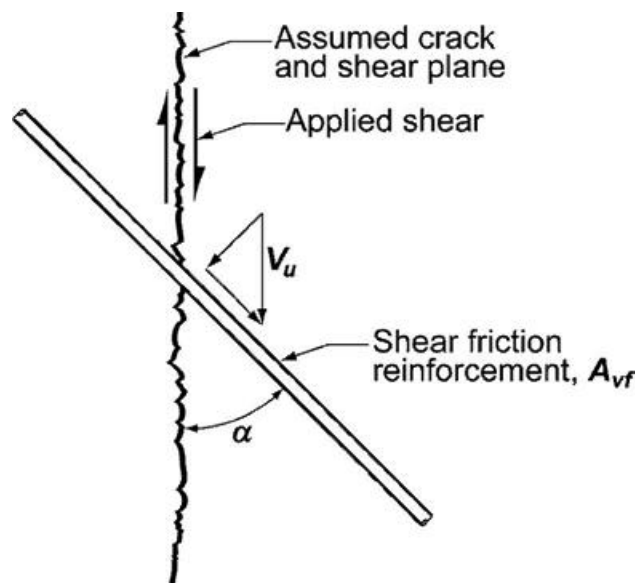
Στην περίπτωση που ο οπλισμός δεν διαπερνά κάθετα το επίπεδο ολίσθησης, αλλά υπό γωνία  $\alpha$ , ισχύει:

$$V_n = A_{vf}f_y(\mu \sin\alpha + \cos\alpha) \quad (4.3.3)$$

Και τελείως αντίστοιχα:

$$V_n = A_{vf}f_y(0.8 \sin\alpha + \cos\alpha) + A_cK_1 \sin^2\alpha \quad (4.3.4)$$

με  $0 \leq \alpha \leq 90$ , όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 4.3.1: Διεπιφάνεια παλαιού – νέου σκυροδέματος

Ο συντελεστής τριβής μπορεί να λάβει τις εξής τιμές:

Μονολιθικό σκυρόδεμα	$\mu=1.4\lambda$
Διεπιφάνεια εκτραχυμένη με τεχνητά μέσα	$\mu=1.0\lambda$
Διεπιφάνεια χωρίς εκτράχυνση	$\mu=0.6\lambda$

όπου  $\lambda=1.0$  για κανονικό σκυρόδεμα και  $\lambda=0.75$  για ελαφροσκυρόδεμα

Η δύναμη αντίστασης δεν πρέπει να ξεπερνά την ελάχιστη από τις ακόλουθες τιμές:

- $0.2f_c A_c$
- $(3.31 + 0.08f_c)A_c$
- $11A_c$

όπου  $f_c$  σε MPa και  $A_c$  σε  $\text{mm}^2$ .

Ο οπλισμός πρέπει να είναι καλά αγκυρωμένος εκατέρωθεν της ρωγμής προκείμενου να αναπτύξει την τάση διαρροής του  $f_y$ . Σχετικά με το μήκος αγκύρωσης βλήτρων αναφέρεται στο ASCE STANDARD – ASCE/SEI 41-06 SEISMIC REHABILITATION OF EXISTING BUILDINGS.

#### 4.4.ASCE STANDARD – ASCE/SEI 41-06 SEISMIC REHABILITATION OF EXISTING BUILDINGS

Στα αμερικάνικα πρότυπα, αναφορά στο μηχανισμό βλήτρου γίνεται στην παράγραφο 6.3.4 όπου τίθεται το θέμα της διάτμησης και της στρέψης. Αναφέρονται τα εξής:

Η **ελάχιστη επικάλυψη** των βλήτρων στη διεύθυνση που είναι κάθετη στη διεύθυνση της φόρτισης θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με 2 φορές το βάθος έμπηξης,  $l_e$ , του βλήτρου. Στην περίπτωση που δεν ικανοποιείται αυτή η προϋπόθεση η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο βλήτρο θα πρέπει να λαμβάνεται από την σχέση (4.4.1):

$$f_s = \frac{2500}{d_b} l_e \leq f_y \quad (4.4.1)$$

όπου:

- $f_s$ : η μέγιστη τάση που μπορεί να αναπτυχθεί στο βλήτρο για μήκος έμπηξης ίσο με  $l_e$
- $f_y$ : η τάση διαρροής του χάλυβα
- $d_b$ : η διάμετρος του βλήτρου

Το **μήκος έμπηξης** των βλήτρων, προκειμένου να αυτά να διαρρέουν, πρέπει να πληροί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Να είναι τουλάχιστον ίσο με δέκα φορές τη διάμετρο του βλήτρου,  $l_e \geq 10d_b$
- Αν δεν ικανοποιείται η παραπάνω πρόταση τότε η μέγιστη τέμνουσα που μπορεί να αναλάβει το βλήτρο θα πρέπει να υπολογίζεται μειωμένη αναλόγως

Όταν χρησιμοποιούνται σειρές βλήτρων τότε η **απόσταση μεταξύ διαδοχικών βλήτρων** δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από τέσσερις φορές το μήκος έμπηξης  $l_e$ .

Ο κανονισμός αυτός προβλέπει στην περίπτωση που δεν επαρκεί το μήκος έμπηξης των βλήτρων να γίνονται επιτόπου δοκιμές προκειμένου να υπολογιστεί η αντοχή των βλήτρων και η μείωση που παρουσιάζει σε σχέση με την περίπτωση που ικανοποιούνται όλες οι παραπάνω απαιτήσεις.

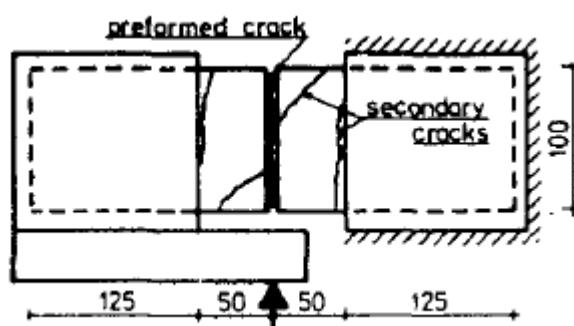
## 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται πειραματικές έρευνες που έχουν δημοσιευτεί σε επιστημονικά περιοδικά παγκόσμιας εμβέλειας για μηχανικούς, οι στόχοι που τα πειράματα αυτά εξυπηρετούν, οι παραδοχές που τυχόν έγιναν, οι εργαστηριακές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και τα τελικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από αυτά.

### 5.1.ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΛΛΗΛΕΜΠΛΟΚΗΣ ΑΔΡΑΝΩΝ

- Μονοτονική φόρτιση

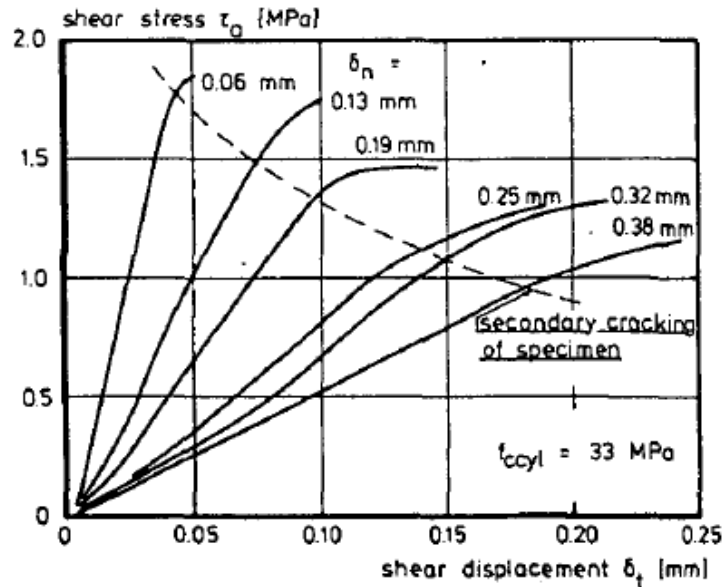
Ο **Fenwick** [6] ήταν ο πρώτος που έδειξε ενδιαφέρον στην μεταφορά δυνάμεων σε ρηγματωμένο σκυρόδεμα, και συγκεκριμένα εστίασε στην συνεισφορά του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών. Σκοπός των πειραμάτων που διενέργησε ήταν να εντοπίσει τη σχέση ανάμεσα στην αντίσταση που αναπτύσσεται κατά μήκος του επιπέδου ολίσθησης και της τιμής της ολίσθησης και του εύρους ρωγμής. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν το εύρος της ρωγμής, που κυμαινόταν μεταξύ 0.06 mm και 0.38 mm, και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος που κυμαινόταν μεταξύ 19 MPa και 56 MPa.



Σχήμα 5.1.1: Πειραματική διάταξη του Fenwick [6]

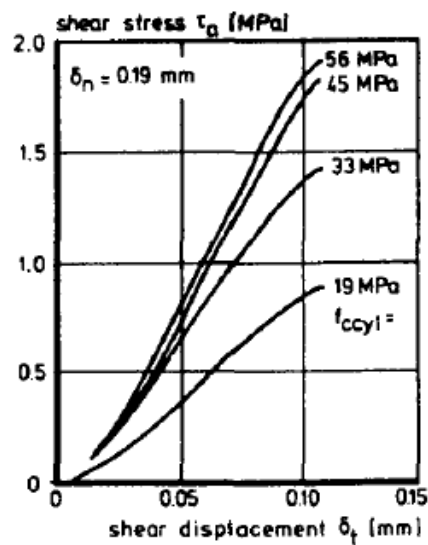
Στο σχήμα 5.1.1 φαίνεται η τυπική μορφή δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν από τον Fenwick. Στα δοκίμια είχε δημιουργηθεί ρωγμή πριν την έναρξη της δοκιμής κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, η οποία είχε εμβαδόν ίσο με  $79\text{cm}^2$ . Το αρχικό εύρος της ρωγμής αποτέλεσε την παράμετρο που εξετάστηκε στην πρώτη σειρά δοκιμίων, ενώ η αντοχή του σκυροδέματος ήταν 33MPa. Τα δοκίμια αστόχησαν εξαιτίας της ανάπτυξης δευτερευουσών ρωγμών σε σημείο εκτός του διατμητικού επιπέδου. Τα αποτελέσματα των δοκιμών συνοψίζονται στο επόμενο γράφημα.





Σχήμα 5.1.2: Διάγραμμα διατμητικής τάσης – ολίσθησης [6]

Στη δεύτερη σειρά δοκιμών, μεταβλητή ήταν η αντοχή του σκυροδέματος ενώ η τιμή του εύρους ρωγμής ήταν σταθερή και ίση με 0.19 mm. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών αποτυπώνονται στο επόμενο διάγραμμα.



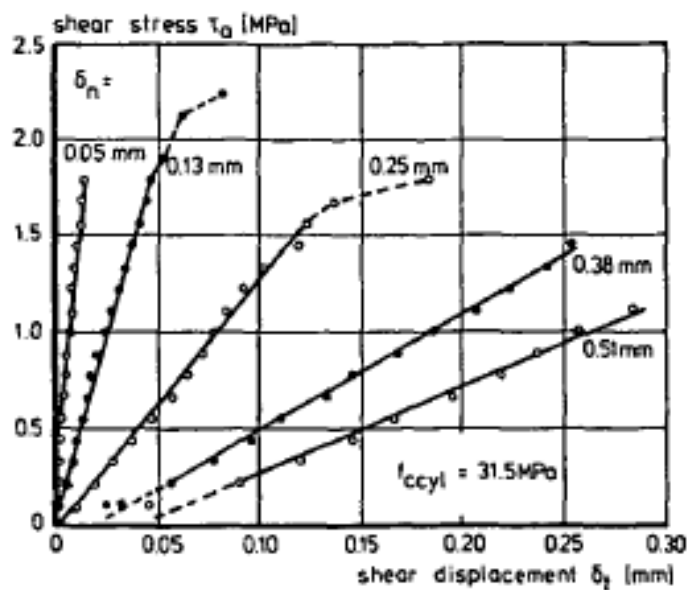
Σχήμα 5.1.3: Διάγραμμα διατμητικής τάσης - ολίσθησης για σταθερό εύρος ρωγμής [6]

Από τα αποτελέσματα εξάχθηκε η επόμενη εμπειρική σχέση:

$$\tau_a = \left( \frac{0.928}{\delta_n} - 0.658 \right) (\sqrt{f_c} - 1.447) (\delta_t - 0.044\delta_n) \quad [\text{MPa}] \quad (5.1.1)$$

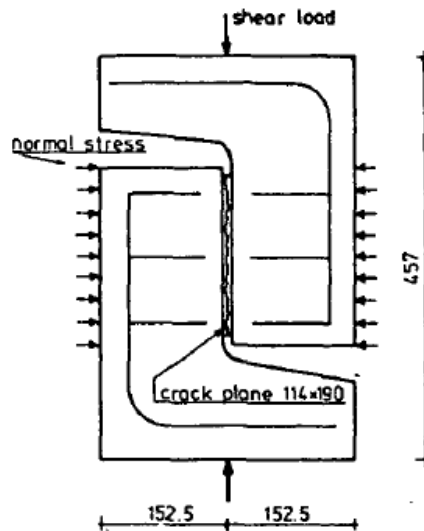
όπου  $\tau_a$ : η μέγιστη διατμητική τάση  
 $f_c$ : η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος [MPa]  
 $\delta_t$ : η τιμή της ολίσθησης [mm]  
 $\delta_n$ : η τιμή του εύρους της ρωγμής [mm]

Επιπλέον πειράματα πραγματοποιήθηκαν από τους **Houde** και **Mirza** [10]. Συνολικά εξετάστηκαν 32 δοκίμια με μορφή όμοια με αυτά του Fenwick. Χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες μεταβλητές όπως με τα πειράματα του Fenwick και προστέθηκε και η διάμετρος του μεγαλύτερου αδρανούς, που κυμαινόταν μεταξύ 9.5mm και 19mm. Στα δοκίμια προβλεπόταν επιπλέον οπλισμός εκτός του επιπέδου διάτμησης προκειμένου να αποφευχθούν αστοχίες σε άλλα σημεία. Στο επόμενο διάγραμμα φαίνονται κάποια από τα αποτελέσματα των δοκιμών που έγιναν. Παρατηρήθηκε ότι η διάμετρος του μεγαλύτερου αδρανούς δεν φαίνεται να επηρεάζει την διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας. Αντίθετα, η τιμή του μέγιστου φορτίου είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της αντοχής του σκυροδέματος, για τιμές που βρίσκονται μεταξύ 16.5 MPa και 51 MPa.



Σχήμα 5.1.4: Αποτελέσματα δοκιμών των Houde και Mirza [10]

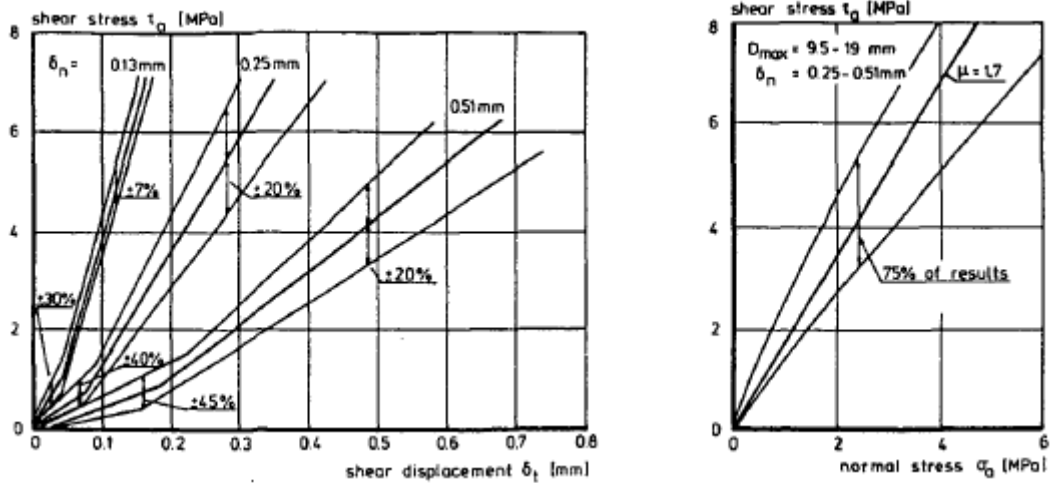
Τα αποτελέσματα των δοκιμών που αναφέρθηκαν προηγουμένως εμφάνισαν μεγάλη διασπορά και έτσι δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο που επηρεάζει την αντοχή της διεπιφάνειας ο μηχανισμός αλληλοεμπλοκής αδρανών. Έτσι, έγιναν πειράματα και από τους **Pauley** και **Loeber** [23]. Μεταβλητές των πειραμάτων αποτέλεσαν το είδος των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν, το εύρος της ρωγμής (0.13 mm, 0.25 mm, 0.51 mm), και ο τρόπος εφαρμογής του φορτίου. Η τιμή της αντοχής του σκυροδέματος ήταν για όλα τα δοκίμια ίση με 37 MPa.



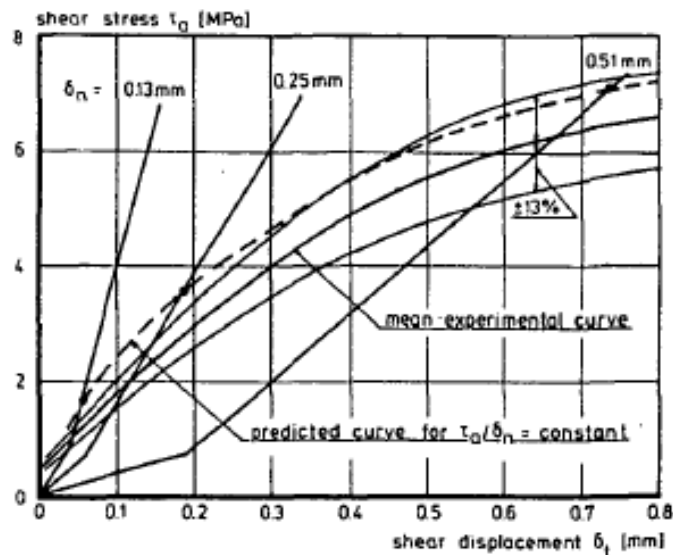
Σχήμα 5.1.5: Δοκίμια των Pauley και Loeber [23]

Παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχει καμία σχέση της τελικής αντοχής με το είδος και τη διάμετρο των αδρανών. Εξαιτίας της καλύτερης μορφής δοκιμίων σε σχέση με τα δοκίμια των Fenwick [6] και Houde [10], το μέγιστο φορτίο που προέκυψε ήταν μεγαλύτερο από τα πειράματα των προαναφερθέντων. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών με σταθερό εύρος ρωγμής μετρήθηκε ταυτόχρονα η αξονική δύναμη που απαιτήθηκε για να διατηρηθεί σταθερή η τιμή του εύρους. Τα αποτελέσματα έδειξαν τιμή για το συντελεστή τριβής ίση με  $\mu=1.7$ . Σημαντική είναι η παρατήρηση ότι ο συντελεστής τριβής δεν εξαρτάται από το εύρος της ρωγμής και τον τύπο των αδρανών.

Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων, προσοχή δόθηκε στην επιρροή της αύξησης του εύρους της ρωγμής στη μέγιστη διατμητική τάση που αναπτύσσεται. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών αυτών, ο λόγος του επιβαλλόμενου φορτίου προς το εύρος της ρωγμής διατηρήθηκε σταθερό και ίσο με 1.38 MPa προς 0.1 mm. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των δοκιμών που έγιναν για σταθερό εύρος ρωγμής κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Στο διάγραμμα, με διακεκομμένη γραμμή παριστάνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών με σταθερή τιμή εύρους ρωγμής. Η καμπύλη αυτή έχει την ίδια μορφή με αυτή των δοκιμών που προέκυψαν για μεταβλητό εύρος ρωγμής. Αυτό αποδεικνύει ότι ο τρόπος της φόρτισης, η ολίσθηση και η τιμή του εύρους της ρωγμής επηρεάζουν ελάχιστα την απόκρισή της σε επιβαλλόμενο διατμητικό φορτίο.

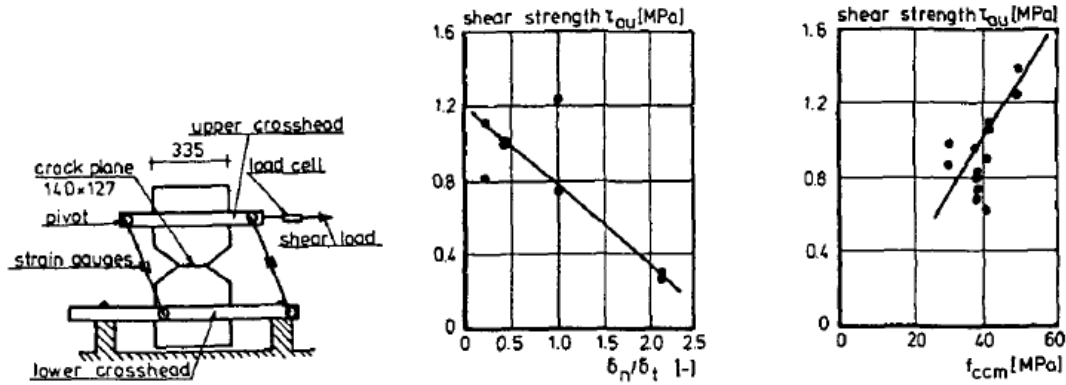


Σχήμα 5.1.6: (α) Σχέση διατμητικής τάσης - ολίσθησης (β) Διατμητική τάση συναρτήσει της ολίσθησης [23]



Σχήμα 5.1.7: Σύγκριση των αποτελεσμάτων των δοκιμών με σταθερό και μεταβλητό εύρος ρωγμής [23]

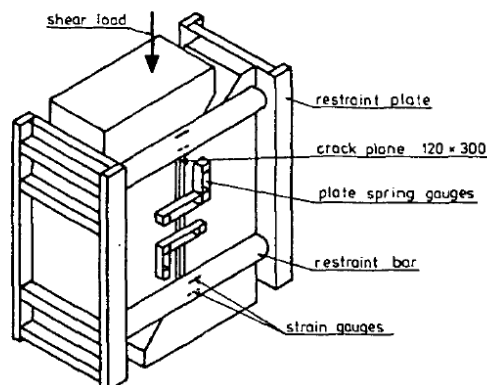
Ο Taylor [31] στα πειράματά του επεσήμανε ότι ταυτόχρονα με την αύξηση της ολίσθησης αυξάνεται και το εύρος της ρωγμής. Πραγματοποίησε δοκιμές με σταθερό λόγο εύρους ρωγμής προς διατμητική ολίσθηση. συνολικά δοκιμάστηκαν 32 δοκίμια, με μεταβλητές το είδος των αδρανών, το μέγεθός τους, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και ο λόγος εύρους ρωγμής προς διατμητική ολίσθηση.



Σχήμα 5.1.8: (α) Μορφή δοκιμίων, (β) διατμητική αντοχή συναρτήσει του λόγου ολίσθησης/εύρους, (γ) Σχέση διατμητικής αντοχής - σχετικής ολίσθησης [31]

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η σχέση διατμητικής αντοχής και θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος είναι γραμμική, παρόλο που είναι εμφανές ότι υπάρχει μεγάλη διασπορά των αποτελεσμάτων. Από τη σειρά δοκιμίων με αδρανή χαμηλής αντοχής, παρατηρήθηκε ότι η αντοχή των αδρανών σε σχέση με την αντοχή του υλικού της μήτρας, επηρεάζει τη διατμητική αντοχή. Αδρανή με μικρότερη αντοχή από το μητρικό υλικό επιτρέπουν τη διέλευση μιας ρωγμής από αυτά, εξομαλύνοντας έτσι το επίπεδο ολίσθησης. Στις δοκιμές αυτές τα εύρος της ρωγμής αυξήθηκε ταυτόχρονα με την ολίσθηση.

Στη συνέχεια, ο **Walraven** [37] πραγματοποίησε πειράματα σε ρηγματωμένα δοκίμια πριν την έναρξη των δοκιμών. Δεν υπάρχει οπλισμός που να διαπερνά τη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο τμημάτων του δοκιμίου. Εξωτερικά των δοκιμίων έχουν τοποθετηθεί ράβδοι που δεν επιτρέπουν να ανοίξει περαιτέρω η ρωγμή κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, και αγκυρώνονται σε μεταλλικές πλάκες στην οπίσθια όψη των επιμέρους τμημάτων, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα:

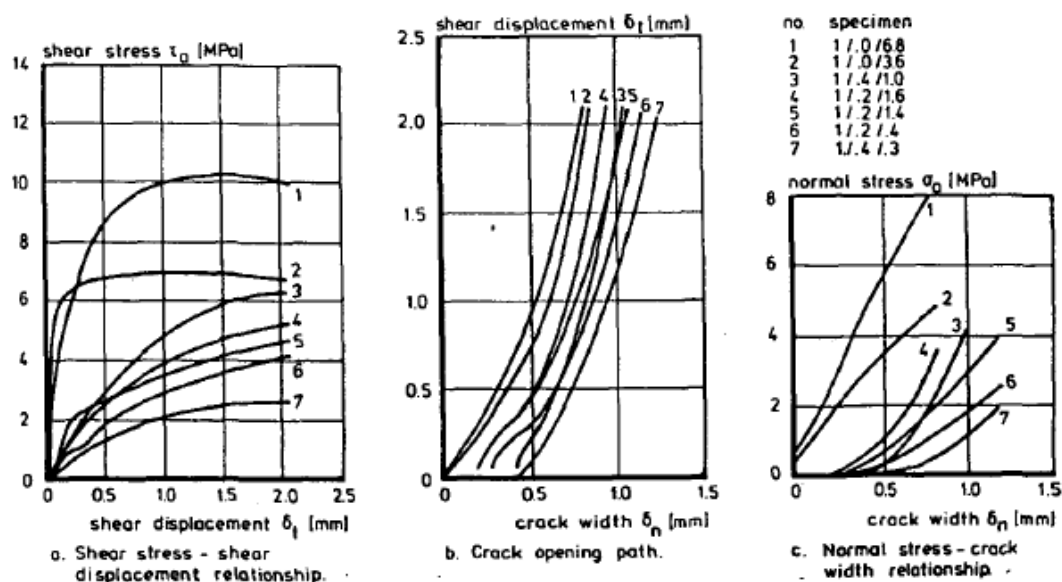


Σχήμα 5.1.9: Δοκίμια των πειραμάτων του Walraven [37]

Οι δοκιμές έγιναν επιβάλλοντας μετατοπίσεις, έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η καταγραφή της συμπεριφοράς των δοκιμίων μετά τη στιγμή εκείνη που

αναπτύσσεται το μέγιστο φορτίο. Μεταβλητές των πειραμάτων αποτελούν η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και η σύνθεσή του, η εξωτερική αξονική θλιπτική δύναμη που επιβάλλεται και αποτρέπει την διεύρυνση της ρωγμής και το αρχικό εύρος ρωγμής.

Η σύνθεση του μίγματος που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του σκυροδέματος των πειραμάτων περιείχε κατανομή αδρανών σύμφωνα με την κατανομή του Fuller. Η διάμετρος του μεγαλύτερου σε μέγεθος αδρανούς είναι 16 mm ή 32 mm. Η θλιπτική αντοχή κύβου σκυροδέματος κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 13.4 MPa και 37.6 MPa, ενώ το αρχικό εύρος της ρωγμής βρίσκεται μεταξύ 0.01 mm και 0.40 mm. Στα επόμενα διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών για αντοχή κύβου σκυροδέματος 37.6 MPa και διάμετρο του μεγαλύτερου αδρανούς ίση με 16 mm.



Σχήμα 5.1.10: Αποτελέσματα δοκιμών του Walraven [37]

Σχετικά με την ονοματολογία των δοκιμών, ο πρώτος αριθμός αφορά το μίγμα αδρανών που χρησιμοποιήθηκε, ο δεύτερος το αρχικό εύρος της ρωγμής και ο τρίτος την εξωτερική θλιπτική τάση που δρα όταν το εύρος της ρωγμής στη διεπιφάνεια είναι ίσο με 0.6 mm. Εξαιτίας της εξωτερικής θλιπτικής δύναμης υπήρχε η δυνατότητα αύξησης της αντοχής ακόμα και για μεγάλες μετατοπίσεις.

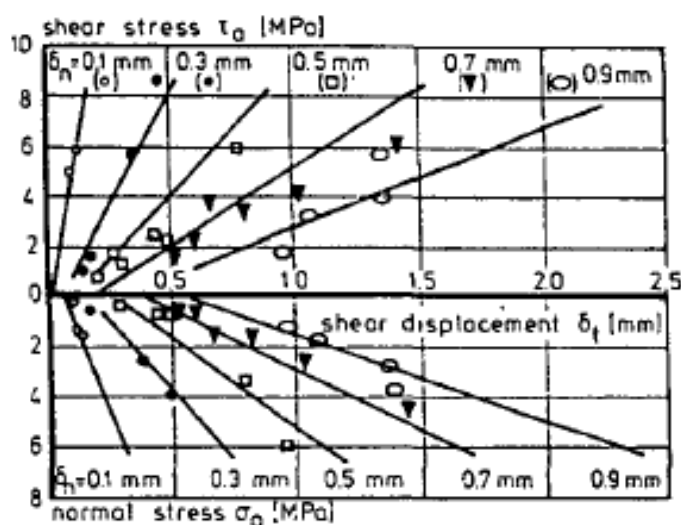
Παρατηρήθηκε ότι η μέγιστη διάμετρος των αδρανών είχε πολύ μικρή επιρροή στην ανάπτυξη της αντοχής έναντι διάτμησης. Έτσι προέκυψαν οι ακόλουθες διγραμμικές εμπειρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της μέγιστης διατμητικής και ορθής τάσης που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια, αγνοώντας τη διάμετρο του μεγαλύτερου αδρανούς του μίγματος.

Έτσι έχουμε:

$$\tau_{\alpha} = -\frac{f_c}{30} + \left( \frac{1.8}{\delta_n^{0.80}} + \left( \frac{0.234}{\delta_n^{0.707}} - 0.20 \right) f_c \right) \delta_t \quad (5.1.2)$$

$$\sigma_{\alpha} = -\frac{f_c}{20} + \left( \frac{1.35}{\delta_n^{0.63}} + \left( \frac{0.191}{\delta_n^{0.552}} - 0.15 \right) f_c \right) \delta_t \quad (5.1.3)$$

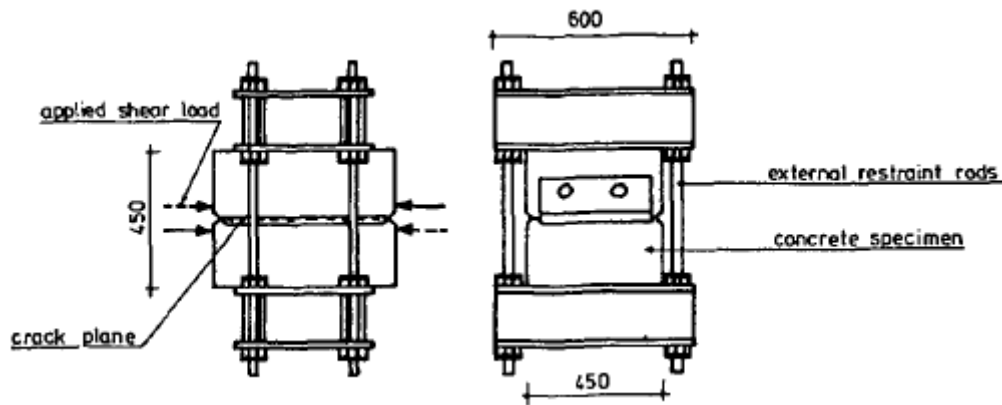
όπου:  $f_c$  η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος [MPa]  
 $\delta_t$  η σχετική ολίσθηση κατά μήκος της διεπιφάνειας [mm]  
 $\delta_n$  το εύρος της ρωγμής κατά μήκος της διεπιφάνειας [mm]



Σχήμα 5.1.11: Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις εξισώσεις [37]

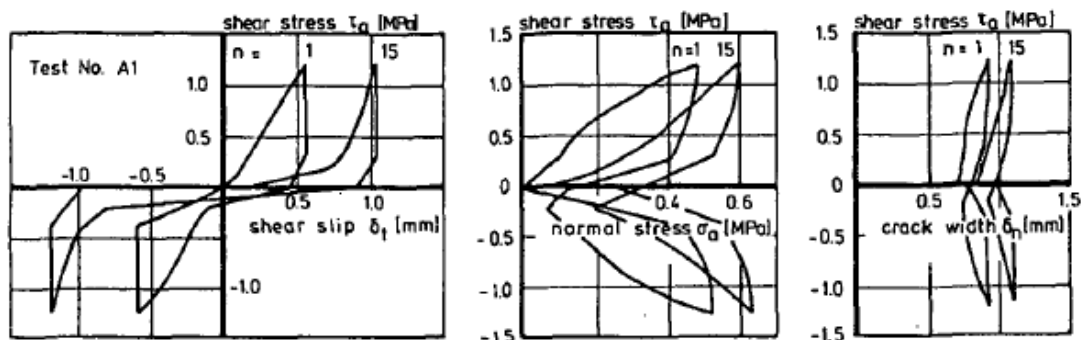
- Ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Οι **White** και **Gergely** [38] πραγματοποίησαν πειράματα για να εξετάσουν τη συνεισφορά του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Το εμβαδόν της διεπιφάνειας είναι ίσο με  $1940 \text{ cm}^2$ . Η αντοχή του σκυροδέματος για την πλειοψηφία των δοκιμίων ήταν ίση με  $20.7 \text{ MPa}$ , η μέγιστη διάμετρος των αδρανών  $38 \text{ mm}$ . Το αρχικό εύρος ρωγμής είχε τις τιμές  $0.25$ ,  $0.51$  και  $0.76 \text{ mm}$  προσαρμόζοντας κάθε φορά τη θλιπτική δύναμη που εισάγεται από ράβδους που έχουν τοποθετηθεί στην εξωτερική παρειά των δοκιμίων, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η επιβαλλόμενη τάση είχε τιμή  $1.24 \text{ MPa}$  και επιβλήθηκε και προς τις δύο κατευθύνσεις (θετική – αρνητική). Στις δοκιμές πραγματοποιήθηκαν συνολικά  $25$  πλήρεις κύκλοι φόρτισης. Για τους κύκλους  $1 - 15$  το φορτίο επιβλήθηκε κλιμακωτά, ενώ στους επόμενους κύκλους ασκήθηκε τάση ίση με τη μέγιστη που προβλεπόταν από τους ερευνητές χωρίς ενδιάμεσα βήματα.



Σχήμα 5.1.12: Πειραματική διάταξη δοκιμών των White και Gergely [38]

Στον πρώτο κύκλο, η σχέση μεταξύ διατμητικής τάσης και ολίσθησης παρουσιάζει γραμμικότητα, η οποία στη συνέχεια χάνεται και η σχέση γίνεται αρκετά μη γραμμική. Κατά το στάδιο της αποφόρτισης σε κάθε κύκλο η παραμένουσα ολίσθηση ισούται με περίπου 20% της μέγιστης που μετρήθηκε κατά το στάδιο της φόρτισης, και αποδίδεται στις μόνιμες παραμορφώσεις που είχαν υποστεί οι επιφάνειες επαφής των αδρανών των παρειών εκατέρωθεν της διεπιφάνειας. Επίσης, από τη μορφή των υστερητικών κύκλων φαίνεται ότι με αύξηση της ολίσθησης αυξάνεται η δυσκαμψία, κάτι που υποστηρίζει την υπόθεση των παραμορφωμένων επιφανειών επαφής. Εξαιτίας της θραύσης του μητρικού υλικού μεταξύ των αδρανών στους προηγούμενους κύκλους, η αρχική δυσκαμψία είναι αρκετά μικρή, διότι πρέπει να ολισθήσουν οι δύο παρειές του διατμητικού επιπέδου προκειμένου να αναπτυχθούν ξανά επιφάνειες επαφής ανάμεσα στις απέναντι παρειές.

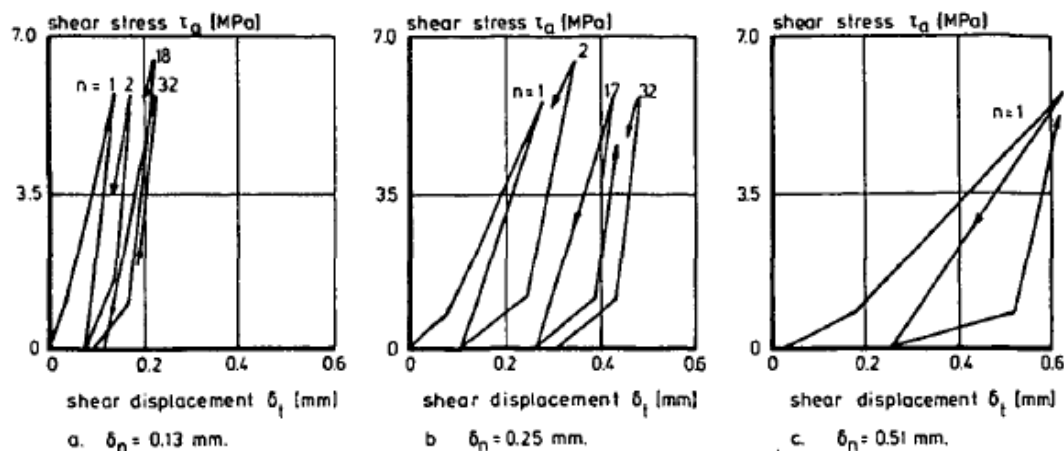


Σχήμα 5.1.13: (α) Σχέση διατμητικής τάσης - ολίσθησης (β) Σχέση διατμητικής - ορθής τάσης (γ) Σχέση διατμητικής τάσης - εύρους ρωγμής [38]

Οι **Pauley** και **Loeber** [23] εξέτασαν τη συμπεριφορά του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών τόσο υπό μονοτονική όσο και υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων για μέγιστο φορτίο 6 MPa. Το εύρος της ρωγμής παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Έκπληξη προκάλεσε το γεγονός ότι παρατηρήθηκε μικρότερη δυσκαμψία κατά την αποφόρτιση από ότι στην φόρτιση. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η παραμένουσα ολίσθηση είχε μεγάλη τιμή στους προηγούμενους

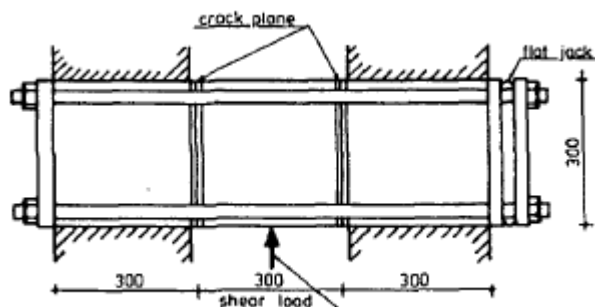


κύκλους. Επίσης, η μεγάλη τιμή της θλιπτικής δύναμης που απαιτείται για να διατηρηθεί σταθερό το εύρος της ρωγμής φαίνεται πως επηρέασε τον τρόπο αποφόρτισης των δοκιμίων.

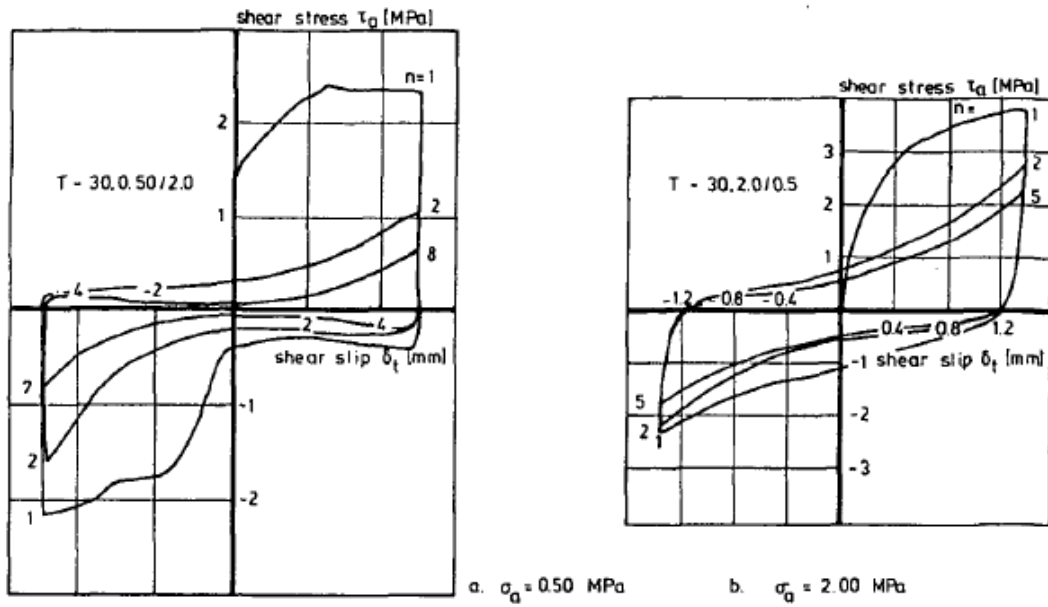


Σχήμα 5.1.14: Αποτελέσματα δοκιμών των Pauley και Loeber [23]

Πειράματα σχετικά με το μηχανισμό αλληλοεμπλοκήςαδρανών έγιναν και από τη **Βιντζηλαίου** [35]. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε πλήρως ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Οι δοκιμές έγιναν ελέγχοντας το επίπεδο της επιβαλλόμενης ολίσθησης. Εξαιτίας των μεγάλων τιμών της ολίσθησης, μικρός αριθμός κύκλων ήταν εφικτός. Στο επόμενο διάγραμμα αναπαρίστανται τα αποτελέσματα των δοκιμών για διάφορες τιμές της ορθής τάσης. Παρατηρήθηκε ότι για μεγάλη ορθή τάση δεν υπάρχει πτώση της απόκρισης της διεπιφάνειας έναντι τέμνουσας. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το ότι η παρουσία μεγάλης ορθής τάσης αποτρέπει την ανάπτυξη ρωγμής μεγαλύτερου εύρους, με αποτέλεσμα να μην ελαττώνονται οι επιφάνειες επαφής μεταξύ των παρειών εκατέρωθεν του επιπέδου ολίσθησης και με αυτό τον τρόπο να μην μειώνεται σημαντικά η συνεισφορά του μηχανισμού αλληλοεμπλοκήςαδρανών με την πρόοδο των ανακυκλίσεων.



Σχήμα 5.1.15: Μορφή δοκιμίων της Βιντζηλαίου [35]



**Σχήμα 5.1.16:** Διατμητική τάση - ολίσθηση για (α) ορθή τάση 0.50 MPa και (β) ορθή τάση 2.00 MPa [35]

## 5.2.ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΡΑΣΗΣ ΒΛΗΤΡΟΥ

- Μονοτονική φόρτιση

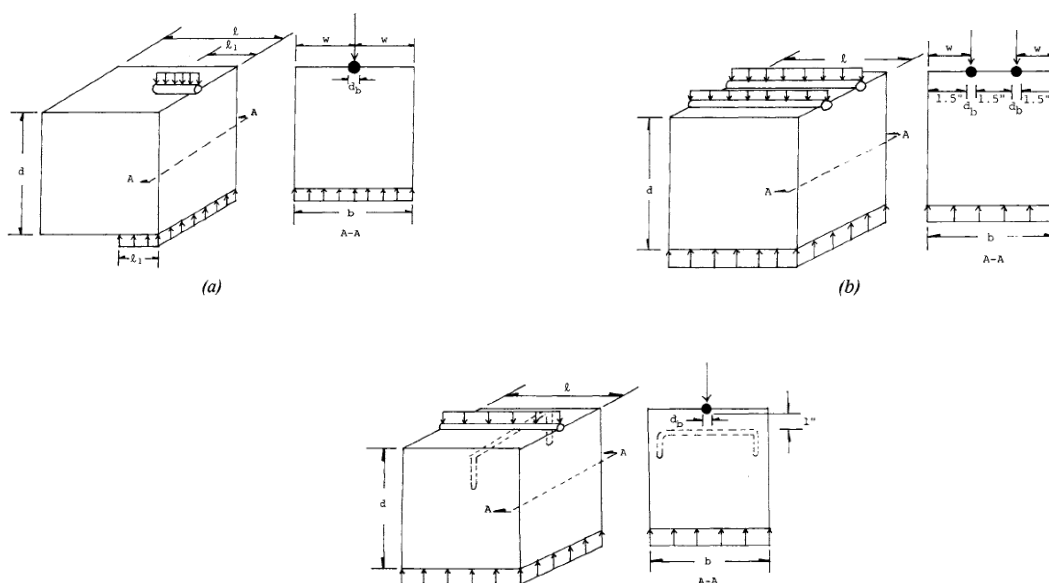
➤ **Φέρουσα ικανότητα και κατανεμημένη δυσκαμψία οπλισμένου σκυροδέματος με βλήτρα**

(Parviz Soroushian, Kienuwa Obaseki, and Maximo C. Rojas, ACI Materials Journal / May-June 1987, p. 179-184)

Σκοπός αυτής της έρευνας [28] ήταν η εξαγωγή πληροφοριών για την ασφαλή πρόβλεψη της συμπεριφοράς των βλήτρων στην αντίσταση σε διατμητικές παραμορφώσεις κατά μήκος των ρωγμών. Επιπλέον, εξήχθησαν εμπειρικές σχέσεις, μέσω μιας σειράς πειραμάτων, για τον υπολογισμό της δυσκαμψίας του σκυροδέματος, όπως αυτή ορίζεται στο μοντέλο ημι-άπειρης δοκού επί ελαστικών στηρίξεων.

Η μορφή των δοκιμίων επιλέχθηκε έτσι ώστε να προσομοιώνει τη δράση βλήτρου του διαμήκους οπλισμού δοκών ενάντια στον πυρήνα της διατομής της δοκού Ο/Σ στη διεπιφάνεια δοκού-υποστυλώματος μετά τη διάνοιξη καμπτοδιατμητικών ρωγμών. Τριάντα τρία δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμές με τις εξής μεταβλητές:

- Θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος
- Διάμετρος του οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια
- Διαστάσεις του κορμού των δοκιμίων
- Βάθος έμπηξης των βλήτρων
- Ποσοστό του οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια
- Περίσφιγξη του δοκιμίου με χρήση οπλισμού κάθετο στο διαμήκη άξονα των βλήτρων



Σχήμα 5.2.1: (α) Γενική γεωμετρία δοκιμίων (β) δοκίμια με παραπάνω από ένα βλήτρο (γ) δοκίμια με εγκάρσιο οπλισμό περισφίγξης [28]

Πίνακας 5.2.1: Χαρακτηριστικά δοκιμών και αποτελέσματα δοκιμών [28]

Series	$b$ , in.	$d$ , in.	$\ell$ , in.	$\ell_1$ , in.	$W$ , in.	$d_s$ , in.	$f'_c$ , ksi	$f_s$ , ksi	$K_p$ , ksi/in.	Comments
I	6	9	6	6	3.0	1.00	5.84	10.67	365	
	6	9	6	6	3.0	1.00	6.00	11.00	457	
II Bar diameter	6	9	6	6	3.0	0.50	5.60	16.00	571	
	6	9	6	6	3.0	0.50	5.60	15.00	578	
	6	9	6	6	3.0	0.75	5.60	12.11	368	
	6	9	6	6	3.0	0.75	5.60	14.44	407	
	6	9	6	6	3.0	1.25	5.76	10.59	265	
	6	9	6	6	3.0	1.25	5.76	10.43	258	
III Concrete strength	6	9	6	6	3.0	1.00	3.63	7.83	239	
	6	9	6	6	3.0	1.00	3.63	7.67	290	
	6	9	6	6	3.0	1.00	5.47	11.25	308	
	6	9	6	6	3.0	1.00	5.47	9.25	281	
	6	9	6	6	3.0	1.00	5.47	11.08	308	
IV Block width	3	9	6	6	1.5	1.00	6.76	9.67	306	
	3	9	6	6	1.5	1.00	6.68	8.00	265	
	9	9	6	6	4.5	1.00	6.76	10.58	281	
	9	9	6	6	4.5	1.00	5.30	13.30	364	
V Block depth	6	6	6	6	3	1.00	6.76	8.70	271	
	6	6	6	6	3	1.00	6.76	10.04	416	
	6	12	6	6	3	1.00	5.76	9.50	340	
	6	12	6	6	3	1.00	5.76	8.75	276	
VI Bar length	6	9	6	2	3	1.00	5.84	16.25	578	
	6	9	6	2	3	1.00	5.84	21.25	*	
	6	9	6	4	3	1.00	6.68	14.50	378	
	6	9	6	4	3	1.00	6.68	13.25	471	
VII Number of bars	6	9	6	6	2	1.00	5.75	8.75	216	2 dowel bars
	6	9	6	6	2	1.00	5.75	8.79	216	2 dowel bars
	8	9	6	6	2	1.00	5.75	10.61	188	3 dowel bars
	8	9	6	6	2	1.00	5.75	8.19	229	3 dowel bars
VIII Confinement	6	9	6	6	3	1.00	6.72	12.67	326	1 confining bar
	6	9	6	6	3	1.00	6.72	12.85	322	1 confining bar
	6	9	6	6	3	1.00	6.72	12.21	306	2 confining bars
	6	9	6	6	3	1.00	6.72	19.15	480	2 confining bars

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ:

- Όλα τα δοκίμια συμπεριφέρθηκαν ελαστικά μέχρι την αστοχία.
- Τα δοκίμια χωρίς την παρουσία εγκάρσιου οπλισμού για περισφιγξη αστόχησαν χωρίς προειδοποίηση με διάρρηξη του σκυροδέματος (ψαθυρή αστοχία). Τα δοκίμια χωρίστηκαν σε δύο σχεδόν συμμετρικά τμήματα, όπως φαίνεται στην διπλανή φωτογραφία.



- Για μικρό μήκος έμπηξης των βλήτρων εκτός από την παραπάνω ρωγμή άνοιξαν ρωγμές και σε επίπεδο κάθετο με το επίπεδο της κατακόρυφης ρωγμής

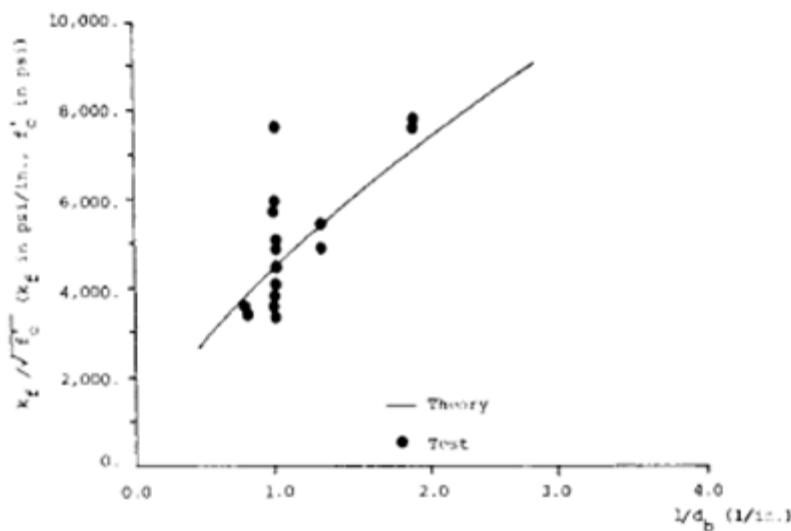


- Η αστοχία των δοκιμίων με περισσότερα του ενός βλήτρου ήταν όμοια με αυτή των δοκιμίων με ένα βλήτρο με διάρρηξη του σκυροδέματος.



- Η παρουσία σκελών συνδετήρα κάθετα στην κατακόρυφη ρωγή δεν επιτρέπει την αύξηση του πλάτους της με αποτέλεσμα να μην επέρχεται απότομη μείωση της φέρουσας ικανότητας των βλήτρων. Αυτό πρακτικά οδηγεί σε αύξηση της πλαστιμότητας.

Η τάση που εκφράζει τη φέρουσα ικανότητα προκύπτει από τη διαίρεση του φορτίου αστοχίας με την προβαλλόμενη επιφάνεια του βλήτρου στο οριζόντιο επίπεδο  $f_b = \frac{\text{φορτίο αστοχίας}}{l_1 d_b}$  όπου  $l_1$  είναι το μήκος του βλήτρου και  $d_b$  η διάμετρός του. Η ισοδύναμη δυσκαμψία της συνάφειας με το σκυρόδεμα ορίζεται ως η κλίση του διαγράμματος φορτίου συναρτήσεως της μετακίνησης του βλήτρου στη διεύθυνση του φορτίου.



Σχήμα 5.2.2: Δυσκαμψία περιβάλλοντος σκυροδέματος [28]

Με βάση τα παραπάνω προέκυψαν οι ακόλουθες εμπειρικές σχέσεις για τη φέρουσα ικανότητα και τη δυσκαμψία του σκυροδέματος:

$$f_b = 8 \sqrt{f'_c} \frac{l_1}{d_b} \left( \frac{w}{d_b} \right)^{1/3} \quad (5.2.1)$$

$$K_f = 127 c_1 \sqrt{f'_c} \left( \frac{l_1}{d_b} \right)^{2/3} \quad (5.2.2)$$

όπου  $c_1$  είναι σταθερά με τιμές μεταξύ 0.6 για καθαρή απόσταση μεταξύ διαδοχικών βλήτρων ίση με 2.54cm και 1.0 για μεγαλύτερες αποστάσεις.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:

- Η φέρουσα ικανότητα και η δυσκαμψία αυξάνονται με μείωση της διαμέτρου του οπλισμού και αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος
- Όταν χρησιμοποιήθηκαν περισσότερα από ένα βλήτρα με καθαρή απόσταση μεταξύ τους 1 in. (2.54cm) η τιμή της αντοχής ήταν αρκετά κοντά στην τιμή της αντοχής των δοκιμίων με ένα βλήτρο, ενώ η δυσκαμψία παρουσίασε μείωση στα δοκίμια με περισσότερα του ενός βλήτρου.
- Η επιρροή του ύψους των δοκιμίων (διάσταση παράλληλη στη διεύθυνση του φορτίου) δεν ήταν σημαντική στην ικανότητα και στη δυσκαμψία.
- Η χρήση επιπρόσθετου εγκάρσιου οπλισμού συνέβαλε στην αύξηση της πλαστιμότητας.

- **Απόκριση σε διάτμηση, παραμορφώσεις και δυσκαμψία βλήτρου εμπηγμένου σε σκυρόδεμα**  
(S. Dei Poli, M. Di Prisco, and P. G. Gambarova, ACI Structural Journal / November-December 1992, p. 665-675)

Σκοπός της μελέτης αυτής [5] είναι η διερεύνηση του κατάλληλου τρόπου μοντελοποίησης και της συμπεριφοράς βλήτρου εμπηγμένου σε σκυρόδεμα από τις ακόλουθες σκοπιές:

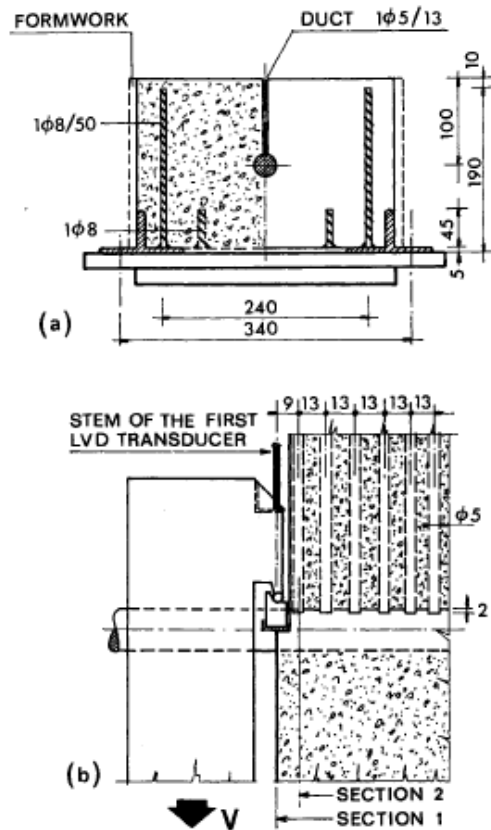
A) υπολογισμός της ελατηριακής σταθεράς (πρακτικά της δυσκαμψίας του βλήτρου) που προσομοιώνει τη συνάφεια μεταξύ των δύο υλικών, του χάλυβα και του σκυροδέματος

B) έλεγχος της αξιοπιστίας των εξισώσεων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία για τον υπολογισμό του μέγιστου φορτίου αντοχής

Γ) το πραγματικό εύρος των μετατοπίσεων του βλήτρου (καθώς δεν υπάρχουν απευθείας μετρήσεις της μετατόπισης στη διεπιφάνεια χάλυβα-σκυροδέματος)

Δ) ανάπτυξη πλαστικής άρθρωσης σε μια περιοχή του βλήτρου και ταυτόχρονη θραύση του σκυροδέματος κάτω από αυτό καθώς και ανάπτυξη μόνιμων παραμορφώσεων κατά μήκος του βλήτρου.

Το πειραματικό πρόγραμμα περιλαμβάνει δοκιμές σε μια σειρά από 27 δοκίμια καθένα από τα οποία αποτελείται από ένα βλήτρο χωρίς την παρουσία άλλου είδους οπλισμού (διαμήκη ή εγκάρσιου). Ο μοχλοβραχίονας του επιβαλλόμενου διατμητικού φορτίου είναι μηδενικός.



Σχήμα 5.2.3: Πειραματική διάταξη [5]

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η μορφή που είχαν τα υπό εξέταση δοκίμια. Αποτελούνταν από ένα βλήτρο πάνω από το οποίο είχαν τοποθετηθεί μέσα στο σκυρόδεμα 11 πλαστικοί σωλήνες διαμέτρου 5mm ανά 13mm έτσι ώστε ηλεκτρομηκυνσιόμετρα να έρχονται σε επαφή με το βλήτρο για να μετρήσουν τη μετατόπισή του ως προς το περιβάλλον σκυρόδεμα απευθείας.

Κατασκευάστηκαν τρεις σειρές δοκιμών:

- Σειρά A: 15 δοκίμια από σκυρόδεμα αντοχής  $f_c=24.9$  MPa και με 11 πλαστικούς σωλήνες τοποθετημένους μέσα στο σκυρόδεμα
- Σειρά B: 9 δοκίμια από σκυρόδεμα αντοχής 32.3 MPa. Τα δοκίμια B1-B3 είχαν μόνο ένα σωλήνα στη διατομή 1 (βλ. παραπάνω σχήμα) ενώ τα B4-B9 όπως τα δοκίμια της σειράς A.
- Σειρά E: 3 δοκίμια από σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (72 MPa) όπως τα δοκίμια της σειράς A. (δεν θα γίνει λόγος για τα δοκίμια αυτής της σειράς)

Οι δοκιμές έγιναν ελέγχοντας τις μετατοπίσεις της διατομής 1 (Σειρά B) ή της διατομής 2 (Σειρά A). Οι μετατοπίσεις στη διατομή 2 (Σειρά A) επιβλήθηκαν με ρυθμό 12μm/min για φορτίο  $\frac{V}{V_u} \leq \frac{2}{3}$ , 7μm/min για  $\frac{V}{V_u} > \frac{2}{3}$  και πάλι 12μm/min μετά τη διαρροή. Το φορτίο αστοχίας υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

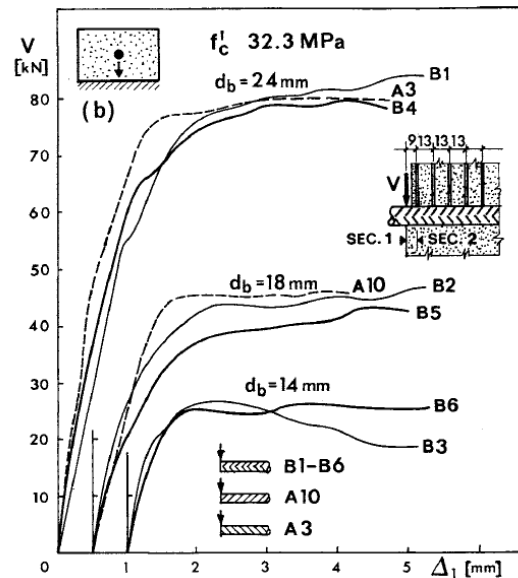
$$V_u = 1.267 d_b^2 \sqrt{f_{sy} f_c} \quad (\text{Dulacska H.}) \quad (5.2.3)$$



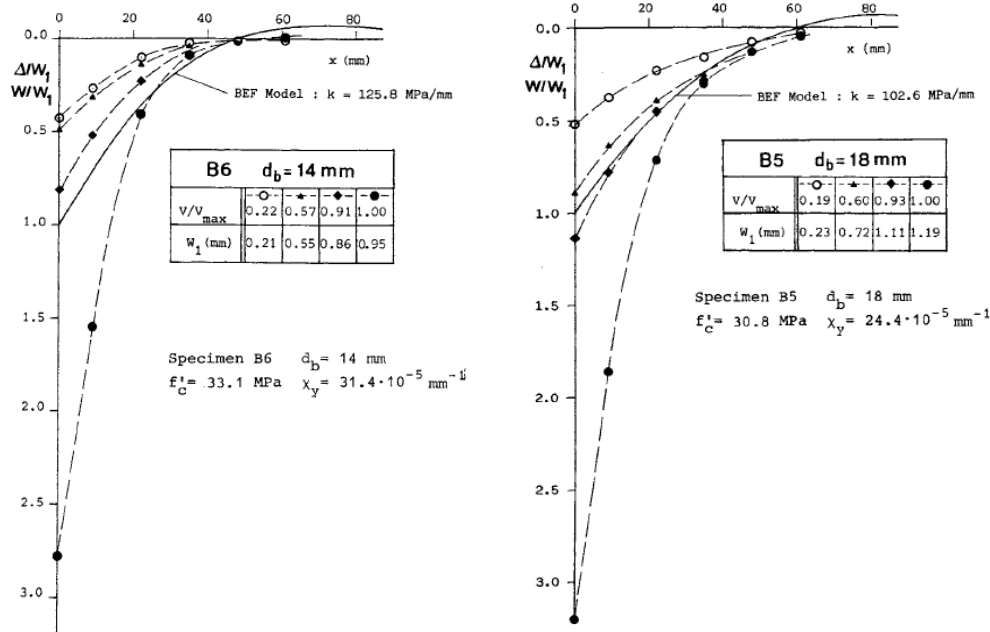
## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ:

Τα δοκίμια των σειρών Α και Β επέδειξαν ελαστοπλαστική συμπεριφορά μέχρι την αστοχία τους. Οι πλαστικοί σωλήνες που περιείχαν τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα αποδείχθηκε ότι δεν επηρέασαν καθόλου τα χαρακτηριστικά αντοχής και στιβαρότητας των δοκιμίων, όπως προκύπτει από το πόσο κοντά βρίσκονται οι καμπύλες απόκρισης των δοκιμίων με 11 σωλήνες σε σχέση με αυτά που έχουν έναν.

Κανένα δοκίμιο (εκτός από το Α1 με  $d_b=24\text{mm}$ ) δεν αστόχησε εξαιτίας διάρρηξης του σκυροδέματος. Όπου αναπτύχθηκαν ρωγμές, αυτές είχαν πολύ μικρό πλάτος και δεν επεκτάθηκαν περισσότερο ακόμα και σε μεγάλες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις. Η συμπεριφορά του βλήτρου είναι αρκετά πλάσιμη μιας και το βλήτρο διέρρευσε με ταυτόχρονη αστοχία μιας μικρής περιοχής του σκυροδέματος κάτω απ' αυτό. Κανένα δοκίμιο δεν αστόχησε ξαφνικά λόγω θραύσης (ψαθυρή αστοχία). Έτσι, λόγω των παραπάνω, οι δοκιμές σταμάτησαν όταν η μετακίνηση της φορτιζόμενης διατομής ήταν της τάξης του 1/5 με 1/3 της διαμέτρου του βλήτρου.



Σχήμα 5.2.4: Πειραματικά αποτελέσματα [5]



Σχήμα 5.2.5: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με το προσομοίωμα BEF για τα δοκίμια B5 και B6 [5]

Στα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζεται η μετακίνηση σε αδιάστατη μορφή. Οι τιμές που έχουν μετρηθεί από τις δοκιμές έχουν διαιρεθεί με την τιμή της μέγιστης μετακίνησης σύμφωνα με το BEF analogy. Έτσι έχουμε:

$$W_l = \frac{V}{2\alpha^3 E_s I_b} \quad (5.2.4)$$

όπου:

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{k_c d_b}{4E_s I_b}} \quad \text{και} \quad k_c = 127 \frac{\sqrt{f_c}}{(d_b)^{2/3}}$$

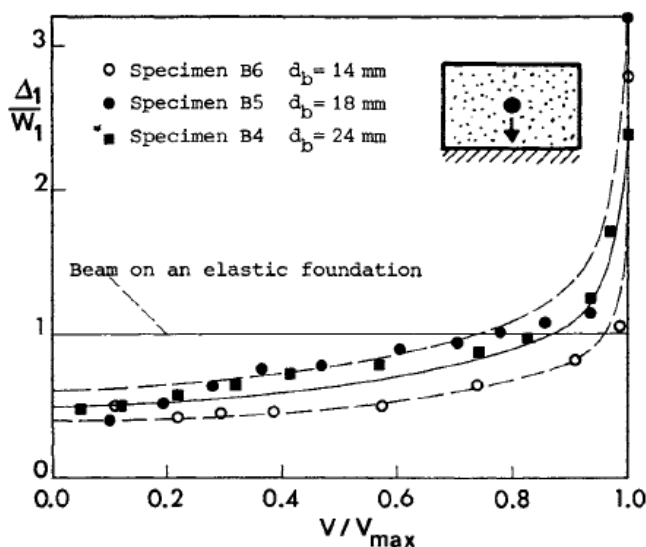
$E_s$  το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

$I_b$  η πολική ροπή αδράνειας της διατομής του βλήτρου

$f_c$  η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

Η παραπάνω σχέση υπολογισμού για την  $k_c$  είναι αυτή που προτάθηκε στα πειράματα των Parviz Soroushian, Kienyuwa Obaseki και Maximo C. Rojas.

Όμως η σχέση αυτή δεν μπορεί να περιγράψει τη δυσκαμψία με ακρίβεια γιατί δεν γίνεται να έχει σταθερή τιμή ανεξάρτητα του μεγέθους της φόρτισης. Για χαμηλότερα φορτία η πραγματική συμπεριφορά είναι πολύ πιο δύσκαμπτη ενώ όσο πλησιάζει την αστοχία γίνεται πιο εύκαμπτη. Αυτό φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 5.2.6: Μεταβολή δυσκαμψίας περιβάλλοντος σκυροδέματος [5]

Παρατηρήθηκε ότι για φορτίο μέχρι το 40% του μέγιστου φορτίου το διάγραμμα είναι γραμμικό και επομένως η δυσκαμψία μπορεί να πάρει μια σταθερή τιμή. Όμως, για μεγαλύτερες τιμές του φορτίου το βλήτρο συμπεριφέρεται πλαστικά και η συμπεριφορά αυτή αυξάνεται με ταχύ ρυθμό. Έτσι προέκυψε ότι η επόμενη σχέση για τον υπολογισμό της δυσκαμψίας:

$$k = \omega k_c \quad (5.2.5)$$

όπου

$$\omega = 2.12 \quad \text{για} \quad \frac{V}{V_u} \leq 0.40$$

$$\omega = \left\{ 0.544 + 0.026 \cosh \left[ 8 \left( \frac{V}{V_u} \right) - 0.4 \right] \right\}^{-4/3} \quad \text{για} \quad \frac{V}{V_u} > 0.40$$

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:

- Η συμπεριφορά ενός βλήτρου είναι κυρίως ελαστική για τιμές του φορτίου μικρότερες από το 40% του μέγιστου.
- Για φορτίο μεγαλύτερο του 50% του οριακού το μεγαλύτερο μέρος της διατομής του βλήτρου πλαστικοποιείται σε περιοχή περίπου δύο φορές τη διάμετρο του βλήτρου κατά μήκος και σε απόσταση περίπου 1 διάμετρο από το επίπεδο που δρα το διατμητικό φορτίο. Όσον αφορά το σκυρόδεμα, αυτό θραύεται σε μια περιοχή κάτω από το βλήτρο σε απόσταση 0.4-0.6 διαμέτρους από το διατμητικό επίπεδο και για φορτίο ίσο με 75% του μέγιστου.
- Το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης είναι ελαστοπλαστικό για σκυρόδεμα κανονικής αντοχής.
- Οι προτεινόμενες εξισώσεις για τον υπολογισμό της αντοχής ενός βλήτρου ισχύουν για κανονικά σκυροδέματα ενώ χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για το αν ισχύουν για σκυρόδεμα υψηλής αντοχής.
- Το προσομοίωμα της ελαστικής δοκού επί ελαστικής στήριξης μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά το φυσικό πρόβλημα αρκεί να ληφθούν υπόψη στη θεώρηση της δυσκαμψίας σχέσεις που να περιλαμβάνουν το επίπεδο φόρτισης  $\frac{V}{V_u}$  ή την ανηγμένη μετατόπιση  $\frac{W_L}{d_b}$ .

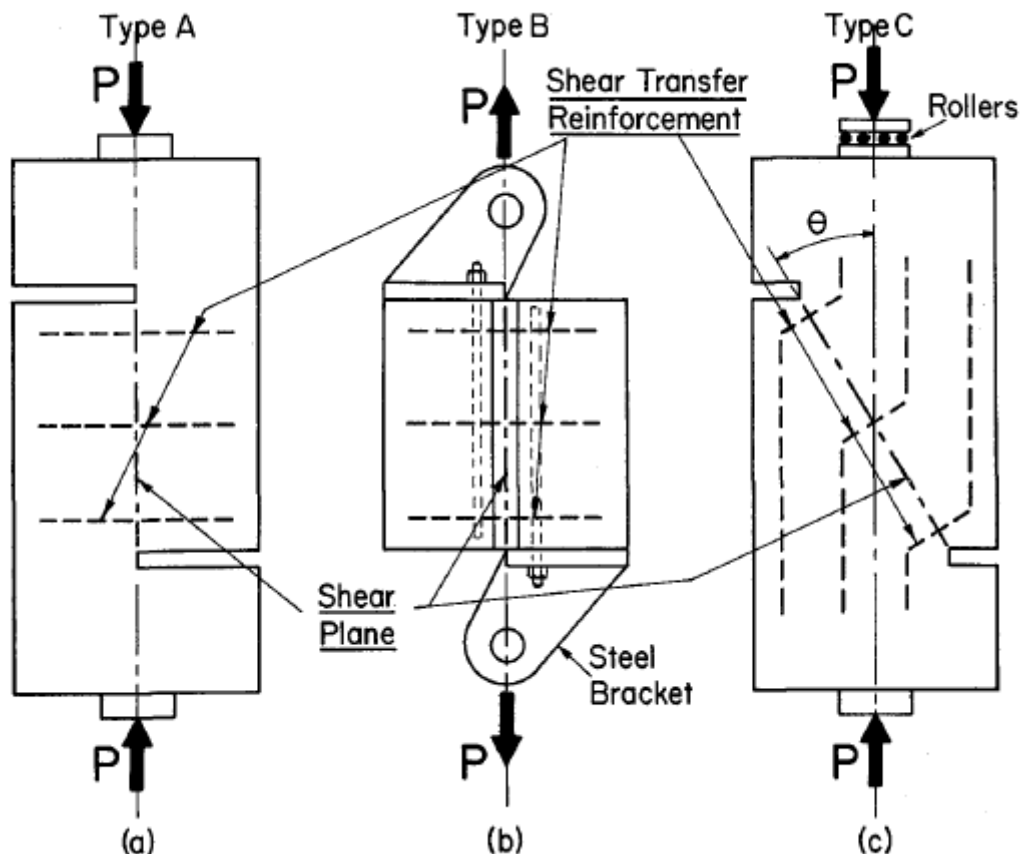
➤ **Μεταφορά τέμνουσας στο οπλισμένο σκυρόδεμα**  
(Alan H. Mattock, Neil. M. Hawkins, PCI Journal / March-April 1972, p.55-75)

Στόχος των πειραμάτων [20] είναι να καταδείξει τον τρόπο με τον οποίο η αντοχή του σκυροδέματος, τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας και ο υπάρχον οπλισμός επηρεάζουν τη μεταφορά τέμνουσας στο οπλισμένο σκυρόδεμα.

Έτσι οι χρησιμοποιούμενες μεταβλητές είναι:

- Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος
- Τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας
- Τα χαρακτηριστικά του οπλισμού
- Η ένταση που προκαλείται παράλληλα αλλά και κάθετα με το επίπεδο ολίσθησης

Για τις πρώτες τρεις μεταβλητές πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με δοκίμια τύπου A, ενώ για να διερευνηθεί η επίδραση πεδίου τάσεων παράλληλα και κάθετα με τη διεπιφάνεια χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια τύπου B και C. Οι τύποι δοκιμίων που μόλις αναφέρθηκαν φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.2.11: Γεωμετρία δοκιμίων [20]

Οι διαστάσεις της διεπιφάνειας είναι 25x13cm, 30x12cm και 30x15cm για τους τύπους δοκιμίων A, B, C αντίστοιχα. Το φορτίο  $P$  για τους τύπους A και B δρα με

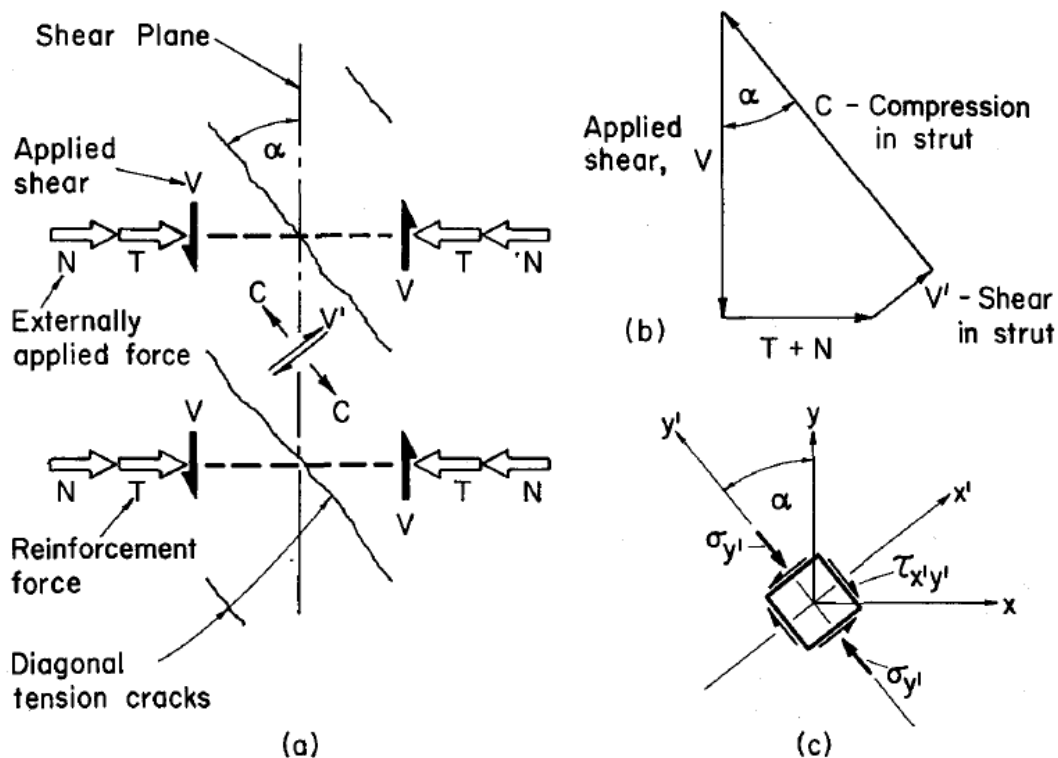
μηδενική εκκεντρότητα παράλληλα στη διεπιφάνεια. Για τον τύπο C το φορτίο  $P$  δημιουργεί φορτίο  $P\cos\theta$  παράλληλο στη διεπιφάνεια, όπου  $\theta$  η γωνία της διεπιφάνειας με τον ορίζοντα, και ένα θλιπτικό φορτίο  $P\sin\theta$  κάθετο στη διεπιφάνεια.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ:

### Χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας:

Στην πορεία των πειραμάτων διαπιστώθηκε πως ήταν προτιμότερο να δοκιμαστούν δοκίμια με αρχική ρωγμή στο επίπεδο της διεπιφάνειας πριν την επιβολή φορτίου. Τέτοιες ρωγμές υπάρχουν και οφείλονται σε αιτίες που δεν έχουν σχέση με την τέμνουσα δύναμη αλλά με την εμφάνιση εφελκυστικών τάσεων λόγω συστολής ξήρανσης και μεταβολών της θερμοκρασίας.

Για τα αρχικώς ρηγματωμένα δοκίμια ολίσθηση κατά μήκος της διεπιφάνειας μετρήθηκε από την αρχή των δοκιμών σε αντίθεση με τα αρχικώς μη ρηγματωμένα δοκίμια όπου σχετική ολίσθηση μεταξύ των δύο σωμάτων του δοκιμίου μετρήθηκε αφού πρώτα εμφανίστηκαν ρωγμές μήκους 5cm και γωνίας  $40^\circ$ - $50^\circ$ . Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι μετά την ανάπτυξη των ρωγμών αυτών αυξήθηκε το πλάτος της αρχικής ρωγμής κατά μήκος της διεπιφάνειας. Αυτό οφείλεται στην περιστροφή των διαγώνιων θλιπτήρων που σχηματίστηκαν μεταξύ των ρωγμών που περιγράφηκαν παραπάνω.

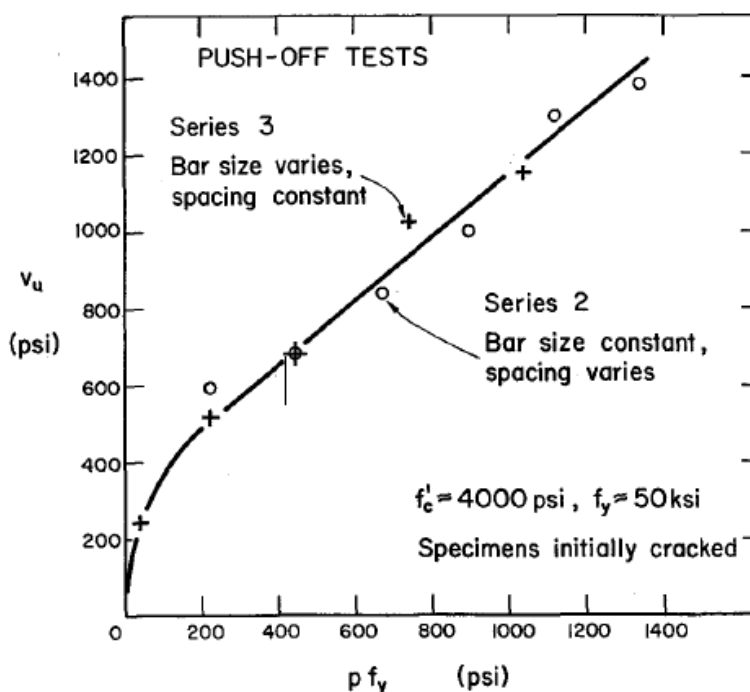


Σχήμα 5.2.12: Εντατική κατάσταση διεπιφάνειας [20]

### Χαρακτηριστικά οπλισμού

Η παράμετρος  $\rho f_y$  μπορεί να αλλάξει είτε αλλάζοντας το ποσοστό του οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια  $\rho$ , είτε μεταβάλλοντας την τάση διαρροής  $f_y$  είτε αλλάζοντας ταυτόχρονα όλα τα παραπάνω. Επίσης, για δεδομένα χαρακτηριστικά μιας διεπιφάνειας το ποσοστό οπλισμού μπορεί να μεταβληθεί αλλάζοντας την απόσταση μεταξύ των οπλισμών που διαπερνούν τη διεπιφάνεια ή αλλάζοντας τη διάμετρο του οπλισμού. Στο παρακάτω διάγραμμα συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών των σειρών 2 και 3. Στη σειρά 2 το ποσοστό  $\rho$  μεταβάλλεται αλλάζοντας την απόσταση μεταξύ των οπλισμών και διατηρώντας σταθερή τη διάμετρο (10mm), ενώ στη σειρά 3 γίνεται το αντίθετο (η διάμετρος κυμαίνεται από 3.2mm μέχρι 15.9mm).

Σκοπός της παραπάνω σύγκρισης είναι να προσδιοριστεί πώς επηρεάζει ο εκάστοτε τρόπος αλλαγής του ποσοστού  $\rho$  τη σχέση της μέγιστου διατμητικού φορτίου στη διεπιφάνεια σε συνάρτηση με την παράμετρο  $\rho f_y$ . Από το ακόλουθο διάγραμμα προκύπτει ότι ο τρόπος μεταβολής του  $\rho$  δεν επηρεάζει σημαντικά τη σχέση της  $V_u$  με την παράμετρο  $\rho f_y$ .



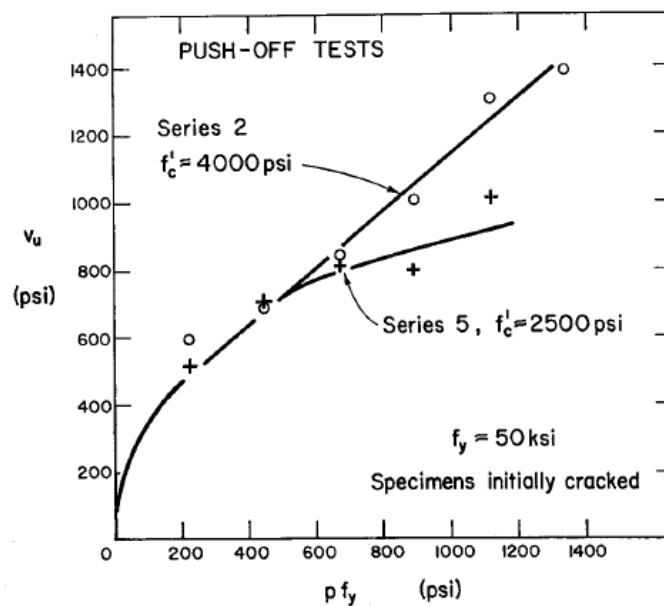
Σχήμα 5.2.13: Σχέση διατμητικής τάσης αστοχίας και τάσης οπλισμού  $\rho f_{sy}$  για δεδομένη θλιπτική αντοχή σκυροδέματος ( $f'_c=28$  MPa) και διαφορετικές τιμές διαμέτρου και απόστασης οπλισμού [20]

Η άλλη παράμετρος που δοκιμάστηκε ήταν η τάση διαρροής του οπλισμού. Χρησιμοποιήθηκε χάλυβας με τάση διαρροής 343MPa και 455MPa. Σκοπός ήταν, επίσης, να εξακριβωθεί αν ο οπλισμός μπορούσε να αναπτύξει τάση μεγαλύτερη από αυτή της διαρροής (κράτνηση). Το αποτέλεσμα ήταν ότι για σταθερό ποσοστό οπλισμού της διεπιφάνειας τα δοκίμια με χάλυβα τάσης διαρροής 455MPa είχαν λίγο μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με τα δοκίμια με χάλυβα χαμηλότερης τάσης διαρροής.

Αυτό υπονοεί ότι ο χάλυβας με τη μεγαλύτερη τάση διαρροής (455MPa) στην οριακή κατάσταση αστοχίας ανέπτυξε τάση μεγαλύτερη από αυτή στη διαρροή (κράτυνση).

### Χαρακτηριστικά σκυροδέματος

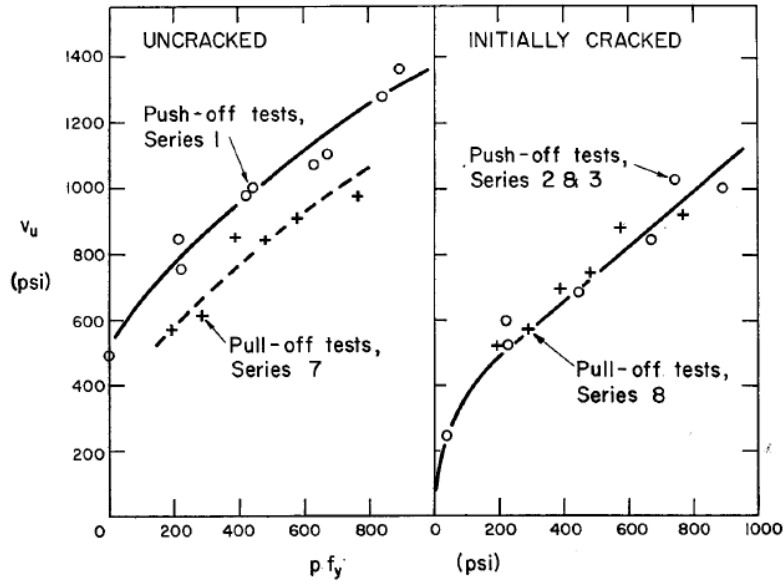
Οι σειρές 2 και 5 διαφέρουν μόνο στην αντοχή του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε (27.55MPa και 17.26MPa αντίστοιχα). Για μεγάλες τιμές του μεγέθους  $\rho f_y$  ( $>4.16\text{MPa}$ ) το φορτίο αντοχής είναι μεγαλύτερο για τα δοκίμια της σειράς 2 ( $f_c=27.55\text{MPa}$ ). Αυτό σημαίνει ότι η αντοχή του σκυροδέματος θέτει ένα άνω όριο στην τιμή της παραμέτρου  $\rho f_y$ . Κάτω από το όριο αυτό η σχέση της  $v_u$  συναρτήσει της  $\rho f_y$  θα είναι ίδια για σκυροδέμα ίσης ή μεγαλύτερης αντοχής. Πάνω από το όριο αυτό, το μέγιστο φορτίο αυξάνεται με συνεχώς μειωμένο ρυθμό για το συγκεκριμένο σκυροδέμα.



Σχήμα 5.2.14: Σχέση διατμητικής τάσης και τάσης οπλισμού  $\rho f_{sy}$  για διάφορες τιμές θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος και δεδομένη τάση διαρροής του οπλισμού ( $f_{sy}=345\text{ MPa}$ ) [20]

### Ένταση παράλληλη στο επίπεδο της διεπιφάνειας

Τα πειράματα έδειξαν ότι για αρχικώς μη ρηγματωμένα δοκίμια η επιβολή διατμητικού φορτίου είναι επιβλαβής για τα pull-off (εφελκυσμός) συγκριτικά με τα push-off (θλίψη). Η μείωση αυτή της αντοχής για τα δοκίμια pull-off οφείλεται περισσότερο στη μείωση της συνεισφοράς της συνεκτικότητας του σκυροδέματος. Για αρχικά ρηγματωμένα δοκίμια η μέγιστη αντοχή είναι η ίδια είτε το φορτίο είναι εφελκυστικό είτε είναι θλιπτικό για οποιοδήποτε ποσοστό οπλισμού. Αυτό πρακτικά δείχνει ότι αν ο σχεδιασμός γίνεται με βάση το οριακό φορτίο αστοχίας ανηγμένο στο εμβαδό της διεπιφάνειας και το ποσοστό του οπλισμού της τότε οι παράλληλες τάσεις στη διεπιφάνεια μπορούν να αγνοηθούν.



Σχήμα 5.2.15: Σύγκριση αντοχής μονολιθικών και ρηγματωμένων δοκιμίων [20]

#### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:

- Η ύπαρξη αρχικής ρωγμής κατά μήκος της διεπιφάνειας μειώνει την αντοχή σε τέμνουσα και αυξάνει τις τιμές της ολίσθησης για οποιαδήποτε τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου.
- Η μεταβολή στην αντοχή, τη διάμετρο και την μεταξύ απόσταση των οπλισμών επηρεάζει την τιμή του οριακού φορτίου αστοχίας προκαλώντας αλλαγή στην τιμή της παραμέτρου  $\rho f_y$  για χάλυβα με μέτρια τάση διαρροής.
- Για αρχικά ρηγματωμένο σκυρόδεμα η τιμή της θλιπτικής αντοχής του θέτει ένα άνω όριο στο μέγεθος  $\rho f_y$ . Για τιμές μικρότερες του ορίου αυτού η σχέση της μέγιστης τέμνουσας και του ποσοστού οπλισμού δεν εμπεριέχει εξάρτηση της αντοχής του σκυροδέματος. Για τιμές μεγαλύτερες από το παραπάνω όριο ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η αντοχή σε διάτμηση είναι μειωμένος όσο μικρότερη είναι η αντοχή του σκυροδέματος και ίσος με αυτόν για ένα αρχικά μη ρηγματωμένο δοκίμιο με τα ίδια χαρακτηριστικά οπλισμού.
- Εφελκυστικές τάσεις παράλληλες με τη διεπιφάνεια μειώνουν την ικανότητα μεταφοράς τέμνουσας για μη ρηγματωμένο στοιχείο σκυροδέματος, ενώ δεν έχουν καμία επίδραση σε αρχικά ρηγματωμένα στοιχεία.
- Η μεταφορά τέμνουσας σε αρχικά ρηγματωμένο σκυρόδεμα, για μέτρια ποσοστά οπλισμού, πραγματοποιείται αρχικά από την τριβή των δύο μετώπων εκατέρωθεν της ρωγμής και στη συνέχεια από τη δράση βλήτρου του οπλισμού που διαπερνά τη ρωγμή. Για υψηλά ποσοστά οπλισμού ή για εξωτερικά επιβαλλόμενα θλιπτικά φορτία κάθετα στη διεπιφάνεια το εύρος



της ρωγμής μειώνεται αρκετά και η μεταφορά τέμνουσας γίνεται με όμοιο τρόπο με μη ρηγματωμένο σκυρόδεμα.

- Ανακυκλιζόμενη φόρτιση

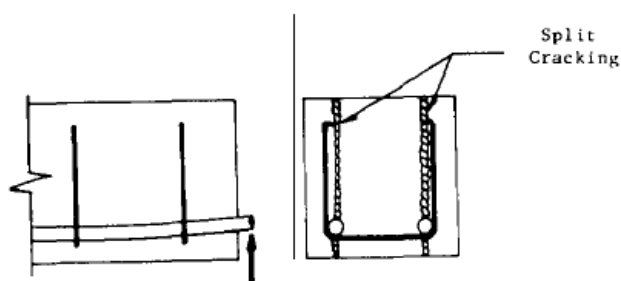
➤ **Ανελαστική συμπεριφορά βλήτρου υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση**

(Parviz Soroushian, Kienuwa Obaseki, Mohamad Imad Baiyasi, Basheer EI-Sweidan, and Ki-Bong Choi, ACI Structural Journal / January-February 1988, p. 23-29)

Σκοπός αυτής της πειραματικής μελέτης [28] είναι να διερευνηθεί η συνεισφορά της δράσης βλήτρου του διαμήκους οπλισμού στην αντίσταση στη διατμητική ολίσθηση στη συμβολή δοκού-υποστυλώματος υπό μία ανελαστική θεώρηση.

Διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

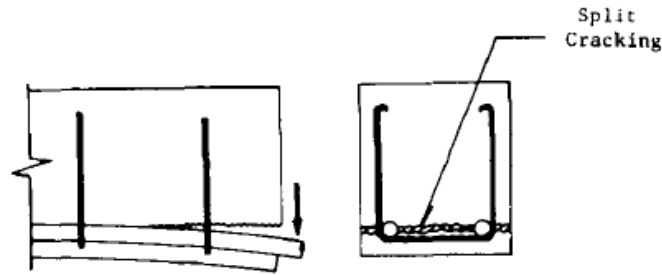
- Δράση βλήτρου προς τον πυρήνα της διατομής της δοκού (χρησιμοποιείται το μοντέλο της δοκού εδραζόμενης επί ελαστικής στηρίξεως) όπου το κρίσιμο φορτίο είναι αυτό για το οποίο αναπτύσσονται ρωγμές κατακόρυφα και παράλληλα με τον διαμήκη άξονα του οπλισμού



(a)

**Σχήμα 5.2.16:** Δράση βλήτρου προς τον πυρήνα της διατομής του δοκού [28]

- Δράση βλήτρου προς την επικάλυψη του οπλισμού όπου το φορτίο αστοχίας είναι αυτό για το οποίο αναπτύσσεται ρωγμή παράλληλα στη διάσταση του πλάτους της διατομής. Αρχικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ανάλογο της ημι-άπειρης δοκού επί ελαστικής στήριξης αλλά κατόπιν της ανάπτυξης της ρωγμής ο διαμήκης οπλισμός μπορεί να προσομοιωθεί ως δοκός που εδράζεται στον πλησιέστερο στη ρωγμή συνδετήρα.



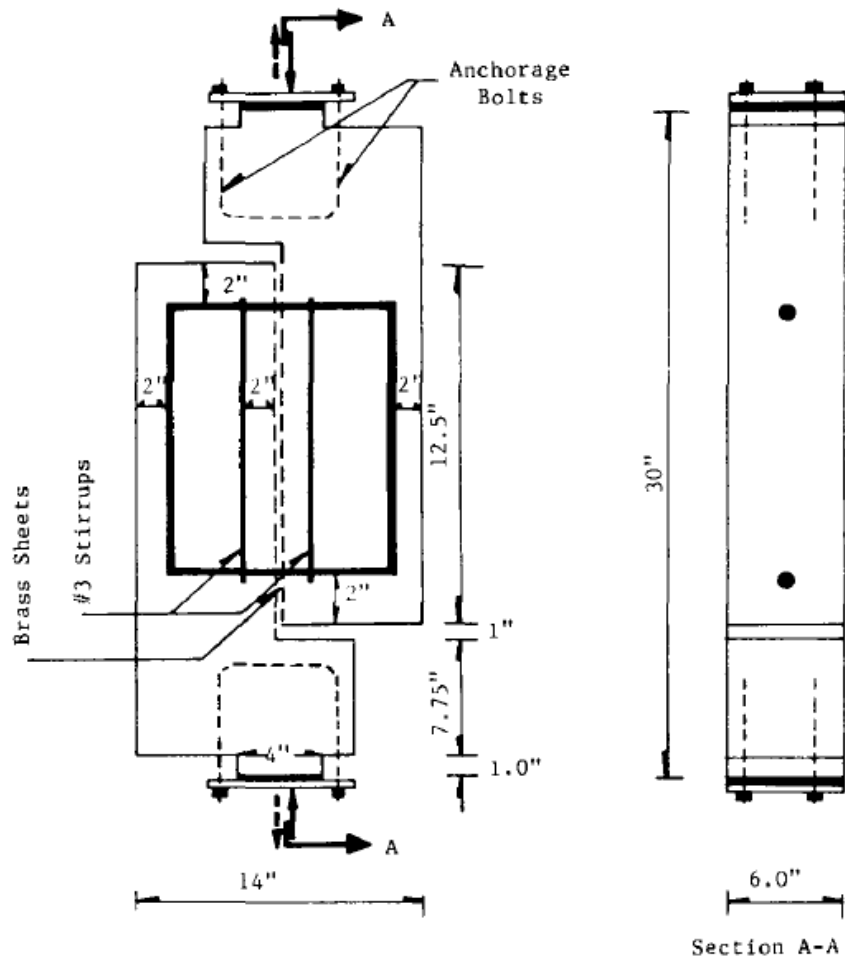
(b)

**Σχήμα 5.2.17:** Δράση βλήτρου προς την επικάλυψη του οπλισμού [28]

Η εμφάνιση των παραπάνω δράσεων εξαρτάται από τη θέση του οπλισμού μέσα στη διατομή αλλά και από τη φορά της δύναμης σεισμικής διέγερσης. Γι' αυτό και εξετάζεται και η περίπτωση ανακυκλιζόμενης φόρτισης όπου οι παραπάνω μηχανισμοί εναλλάσσονται κάθε φορά.

Τα δοκίμια αποτελούνται από δύο τεμάχια οπλισμένου σκυροδέματος σχήματος L ανάμεσα στα οποία έχουν τοποθετηθεί 2 φύλλα από μπρούντζο για να μην υπάρξει επιρροή λόγω της αλληλοεμπλοκής των αδρανών στη διεπιφάνεια. Στη διάταξη αυτή δεν λαμβάνεται υπόψη η αξονική δύναμη που καταπονεί τις δοκούς στην πραγματικότητα. Επιπλέον η θέση του εγκάρσιου οπλισμού κάθε δοκιμίου δεν αποτελεί μεταβλητή της μελέτης, δηλαδή για όλα τα δοκίμια ο πλησιέστερος στη διεπιφάνεια συνδετήρας απέχει την ίδια απόσταση από αυτή.

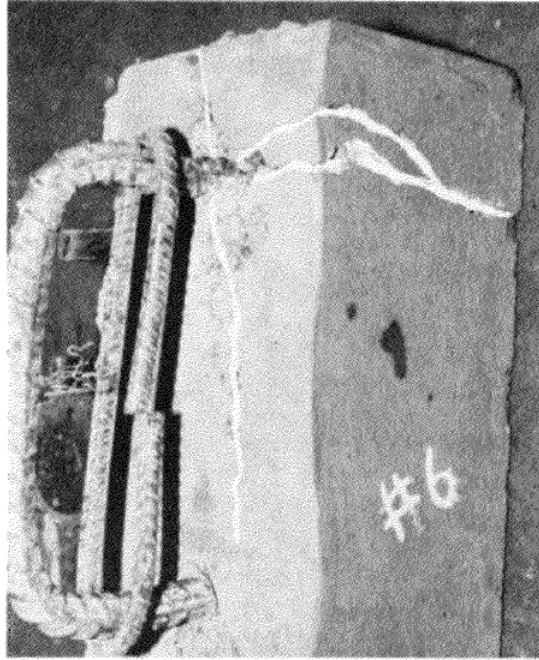
Στο σχήμα 5.2.18 φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε από τους ερευνητές.



Σχήμα 5.2.18: Γεωμετρία δοκιμίων [28]

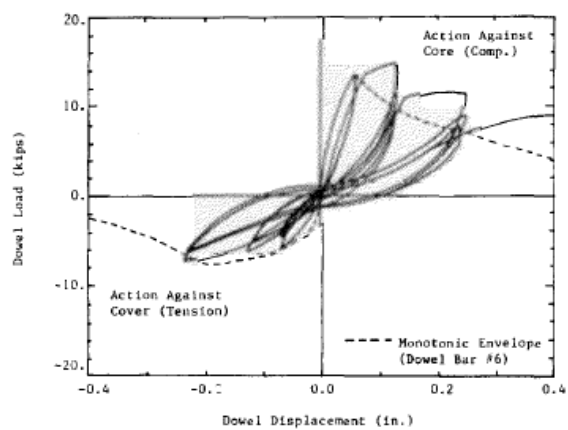
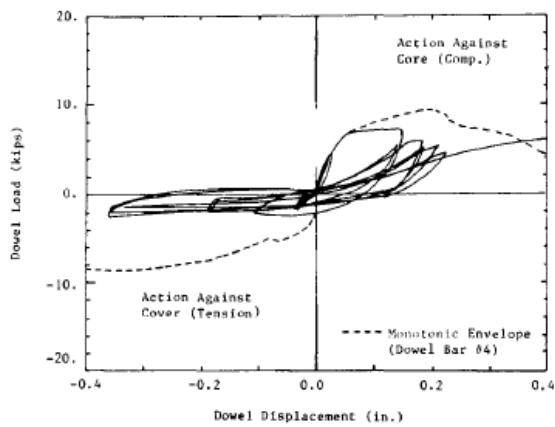
## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

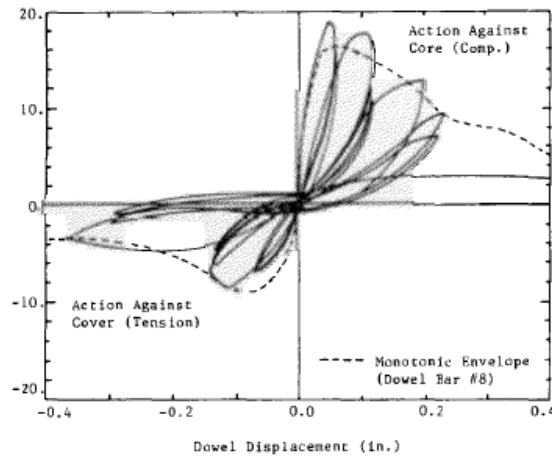
Για μικρά φορτία αναπτύχθηκε ρωγή παράλληλα με το πλάτος της διατομής (όμοια με τη δράση βλήτρου του διαμήκους οπλισμού ενάντια στην επικάλυψη). Για μεγαλύτερη τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου αναπτύχθηκε κατακόρυφη ρωγή κατά μήκος του βλήτρου. Με την αύξηση του φορτίου και με την πρόοδο των ανακυκλίσεων το πλάτος των ρωγμών αυξήθηκε μέχρι που το τμήμα σκυροδέματος που κάλυπτε τον οπλισμό που διαπερνούσε τη διεπιφάνεια αποκολλήθηκε από το δοκίμιο.



Σχήμα 5.2.19: Μορφολογία ρηγάτωσης [28]

Στο σχήμα 5.2.20 φαίνεται το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης για ανακυκλιζόμενες συνθήκες φόρτισης (υστερητικοί κύκλοι) με μεταβλητή τη διάμετρο των βλήτρων που διαπερνούν τη διεπιφάνεια των δύο τεμαχίων (#4 (12.7mm), #6 (19.05mm) και #8 (25.4mm) αντίστοιχα).





**Σχήμα 5.2.20:** Κύκλοι υστέρησης για διατομή βλήτρων #4 (12.7mm), #6 (19.05mm) και #8 (25.4mm) αντίστοιχα [28]

Παρατηρούμε ότι τα δοκίμια παρουσιάζουν όμοιους κύκλους υστέρησης με στοιχεία που είναι ευαίσθητα σε διάτμηση.

#### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:

- Η δράση βλήτρου ενάντια στην επικάλυψη του οπλισμού οδηγεί στην αποκόλληση της επικάλυψης ενώ η δράση βλήτρου ενάντια στον πυρήνα οδηγεί στη δημιουργία κατακόρυφων ρωγμών παράλληλα με το διαμήκη άξονα του βλήτρου.
- Με την πάροδο των ανακυκλίσεων μειώνεται η δυσκαμψία των βλήτρων και η ικανότητα διανομής της εισαγόμενης ενέργειας λόγω της σχετικής ολίσθησης των τεμαχίων στη μεταξύ τους διεπιφάνεια. Επομένως, παρατηρείται πτώση της απόκρισης των δοκιμών με την πρόοδο των ανακυκλίσεων.
- Για διάμετρο βλήτρου #4 (12.7mm) οι κύκλοι υστέρησης περιβάλλονται από το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης για μονοτονική φόρτιση. Για μεγαλύτερες διαμέτρους (#6 και #8) παρατηρήθηκε ότι το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης για μονοτονική φόρτιση συμπίπτει με τους κύκλους υστέρησης για τη μια διεύθυνση φόρτισης ενώ για την αντίθετη διεύθυνση φόρτισης το φορτίο αντίστασης της διεπιφάνειας προέκυψε μεγαλύτερο από αυτό για μονοτονική φόρτιση.
- Το εύρος των αναπτυσσόμενων ρωγμών αυξανόταν με την πρόοδο της ανακυκλιζόμενης φόρτισης.

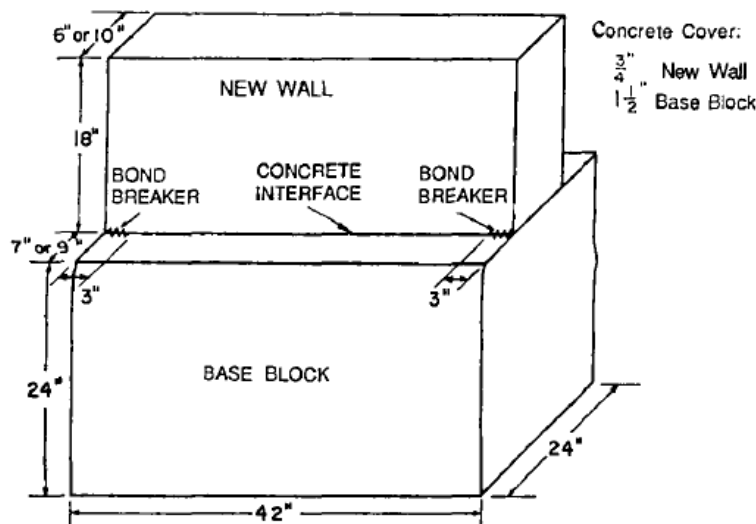
➤ **Μεταφορά Τένουσας στη διεπιφάνεια παλαιού και νέου σκυροδέματος**  
(Robert A. Bass, Ramon L. Carrasquillo and James O. Jirsa, ACI Structural Journal / July-August 1989, p. 383-393)

Τριάντα τρία δοκίμια εξετάστηκαν με στόχο την αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας της διεπιφάνειας μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος σε διάτμηση [1].

Οι μεταβλητές αυτής της πειραματικής έρευνας είναι:

- ❖ Η προετοιμασία της διεπιφάνειας
- ❖ Το μήκος αγκύρωσης των βλήτρων
- ❖ Οι λεπτομέρειες όπλισης του υφισταμένου και του νέου στοιχείου σκυροδέματος
- ❖ Η θλιπτική αντοχή του παλιού και του νέου σκυροδέματος
- ❖ Το εμβαδόν της διεπιφάνειας

Η μορφή των δοκιμίων είναι τέτοια έτσι ώστε να προσομοιώνεται η ενίσχυση ενός υποστυλώματος με πλευρικό τοίχωμα (infill walls). Κάθε βασικό στοιχείο του δοκιμίου (κορμός) είναι τετραγωνικής διατομής  $24 \times 24 \text{ in}^2$  ( $60.96 \times 60.96 \text{ cm}^2$ ) και έχει μήκος  $42 \text{ in}$  ( $1.07 \text{ m}$ ). Παρακάτω δίνονται οι λεπτομέρειες όπλισης του κορμού. Η επικάλυψη των οπλισμών είναι  $1.5 \text{ in}$  ( $3.81 \text{ cm}$ ). Τα πλευρικά τοιχώματα είναι ορθογωνικής διατομής  $10 \times 18 \text{ in}^2$  ( $25.4 \times 45.72 \text{ cm}^2$ ) και έχουν μήκος  $42 \text{ in}$  ( $1.07 \text{ m}$ ) – μόνο για το δοκίμιο 1B η διατομή του πλευρικού τοιχώματος είναι  $6 \times 18 \text{ in}^2$  ( $15.24 \times 45.72 \text{ cm}^2$ )-. Σιλικόνη χρησιμοποιήθηκε στις άκρες των στοιχείων σε μήκος  $3 \text{ in}$  από κάθε άκρη για να αποφευχθεί η ανάπτυξη συνάφειας μεταξύ του κορμού και του πλευρικού τοιχώματος. Έτσι το ενεργό μήκος της διεπιφάνειας μειώθηκε σε  $36 \text{ in}$  ( $91.44 \text{ cm}$ ). Παρακάτω φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων καθώς και οι λεπτομέρειες όπλισής τους.



Σχήμα 5.2.21: Γεωμετρία δοκιμίων [1]

Πίνακας 5.2.3: Χαρακτηριστικά δοκιμών [1]

Specimen	Base block		New wall			Interface			
	fc' (Mpa)	Reinforcement	fc' (Mpa)	Reinforcement	width (cm)	Surface preparation	Dowel size (mm)	Spacing (cm)	Embedment length (cm)
1A	21,37	2.12	24,13	4.12D	25,4	S	3Φ20	30,48	15,24=8db
2A	21,37	2.12	24,82	4.12D	25,4	S	3Φ20	30,48	15,24
3A	21,37	2.12	24,82	4.12D	25,4	S	3Φ20	30,48	15,24
4A	21,37	2.12	24,82	4.12D	25,4	S	3Φ20	30,48	15,24
5A	21,37	2.12	24,82	4.12D	25,4	S	3Φ20	30,48	15,24
6A	21,37	2.12	24,82	4.12D	25,4	S	3Φ20	30,48	15,24
7A	21,37	2.12	24,82	4.12D	25,4	S	2Φ20	30,48	15,24
8A	21,37	2.12	26,54	4.12D	25,4	S	6Φ20	15,24	15,24
9A	21,37	2.12	26,54	4.12D	25,4	S	3Φ20	30,48	16db
10A	21,37	2.12	26,54	4.12D	25,4	S	3Φ20	30,48	4db
11A	18,62	2.12	25,51	4.12D	25,4	SV	3Φ20	30,48	15,24
12A	18,96	2.12	27,23	4.12D	25,4	C	3Φ20	30,48	15,24
13A	18,96	2.12	27,23	4.12D	25,4	K	3Φ20	30,48	15,24
14A	18,96	2.12	27,23	4.12D	25,4	U	3Φ20	30,48	15,24
15A	18,96	2.12	27,23	4.12D	25,4	DO	3Φ20	30,48	15,24
16A	18,96	2.12	27,23	4.12D	25,4	DOE	3Φ20	30,48	15,24
17A	18,62	2.5	25,51	4.12D	25,4	S	3Φ20	25,4	15,24
18A	18,96	2.5	27,23	4.12D	25,4	C	3Φ20	25,4	15,24
19A	18,96	2.5	27,23	4.12D	25,4	K	3Φ20	25,4	15,24
20A	19,78	2.5	24,61	4.12D	25,4	S	3Φ20	25,4	15,24
21A	28,61	2.12	25,51	4.12D	25,4	C	3Φ20	30,48	15,24
22A	29,65	2.12	27,23	4.12D	25,4	K	3Φ20	30,48	15,24
23A	29,65	2.12	27,23	4.12D	25,4	S	3Φ20	30,48	4db
24A	29,65	2.12	27,23	4.12D	25,4	S	3Φ20	30,48	15,24
1B	22,13	2.12	24,6	2.12S	15,24	S	3Φ20	30,48	15,24
2B	22,13	2.12	24,6	4.12I	25,4	S	3Φ20	30,48	15,24
3B	22,13	2.12	24,6	4.12D	25,4	SV	3Φ20	30,48	15,24
4B	22,13	2.12	24,6	4.12D	25,4	S	3Φ20	30,48	16db
5B	22,13	2.12	34,75 **	4.12D	25,4	S	3Φ20	30,48	15,24
6B	22,13	2.12	34,75 **	4.12D	25,4	S	3Φ20	30,48	16db
17B	19,78	2.5	25,51	4.12D	25,4	S	3Φ20	25,4	16db
20B	18,62	3.5	24,6	4.12D	25,4	COD	3Φ20	25,4	15,24
21B	29,64	2.12	24,6	4.12D	25,4	S	3Φ20	30,48	16db

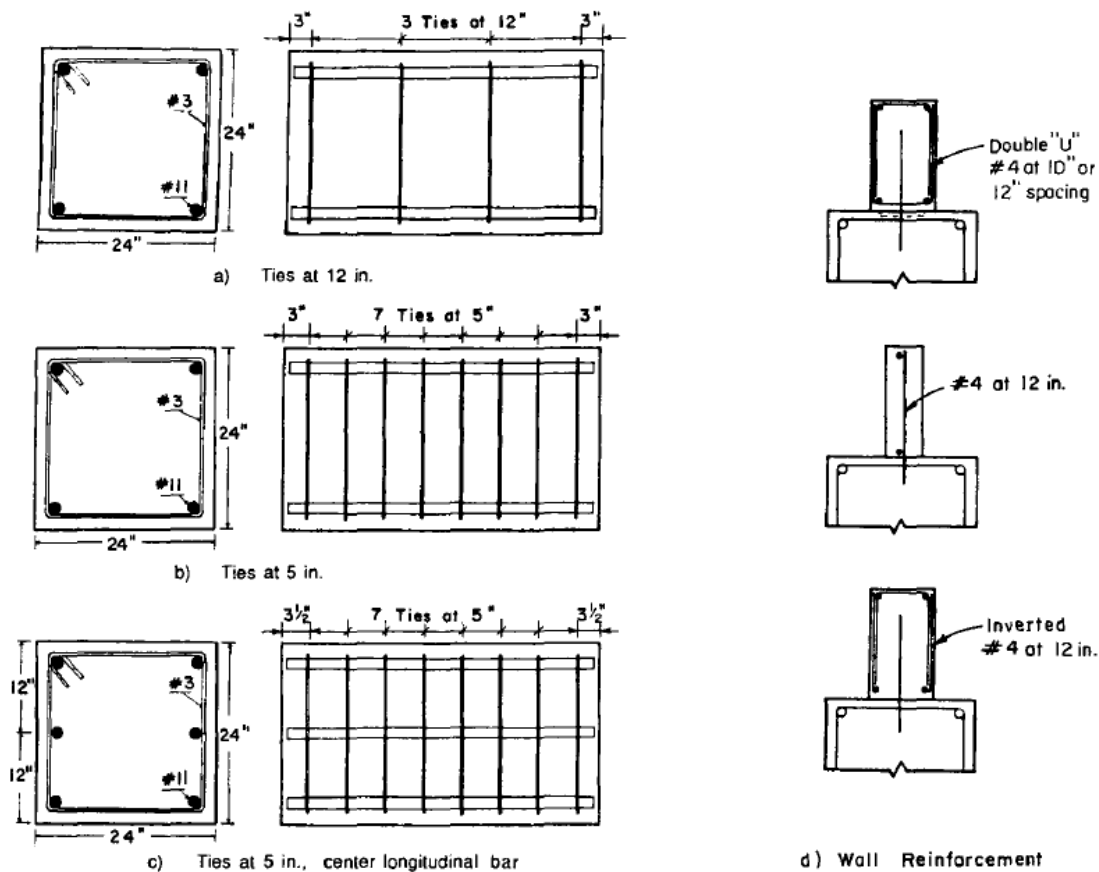
\*Base block reinforcement: 2-12, 2-#11 long, #3 at 12 in. ties; 2-5, 2-#11 long, #3 at 5 in. ties; 3-5, 3-#11 long, #3 at 5 in. ties.

<sup>†</sup>New wall reinforcement: 4-12D, #4 each corner long, #4 at 12 in. double-U ties; 2-12S, #4 top & bottom long, #4 at 12 in. straight bars; 4-12I, #4 each corner long, #4 at 12 in. inverted-U.

<sup>‡</sup>Surface preparation: S — sandblasted; SV — sandblasted, cast in vertical position; C — ¼ in. chipping; K — two 8 × 8 × 1 in. shear keys between dowels; U — smooth untreated surface; DO — sandblasted, cast overhead, 2-in. drypack; DOE — sandblasted, cast overhead, epoxy-coated, 2-in. drypack; COD — ¼ in. chipping, cast overhead, 2-in. drypack.

<sup>§</sup>Staggered.

\*\*Shotcrete.



Σχήμα 5.2.22: Οπλισμός δοκιμίων [1]

Όσο για την προετοιμασία της διεπιφάνειας ακολουθήθηκαν οι ακόλουθοι τρόποι:

- Χωρίς καμία επεξεργασία, όπως ακριβώς ήταν μετά τη σκυροδέτηση
- Επεξεργασία με έντονη αμμοβολή
- Επεξεργασία με καλέμι μέχρι σε 0.25 in βάθος από την επιφάνεια
- Τεμάχια σκυροδέματος  $8 \times 8 \text{ in}^2$  ( $20.32 \times 20.32 \text{ cm}^2$ ) και ύψους 1in (2.54cm) (shear keys)
- Εμποτισμός της διεπιφάνειας με εποξική ρητίνη

Ο αριθμός, η μεταξύ τους απόσταση και το βάθος έμπτυξης των βλήτρων ήταν διαφορετικά για κάθε δοκίμιο και κυμαίνονταν από 2-6 βλήτρα, 3-12 in βάθος έμπτυξης και 6-12 in απόσταση μεταξύ τους.

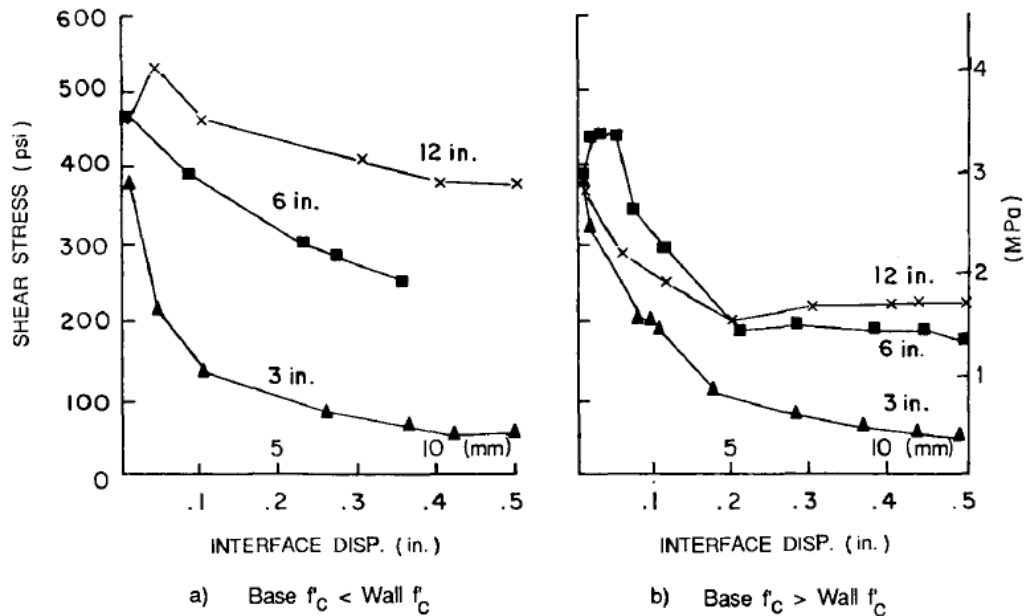
Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης ανάλογα με το μέγεθος του επιβαλλόμενου φορτίου ή το μέγεθος της μέσης μετατόπισης του μέσου της διεπιφάνειας των δοκιμίων. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 10 κύκλοι φόρτισης: οι 3 πρώτοι για φορτίο ίσο με 50 kips, οι επόμενοι 3 για φορτίο 100 kips, 3 για ολίσθηση 0.1 in και ο τελευταίος για ολίσθηση 0.5 in. Οι μετατοπίσεις μετρούνται στα άκρα αλλά και στο μέσο της διεπιφάνειας και στις δύο παρειές των δοκιμίων προκειμένου να καταγραφεί η μετακίνηση και η στροφή του τοιχώματος ως προς τον κορμό.



## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ:

— Επίδραση του βάθους έμπτυξης των βλήτρων

Τα βλήτρα με το μικρότερο βάθος έμπτυξης (3in.=4d<sub>b</sub> για #6 (19.05mm)) είχαν μειωμένο μέγιστο φορτίο κατά 30% σε σχέση με αυτά που είχαν βάθος έμπτυξης 6in. και 12in (=16d<sub>b</sub>). Επιπλέον, σε μεγαλύτερες τιμές της σχετικής ολίσθησης του κορμού και του πλευρικού τοιχώματος παρατηρήθηκε μειωμένη απομένουσα αντοχή των βλήτρων με βάθος έμπτυξης 3 in.

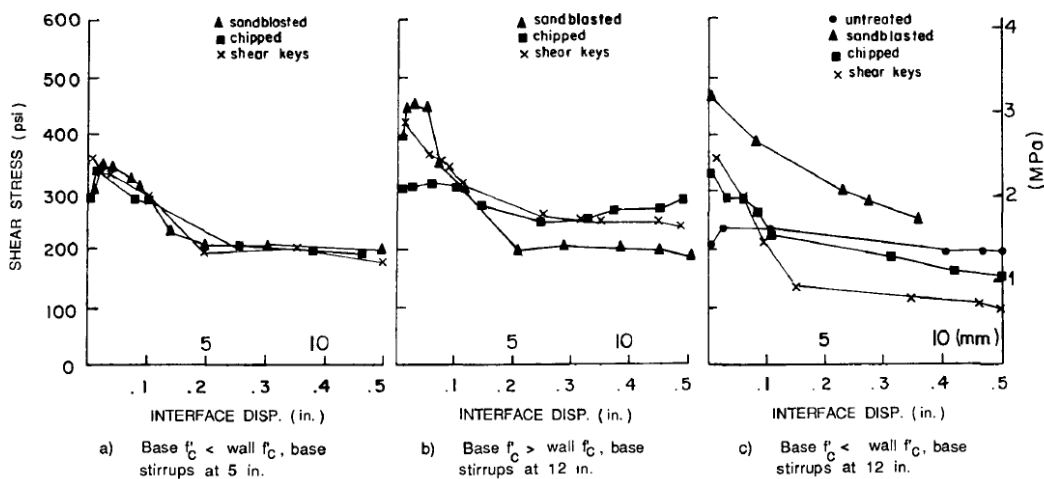


Σχήμα 5.2.23: Σχέση διατμητικής τάσης – ολίσθησης για μήκος έμπτυξης 4d<sub>b</sub>, 8d<sub>b</sub> και 16d<sub>b</sub> [1]

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι σε δοκίμια που χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα μεγαλύτερης αντοχής ( $f'_c \approx 29\text{MPa}$ ) για τη βάση από αυτό για το προστιθέμενο τοίχωμα ( $f'_c \approx 26\text{MPa}$ ) η απομένουσα τελική αντοχή σε διάτμηση είναι μικρότερη συγκριτικά με την τελικά αντοχή των δοκιμίων στα οποία το σκυρόδεμα της βάσης είναι μικρότερης αντοχής. Σαφώς, βάθος έμπτυξης ίσο με 4d<sub>b</sub> έχει και για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις το ίδιο αποτέλεσμα (χαμηλότερη αντοχή σε σχέση με βάθος έμπτυξης 8d<sub>b</sub> και 16d<sub>b</sub>), ενώ στη δεύτερη περίπτωση η αντοχή για l<sub>b</sub>=6d<sub>b</sub> προέκυψε περίπου ίση με αυτή για l<sub>b</sub>=16d<sub>b</sub>.

— Επίδραση της επεξεργασίας της διεπιφάνειας

Για μικρές τιμές της ολίσθησης (0-5 mm) προκύπτει ότι η επεξεργασία της διεπιφάνειας με έντονη αμμοβολή δίνει μεγαλύτερη αντοχή, με εξαίρεση την περίπτωση όπου  $f_{c\text{βάσης}} < f_{c\text{τοιχώματος}}$  και απόσταση μεταξύ διαδοχικών συνδετήρων 12.7cm, όπου παρατηρούμε ότι κανένας από τους τρόπους επεξεργασίας της διεπιφάνειας δεν δίνει μεγαλύτερη αντοχή από τους υπόλοιπους. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα b και c προκύπτει ότι, για αμμοβολή, ανεξάρτητα από την αντοχή του σκυροδέματος της βάσης και του τοιχώματος το μέγιστο διατμητικό φορτίο, για χαμηλά επίπεδα ολίσθησης είναι το ίδιο. Όμως, για μεγαλύτερες τιμές της ολίσθησης, σε δοκίμια που είχαν  $f_{c\text{βάσης}} > f_{c\text{τοιχώματος}}$  η αμμοβολή έδωσε χαμηλότερο φορτίο αντοχής από τους υπόλοιπους τρόπους επεξεργασίας της διεπιφάνειας. Το αντίθετο συνέβη στα δοκίμια με  $f_{c\text{βάσης}} < f_{c\text{τοιχώματος}}$ . Για τιμές της ολίσθησης μεγαλύτερες από 5mm δεν υπήρχε σαφής συσχετισμός της αντοχής με τον τρόπο επεξεργασίας της διεπιφάνειας, κάτι που μπορεί να αποδοθεί στο ότι με την πρόοδο των ανακυκλίσεων λειαινόνται οι παρειές της διεπιφάνειας και η εκτράχυνση της διεπιφάνειας δεν συμβάλλει στη φέρουσα ικανότητα.

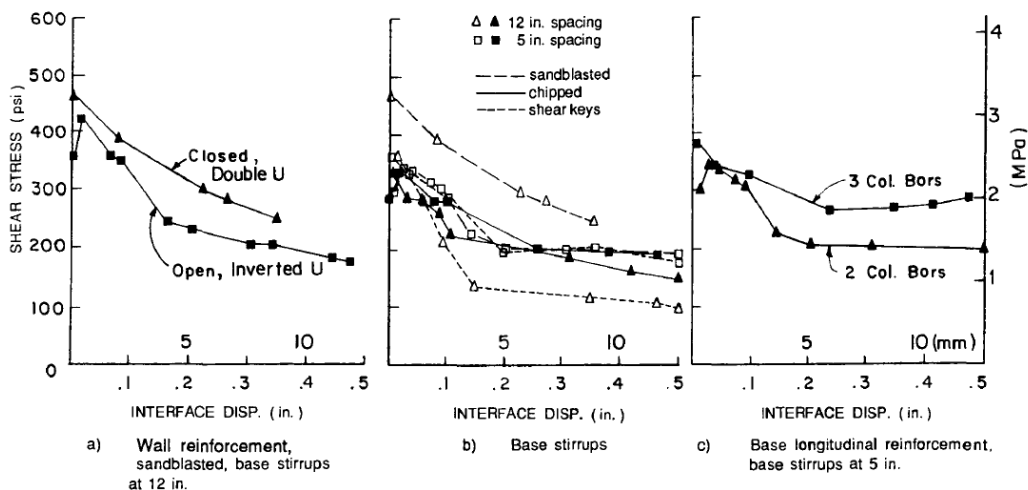


**Σχήμα 5.2.24:** Σχέση διατμητικής τάσης – ολίσθησης με παράμετρο την επεξεργασία της διεπιφάνειας [1]

— Η επιρροή του οπλισμού του κορμού και του τοιχώματος του δοκιμίου

**Τοίχωμα:** Για ανοιχτούς συνδετήρες μορφής U παρατηρήθηκε ότι παρουσίασαν ελαφρώς μειωμένη απόκριση σε σχέση με τα δοκίμια στα οποία τα τοιχώματα είχαν οπλιστεί με κλειστούς συνδετήρες. Η καλύτερη συμπεριφορά των δοκιμίων με κλειστούς συνδετήρες έγκειται στο ότι το σκυρόδεμα απολάμβανε μεγαλύτερη περίσφιγξη από ότι στα δοκίμια με ανοιχτούς συνδετήρες μορφής U.

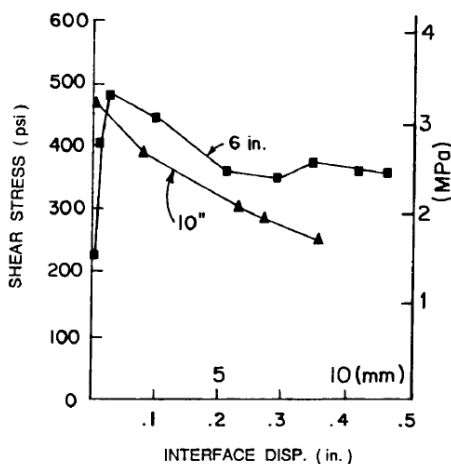
**Κορμός:** Βασική παράμετρος σύγκρισης είναι η απόσταση μεταξύ των κλειστών συνδετήρων και η επεξεργασία της διεπιφάνειας. Για βλήτρα με βάθος έμπηξης 6 in ( $8d_b$ ) και με διεπιφάνεια επεξεργασμένη με αμμοβολή παρατηρήθηκε ότι υπήρχε μειωμένη απόκριση για απόσταση συνδετήρων 5 in. συγκριτικά με απόσταση συνδετήρων 12in. Τα δοκίμια στα οποία είχαν τοποθετηθεί shear keys έδειξαν μεγαλύτερη απομένουσα αντοχή.



Σχήμα 5.2.25: Σχέση διατμητικής τάσης – ολίσθησης με παράμετρο τα χαρακτηριστικά του οπλισμού [1]

— Επιρροή του πάχους του προστιθέμενου στοιχείου

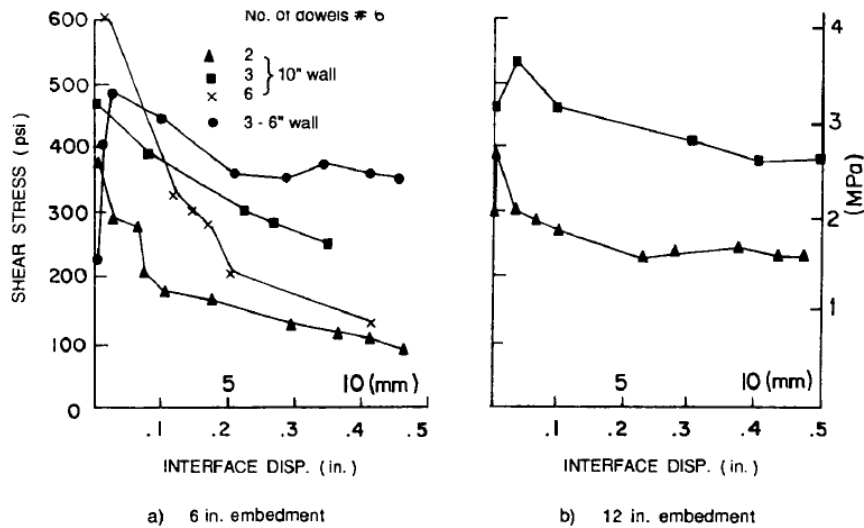
Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η σχέση της διατμητικής αντοχής σε συνάρτηση με τη σχετική ολίσθηση της βάσης και του τοιχώματος. Το τοίχωμα με το μικρότερο πάχος ολισθαίνει περισσότερο από αυτό με μεγαλύτερο πάχος, προτού αναπτύξει το μέγιστο φορτίο αντίστασης. Επίσης, παρουσιάζει μεγαλύτερη απομένουσα αντοχή αλλά μεγαλύτερη τιμή ολίσθησης στην αστοχία από το τοίχωμα πάχους 25.4cm.



Σχήμα 5.2.26: Σχέση διατμητικής τάσης – ολίσθησης με παράμετρο το πάχος του προστιθέμενου στοιχείου [1]

— Επιρροή του αριθμού των βλήτρων

Όσο περισσότερα βλήτρα διαπερνούν τη διεπιφάνεια τόσο περισσότερο αυξάνεται το μέγιστο φορτίο αντοχής και βελτιώνεται η απόκριση της διεπιφάνειας ανεξάρτητα από το βάθος έμπηξης των βλήτρων. Αυτό πηγάζει από το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του οπλισμού της διεπιφάνειας τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη που εισάγεται από αυτό τον οπλισμό. Αυτό έχει αντίκτυπο στο μέγεθος του μέγιστου διατμητικού φορτίου που μπορεί να αναλάβει η διεπιφάνεια.



Σχήμα 5.2.27: Σχέση διατμητικής τάσης – ολίσθησης ανάλογα με τον αριθμό των βλήτρων [1]

#### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:

- Η αύξηση του βάθους έμπηξης των βλήτρων συμβάλλει στην ανάπτυξη μεγαλύτερης φέρουσας ικανότητας σε διατμητικό φορτίο ακόμα και για μεγάλες τιμές της ολίσθησης στη διεπιφάνεια.
- Μεγαλύτερη αντοχή για μεγαλύτερο αριθμό βλήτρων
- Η αμμοβολή της διεπιφάνειας για χαμηλές τιμές ολίσθησης έδωσε αυξημένη αντοχή σε σχέση με τους υπόλοιπους τρόπους επεξεργασίας. Όμως, για μεγαλύτερες τιμές ο ρόλος της επεξεργασίας της διεπιφάνειας αποδείχθηκε όχι και τόσο σημαντικός.
- Γενικά οι οπλισμοί του δοκιμίου δεν συνέβαλαν και τόσο στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας. Βέβαια, θα πρέπει να σημειωθεί ότι αποτελούν εξαίρεση οι κλειστοί συνδετήρες του κορμού των δοκιμίων που βοήθησαν στην αύξηση της αντοχής λόγω της περίσφιγξης που παρείχαν.

➤ **Μεταφορά Τέμνουσας σε Διεπιφάνειες επισκευασμένων/ενισχυμένων Στοιχείων Οπλισμένου Σκυροδέματος, υποβαλλόμενες σε Ανακυκλιζόμενες Ολισθήσεις**

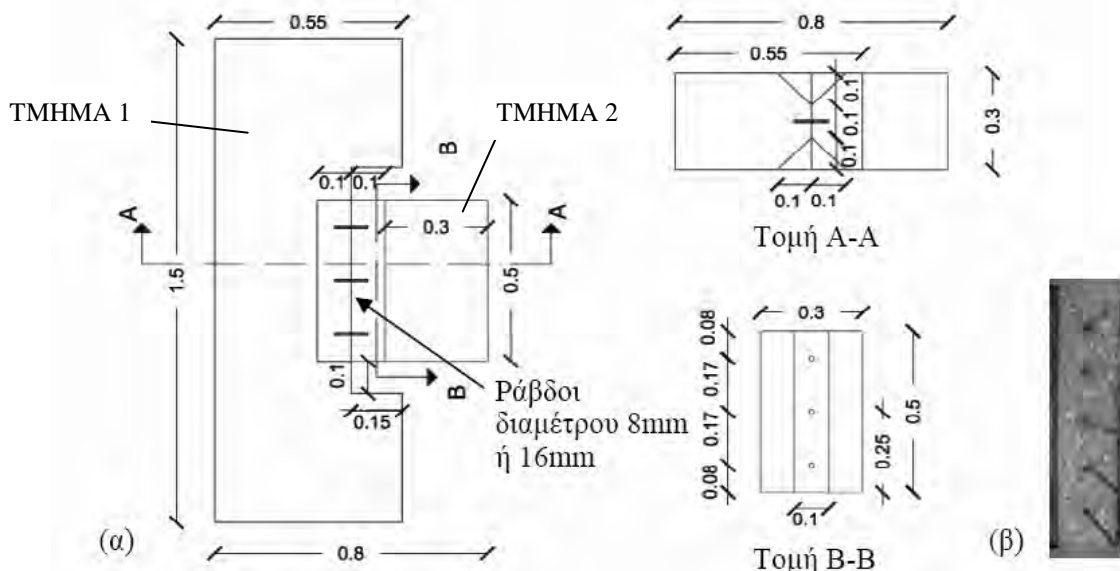
(Παλιεράκη Βασιλική, 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/2009, Πάφος, Κύπρος)

Σκοπός της εργασίας αυτής [40] ήταν ο προσδιορισμός της μεταφοράς τέμνουσας στη διεπιφάνεια παλιού και νέου σκυροδέματος οπλισμένης με βλήτρα κάτω από ανακυκλιζόμενες ολισθήσεις. Παράμετροι ελέγχου ήταν:

- Η διάμετρος των βλήτρων
- το ποσοστό του οπλισμού,
- η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος,
- η τραχύτητα της διεπιφάνειας,
- το μέγεθος της κάθετης στην διεπιφάνεια θλιπτικής τάσης,
- το –μη επαρκές για την πλήρη αγκύρωση- μήκος έμπηξης των ράβδων,
- ο μηχανισμός συνάφειας (μέσω χρήσης εποξειδικών ρητινών ή μέσω συνάφειας χάλυβα-σκυροδέματος)

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ**

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται (α) η γεωμετρία των δοκιμίων και (β) η τράχυνση της διεπιφάνειας και η διάταξη των βλήτρων στη διεπιφάνεια



Σχήμα 5.2.28: Γεωμετρία δοκιμίων [40]

Πίνακας 5.2.4 [40]

Τα κύρια χαρακτηριστικά των δοκιμών και οι πειραματικές τιμές της μέγιστης διατμητικής αντίστασης των διεπιφανειών.

Δοκίμιο	Αριθμός και διάμετρος ράβδων/ Ποσοστό οπλισμού/ Μήκος έμπτυξης ανηγμένο στην διάμετρο ράβδου	Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (N/mm <sup>2</sup> )		$\tau_{u,exp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Διορθωμένη $\tau_{u,exp}$ (N/mm <sup>2</sup> )
		Τμήμα 1	Τμήμα 2		
R-24/A/47/3.0	5Φ8/0.005/46.9	31.88	24.26	2.98	1.91
R1-24/A/47/0.5	5Φ8/0.005/46.9	31.88	24.26	3.06	1.96
R2-24/A/47/0.5	5Φ8/0.005/46.9	31.88	24.26	3.58	2.30
R-17/A/47/0.5	5Φ8/0.005/46.9	28.99	17.25	2.17	1.96
R-17/A/47/2.0	5Φ8/0.005/46.9	28.99	17.25	1.93	1.74
R-21/A/47/2.0	5Φ8/0.005/46.9	28.99	21.24	2.20	1.61
R-24/A/47/0.1	5Φ8/0.005/46.9	31.88	24.26	2.38	1.53
R-21/B/6/0.1	3Φ8/0.003/6.25	39.74	20.98	0.55	0.68
Re-26/B/6/0.1	Ρητίνες/3Φ8/0.003/6.25	49.14	26.04	1.28	0.68
NRe-27/B/6/0.1	Ρητίνες/3Φ8/0.003/6.25	36.21	27.03	4.25	3.05
R-16/C/6/0.1	3Φ16/0.012/6.25	36.00	15.94	1.25	0.51
R-23/C/6/0.5	3Φ16/0.012/6.25	38.13	22.70	2.08	0.59
R-23/C/6/0.2	3Φ16/0.012/6.25	38.13	22.70	1.87	0.53
S-17/C/6/0.1	3Φ16/0.012/6.25	33.29	17.12	1.02	0.40
S-16/C/6/0.2	3Φ16/0.012/6.25	29.67	15.57	1.20	0.50
NR-36/C/6/0.1	3Φ16/0.012/6.25	49.14	36.21	4.46	0.80

Σημειώσεις:

1. Ονοματολογία των δοκιμών:

R: Τραχεία διεπιφάνεια, S: Λεία διεπιφάνεια, Re: αγκύρωση του οπλισμού με χρήση εποξειδικών ρητινών, N: Κάθετη θλιπτική δύναμη στην διεπιφάνεια.

Ο πρώτος αριθμός δηλώνει την θλιπτική αντοχή του ασθενέστερου σκυροδέματος κάθε δοκιμίου.

A: Δοκίμια με 5 ράβδους Φ8, B: δοκίμια με τρεις ράβδους Φ8, C: δοκίμια με τρεις ράβδους Φ16.

Ο δεύτερος αριθμός δηλώνει το μήκος έμπτυξης ανηγμένο στην διάμετρο της ράβδου.

Ο τρίτος αριθμός δηλώνει το μέγεθος της επιβαλλόμενης κατά τον πρώτο κύκλο ολίσθησης.

Η διεπιφάνεια έχει μήκος 500mm και πλάτος 100mm και οι ράβδοι οπλισμού είναι τοποθετημένες στο μέσον του πλάτους της. Η καθαρή απόσταση μεταξύ των διαδοχικών βλήτρων είναι ίση με 9.62 ή 20.25Φ. Χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι χάλυβα S500 (μέση τιμή ορίου διαρροής 560N/mm<sup>2</sup>).

Επεξεργασία της διεπιφάνειας

Μετά τη σκυροδέτηση του κορμού του δοκιμίου ( η εκτράχυνση της διεπιφάνειας έγινε τεχνητά, με καλέμι, είτε παρέμεινε όπως ήταν μετά τη σκυροδέτηση, λεία.

Για τα περισσότερα δοκίμια, οι ράβδοι οπλισμού τοποθετήθηκαν στον πριν την σκυροδέτηση και εξείχαν κατά προκαθορισμένο μήκος (αναμονές). Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλιζόταν η συνάφεια. Στα υπόλοιπα δοκίμια, τα βλήτρα τοποθετήθηκαν στο πρώτο κομμάτι μετά την σκλήρυνση του σκυροδέματος, με τη διάνοιξη οπών και τη χρήση ρητινών. Προκειμένου να μελετηθεί η επάρκεια της αγκύρωσης του

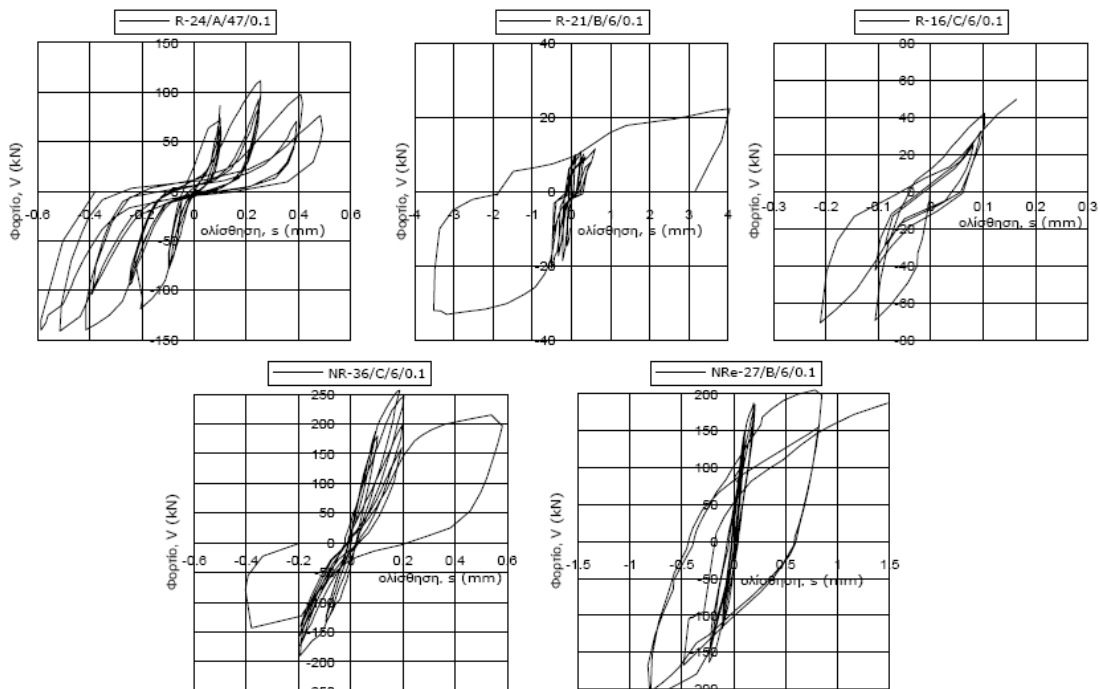
συγκεκριμένου τύπου, το μήκος έμπτυξης των βλήτρων στο δεύτερο κομμάτι επαρκούσε για την πλήρη αγκύρωσή τους ( $l_b=47d_b$ ).

Οι ανακυκλιζόμενες ολισθήσεις επιβληθήκαν ως εξής:  $\pm 0.10\text{mm}$ ,  $\pm 0.20\text{mm}$ ,  $\pm 0.50\text{mm}$ ,  $\pm 2.0\text{mm}$  είναι οι τιμές που επιλέχθηκαν για τις δοκιμές. Σε κάθε δοκίμιο επιβάλλονται τρεις πλήρεις ανακυκλίσεις στην προκαθορισμένη στάθμη μετατοπίσεων. Στη συνέχεια, επιβάλλονται τρεις πλήρεις ανακυκλίσεις σε μετατοπίσεις μεγαλύτερου εύρους, μέχρις ότου η μείωση της απόκρισης του δοκιμίου γίνει μεγαλύτερη από το 50% της μέγιστης απόκρισης, οπότε σταματά η δοκιμή.

#### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ:

##### — Βρόχοι υστέρησης

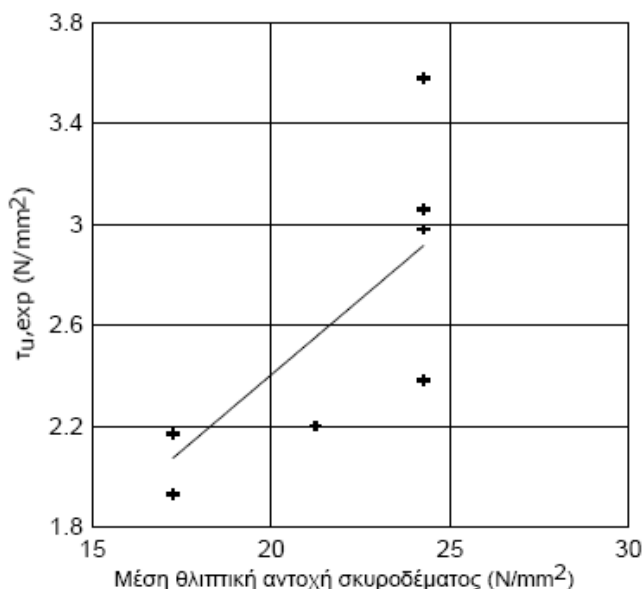
Οι βρόχοι υστέρησης εμφανίζουν έντονη στένωση περί την αρχή των αξόνων. Το εμβαδόν που περικλείεται από τους βρόχους υστέρησης είναι μικρό. Με την πρόοδο των ανακυκλίσεων και καθώς μεγαλώνει η επιβαλλόμενη ολίσθηση το φορτίο απόκρισης μειώνεται σημαντικά. Μεγαλύτερη πτώση σημειώθηκε στα δοκίμια στα οποία τα βλήτρα δεν είχαν επαρκές βάθος έμπτυξης. Επιπλέον για τα δοκίμια αυτά παρατηρήθηκε ότι για τη μία κατεύθυνση φόρτισης το φορτίο αντίστασης της διεπιφάνειας είναι ίσο ή μικρότερο από το 50% του φορτίου για την αντίθετη διεύθυνση φόρτισης.



Σχήμα 5.2.29: Τυπικοί βρόχοι υστέρησης [40]

— Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

Με βάση το διάγραμμα του μέγιστου διατμητικού φορτίου ανηγμένο στο εμβαδόν της διεπιφάνειας συναρτήσει της μέσης θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2.30 προκύπτει ότι το μέγιστο φορτίο αντίστασης προκύπτει για το σκυρόδεμα με τη μεγαλύτερη αντοχή.



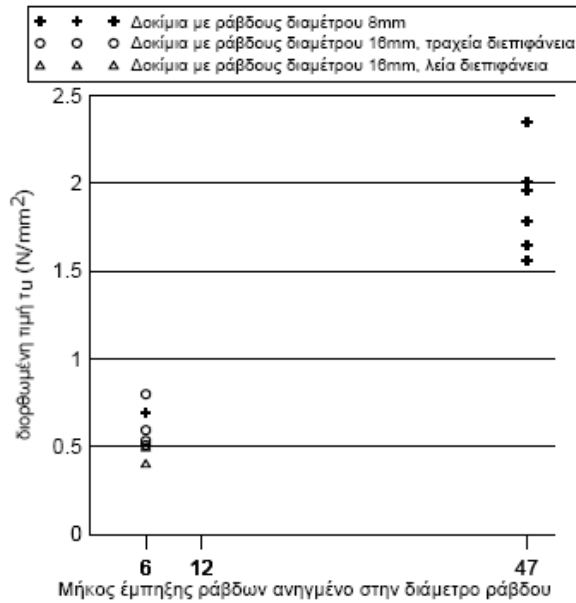
Σχήμα 5.2.30: Δοκίμια με επαρκώς αγκυρωμένο οπλισμό. Επιρροή της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος στην μέγιστη διατμητική αντοχή [40]

— Βάθος έμψηξης βλήτρων

Για βάθος έμψηξης ίσο με  $6d_b$  η μεγαλύτερη διατμητική αντοχή προκύπτει για τα δοκίμια στα οποία έχει γίνει εκτράχυνση της διεπιφάνειας και χρησιμοποιήθηκαν βλήτρα  $\Phi 16$  ( $t_u=0.8\text{N/mm}^2$ ). Η ελάχιστη διατμητική αντοχή είναι ίση με  $t_u=0.4\text{N/mm}^2$  για βλήτρα  $\Phi 16$  και λεία διεπιφάνεια. Για βλήτρα  $\Phi 8$  και εκτραχυμένη διεπιφάνεια η αντοχή που αναπτύχθηκε είναι ίση με  $0.7\text{N/mm}^2$ .

Για βάθος έμψηξης  $47d_b$  είναι αρκετά μεγαλύτερη από ότι για  $6d_b$  (περίπου 3.5 φορές μεγαλύτερη).

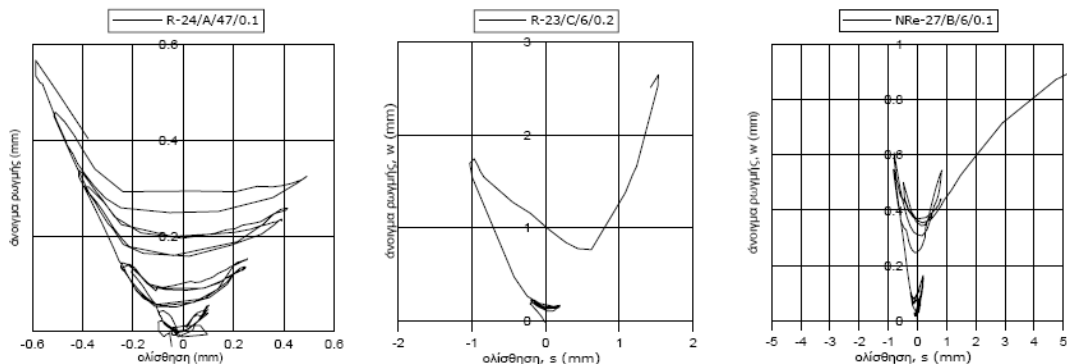




Σχήμα 5.2.31: Μέγιστη διατμητική αντοχή ως προς το ανηγμένο μήκος έμψηξης των ράβδων [40]

— Εύρος της ρωγμής

Για τη μεταβολή του εύρους της ρωγμής χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τις σειρές δοκιμών Β και C στα οποία έχουν τοποθετηθεί βλήτρα με ανεπαρκές μήκος αγκύρωσης ίσο με  $6d_b$ . Είναι φανερό ότι με την πρόοδο των ανακυκλίσεων το εύρος της ρωγμής μεταξύ των παρειών της διεπιφάνειας αυξανόταν. Το φαινόμενο αυτό είναι λιγότερο έντονο στην περίπτωση που ταυτόχρονα με την επιβαλλόμενη ολίσθηση ασκείται κάθετα στην διεπιφάνεια θλιπτικό φορτίο. Αυτή η θλιπτική δύναμη παρεμπόδιζε την ανάπτυξη του εύρους της ρωγμής με αποτέλεσμα την μικρότερη πτώση της απόκρισης. Πράγματι, από τα διαγράμματα ανοίγματος ρωγμής-διατμητικής ολίσθησης, παρατηρείται ότι ολίσθηση ίση με 0.5mm προκαλεί άνοιγμα περίπου ίσο με 1.00mm για το δοκίμιο R-23/C/6/0.2, ενώ αντιστοιχεί σε άνοιγμα ρωγμής μικρότερο από 0.20mm για το δοκίμιο NRe-27/B/6/0.1.



Σχήμα 5.2.32: Τυπικά διαγράμματα ανοίγματος ρωγμής συναρτήσει της διατμητικής ολίσθησης [40]

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:

- Οι διεπιφάνειες παλαιού και νέου σκυροδέματος, στις οποίες έχει γίνει τεχνητή τράχυνση, αποκρίνονται στις ολισθήσεις αναπτύσσοντας σημαντική αντίσταση, η οποία είναι συνάρτηση του μήκους αγκύρωσης των βλήτρων. Η επιρροή της αύξησης του μήκους αγκύρωσης των βλήτρων ήταν ευεργετική στη διατμητική αντίσταση της διεπιφάνειας.
- Οι ανακυκλιζόμενες ολισθήσεις οδηγούν σε σημαντική πτώση της απόκρισης. Το μέγεθος της πτώσης αυτή εξαρτάται από το εύρος της ολίσθησης και του μήκους αγκύρωσης των βλήτρων.
- Το άνοιγμα της ρωγμής αυξάνεται με την αύξηση της ολίσθησης. Στην περίπτωση βλήτρων μικρού μήκους παρατηρείται εντονότερη ολίσθησή τους, ακόμα και για μικρή τιμή του εφελκυστικού φορτίου που αναπτύσσεται σε αυτές.



## 6. ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΠΟΥ ΔΡΟΥΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΜΙΑΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΥΠΟ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό πρόκειται να αναπτυχθούν τα θεωρητικά προσομοιώματα που περιγράφουν τη συμπεριφορά των μηχανισμών που ενεργοποιούνται κατά μήκος μιας διεπιφάνειας, αρχικά μεμονωμένα ο ένας από τους υπόλοιπους και στο τέλος συνολικά.

### 6.1.ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΡΙΒΗΣ

Σε πρώτη προσέγγιση ο μηχανισμός που θεωρήθηκε ότι είναι υπεύθυνος για την αντίσταση της διεπιφάνειας σε ένα εξωτερικά επιβαλλόμενο διατμητικό φορτίο είναι ο μηχανισμός της τριβής. Προκειμένου να υπολογιστεί ο απαιτούμενος οπλισμός που πρέπει να διαπερνά μια διεπιφάνεια έτσι ώστε να μεταφέρονται διατμητικά φορτία κατά μήκος αυτής, προτάθηκε από τους Mast [13] και Birkeland [2] το μοντέλο διατμητικής τριβής (shear-friction model). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό η διατμητική αντίσταση του οπλισμένου σκυροδέματος προέρχεται από την τριβή που αναπτύσσεται στην επιφάνεια ολίσθησης μιας ρωγμής. Η διατμητική τάση λόγω τριβής μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας την ορθή θλιπτική τάση που εισάγεται από τον οπλισμό που διαπερνά τη ρωγμή με την εφαπτομένη της γωνίας τριβής. Η μέγιστη τάση προκύπτει όταν διαρρέει ο οπλισμός στη διεπιφάνεια και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tau_u = \rho \cdot f_{sy} \cdot \tan(\psi) \quad (6.1.1)$$

όπου

$\rho$ : το ποσοστό του οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια

$f_{sy}$ : η τάση διαρροής του χάλυβα

$\tan(\psi)$ : η εφαπτομένη της γωνίας τριβής (ή αλλιώς ο συντελεστής τριβής)

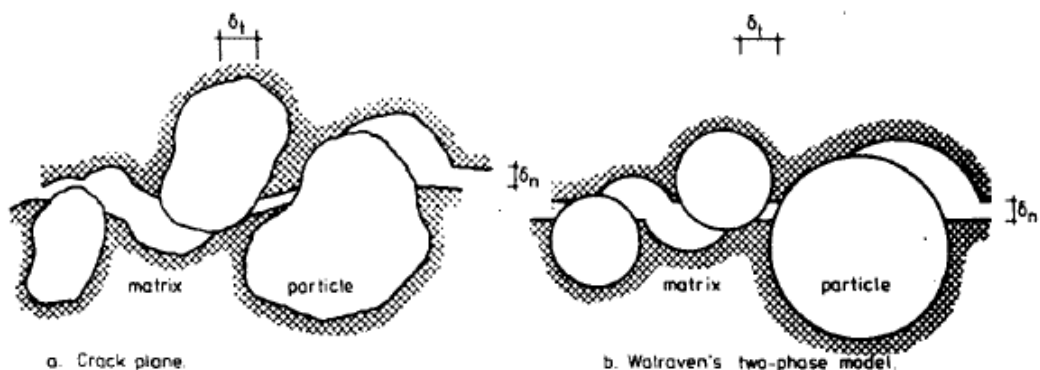
για ράβδους που διαπερνούν κάθετα τη διεπιφάνεια από πειράματα έχει προκύψει ότι  $\tan(\psi)=1.4$

## 6.2.ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΛΛΗΛΟΕΜΠΛΟΚΗΣ ΑΔΡΑΝΩΝ

Ο μηχανισμός αυτός ενεργοποιείται κυρίως στην περίπτωση ρωγμών εντός μονολιθικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, αλλά και σε διεπιφάνειες που έχουν υποστεί τεχνητή εκτράχυνση υπό την έννοια της αλληλοεμπλοκής των προεξέχοντων τμημάτων των αδρανών που γίνονται εμφανή μετά την εκτράχυνση.

Στο μοντέλο που προτάθηκε από τον Walraven [37] γίνεται η θεώρηση ότι το σκυρόδεμα αποτελεί την σύνθεση δύο διαφορετικών υλικών (φάσεων): των άκαμπτων και σκληρών αδρανών και του τσιμεντοπολτού που είναι το μητρικό υλικό και είναι σημαντικά ασθενέστερο από τα αδρανή. Εάν μια ρωγμή σχηματιστεί αυτή θα διαπερνά το μητρικό υλικό κατά μήκος της διεπιφάνειας του υλικού και των αδρανών. Έτσι, το επίπεδο της ρωγμής χαρακτηρίζεται από έντονο κυματισμό που οφείλεται στην αταξία του σχήματος των παρειών της ρωγμής και τη σκληρότητα των αδρανών που εξέχουν από αυτές. Το επίπεδο της �ωγμής καθορίζεται από ένα επίπεδο το οποίο τέμνουν τα προεξέχοντα αδρανή.

Επιπλέον, τα αδρανή είναι τυχαία προσανατολισμένα στο χώρο. Βάσει του προσομοιώματος τα αδρανή θεωρούνται άκαμπτα σφαιρικά αντικείμενα.



Σχήμα 6.2.1: Επίπεδο ρωγμής σύμφωνα με το μοντέλο δύο φάσεων του Walraven [37]

Τα αδρανή εκλαμβάνονται ως άκαμπτες σφαίρες που περιβάλλονται από το υλικό της μήτρας το οποίο επίσης θεωρείται άκαμπτο με τάση θραύσης  $\sigma_{pu}$ . Κατά συνέπεια, τα αδρανή συνθλίβουν το περιβάλλοντα τσιμεντοπολτό χωρίς, όμως, να παραμορφώνονται λόγω της σχετικής ολίσθησης των παρειών της ρωγμής.

Το αν ένα αδρανή έρχεται σε επαφή με την απέναντι παρεία της ανοιγόμενης ρωγμής εξαρτάται από το μέγεθος του εν λόγω αδρανούς, το εύρος της ρωγμής και το μέγεθος της σχετικής ολίσθησης των μετώπων της ρωγμής.

Χρησιμοποιώντας κατανομή αδρανών σύμφωνα με το διάγραμμα του Fuller, ο Walraven υπολόγισε τις προβολές των περιοχών επαφής,  $a_x$  και  $a_y$ , στους άξονες  $x$  και  $y$  αντίστοιχα για οποιονδήποτε τύπο αδρανούς (βλ. σχήμα 6.2.2). Αυτή η συσσωρευτική συνάρτηση κατανομής εκφράζεται από τη σχέση:

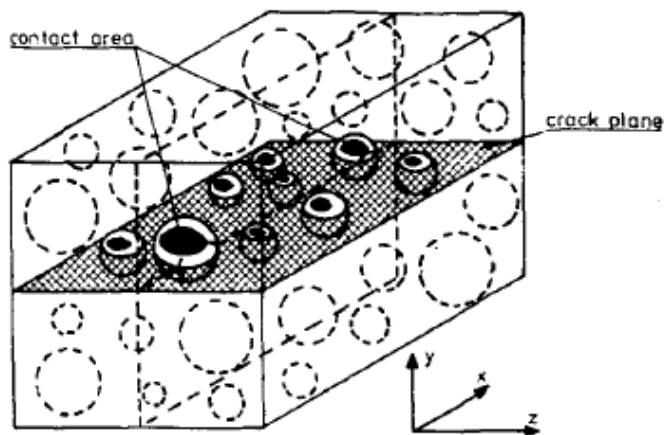
$$p_k = \sqrt{\frac{D}{D_{max}}} \quad (6.2.1)$$

Στην ανωτέρω σχέση το  $P_k$  εκφράζει το λόγο των αδρανών με διάμετρο  $D$ , ενώ  $D_{max}$  είναι η διάμετρος του μεγαλύτερου αδρανούς. Η πιθανότητα ένα τυχαίο σημείο στο σκυρόδεμα να είναι σε ένα αδρανές είναι  $P=p_k$ . Κανονικά το  $p_k$  είναι ο λόγος του όγκου των αδρανών προς τον όγκο του σκυροδέματος.

Με βάση την παραπάνω σχέση μπορούμε να βρούμε την πιθανότητα ένα τυχαίο σημείο στο  $x-z$  επίπεδο στο μοναδιαίο τμήμα που εξετάζεται, να βρίσκεται σε ένα αδρανές με διάμετρο  $D_o$ , δηλαδή να ισχύει  $D < D_o$ . Αυτή η συνάρτηση είναι η εξής:

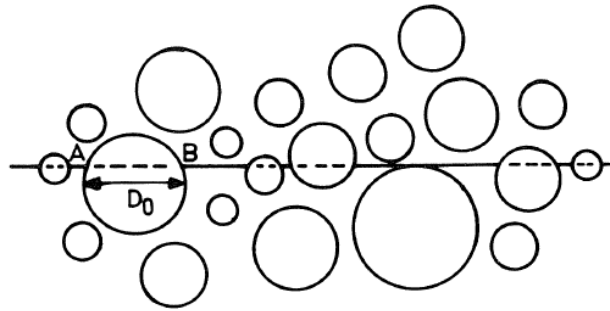
$$P_c(D < D_o) = p_k(1.065D_o^{0.5}D_{max}^{-0.5} - 0.053D_o^4D_{max}^{-4} - 0.012D_o^6D_{max}^{-6} - 0.045D_o^8D_{max}^{-8} - 0.0025D_o^{10}D_{max}^{-10}) \quad (6.2.2)$$

Δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος των αδρανών τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα το σημείο που εξετάζεται στην μάζα του σκυροδέματος στο επίπεδο  $x-z$ , να ανήκει σε ένα αδρανές.



a. Contact areas.

**Σχήμα 6.2.2:** Επιφάνειες επαφής κατά τη διατμητική ολίσθηση [37]



Σχήμα 6.2.3: Αδρανή που τέμνεται από τη ρωγμή [37]

Το μέσο μήκος της γραμμής τομής AB για ένα αδρανές με διάμετρο  $D_0$ , τετμημένο από τη ρωγμή είναι :

$$s_m = \frac{\pi \cdot D_0}{4} \quad (6.2.3)$$

Υποθέτοντας μία διατομή μοναδιαίου πλάτους που προήλθε από την τομή του z επιπέδου και της ρωγμής, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που περιλαμβάνει μόνο σημεία τα οποία βρίσκονται σε αδρανές με διάμετρο  $D_0$ , μπορεί να προκύψει πολλαπλασιάζοντας αυτό το μοναδιαίου μήκους τμήμα με το  $P'_c(D_0)$ , δηλαδή με την πιθανότητα ένα σημείο να βρίσκεται σε αδρανές με διάμετρο  $D_0$ , όπου:

$$P'_c(D_0) = \frac{\partial P_c(D < D_0)}{\partial D_0} \quad (6.2.4)$$

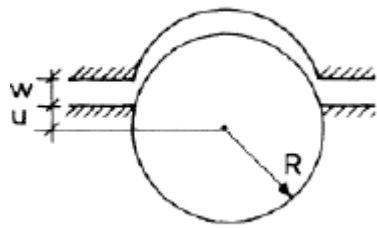
$$\text{Έτσι: } 1 \cdot (D_0) = P'_c(D_0) \cdot 1 = P'_c(D_0) \quad (6.2.5)$$

Κατά συνέπεια η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για ένα σύνολο αδρανών με διάμετρο  $D_0$  στο επίπεδο z, το οποίο τέμνει τη ρωγμή, δηλαδή ο αριθμός των αδρανών που τέμνονται από τη ρωγμή και έχουν διάμετρο  $D_0$  είναι:

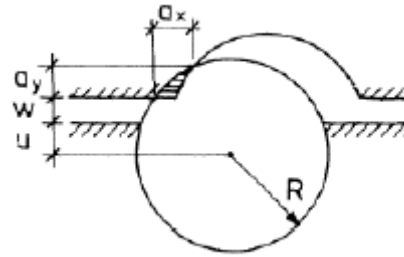
$$n(D_0) = \frac{P'_c(D_0)}{0.25 \cdot \pi \cdot D_0} \quad (6.2.6)$$

Έτσι λοιπόν η επιφάνεια επαφής για μία τέτοια τομή με διάμετρο  $D_0$  προκύπτει σαν συνάρτηση του ανοίγματος της ρωγμής w και της διατμητικής μετατόπισης Δ.

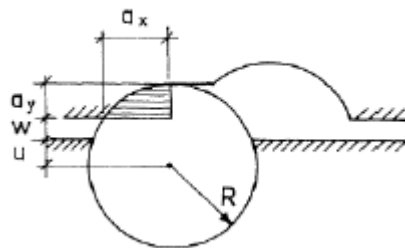
Υπάρχουν 3 ενδεχόμενα:



(α) φάση μηδενικής επαφής μεταξύ των αδρανών  
( $0 < \Delta < \Delta_0$ )



(β) φάση επαφής μεταξύ των αδρανών  
( $\Delta_0 < \Delta < \Delta_b$ )



(γ) φάση μέγιστης επαφής μεταξύ των αδρανών  $\Delta > \Delta_b$

**Σχήμα 6.2.4**

Είναι:

$$\Delta_0 = \sqrt{R^2 - u^2} - \sqrt{R^2 - (u + w)^2} \quad (6.2.7)$$

$$\Delta_b = \sqrt{2 \cdot R \cdot w - w^2} \quad (6.2.8)$$

Για τις προβαλλόμενες επιφάνειες  $a_x$  και  $a_y$ :

Για  $0 < \Delta < \Delta_0$ :

$$a_x = a_y = 0$$

Για  $\Delta_0 < \Delta < \Delta_b$ :

$$a_y = \sqrt{R^2 - \frac{1}{4}(w^2 + \Delta^2)} \cdot \frac{\Delta}{\sqrt{(w^2 + \Delta^2)}} - \frac{1}{2} \cdot w - u \quad (6.2.9)$$

$$a_x = \frac{1}{2} \cdot \Delta - \sqrt{R^2 - \frac{1}{4}(w^2 + \Delta^2)} \cdot \frac{w}{\sqrt{(w^2 + \Delta^2)}} + \sqrt{R^2 - (u + w)^2} \quad (6.2.10)$$



Για  $\Delta > \Delta_b$ :

$$a_y = R - (u + w) \quad (6.2.11)$$

$$a_x = \sqrt{R^2 - (u + w)^2} \quad (6.2.12)$$

Οι παραπάνω σχέσεις συνυπολογίζουν ως παράμετρο το  $u$  που είναι το βάθος αλληλεμπλοκής, δηλαδή πόσο πιο κάτω είναι το κέντρο βάρους του αδρανούς από την επιφάνεια του χείλους της ρωγμής. Δεχόμενοι ότι όλες οι τιμές του  $u$  μπορούν να συμβούν με την ίδια πιθανότητα, είναι δυνατόν να υπολογίσουμε τις τιμές των  $a_x$  και  $a_y$  συναρτήσει των  $D$ ,  $w$  και  $\Delta$ . Έτσι λοιπόν αν τα μέτωπα της ρωγμής περιστρέφονται το ένα ως προς το άλλο, για κάθε αδρανές με διάμετρο  $D$  οι πιο πιθανές τιμές για τις μέσες τιμές των  $a_x$  και  $a_y$  είναι γνωστές. Αν  $D_{min}$  είναι η μικρότερη διάμετρος του κύκλου τομής που υποδηλώνει επαφή για τις δεδομένες συνθήκες ( $w$ ,  $\Delta$ ) και  $D_{max}$  είναι η μέγιστη διάμετρος του κύκλου τομής, η επιφάνειες επαφής των μετώπων της ρωγμής  $A_x$  και  $A_y$  υπολογίζονται για ένα τμήμα μοναδιαίου μήκους και πλάτους ως εξής:

$$A_y = \sum \alpha_y = \int_{D_{min}}^{D_{max}} n(D) \cdot \bar{a}_{yD} dD \quad (6.2.13)$$

$$A_x = \sum \alpha_x = \int_{D_{min}}^{D_{max}} n(D) \cdot \bar{a}_{xD} dD \quad (6.2.14)$$

Έτσι διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

Περίπτωση Α:  $\Delta < w$

$$A_y = \int_{\frac{w^2 + \Delta^2}{\Delta}}^{D_{max}} p_k \cdot \frac{4}{\pi} \cdot F\left(\frac{D}{D_{max}}\right) \cdot G_1(\Delta, w, D) \cdot dD \quad (6.2.15)$$

$$A_x = \int_{\frac{w^2 + \Delta^2}{\Delta}}^{D_{max}} p_k \cdot \frac{4}{\pi} \cdot F\left(\frac{D}{D_{max}}\right) \cdot G_2(\Delta, w, D) \cdot dD \quad (6.2.16)$$

Περίπτωση Β:  $\Delta > w$

$$A_y = \int_{2w}^{\frac{w^2+\Delta^2}{w}} p_k \cdot \frac{4}{\pi} \cdot F\left(\frac{D}{D_{max}}\right) \cdot G_3(\Delta, w, D) \cdot dD \quad (6.2.17)$$

$$+ \int_{\frac{w^2+\Delta^2}{w}}^{D_{max}} p_k \cdot \frac{4}{\pi} \cdot F\left(\frac{D}{D_{max}}\right) \cdot G_1(\Delta, w, D) \cdot dD$$

$$A_x = \int_{2w}^{\frac{w^2+\Delta^2}{w}} p_k \cdot \frac{4}{\pi} \cdot F\left(\frac{D}{D_{max}}\right) \cdot G_4(\Delta, w, D) \cdot dD \quad (6.2.18)$$

$$+ \int_{\frac{w^2+\Delta^2}{w}}^{D_{max}} p_k \cdot \frac{4}{\pi} \cdot F\left(\frac{D}{D_{max}}\right) \cdot G_1(\Delta, w, D) \cdot dD$$

όπου:

$$G_1(\Delta, w, D) = D^{-3} \cdot (\sqrt{D^2 - (w^2 + \Delta^2)}) \cdot \frac{\Delta}{\sqrt{w^2 + \Delta^2}} \cdot u_{max} - w \cdot u_{max} - u_{max}^2 \quad (6.2.19)$$

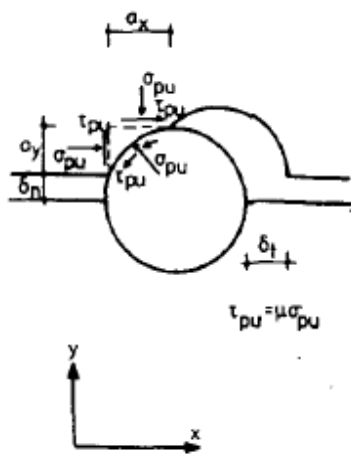
$$G_2(\Delta, w, D) = D^{-3} \cdot \left\{ \Delta - \sqrt{D^2 - (w^2 + \Delta^2)} \cdot \frac{\Delta}{\sqrt{w^2 + \Delta^2}} \cdot u_{max} + (u_{max} + w) \cdot \right. \\ \left. 14D^2 - w + u_{max}^2 - w \cdot 14D^2 - w^2 + 14D^2 \sin^{-1} \frac{2w}{D} - 1u_{max} + w \cdot 12D - 14D^2 \sin^{-1} \frac{2w}{D} - 12wD \right\} \quad (6.2.20)$$

$$G_3(\Delta, w, D) = D^{-3} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot D - w \right)^2 \quad (6.2.21)$$

$$G_4(\Delta, w, D) = D^{-3} \cdot \left( \frac{\pi}{8} D^2 - w \cdot \sqrt{\frac{1}{4} D^2 - w^2} - \frac{1}{4} D^2 \sin^{-1} \frac{2w}{D} \right) \quad (6.2.22)$$

$$F\left(\frac{D}{D_{max}}\right) = 0.532 \left(\frac{D}{D_{max}}\right)^{0.5} - 0.212 \left(\frac{D}{D_{max}}\right)^4 - 0.072 \left(\frac{D}{D_{max}}\right)^6 - 0.036 \left(\frac{D}{D_{max}}\right)^8 \\ - 0.025 \left(\frac{D}{D_{max}}\right)^{10} \quad (6.2.23)$$

$$u_{max} = \frac{-\frac{1}{2} w \cdot (w^2 + \Delta^2) + \frac{1}{2} \sqrt{w^2 \cdot (w^2 + \Delta^2)^2 - (w^2 + \Delta^2) \cdot \{(w^2 + \Delta^2)^2 - \Delta^2 D^2\}}}{(w^2 + \Delta^2)} \quad (6.2.24)$$



b. Projected contact areas

Από ισορροπία σε μια στοιχειώδη διεπιφάνεια μοναδιαίου μήκος και πλάτους παίρνουμε:

$$\tau_\alpha = \sigma_{pu}(A_y + \mu \cdot A_x) \quad [\text{MPa}] \quad (6.2.25)$$

$$\sigma_\alpha = \sigma_{pu}(A_x - \mu \cdot A_y) \quad [\text{MPa}] \quad (6.2.26)$$

Τα μεγέθη  $\sigma_{pu}$  και  $\mu$  προσδιορίστηκαν πειραματικά και δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

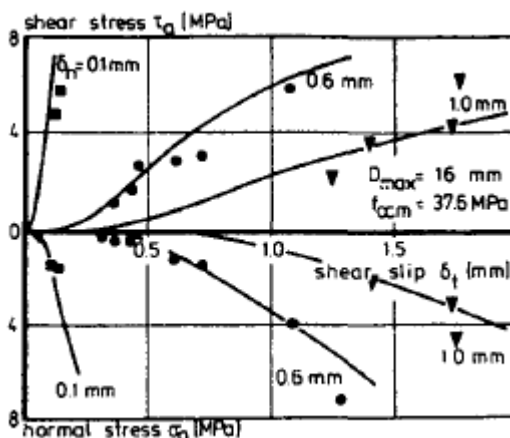
$$\sigma_{pu} = 6.39 \cdot f_{ccm}^{0.56} \quad [\text{MPa}] \quad (6.2.27)$$

όπου  $f_{ccm}$  η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε MPa.

και

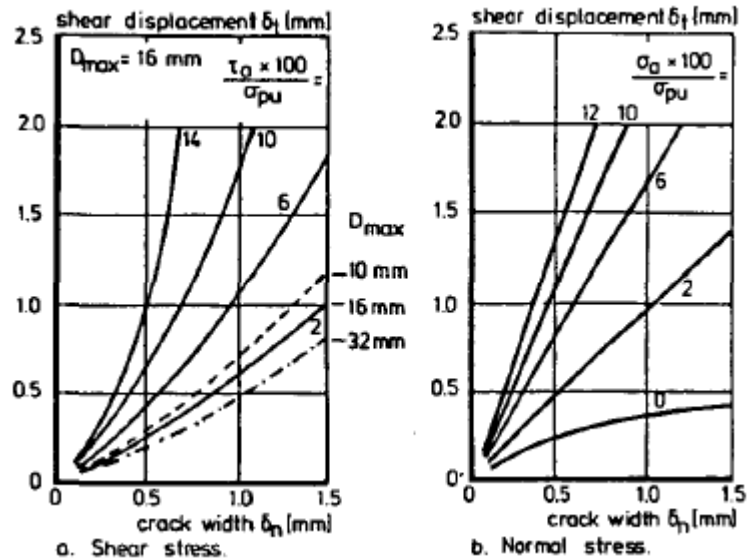
$$\mu = 0.4$$

Το σχήμα 6.2.3 αναπαριστά τις τάσεις που αναπτύσσονται στο επίπεδο ολίσθησης συναρτήσει της ολίσθησης για σταθερή διάμετρο του μεγαλύτερου αδρανούς ( $D_{max}=16\text{mm}$ ) και θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ( $f_{ccm}=37.6\text{MPa}$ ). Οι συνεχείς καμπύλες προκύπτουν από εφαρμογή του μοντέλου διατμητικής τριβής για διαφορετικές τιμές του ανοίγματος της ρωγμής (0.1, 0.6 και 1.0mm) και τα σημεία προέρχονται από τα αποτελέσματα των δοκιμών των Walraven [37], Pauley [23] και Millard [21]. Είναι εμφανές ότι τα σημεία συμπίπτουν με τις καμπύλες.



Σχήμα 6.2.3: Σύγκριση του μοντέλου με πειραματικά αποτελέσματα [37]

Σύμφωνα με το προσομοίωμα το μέγεθος του μεγαλύτερου αδρανούς του μίγματος έχει μικρή επιρροή στο μέγεθος του φορτίου αντίστασης της διεπιφάνειας. Όσο πιο μικρή είναι η διάμετρος του μεγαλύτερου αδρανούς τότε ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η ολίσθηση είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό αύξησης του ανοίγματος της ρωγμής.



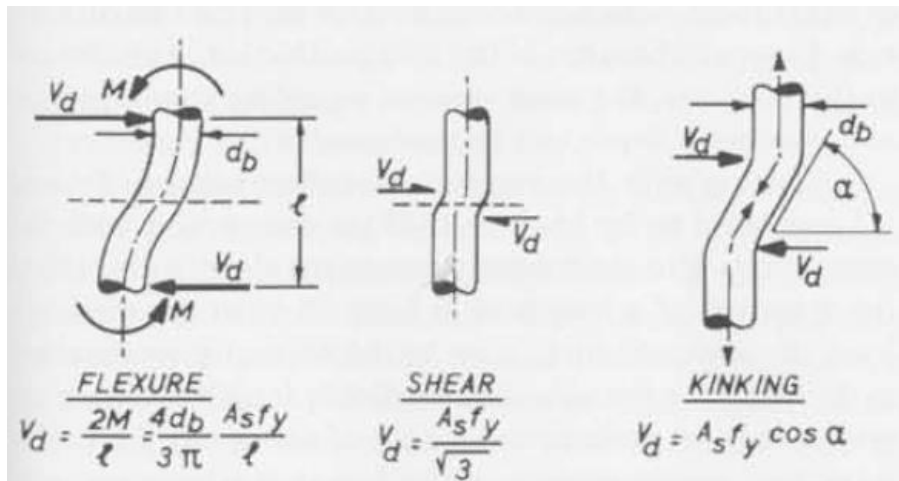
**Σχήμα 6.2.4:** Η ολίσθηση ως συνάρτηση του εύρους της ρωγμής για α. σταθερή διατμητική τάση και β. σταθερή ορθή τάση [37]

Στο σχήμα 6.2.4 φαίνεται η σχέση της διατμητικής ολίσθησης σε συνάρτηση με το πλάτος της ρωγμής υπό σταθερή διατμητική και ορθή τάση αντίστοιχα. Το μοντέλο εφαρμόστηκε για τιμή διαμέτρου του μεγαλύτερου αδρανούς ίση με 16mm.

### 6.3.ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΡΑΣΗΣ ΒΛΗΤΡΟΥ

Ο μηχανισμός δράσης βλήτρου βασίζεται στην απόκριση της ράβδου που διαπερνά μια διεπιφάνεια ή μια ρωγμή και του περιβάλλοντος σκυροδέματος σε μια κίνηση της ράβδου κάθετα στον άξονά της. Όπως έχει ήδη ειπωθεί, η αστοχία επέρχεται με τη μορφή θραύσης του σκυροδέματος και σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης στη ράβδο με την προϋπόθεση ότι υπάρχει επαρκής επικάλυψη του βλήτρου έτσι ώστε να αποτραπεί η αστοχία λόγω διάρρηξης του σκυροδέματος. Για τον παραπάνω τρόπο αστοχίας διακρίνονται τρεις μηχανισμοί (Pauley, [24]):

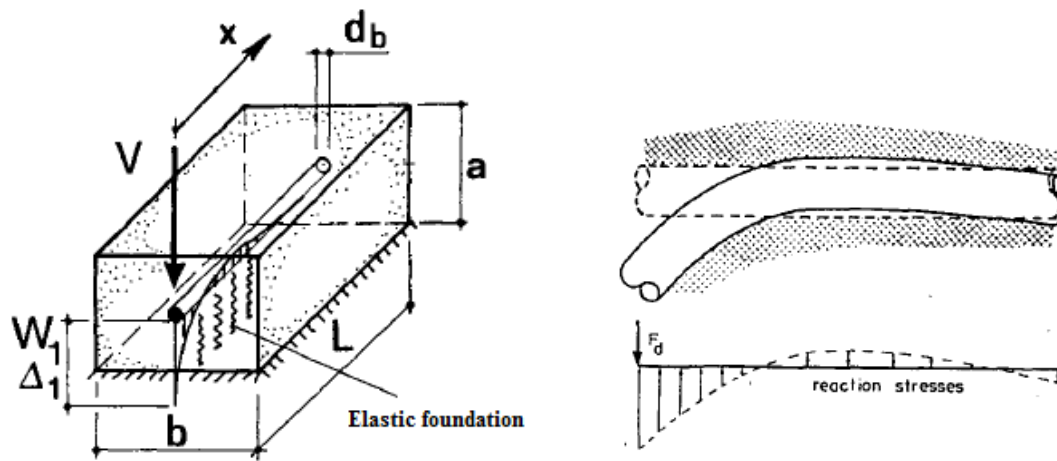
- Καμπτική αστοχία: η δύναμη λόγω δράσης βλήτρου εμφανίζεται μέσω της κάμψης της ράβδου. Στο μηχανισμό αυτό το μέγιστο φορτίο οφείλεται στη διαρροή της ράβδου.
- Καθαρή διάτμηση: αναμένεται ότι η μεταφορά της δύναμης λόγω δράσης βλήτρου μέσω διάτμησης είναι απίθανη να γίνει εξαιτίας της αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος στην γειτονική περιοχή της ράβδου. Επομένως, οι δυνάμεις βλήτρου που αναπτύσσονται στις δύο παρειές της επιφάνειας ολίσθησης έχουν σχετικά μεγάλη εκκεντρότητα οδηγώντας και πάλι στη διαρροή της ράβδου λόγω κάμψης.
- Συστροφή: για σημαντική μετατόπιση κάθετη στον άξονα της ράβδου, η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται σε αυτή έχει μια συνιστώσα παράλληλη στο επίπεδο της ρωγμής. Για ρηγματωμένο σκυρόδεμα, το πλάτος της ρωγμής παραμένει μικρό σε σύγκριση με τη διάμετρο της ράβδου. Έτσι, η επιρροή της συστροφής θα είναι μικρή. Βέβαια, εξαίρεση αποτελεί ο συνδυασμός ρωγμής μεγάλου εύρους με ράβδους μικρής διαμέτρου.



Σχήμα 6.3.1: Μηχανισμοί αστοχίας βλήτρου σύμφωνα με τον Pauley [24]

Το μέγιστο φορτίο λόγω δράσης βλήτρου αναπτύσσεται μετά τον σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων κατά μήκος της ράβδου. Επομένως, ο μηχανισμός δράσης βλήτρου επηρεάζεται από τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος και του χάλυβα. Οι πιο σημαντικές παράμετροι είναι η διάμετρος του οπλισμού, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος  $f_c$ , η αξονική τάση του οπλισμού  $f_s$  και η τάση διαρροής  $f_{sy}$  του χάλυβα.

Η σχέση φορτίου-διατμητικής ολίσθησης μπορεί να περιγραφεί από το ανάλογο της δοκού επί ελαστικών στηρίξεων (Beam on Elastic Foundation (BEF) model, Timoshenko & Lessels, [32]). Η ράβδος αντιμετωπίζεται ως μια εύκαμπτη δοκός που εδράζεται επί ελαστικών στηρίξεων.



Σχήμα 6.3.2: Το μοντέλο της δοκού επί ελαστικών στηρίξεων [5]

Σύμφωνα με το προσομοίωμα αυτό μπορεί να προκύψει η σχέση 6.3.1:

$$\delta_t = F_d \frac{1}{2\beta^3 EI} \quad [\text{mm}] \quad (6.3.1)$$

όπου

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_f \cdot d_b}{4EI}}$$

$F_d$ : η δύναμη αντίστασης λόγω ενεργοποίησης του μηχανισμού δράσης βλήτρου [N]

$K_f$ : κατανεμημένη δυσκαμψία σκυροδέματος ( $K_f = 127 \frac{\sqrt{f_c}}{(d_b)^{2/3}}$ ) [MPa/mm]

$d_b$ : η διάμετρος της ράβδου [mm]

$E$ : μέτρο ελαστικότητας χάλυβα [MPa]

$I$ : ροπή αδράνειας της ράβδου ( $I = \pi \frac{d_b^4}{64}$ ) [mm<sup>4</sup>]

Το μέγεθος  $K_f$  εμφανίζει μεγάλη διασπορά,  $K_f=200-2400$  MPa/mm με μέση τιμή ίση περίπου με 700 MPa/mm. Η διασπορά των τιμών οφείλεται στην

αποδιοργάνωση του περιβάλλοντος σκυροδέματος με την αύξηση του επιβαλλόμενου διατμητικού φορτίου. Παρόλα αυτά γίνεται η παραδοχή ότι το σκυρόδεμα δεν ρηγματώνεται και ότι υπάρχει άριστη συνάφεια με τον οπλισμό (Finney, [7]). Κατά συνέπεια, οι παράγοντες που ασκούν επιρροή στην τιμή του  $K_f$  είναι ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόζεται το φορτίο καθώς και η εκκεντρότητα που αυτό έχει, δηλαδή η απόσταση του σημείου εφαρμογής της δύναμης από την παρειά της επιφάνειας ολίσθησης.

Η μετατόπιση της ράβδου υπολογίζεται ως συνάρτηση της κάθετης στον άξονά της μετατόπιση που οφείλεται στην παραμόρφωση που υφίσταται το «ελεύθερο» τμήμα της ράβδου. Η περιοχή αυτή έχει μήκος ίσο με το άνοιγμα της ρωγμής.

Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα από αναλυτικές λύσεις των Friberg [8], Finney [7] και Schäfer [27], ο Walraven [37] οδηγήθηκε στη διατύπωση της ακόλουθης εξίσωσης:

$$F_d = 3.56d_b^{1.75}K_f^{0.75}\delta_t \quad (6.3.2)$$

Επομένως η δύναμη βλήτρου είναι ανάλογη της διαμέτρου της ράβδου. Αντίστοιχη σχέση διατυπώθηκε και από τον Jimenez [11]:

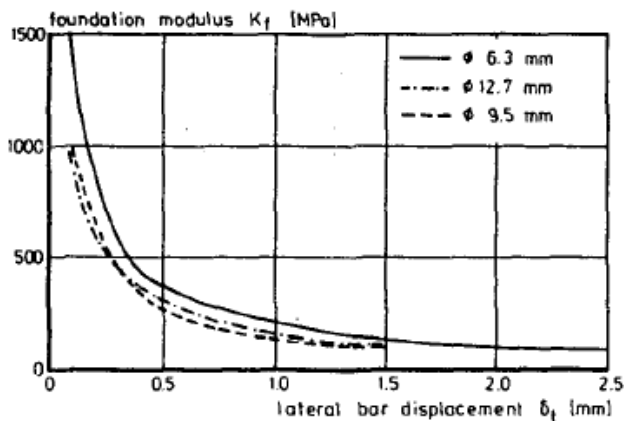
$$F_d = 190d_b^{1.75}\delta_t \quad (6.3.3)$$

Αργότερα, η Βιντζηλαίου [34] βασιζόμενη στην υπόθεση ότι το περιβάλλον σκυρόδεμα παραμορφώνεται λόγω της δράσης βλήτρου σε μήκος ίσο με δύο διαμέτρους ( $2d_b$ ) και κάνοντας την παραδοχή ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού διατύπωσε την εξής σχέση για τη δυσκαμψία του σκυροδέματος  $K_f$ :

$$K_f = \frac{E_c}{2d_b} \quad (6.3.4)$$

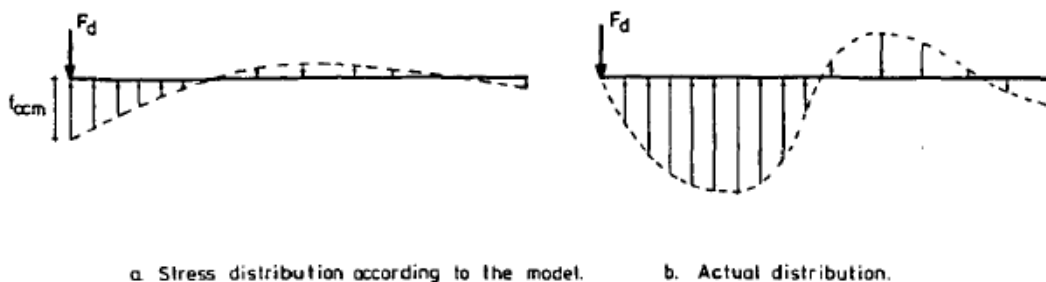
όπου  $E_c$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος.

Η παραπάνω σχέση αποδείχτηκε ότι ισχύει για τιμές του διατμητικού φορτίου στη διεπιφάνεια ίσες ή μικρότερες από το 50% του μέγιστου φορτίου. Στην πραγματικότητα, καθώς το φορτίο αυξάνεται και πλησιάζει το φορτίο αντοχής η δυσκαμψία του σκυροδέματος ελαττώνεται.



**Σχήμα 6.3.3:** Δυσκαμγία σκυροδέματος συναρτήσει της μετατόπισης της ράβδου κάθετα στον άξονα της ράβδου

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η κατανομή των τάσεων σύμφωνα με τη θεωρία του Timoshenko δεν συμπίπτει με την πραγματική κατανομή των τάσεων κατά μήκος της ράβδου, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



**Σχήμα 6.3.4:** Η θεωρητική και πραγματική κατανομή των τάσεων κατά μήκος της ράβδου

Με αύξηση του φορτίου λόγω δράσης βλήτρου, οι τάσεις που καταπονούν το σκυρόδεμα που περιβάλλει τη ράβδο ξεπερνούν την αντοχή που μπορεί να αναπτυχθεί λόγω συνθηκών τριαξονικής θλίψης. Παρόλα αυτά, το σκυρόδεμα παρέχει ικανοποιητική περίσφιξη, δημιουργώντας συνθήκες τριαξονικής θλίψης κάτω από τη ράβδο στη διεύθυνση του φορτίου. Κατά τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος και έτσι ο αδύναμος κρίκος του μηχανισμού γίνεται το βλήτρο. Το μέγιστο φορτίο προκύπτει εξαιτίας της διαρροής του υλικού της ράβδου.

Ο Rasmussen [25] πραγματοποίησε πειράματα σε δοκίμια με βλήτρα τα οποία εξείχαν από μια βάση σκυροδέματος. Πέρα, όμως από το πειραματικό πρόγραμμα, ανέπτυξε και ένα μοντέλο προκειμένου να ερμηνεύσει το μηχανισμό δράσης βλήτρου. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο ο μηχανισμός δράσης βλήτρου αστοχεί μετά την ανάπτυξη πλαστικής άρθρωσης στη ράβδο και σε κάποια απόσταση από τη διεπιφάνεια. Στην πλαστική άρθρωση εκδηλώνεται η μέγιστη πλαστική ροπή της



διατομής του βλήτρου και είναι ίση με  $0.167f_{sy}d_b^3$ . Από ισορροπία προκύπτει η ακόλουθη σχέση για το φορτίο αντίστασης:

$$F_d = Bd_b^2 \sqrt{f_{ccyl}f_{sy}} \quad (6.3.5)$$

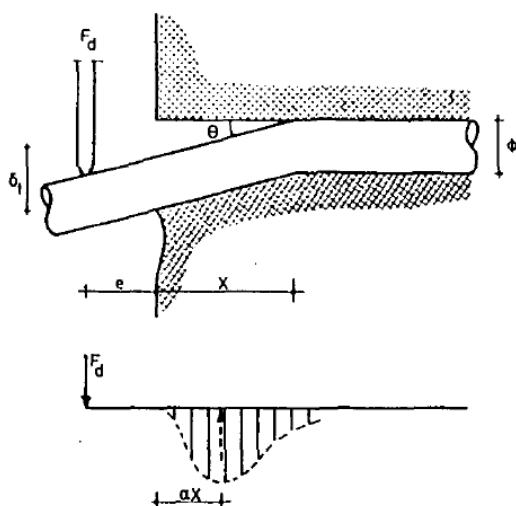
όπου

$$B = C \left( \sqrt{1 + (\varepsilon C)^2} - \varepsilon C \right)$$

$$\varepsilon = 3 \frac{e}{d_b} \sqrt{\frac{f_{ccyl}}{f_{sy}}}$$

$e$ : η εκκεντρότητα του επιβαλλόμενου φορτίου [mm]

$C$ : εμπειρική σταθερά. Για μηδενική εκκεντρότητα ( $e=0$ ) έχει παρατηρηθεί ότι  $C=1.3$



Σχήμα 6.3.5: Μηχανισμός αστοχίας βλήτρου κατά Rasmussen [25]

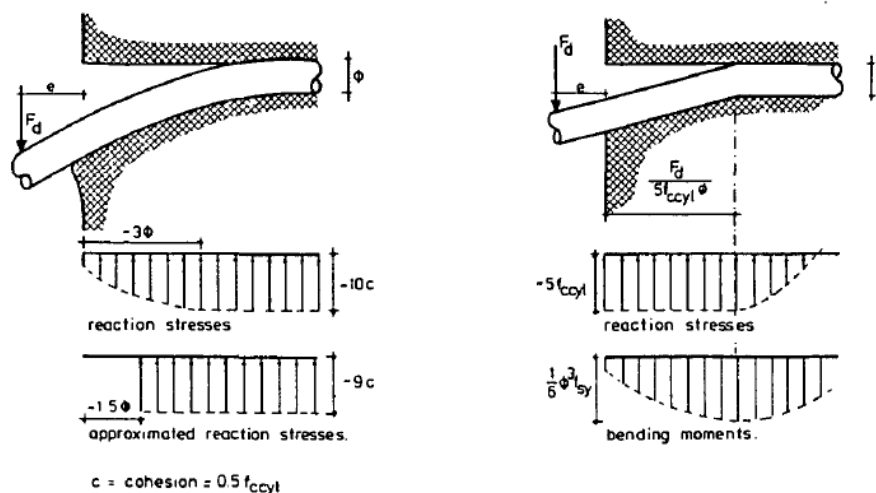
Παρόμοιο μοντέλο προτάθηκε και από τη Βιτζηλαίου [36]. Προσδιορίζεται η έκφραση του οριακού φορτίου κάνοντας τη θεώρηση του βλήτρου ως έναν πάσσαλο εμπηγμένο σε συνεκτικό έδαφος. Στο μοντέλο αυτό δεν απαιτείται η εισαγωγή καμίας εμπειρική σταθεράς. Το έδαφος στην επιφάνεια είναι πιο εύκαμπτο από ότι είναι αυτό που βρίσκεται σε κάποια απόσταση από αυτή. Όμως, εδώ, γίνεται η υπόθεση ότι δεν υπάρχει μείωση της δυσκαμψίας του υλικού στην επιφάνεια ολίσθησης. Για το μηχανισμό αστοχίας (τύπου β) του επόμενου σχήματος προκύπτει η εξής εξίσωση:

$$F_{du}^2 + (10f_{ccyl}ed_b)F_{du} - 1.7d_b^4 f_{ccyl}f_{sy} = 0 \quad (6.3.6)$$

Για μηδενική εκκεντρότητα προκύπτει η ίδια σχέση όπως για τον Rasmussen. Η παραπάνω προσέγγιση τίθεται υπό αμφισβήτηση και αυτό διότι πειράματα έδειξαν

ότι το σκυρόδεμα κοντά στην επιφάνεια ολίσθησης συνθλίβεται, που σημαίνει ότι μειώνεται η δυσκαμψία του υλικού.

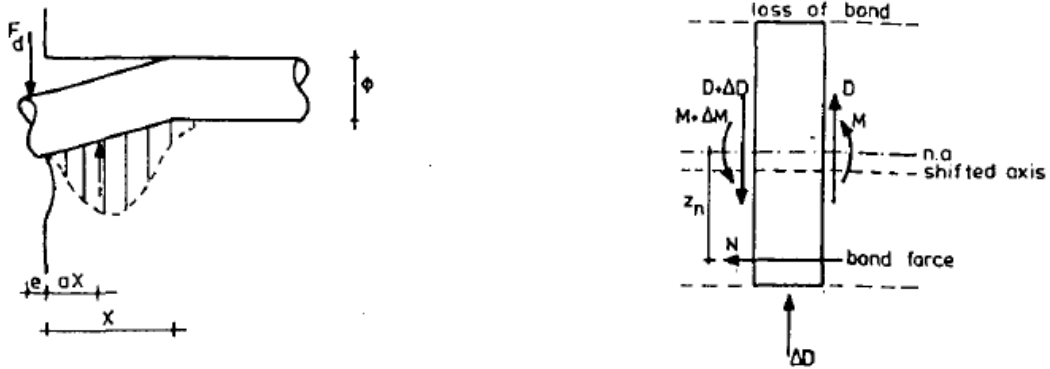
Στο επόμενο σχήμα φαίνονται οι διαφορές στην κατανομή των τάσεων κατά μήκος του βλήτρου ανάμεσα στις δύο προηγούμενες θεωρήσεις.



**Σχήμα 6.3.6:** α. μηχανισμός αστοχίας πασσάλου κατά Broms [3] β. μηχανισμός αστοχίας βλήτρου κατά Βιτζηλαίου [36]

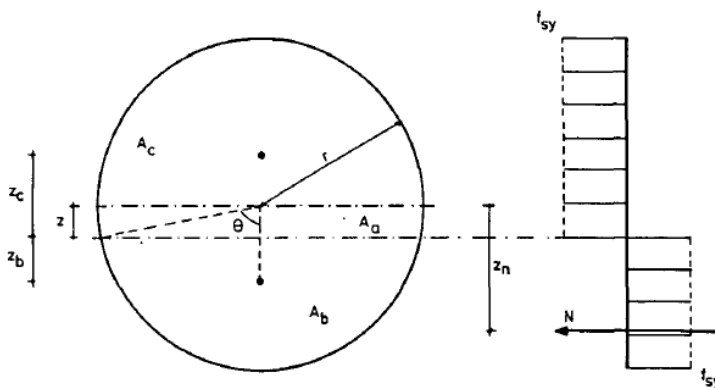
Έτσι, για περαιτέρω ανάλυση του μηχανισμού δράσης βλήτρου θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο του Rasmussen που φαίνεται να περιγράφει καλύτερα την πραγματική εντατική κατάσταση στο βλήτρο.

Σύμφωνα με τη θεωρία της πλαστικότητας, η πλαστική ροπή που αναπτύσσεται σε μια ράβδο κυκλικής διατομής είναι  $0.166d_b^3 f_{sy}$ . Η ροπή αυτή, όμως, αφορά μία ράβδο χάλυβα που είναι γυμνή, δηλαδή που δεν περιβάλλεται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Στην περίπτωση βλήτρου σε οπλισμένο σκυρόδεμα, στη θέση που δημιουργείται η πλαστική άρθρωση, το σκυρόδεμα που περιβάλλει το βλήτρο παραμορφώνεται εξαιτίας της κάθετης μετατόπισης της ράβδου ως προς τον άξονά της. Κατά συνέπεια, η συνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος στο άνω τμήμα της ράβδου χάνεται. Αντίθετα, στο κάτω τμήμα της ράβδου, στη διεύθυνση του διατμητικού φορτίου θα αναπτυχθεί ακόμα πιο δυνατή συνάφεια από την αρχική λόγω των υψηλών τάσεων αντίδρασης.



**Σχήμα 6.3.7:** α. μηχανισμός αστοχίας λόγω πλαστικοποίησης της διατομής της ράβδου σε απόσταση  $X$  από τη διεπιφάνεια β. κατάσταση ισορροπίας στην πλαστική άρθρωση

Εξαιτίας της αξονικής δύναμης λόγω συνάφειας ο ουδέτερος άξονας της ράβδου θα μετατοπιστεί προς τα κάτω κατά  $z$ . Προκειμένου να έχουμε ισορροπία δυνάμεων στη διατομή που σχηματίζεται πλαστική άρθρωση πρέπει η δύναμη αυτή να ισούται με  $2A_\alpha f_{sy}$ .



$$\sum N = 0 \Rightarrow (A_a + A_c)f_{sy} = (A_b + 2A_a)f_{sy}$$

$$\sum M = 0 \Rightarrow (A_a + A_c)f_{sy}z_n = A_b f_{sy}z_b + 2A_a f_{sy}(z_n - z)$$

όπου

$$A_\alpha = \frac{\pi}{2}r^2 - A_b$$

$$A_b = r^2[\theta - 0.5 \sin(2\theta)]$$

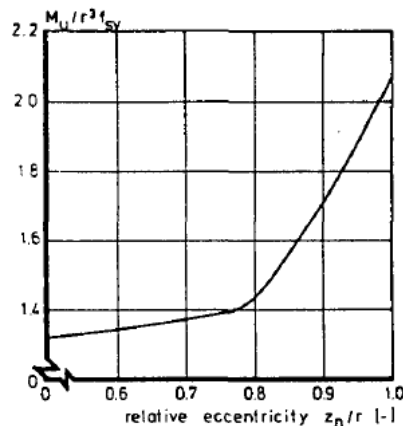
$$A_c = 0.5\pi r^2$$

$$z_b = \frac{0.67r^3 \sin^3 \theta}{A_b} - z$$

$$z_b = \frac{0.67r^3 \sin^3 \theta}{A_a + A_c} + z$$

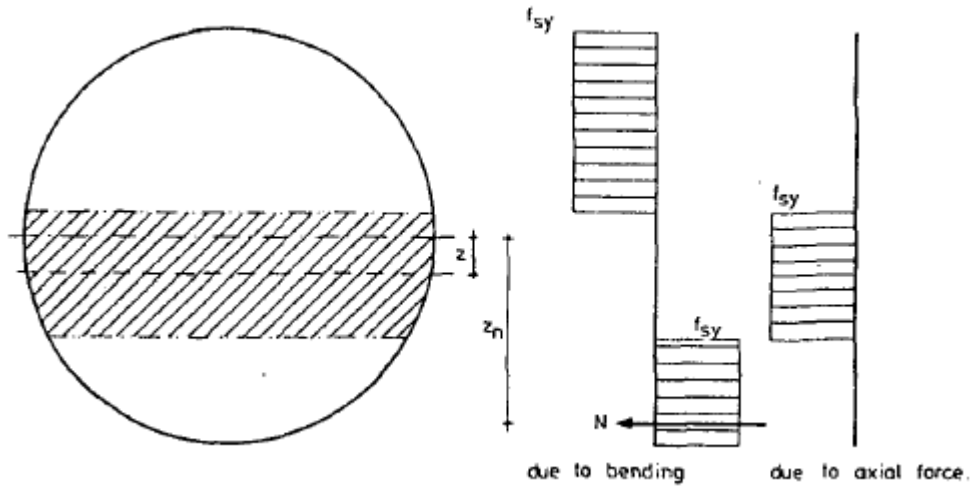
Η πλαστική ροπή μπορεί τώρα να υπολογιστεί ως συνάρτηση της απόστασης  $z_n$ . Η μετακίνηση του ουδέτερου άξονα μπορεί να προσδιοριστεί αν γνωρίζουμε την εκκεντρότητα της δύναμης λόγω συνάφειας. Η εκκεντρότητα, βέβαια, σχετίζεται με την κατανομή των τάσεων συνάφειας η οποία δεν είναι ακριβώς γνωστή, αλλά μπορεί να προσδιοριστεί με επαρκή ακρίβεια.

Το επόμενο διάγραμμα δείχνει την πλαστική ροπή σε συνάρτηση με την εκκεντρότητα της δύναμης λόγω συνάφειας.



**Σχήμα 6.3.8:** Η πλαστική ροπή ως συνάρτηση της εκκεντρότητας της αξονικής δύναμης λόγω συνάφειας

Το μοντέλο του Rasmussen πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την περίπτωση που έχουμε ταυτόχρονη παρουσία διατμητικών και αξονικών τάσεων στη ράβδο που διαπερνά μια διεπιφάνεια. Στην πραγματικότητα, πάντα έχουμε ταυτόχρονη δράση αξονικών τάσεων γιατί ο σπλισμός παραμορφώνεται αξονικά εξαιτίας της αύξησης του εύρους της ρωγμής λόγω της σχετικής ολίσθησης των παρειών της διεπιφάνειας. Κατά συνέπεια, η αυξανόμενη εφελκυστική αξονική δύναμη του σπλισμού θα επηρεάσει την ισορροπία των δυνάμεων και την καμπτική ροπή στη ράβδο. Η αξονική δύναμη θα ισορροπεί με τις αξονικές τάσεις κοντά στον μετατοπισμένο ουδέτερο άξονα της διατομής της ράβδου, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



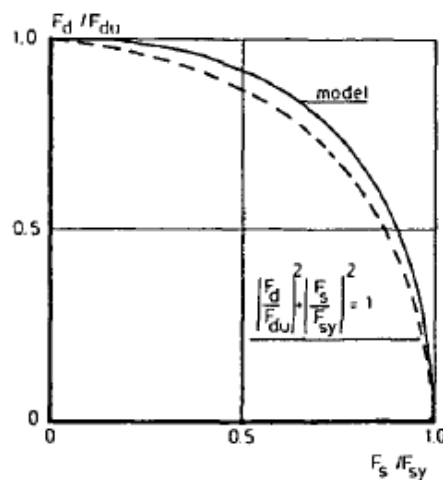
Σχήμα 6.3.9: Ισοροπία αξονικών δυνάμεων στην πλαστική άρθρωση

Η αλληλεπίδραση της αξονικής δύναμης της ράβδου με την μέγιστη δύναμη λόγω δράσης βλήτρου εκφράζεται από την επόμενη σχέση:

$$\left(\frac{F_d}{F_{du}}\right)^n + \left(\frac{F_s}{F_{sy}}\right)^m = 1 \text{ ή } Y_d = \sqrt[n]{1 - \left(\frac{F_s}{F_{sy}}\right)^m} \quad (6.3.7)$$

όπου:  $F_d$  η δύναμη λόγω δράσης βλήτρου  
 $F_{du}$  η μέγιστη δύναμη λόγω δράσης βλήτρου  
 $F_s$  η αξονική δύναμη της ράβδου  
 $F_{sy}$  η δύναμη διαρροής  
 $Y_d = \frac{F_d}{F_{du}}$

Στο επόμενο γράφημα φαίνεται η δύναμη λόγω δράσης βλήτρου ως συνάρτηση της αξονικής δύναμης που καταπονεί τη ράβδο.



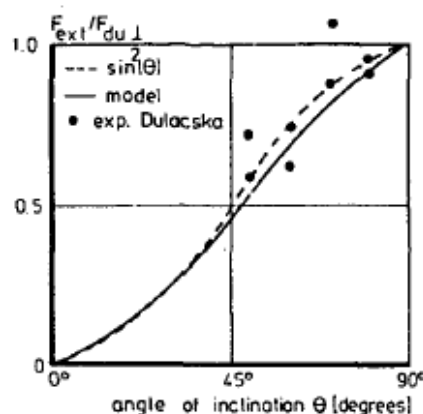
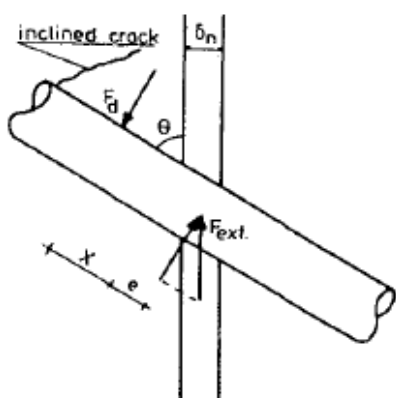
Σχήμα 6.3.10: Μείωση της αντοχής βλήτρου λόγω ταυτόχρονης δράσης αξονικής εφελκυστικής δύναμης

Τέλος, υπάρχει και η περίπτωση που ο οπλισμός δεν διαπερνά τη διεπιφάνεια κάθετα αλλά υπό κάποια γωνία  $\theta$ . Για κεκλιμένες ράβδους, η γωνία  $\theta$  επηρεάζει τη μέγιστη δύναμη λόγω δράσης βλήτρου. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις σχετικά με κεκλιμένες ράβδους.

Πρώτον, για μικρές γωνίες, η συμπεριφορά του περιβάλλοντος σκυροδέματος θα είναι λιγότερο δύσκαμπτη στην επιβαλλόμενη ολίσθηση συγκριτικά με την περίπτωση που οι ράβδοι διαπερνούν κάθετα τη διεπιφάνεια. Αυτό οφείλεται στη λιγότερη ευνοϊκή θέση των ράβδων ως προς τη διεπιφάνεια κάτι που μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό λοξών ρωγμών στο σκυρόδεμα.

Δεύτερον, για μεγάλες γωνίες κλίσης, το σκυρόδεμα θα συμπεριφερθεί πιο δύσκαπτα στην επιβαλλόμενη ολίσθηση. Όμως, στην περίπτωση αυτή θα αναπτυχθεί και μια αξονική δύναμη η οποία θα επηρεάσει το εύρος της δύναμης βλήτρου σύμφωνα με το μοντέλο αλληλεπίδρασης που αναπτύχθηκε παραπάνω.

a. Για γωνίες  $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$



Σχήμα 6.3.11: α. Ράβδος με μικρή γωνία κλίσης  $\theta$ . β. Δύναμη βλήτρου συναρτήσει της γωνίας  $\theta$

Στο προηγούμενο σχήμα φαίνεται μια ράβδος που διαπερνά μια διεπιφάνεια υπό γωνία  $\theta$  και ασκείται σε αυτή μία εξωτερική δύναμη  $F_{ext}$ , παράλληλη στο επίπεδο ολίσθησης. Σύμφωνα με τη Βιντζηλαίου [34], η δύναμη αντίδρασης από το σκυρόδεμα προέρχεται από ένα στρώμα πάχους ίσο με δύο φορές τη διάμετρο της ράβδου ( $2d_b$ ). Για μικρές τιμές της γωνίας  $\theta$  το στρώμα αυτό, κοντά στην διεπιφάνεια, έχει πάχος πολύ λιγότερο από  $2d_b$ . Επιπλέον, μπορεί να εμφανιστούν λοξές ρωγμές στο σκυρόδεμα (σχήμα 6.3.11).

Έτσι, η μέγιστη δύναμη λόγω δράσης βλήτρου θα είναι μικρότερη από αυτή που αναπτύσσεται στην περίπτωση κάθετων ράβδων στη διεπιφάνεια. Η πραγματική κατανομή των τάσεων στο σκυρόδεμα δεν μπορεί να προσδιοριστεί ακριβώς, και έτσι

η αντίδραση στην ολίσθηση υπολογίζεται κατά προσέγγιση σύμφωνα με την σχέση (6.3.8):

$$F_{du} = F_{du,90} \sin(\theta) \quad (6.3.8)$$

Η δύναμη λόγω δράσης βλήτρου της ράβδου έχει εκκεντρότητα  $e$ , η οποία είναι ίση με:

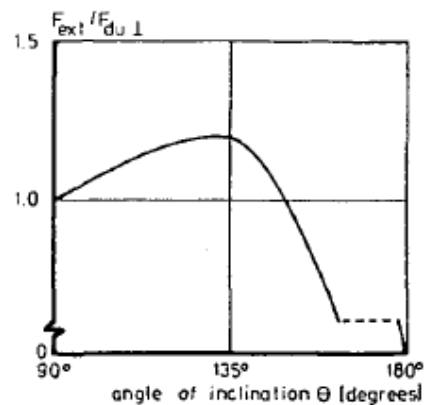
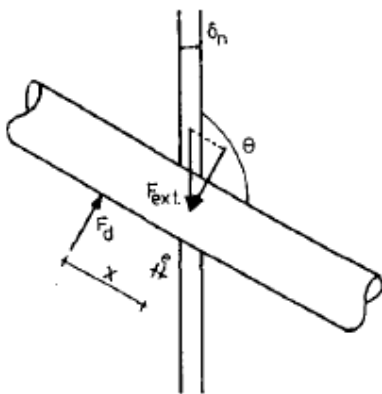
$$e = 0.5d_b \cotan(\theta) + 0.5 \frac{\delta_n}{\sin(\theta)} \approx 0.5d_b \cotan(\theta) \quad (6.3.9)$$

Αφού υπολογιστεί η εκκεντρότητα  $e$  μπορεί να υπολογιστεί η δύναμη  $F_{du,90}$  από τη σχέση (6.3.10):

$$F_{du,90} = 1.35[\sqrt{1 + 9\varepsilon^2} - 3\varepsilon]d_b^2 \sqrt{f_{sy} f_{ccm}} \quad \text{όπου } \varepsilon = \frac{e}{d_b} \sqrt{\frac{f_{ccm}}{f_{sy}}} \quad (6.3.10)$$

και στη συνέχεια η δύναμη αυτή πολλαπλασιάζεται με  $\sin(\theta)$  οπότε προκύπτει η τελική δύναμη λόγω δράσης βλήτρου.

b. Για γωνίες  $90^\circ < \theta < 180^\circ$



Σχήμα 6.3.12: α. Ράβδος με μεγάλη γωνία κλίσης  $\theta$  β. Δύναμη βλήτρου συναρτήσει της γωνίας  $\theta$

Η εκκεντρότητα που δημιουργείται έχει αρνητικό πρόσημο. Η απόκριση του σκυροδέματος στην ολίσθηση θα είναι πιο δύσκαμπτη. Παρόλα αυτά, εξαιτίας του γεγονότος ότι η αύξηση της δυσκαμψίας περιορίζεται στην περιοχή που γειτνιάζει με την επιφάνεια ολίσθησης, μπορούμε να την παραβλέψουμε.

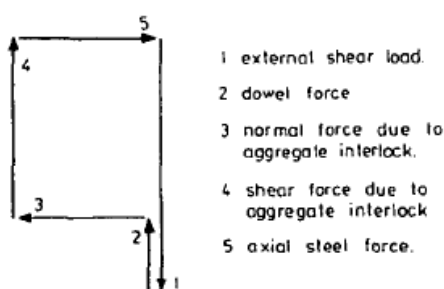
Η εκκεντρότητα δίνεται από τη σχέση (6.3.11):

$$e = -0.5d_b \tan(\theta - 0.5\pi) \quad (6.3.11)$$

Ταυτόχρονα με τη δύναμη λόγω δράσης βλήτρου θα αναπτυχθεί και μια αξονική επηρεάζοντας το μέγεθος της  $F_{du}$ . Η αξονική αυτή ισούται με  $F_d \tan(\theta - 0.5\pi)$ . Έτσι η δύναμη βλήτρου προκύπτει από συνδυασμό της εξίσωσης για ταυτόχρονη δράση αξονικής δύναμης και της σχέσης που δίνει την  $F_{du,90}$ .

#### 6.4.ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ

Τα πειράματα των Vintzileou [35] και Millard [21] έχουν ήδη δείξει ότι ο συνδυασμός των μηχανισμών αλληλοεμπλοκής αδρανών και δράσης βλήτρου είναι κατάλληλος για την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής ρηγματωμένου σκυροδέματος σύμφωνα με την κατάσταση ισορροπίας που φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Ωστόσο, για πειράματα στα οποία εξετάστηκαν δοκίμια με πολύ μικρό αρχικό πλάτος ρωγμής όπως αυτά του Walraven τα μοντέλα των Vintzileou και Millard υποτιμούν την αντοχή διατμήσεως της επιφάνειας ολίσθησης που αναπτύσσεται.



Σχήμα 6.4.1: Η κατάσταση ισορροπίας για ρηγματωμένο σκυρόδεμα

Προκείμενου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παραπάνω κατάσταση ισορροπίας πρέπει να είναι γνωστή η σχέση ανάμεσα στην αξονική δύναμη που καταπονεί τη ράβδο και το πλάτος της ρωγμής. Η τιμή της αξονικής δύναμης του οπλισμού μπορεί να υπολογιστεί από ισορροπία με τη κάθετη στη διεπιφάνεια δύναμη που οφείλεται στο μηχανισμό αλληλοεμπλοκής αδρανών.

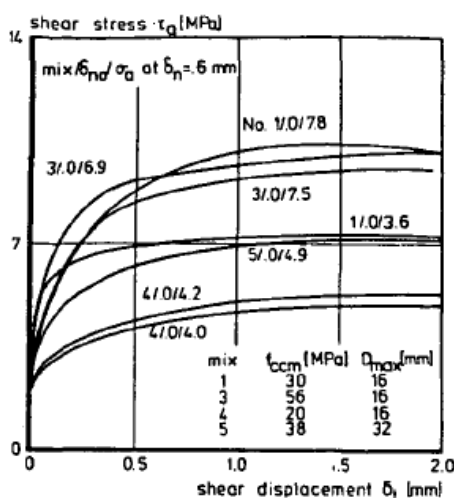
Στην ενότητα αυτή θα γίνει λόγος για το συνδυασμό των μηχανισμών αλληλοεμπλοκής αδρανών και δράσης βλήτρου λαμβάνοντας υπόψη την τιμή του πλάτους της ρωγμής.

Από πειράματα προέκυψε ότι ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσεται μια ρωγμή με την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου δεν εξαρτάται από το ποσοστό του οπλισμού που την διαπερνά ούτε από τη διάμετρο των ράβδων που χρησιμοποιούνται. Αντίθετα, υπάρχει εξάρτηση από την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και εν μέρει από τη μέγιστη διάμετρο αδρανών. Τα παραπάνω



υποδεικνύουν ότι ο μηχανισμός αλληλοεμπλοκής αδρανών είναι αυτός που εν μέρει επηρεάζει το άνοιγμα μιας ρωγμής και όχι ο μηχανισμός δράσης βλήτρου και αυτό γιατί ο δεύτερος δεν σχετίζεται με το μέγεθος των αδρανών.

Το σχήμα 6.4.2 δείχνει τα αποτελέσματα δοκιμών που έγιναν σε δοκίμια με πολύ μικρό εύρος (<0.1mm) με παραμέτρους την αντοχή του σκυροδέματος και τη μέγιστη διάμετρο των αδρανών. Μετά από μια τιμή της διατμητικής ολίσθησης (περίπου 1.0mm) φαίνεται ότι το φορτίο αντίστασης παίρνει σταθερή τιμή. Είναι προφανές ότι η αύξηση στην τιμή της ολίσθησης επιφέρει πτώση του ρυθμού αύξησης του φορτίου αντίστασης μέχρι που η τιμή του τελικά σταθεροποιείται. Μόνο σε λίγες δοκιμές το φορτίο αντοχής εμφάνισε πτώση.



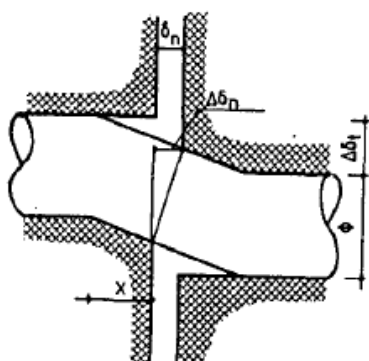
Σχήμα 6.4.2: Διατμητική τάση συναρτήσει της ολίσθησης

Παρόλα αυτά, έγινε προφανές ότι ο μηχανισμός αλληλοεμπλοκής αδρανών μπορεί να δώσει μια πρόβλεψη σχετικά με τη διεύθυνση μιας ρωγμής μόνο αφού σταθεροποιηθεί η τιμή των διατμητικών τάσεων, δηλαδή αφού έχει αναπτυχθεί το μέγιστο φορτίο. Για τη φάση κατά την οποία το φορτίο αυξάνεται συνεχώς λόγω της συνεισφοράς του μηχανισμού δράσης βλήτρου, η πλαστική άρθρωση στις ράβδους σπλισμού είναι ακόμη υπό ανάπτυξη (σταδιακά πλαστικοποιείται όλο και μεγαλύτερο μέρος της διατομής). Έτσι, οι ράβδοι σαφώς θα επηρεάσουν τον τρόπο με τον οποίο θα αναπτυχθεί μια ρωγή. Λαμβάνοντας αυτή την επιρροή υπόψη, η παραμόρφωση της ράβδου λόγω δράσης βλήτρου μπορεί να προσεγγιστεί σχηματικά στο επόμενο σχήμα στο οποίο φαίνεται ότι η κάθετη στον άξονα μετατόπιση (διατμητική ολίσθηση) προκαλείται από περιστροφή της ράβδου περί την πλαστική άρθρωση. Η σχέση που συνδέει το πλάτος της ρωγμής με την ολίσθηση είναι:

$$\frac{\Delta\delta_t}{\Delta\delta_n} = \frac{X+0.5\delta_n}{0.5d_b} \cong \frac{2X}{d_b} \quad (6.4.1)$$

Η τιμή του μεγέθους  $X$  προσδιορίζεται πειραματικά από τις δοκιμές που έγιναν από τον Rasmussen και δίνεται από τη σχέση:

$$X = 0.318d_b \sqrt{\frac{f_{sy}}{f_{ccm}}} \quad (6.4.2)$$



Αντικαθιστώντας την έκφραση του  $X$  στην προηγούμενη εξίσωση έχουμε:

$$\frac{\Delta\delta_t}{\Delta\delta_n} = 0.736 \sqrt{\frac{f_{sy}}{f_{ccm}}} \quad (6.4.3)$$

Η προηγούμενη εξίσωση δίνει μια ικανοποιητική προσέγγιση των χαρακτηριστικών μιας ρωγμής. Είναι προφανές ότι το αρχικό άνοιγμα της ρωγμής πριν την επιβολή της φόρτισης καθώς και η αξονική δύναμη της ράβδου, θα επηρεάσουν τόσο το πόσο θα διευρυνθεί η ρωγμή όσο και την ολίσθηση. Έτσι προκύπτει η ακόλουθη εμπειρική εξίσωση:

$$\delta_t = \sqrt{\frac{\delta_{no} f_{sy}}{2f_{ccm}}} (\delta_n - \delta_{no})^{0.667} \quad (6.4.4)$$

όπου  $\delta_{no}$  το αρχικό πλάτος της ρωγμής

Εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης δίνει διάφορους συνδυασμούς ολίσθησης και πλάτους ρωγμής. Το μοντέλο δύο φάσεων, που περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί, έτσι ώστε να υπολογιστεί η συνεισφορά του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών στην μεταφορά τέμνουσας.

Όσον αφορά, τώρα, δοκίμια στα οποία εμφανίστηκε πτώση του μέγιστου φορτίου, σημειώνεται ότι από την έναρξη της πτώσης και μετά, τα χαρακτηριστικά της ρωγμής καθορίζονται αποκλειστικά από το μηχανισμό αλληλοεμπλοκής αδρανών. Η συμμετοχή της δράσης βλήτρου είναι μηδαμινή γιατί πλέον έχει αναπτυχθεί πλήρως πλαστική άρθρωση πάνω στο βλήτρο.

Κατά τη φάση της αύξησης της διατμητικής τάσης, η συμμετοχή του μηχανισμού δράσης βλήτρου στην ανάληψη διάτμησης επίσης αυξάνεται. Δίνεται η ακόλουθη εμπειρική σχέση:

$$\frac{F_d}{F_{du}} = \sqrt[3]{\frac{\delta_t}{\delta_{no} + \delta_{t,e}}} < 1 \quad (6.4.5)$$

όπου  $\delta_{t,e}$  η μέγιστη τιμή της ολίσθησης πριν τη διαρροή του βλήτρου.

Για πολύ μικρό πλάτος ρωγμής λαμβάνεται ελάχιστη τιμή για  $\delta_{no}=0.1\text{mm}$ . Από πειραματικά αποτελέσματα προέκυψε ότι η  $\delta_{t,e}$  εμφανίζεται για 41% του μέγιστου φορτίου.

$$\delta_{t,e} = \frac{2Fd}{2\beta^3 EI} \quad (6.4.6)$$

$$\text{με } \beta = \sqrt[4]{\frac{K_f d_b}{4EI}}$$

Για μεγάλο εύρος αρχικής ρωγμής η τιμή της ολίσθησης συγκριτικά με το εύρος της αρχικής ρωγμής είναι μικρή (αν για παράδειγμα μια ρωγμή έχει πλάτος 1mm η τιμή της ολίσθησης μπορεί να είναι περίπου 0.1mm).

Οι ράβδοι που διαπερνούν το επίπεδο της ρωγμής παρεμποδίζουν την αύξηση του εύρους της μέσω της αξονική δύναμης που δρα ως αντίδραση στη δύναμη που οφείλεται στην αλληλοεμπλοκή των αδρανών. Η δύναμη αυτή αυξάνεται καθώς αυξάνεται η τιμή της σχετική ολίσθησης μέχρι το σημείο εκείνο που οι ράβδοι διαρρέουν, οπότε αναπτύσσεται η μέγιστη δύναμη των ράβδων. Μετά το σημείο αυτό, τα χαρακτηριστικά μιας αναπτυσσόμενης ρωγμής εξαρτώνται μόνο από την αξονική δύναμη που οφείλεται στο μηχανισμό αλληλοεμπλοκής αδρανών. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το μοντέλο δύο φάσεων: μετά τη διαρροή των ράβδων, η αύξηση του πλάτους της ρωγμής είναι μεγαλύτερη από την αύξηση της ολίσθησης με αποτέλεσμα να μειώνονται οι επιφάνειες επαφής των αδρανών που εξέχουν από της δύο παρειές της επιφάνειας ολίσθησης. Συνέπεια αυτού είναι η εισαγόμενη από το μηχανισμό αλληλοεμπλοκής αδρανών δύναμη να μειώνεται και σε κάποια μεταγενέστερη φάση να ισορροπεί με την δύναμη διαρροής του οπλισμού. Εξαιτίας της μείωσης των επιφανειών επαφής η διατμητική δύναμη μειώνεται επίσης. Η μείωση της διατμητικής δύναμης είναι μικρότερη από τη μείωση της αξονικής. Η μείωση αυτή αποτυπώνεται στην επόμενη σχέση:

$$Y_a = \frac{f_{sy}}{\sigma_s} = \frac{\rho f_{sy}}{\sigma_a} \quad (6.4.7)$$

όπου:  $\sigma_a$  η ορθή τάση που οφείλεται στον μηχανισμό αλληλοεμπλοκής αδρανών

Για τον υπολογισμό της ορθής και διατμητικής τάσης που αναπτύσσονται σε μια διεπιφάνεια υπό την ταυτόχρονη δράση των μηχανισμών αλληλοεμπλοκής αδρανών και δράσης βλήτρου του οπλισμού προτείνονται οι εξής σχέσεις:

$$\tau_{cal} = Y_a \tau_a + Y_d \tau_d \quad (6.4.8)$$

$$\sigma_{cal} = Y_a \sigma_a \quad (6.4.9)$$

Εκτός του προηγούμενου προσομοιώματος, προτείνονται και τα επόμενα, τα οποία είναι πιο απλά στην εφαρμογή τους.

#### A. Mattock (1974)

Η εξίσωση που προτείνει ο Mattock [26] για τον υπολογισμό της μεταφερόμενης διατμητικής τάσης σε μια διεπιφάνεια αποτελεί προσαρμογή του μοντέλου διάτμησης – τριβής στα πειράματα τα οποία πραγματοποίησε. Έτσι η μέγιστη διατμητική τάση δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$v_u = 2.76 + 0.8(\rho f_y + \sigma_n) \text{ [MPa]} \quad (6.4.10)$$

όπου  $v_u$  είναι η μέγιστη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια,  $\rho$  το ποσοστό οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια,  $f_y$  η τάση διαρροή του οπλισμού και  $\sigma_n$  η ορθή τάση που ασκείται στη διεπιφάνεια.

Πρέπει να αναφερθεί ότι ο πρώτος όρος στην παραπάνω εξίσωση αναφέρεται στην συνάφεια και το μηχανισμό αλληλοεμπλοκής αδρανών και ο δεύτερος όρος στο μηχανισμό τριβής. Όπως έγινε φανερό στη συνέχεια, η συνάφεια δεν μπορεί να είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

Η παραπάνω εξίσωση πρέπει να πληροί τους εξής περιορισμούς:

$$v_u < 0.3f_c \text{ και} \\ \rho f_y > 1.38 \text{ MPa}$$

Στην περίπτωση που ο οπλισμός διαπερνά την διεπιφάνεια υπό κάποια γωνία  $\theta$ , και όχι κάθετα, ισχύουν οι επόμενες τροποποιημένες σχέσεις:

$$v_u = 2.76 \sin^2 \theta + \rho f_s (0.8 \sin^2 \theta - 0.5 \sin(2\theta)) < 0.3f_c \text{ [MPa]} \quad (6.4.11)$$

Η τάση του χάλυβα οπλισμού έχει υπολογιστεί από πειράματα και εξαρτάται από την τιμή της γωνίας  $\theta$  και δίνεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$f_s = 0, \quad 0 < \theta \leq 51.3^\circ \\ f_s = -1.6f_y \cos(\theta + 38.7^\circ), \quad 51.3^\circ \leq \theta < 90^\circ \\ f_s = f_y, \quad 90^\circ \leq \theta < 180^\circ$$

## B. Raml (1997)

Ο Raml [26] συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό στη βελτίωση των σχέσεων για τον υπολογισμό της διατμητικής τάσης σχεδιασμού που μεταφέρεται στην διεπιφάνεια μεταξύ δύο στοιχείων από σκυροδέμα. Η εξίσωση του Raml περιλαμβάνει τη συμβολή της συνοχής, της τριβής και της δράσης βλήτρου του οπλισμού.

Ο όρος συνοχή αναφέρεται στην αλληλοεμπλοκή των αδρανών, η τριβή προέρχεται από τη σχετική ολίσθηση των παρειών της διεπιφάνειας και επηρεάζεται από την τραχύτητά της και την κάθετη στη διεπιφάνεια ορθή τάση και η δράση βλήτρου αναφέρεται στην τάση που αναπτύσσεται λόγω της εγκάρσιας παραμόρφωσης του οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια. Η διατμητική τάση που μεταφέρεται στη διεπιφάνεια δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$v_u = \tau_{coh} + \mu \sigma_n + a \rho \sqrt{f_c f_y} \quad (6.4.12)$$

όπου:  $v_u$ : η μέγιστη διατμητική τάση που μεταφέρεται στη διεπιφάνεια  
 $\tau_{coh}$ : η συνοχή του σκυροδέματος λόγω του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών  
 $\sigma_n$ : η κάθετη τάση στη διεπιφάνεια  
 $a$ : σταθερά για να ληφθεί υπόψη η δράση βλήτρου του οπλισμού  
 $\rho$ : το ποσοστό οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια  
 $f_c$ : η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος  
 $f_y$ : η τάση διαρροής του χάλυβα του οπλισμού

Η παραπάνω σχέση, αν εισάγουμε και τους συντελεστές ασφαλείας, γίνεται:

$$v_u = c \frac{f_{ck}^{1/3}}{\gamma_{coh}} + \mu \left( \rho k \frac{f_{yk}}{\gamma_s} + \sigma_n \right) + a \rho \sqrt{\frac{f_{yk} f_{ck}}{\gamma_s \gamma_c}} \leq \beta v \frac{f_{ck}}{\gamma_s} \quad (6.4.13)$$

όπου:  $v_u$ : η μέγιστη διατμητική τάση που μεταφέρεται στη διεπιφάνεια  
 $f_{ck}$ : η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος  
 $\gamma_{coh}$ : ο συντελεστής ασφαλείας για την συνοχή του σκυροδέματος (ίσος με 1.2)  
 $\mu$ : ο συντελεστής τριβής  
 $\rho$ : το ποσοστό οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια  
 $k$ : συντελεστής αποδοτικότητας του οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια (δείχνει την ικανότητα του κάθετου στη διεπιφάνεια οπλισμού να παραλάβει εφελκυσμό)  
 $\beta$ : σταθερά που σχετίζεται με τη γωνία του διαγώνιου θλιπτήρα

$$v = 0.55 \cdot \frac{30^{1/3}}{f_{ck}} \leq 0.55 \text{ ο μειωτικός συντελεστής της αντοχής του διαγώνιου θλιπτήρα}$$

Στον επόμενο πίνακα δίνονται οι τιμές για τις παραπάνω σταθερές:

**Πίνακας 6.4.1:** Τιμές συντελεστών για το προσομοίωμα του Randl [26]

Προετοιμασία διεπιφάνειας	Συνοχή c	Συντελεστής τριβής (μ)		k	α	β
		$f_{ck} \geq 20 \text{MPa}$	$f_{ck} \geq 35 \text{MPa}$			
Υδροβολή υψηλής πίεσης	0.4	0.8	1.0	0.5	0.9	0.4
Αμμοβολή	0.0	0.7	0.7	0.5	1.1	0.3
Λεία διεπιφάνεια	0.0	0.5	0.5	0.0	1.5	0.2

### C. Mansur, Vinayagam and Tan (2008)

Αρχική υπόθεση για την εξαγωγή μιας εξίσωσης που να υπολογίζει την διατμητική τάση αντίστασης σε μια διεπιφάνεια είναι ότι αυτή δίνεται από την εξίσωση [26]:

$$v_u = A f_c \left( \frac{\rho f_y}{f_c} \right)^\alpha$$

Κάνοντας πολλαπλή παλινδρόμηση στα αποτελέσματα 154 δοκιμών με αντοχή σκυροδέματος μεταξύ 18 και 100 MPa και τιμή αδιάστατου παράγοντα  $\rho \frac{f_y}{f_c}$  από 0.02 μέχρι 0.39, προέκυψε ότι  $A=0.566$  και  $\alpha=0.5$ . Επομένως, η προηγούμενη εξίσωση παίρνει την ακόλουθη μορφή:

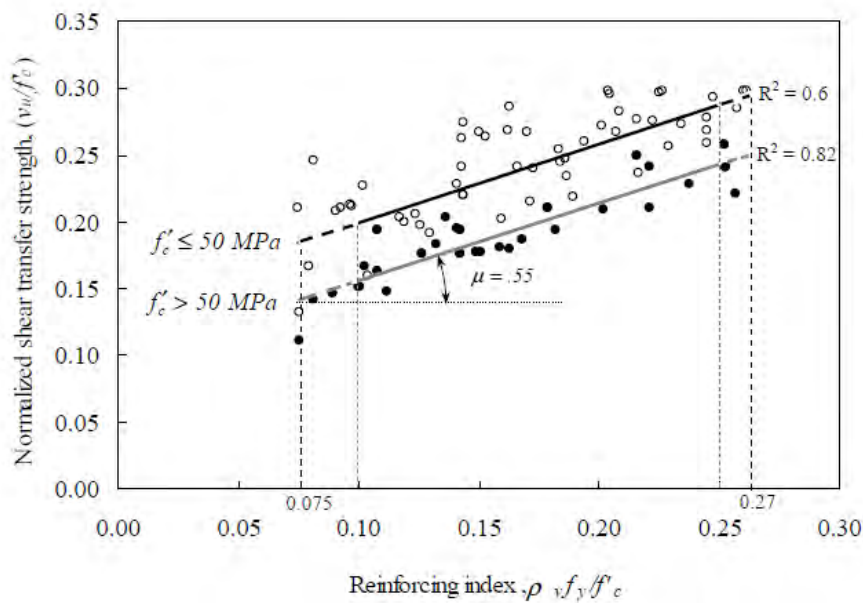
$$v_u = 0.566 f_c \left( \frac{\rho f_y}{f_c} \right)^{0.5}$$

Η εφαρμογή της εξίσωσης αυτής στα πειράματα έδωσε μέση τιμή του λόγου  $\frac{V_{cal}}{V_{exp}}$  ίση με 1.00 (οι τιμές κυμαίνονταν μεταξύ 0.604 και 1.50) και η τυπική απόκλιση είναι ίση με 0.164.

Αργότερα, διαπιστώθηκε ότι η παραπάνω εξίσωση δίνει μη ασφαλή αποτελέσματα για μικρές τιμές του αδιάστατου παράγοντα  $\rho \frac{f_y}{f_c}$ . Επίσης, τίθεται ένα όριο για το οποίο η τάση αντίστασης δεν αυξάνεται. Έτσι για την περίπτωση αυτή προκύπτει:

$$\frac{v_u}{f_c} = 0.3, \text{ για } \frac{\rho f_y}{f_c} \geq 0.270$$

Στο σημείο αυτό αποφασίστηκε να γίνει τριγωνική θεώρηση της σχέσης που δίνει τη μέγιστη διατμητική τάση ανάλογα με την τιμή του  $\rho \frac{f_y}{f_c}$ . Για το σκοπό αυτό, τα δοκίμια χωρίστηκαν σε δύο μικρότερες ομάδες ανάλογα με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Η μία ομάδα είχε δοκίμια με  $f_c < 50 \text{ MPa}$  και η άλλη ομάδα δοκίμια με  $f_c > 50 \text{ MPa}$ . Στα αποτελέσματα των δοκιμών προσαρμόστηκε μια γραμμική συνάρτηση.



**Σχήμα 6.4.3:** Σχέση διατμητικής τάσης – τάσης οπλισμού  $\rho f_{sy}$  (μεγέθη διαιρεμένα με την αντοχή του σκυροδέματος)

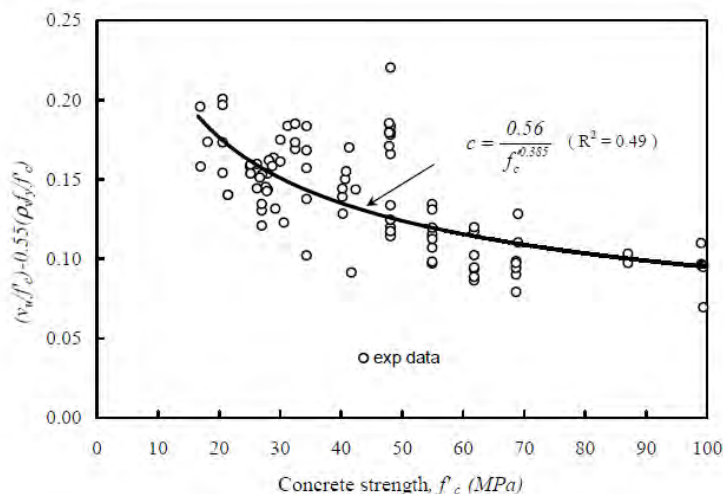
Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως η σχέση  $\frac{v_u}{f_c}$  και  $\frac{\rho f_{sy}}{f_c}$  είναι γραμμική και για τις δύο ομάδες δοκιμών για  $0.1 \leq \frac{\rho f_{sy}}{f_c} \leq 0.25$ . Από αυτή την παρατήρηση τα προηγούμενα όρια επεκτάθηκαν και έτσι τα νέα όρια είναι  $0.075 \leq \frac{\rho f_{sy}}{f_c} \leq 0.27$ .

Η κλίση της ευθείας αντιστοιχεί στον συντελεστή τριβής  $\mu$  και η τομή της ευθείας με τον κατακόρυφο άξονα των τιμών  $\frac{v_u}{f_c}$  ισούται με τον συντελεστή συνοχής  $c$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής τριβής  $\mu$  βρέθηκε και για τις δύο ομάδες ίδιος ( $\mu=0.55$ ). Αυτό σημαίνει ότι είναι ανεξάρτητος από τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Αντίθετα, ο συντελεστής  $c$  εξαρτάται από την αντοχή του σκυροδέματος και για το λόγο αυτό πρέπει να εκφραστεί ως συνάρτησή της.

Επομένως:

$$c = \frac{v_u}{f_c} - 0.55 \left( \frac{\rho f_{sy}}{f_c} \right)$$

Εφαρμόζοντας τη σχέση αυτή στα πειράματα προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα:



**Σχήμα 6.4.4:** Προσδιορισμός όρου συνάφειας στη σχέση υπολογισμού της μέγιστης διατμητικής τάσης που μεταφέρεται στη διεπιφάνεια

Προσαρμόζοντας μια καμπύλη στις τιμές των πειραματικών αποτελεσμάτων προκύπτει ότι

$$c = \frac{0.56}{f_c^{0.385}}$$

Επομένως για  $0.075 \leq \frac{\rho f_{sy}}{f_c} \leq 0.27$  ισχύει η σχέση  $\frac{v_u}{f_c} = \frac{0.56}{f_c^{0.385}} + 0.55 \frac{\rho f_y}{f_c}$ .

Για  $\frac{\rho f_{sy}}{f_c} \leq 0.075$  προσαρμόζοντας μια γραμμική συνάρτηση στα αποτελέσματα των πειραμάτων προκύπτει η σχέση:  $\frac{v_u}{f_c} = 2.5 \frac{\rho f_y}{f_c}$ .

Συνοψίζοντας έχουμε:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{v_u}{f_c} = 2.5 \frac{\rho f_y}{f_c}, \quad \text{για } \frac{\rho f_y}{f_c} \leq 0.075 \\ \frac{v_u}{f_c} = \frac{0.56}{f_c^{0.385}} + 0.55 \frac{\rho f_y}{f_c}, \quad \text{για } 0.075 \leq \frac{\rho f_y}{f_c} \leq 0.270 \\ \frac{v_u}{f_c} = 0.3, \quad \text{για } \frac{\rho f_y}{f_c} \geq 0.270 \end{array} \right. \quad (6.4.14)$$



## 6.5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η μεταφορά διατμητικών δυνάμεων υπό μονοτονική φόρτιση γίνεται μέσω των μηχανισμών δράσης βλήτρου και αλληλοεμπλοκής αδρανών. Η αλληλεπίδραση των δύο αυτών μηχανισμών προσδιορίζεται από την ισορροπία των κάθετων στην επιφάνεια ολίσθησης δυνάμεων που εισάγονται από αυτούς.
- Η δράση βλήτρου εξαρτάται από το βαθμό συνάφειας που επιτυγχάνεται ανάμεσα σε οπλισμό και σκυρόδεμα. Η δύναμη συνάφειας που αναπτύσσεται παράλληλα στον άξονα της ράβδου έχει ως αποτέλεσμα την μετατόπιση του ουδέτερου άξονα της διατομής της ράβδου. Έτσι, η πλαστική ροπή που αναπτύσσεται είναι αρκετά αυξημένη σε σχέση με αυτή που αναπτύσσεται σε μια ράβδο γυμνή.
- Για αυξανόμενο αξονικό φορτίο της ράβδου, η μετατόπιση του ουδέτερου άξονα μειώνεται και έτσι ελαττώνεται και η δύναμη λόγω δράσης βλήτρου.
- Τα χαρακτηριστικά μιας ρωγμής επηρεάζονται από το μηχανισμό δράσης βλήτρου μέχρι την τιμή του φορτίου για το οποίο σχηματίζεται πλήρως πλαστική άρθρωση στη ράβδο. Από το σημείο αυτό και μετά, η διεύθυνση που θα αναπτυχθεί η ρωγμή οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στο μηχανισμό αλληλοεμπλοκής αδρανών.
- Το μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε για τη συνδυασμένη δράση των μηχανισμών αλληλοεμπλοκής αδρανών και δράσης βλήτρου του οπλισμού μπορεί να εφαρμοστεί ανεξάρτητα από την αρχική τιμή του ανοίγματος της ρωγμής.

## **7. ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΠΟΥ ΔΡΟΥΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΜΙΑΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ**

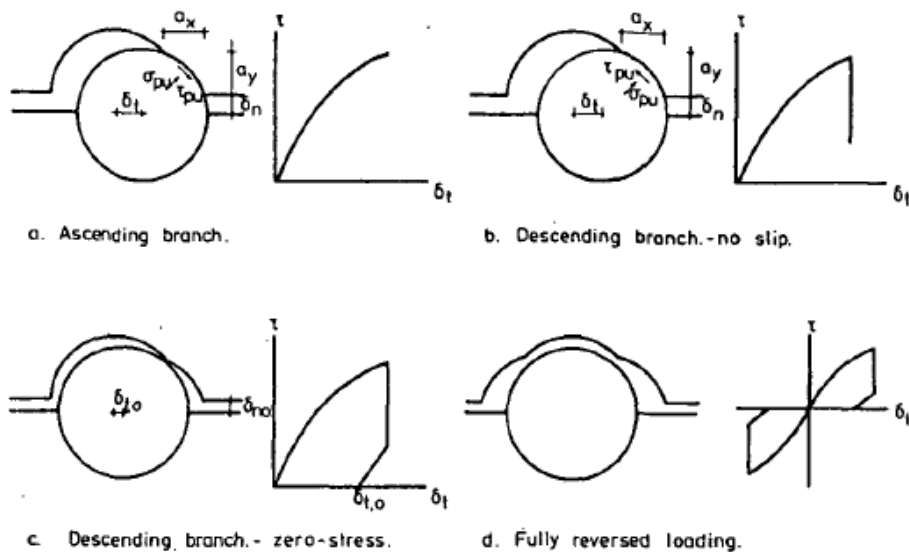
Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων υπό στατικές συνθήκες φόρτισης θα προσαρμοστούν για την περίπτωση ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Παρόλο που η απόκριση της επιφάνειας ολίσθησης είναι ίδια, για πρακτικούς λόγους, θα γίνει διάκριση ανάμεσα σε δοκιμές υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση χαμηλής έντασης και σε δοκιμές υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση υψηλής έντασης. Για πειράματα χαμηλής έντασης η αύξηση της διατμητικής ολίσθησης από κύκλο σε κύκλο φόρτισης είναι πολύ μικρή για να μπορέσει να αποδοθεί με ακρίβεια από αριθμητικά μοντέλα. Αντίθετα, για δοκιμές υψηλής έντασης, η αύξηση της διατμητικής ολίσθησης μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια με αριθμητικές μεθόδους.

Επομένως, οι δοκιμές χαμηλής έντασης θα εξεταστούν υπό το πρίσμα της γενικής συμπεριφοράς ρηγματωμένου σκυροδέματος στο οποίο δρα διατμητικό φορτίο, ενώ, οι δοκιμές υψηλής έντασης θα περιγραφούν χρησιμοποιώντας τα φυσικά μοντέλα που θα αναφερθούν λεπτομερώς παρακάτω.

Αρχικά, θα γίνει περιγραφή του κάθε μηχανισμού μεταφοράς διατμητικών τάσεων σε μια διεπιφάνεια και στο τέλος θα αναλυθεί η γενική συμπεριφορά ρηγματωμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

## 7.1.ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΛΛΗΛΕΜΠΛΟΚΗΣ ΑΔΡΑΝΩΝ

Η ανάλυση της απόκρισης της ρωγμής υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση μεγάλου εύρους μπορεί να εξηγήσει τη συμπεριφορά του ρηγματωμένου σκυροδέματος εξαιτίας των μεγάλων μετατοπίσεων που συμβαίνουν στη ρωγμή (Walraven, 1980). Σύμφωνα με το μοντέλο δύο φάσεων (two-phase-model), που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η απόκριση υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση μπορεί να περιγραφεί από την κίνηση ενός αδρανούς σύμφωνα με το ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 7.1.1: Απεικόνιση ενός πλήρους κύκλου φόρτισης [37]

Ο αύξων κλάδος του διαγράμματος τάσης-ολίσθησης μπορεί να περιγραφεί από το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την ερμηνεία της συμπεριφοράς υπό μονοτονική φόρτιση. Αφού αναπτυχθεί η μέγιστη διατμητική τάση, η τιμή της τάσης αυτής αρχίζει να ελαττώνεται (αποφόρτιση). Κατά συνέπεια, η παραμένουσα ορθή δύναμη θα κλείσει τη ρωγμή. Όμως, η τριβή που αναπτύσσεται στην επιφάνεια επαφής θα παρεμποδίσει έως έναν βαθμό το κλείσιμο της ρωγμής.

Η ακόλουθη σχέση περιγράφει τη μείωση της διατμητικής τάσης προτού συμβεί ολίσθηση προς την αντίθετη διεύθυνση (αρνητική διεύθυνση) [37]:

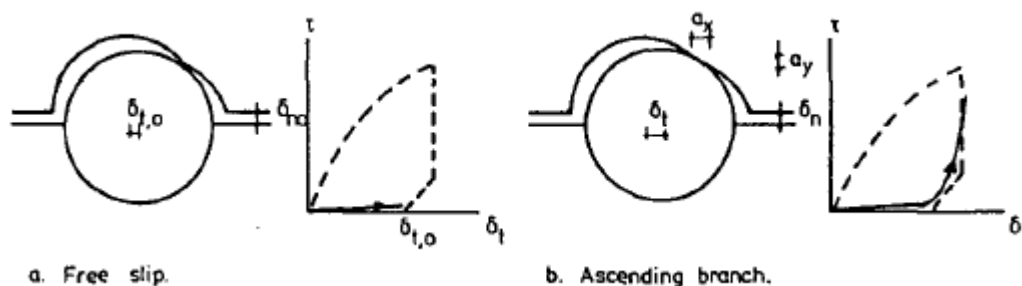
$$\frac{\tau}{\tau_m} = \frac{A_x - \mu A_y}{A_x + \mu A_y} \cdot \frac{A_y - \mu A_x}{A_y + \mu A_x} \quad (7.1.1)$$

όπου  $\tau_m$  είναι η μέγιστη διατμητική τάση.

Περαιτέρω μείωση της διατμητικής τάσης ωθεί στο κλείσιμο της ρωγμής μέχρι την επαναφορά στο αρχικό πλάτος. Ταυτόχρονα η τιμή της ολίσθησης μειώνεται αλλά δεν φτάνει ποτέ στην αρχική της τιμή (μηδέν) εξαιτίας της παραμόρφωσης του

μητρικού υλικού. Η τιμή της παραμένουσας παραμόρφωσης μπορεί να προσδιοριστεί από το μοντέλο για τη στατική φόρτιση χρησιμοποιώντας το αρχικό εύρος της ρωγμής και μηδενική διατμητική τάση.

Η απόκριση προς την άλλη κατεύθυνση φόρτισης είναι όμοια με αυτή που περιγράφηκε παραπάνω. Στον επόμενο κύκλο φόρτισης, η διατμητική ολίσθηση αυξάνεται χωρίς την παρουσία φορτίου.



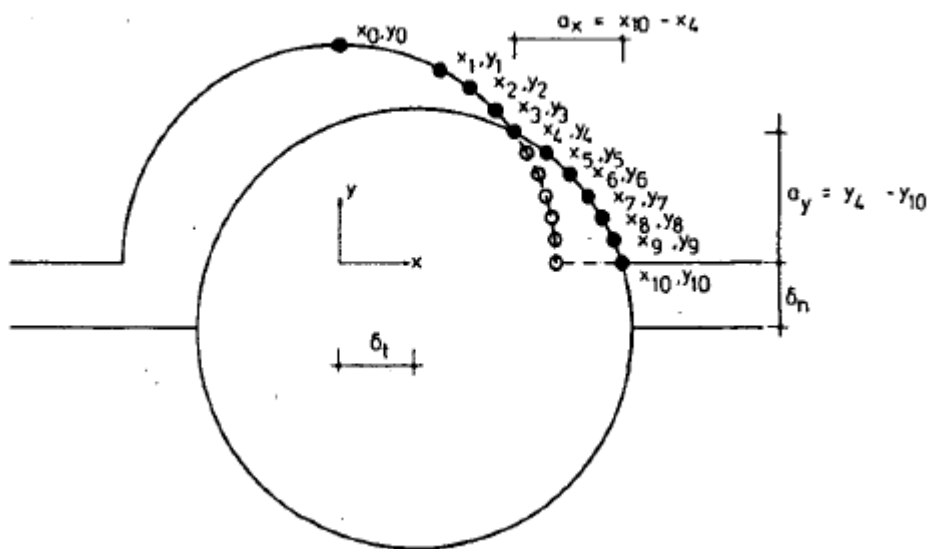
Σχήμα 7.1.2: 2<sup>ος</sup> κύκλος φόρτισης [37]

Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το μητρικό υλικό έχει υποστεί μόνιμη παραμόρφωση. Περεταίρω αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου φέρνει το αδρανές σε επαφή με την απέναντι παρειά της ρωγμής. Η επιφάνεια επαφής δεν μπορεί, πλέον, να προσδιοριστεί αναλυτικά, χρησιμοποιώντας το μοντέλο δύο φάσεων.

### Το αριθμητικό μοντέλο υπολογισμού επιφανειών επαφής

Ο Walraven [37] τροποποίησε τον τρόπο υπολογισμού των επιφανειών επαφής των αδρανών αντικαθιστώντας την αναλυτική λύση με μία προσέγγιση με αριθμητικές μεθόδους. Το σχήμα των επιφανειών επαφής του κάθε αδρανούς στο επίπεδο της ρωγμής περιγράφεται από ένα σύνολο σημείων που βρίσκονται στην επιφάνεια του παραμορφωμένου μητρικού υλικού.

Για συγκεκριμένο συνδυασμό ανοίγματος ρωγμής και διατμητικής ολίσθησης, το ψηλότερο και το χαμηλότερο σημείο  $(x_4, y_4)$ ,  $(x_{10}, y_{10})$  αντίστοιχα, που βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια επαφής, μπορούν να προσδιοριστούν. Οι προβολές των επιφανειών επαφής  $a_x$  και  $a_y$  ορίζονται ως η απόσταση των δύο προηγούμενων σημείων κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση αντίστοιχα. Λαμβάνοντας στους υπολογισμούς διάφορες διαμέτρους αδρανών, η συνολική επιφάνεια επαφής ανά μονάδα επιφάνειας στο επίπεδο της ρωγμής μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά με όμοιο τρόπο όπως στο μοντέλο δύο φάσεων για στατική φόρτιση.



Σχήμα 7.1.3: Παρουσίαση της επιφάνειας επαφής ορίζοντας σημεία πάνω σε αυτή [37]

Η ύπαρξη ενός αδρανούς συγκεκριμένης διαμέτρου και πάλι προσδιορίζεται από μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$P(D_o) = \frac{P_k}{D_o} (0.532x^{0.5} - 0.212x^4 - 0.075x^6 - 0.036x^8 - 0.025x^{10}) \quad (7.1.2)$$

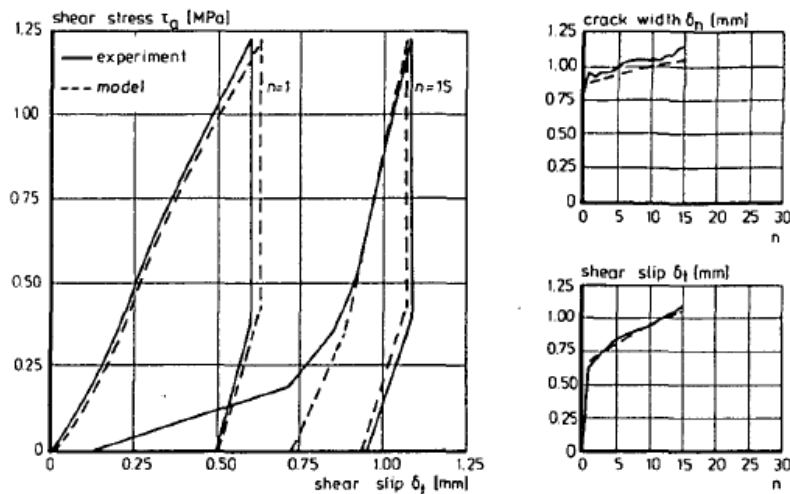
όπου

$P_k$ : ο λόγος του όγκου των αδρανών προς το συνολικό όγκο

$$x = \frac{D_o}{D_{max}}$$

Η παραπάνω τροποποίηση του μοντέλου δύο φάσεων ορίζεται ως το αριθμητικό μοντέλο επαφής.

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε από τον Walraven [37] για να ερμηνεύσει τα πειράματα του Laible [12]. Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μεσαίας αντοχής. Συνεπώς, ο αριθμός των αδρανών που θραύονται μετά το σχηματισμό ρωγμής στο σκυρόδεμα είναι μεγαλύτερος από ότι στα πειράματα του Walraven. Έτσι, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη μείωση στη συνολική επιφάνεια επαφής. Επιπλέον, ο συντελεστής τριβής πρέπει να τροποποιηθεί για το συγκεκριμένο τύπο αδρανών που χρησιμοποίησε ο Laible. Στα πειράματα του Walraven προέκυψε μείωση της τάσης αντίστασης 25% μετά τον πρώτο κύκλο φόρτισης και συντελεστής τριβής ίσος με 0.20. Το σχήμα 7.1.4 προκύπτει από εφαρμογή των προηγούμενων τιμών στο μοντέλο:



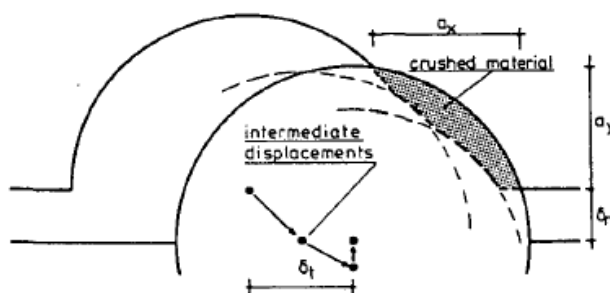
**Σχήμα 7.1.4:** Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις προβλέψεις του προσομοιώματος [37]

Στο σχήμα 7.1.4 εμφανίζεται μόνον ο κλάδος για τη μια διεύθυνση φόρτισης λόγω συμμετρίας του διαγράμματος.

Αποδεικνύεται ότι καμία μείωση δεν πρέπει να εισαχθεί στην αντοχή του μητρικού υλικού λόγω της ανακύκλισης. Αυτό εξηγείται από το ότι οι μεγάλες τάσεις λόγω επαφής δεν καταπονούν το μητρικό υλικό αλλά εμφανίζονται μόνον στις επιφάνειες επαφής. Έτσι, δεν παραμορφώνεται το μητρικό υλικό. Στις δοκιμές του Laible, όμως, εξαιτίας της υψηλής τιμής της ολίσθησης προκαλείται παραμόρφωση στο μητρικό υλικό με αποτέλεσμα αυτό να γίνεται λιγότερο δύσκαμπτο σε κάθε κύκλο φόρτισης και να μειώνεται η αντοχή του.

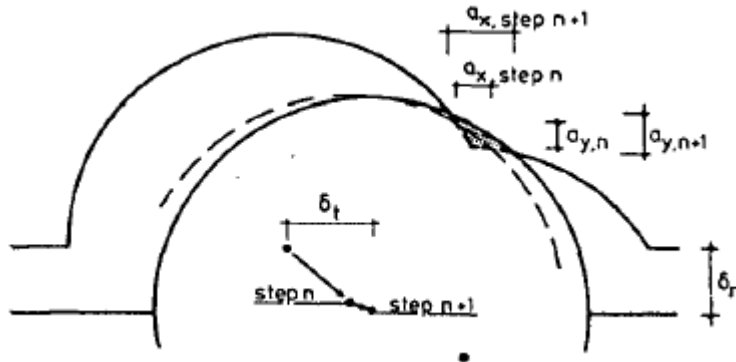
### Το αναλυτικό μοντέλο υπολογισμού των επιφανειών επαφής

Σκοπός του μοντέλου είναι να μπορεί να περιγράψει την απόκριση τόσο για μικρού εύρους κύκλους όσο και για μεγάλου εύρους κύκλους. Γίνεται η υπόθεση ότι η χρονοϊστορία της φόρτισης αποτυπώνεται στη συμπεριφορά των επιφανειών επαφής που σχηματίζονται στο τελευταίο βήμα φόρτισης του προηγούμενου κύκλου.



**Σχήμα 7.1.5:** Αποτύπωση της χρονοϊστορίας της φόρτισης στην τελική παραμόρφωση του επιπέδου ολίσθησης [37]

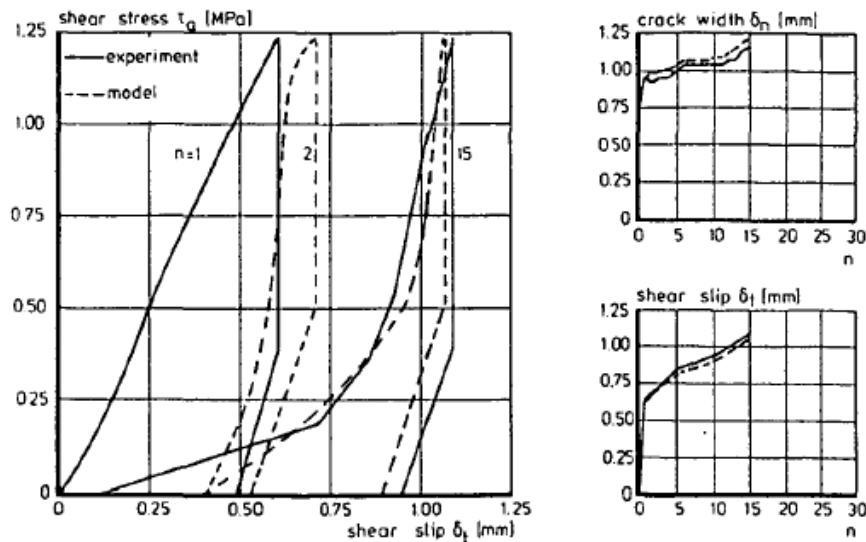
Η παραπάνω υπόθεση ισχύει για όλα τα βήματα φόρτισης ενός κύκλου.



Σχήμα 7.1.6: Βήμα προς βήμα φόρτιση της επιφάνειας επαφής [37]

Όταν ισχύει η παραπάνω υπόθεση, το εύρος των επιφανειών επαφής μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά από τα σημεία τομής τριών κύκλων, όπως φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα. Μόνο τρία ζεύγη συντεταγμένων ορίζουν την επιφάνεια επαφής.

Τα δεδομένα που εισάγονται στο μοντέλο είναι η παραμένουσα ολίσθηση μετά το πέρας του πρώτου κύκλου φόρτισης. Για το λόγο αυτό, ο πρώτος κύκλος δεν εμφανίζεται στα επόμενα γραφήματα.



Σχήμα 7.1.7: Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα του θεωρητικού προσομοιώματος [37]

Παρατηρούμε ότι το μοντέλο προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική απόκριση παρόλο που για τον υπολογισμό των επιφανειών επαφής χρησιμοποιούνται μόνο τρία σημεία. Η υπολογιστική διαδικασία είναι πιο γρήγορη σε σχέση με το

αριθμητικό μοντέλο αλλά παραμένει ακόμα αρκετά δύσκολη για να εφαρμοστεί σε προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων.

### Το μοντέλο υπολογισμού με μειωμένη επιφάνεια επαφής

Επιπλέον απλοποίηση των προηγούμενων μοντέλων μπορεί να επιτευχθεί ελαττώνοντας τον αριθμό των διαμέτρων αδρανών [37]. Κατά τη διάρκεια των ανακυκλίσεων, οι τάσεις στο επίπεδο της ρωγμής για δεδομένο συνδυασμό ανοίγματος ρωγμής και διατμητικής ολίσθησης έχουν την ίδια ή μικρότερη τιμή σε σχέση με αυτή για στατική φόρτιση. Αυτό οφείλεται στη μειωμένη επιφάνεια επαφής. Έτσι έχουμε τις εξής σχέσεις:

$$\tau_{\alpha} = \sigma_{pu}(\lambda_y A_y + \lambda_x \mu A_x) \quad (7.1.3)$$

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{pu}(\lambda_x A_x - \lambda_y \mu A_y) \quad (7.1.4)$$

όπου

$A_x, A_y$ : το συνολικό εμβαδόν των προβολών των επιφανειών επαφής για στατική φόρτιση

$\lambda_x, \lambda_y$ : μειωτικοί συντελεστές

Οι μειωτικοί συντελεστές προκύπτουν από τις ακόλουθες εμπειρικές σχέσεις:

$$\lambda_x = 0.8 \left( \frac{\delta_t - \delta_o}{\delta_{tm} - \delta_o} \right)^2 \quad (7.1.5)$$

$$\lambda_y = 0.7 \left( \frac{\delta_t - \delta_o}{\delta_{tm} - \delta_o} \right)^3 \quad (7.1.6)$$

$$\text{με } \delta_o = \delta_{nm} - \sqrt{\delta_{nm}^2 - \delta_{no}^2} < 0.67\delta_{tm} \quad (7.1.7)$$

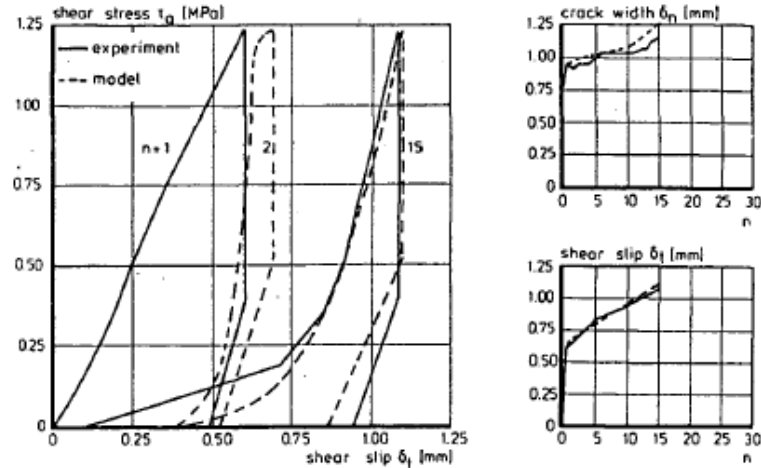
$\delta_{nm}, \delta_{tm}$  : η τελική αποκόλληση και ολίσθηση του προηγούμενου κύκλου αντίστοιχα

$\delta_{no}$ : το αρχικό εύρος της ρωγμής

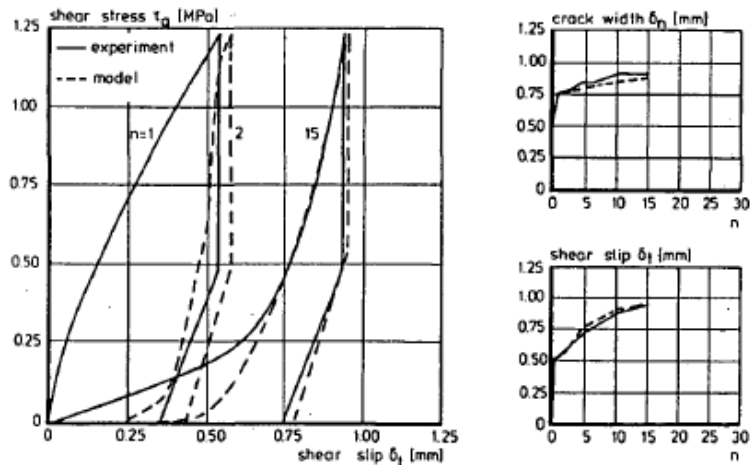
Η εισαγωγή των παραπάνω σχέσεων στο μοντέλο απλοποιούν το πρόβλημα μετατρέποντας τη φόρτιση σε στατική (οιονεί-στατική). Δηλαδή, το πρόβλημα οδηγείται σε απλό υπολογισμό των επιφανειών επαφής για στατική φόρτιση.

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων του Laible με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου μειωμένων επαφών.





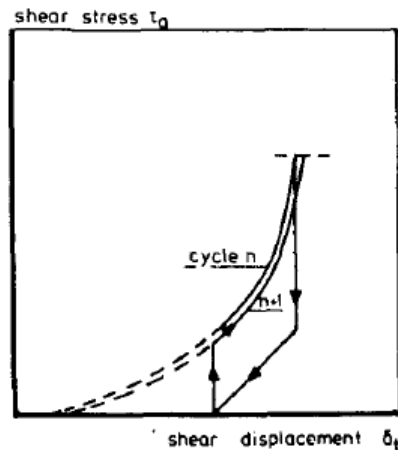
Σχήμα 7.1.8: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα από εφαρμογή του μοντέλου με  $\delta_{no}=0.76\text{mm}$



Σχήμα 7.1.9: Σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου με  $\delta_{no}=0.51\text{mm}$

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα προηγούμενα μοντέλα μπορούν να εφαρμοστούν υπό την προϋπόθεση ότι το επιβαλλόμενο φορτίο είναι τουλάχιστον ίσο με το μέγιστο φορτίο του προηγούμενου κύκλου.

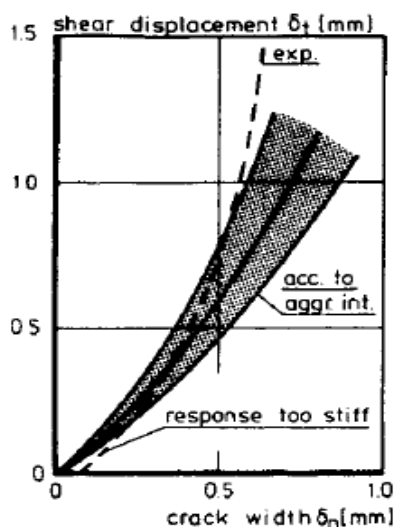
Εξαιτίας των ανακυκλίσεων, το αρχικό άνοιγμα της ρωγμής δεν πρόκειται να μειωθεί εξαιτίας της ορθής τάσης που αναπτύσσεται λόγω τριβής στις επιφάνειες επαφής. Συνεπώς, κατά την επαναφόρτιση η ρωγμή θα επιδείξει αρχικά δύσκαμπτη συμπεριφορά η οποία προσομοιώνεται ικανοποιητικά από το μοντέλο όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 7.1.10: Η απόκριση της ρωγμής για την περίπτωση ανακυκλιζόμενης φόρτισης

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω μοντέλα αποδείχθηκε ότι η αντοχή του μητρικού υλικού δεν εμφάνισε μείωση υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Αυτό, μάλλον, οφείλεται στο γεγονός ότι ο ρυθμός αύξησης της ολίσθησης είναι υψηλός, για δοκιμές στις οποίες τα φορτία επιβάλλονται είναι μεγάλα. Μεγάλη ένταση αναπτύσσεται στις περιοχές κοντά στις επιφάνειες επαφής. Στις περιοχές αυτές, με επιπλέον αύξηση της διατμητικής ολίσθησης, το μητρικό υλικό συνθλίβεται. Σε γειτονικές περιοχές των προηγούμενων περιοχών, το μητρικό υλικό παραμένει χωρίς ένταση στους προηγούμενους κύκλους.

Για τις δοκιμές που έγιναν σε άοπλο ρηγματωμένο σκυρόδεμα δεν προέκυψε κάποια σχέση που να συνδέει το εύρος των τάσεων, τον αριθμό των κύκλων και τις μετατοπίσεις στη ρωγμή. Γενικά, η ρωγμή παρουσίασε αρχικά απόκριση που χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη δυσκαμψία από αυτή που αναμένεται από το μοντέλο δύο φάσεων, θεωρώντας την επιβαλλόμενη φόρτιση οιονεί-στατική.



Στο διπλανό διάγραμμα τάσης-ανοίγματος ρωγμής, η γραμμοσκιασμένη περιοχή προκύπτει από εφαρμογή των μοντέλου δύο φάσεων του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών για διάφορες τιμές του λόγου  $\frac{\tau_a}{\sigma_{pu}}$  από πειράματα της βιβλιογραφίας.

Το φαινόμενο αποδίδεται στο ότι στα πειράματα αυτά ασκήθηκαν μεγάλα φορτία κάθετα στη διεπιφάνεια. Σε προρηγματωμένα δοκίμια κατά τη διάρκεια των δοκιμών τμήμα από το μητρικό υλικό και μικρά αδρανή αποκολλούνταν από τις παρειές της ρωγμής. Εξαιτίας των υλικών αυτών, δεν ήταν δυνατό το άνοιγμα της ρωγμής να επιστρέφει στην αρχική του τιμή. Επιπλέον, τα

υλικά αυτά είχαν και έναν ακόμα ρόλο, τη μεταφορά ορθών τάσεων μεταξύ των παρειών.

Λόγω της σχετικής ολίσθησης τα αποκολλημένα μικρά αδρανή μαζί με μητρικό υλικό δρουν ως δύσκαμπτοι θλιπτήρες που μεταφέρουν ορθές και διατμητικές τάσεις. Αρχικά, οι θλιπτήρες μεταφέρουν μόνο ορθές τάσεις. Η αύξηση της ολίσθησης προκαλεί περιστροφή των θλιπτήρων. Συνεπώς, οι θλιπτήρες συνεισφέρουν στη μεταφορά διατμητικών τάσεων και καθορίζουν τη διεύθυνση ανάπτυξης της ρωγμής. Ταυτόχρονα, αυξάνεται η συνεισφορά του μηχανισμού αλληλοεμπλοκήςαδρανών στη μεταφορά δυνάμεων στη διεπιφάνεια. Για δεδομένη τιμή της ολίσθησης ο προσανατολισμός των θλιπτήρων είναι κάθετος στη ρωγμή. Τώρα μεταφέρονται μόνο αξονικά φορτία. Περεταίρω αύξηση της τιμής της ολίσθησης θα προκαλέσει μείωση της συνεισφοράς στη μεταφορά διατμητικών τάσεων και αυτό συνεπάγεται απότομη διεύρυνση της ρωγμής. Τελικά τα εξωτερικά επιβαλλόμενα φορτία ισορροπούν με την αντίδραση που αναπτύσσεται λόγω του μηχανισμού αλληλοεμπλοκήςαδρανών. οι θλιπτήρες αδρανοποιούνται όπως και στην περίπτωση που ασκείται χαμηλής τιμής φορτίο κάθετα στο διατμητικό επίπεδο.



Σχήμα 7.1.11: Ο μηχανισμός διαγώνιου θλιπτήρα [37]

Η διεύθυνση ανάπτυξης της ρωγμής καθορίζεται από τους θλιπτήρες. Σύμφωνα με το μοντέλο δύο φάσεων, λιγότερο απότομη διεύρυνση της ρωγμής θα προκαλέσει άμεση πτώση των διατμητικών τάσεων που μεταφέρονται στη ρωγμή. Ακόμα και αν οι θλιπτήρα είναι αδρανείς, η διεύρυνση της ρωγμής θα είναι απότομη.

Όσο μεγαλύτερο είναι το αρχικό φορτίο που δρα κάθετα στη διεπιφάνεια, τόσο περισσότερο απομακρύνονται τα αδρανή από την επιφάνεια ολίσθησης («βυθίζονται»). Αυτό συνεπάγεται λιγότερο απότομη διεύρυνση της ρωγμής και επομένως μεταφορά μικρότερου εύρους διατμητικού φορτίου.

Για ανακυκλιζόμενη φόρτιση, οι θλιπτήρες θα προκαλέσουν σχεδόν σταθερό εύρος ρωγμής για χαμηλό ρυθμό αύξησης της ολίσθησης για κάθε κύκλο. Όμως, όταν οι θλιπτήρες απενεργοποιούνται ο μηχανισμός αλληλοεμπλοκήςαδρανών πρέπει να μεταφέρει όλο το επιβαλλόμενο διατμητικό φορτίο, προκαλώντας έτσι, απότομη και μεγάλη αύξηση της ολίσθησης και του ανοίγματος της ρωγμής.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι στην περίπτωση άοπλου σκυροδέματος με σχετικά μεγάλες ορθές τάσεις να δρουν σε αυτό, άκαμπτοι θλιπτήρες συνεισφέρουν στη μεταφορά τάσεων και αρχικά ελέγχουν τον τρόπο

ανάπτυξης μιας ρωγμής. Η συμπεριφορά αυτή δεν μπορεί να περιγραφεί από το μοντέλο που περιγράφηκαν παραπάνω.

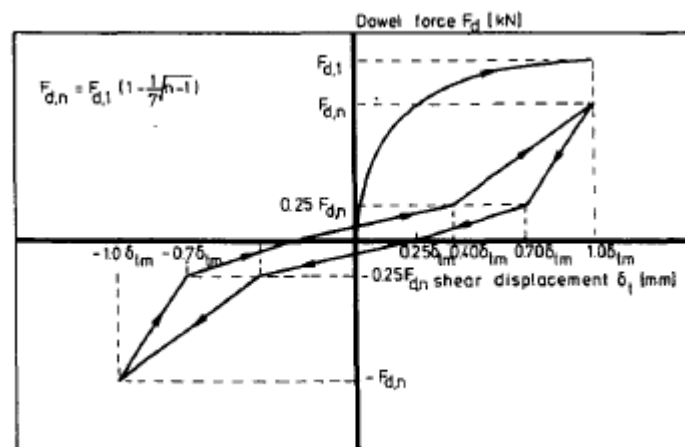
## 7.2.ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΡΑΣΗΣ ΒΛΗΤΡΟΥ

Παρόλο που αρκετά πειράματα έχουν γίνει σχετικά με το μηχανισμό δράσης βλήτρου, οι παρατηρήσεις από αυτά δεν οδήγησαν στην ανάπτυξη ενός μοντέλου που να περιγράφει τη συμπεριφορά του μηχανισμού υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Για πρακτικούς λόγους, χρησιμοποιούνται εμπειρικές εκφράσεις. Η Βιντζηλαίου [36] πρότεινε τη σχέση 7.2.1 για να περιγράψει τη μείωση της δύναμης βλήτρου στη μέγιστη τιμή της επιβαλλόμενης ολίσθησης:

$$\frac{F_{d,n=n}}{F_{d,n=1}} = 1 - \frac{1}{7}\sqrt{n-1} \quad (7.2.1)$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης ( $n < 7$ )

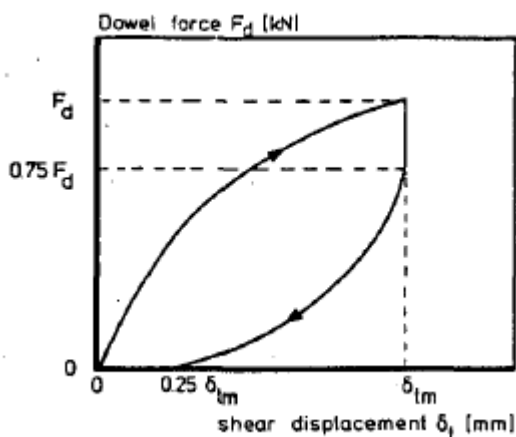
Βασιζόμενη στη σχέση αυτή, πρότεινε το μοντέλο που αναπαρίσταται στο σχήμα 7.2.1 και προέρχεται από δοκιμές στις οποίες η φόρτιση των δοκιμών επιτυγχάνεται επιβάλλοντας μετακίνηση κάθετα στον άξονα του βλήτρου.



Σχήμα 7.2.1: Το προσομοίωμα Βιντζηλαίου για ανακυκλιζόμενη φόρτιση [36]

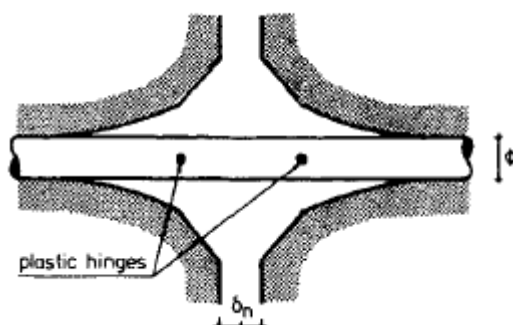
Το μοντέλο της Βιντζηλαίου μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα σε αριθμητικά προγράμματα. Όμως, υπάρχει ακόμα η ανάγκη για μια περισσότερο θεωρητική προσέγγιση της συμπεριφοράς του μηχανισμού υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Έτσι, γίνεται μια προσπάθεια ανάπτυξης ενός μοντέλου το οποίο να βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη συμπεριφορά των υλικών (χάλυβα και σκυροδέματος). Εξαιτίας του γεγονότος ότι τα περισσότερα πειράματα δεν δίνουν πληροφορίες για την απόκριση του περιβάλλοντος σκυροδέματος, το μοντέλο αυτό θα βασίζεται σε λιγότερο βαθμό σε εμπειρικές σχέσεις.

Για την περίπτωση μονοτονικής φόρτισης, η απόκριση του μηχανισμού βλήτρου, αρχικά, μπορεί να προσεγγιστεί από το ανάλογο της δοκού επί ελαστικών στηρίξεων. Για μια τιμή του φορτίου δημιουργείται πλαστική άρθρωση στη ράβδο. Η πλαστική άρθρωση βρίσκεται σε απόσταση από την διεπιφάνεια ίση περίπου με τη διάμετρο της ράβδου. Στο τμήμα κάτω από τη ράβδο, στη διεύθυνση του φορτίου, αναπτύσσονται συνθήκες τριαξονικής θλίψης. Αφού επιτευχθεί η μέγιστη τιμή της δύναμης βλήτρου, η τιμή της δύναμης αυτής παρουσιάζει μείωση και το περιβάλλον σκυρόδεμα έχει υποστεί μόνιμες παραμορφώσεις



Σχήμα 7.2.2: Μηχανισμός φόρτισης αποφόρτισης για τον πρώτο κύκλο [36]

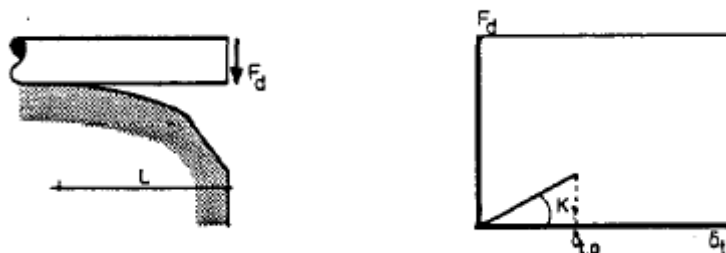
Η πτώση στις τάσεις που δρουν στο σκυρόδεμα σχετίζεται με τις ιδιότητες του υλικού. Για τριαξονικές συνθήκες φόρτισης, ο Van Mier [34] βρήκε ότι τη στιγμή της αποφόρτισης συμβαίνει απότομη μείωση της δύναμης βλήτρου του οπλισμού κατά 25%. Έπειτα, η τιμή της διατμητικής ολίσθησης ελαττώνεται ταυτόχρονα με τη δύναμη βλήτρου. Για μηδενική φόρτιση υπάρχει κάποια παραμένουσα ολίσθηση που είναι ίση με το 25% της μέγιστης.



Σχήμα 7.2.3: Η παραμόρφωση του μητρικού υλικού μετά την ολοκλήρωση του πρώτου κύκλου φόρτισης [36]

Όταν και πάλι επιβάλλεται φόρτιση κατά τη θετική φορά (έναρξη δεύτερου κύκλου), η ράβδος αρχικά συμπεριφέρεται σαν δοκός μερικώς πακτωμένη στο ένα της άκρο. Για τη φόρτιση αυτή, η ακαμψία βλήτρου δίνεται από τη σχέση:

$$K_1 = \frac{9d_b E_s}{120d_b L^2 + 40L^3} \quad [\text{N/mm}] \quad (7.2.2)$$



Σχήμα 7.2.4: Η αρχική ακαμψία του βλήτρου για τους επόμενους κύκλους φόρτισης [36]

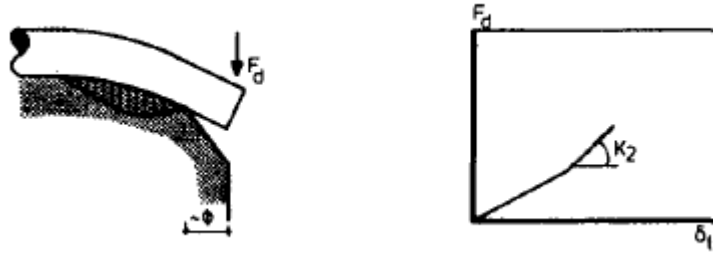
Το εύρος του μήκους  $L$  δεν μπορεί να προσδιοριστεί θεωρητικά. Έτσι η Βιντζηλαίου πραγματοποίησε δοκιμές σε δοκίμια με θλιπτική αντοχή σκυροδέματος 30MPa,  $f_{sy}=420\text{MPa}$  και μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο ίσο με 80% του φορτίου αντοχής του βλήτρου. Με την πρόοδο των ανακυκλίσεων η αποδιοργάνωση του περιβάλλοντος σκυροδέματος οδηγεί στην αύξηση του μήκους  $L$ . Προκύπτει η ακόλουθη εμπειρική σχέση:

$$L = 3.5d_b \sqrt{\delta_{t,max}} (n - 1)^{0.1} \quad [\text{mm}] \quad (7.2.3)$$

όπου  $\delta_{t,max}$  η μέγιστη τιμή της ολίσθησης στον προηγούμενο κύκλο  
 $n$  ο αριθμός του κύκλου (Πρέπει να σημειωθεί ότι για φόρτιση στην αρνητική διεύθυνση έχουμε  $n=2$ . Επομένως για φόρτιση στην θετική διεύθυνση θα έχουμε  $n=3$ . Στην περίπτωση που η επιβαλλόμενη μετακίνηση στην αρνητική διεύθυνση ήταν ίση με τη μισή από αυτή που επιβλήθηκε στη θετική τότε ο κύκλος στην αρνητική διεύθυνση θα ήταν ίσος με 1.5. Ο δεύτερος κύκλος στην θετική διεύθυνση θα ήταν 2.5 κ.ο.κ.

Ο όρος  $(n-1)^{0.1}$  εισάγει την επιρροή της κόπωσης του σκυροδέματος. Εξαιτίας της αύξησης της μετατόπισης της ράβδου το μέχρι πριν παραμορφωμένο μητρικό υλικό τώρα συνθλίβεται.

Η ακαμψία  $K_1$  χαρακτηρίζει το βλήτρο μέχρι την τιμή της ολίσθησης  $\delta_{t,0}$ . Για αυτή την τιμή η ράβδος περιβάλλεται από σκυροδέμα στο μήκος  $L$ -φ, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 7.2.5: Η ακαμψία βλήτρου  $K_2$  [36]

Εξαιτίας της αντίστασης από το σκυροδέμα, η ακαμψία αυξάνεται και παίρνει την τιμή  $K_2$ . Η απόκριση του σκυροδέματος προσεγγίζεται θεωρώντας τη ράβδο δοκό επί ελαστικών στηρίξεων. Σύμφωνα με τη σχέση  $K_f = 390\delta_{t,e}^{-0.78}$  η ελατηριακή σταθερά που προσομοιώνει την αντίσταση του σκυροδέματος δίνεται από τη σχέση:

$$K_f = 390(\delta_t^*)^{-0.78} \quad [\text{MPa/mm}] \quad (7.2.4)$$

Στην παραπάνω σχέση αντικαθιστούμε την τιμή  $\delta_t^* = \delta_{t,o} = 0.3\delta_{t,max}$  οπότε προκύπτει η σχέση:

$$K_f = 998(\delta_{t,max})^{-0.78} \quad [\text{MPa/mm}] \quad (7.2.5)$$

Επειδή η αντίσταση του σκυροδέματος είναι ανάλογη του μέτρου ελαστικότητας, το οποίο είναι ανάλογο με την τετραγωνική ρίζα της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος προκύπτει η επόμενη έκφραση:

$$K_f = 168\sqrt{f_{ccm}}(\delta_{t,max})^{-0.78} \quad (7.2.6)$$

Συνδυάζοντας την προηγούμενη εξίσωση με την εξίσωση  $F_d = 3.56d_b^{1.75}K_f^{0.75}\delta_t$  έχουμε:

$$F_d = 166d_b^{1.75}f_{ccm}^{0.375}\delta_{t,max}^{-0.59}\Delta\delta_t \quad [\text{N}] \quad (7.2.7)$$

Ωστόσο, σύμφωνα με το τελευταίο σχήμα, το φορτίο που δρα στη διεπιφάνεια έχει εκκεντρότητα  $e$  η οποία είναι ίση με τη διάμετρο της ράβδου. Στην περίπτωση αυτή η διατμητική ολίσθηση εκφράζεται από τη σχέση:

$$\delta_t = \frac{F_d}{3\beta^3EI} (3 + 6\beta e + 6\beta^2 e^2 + 2\beta^3 e^3) \quad (7.2.8)$$

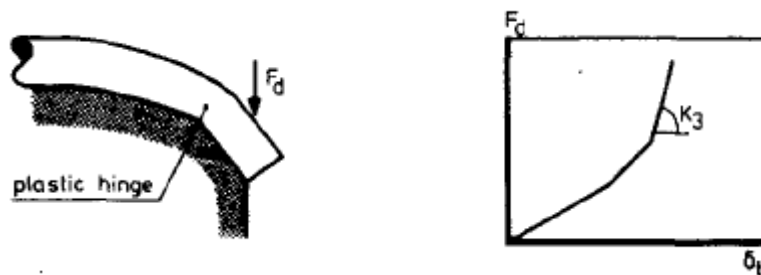
Αν λάβουμε μέση τιμή για την  $K_f=300\text{MPa/mm}$  βρέθηκε ότι  $\beta_e \approx 0.6$ . Από συνδυασμό των τελευταίων δύο σχέσεων προκύπτει ότι η συνολική διατμητική ολίσθηση είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη από τη  $\delta_{t,max}$ . Επομένως, η δυσκαμψία βλήτρου  $K_2$  ισούται με:

$$K_2 = 55d_b^{1.75} f_{ccm}^{0.375} \delta_{t,max}^{-0.59} \quad [\text{N/mm}] \quad (7.2.9)$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει μέχρι τη στιγμή που δημιουργείται πλαστική άρθρωση στη ράβδο. Επειδή στο στάδιο αυτό το σκυρόδεμα δεν συνεισφέρει στην ενδυνάμωση της διατομής του βλήτρου, η δύναμη βλήτρου τη στιγμή της διαρροής θα είναι:

$$F_{d,sy} = \frac{M_{sy}}{e} = 0.1d_b^2 f_{sy} \quad [\text{N}] \quad (7.2.10)$$

Λόγω της πλαστικής άρθρωσης, η ράβδος έρχεται σε επαφή με το σκυρόδεμα κοντά στο επίπεδο διάτμησης. Για την κατανεμημένη δυσκαμψία του σκυροδέματος στην περιοχή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση για το  $K_f$ .



Σχήμα 7.2.6: Η δυσκαμψία βλήτρου  $K_3$  [36]

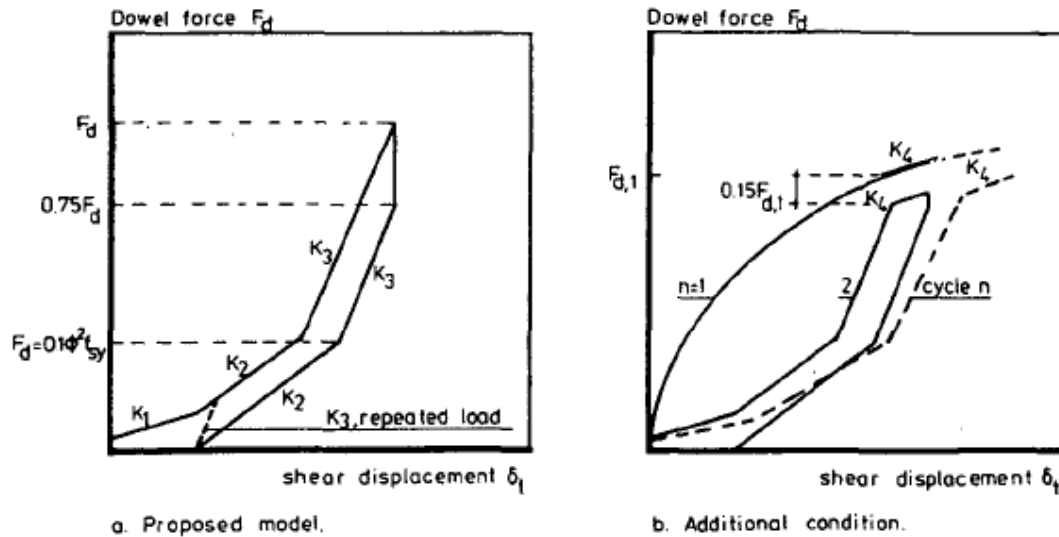
Με τη δημιουργία πλαστικής άρθρωσης, το σκυρόδεμα που βρίσκεται κοντά στη διεπιφάνεια είναι αυτό το οποίο καθορίζει τη δυσκαμψία του βλήτρου. Σύμφωνα με την υπόθεση ότι το 25% της μέγιστης ολίσθησης παραμένει μετά την αποφόρτιση, γίνεται η παραδοχή ότι η παραμόρφωση του σκυροδέματος στο μήκος  $L-\phi$  συνεισφέρει το 25% της συνολικής ολίσθησης. Έτσι, η δυσκαμψία βλήτρου  $K_3$  εκφράζεται από τη σχέση (7.2.11):

$$K_3 = 0.75 \cdot 168d_b^{1.75} f_{ccm}^{0.375} \delta_{t,max}^{-0.59} = 126d_b^{1.75} f_{ccm}^{0.375} \delta_{t,max}^{-0.59} \quad (7.2.11)$$

Πρόσθετη υπόθεση αποτελεί ότι η συνολική δύναμη βλήτρου είναι πάντα μικρότερη από το 85% της δύναμης βλήτρου για μονοτονική φόρτιση που αντιστοιχεί στην ίδια τιμή ολίσθησης. Η πορεία της φόρτισης φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα. Η αποφόρτιση προκαλεί πτώση της δύναμης βλήτρου κατά 25% της μέγιστης δύναμης. Η αποφόρτιση γίνεται με δυσκαμψία ίση με  $K_3$  μέχρι την τιμή  $F_{d,sy}$ . Από το σημείο αυτό η δυσκαμψία ισούται με  $K_2$  μέχρι να μηδενιστεί η δύναμη



βλήτρου. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό στον επόμενο κύκλο, θεωρείται ότι η δυσκαμψία βλήτρου ισούται με  $K_3$  για να συνδεθεί η κατάσταση μηδενικής τάσης με τον κλάδο επαναφόρτισης (διακεκομμένη γραμμή στο αριστερό διάγραμμα). Η δύναμη βλήτρου δεν γίνεται να ξεπεράσει το 85% της μέγιστης για μονοτονική φόρτιση (διάγραμμα δεξιά). Στο σημείο αυτό η δυσκαμψία βλήτρου ισούται με  $K_4$  και προκύπτει από το διάγραμμα για στατική φόρτιση.



Σχήμα 7.2.7: Φόρτιση και αποφόρτιση σύμφωνα με το μοντέλο [36]

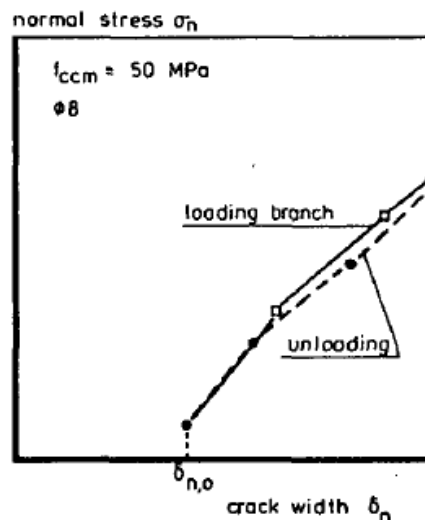
Επίσης, σημειώνεται ότι η δυσκαμψία βλήτρου επηρεάζεται από εύρος της αξονικής τάσης που καταπονεί τη ράβδο. Για την ποσοτικοποίηση της επιρροής αυτής εισάγεται ο ακόλουθος μειωτικός συντελεστής:

$$\gamma_k = \left(1 - \frac{F_s}{F_{Sy}}\right)^{0.5} \quad (7.2.12)$$

### 7.3.ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΑΛΛΗΛΟΕΜΠΛΟΚΗΣ ΑΔΡΑΝΩΝ ΚΑΙ ΔΡΑΣΗΣ ΒΛΗΤΡΟΥ

Ο μηχανισμός αλληλοεμπλοκής αδρανών και ο μηχανισμός δράσης βλήτρου που περιγράφηκαν στα κεφάλαια 7.1 και 7.2 αντίστοιχα πρόκειται να συνδυαστούν προκειμένου να περιγράψουν τη συνολική απόκριση μιας ρωγμής σε ανακυκλιζόμενη διατμητική φόρτιση.

Αρχικά θα πρέπει να προσδιοριστεί η εφελκυστική τάση που δρα αξονικά στις ράβδους του οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια και οφείλεται στη διεύρυνση της ρωγμής εξαιτίας των ανακυκλίσεων. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προκειμένου να εξαχθεί μια εμπειρική σχέση από την οποία θα προκύπτει η σχέση της τάσης αυτής ως συνάρτηση του εύρους ρωγμής. Από τα πειράματα [12] αυτά προέκυψε ότι η σχέση αυτή είναι σχεδόν γραμμική (σχήμα 7.3.1).



Σχήμα 7.2.7: Σχέση ορθής τάσης που δρα στη διεπιφάνεια με το εύρος ρωγμής για ανακυκλιζόμενη φόρτιση [12]

Πρέπει, εδώ, να τονιστεί ότι το εύρος της μετρηθείσας τάσης εξαρτάται από την τάση διαρροής του οπλισμού στις πλαστικές αρθρώσεις που αναπτύσσονται στα βλήτρα. Έτσι υιοθετείται τελικά μια γραμμική σχέση της αξονικής τάσης που καταπονεί τον οπλισμό σε συνάρτηση με την αύξηση της αποκόλλησης κατά μήκος της διεπιφάνειας. Συνεπώς προκύπτει η σχέση 7.3.1, [12]:

$$\sigma_n = \alpha \cdot \rho f_{sy} \cdot (\delta_n - \delta_{n,0}) \quad [\text{MPa}] \quad (7.3.1)$$

όπου  $\rho$ : το ποσοστό οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια

$f_{sy}$ : η τάση διαρροής του οπλισμού [MPa]

$\delta_n$ : η τιμή της αποκόλλησης στον κύκλο n [mm]

$\delta_{n,0}$ : η αρχική τιμή της αποκόλλησης πριν την επιβολή της φόρτισης [mm]

$$\alpha = \frac{3}{(n+2)} > 0.25 \text{ [mm}^{-1}\text{]} \quad (7.3.2)$$

Αφού προσδιοριστεί η τάση που δρα κάθετα στη διεπιφάνεια στη συνέχεια η ανακυκλιζόμενη φόρτιση αντιμετωπίζεται σαν να ήταν μονοτονική (ψευδό – στατική φόρτιση).

Για τον υπολογισμό της συνεισφοράς του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών χρησιμοποιείται το μοντέλο των μειωμένων επιφανειών επαφής. Οι επιφάνειες επαφής των αδρανών  $A_x$  και  $A_y$  υπολογίζονται όπως και στην περίπτωση μονοτονικής φόρτισης.

Η συνεισφορά του μηχανισμού δράσης βλήτρου υπολογίζεται από τη σχέση που προτείνεται από το προσομοίωμα της δοκού επί ελαστικής στήριξης όπως αυτή έχει εκφραστεί για μονοτονική φόρτιση, λαμβάνεται όμως μειωμένη κατά 35% λόγω των ανακυκλίσεων.

Η συνολική τάση που αντιστέκεται στην επιβολή της εξωτερικής φόρτισης δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{cal} = Y_a \tau_a + Y_d \tau_d \quad (7.3.3)$$

όπου οι παράμετροι  $Y_a$  και  $Y_d$  υπολογίζονται όπως στην περίπτωση της μονοτονικής φόρτισης, από τις σχέσεις (6.4.7) και (6.3.7) αντίστοιχα.

## 8. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

### A) Μονοτονική φόρτιση

Πρόκειται να εφαρμοστούν πέντε προσομοιώματα για τον υπολογισμό της διατμητικής δύναμης που αναπτύσσεται σε μια διεπιφάνεια σε δοκίμια της βιβλιογραφίας που υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση. Εξετάζονται τα εξής προσομοιώματα:

1. Το τροποποιημένο μοντέλο διάτμησης – τριβής που προτάθηκε από το Mattock
2. Το μοντέλο της δοκού επί ελαστικών στηρίξεων (Beam on Elastic Foundation – BEF)
3. Το μοντέλο του Rasmussen
4. Το μοντέλο του Randl
5. Το μοντέλο των Mansur et al.

Περιγραφή των μοντέλων αυτών έχει γίνει σε προηγούμενο κεφάλαιο. Κατά την εφαρμογή τους έχουν γίνει οι εξής παραδοχές:

1. Στην περίπτωση των δοκιμίων στα οποία η διεπιφάνεια είναι λεία, στα μοντέλα των Rasmussen και BEF, στην τελική τιμή της αντοχής, αγνοήθηκε η συνεισφορά της τριβής. Ήδη, είναι γνωστό από την περιγραφή των μοντέλων αυτών, ότι αυτά χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της δύναμης λόγω δράσης βλήτρου και μόνο. Στην περίπτωση δοκιμίων με λεία διεπιφάνεια, ο βασικός μηχανισμός μεταφοράς διατμητικής δύναμης είναι αυτός της δράσης βλήτρου του οπλισμού του εγκάρσιου στη διεπιφάνεια.
2. Για το λόγο που περιγράφηκε παραπάνω κρίνεται απαραίτητο, στα δοκίμια που είτε ήταν μονολιθικά είτε η διεπιφάνειά τους έχει εκτραχυνθεί, να συνυπολογιστεί και ο μηχανισμός τριβής.
3. Στην περίπτωση του μοντέλου BEF, όταν η τιμή της ολίσθησης στην αστοχία ήταν μεγαλύτερη από αυτή που χρειάζεται για να αναπτυχθεί η μέγιστη δύναμη λόγω δράσης του κάθε μηχανισμού, στον υπολογισμό της αντοχής της διεπιφάνειας λαμβάνονται η τιμή της ολίσθησης για την οποία μεγιστοποιείται η δράση του κάθε μηχανισμού.
4. Για την εφαρμογή του μοντέλου του Randl, συγκεκριμένα, για την περίπτωση των μονολιθικών δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές που αντιστοιχούν σε διεπιφάνειες στις οποίες έχει γίνει έντονη εκτράχυνση με αμβολή.

### **8.1.«Effect of reinforcing bar size on shear transfer across a crack in concrete», Alan H. Mattock**

Σκοπός αυτής της σειράς πειραμάτων του Mattock [19] είναι να προσδιοριστεί η επιρροή της διαμέτρου του οπλισμού στη μεταφορά διατμητικών δυνάμεων κατά μήκος μιας ρωγμής. Εξετάστηκαν οι εξής παράμετροι:

- Η διάμετρος των ράβδων οπλισμού (οι τιμές των διαμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον πίνακα 1)
- Η ιστορία της φόρτισης (μονοτονικά αυξανόμενη φόρτιση και ανακυκλιζόμενη φόρτιση)

Το κάθε δοκίμιο αποτελείται από τρία επιμέρους τμήματα, ορίζοντας, έτσι, δύο επίπεδα ολίσθησης, καθένα με εμβαδόν  $6451.6 \text{ cm}^2$ . Λεπτομέρειες για τη μορφή των δοκιμίων φαίνονται στο σχήμα 1. Για την αγκύρωση των ράβδων #14 και #18, προτιμήθηκε να χρησιμοποιηθούν ευθείες ράβδοι που αγκυρώνονταν σε μεταλλικές πλάκες στην εξωτερική πλευρά των δοκιμίων, αντί για κλειστούς συνδετήρες. Για ράβδους μικρότερης διαμέτρου το πρόβλημα της αγκύρωσης λύνεται με τη χρήση κλειστών συνδετήρων. Τα δοκίμια φορτίζονται κεντρικά με φορτίο που κατανέμεται ομοιόμορφα κατά πλάτος του μεσαίου τμήματος των δοκιμίων. Η επιβαλλόμενη τέμνουσα δύναμη σε κάθε διατμητικό επίπεδο είναι περίπου ίση με το μισό φορτίο που ασκείται από τον γρύλο, με ταυτόχρονη παρουσία αμελητέας ροπής.

Για να γίνει ορατή η επιρροή της διαμέτρου του οπλισμού, έγινε προσπάθεια να διατηρηθεί η ποσότητα  $\rho_{fy}$  σταθερή. Προκειμένου να γίνει αυτό εφικτό όσο μικρότερη είναι η διάμετρος του οπλισμού τόσες περισσότερες ράβδοι χρησιμοποιούνταν. Η μέση τιμή της παραμέτρου  $\rho_{fy}$  είναι 3.78 MPa αλλά κυμαίνεται μεταξύ 3.46 και 4.13 MPa. Η διαφοροποίηση στις παραπάνω τιμές οφείλεται στη διαφορά του ορίου διαρροής των ράβδων καθώς η τιμή της αυξάνεται όσο αυξάνεται η διάμετρος της ράβδου (π.χ. ράβδοι #18 έχουν τάση διαρροής 474.01 MPa ενώ ράβδοι #4 βρέθηκε ότι έχουν τάση διαρροής 449.88 MPa).

Το πρώτο γράμμα στην ονομασία του δοκιμίου αφορά το είδος της φόρτισης, M για μονοτονική φόρτιση. Ο αριθμός αναφέρεται στη διάμετρο των ράβδων που διαπερνούν τη διεπιφάνεια και το γράμμα στο τέλος χρησιμοποιείται για την περίπτωση που χρειαστεί να επαναληφθεί πείραμα σε δοκίμιο με ίδια χαρακτηριστικά με αυτό που εξετάστηκε την πρώτη φορά. Π.χ. το δοκίμιο M4A υποβλήθηκε σε μονοτονική φόρτιση, οι ράβδοι ήταν #4 (12.82 mm). Αν εξεταζόταν και δεύτερο δοκίμιο με ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά τότε θα είχε την ονομασία M4B κ.ο.κ.

Πριν την έναρξη της δοκιμής, δημιουργήθηκε αρχική ρωγμή κατά μήκος του επιπέδου ολίσθησης με εύρος 0.254 mm. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο βρέθηκε ότι

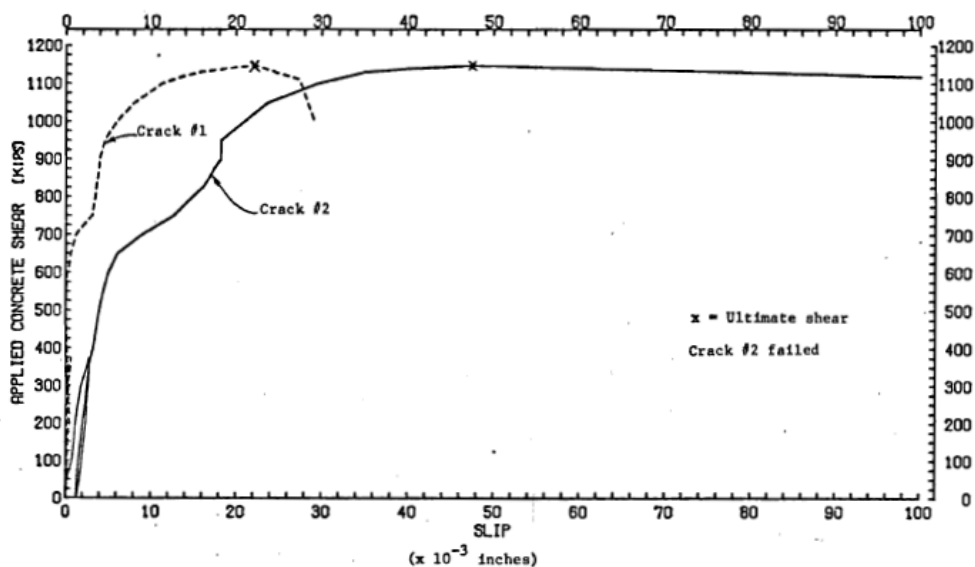


Οι πρώτες ρωγμές εμφανίστηκαν στο επίπεδο ολίσθησης για τιμή του φορτίου μεγαλύτερο 25% από το φορτίο λειτουργίας. Το μήκος τους αυξανόταν καθώς αυξανόταν η τιμή του φορτίου αλλά το εύρος τους δεν ξεπέρασε ποτέ τα 0.254 mm μέχρι λίγο πριν την αστοχία.

Όταν το φορτίο πλησίαζε την μέγιστη τιμή του, ρωγμές αναπτύχθηκαν στην άνω επιφάνεια του μεσαίου τμήματος, περιμετρικά της κεφαλής του γρύλου. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο μεγάλο πεδίο τάσεων που αναπτύσσεται κάτω από την κεφαλή φόρτισης, η οποία μετρήθηκε περίπου ίση με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος κοντά στην αστοχία. Οι ρωγμές αυτές προχώρησαν προς το εσωτερικό των δοκιμίων για πολύ λίγα εκατοστά.

Όσο η τιμή του φορτίου πλησίαζε στην οριακή τιμή στην αστοχία τόσο αυξανόταν η ολίσθηση και το εύρος της ρωγμής, ενώ ταυτόχρονα παρατηρήθηκε και στροφή του επιπέδου ολίσθησης ως προς την αρχική του θέση.

Για τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου μικρότερες από το 50% του μέγιστου, η ολίσθηση ήταν μικρότερη από 0.127mm. Επιπλέον για το ίδιο εύρος τιμών του εξωτερικού φορτίου, η τιμή της αποκόλλησης είναι περίπου ίση με την ολίσθηση. Η μέση τιμή της αποκόλλησης είναι 0.09 mm. Συνέπεια του παραπάνω είναι ο οπλισμός που διαπερνά τη διεπιφάνεια να μην παραμορφώνεται τόσο και έτσι ο βασικός μηχανισμός που αναλαμβάνει τη μεταφορά των διατμητικών τάσεων κατά μήκος του επιπέδου ολίσθησης είναι αυτός της αλληλοεμπλοκής αδρανών. Για παράδειγμα, στο δοκίμιο M11A (5Φ35.81,  $f_c=27.58$  MPa,  $V_u=4854.95$  kN), για τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου ίση με 1544.15 kN, η αντίσταση του μηχανισμού δράσης βλήτρου είναι 84.55 kN, δηλαδή περίπου 5%.



Σχήμα 8.1.2: Καμπύλη επιβαλλόμενου φορτίου - ολίσθησης για το δοκίμιο M8A (11Φ25.48,  $f_c=33.60$  MPa,  $V_u=5108.60$  kN) [19]

Για τιμές του φορτίου μεγαλύτερες από 50% του μέγιστου, τόσο η ολίσθηση όσο και η αποκόλληση αυξάνονται με πιο γρήγορο ρυθμό, κάτι που μπορεί να οφείλεται σε συνδυασμό της αποφλοίσωσης εξωτερικού στρώματος σκυροδέματος και παραίδευσης αδρανών που συνθλίβονται στη διεπιφάνεια. Η ταχύτερη αύξηση της τιμής της ολίσθησης οδηγεί στην αύξηση της καταπόνησης του οπλισμού. Στο στάδιο αυτό και καθώς πλησιάζουμε στην αστοχία, η συμμετοχή του μηχανισμού δράσης βλήτρου αυξάνεται.

Συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα, φαίνεται ότι, για μεγαλύτερες τιμές διαμέτρου των ράβδων (>32 mm), υπάρχει μείωση της αντοχής σε σχέση με τα δοκίμια στα οποία χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι μικρότερης διαμέτρου. Π.χ. το φορτίο αντίστασης για το δοκίμιο M18A (2Φ57.34,  $f_c=30.10$  MPa,  $V_u=5108.60$  kN) είναι μειωμένο κατά 15% σε σχέση με το δοκίμιο M8A (11Φ25.48,  $f_c=33.60$  MPa,  $V_u=4409.95$  kN). Το παραπάνω μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι οι μεγαλύτερες σε διάμετρο ράβδοι έχουν μεγαλύτερη καμπτική δυσκαμψία και έτσι παραλαμβάνουν μεγαλύτερες δυνάμεις βλήτρου. Αυτό, όμως οδηγεί στην σύνθλιψη και αποδιοργάνωση του περιβάλλοντος σκυροδέματος με αποτέλεσμα τη μείωση της τιμής του οριακού φορτίου.

Στον επόμενο πίνακα δίνονται τα χαρακτηριστικά των υλικών των δοκιμών καθώς και τα αποτελέσματα των δοκιμών:

**Πίνακας 8.1.1:** Χαρακτηριστικά δοκιμών και αποτελέσματα δοκιμών

A/A	Σκυρόδεμα $f_{cc}$ (MPa)	Χάλυβας $f_{sy}$ (MPa)	Αριθμός ράβδων	$d_b$ (mm)	$\rho f_{sy}$ (MPa)	$\delta_t$ (mm)	w (mm)	$V_{u,exp}$ (kN)
M4A	28.53	449.88	42	12.82	3.78	<b>1.346</b> 2.896	<b>0.940</b> 2.159	3849.25
M6A	28.88	428.30	20	19.02	3.77	<b>0.584</b> 1.549	<b>0.762</b> 1.372	5117.50
M8A	33.60	422.17	11	25.48	3.67	<b>0.559</b> 1.194	<b>0.254</b> 1.168	5108.60
M9A	32.55	466.29	8	28.67	3.73	<b>1.067</b> <b>1.168</b>	<b>1.524</b> <b>0.889</b>	5117.50
M10A	27.58	465.40	6	32.31	3.55	<b>0.533</b> 1.499	<b>0.432</b> 1.778	4494.50
M11A	27.58	464.71	5	35.81	3.62	<b>2.057</b> 1.295	<b>1.727</b> 0.838	4854.95
M14A	27.58	452.30	4	43.00	4.07	<b>0.483</b> 1.651	<b>0.483</b> 1.524	5059.65
M18A	30.10	474.01	2	57.34	3.79	<b>1.321</b> 1.041	<b>1.219</b> 1.118	4409.95

\* με έντονη γραμματοσειρά δίνονται οι τιμές της ολίσθησης  $\delta_t$  και του εύρους ρωγμής w για τη διεπιφάνεια που αστόχησε πρώτη



## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

Στον επόμενο πίνακα φαίνονται οι τιμές της μέγιστης τέμνουσας όπως αυτή έχει υπολογιστεί για κάθε δοκίμιο μετά από εφαρμογή των παραπάνω μαθηματικών μοντέλων. Στις πέντε τελευταίες στήλες του πίνακα δίνονται οι λόγοι της υπολογισμένης τέμνουσας δύναμης,  $V_{u,cal}$ , προς την τιμή που προέκυψε από τις δοκιμές,  $V_{u,exp}$ , με σκοπό την άμεση σύγκριση των μαθηματικών μοντέλων.

**Πίνακας 8.1.2:** Αποτελέσματα εφαρμογής των μοντέλων

A/A	$V_{u,cal,1}$ (kN)	$V_{u,cal,2}$ (kN)	$V_{u,cal,3}$ (kN)	$V_{u,cal,4}$ (kN)	$V_{u,cal,5}$ (kN)	$\frac{V_{u,cal,1}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,2}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,3}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,4}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,5}}{V_{u,exp}}$
M4A	3731.09	4695.72	4468.61	2316.15	4177.81	0.97	1.22	1.16	0.60	1.09
M6A	3725.96	3841.60	4491.94	2333.29	4196.32	0.73	0.75	0.88	0.46	0.82
M8A	3674.12	3663.54	4461.68	2380.34	4438.99	0.72	0.72	0.87	0.47	0.87
M9A	3705.98	3979.03	4463.42	2359.10	4400.46	0.72	0.78	0.87	0.46	0.86
M10A	3610.99	3431.22	4161.69	2196.38	4037.16	0.80	0.76	0.93	0.49	0.90
M11A	3651.46	4106.78	4254.54	2228.12	4065.02	0.75	0.85	0.88	0.46	0.84
M14A	3881.63	3872.88	4791.56	2413.69	4222.86	0.77	0.77	0.95	0.48	0.83
M18A	3737.86	3823.43	4485.92	2336.40	4277.82	0.85	0.87	1.02	0.53	0.97

- \* 1. Mattock  
2. BEF  
3. Rasmussen  
4. Randl  
5. Mansur et al.

Δίνεται στη συνέχεια ένα παράδειγμα υπολογισμού της μέγιστης διατμητικής δύναμης από εφαρμογή των μοντέλων:

*Δοκίμιο M6A:*

- Τροποποιημένο μοντέλο διάτμησης – τριβής του Mattock

Η μέγιστη διατμητική τάση δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$v_u = 2.76 + 0.8(\rho f_y + \sigma_n) \text{ (MPa)}$$

Για  $\rho f_y = 3.77 \text{ MPa}$  και  $\sigma_n = 0$  υπολογίζεται  $v_u = 2.76 + 0.8(3.77 + 0) = 5.78 \text{ MPa}$  ή

$$V_{u,cal,1} = 5.78 \cdot \frac{6451.6}{10} = 3725.96 \text{ kN}$$

- Beam on Elastic Foundation

Η μέγιστη διατμητική δύναμη δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F_{d,u} = 2\beta^3 EI \delta_t \leq \frac{A_s f_{sy}}{\sqrt{3}}$$

Υπολογίζουμε τα εξής:

$$K_f = 127 \cdot \sqrt{f_c} \cdot (d_b)^{-\frac{2}{3}} = 127 \cdot \sqrt{28.88} \cdot (19.02)^{-\frac{2}{3}} = 122.78 \text{ MPa/mm}$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{3.14 \cdot (19.02)^4}{64} = 6420.838 \text{ mm}^4$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_f \cdot d_b}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{(122.78) \cdot (19.02)}{4(200000)(6420.838)}} = 0.024$$

$$\delta_t = 0.584 \text{ mm}$$

$$F_{d,u} = (20) \cdot 2 \cdot (0.024^3) \cdot (200000) \cdot (6420.838) \cdot (0.584) = 435.98 \text{ kN}$$

$$\frac{A_s f_{sy}}{\sqrt{3}} = \frac{56.796 \cdot 42.83}{\sqrt{3}} = 1404.49 \text{ kN} > 472.39 \text{ kN}$$

Η παραπάνω τιμή αφορά μόνο τη δύναμη λόγω δράσης βλήτρου του σπλισμού. Αν λάβουμε υπόψη και τη συνεισφορά λόγω του μηχανισμού τριβής τότε έχουμε:

$$V_{u,f} = \mu \rho f_{sy} A = (1.4) \frac{(3.77)}{10} (6451.6) = 3405.63 \text{ kN}$$

Η μέγιστη διατμητική τάση λόγω τριβής δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{fud} = 0.4 (f_{cd}^2 \rho f_{sy})^{1/3} \text{ (KAN.ΕΠΕ.)}$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση προκύπτει ότι

$$\tau_{fud} = 0.4 ((28.88^2)(3.77))^{1/3} = 5.86 \text{ MPa ή}$$

$$V_{f,max} = \frac{(5.86)}{10} (6451.6) = 3779.94 \text{ kN}$$

Επομένως θα είναι:

$$V_{u,cal,2} = F_{d,u} + V_{f,u} = 435.98 + 3405.63 = \mathbf{3841.60 \text{ kN}}$$

- Rasmussen

$$F_{d,u} = 1.35 \left[ \sqrt{1 + 9\varepsilon^2} - 3\varepsilon \right] d_b^2 \sqrt{f_{sy}f_{cc}} \leq \frac{A_s f_{sy}}{\sqrt{3}} \text{ όπου } \varepsilon = \frac{e}{d_b} \sqrt{\frac{f_{cc}}{f_{sy}}}$$

Για  $e=0$  προκύπτει ότι  $\varepsilon=0$  οπότε:

$$F_{d,u} = 20 \cdot 1.35 \left[ \sqrt{f_{sy}f_{cc}} \right] = 20 \cdot 1.35 \frac{\sqrt{(428.30)(28.88)}}{1000} = 1086.32 \text{ kN} < \frac{A_s f_{sy}}{\sqrt{3}}$$

Επομένως θα είναι:

$$V_{u,cal,3} = F_{d,u} + V_{f,u} = 1086.32 + 3405.63 = \mathbf{4491.94 \text{ kN}}$$

- Randl

$$v_u = c f_c^{1/3} + \mu(\rho k f_{sy} + \sigma_n) + a \rho \sqrt{f_{sy}f_c} \leq \beta v_f$$

Για σκυρόδεμα με  $f_c > 20 \text{ MPa}$  και για πολύ εκτραχυμένη διεπιφάνεια λαμβάνουμε τις εξής τιμές για τις σταθερές της παραπάνω σχέσης:

c	μ	k	a	β
0.4	0.8	0.5	0.9	0.4

Με αντικατάσταση προκύπτει ότι  $v_u = 3.62 \text{ MPa}$  ή

$$V_{u,cal,4} = \frac{(3.62)}{10} (6451.6) = \mathbf{2333.29 \text{ kN}}$$

- Mansur et al.

Είναι  $\frac{\rho f_{sy}}{f_c} = \frac{3.77}{28.88} = 0.13053$  επομένως ισχύει η εξίσωση:

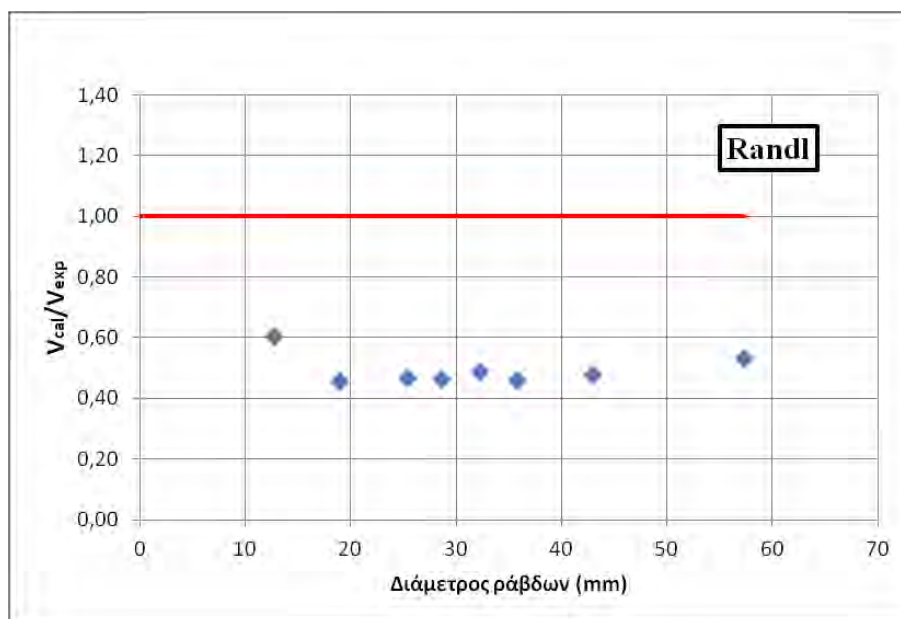
$$\frac{v_u}{f_c} = \frac{0.56}{f_c^{0.385}} + 0.55 \frac{\rho f_y}{f_c}, \text{ για } 0.075 \leq \frac{\rho f_y}{f_c} \leq 0.270$$

Με αντικατάσταση προκύπτει  $v_u = 6.50 \text{ MPa}$  ή

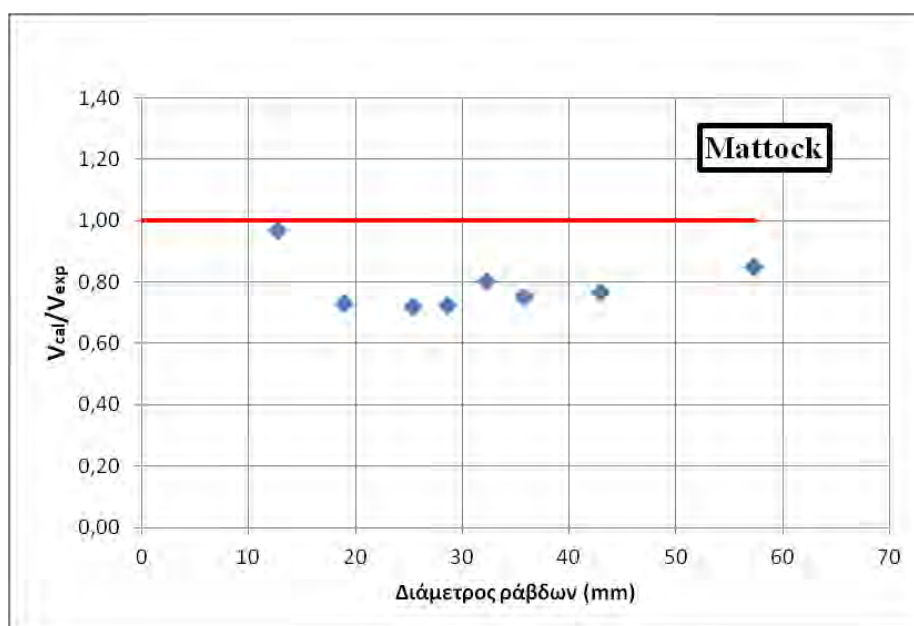
$$V_{u,cal,5} = \frac{6.50}{10} \cdot 6451.6 = \mathbf{4196.32 \text{ kN}}$$

## ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

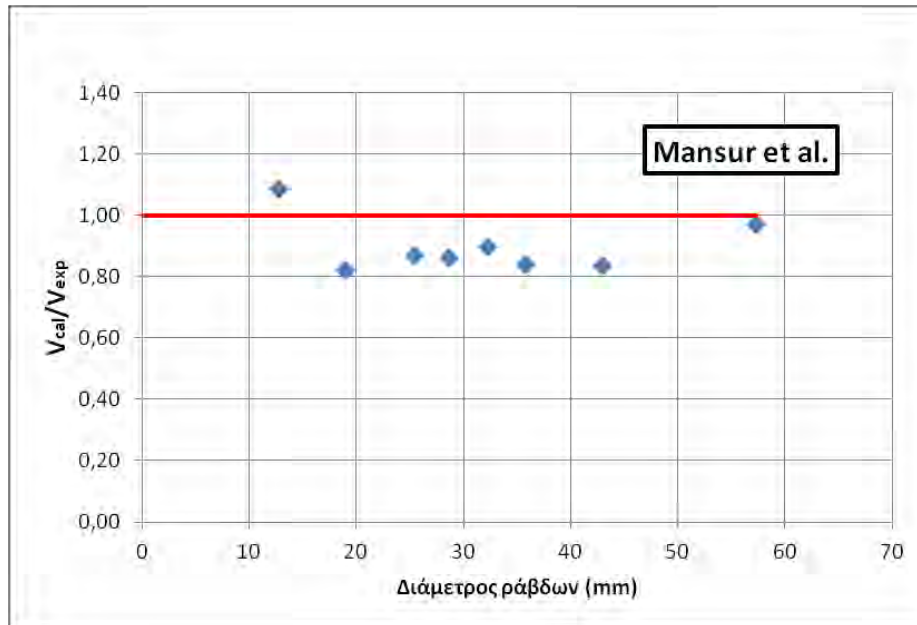
Τα πιο συντηρητικά αποτελέσματα δίνει το μοντέλο του Randl με τιμές 46% - 60% του φορτίου που μετρήθηκε στην αστοχία. Παρατηρούμε ότι η τιμή του παράγοντα  $rf_{sy}$  έχει γενικά σταθερή τιμή σε όλες τις δοκιμές. Οι τιμές που προκύπτουν από όλα τα μοντέλα είναι περίπου σταθερές για όλα τα δοκίμια, κάτι που μαρτυρά την ευαισθησία τους στην τιμή του  $rf_{sy}$ . Μόνη εξαίρεση αποτελεί το μοντέλο της δοκού επί ελαστικών στηρίξεων (BEF), όπως θα σχολιαστεί στα επόμενα.



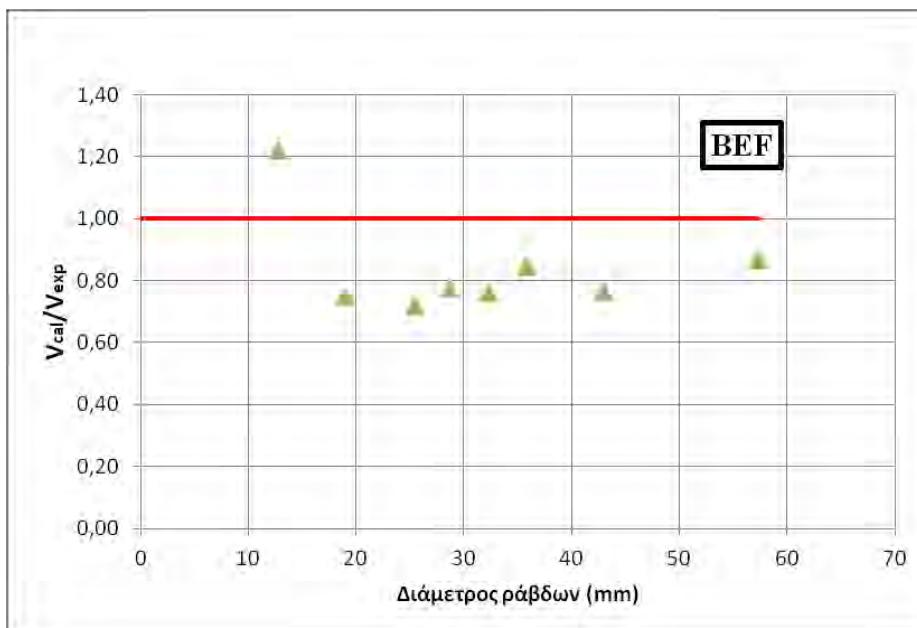
Σχήμα 8.1.3: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της διαμέτρου του οπλισμού για το μοντέλο του Randl



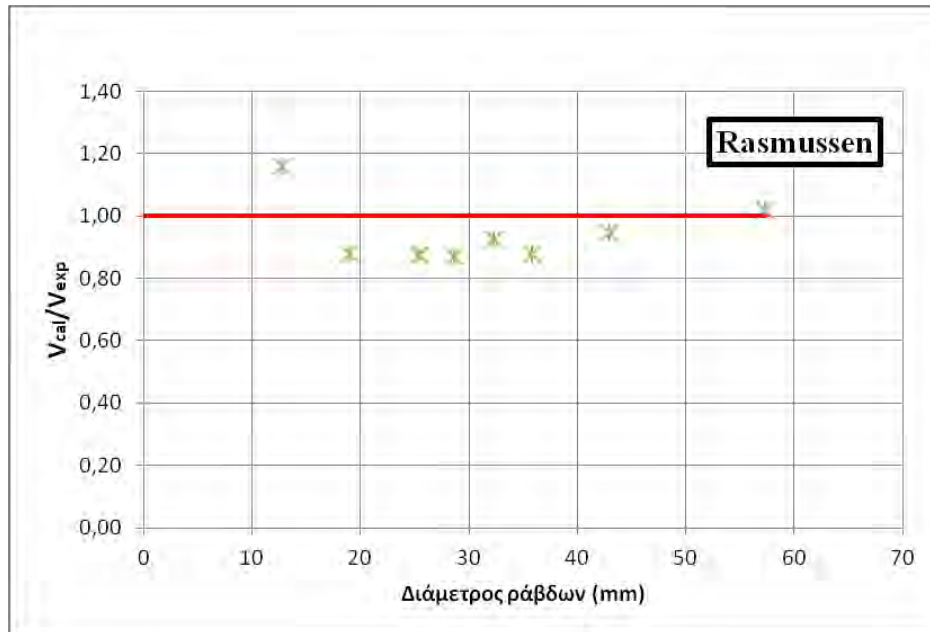
Σχήμα 8.1.4: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της διαμέτρου του οπλισμού για το μοντέλο του Mattock



Σχήμα 8.1.5: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της διαμέτρου του οπλισμού για το μοντέλο των Mansur et al.



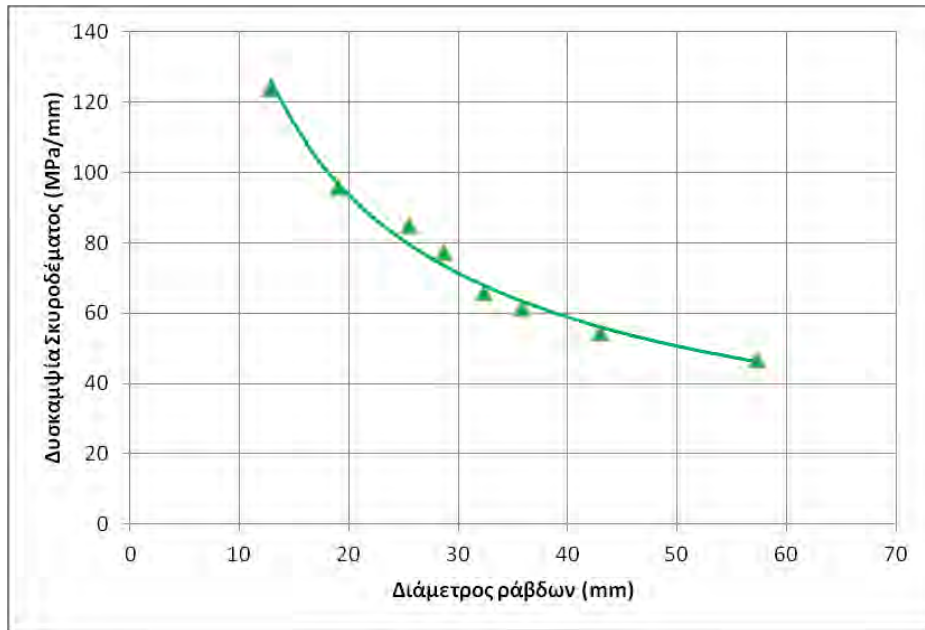
Σχήμα 8.1.6: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της διαμέτρου του οπλισμού για το προσομοίωμα BEF



**Σχήμα 8.1.7:** Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της διαμέτρου του σπλισμού για το μοντέλο του Rasmussen

Βλέπουμε ότι στο δοκίμιο M4A οι προβλέψεις από τα μοντέλα είναι πάρα πολύ κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ στα υπόλοιπα δοκίμια είναι περισσότερο συντηρητικές. Είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι το δοκίμιο M4A αστόχησε σε πολύ μικρότερο φορτίο από το αναμενόμενο. Παρατηρήθηκε ρωγμή που εκτεινόταν από το άνω άκρο μέχρι το μέσο του μεσαίου τμήματος του δοκιμίου. Πιστεύεται ότι η ρωγμή οφείλεται σε συνδυασμό τεσσάρων παραγόντων: α) διάρρηξη του σκυροδέματος λόγω των μεγάλων εφελκυστικών τάσεων λόγω συνάφειας χάλυβα – σκυροδέματος και της μικρής απόστασης μεταξύ διαδοχικών ράβδων (<5.00 cm μεταξύ κ.β.) β) σύνθλιψη του σκυροδέματος καθώς αυξανόταν η δύναμη λόγω δράσης βλήτρου γ) ολίσθηση του περιβάλλοντος σκυροδέματος στις ράβδους εξαιτίας της παρουσίας μεγάλου αριθμού ράβδων και δ) η πρόκληση εφελκυστικών τάσεων διάρρηξης στο σημείο εφαρμογής του φορτίου

Πρέπει να τονιστεί ότι για αύξηση της διαμέτρου της ράβδου το μοντέλο BEF είναι το μοναδικό που έδωσε μείωση του φορτίου αντοχής σε αντίθεση με τα υπόλοιπα. Το μοντέλο αυτό είναι το μόνο που λαμβάνει υπόψη την δυσκαμψία του περιβάλλοντος σκυροδέματος,  $K_f$ , και την ροπή αδράνειας της ράβδου. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της ράβδου τόσο μικρότερη είναι η δυσκαμψία του περιβάλλοντος σκυροδέματος και έτσι μειώνεται το φορτίο αντίστασης. Η διαπίστωση αυτή έρχεται σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, το δοκίμιο M10A (6Φ32.31,  $f_c=27.58$  MPa,  $V_u=4494.50$  kN) έδωσε τιμή φορτίου αντίστασης 3431.22 kN βάσει του προσομοιώματος, ενώ το δοκίμιο M6A (20Φ19.02,  $f_c=28.88$  MPa,  $V_u=4494.50$  kN) 3841.60 kN, δηλαδή για αύξηση της διαμέτρου από 19 mm σε 32 mm παρατήρηθηκε μείωση 11% και αντίστοιχα 12% βάσει των πειραματικών μετρήσεων.



Σχήμα 8.1.8: Δσκαμψία περιβάλλοντος σκυροδέματος συναρτήσει της διαμέτρου του οπλισμού

## 8.2.«Shear transfer under monotonic loading, across an interface between concretes cast at different times», Alan H. Mattock

Το πειραματικό πρόγραμμα [15] αφορά τη μελέτη της απόκρισης της διεπιφάνειας μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση. Οι μεταβλητές που εξετάστηκαν στα πειράματα ήταν:

1. Η επεξεργασία της διεπιφάνειας πριν σκυροδετηθεί το νέο στοιχείο του σκυροδέματος πάνω από το παλιό (λεία διεπιφάνεια ή εκτραχυμένη διεπιφάνεια)
2. Η ύπαρξη συνάφειας στη διεπιφάνεια ανάμεσα σε παλιό και προστιθέμενο στοιχείο
3. Η θλιπτική αντοχή του παλαιού και του νέου σκυροδέματος
4. Η ύπαρξη ρωγμής κατά μήκος της διεπιφάνειας πριν από την έναρξη της δοκιμής
5. Η παράμετρος του οπλισμού,  $\rho_{f_{sy}}$ .

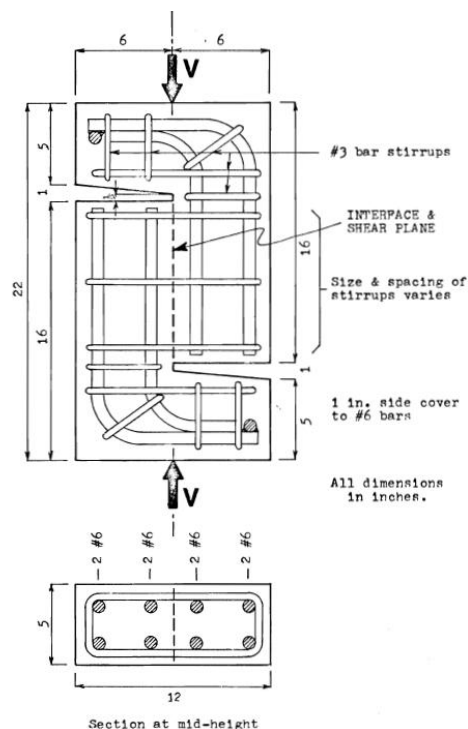
Τα δοκίμια αποτελούνται από δύο επιμέρους τμήματα σχήματος L, τοποθετημένα όπως φαίνεται στο σχήμα 2. Το εμβαδόν της επιφάνειας ολίσθησης είναι  $322.58 \text{ cm}^2$ . Η φόρτιση επιβάλλεται κεντρικά με αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται επιπλέον ροπή στη διεπιφάνεια. Ο οπλισμός είναι υπό μορφή κλειστών συνδετήρων έτσι ώστε να ξεπεραστεί το πρόβλημα της αγκύρωσής του. Τα επιμέρους τμήματα των δοκιμίων που δεν είναι μονολιθικά σκυροδετήθηκαν σε διαφορετικούς χρόνους, έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια διεπιφάνεια μεταξύ τους. Συνολικά εξετάστηκαν 8 σειρές δοκιμίων (Α ως Η, Πιν.3), των οποίων τα γενικά χαρακτηριστικά παρατίθενται σε επόμενο πίνακα. Μεταξύ των δοκιμίων της ίδιας σειράς, εξετάζεται η επιρροή της παραμέτρου  $\rho_{f_{sy}}$ , η οποία κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.57 – 10.38 MPa.

Στη διεπιφάνεια χρησιμοποιήθηκε οπλισμός διαμέτρου 9.53 ή 12.70 mm ενώ ο αριθμός των συνδετήρων που τη διαπερνούν μεταβάλλεται από 1 – 5 (2 – 10 ράβδοι αντίστοιχα). Ο χάλυβας είχε τάση διαρροής  $f_{sy}=345 \text{ MPa}$ .

Μετά τη σκυροδέτηση του πρώτου μισού των δοκιμίων, στα δοκίμια των σειρών C, G και H, η διεπιφάνεια δεν είχε υποστεί καμία επεξεργασία με στόχο να είναι όσο το δυνατόν πιο λεία. Στις σειρές B, D, E και F, πραγματοποιήθηκε τεχνητή εκτράχυνση της διεπιφάνειας μέχρι το σημείο εκείνο που απομακρύνθηκε πλήρως το επιφανειακό και ασθενέστερο στρώμα του σκυροδέματος. Τα δοκίμια της σειράς A είναι μονολιθικά. Επίσης, στις σειρές B, C και D ήταν επιθυμητό να διατηρηθεί η συνάφεια μεταξύ των δύο μισών των δοκιμίων κατά μήκος της διεπιφάνειας. Για να γίνει κάτι τέτοιο εφικτό, η διεπιφάνεια διαβρέχτηκε πριν τη σκυροδέτηση του δεύτερου τμήματος των δοκιμίων. Στις σειρές E, F, G και H, η διεπιφάνεια εμποτίστηκε με ένα μίγμα που περιείχε μαλακό σαπούνι έτσι ώστε να μην αναπτυχθεί συνάφεια.



Στα δοκίμια στα οποία προβλεπόταν η ύπαρξη ρωγμής στη διεπιφάνεια πριν την έναρξη της δοκιμής, ασκήθηκε γραμμικό φορτίο κατά μήκος της διεπιφάνειας και στις δύο όψεις των δοκιμίων. Μετά την απομάκρυνση του φορτίου η παραμένουσα τιμή του εύρους της ρωγμής είναι 0.254 mm. Το φορτίο που απαιτήθηκε για τη δημιουργία αρχικού εύρους ρωγμής είναι περίπου ανάλογο με την τιμή  $\rho f_{sy}$ .



Σχήμα 8.2.1: Τυπική μορφή δοκιμίων [15]

Πίνακας 8.2.1: Γενικά χαρακτηριστικά δοκιμίων

Σειρά	Είδος δοκιμίου	$f_{cc}$ (MPa)	Είδος διεπιφάνειας	Ύπαρξη συνάφειας	Αρχική κατάσταση
A	μονολιθικό	42	---	---	ρηγματωμένο
B	σύνθετο	42	εκτραχυμένη	ναι	ρηγματωμένο
		42			
C	σύνθετο	42	λεία	ναι	ρηγματωμένο
		42			
D	σύνθετο	42	εκτραχυμένη	ναι	ρηγματωμένο
		21			
E	σύνθετο	42	εκτραχυμένη	όχι	ρηγματωμένο
		42			
F	σύνθετο	42	εκτραχυμένη	όχι	μη ρηγματωμένο
		42			
G	σύνθετο	42	λεία	όχι	ρηγματωμένο
		42			
H	σύνθετο	42	λεία	όχι	μη ρηγματωμένο
		42			

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των δοκιμών συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα

**Πίνακας 8.2.2:** Χαρακτηριστικά δοκιμών και αποτελέσματα δοκιμών

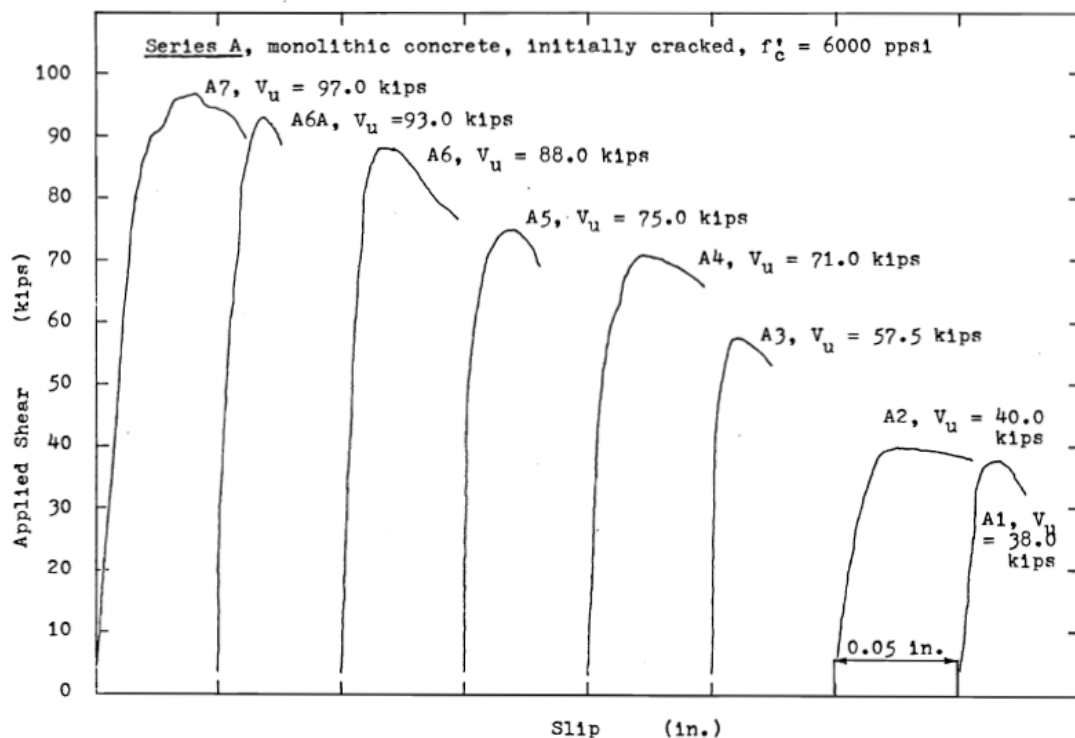
A/A	Σκυρόδεμα	Χάλυβας	Αριθμός ράβδων	$d_b$ (mm)	$\rho f_{sy}$ (MPa)	$\delta_t$ (mm)	w (mm)	$V_{u,exp}$ (kN)
	$f_{cc}$ (MPa)	$f_{sy}$ (MPa)						
A1	42.14	355.80	2	9.53	1.57	0.343	0.320	171.61
A2	42.14	355.79	4	9.53	3.15	0.577	0.173	180.64
A3	40.74	382.05	6	9.53	5.07	0.229	0.330	259.67
A4	41.16	382.05	8	9.53	6.76	0.541	0.391	320.64
A5	42.88	353.25	10	9.53	7.81	0.457	0.226	338.70
A6	41.30	330.72	8	12.70	10.38	0.373	0.259	397.42
A6A	41.79	330.72	8	12.70	10.38	0.450	0.462	419.99
A7	41.79	332.09	10	12.70	13.03	1.034	0.660	438.06
B1	40.88	353.25	2	9.53	1.56	0.305	0.053	109.96
B2	40.88	348.28	4	9.53	3.08	0.439	0.043	158.06
B3	42.38	353.25	6	9.53	4.68	0.381	0.211	237.99
B4	42.38	370.81	8	9.53	6.56	0.442	0.157	288.128
B6	41.26	339.33	8	12.70	10.65	0.368	0.254	383.87
C1	41.09	350.76	2	9.53	1.55	2.725	0.391	47.42
C2	41.09	350.76	4	9.53	3.10	1.059	0.078	81.29
C3	41.86	348.28	6	9.53	4.62	0.622	0.129	96.64
C4	41.86	355.79	8	9.53	6.29	0.879	0.046	135.48
C5	43.15	363.30	10	9.53	8.03	0.744	0.152	176.12
C6	43.15	311.77	8	12.70	9.80	0.538	0.163	199.16

D1	26.39	353.25	2	9.53	1.56	0.251	0.155	133.23
D2	26.39	353.25	4	9.53	3.12	0.246	0.114	207.74
D3	20.58	385.84	6	9.53	5.12	0.533	0.234	228.06
D4	20.58	385.84	8	9.53	6.82	0.358	0.234	226.25
D4A	17.46	372.06	8	9.53	6.58	0.846	0.356	224.45
D6	20.68	334.16	8	12.70	10.49	0.759	0.305	331.93
E1	41.58	325.69	2	9.53	1.44	0.724	0.317	94.84
E2	45.5	325.69	4	9.53	2.88	1.105	0.343	160.32
E3	41.93	325.69	6	9.53	4.32	1.359	0.343	191.94
E4	41.02	325.69	8	9.53	5.76	0.940	0.279	234.84
E6	42.87	312.11	8	12.70	9.80	0.732	0.254	282.25
F1	42.07	319.42	2	9.53	1.41	1.067	0.508	95.29
F2	41.58	325.69	4	9.53	2.88	0.483	0.221	152.19
F3	45.5	325.69	6	9.53	4.32	0.864	0.432	202.32
F4	41.93	325.69	8	9.53	5.76	0.516	0.330	273.23
F6	44.48	326.58	8	12.70	10.25	0.526	0.356	343.23
G1	41.09	350.76	2	9.53	1.55	2.261	0.086	36.13
G2	41.09	350.76	4	9.53	3.10	1.524	0.036	59.61
G3	41.86	348.28	6	9.53	4.62	1.105	0.142	86.71
G4	41.86	355.79	8	9.53	6.29	1.016	0.254	112.90
G5	43.15	363.30	10	9.53	8.03	0.610	0.221	132.32
G6	43.29	311.77	8	12.70	9.79	0.889	0.165	175.68
H1	40.77	382.05	2	9.53	1.69	1.638	0.292	42.45
H2	42.56	382.05	4	9.53	3.38	0.610	0.066	72.71

H3	42.56	382.05	6	9.53	5.07	0.597	0.147	103.87
H4	42.52	369.57	8	9.53	6.53	0.427	0.165	115.16
H6	41.30	322.45	8	12.70	10.12	0.889	0.267	171.61

- Μονολιθικά, αρχικά ρηγματωμένα δοκίμια (Σειρά A)

Από την έναρξη της επιβολής της εξωτερικής φόρτισης το εύρος της ρωγμής στο επίπεδο ολίσθησης καθώς και η τιμή της ολίσθησης αυξάνονται με γρήγορο ρυθμό. Η αύξηση του φορτίου συνοδεύεται από εμφάνιση διαγώνιων ρωγμών λόγω εφελκυσμού στην περιοχή πολύ κοντά στη διεπιφάνεια. Για μεγάλες τιμές της παραμέτρου  $\rho f_{sy}$  ( $>7.81$  MPa) οι ρωγμές αυτές αναπτύσσονται σε όλο το μήκος του επιπέδου ολίσθησης, κάτι που υποδεικνύει ότι η παρουσία μεγάλου ποσοστού οπλισμού στη διεπιφάνεια οδηγεί σε πιο ψαθυρή συμπεριφορά. Στην αστοχία, παρατηρείται απότομη αύξηση της ολίσθησης και του εύρους της ρωγμής στη διεπιφάνεια και σε μερικές περιπτώσεις αυτή συνοδεύεται από αποφλοίωση του σκυροδέματος που γειτνιάζει με τη διεπιφάνεια.



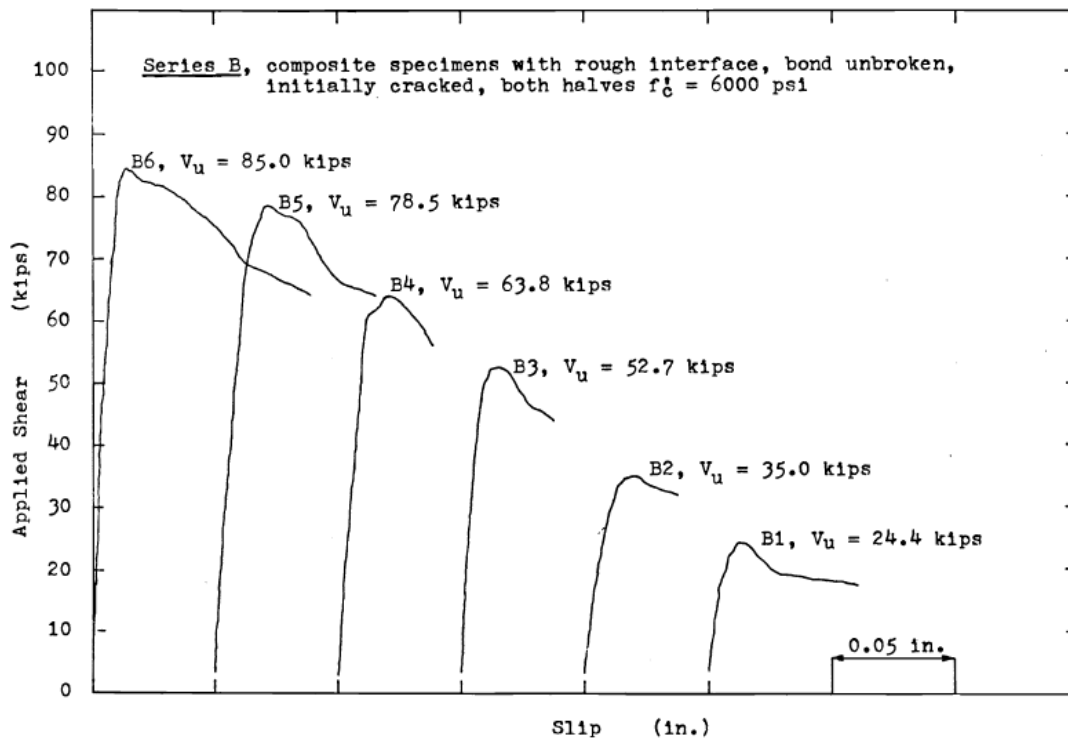
Σχήμα 8.2.2: Φέρουσα Ικανότητα συναρτήσει της ολίσθησης για τη σειρά A [15]

- Σύνθετα δοκίμια με εκτραχυμένη διεπιφάνεια (Σειρές B, D, E και F)

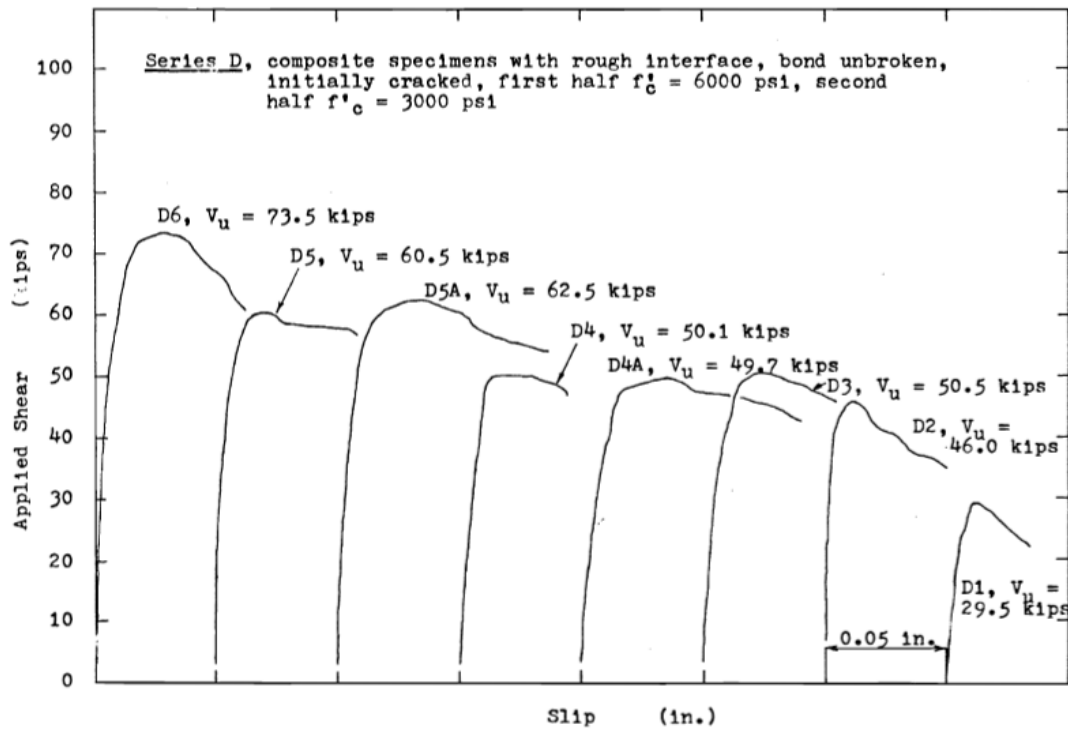
Η συμπεριφορά των δοκιμίων των σειρών B και D, στα οποία επιτεύχθηκε αρκετά καλή συνάφεια μεταξύ των επιμέρους τμημάτων, ήταν παρόμοια με αυτή των δοκιμίων της σειράς A. Οι διαφορές εντοπίζονται στο ότι σχηματίστηκαν λιγότερες διαγώνιες ρωγμές λόγω εφελκυσμού. Συγκεκριμένα στη σειρά D, οι ρωγμές αυτές συνοδεύτηκαν από μερική αποφλοιώση του σκυροδέματος κοντά στη διεπιφάνεια του τμήματος με την μικρότερη θλιπτική αντοχή.

Στα δοκίμια της σειράς F, στα οποία η συνοχή στη διεπιφάνεια είχε επί σκοπού καταστραφεί και το εύρος της ρωγμής κατά μήκος του επιπέδου ολίσθησης ήταν μηδενικό, ο τρόπος αστοχίας ήταν όμοιος με τα δοκίμια των άλλων σειρών (B και D), με τη διαφορά ότι η αστοχία συνέβη για μεγαλύτερες τιμές της ολίσθησης.

Σημειωτέον ότι στα δοκίμια της σειράς E, στα οποία το εύρος της ρωγμής κατά μήκος της διεπιφάνειας δεν είναι μηδενικό πριν την έναρξη της δοκιμής και ταυτόχρονα δεν υπάρχει συνάφεια, η δυσκαμψία είναι αρκετά μικρότερη από αυτή που επέδειξαν τα δοκίμια των άλλων σειρών. Επιπλέον, η τιμή της ολίσθησης στην αστοχία, όπως ήταν λογικό, είναι μεγαλύτερη.



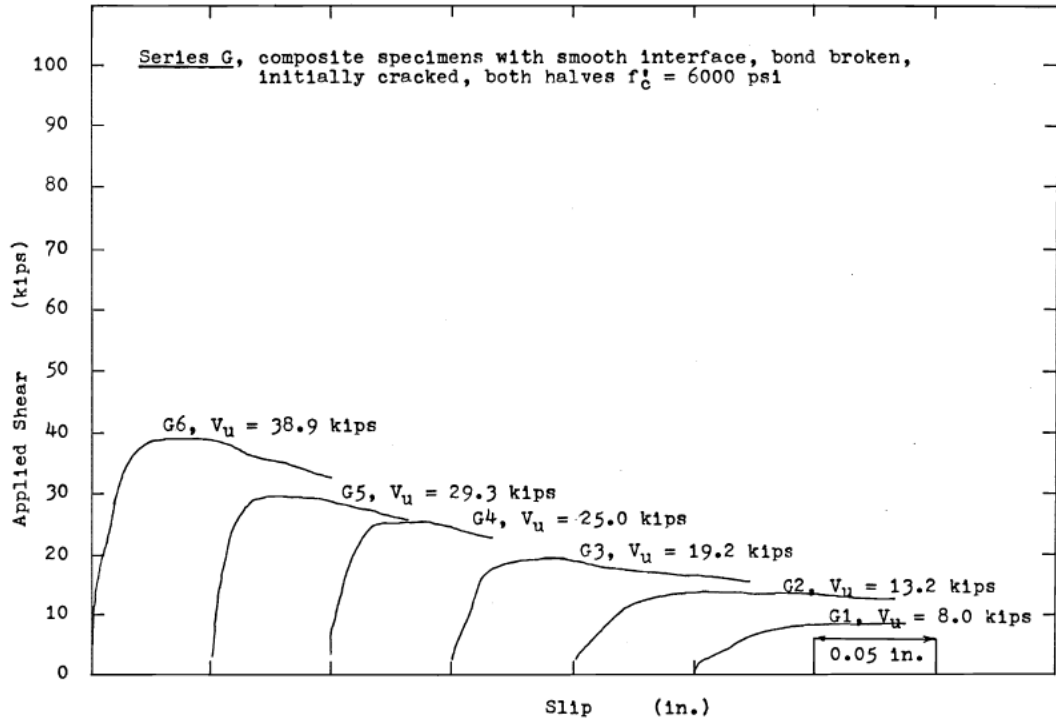
Σχήμα 8.2.3: Φέρουσα Ικανότητα συναρτήσει της ολίσθησης για τη σειρά B [15]



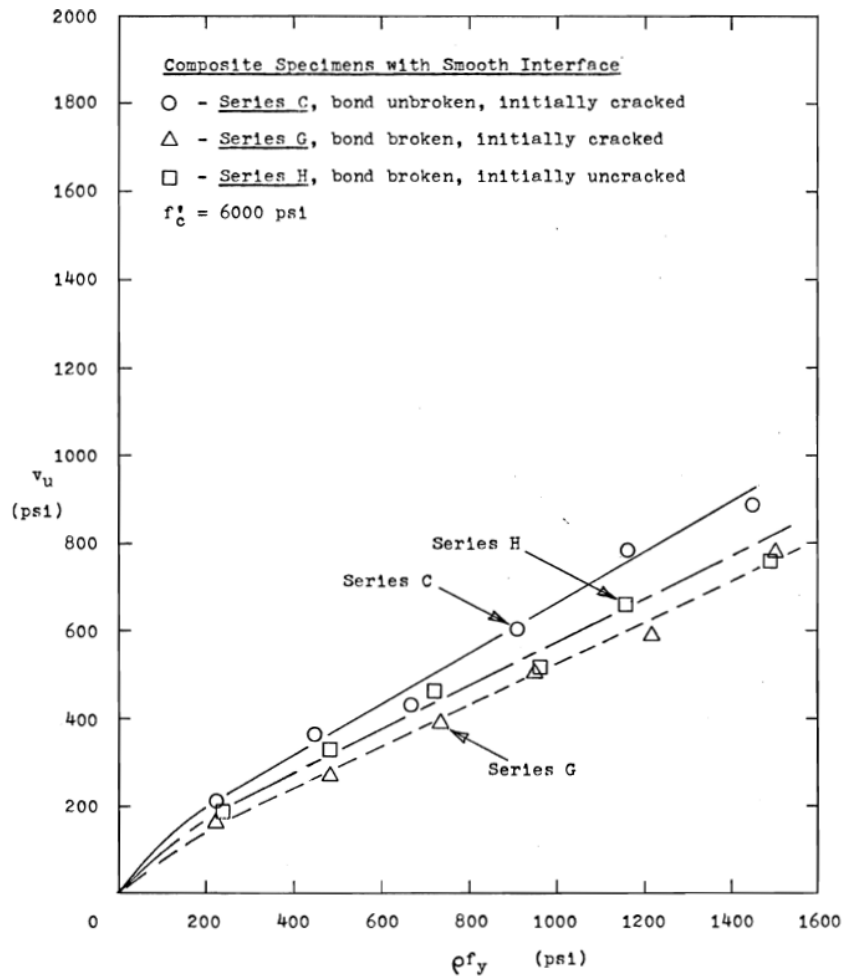
Σχήμα 8.2.4: Φέρουσα Ικανότητα συναρτήσει της ολίσθησης για τη σειρά D [15]

- Σύνθετα δοκίμια με λεία διεπιφάνεια (Σειρές C, G και H)

Η ύπαρξη ή μη συνάφειας μεταξύ των επιμέρους τμημάτων στη διεπιφάνεια επηρεάζει την τιμή της διατμητικής δύναμης που αναπτύσσεται. Έτσι στις σειρές δοκιμών G και H, όπου δεν επιτράπηκε να αναπτυχθεί συνάφεια, η τέμνουσα δύναμη στην αστοχία είχε μικρότερη τιμή από αυτή στα δοκίμια της σειράς C. Συγκρίνοντας, όμως την αντοχή των δοκιμών με λεία διεπιφάνεια με αυτά στα οποία έχει γίνει εκτράχυνση της διεπιφάνειας, παρατηρούμε ότι τα τελευταία έχουν αναπτύξει μεγαλύτερο φορτίο αντίστασης από ότι τα πρώτα. Αυτό σημαίνει στα δοκίμια των σειρών A, B, D, E και F είναι σημαντική η προσφορά του μηχανισμού τριβής στην τελική αντοχή της διεπιφάνειας έναντι διάτμησης. Η παραπάνω διαπίστωση ενισχύεται από το γεγονός ότι, στην αστοχία, παρατηρήθηκαν μεγάλες τιμές της σχετικής ολίσθησης και χαμηλές τιμές του εύρους της ρογμής κατά μήκος του επιπέδου ολίσθησης.



Σχήμα 8.2.5: Φέρουσα Ικανότητα συναρτήσει της ολίσθησης για τη σειρά G



Σχήμα 8.2.6: Επιρροή της επεξεργασίας της διεπιφάνειας στις σειρές δοκιμών με λεία διεπιφάνεια (C, G, H) [15]

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

**Πίνακας 8.2.3:** Αποτελέσματα εφαρμογής των μοντέλων

A/A	$V_{u,cal,1}$ (kN)	$V_{u,cal,2}$ (kN)	$V_{u,cal,3}$ (kN)	$V_{u,cal,4}$ (kN)	$V_{u,cal,5}$ (kN)	$\frac{V_{u,cal,1}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,2}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,3}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,4}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,5}}{V_{u,exp}}$
A1	129.62	53.02	69.88	85.98	126.83	0.76	0.31	0.41	0.50	0.74
A2	170.20	123.02	139.75	127.06	253.67	0.94	0.68	0.77	0.70	1.40
A3	219.77	155.34	222.52	174.14	266.48	0.85	0.60	0.86	0.67	1.03
A4	263.36	252.10	297.32	217.87	297.56	0.82	0.79	0.93	0.68	0.93
A5	290.51	284.88	346.88	250.06	320.75	0.86	0.84	1.02	0.74	0.95
A6	357.02	344.87	461.39	263.47	362.33	0.90	0.87	1.16	0.66	0.91
A6A	357.02	361.15	461.39	265.55	363.63	0.85	0.86	1.10	0.63	0.87
A7	404.42	579.13	579.13	265.55	404.42	0.92	1.32	1.32	0.61	0.92
B1	129.33	51.23	69.38	85.06	125.92	1.18	0.47	0.63	0.77	1.15
B2	168.49	110.93	136.80	124.73	231.60	1.07	0.70	0.87	0.79	1.47
B3	209.92	162.42	208.13	167.65	264.06	0.88	0.68	0.87	0.70	1.11
B4	258.23	233.44	291.30	215.08	297.28	0.90	0.81	1.01	0.75	1.03
B6	364.00	350.79	473.41	263.30	367.04	0.95	0.91	1.23	0.69	0.96
C1	129.04	28.88	28.88	25.68	125.04	2.72	0.61	0.61	0.54	2.64
C2	169.06	57.75	57.75	51.35	232.55	2.08	0.71	0.71	0.63	2.86
C3	208.22	67.49	86.02	77.48	261.51	2.15	0.70	0.89	0.80	2.71
C4	251.37	117.16	117.16	104.41	291.18	1.86	0.86	0.86	0.77	2.15
C5	296.24	136.09	149.54	133.90	325.43	1.68	0.77	0.85	0.76	1.85
C6	341.67	112.73	182.32	135.64	356.65	1.72	0.57	0.92	0.68	1.79
D1	129.33	47.93	63.97	75.99	125.92	0.97	0.36	0.48	0.57	0.95
D2	169.62	95.56	127.94	113.57	190.62	0.82	0.46	0.62	0.55	0.92



D3	199.16	176.36	197.59	146.05	206.81	0.87	0.77	0.87	0.64	0.91
D4	199.16	215.74	263.46	146.05	199.16	0.88	0.95	1.16	0.65	0.88
D4A	168.97	257.95	248.82	123.91	169.02	0.75	1.15	1.11	0.55	0.75
D6	200.13	391.48	415.58	146.76	200.18	0.60	1.18	1.25	0.44	0.60
E1	126.18	63.27	63.96	34.51	116.10	1.33	0.67	0.67	0.36	1.22
E2	163.34	127.93	127.93	70.69	232.20	1.02	0.80	0.80	0.44	1.45
E3	200.49	191.89	191.89	103.75	256.38	1.04	1.00	1.00	0.54	1.34
E4	237.64	255.86	255.86	137.53	279.51	1.01	1.09	1.09	0.59	1.19
E6	341.94	405.91	435.43	202.58	356.11	1.21	1.44	1.54	0.72	1.26
F1	125.47	62.73	62.73	34.12	113.86	1.32	0.66	0.66	0.36	1.19
F2	163.34	109.16	127.93	69.01	232.20	1.07	0.72	0.84	0.45	1.53
F3	200.49	191.89	191.89	106.04	265.64	0.99	0.95	0.95	0.52	1.31
F4	237.64	223.31	255.86	138.33	281.92	0.87	0.82	0.94	0.51	1.03
F6	353.67	376.11	455.62	207.62	368.35	1.03	1.10	1.33	0.60	1.07
G1	129.04	28.88	28.88	25.68	125.04	3.57	0.80	0.80	0.71	3.46
G2	169.06	57.75	57.75	51.35	232.55	2.84	0.97	0.97	0.86	3.90
G3	208.22	86.02	86.02	77.48	261.51	2.40	0.99	0.99	0.89	3.02
G4	251.37	117.16	117.16	104.41	291.18	2.23	1.04	1.04	0.92	2.58
G5	296.24	111.58	149.54	133.90	325.43	2.24	0.84	1.13	1.01	2.46
G6	341.67	182.32	182.32	135.93	357.02	1.94	1.04	1.04	0.77	2.03
H1	132.61	31.45	30.60	26.69	136.19	3.12	0.74	0.72	0.63	3.21
H2	176.19	44.40	62.54	54.55	241.33	2.42	0.61	0.86	0.75	3.32
H3	219.77	65.19	93.81	81.82	271.30	2.12	0.63	0.90	0.79	2.61
H4	257.66	62.14	121.70	107.25	297.25	2.24	0.54	1.06	0.93	2.58

H6	350.32	183.24	188.57	131.74	357.72	2.04	1.07	1.10	0.77	2.08
----	--------	--------	--------	--------	--------	------	------	------	------	------

## ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

- Μονολιθικά, αρχικά ρηγματωμένα δοκίμια (Σειρά Α)

Από την εφαρμογή των θεωρητικών προσομοιωμάτων που εξετάστηκαν, παρατηρούμε ότι τις πιο μικρές τιμές δίνει το προσομοίωμα της δοκού επί ελαστικών στηρίξεων (BEF). Αυτό δεν καθιστά τη μέθοδο αυτή ως την πιο ακριβή γιατί, όπως μπορούμε να διακρίνουμε από τα αποτελέσματα υπερεκτιμά το μηχανισμό δράσης βλήτρου του οπλισμού για μεγάλες τιμές του  $rf_{sy} > 6.76$ . Περίπου ίδια αποτελέσματα προκύπτουν και από την εφαρμογή του μοντέλου του Rasmussen, μόνο που, ακόμα και για χαμηλά ποσοστά οπλισμού δίνει λιγότερο συντηρητικά αποτελέσματα συγκριτικά με την προηγούμενη μέθοδο που σχολιάστηκε. Πάλι, όμως, όταν αυξάνεται το ποσοστό οπλισμού, και η μέθοδος αυτή υπερεκτιμά την συμβολή του στο φορτίο αντίστασης σε μεγαλύτερο βαθμό από το προηγούμενο μοντέλο. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι το μοντέλο αυτό δεν περιλαμβάνει την επιρροή του μεγέθους της ολίσθησης στην αστοχία.

Από την άλλη, το μοντέλο του Mattock, δίνει αρκετά καλά αποτελέσματα καθώς η εξίσωση που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει τόσο τη συμβολή του μηχανισμού τριβής όσο και τη συμβολή του μηχανισμού δράσης βλήτρου. Τα αποτελέσματα που δίνει κυμαίνονται μεταξύ 76% - 97% του φορτίου αντίστασης που αναπτύχθηκε στη διεπιφάνεια. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι δεν λαμβάνει υπόψη την τιμή της ολίσθησης στην αστοχία και ότι θεωρεί την συμβολή του μηχανισμού δράσης βλήτρου σταθερή. Ο μηχανισμός τριβής, στην περίπτωση μεγάλου ποσοστού οπλισμού, ίσως και να υπερεκτιμάται, καθώς εξαρτάται από την εισαγόμενη από τον οπλισμό κάθετη δύναμη στη διεπιφάνεια (για το λόγο αυτό και στο δοκίμιο A7 η τιμή της προβλεπόμενης, από το μοντέλο, τέμνουσας είναι η μεγαλύτερη από όλα τα άλλα δοκίμια).

Η εφαρμογή του μοντέλου του Randl δίνει τα πιο συντηρητικά αποτελέσματα και αυτό το καθιστά ως το καταλληλότερο μοντέλο για σχεδιασμό. Τα αποτελέσματα που δίνει κυμαίνονται μεταξύ 50% - 89%. Λαμβάνει υπόψη όλους τους μηχανισμούς που συμμετέχουν στην μεταφορά διατμητικών τάσεων σε μια διεπιφάνεια (συνάφεια και μηχανισμός αλληλοεμπλοκής αδρανών, μηχανισμός δράσης τριβής και μηχανισμός δράσης βλήτρου). Και σε αυτό το μοντέλο παρατηρείται αύξηση της δύναμης για αύξηση της τιμής του  $rf_{sy}$ , η οποία είναι μέσα σε λογικά όρια, δηλαδή δεν υπερεκτιμά τη δράση βλήτρου του οπλισμού.

Τέλος, το μοντέλο των Mansur et al. δίνει προβλέψεις που είναι κατά της ασφαλείας. Όμοια με το μοντέλο του Mattock βασίζεται στο μηχανισμό τριβής και δράσης βλήτρου. Η συνεισφορά των μηχανισμών εξαρτάται από το ποσοστό του

οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια και συγκεκριμένα από την τιμή της παραμέτρου  $\rho f_{sy}$ . Η επιρροή αυτή μετριάζεται από την εισαγωγή της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος στις σχέσεις υπολογισμού της μέγιστης διατμητικής τάσης. Η σχέση υπολογισμού της εξαρτάται από την τιμή του λόγου  $\frac{\rho f_{sy}}{f_c}$ . Η χοντρική εκτίμηση που γίνεται, αγνοώντας άλλα χαρακτηριστικά των δοκιμίων, καθιστά το μοντέλο αυτό ως το λιγότερο αξιόπιστο.

- Σύνθετα δοκίμια με εκτραχυμένη διεπιφάνεια (Σειρές B, D, E και F)

Η εφαρμογή του μοντέλου της δοκού επί ελαστικών στηρίξεων, για τις σειρές B και D δίνει παρόμοια αποτελέσματα με τη σειρά A. Και πάλι φαίνεται ότι υπερεκτιμάται η συμβολή του μηχανισμού δράσης βλήτρου καθώς το ποσοστό του οπλισμού αυξάνει. Η όμοια συμπεριφορά των δοκιμίων των σειρών B και D με αυτά της σειράς A αποτυπώνεται και στην εφαρμογή του μοντέλου του Rasmussen, για το οποίο ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις με πριν. Για τις σειρές E και F, τα παραπάνω μοντέλα δίνουν χαμηλές τιμές της τέμνουσας σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από τα πειράματα για χαμηλά ποσοστά οπλισμού, και στη συνέχεια η τιμή της προβλεπόμενης δύναμης ξεπερνά την δύναμη που παρατηρήθηκε από τα πειράματα για μεγαλύτερα ποσοστά οπλισμού.

Το μοντέλο του Mattock στην περίπτωση των δοκιμίων που δεν ήταν μονολιθικά, έδωσε αυξημένες τιμές της διατμητικής τάσης που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια στην αστοχία. Από τη στιγμή που τα δοκίμια δεν είναι μονολιθικά, η συμβολή των μηχανισμών τριβής και αλληλοεμπλοκής αδρανών είναι μικρότερης σημασίας σε σχέση με τα δοκίμια της σειράς A. Ο τύπος των δοκιμίων και τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας δεν αποτυπώνονται στη σχέση του Mattock.

Το μοντέλο του Randl είναι αυτό που προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική κατάσταση και αυτό γιατί στη σχέση υπολογισμού της μέγιστης διατμητικής τάσης λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας. Η απώλεια συνάφειας αποτυπώνεται στην εξίσωση λαμβάνοντας  $c=0$ . Και στις σειρές αυτές παρατηρήθηκε η αύξηση της τιμής της προβλεπόμενης διατμητικής τάσης για μεγαλύτερα ποσοστά οπλισμού.

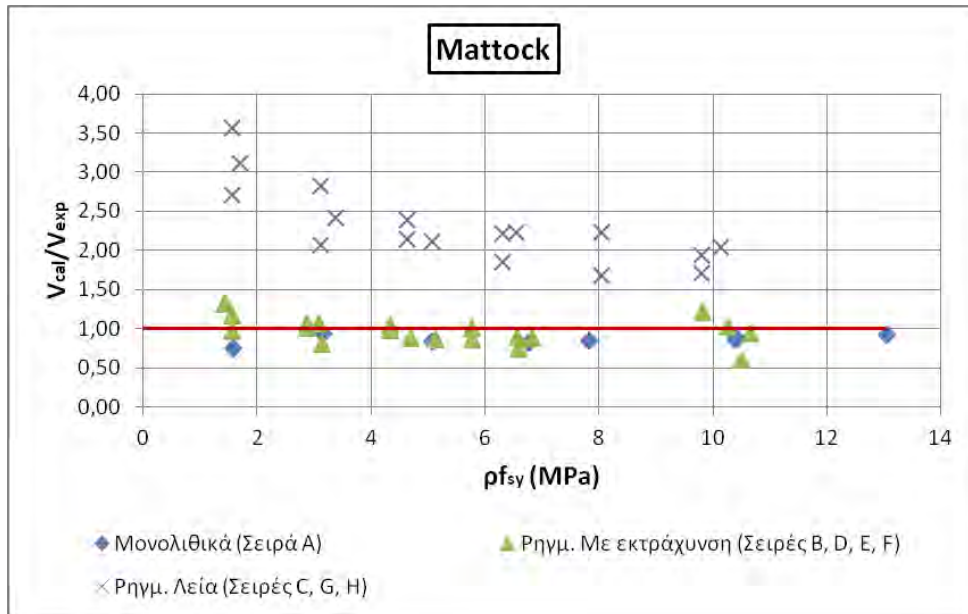
Το μοντέλο των Mansur et al., όμοια με το μοντέλο του Mattock, δεν λαμβάνει υπόψη τον τύπο των δοκιμίων και τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας και σε συνδυασμό με την χοντρική κατηγοριοποίηση που γίνεται ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου  $\frac{\rho f_{sy}}{f_c}$  δίνει τιμές πολύ μεγαλύτερες από αυτές που παρατηρήθηκαν στα πειράματα.

- Σύνθετα δοκίμια με λεία διεπιφάνεια (Σειρές C, G και H)

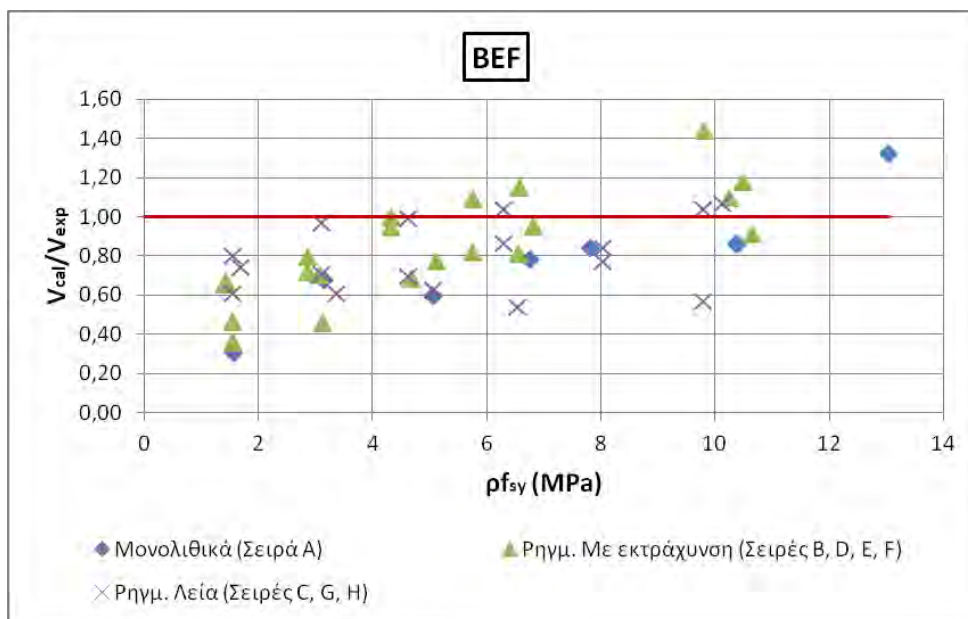
Τα μοντέλα BEF και του Rasmussen δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα, καθώς στηρίζονται κατά κύριο λόγο στο μηχανισμό δράσης βλήτρου του οπλισμού. Έτσι, στην περίπτωση των σειρών δοκιμίων με λεία διεπιφάνεια, προσεγγίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική τιμή της διατμητικής δύναμης που προκύπτει στην αστοχία. Η ύπαρξη αρχικού εύρους ρωγμής επηρεάζει το αν θα συνεισφέρει έστω και ελάχιστα ο μηχανισμός τριβής. Παρατηρούμε ότι ο λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  είναι μικρότερος στα δοκίμια της σειράς H, στα οποία το αρχικό εύρος ρωγμών είναι μηδενικό από ότι είναι στα δοκίμια των σειρών C και G. Επιπλέον, για μικρό αριθμό βλήτρων (μέχρι 6 και διαμέτρου 9.53 mm ή  $\rho_{f_{sy}} \leq 6.29$  MPa) ο τρόπος αστοχίας τους είναι τύπου A, δηλαδή αστοχούν λόγω διαρροής σε διάτμηση σύμφωνα με το κριτήριο του Von – Mises.

Τα μοντέλα των Mattock και των Mansur et al., όπως έχει σημειωθεί και στα προηγούμενα, βασίζονται στο φαινόμενο της τριβής. Καθώς δεν λαμβάνουν υπόψη την επεξεργασία της διεπιφάνειας, αν αυτή είναι εκτραχυμένη ή λεία, οδηγούν σε υπερεκτιμημένες προβλέψεις για την τελική τιμή της διατμητικής δύναμης αντίστασης στην αστοχία. Για την ακρίβεια υπερεκτιμάται ο μηχανισμός τριβής και υποβαθμίζεται η συνεισφορά του μηχανισμού δράσης βλήτρου, ενώ στην πραγματικότητα συμβαίνει το αντίθετο. Η συμπεριφορά αυτή είναι εντονότερη στην περίπτωση δοκιμίων που η διεπιφάνεια είναι λεία και επιπλέον έχει καταστραφεί η συνάφεια πριν την έναρξη της δοκιμής. Στα δοκίμια αυτά η τιμή της τέμνουσας στην αστοχία είναι πολύ μικρότερη από αυτή που προβλέπουν τα μοντέλα (η προβλεπόμενη τιμή μπορεί να είναι ακόμα και τρεις φορές μεγαλύτερη αυτής που παρατηρήθηκε). Για παράδειγμα η φέρουσα ικανότητα για το δοκίμιο C1 ( $f_c=41.09$  MPa,  $\rho_{f_{sy}}=1.55$  MPa, 2Φ9.53,  $V_u=171.67$  kN) προκύπτει σχεδόν ίση με αυτή που προέκυψε για το μονολιθικό δοκίμιο A1 ( $f_c=42.14$  MPa,  $\rho_{f_{sy}}=1.57$  MPa, 2Φ9.53,  $V_u=47.42$  kN) ενώ από τα πειράματα έχει υπολογιστή ότι το διατμητικό φορτίο του C1 στην αστοχία είναι μικρότερο κατά 73% από αυτό για το δοκίμιο A1.

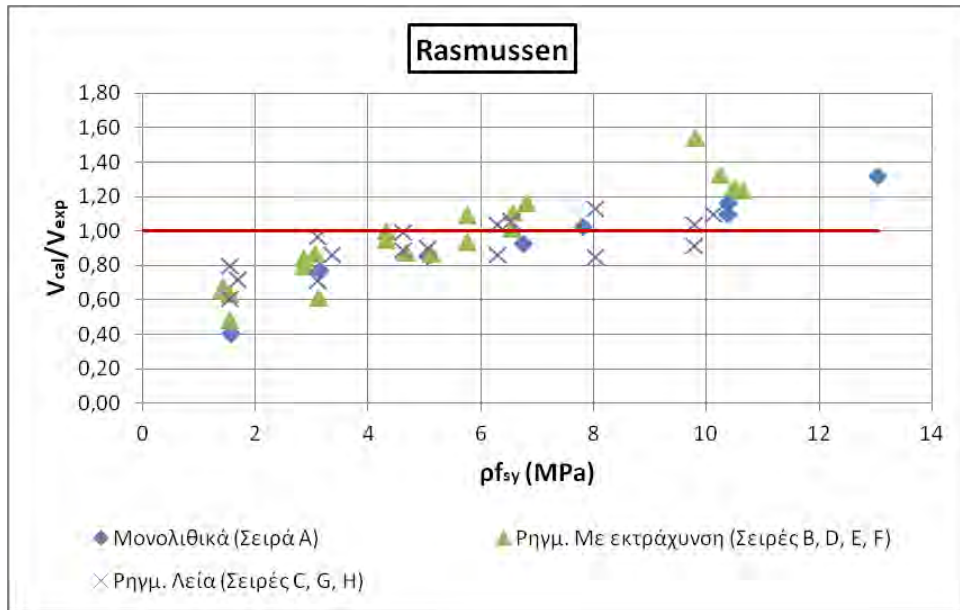
Τέλος, το μοντέλο του Randl δίνει και για αυτές τις σειρές δοκιμίων τα καλύτερα αποτελέσματα. Οι τιμές των παραμέτρων που επηρεάζουν την τιμή της δύναμης αντίστασης στην αστοχία είναι επιλεγμένες έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας. Έτσι, οι τιμές της προβλεπόμενης διατμητικής τάσης στην διεπιφάνεια κυμαίνεται μεταξύ 50% - 88% της τιμής που παρατηρήθηκε στις δοκιμές.



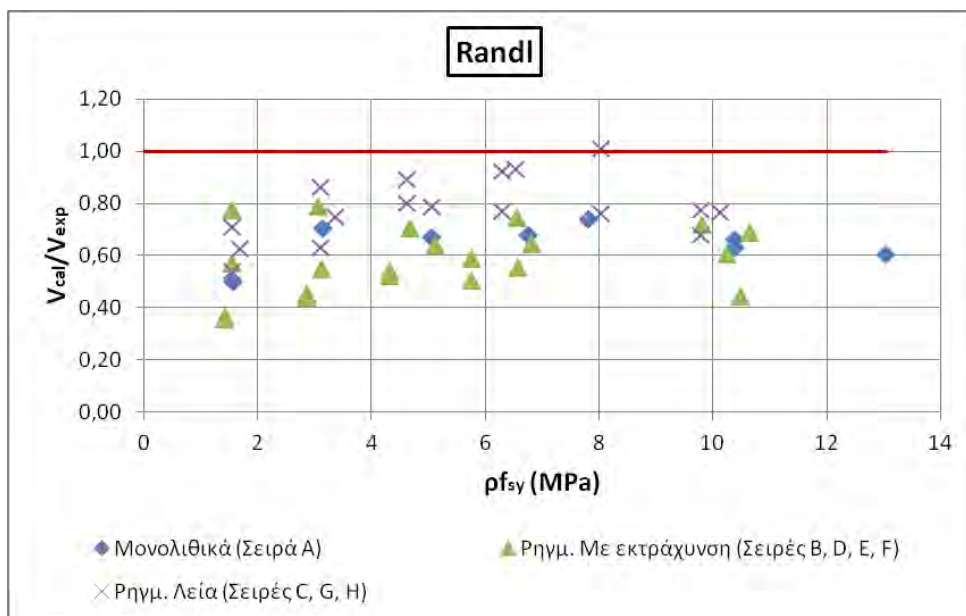
**Σχήμα 8.2.7:** Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της τάσης  $\rho f_{sy}$  για το μοντέλο του Mattock



**Διάγραμμα 8.2.8:** Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της τάσης  $\rho f_{sy}$  για το προσομοίωμα BEF



**Διάγραμμα 8.2.9:** Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της τάσης  $\rho_{fsy}$  για το μοντέλο του Rasmussen

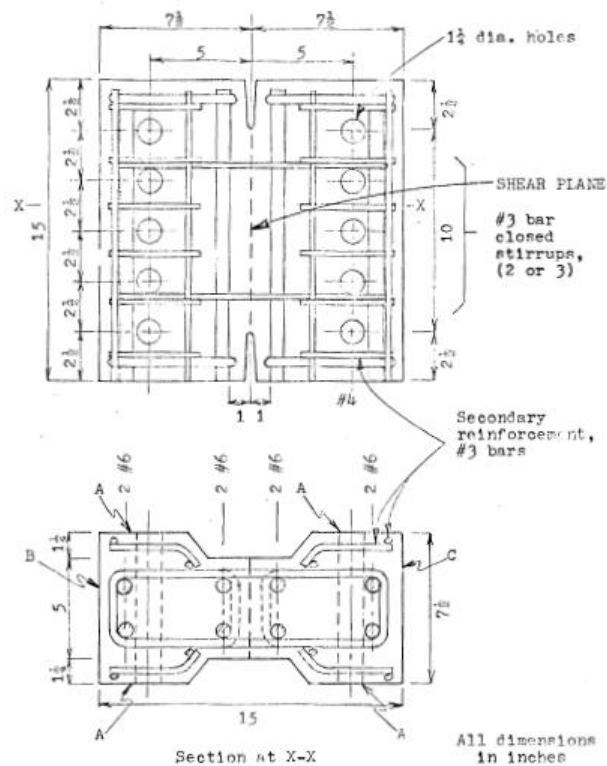


**Διάγραμμα 8.2.10:** Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της τάσης  $\rho_{fsy}$  για το μοντέλο του Randl

### 8.3.«Shear transfer under cyclically reversing loads, across an interface between concretes cast at different times», Alan H. Mattock

Αυτή η πειραματική μελέτη [16] αφορά τη μεταφορά διατμητικών τάσεων σε διεπιφάνειες μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι:

- Η ιστορία της φόρτισης (μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη φόρτιση)
- Η θλιπτική αντοχή του παλαιού και του νέου σκυροδέματος (αν έχουν την ίδια ή διαφορετική αντοχή)
- Η ύπαρξη ρωγμής στην διεπιφάνεια πριν την επιβολή εξωτερικού φορτίου
- Η τιμή της παραμέτρου  $\rho_{fsy}$



Σχήμα 8.3.1: Τυπική μορφή δοκιμίων [16]

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε πέντε σειρές δοκιμίων. Τα δοκίμια της σειρά L ήταν μονολιθικά, ενώ στις υπόλοιπες σειρές πρώτα σκυροδετήθηκε το πρώτο μισό το κάθε δοκιμίου και στη συνέχεια το δεύτερο δημιουργώντας έτσι μεταξύ τους μια διεπιφάνεια με εμβαδόν  $378.76 \text{ cm}^2$ . Ο οπλισμός της διεπιφάνειας ήταν υπό μορφή κλειστών συνδετήρων που περιέβαλλαν το διαμήκη οπλισμό των δοκιμίων, προκειμένου να εξασφαλιστεί επαρκής αγκύρωση του οπλισμού. Σε κάθε σειρά υπήρχαν δοκίμια με 2 ή 3 συνδετήρες #3 (9.53 mm). Επίσης, έχει προβλεφθεί η τοποθέτηση οπλισμού στα επιμέρους τμήματα εκατέρωθεν της διεπιφάνειας, έτσι

ώστε η αστοχία να μην συμβεί σε άλλη περιοχή εκτός αυτής. Η τάση διαρροής του οπλισμού είναι ίση με  $f_{sy}=365$  MPa. στις σειρές M και Q, στις οποίες στόχος ήταν να επιτευχθεί συνάφεια, η διεπιφάνεια διαβρέχτηκε πριν τη σκυροδέτηση του δεύτερου τμήματος, ενώ στις σειρές N και P, όπου δεν προβλεπόταν συνάφεια, στη διεπιφάνεια απλώθηκε μια στρώση πολύ μικρού πάχους από υλικό που δεν επιτρέπει την ανάπτυξη συνάφειας.

Σε όλα τα δοκίμια εκτός αυτών της σειράς N ήταν επιθυμητή η ύπαρξη αρχικής ρωγμής κατά μήκος της διεπιφάνειας. Προκειμένου να γίνει αυτό, ασκήθηκε γραμμικό φορτίο και στις δύο όψεις των δοκιμίων. Το φορτίο που ασκήθηκε ήταν τόσο έτσι ώστε να δημιουργηθεί ρωγμή με εύρος 0.33 mm και μετά την αποφόρτιση το εύρος να λάβει τιμή 0.254 mm.

Στην περίπτωση των δοκιμίων που υποβάλλονται σε μονοτονική φόρτιση και εξετάζονται στο παρόν κεφάλαιο, επιβάλλεται φορτίο κατά μήκος της διεπιφάνειας, χωρίς εκκεντρότητα, μέχρι να επέλθει αστοχία του δοκιμίου. Στην αστοχία η τιμή του φορτίου αντίστασης παραμένει σταθερή ενώ παράλληλα οι τιμές της ολίσθησης και της αποκόλλησης αυξάνουν ανεξέλεγκτα.

**Πίνακας 8.3.1:** Γενικά χαρακτηριστικά δοκιμίων [16]

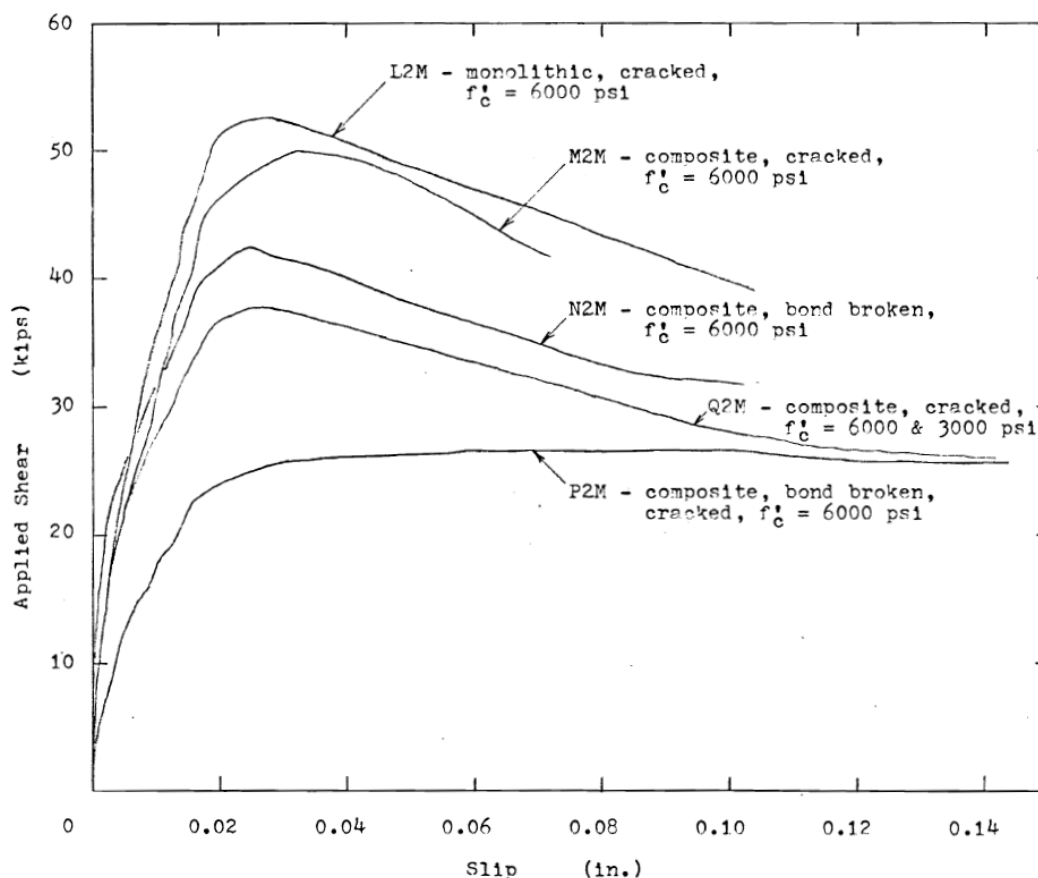
Σειρά	Είδος δοκιμίου	$f_{cc}$ (MPa)	Ύπαρξη συνάφειας	Αρχική κατάσταση
L	μονολιθικό	42	---	ρηγματωμένο
M	σύνθετο	42	ναι	ρηγματωμένο
		42		
N	σύνθετο	42	όχι	μη ρηγματωμένο
		42		
P	σύνθετο	42	όχι	ρηγματωμένο
		42		
Q	σύνθετο	42	ναι	ρηγματωμένο
		21		



## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από την αρχή της επιβολής της εξωτερικής φόρτισης παρατηρήθηκαν ολίσθηση και αποκόλληση σε όλα τα δοκίμια. Οι τιμές των μεγεθών αυτών αυξάνονται καθώς αυξάνεται η τιμή του φορτίου. Μετά το πέρας των δοκιμών, παρατηρήθηκε ότι αναπτύχθηκαν ορισμένες διαγώνιες ρωγμές εκατέρωθεν της διεπιφάνειας, ο αριθμός των οποίων είναι μεγαλύτερος για τα δοκίμια εκείνα τα οποία έχουν μεγάλη τιμή  $\rho f_{sy}$ . Στα μονολιθικά δοκίμια και στα δοκίμια στα οποία επιτράπηκε η ανάπτυξη συνάφειας, οι ρωγμές αυτές ήταν ομοιόμορφα καταναμημένες γύρω από το επίπεδο ολίσθησης. Στα δοκίμια στα οποία δεν υπήρχε συνάφεια, οι ρωγμές είχαν σχηματιστεί στην περιοχή της διεπιφάνειας όπου τη διαπερνούσε οπλισμός.

Αστοχία θεωρείται ότι επέρχεται όταν το φορτίο αντίστασης δεν αυξάνεται άλλο και παράλληλα η ολίσθηση και η αποκόλληση αυξάνονται με πολύ γρήγορο ρυθμό. Στην αστοχία παρατηρήθηκε ότι ένα επιδερμικό στρώμα σκυροδέματος αποκολλήθηκε από τη διεπιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο στην περίπτωση των δοκιμίων που είχε καταστραφεί η συνάφεια και εμφανίστηκε στην περιοχή όπου υπήρχε οπλισμός.



Σχήμα 8.3.2: Φέρουσα Ικανότητα συναρτήσει της ολίσθησης

**Πίνακας 8.3.2:** Χαρακτηριστικά δοκιμών και αποτελέσματα δοκιμών

A/A	Σκυρόδεμα	Χάλυβας	Αριθμός ράβδων	d <sub>b</sub> (mm)	ρf <sub>sy</sub> (MPa)	δ <sub>i</sub> (mm)	w (mm)	V <sub>u,exp</sub> (kN)
	f <sub>cc</sub> (MPa)	f <sub>sy</sub> (MPa)						
L2M	42.84	369.30	4	9.53	3.30	0.711	0.813	234.52
L3M	52.00	369.30	6	9.53	4.96	0.660	1.372	294.15
M2M	40.32	367.93	4	9.53	3.29	0.889	0.660	222.50
M3M	42.70	354.15	6	9.53	4.75	0.432	0.254	263.44
N2M	42.84	370.68	4	9.53	3.31	0.635	0.356	189.57
N3M	40.25	366.55	6	9.53	4.91	0.533	0.559	271.01
P2M	41.72	370.68	4	9.53	3.31	2.540	0.914	118.82
P3M	41.79	367.24	6	9.53	4.93	0.635	0.152	178.00
Q2M	19.25	340.37	4	9.53	3.05	0.686	0.178	169.10
Q3M	20.62	360.35	6	9.53	4.83	0.838	0.457	210.04

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

**Πίνακας 8.3.3:** Αποτελέσματα εφαρμογής μοντέλων

A/A	V <sub>u,cal,1</sub> (kN)	V <sub>u,cal,2</sub> (kN)	V <sub>u,cal,3</sub> (kN)	V <sub>u,cal,4</sub> (kN)	V <sub>u,cal,5</sub> (kN)	$\frac{V_{u,cal,1}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,2}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,3}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,4}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,5}}{V_{u,exp}}$
L2M	172.23	199.34	209.13	150.62	234.52	0.73	0.85	0.89	0.64	1.01
L3M	214.36	198.13	218.00	171.26	264.69	0.73	0.67	0.74	0.58	0.90
M2M	171.96	147.35	143.67	127.47	231.19	0.77	0.66	0.65	0.57	1.04
M3M	209.29	168.40	211.66	167.72	263.19	0.79	0.64	0.80	0.64	0.99
N2M	172.69	88.62	104.09	53.91	238.41	0.91	0.47	0.55	0.28	1.26
N3M	213.50	119.75	152.07	77.94	259.63	0.79	0.67	0.79	0.29	0.96
P2M	172.69	111.14	152.75	53.20	235.50	1.45	0.44	0.56	0.45	1.98

P3M	213.65	131.70	153.97	79.49	263.67	1.20	0.74	0.87	0.45	1.48
Q2M	165.63	114.73	117.35	103.48	163.43	0.98	0.68	0.69	0.61	0.97
Q3M	211.40	193.05	186.72	145.26	199.70	1.00	0.92	0.89	0.69	0.95

## ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

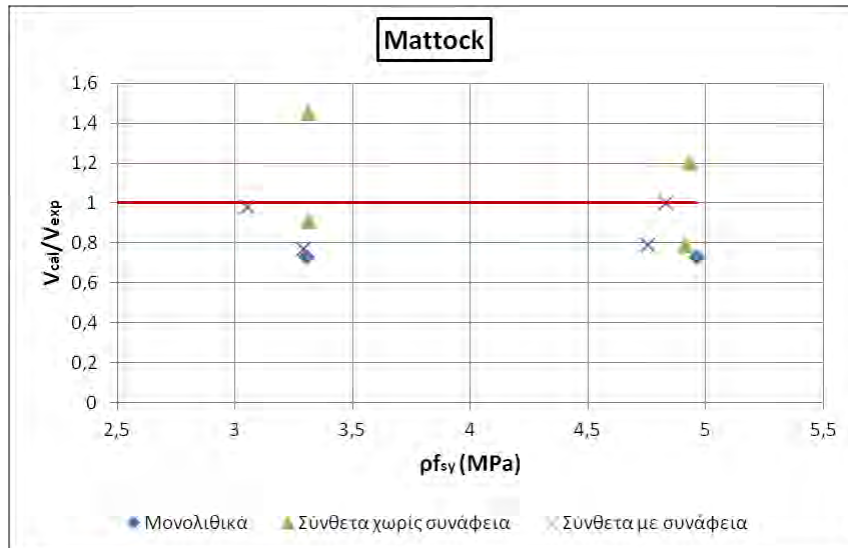
Από τα θεωρητικά προσομοιώματα που εφαρμόστηκαν τις πιο συντηρητικές τιμές δίνει αυτό του Randl (28% - 64% της φέρουσας ικανότητας που προέκυψε πειραματικά). Ιδιαίτερα πρέπει να σημειωθεί ότι οι χαμηλότερες τιμές προκύπτουν για τα δοκίμια της σειράς N στα οποία δεν επιτράπηκε η ανάπτυξη συνάφειας στη διεπιφάνεια. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι το μοντέλο του Randl υποβαθμίζει τη συνεισφορά του μηχανισμού δράσης βλήτρου ο οποίος έχει τη σημαντικότερη προσφορά στην περίπτωση των δοκιμών αυτών, αφού η συνεισφορά των υπόλοιπων μηχανισμών είναι μικρή εξαιτίας των συνθηκών της διεπιφάνειας.

Το παραπάνω μπορεί να εξηγήσει, επιπλέον, τις μεγάλες τιμές της προβλεπόμενης αντίστασης που προκύπτουν από τα μοντέλα των Mattock και Mansur et al. για τις σειρές δοκιμών N και P. Στα μοντέλα αυτά γίνεται η υπόθεση ότι η αντίσταση της διεπιφάνειας οφείλεται στη συνάφεια και στην τριβή. Από τη στιγμή που στα συγκεκριμένα δοκίμια ο ρόλος των μηχανισμών αυτών είναι υποβαθμισμένος, είναι λογικό ο λόγος  $V_{u,cal}/V_{u,exp}$  να λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας.

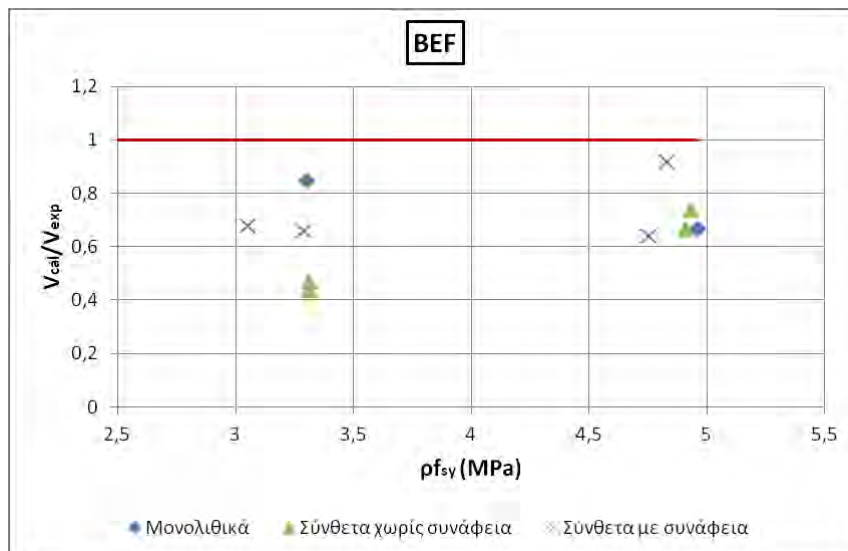
Όσον αφορά την επιρροή της τιμής της τάσης  $\rho f_{sy}$  καθώς αυτή αυξάνεται, παρατηρείται αύξηση της αντίστασης της διεπιφάνειας. Για παράδειγμα, συγκρίνοντας τα δοκίμια Q2M ( $f_c=19.25$  MPa,  $\rho f_{sy}=3.05$  MPa, 4Φ9.53,  $V_u=169.10$  kN) και Q3M ( $f_c=20.62$  MPa,  $\rho f_{sy}=4.83$  MPa, 6Φ9.53,  $V_u=210.04$  kN) παρατηρείται αύξηση του μέγιστου φορτίου κατά περίπου 27%, δηλαδή περίπου ίση με αυτή που παρατηρείται από τα αποτελέσματα των πειραμάτων (24%).

Επίσης, παρατηρούμε ότι η παρόμοια συμπεριφορά που εμφάνισαν τα δοκίμια των σειρών L (μονολιθικά) και των σειρών M και Q (σύνθετα με συνάφεια), αποτυπώνεται και στα αποτελέσματα από την εφαρμογή των μοντέλων. Έτσι, για τα δοκίμια L2M ( $f_c=42.84$  MPa,  $\rho f_{sy}=3.30$  MPa, 3Φ9.53,  $V_u=234.52$  kN) και M2M ( $f_c=40.32$  MPa,  $\rho f_{sy}=3.29$  MPa, 3Φ9.53,  $V_u=222.50$  kN) η τιμή που προκύπτει από τα μοντέλα είναι περίπου ίδια (π.χ. Mattock: L2M ( $V_u=172.23$  kN), M2M ( $V_u=171.96$  kN)).

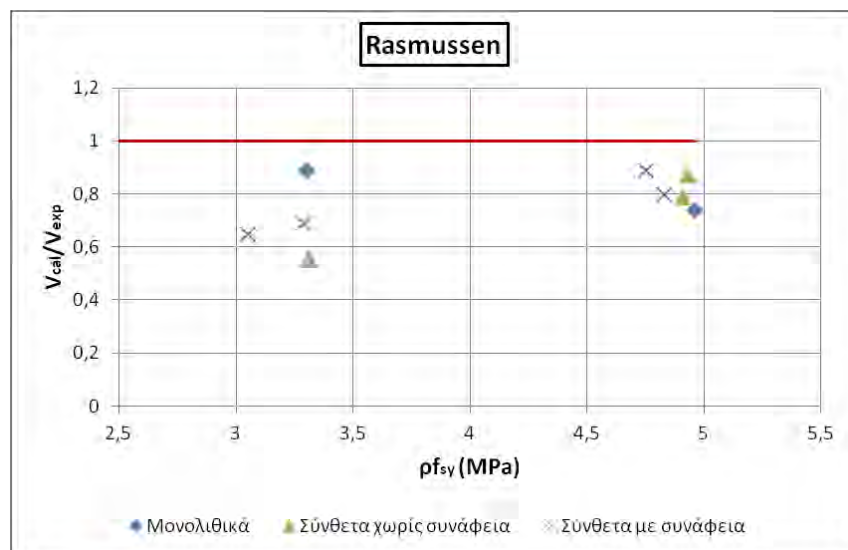
Τα αποτελέσματα της εφαρμογής των δοκιμών συνοψίζονται στα επόμενα διαγράμματα.



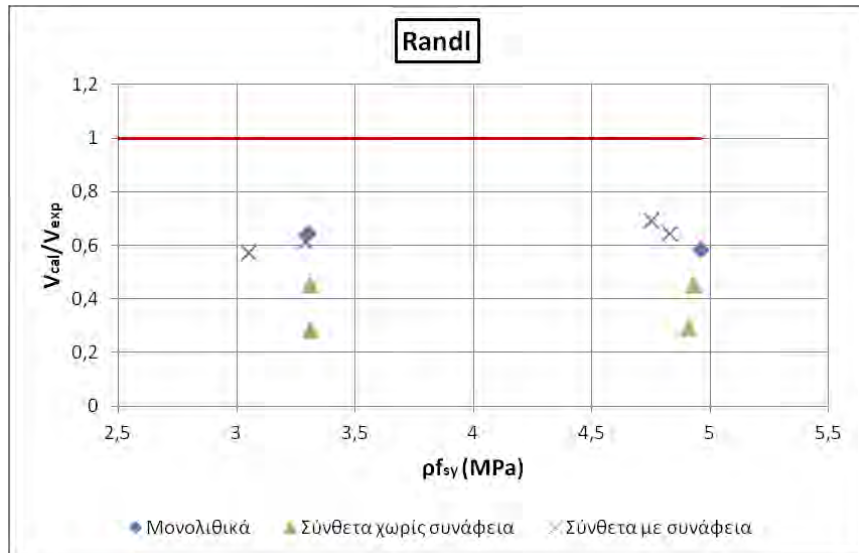
Σχήμα 8.3.3: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της τάσης  $\rho f_{sy}$  για το μοντέλο του Mattock



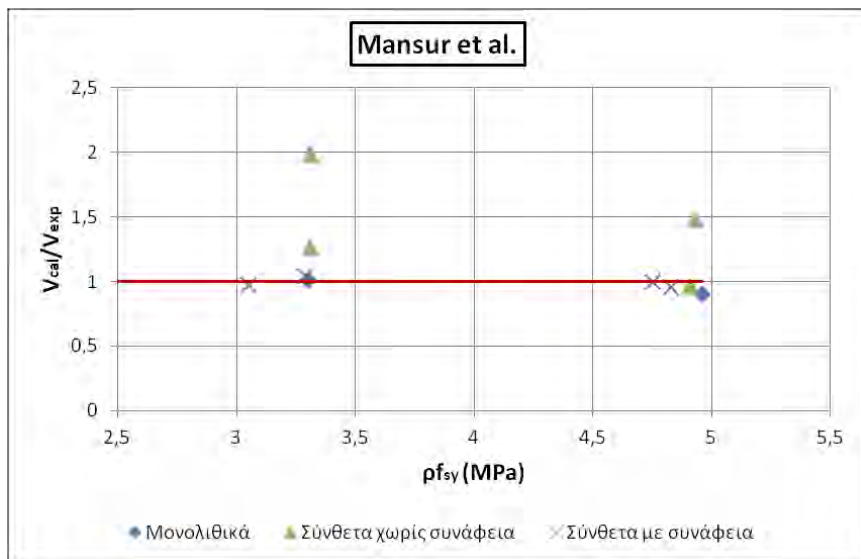
Σχήμα 8.3.4: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της τάσης  $\rho f_{sy}$  για το προσομοίωμα BEF



Σχήμα 8.3.5: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της τάσης  $\rho f_{sy}$  για το μοντέλο του Rasmussen



Σχήμα 8.3.6: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της τάσης  $\rho_{fsy}$  για το μοντέλο του Randl



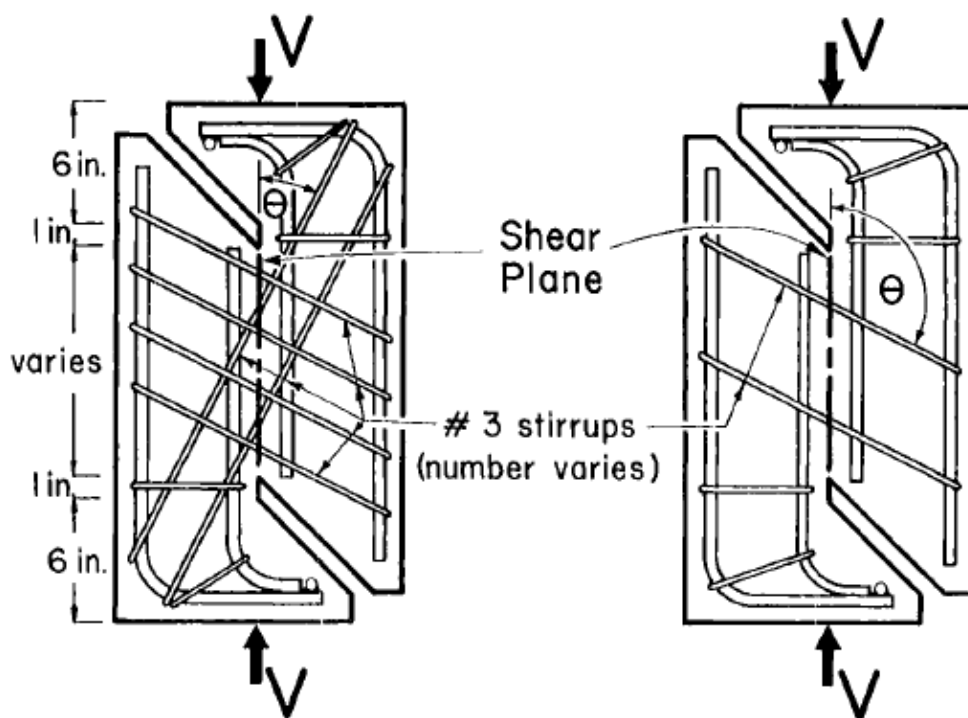
Σχήμα 8.3.7: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της τάσης  $\rho_{fsy}$  για το μοντέλο των Mansur et al.

#### 8.4.«Shear transfer in concrete at an angle to the shear plane», Alan H. Mattock

Τα δοκίμια αυτής της σειρά πειραμάτων του Mattock [17] σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να προσομοιάσουν την εντατική κατάσταση σε μια επιφάνεια ολίσθησης (π.χ. ρωγή) όταν επιβάλλεται κατά μήκος της επιφάνειας αυτής διατμητικό φορτίο και τη διαπερνά οπλισμός υπό κάποια γωνία  $\theta$ . Αποτελούνται από δύο τμήματα σχήματος L και είναι μονολιθικά.

Ο οπλισμός είναι υπό μορφή κλειστών συνδετήρων για την πλήρη αγκύρωσή του και έχει διάμετρο 9.53 mm. Η απόσταση των συνδετήρων είναι 13 cm για τις σειρές 1, 2, 4 και 5 και 6 cm για τη σειρά 3. Τα δοκίμια των σειρών 1, 3, 4 ήταν ρηγματωμένα πριν την έναρξη της δοκιμής. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι  $f_c=28$  MPa και η τάση διαρροής του χάλυβα  $f_{sy}=344.5$  MPa.

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοτονική φόρτιση μέχρι την αστοχία.



Σχήμα 8.4.1: Τυπική μορφή δοκιμίων [17]

Οι μεταβλητές των πειραμάτων είναι:

- Ο αριθμός των συνδετήρων που διαπερνά τη διεπιφάνεια
- Η γωνία  $\theta$  που σχηματίζει ο οπλισμός με τη διεπιφάνεια

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Προέκυψαν τυπικές καμπύλες φορτίου – ολίσθησης για όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν. Καταγράφηκαν ολίσθησης και αποκόλληση από την αρχή των δοκιμών μέχρι την αστοχία για την περίπτωση των δοκιμών που είχε δημιουργηθεί ρωγμή κατά μήκος του επιπέδου ολίσθησης πριν από την έναρξη της δοκιμής. Στα δοκίμια που δεν υπήρχε αρχικό εύρος ρωγμής στη διεπιφάνεια, δεν παρατηρήθηκε ολίσθηση μέχρι το σχηματισμό των πρώτων διαγώνιων ρωγμών για τιμή των διατμητικών τάσεων μεταξύ 2.8 MPa και 4.2 MPa. Η γωνία που σχηματίζουν οι ρωγμές αυτές με τη διεπιφάνεια είναι περίπου ίση με  $25^{\circ}$  –  $45^{\circ}$ . η ολίσθηση που παρατηρείται από το σημείο αυτό και έπειτα είναι αποτέλεσμα της σχετικής περιστροφής των θλιπτήρων σκυροδέματος που ορίζονται μεταξύ των διαγώνιων ρωγμών. Στα ρηγματωμένα δοκίμια δεν παρατηρούνται διαγώνιες ρωγμές.

Το φορτίο για το οποίο η τιμή της ολίσθησης αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό θεωρείται ότι είναι το φορτίο αστοχίας. Στην αστοχία, συμβαίνει αποφλοιώση μιας επιδερμικής στρώσης του σκυροδέματος στην περιοχή γύρω από τον οπλισμό.

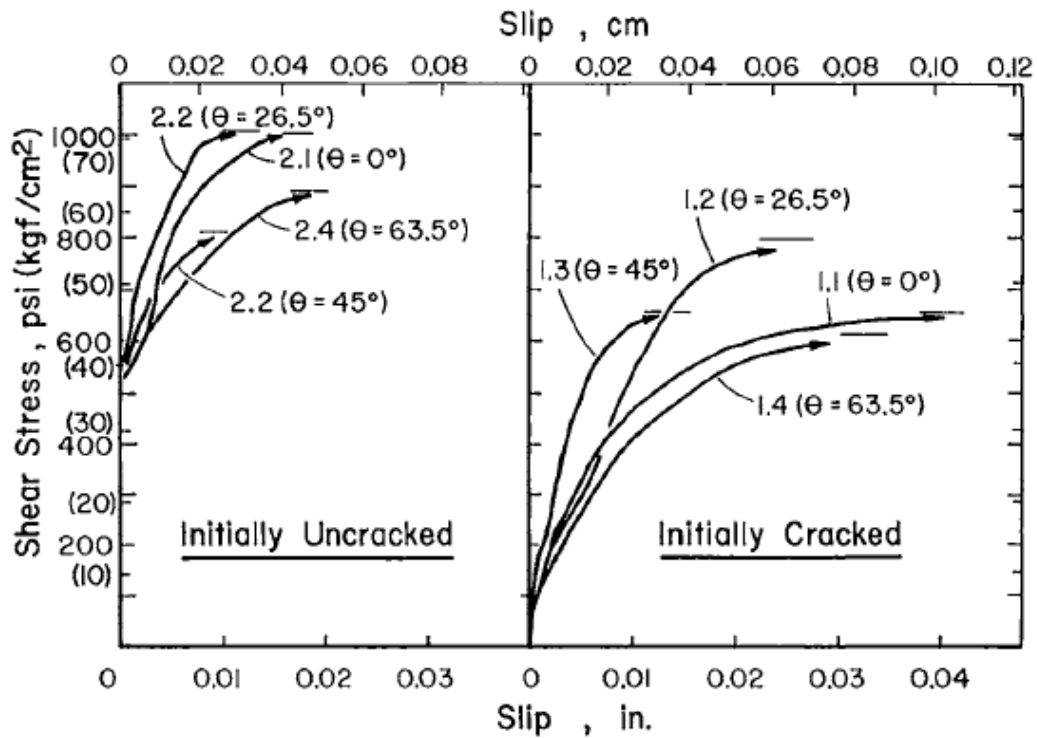
Όσον αφορά τη γωνία με την οποία ο οπλισμός διαπερνά τη διεπιφάνεια προέκυψαν τα εξής:

- Για αρχικά ρηγματωμένα δοκίμια: οι ράβδοι που σχημάτιζαν γωνία  $26.5^{\circ}$  –  $45^{\circ}$  καταπονούνται θλιπτικά. Οι ράβδοι με γωνία  $63.5^{\circ}$  καταπονούνται ελάχιστα ενώ για γωνίες μεγαλύτερες από  $90^{\circ}$  στον οπλισμό δρουν εφελκυστικές τάσεις.
- Για μη ρηγματωμένα δοκίμια: οι ράβδοι που σχημάτιζαν γωνία  $26.5^{\circ}$  καταπονούνται από θλιπτική δύναμη σε μικρό βαθμό. Οι ράβδοι με γωνία  $45^{\circ}$  καταπονούνται από πολύ μικρές εφελκυστικές τάσεις. Οι ράβδοι με γωνία μεγαλύτερη από  $63.5^{\circ}$  καταπονούνται σημαντικά από εφελκυστικές τάσεις.

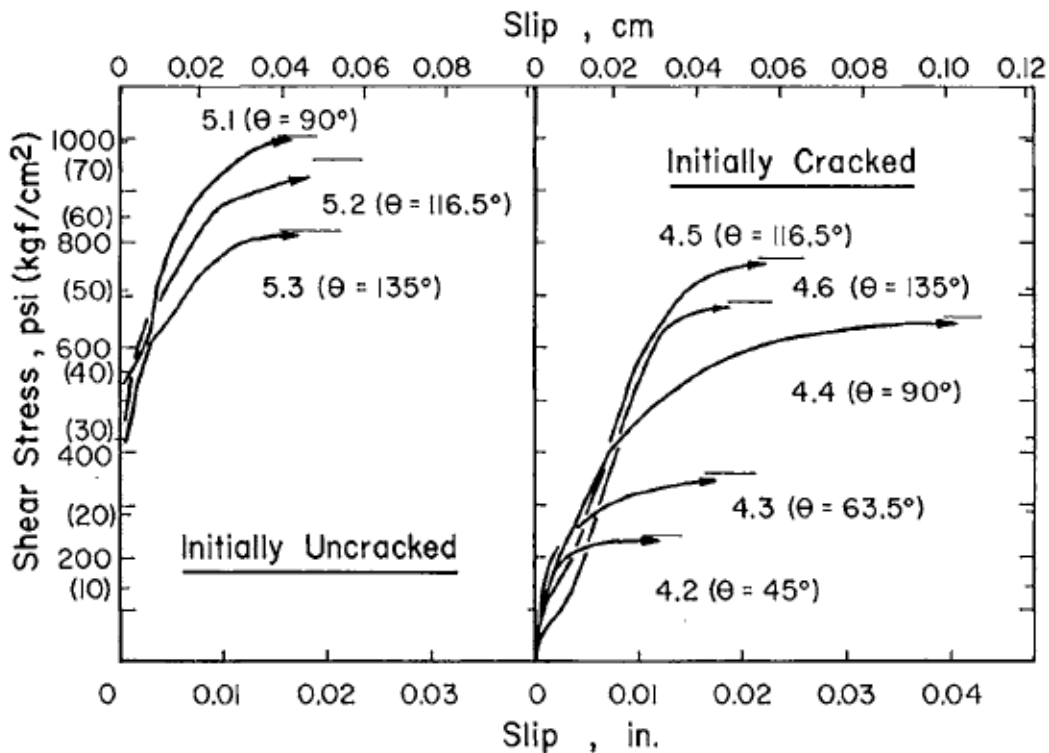
**Πίνακας 8.4.1:** Χαρακτηριστικά δοκιμών και πειραματικά αποτελέσματα

A/A	Γωνία $\theta$	Αριθμός συνδετήρων υπό γωνία $\theta$	Αριθμός συνδετήρων υπό γωνία ( $\theta+90$ )	$f_{cc}$ (MPa)	$f_{sy}$ (MPa)	$\tau_{u,exp}$ (MPa)	$V_{u,exp}$ (kN)
1.1	0	0	2	30.59	344.50	4.578	203.81
1.2	26.5	1	2	30.59	344.50	5.593	278.13
1.3	45	2	2	28.11	344.50	4.599	289.25
1.4	63.5	2	1	28.84	344.50	4.599	211.38
2.1	0	0	2	29.23	344.50	7.000	311.50
2.2	26.5	1	2	29.72	344.50	7.070	351.55
2.3	45	2	2	27.93	344.50	5.656	356.00
2.4	63.5	2	1	27.93	344.50	6.223	309.28
4.2	45	2	---	29.93	344.50	1.680	105.69
4.3	63.5	2	---	27.16	344.50	2.520	125.27
4.4	90	2	---	30.59	344.50	4.578	203.81
4.5	116.5	2	---	28.35	344.50	5.369	267.00
4.6	135	2	---	28.28	344.50	4.774	300.38
5.1	90	2	---	29.23	344.50	7.000	311.50
5.2	116.5	2	---	27.20	344.50	6.710	333.75
5.3	135	2	---	28.28	344.50	5.730	360.45

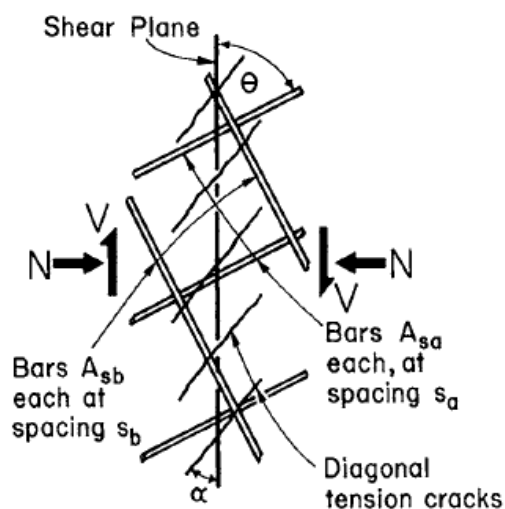




Σχήμα 8.4.2: Καμπύλη φορτίου – ολίσθησης για δοκίμια με συνδετήρες κάθετους μεταξύ τους [17]



Σχήμα 8.4.3: Καμπύλη φορτίου – ολίσθησης για δοκίμια με συνδετήρες παράλληλους μεταξύ τους [17]



Σχήμα 8.4.4: Διαγώνιες ρωγμές κατά μήκος του επιπέδου ολίσθησης [17]

#### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

Πίνακας 8.4.2: Αποτελέσματα από την εφαρμογή των μοντέλων

A/A	$V_{u,cal,1}$ (kN)	$V_{u,cal,2}$ (kN)	$V_{u,cal,3}$ (kN)	$V_{u,cal,4}$ (kN)	$V_{u,cal,5}$ (kN)	$\frac{V_{u,cal,1}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,2}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,3}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,4}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,5}}{V_{u,exp}}$
1.1	200.97	141.80	128.13	120.93	244.07	0.99	0.70	0.63	0.59	1.20
1.2	240.86	117.25	116.13	160.05	137.78	0.87	0.43	0.42	0.58	0.50
1.3	264.17	139.25	191.14	204.78	269.70	0.91	0.48	0.66	0.71	0.93
1.4	164.17	170.08	162.06	153.09	254.16	0.78	0.80	0.56	0.72	1.20
2.1	200.92	161.72	185.58	119.47	252.30	0.65	0.52	0.91	0.39	0.81
2.2	240.85	196.20	154.96	158.89	135.98	0.69	0.56	0.44	0.45	0.37
2.3	264.30	213.47	273.76	204.52	269.11	0.74	0.60	0.77	0.57	0.76
2.4	174.53	141.17	240.15	154.41	265.12	0.56	0.46	0.78	0.51	0.86
4.2	88.07	73.14	78.01	101.17	172.58	0.83	0.69	0.74	0.95	1.63
4.3	119.44	56.71	104.14	110.51	218.42	0.95	0.45	0.83	0.88	1.74
4.4	202.76	154.54	128.13	120.92	244.07	0.99	0.76	0.63	0.59	1.20
4.5	213.06	102.03	117.68	111.79	218.42	0.80	0.38	0.44	0.42	0.82
4.6	175.95	74.91	99.95	99.63	172.58	0.59	0.25	0.33	0.33	0.57
5.1	202.70	163.60	185.58	119.47	252.30	0.65	0.53	0.91	0.38	0.81
5.2	213.03	148.50	169.14	110.56	218.42	0.64	0.44	0.63	0.33	0.65
5.3	175.99	116.33	141.36	99.66	172.58	0.49	0.32	0.47	0.28	0.48

Δίνεται το εξής παράδειγμα εφαρμογής των μοντέλων για τον υπολογισμό της μέγιστης διατμητικής δύναμης:

*Δοκίμιο 1.3:*

- Mattock

Δύο συνδετήρες διαπερνούν τη ρωγμή υπό γωνία  $\theta=45^\circ$  και οι υπόλοιποι δύο υπό γωνία  $\theta=135^\circ$ .

Αρχικά υπολογίζουμε την τάση λόγω των πρώτων συνδετήρων από τη σχέση:

$$v_u = 2.76 \sin^2 \theta + \rho f_s (0.8 \sin^2 \theta - 0.5 \sin(2\theta))$$

Όπου  $f_s=0$  γιατί  $0 < \theta \leq 51.3^\circ$  οπότε παίρνουμε

$$v_u = 2.76 \cdot \sin^2 45 = 1.40 \text{ MPa}$$

Υπολογίζουμε την τάση των υπόλοιπων δύο συνδετήρων από την ίδια σχέση θέτοντας αυτή τη φορά  $f_s = f_{sy} = 344.5 \text{ MPa}$ , αφού  $90^\circ \leq \theta < 180^\circ$ . Οπότε έχουμε:

$$\begin{aligned} v_u &= 2.76 \cdot \sin^2 135 + 0,0045 \cdot 344.5 \cdot (0.8 \sin^2 135 - 0.5 \sin(2 \cdot 135)) \\ &= 2.80 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Επομένως η συνολική τάση που αναπτύσσεται στη ρωγμή είναι  $\tau_{u,cal} = 1.40 + 2.80 = 4.20 \text{ MPa}$ . Επομένως,  $V_{u,cal,1} = 264.17 \text{ kN}$

- BEF model

Η μέγιστη διατμητική δύναμη λόγω δράσης βλήτρου δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F_{d,u} = 2\beta^3 EI \delta_t \cdot \sin \theta$$

Υπολογίζουμε τα εξής:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_f \cdot d_b}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{(148.98) \cdot (9.53)}{4(200000)(399.617)}} = 0.046$$

$$\delta_t = 0.330 \text{ mm}$$

$$F_{d,u} = (8)2(0.046^3)(200000)(399.617)(0.330)(\sin 45) = 28.79 \text{ kN}$$

Υπολογίζουμε τη δράση της τριβής:

$$V_{u,f} = \mu \cdot A_s \cdot f_{sy} \cdot \sin\theta = (0.8) \cdot \left(4 \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot \frac{(0.953)^2}{4}\right) \cdot \frac{344,5}{10} \cdot (\sin 45)$$

$$= 110.45 \text{ kN}$$

Επομένως, η συνολική δύναμη θα είναι

$$V_{u,cal,2} = 28.79 + 110.45 = 139.24 \text{ kN}$$

- Rasmussen:

Πρώτα υπολογίζουμε τη δύναμη λόγω δράσης βλήτρου των συνδετήρων που σχηματίζουν γωνία  $\theta=45^\circ$  με τη ρωγμή:

$$F_{du} = F_{du,90} \sin(\theta)$$

Η δύναμη λόγω δράσης βλήτρου της ράβδου έχει εκκεντρότητα  $e$ , η οποία είναι ίση με:

$$e \approx 0.5d_b \cotan(\theta) = 0.5 * 9.53 * \cotan(45) = 4.75 \text{ mm}$$

$$F_{du,90} = 1.35 \left[ \sqrt{1 + 9\varepsilon^2} - 3\varepsilon \right] d_b^2 \sqrt{f_{sy} f_{ccm}} \quad \text{όπου } \varepsilon = \frac{e}{d_b} \sqrt{\frac{f_{ccm}}{f_{sy}}}$$

Η τιμή της σταθεράς  $\varepsilon$  υπολογίζεται ως εξής:

$$\varepsilon = \frac{e}{d_b} \sqrt{\frac{f_{ccm}}{f_{sy}}} = \frac{4.75}{9.53} * \sqrt{\frac{28.11}{344.5}} = 0.1428$$

Επομένως:

$$F_{du,\theta=45} = 2 * 2 * \frac{1.35 \left[ \sqrt{1 + 9 * (0.1428)^2} - 3 * 0.1428 \right] (9.53)^2 \sqrt{344.5 * 28.11}}{1000}$$

$$* \sin(45) = 22.36 \text{ kN}$$

Η δύναμη λόγω δράσης βλήτρου των συνδετήρων που σχηματίζουν γωνία  $\theta=135^\circ$  θα προκύψει από την επόμενη σχέση αλληλεπίδρασης:

$$\left( \frac{F_d}{F_{du}} \right)^2 + \left( \frac{F_s}{F_{sy}} \right)^2 = 1$$

Οι συνδετήρες καταπονούνται και από μια αξονική δύναμη που δίνεται από τη σχέση:

$$F_s = F_d \tan(\theta - 0.5\pi)$$

Η εκκεντρότητα δίνεται από τη σχέση:

$$e = -0.5d_b \tan(\theta - 0.5\pi) = -0.5 * 9.53 * \tan(135 - 0.5 * 180) = -4.75 \text{ mm}$$

Επομένως

$$F_{du} = 1.35 \left[ \sqrt{1 + 9\varepsilon^2} - 3\varepsilon \right] d_b^2 \sqrt{f_{sy} f_{ccm}}$$

$$\text{όπου } \varepsilon = \frac{e}{d_b} \sqrt{\frac{f_{ccm}}{f_{sy}}} = \frac{-4.75}{9.53} * \sqrt{\frac{28.11}{344.55}} = -0.1428$$

$$F_{du} = 2 * 2 * \frac{1.35 \left[ \sqrt{1 + 9(-0.1428)^2} - 3(-0.1428) \right] (9.53)^2 \sqrt{344.5 * 28.11}}{1000} \\ = 72.72 \text{ kN}$$

Από δοκιμές προκύπτει  $F_d = 58.33 \text{ kN}$ . Άρα  $F_{d,u} = 22.36 + 58.33 = 80.69 \text{ kN}$

Λαμβάνοντας υπόψη και το μηχανισμό τριβής προκύπτει τελικά:

$$V_{u,cal,3} = 80.69 + 110.45 = 191.14 \text{ kN}$$

- Randl

$$v_u = cf_c^{1/3} + \mu(\rho k f_{sy} + \sigma_n) + a\rho \sqrt{f_{sy} f_c} \leq \beta v_f c$$

Για σκυρόδεμα με  $f_c > 20 \text{ MPa}$  και για πολύ εκτραχυμένη διεπιφάνεια λαμβάνουμε τις εξής τιμές για τις σταθερές της παραπάνω σχέσης:

c	μ	k	a	β
0.4	0.8	0.5	0.9	0.4

$$v_u = 0.4 * (28.11)^{1/3} + 0.8(0.009 * 0.5 * 344.5 + 0) + 0.9 * 0.009 \\ * \sqrt{344.5 * 28.11} = 2.30 \text{ MPa}$$

Άρα

$$V_{u,cal,4} = \frac{2.30}{10} * 628.94 = 144.80 \text{ kN}$$

- Mansur et al.

$$\text{Για } \frac{\rho f_{sy}}{f_c} = \frac{0.009 * 344.5}{28.11} = 0.1103 > 0.075 \text{ ισχύει η σχέση}$$

$$\frac{v_u}{f_c} = \frac{0.56}{f_c^{0.385}} + 0.55 \frac{\rho f_y}{f_c} = \frac{0.56}{(28.11)^{0.385}} + 0.550 * 0.1103 = 0.2158 \text{ ή } v_u = 4.29 \text{ MPa}$$

Προκύπτει:

$$V_{u,cal,5} = \frac{4.29}{10} * 628.94 = 269.70 \text{ kN}$$

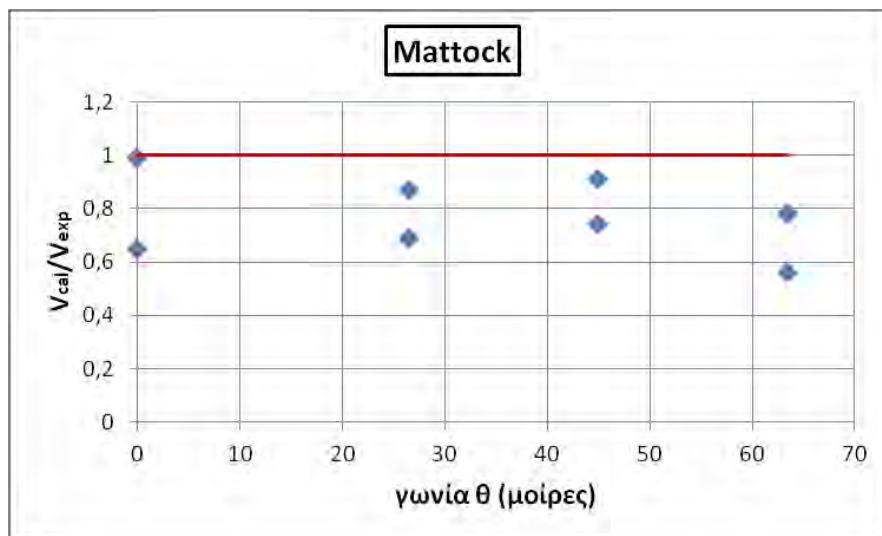
#### ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Οι χαμηλοί λόγοι της προβλεπόμενης δύναμης προς τη δύναμη που προέκυψε από τα πειράματα από την εφαρμογή του μοντέλου BEF είναι αποτέλεσμα των μικρών τιμών των ολισθήσεων. Για μικρές τιμές της ολίσθησης ο μηχανισμός δράσης βλήτρου έχει μικρή συμμετοχή στην ανάληψη διατμητικών τάσεων. Το συγκεκριμένο μοντέλο δεν υπολογίζει καθόλου την συνεισφορά του μηχανισμού αλληλοεμπλοκήςαδρανών, που συμμετέχει για μικρές τιμές της σχετικής ολίσθησης.

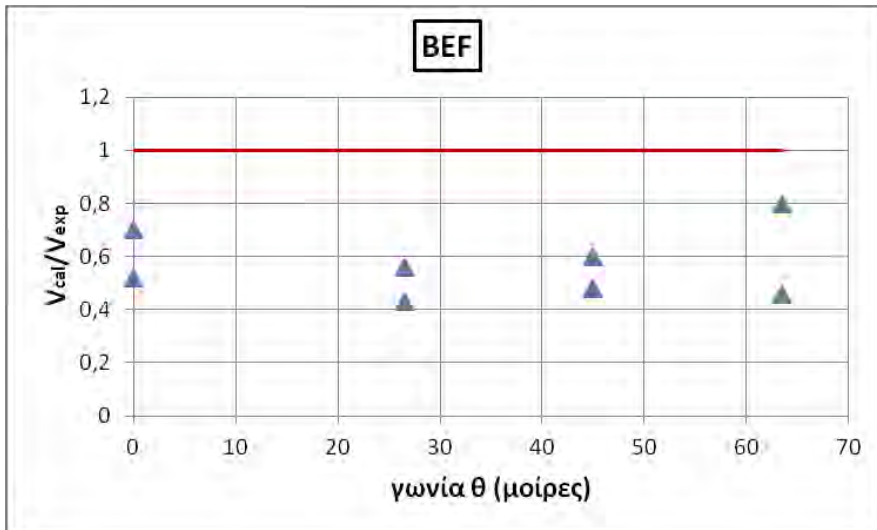
Χαμηλές τιμές για την προβλεπόμενη αντοχή δίνει και το μοντέλο του Randl. Τα δοκίμια αυτής της σειράς πειραμάτων είναι όλα μονολιθικά, με αποτέλεσμα ο μηχανισμός τριβής να έχει σημαντική συνεισφορά στην τιμή του φορτίου στην αστοχία. Το μοντέλο του Randl επειδή έχει προταθεί για το σχεδιασμό διεπιφανειών μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος, φαίνεται να υποτιμά το μηχανισμό τριβής.

Τα καλύτερα αποτελέσματα φαίνεται να δίνει το μοντέλο του Mattock το οποίο δεν δίνει, σε καμία περίπτωση, πρόβλεψη για την τιμή του φορτίου αστοχίας μεγαλύτερη από αυτή που προκύπτει από τα πειράματα. Κάτι τέτοιο είναι λογικό, αφού βασίζεται κατά κύριο λόγο στο μηχανισμό τριβής που στα δοκίμια των πειραμάτων αυτών παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της αντοχής τους.

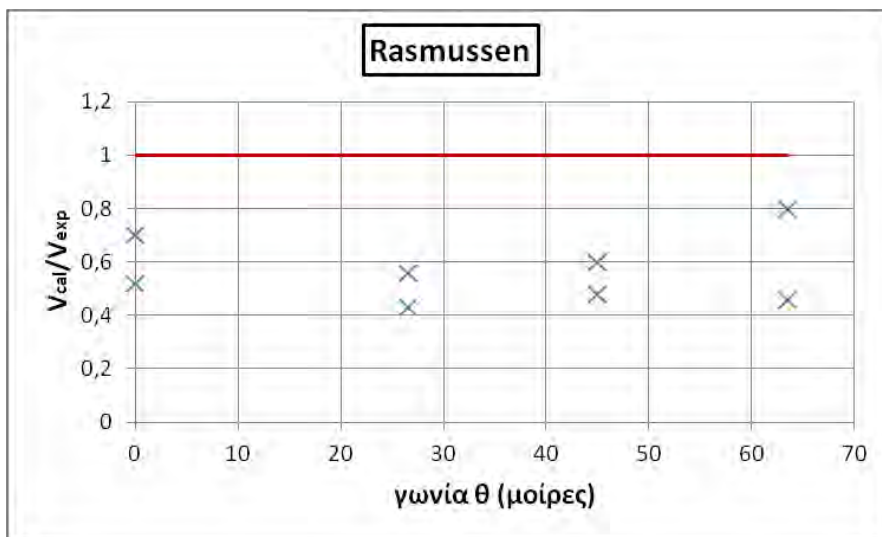
Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου του Rasmussen είναι επίσης ικανοποιητικά αφού προβλέπεται από το μοντέλο ο υπολογισμός του μέγιστου φορτίου στην περίπτωση που ο οπλισμός διαπερνά υπό γωνία το επίπεδο ολίσθησης.



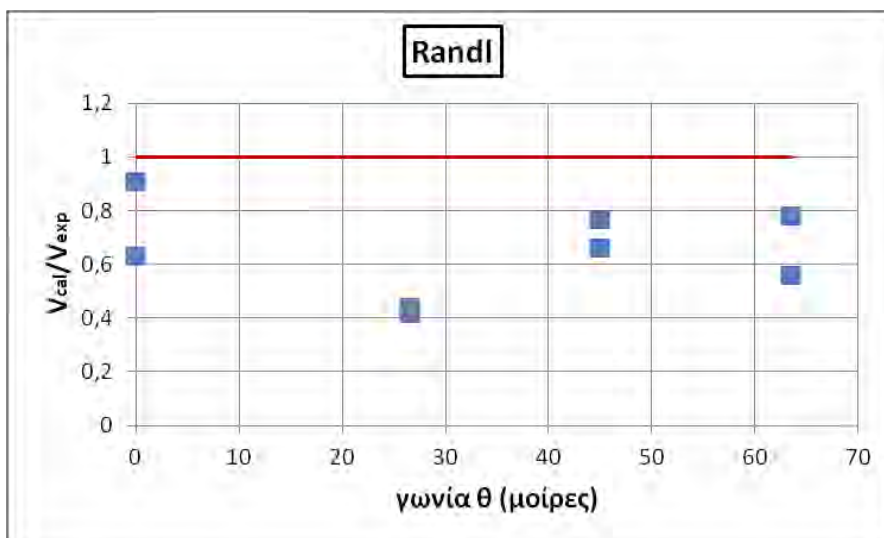
Σχήμα 8.4.5: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  του οπλισμού για το μοντέλο του Mattock για δοκίμια με συνδετήρες κάθετους μεταξύ τους (Σειρές 1 και 2)



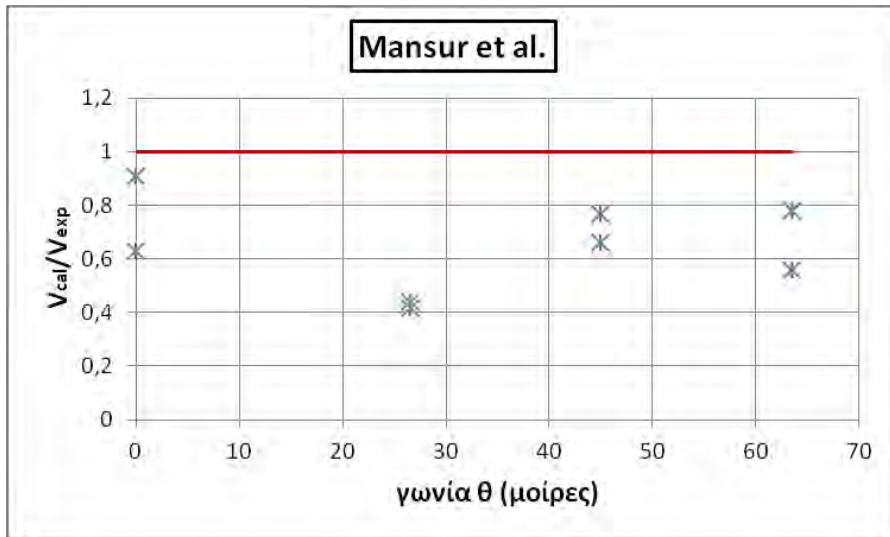
Σχήμα 8.4.6: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  του οπλισμού για το προσομοίωμα BEF για δοκίμια με συνδετήρες κάθετους μεταξύ τους (Σειρές 1 και 2)



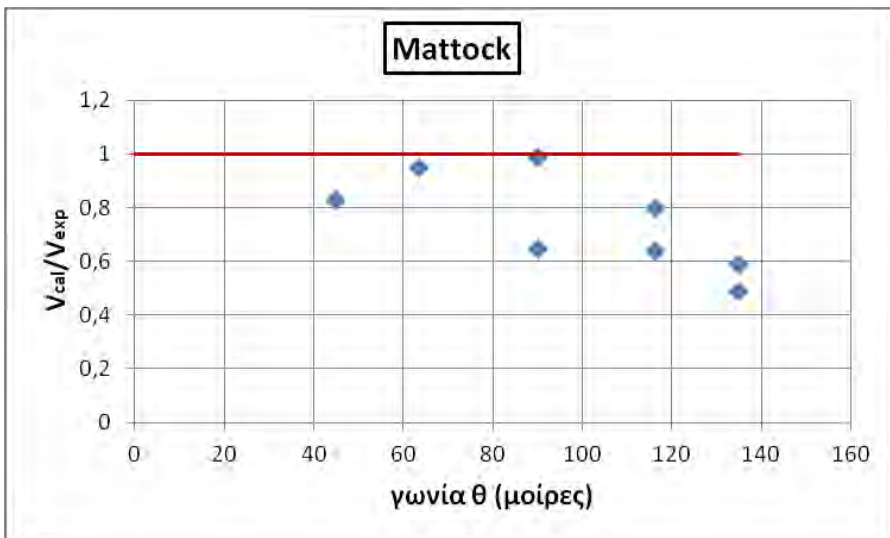
Σχήμα 8.4.7: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  του οπλισμού για το μοντέλο του Rasmussen για δοκίμια με συνδετήρες κάθετους μεταξύ τους (Σειρές 1 και 2)



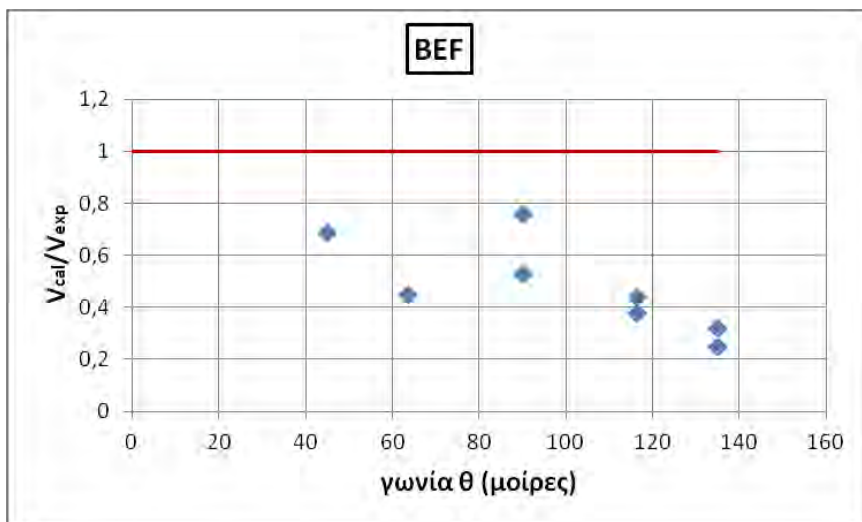
Σχήμα 8.4.8: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  του οπλισμού για το μοντέλο του Randl για δοκίμια με συνδετήρες κάθετους μεταξύ τους (Σειρές 1 και 2)



Σχήμα 8.4.9: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  του σπλισμού για το μοντέλο των Mansur et al. για δοκίμια με συνδετήρες κάθετους μεταξύ τους (Σειρές 1 και 2)

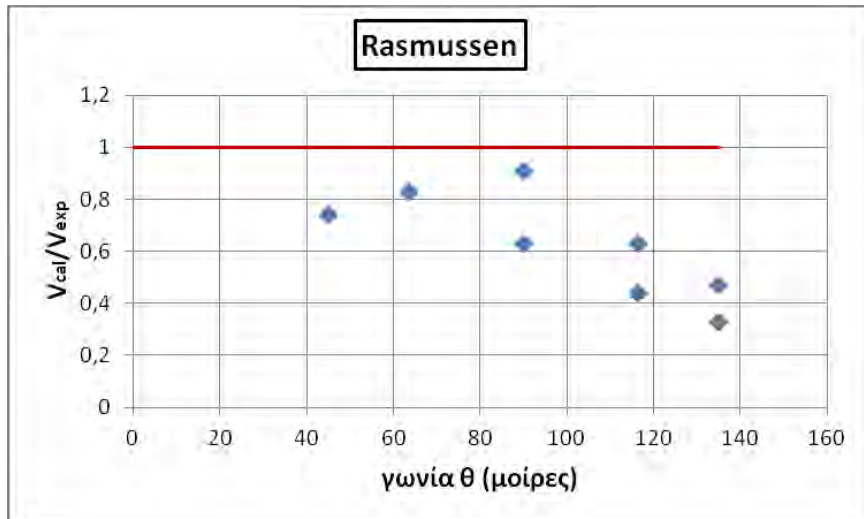


Σχήμα 8.4.10: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  του σπλισμού για το μοντέλο του Mattock για δοκίμια με συνδετήρες παράλληλους (Σειρές 4 και 5)

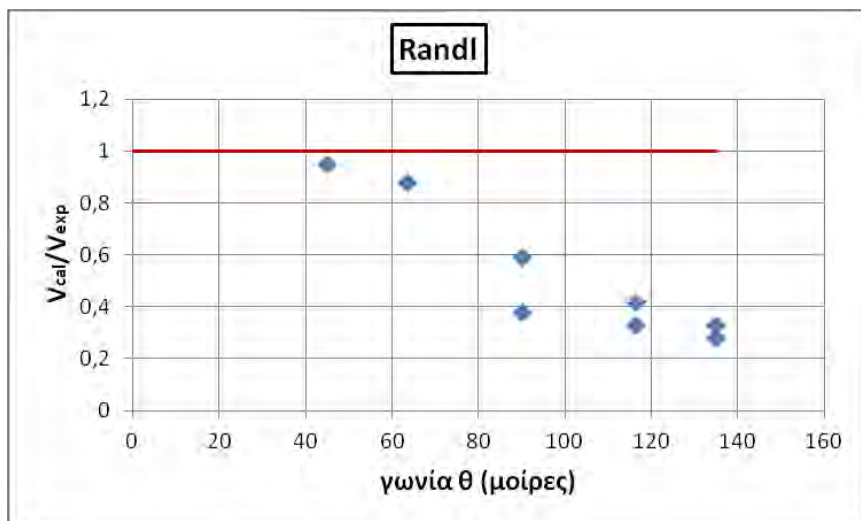


Σχήμα 8.4.11: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  του σπλισμού για το προσομοίωμα BEF για δοκίμια με συνδετήρες παράλληλους (Σειρές 4 και 5)

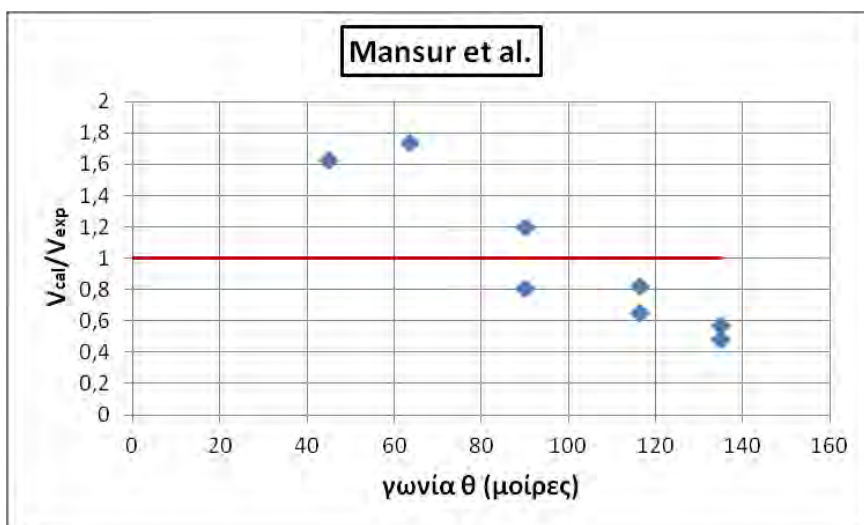




Σχήμα 8.4.12: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  του οπλισμού για το μοντέλο του Rasmussen για δοκίμια με συνδετήρες παράλληλους (Σειρές 4 και 5)



Σχήμα 8.4.13: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  του οπλισμού για το μοντέλο του Randl για δοκίμια με συνδετήρες παράλληλους (Σειρές 4 και 5)



Σχήμα 8.4.14: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει της γωνίας  $\theta$  του οπλισμού για το μοντέλο των Mansur et al. για δοκίμια με συνδετήρες παράλληλους (Σειρές 4 και 5)

## 8.5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό εφαρμόστηκαν πέντε διαφορετικά μοντέλα πρόβλεψης της μέγιστης διατμητικής δύναμης που αντιστέκεται στην επιβολή εξωτερικής φόρτισης παράλληλα σε μια διεπιφάνεια. Παράμετροι από τους οποίες εξαρτάται το τελικό αποτέλεσμα των μοντέλων είναι:

- Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος
- Το ποσοστό οπλισμού που διαπερνά μια διεπιφάνεια ή μια ρωγμή
- Η διάμετρος των ράβδων οπλισμού
- Η επεξεργασία που έχει υποστεί η διεπιφάνεια (λεία ή εκτραχυμένη διεπιφάνεια, ρωγμή σε μονολιθικό σκυρόδεμα)
- Το επίπεδο τιμών της σχετικής ολίσθησης και του εύρους της ρωγμής κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης στην αστοχία

Στα επόμενα παρατίθενται συμπεράσματα για τη δυνατότητα πρόβλεψης των θεωρητικών μοντέλων, συνοψίζοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή τους. Παρουσιάζονται σε γραφήματα, όπου αποτυπώνεται η επιρροή των παραπάνω παραμέτρων στις προβλέψεις των μοντέλων.

### - Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

Το μοντέλο του Mattock είναι το μοναδικό μοντέλο που δίνει αποτελέσματα ανεξάρτητα από τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Η αντοχή του σκυροδέματος περιλαμβάνεται μόνο στον υπολογισμό του άνω ορίου αντοχής της διεπιφάνειας προκειμένου να ληφθεί υπόψη η περίπτωση αστοχίας λόγω θλίψης του σκυροδέματος προτού αστοχήσει ο οπλισμός που διαπερνά τη διεπιφάνεια (για βαριά οπλισμένη διεπιφάνεια). Παρατηρούμε ότι για το ίδιο ποσοστό οπλισμού (ίδιος αριθμός βλήτρων) η προβλεπόμενη διατμητική δύναμη είναι ίδια.

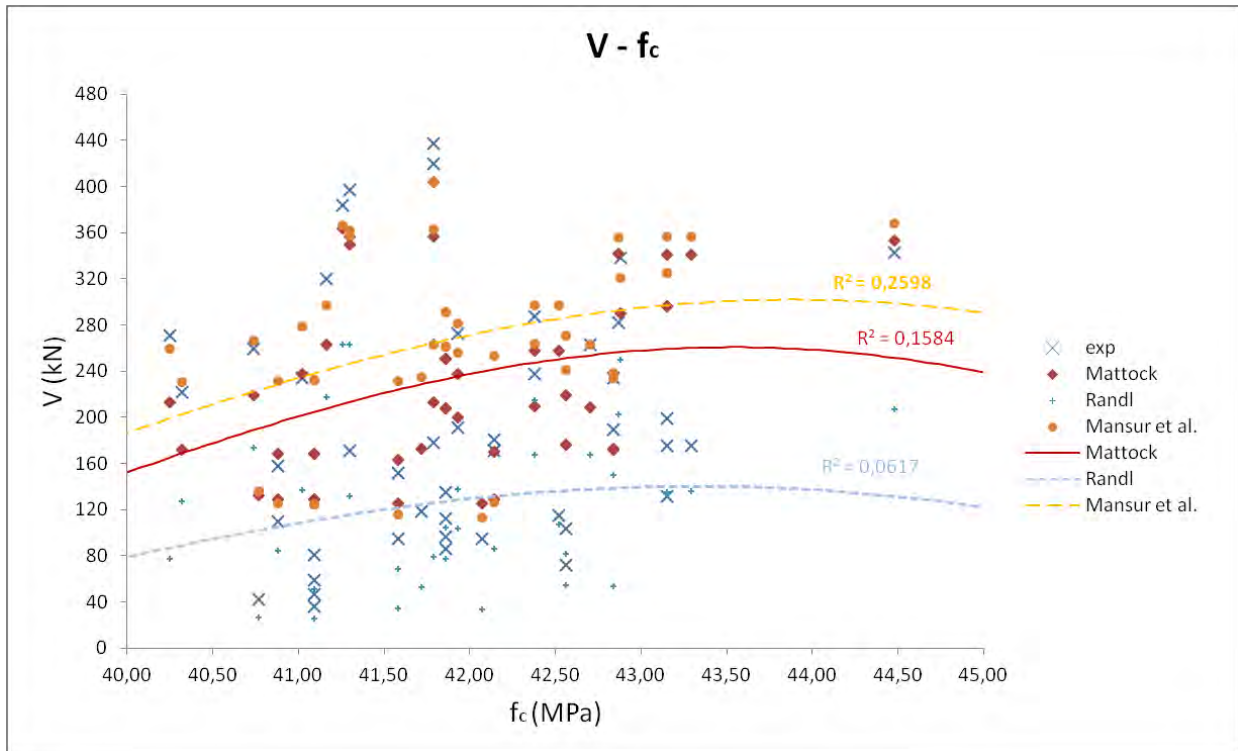
Το προσομοίωμα της δοκού επί ελαστικής στήριξης είναι μοντέλο που προβλέπει τη συμβολή του μηχανισμού δράσης βλήτρου στη μεταφορά τέμνουσας σε μια διεπιφάνεια. Εάν ληφθεί υπόψη και η συμβολή της τριβής, τότε προκύπτουν ικανοποιητικές προβλέψεις για το φορτίο αντοχής που αναπτύσσεται σε μια διεπιφάνεια. Στον υπολογισμό του φορτίου αντοχής λαμβάνει υπόψη την αντοχή του σκυροδέματος, η οποία, όπως αναφέρθηκε, κατέχει σημαντικό ρόλο στην τιμή του τελικού φορτίου ιδιαίτερα στην περίπτωση ελαφρώς και μεσαία οπλισμένης διεπιφάνειας. Για μεγάλο ποσοστό οπλισμού, η δυσκαμψία βλήτρου είναι αυξημένη με αποτέλεσμα το περιβάλλον σκυρόδεμα να συνθλίβεται και να αποδιοργανώνεται η περιοχή γύρω από τις ράβδους και έτσι να μειώνεται το μέγιστο φορτίο.

Το μοντέλο του Rasmussen περιγράφει, όπως και το προηγούμενο μοντέλο, αποκλειστικά τον μηχανισμό δράσης βλήτρου. Λαμβάνοντας υπόψη και τον

μηχανισμό της τριβής δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα αλλά λιγότερο συντηρητικά σε σχέση με το μοντέλο της δοκού επί ελαστικής στήριξης. Στον υπολογισμό του φορτίου αντίστασης λαμβάνεται υπόψη η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του σκυροδέματος τόσο μεγαλύτερη προκύπτει και η αντοχή της διεπιφάνειας.

Το μοντέλο του Randl είναι το πιο συντηρητικό μοντέλο από όλα. Λαμβάνει υπόψη όλους τους μηχανισμούς που δρουν σε μια διεπιφάνεια, χρησιμοποιώντας στον υπολογισμό διάφορες τιμές για τους επιμέρους συντελεστές, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της συνάφειας μεταξύ των δύο παρειών εκατέρωθεν του επιπέδου ολίσθησης και της δύναμης λόγω δράσης βλήτρου με όμοιο τρόπο όπως στο μοντέλο του Rasmussen. Οι συντηρητικές τιμές οφείλονται στους συντελεστές που λαμβάνονται στους υπολογισμούς σε αντίθεση με το μοντέλο του Rasmussen όπου δεν χρησιμοποιείται κανένας μειωτικός συντελεστής. Οι συντελεστές αυτοί εξαρτώνται από το είδος της διεπιφάνειας και εισάγονται για να μειώσουν ή να αυξήσουν, ανάλογα, τη συμβολή του κάθε μηχανισμού στην μεταφορά διατμητικών δυνάμεων.

Το μοντέλο των Mansur et al. αποτελεί τροποποίηση του μοντέλου του Mattock καθώς δεν λαμβάνει σταθερή τιμή για τη συμβολή της συνάφειας αλλά η τιμή αυτή εξαρτάται από τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της αντοχής του σκυροδέματος τόσο μεγαλύτερη είναι και η συμβολή της συνάφειας. Η τιμή που προκύπτει, όμως, είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή που δίνει το μοντέλο του Randl, γεγονός που οφείλεται και στην μεγαλύτερη τιμή των επιμέρους συντελεστών. Ο μέσος όρος των τιμών του λόγου  $\frac{V_{cal}}{V_{exp}}$  ισούται με 1.56. Επομένως, θα πρέπει να εισαχθούν στον υπολογισμό του φορτίου αντοχής μειωτικοί συντελεστές όμοιοι με του Randl.



Σχήμα 8.5.1: Μέγιστη διατμητική δύναμη συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος

#### - Ορθή τάση οπλισμού $\rho f_{sy}$

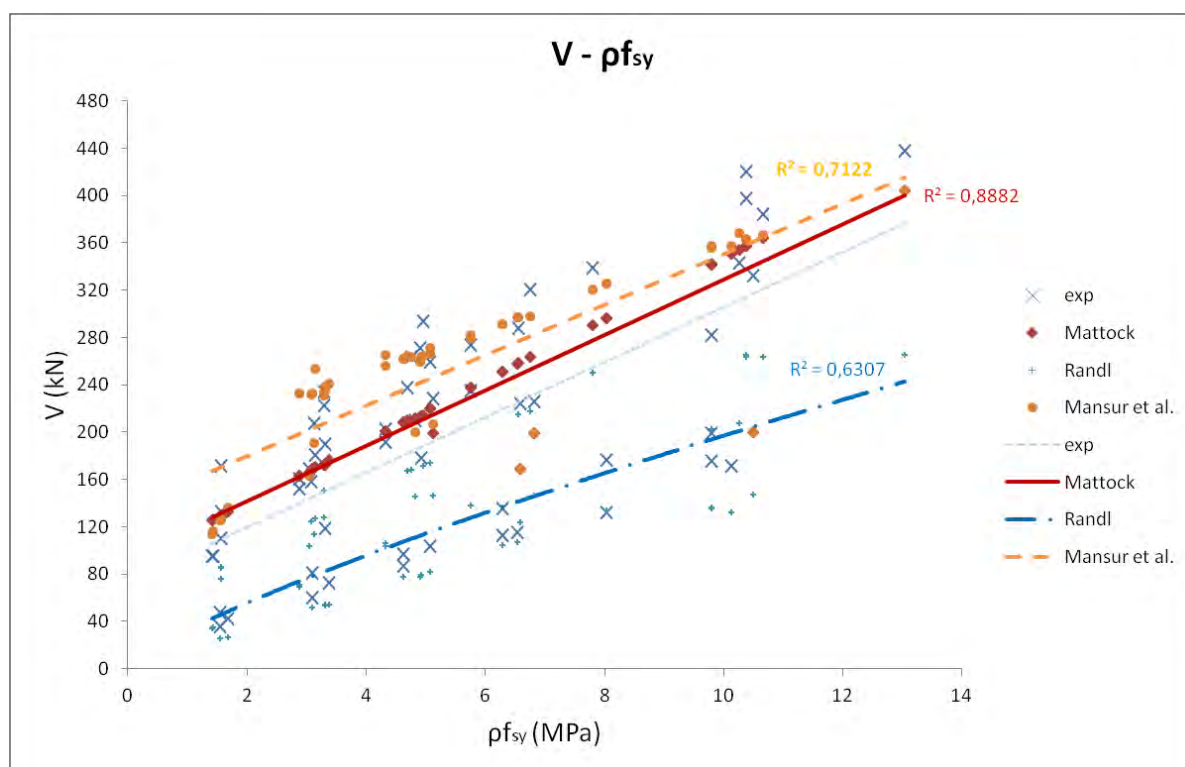
Σε όλα τα μοντέλα, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια, τόσο μεγαλύτερη είναι και η τιμή της αντίστασης. Στη σχέση του Mattock υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της μέγιστης δύναμης και της τιμής του  $\rho f_{sy}$ . Ο παράγοντας  $\rho f_{sy}$  είναι η ορθή τάση που εισάγεται από τον οπλισμό λόγω εξόλκευσης στη διεπιφάνεια. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της δύναμης τριβής που αντιστέκεται στην σχετική ολίσθηση των παρειών της διεπιφάνειας.

Ίδια τάση φαίνεται να υπάρχει και στο μοντέλο των Mansur et al. με τη διαφορά ότι η επίδραση του ποσοστού οπλισμού δεν είναι τόσο ανεξέλεγκτη, αλλά εξαρτάται από την τιμή της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Για δεδομένη τιμή του  $\rho f_{sy}$ , όσο μεγαλύτερη είναι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος τόσο μεγαλύτερη είναι η συμβολή του μηχανισμού τριβής. Αυτό συμβαίνει για λόγους  $\frac{\rho f_y}{f_c} \leq 0.075$ . Όσο μικρότερη είναι η αντοχή του σκυροδέματος τόσο πιο εύκολα λειαίνεται η διεπιφάνεια και αυτό διότι τα προεξέχοντα τμήματα στο επίπεδο ολίσθησης, λόγω της χαμηλής αντοχής συνθλίβονται. Έτσι, υποβαθμίζεται ο ρόλος της τριβής και ενισχύεται ο ρόλος του μηχανισμού δράσης βλήτρου του οπλισμού. Εξαιτίας του παραπάνω, για λόγους  $0.075 \leq \frac{\rho f_y}{f_c} \leq 0.270$  ο συντελεστής τριβής μειώνεται στην τιμή 0.55 από την τιμή 2.5 που είχε πριν.

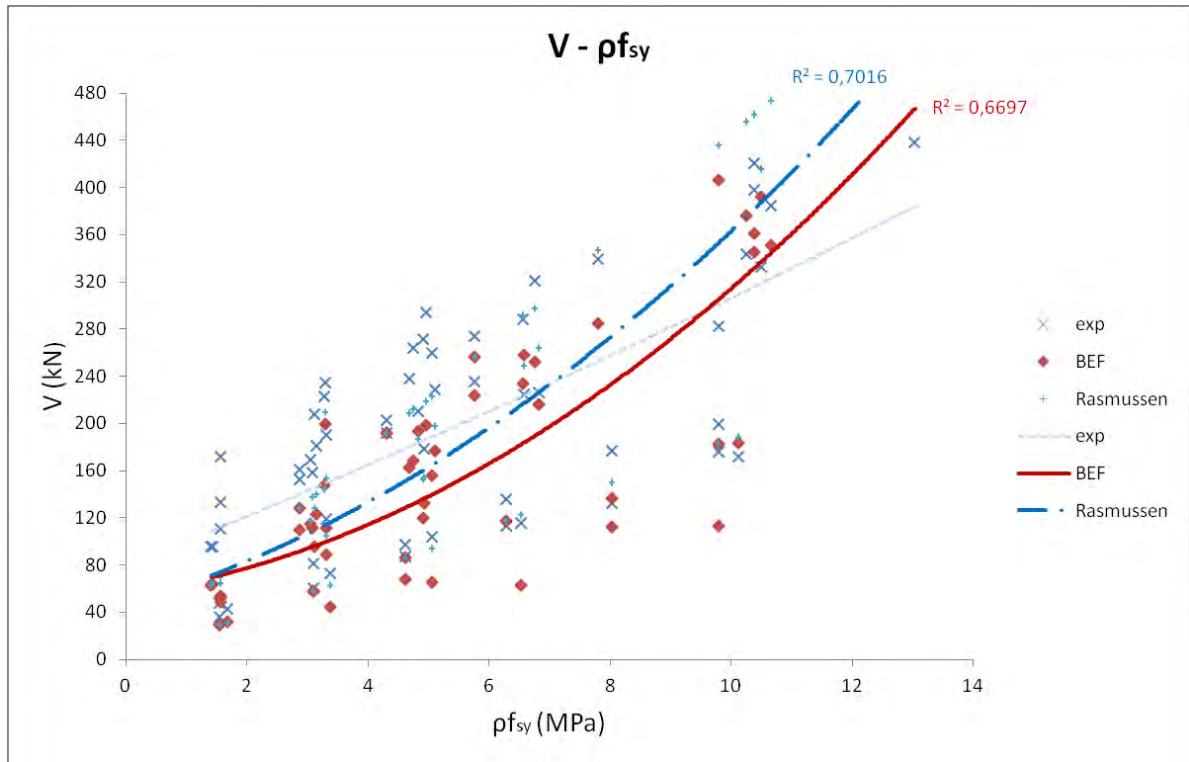
Στο μοντέλο του Randl το ποσοστό οπλισμού επηρεάζει τόσο τον μηχανισμό τριβής όσο και τον μηχανισμό δράσης βλήτρου. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό οπλισμού που διαπερνά την επιφάνεια ολίσθησης τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη τριβής και η δύναμη δράσης βλήτρου. Η επιρροή του ποσοστού οπλισμού μετριάζεται ή ενισχύεται μέσω των επιμέρους συντελεστών που εξαρτώνται από το είδος της διεπιφάνειας, όπως πρόκειται να σχολιαστεί στη συνέχεια.

Στα μοντέλα του Rasmussen και BEF, η αύξηση του ποσοστού του οπλισμού αυξάνει την μέγιστη δύναμη που αναπτύσσεται στην αστοχία, αλλά όχι γραμμικά όπως γίνεται στο μοντέλο του Mattock. Αυτό βέβαια δεν αποτελεί κανόνα στο μοντέλο BEF, γιατί εκτός από το ποσοστό οπλισμού  $\rho$ , επίδραση στην τελική αντοχή του μηχανισμού δράσης βλήτρου έχει και η διάμετρος των ράβδων.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η επιρροή της τιμής της τάσης  $\rho f_{sy}$  στην αντοχή της διεπιφάνειας έναντι επιβολής διατμητικής δύναμης, όπως αυτή προκύπτει από κάθε μοντέλο για τα δοκίμια που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία.



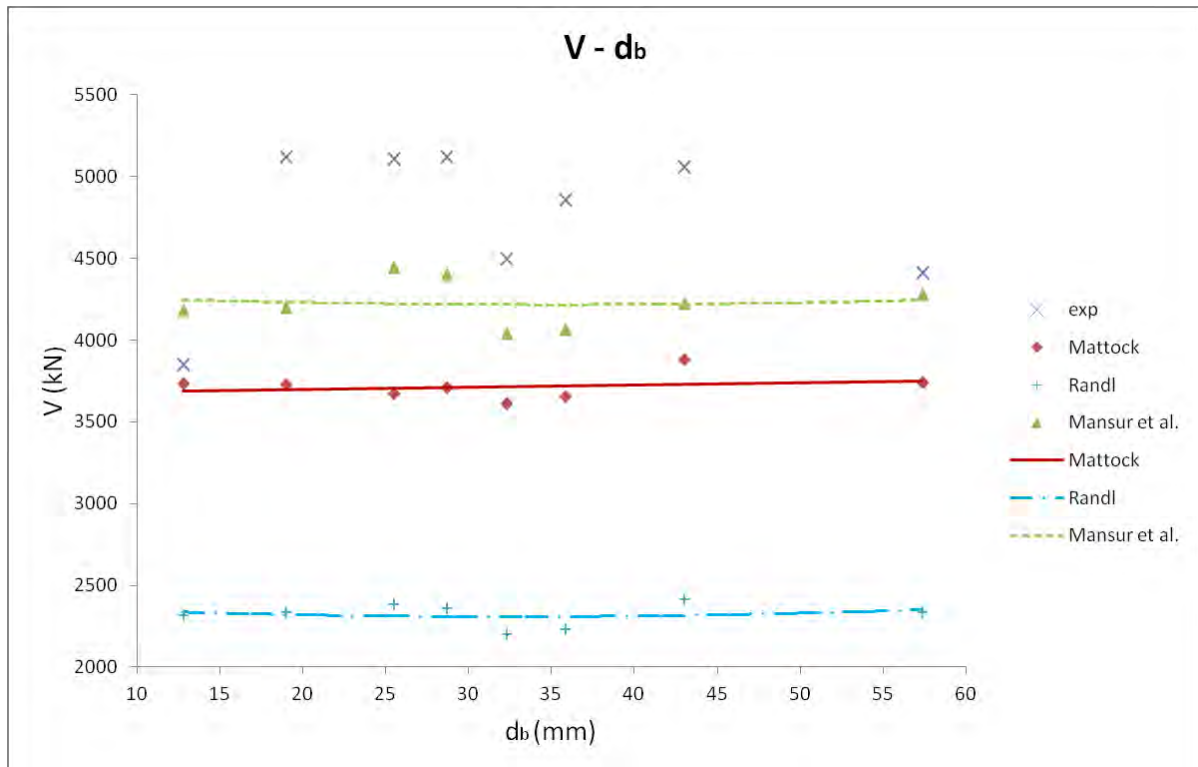
**Σχήμα 8.5.2:** Μέγιστη διατμητική δύναμη συναρτήσει της ορθής στη διεπιφάνεια τάσης από τον οπλισμό (Mattock, Randl, Mansur et al.)



**Σχήμα 8.5.3:** Μέγιστη διατμητική δύναμη συναρτήσει της ορθής στη διεπιφάνεια τάσης από τον οπλισμό (B.E.F., Rasmussen)

## - Διάμετρος ράβδων οπλισμού

Εξετάζοντας την επιρροή της διαμέτρου των ράβδων οπλισμού που διαπερνούν τη διεπιφάνεια, έτσι ώστε η τιμή της τάσης  $\rho f_{sy}$  να παραμένει περίπου σταθερή, αξίζει να σημειωθεί ότι μόνο το μοντέλο BEF υπολογίζει μειωμένη τη δύναμη στην αστοχία με αύξηση της διαμέτρου των ράβδων.



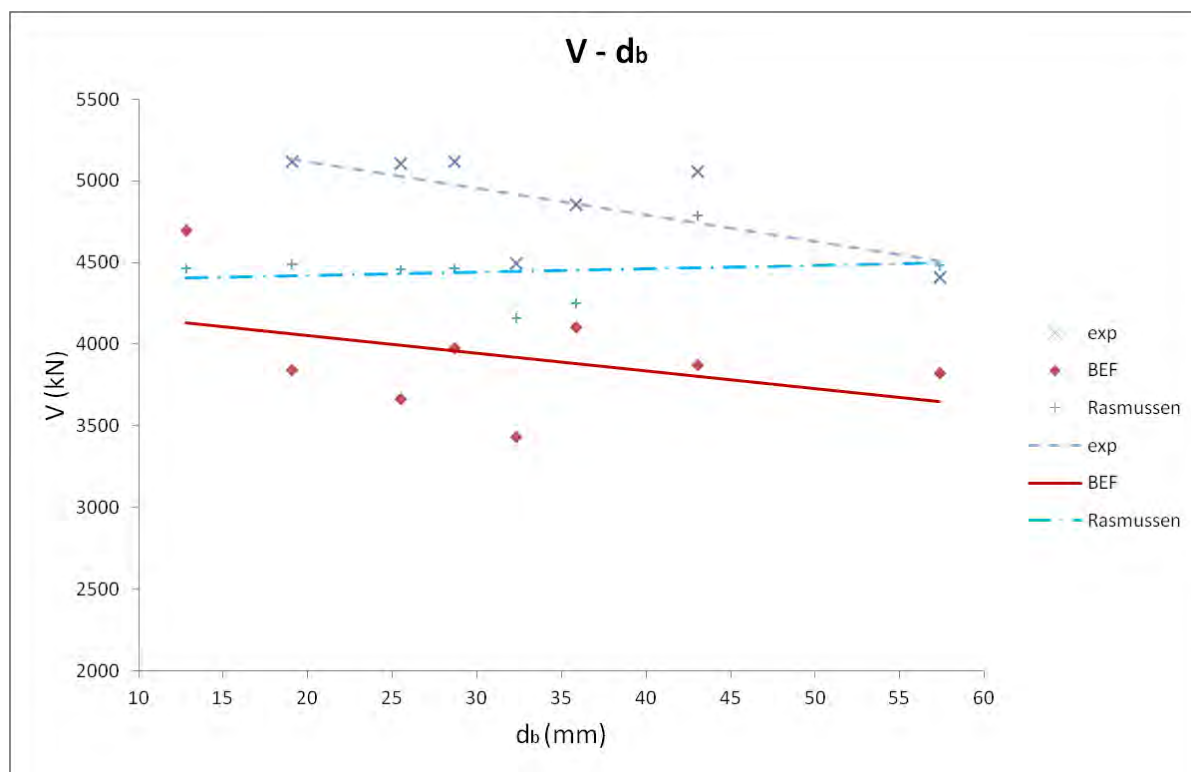
Σχήμα 8.5.4: Μέγιστη διατμητική δύναμη συναρτήσει της διαμέτρου των ράβδων (Mattock, Randl, Mansur et al.)

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι τα μοντέλα των Mattock, Randl και Mansur et al. δεν εμφανίζουν καμία εξάρτηση από τη διάμετρο των ράβδων οπλισμού. Η σχέση της μέγιστης δύναμης με τη διάμετρο είναι σταθερή (σχεδόν γραμμική με τις παρατηρήσεις να εμφανίζουν πολύ μικρή διασπορά).

Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η σχέση της μέγιστης δύναμης που προκύπτει από τα πειράματα και από την εφαρμογή των μοντέλων BEF και Rasmussen. Είναι φανερό ότι στο μοντέλο του Rasmussen, όμοια με τα υπόλοιπα μοντέλα, δεν υπάρχει συσχέτιση του μέγιστου φορτίου με τη διάμετρο των βλήτρων που χρησιμοποιούνται. Αντίθετα το μοντέλο BEF καθώς αυξάνεται η τιμή της διαμέτρου του οπλισμού, το φορτίο αντίστασης στην αστοχία μειώνεται. Αυτό συμφωνεί και με τα πειραματικά αποτελέσματα και μπορεί να ερμηνευτεί ως εξής:

Μεγάλες σε διάμετρο ράβδοι εμφανίζουν μεγαλύτερη καμπτική δυσκαμψία με αποτέλεσμα να αναλαμβάνουν μεγαλύτερες δυνάμεις λόγω δράσης βλήτρου. Αυτό σημαίνει πως το περιβάλλον σκυρόδεμα δέχεται μεγαλύτερα φορτία με συνέπεια να συνθλίβεται και να αποδιοργανώνεται για μικρότερα φορτία συγκριτικά με όταν γίνεται χρήση οπλισμού μικρότερης διαμέτρου.

Η επιρροή της διαμέτρου των ράβδων εισάγεται στον υπολογισμό της δυσκαμψίας του περιβάλλοντος σκυροδέματος  $K_f$  η τιμή της οποίας μειώνεται όσο αυξάνεται η διάμετρος.



Σχήμα 8.5.5: Μέγιστη διατμητική δύναμη συναρτήσει της διαμέτρου των ράβδων (B.E.F., Rasmussen)

#### - Επεξεργασία διεπιφάνειας

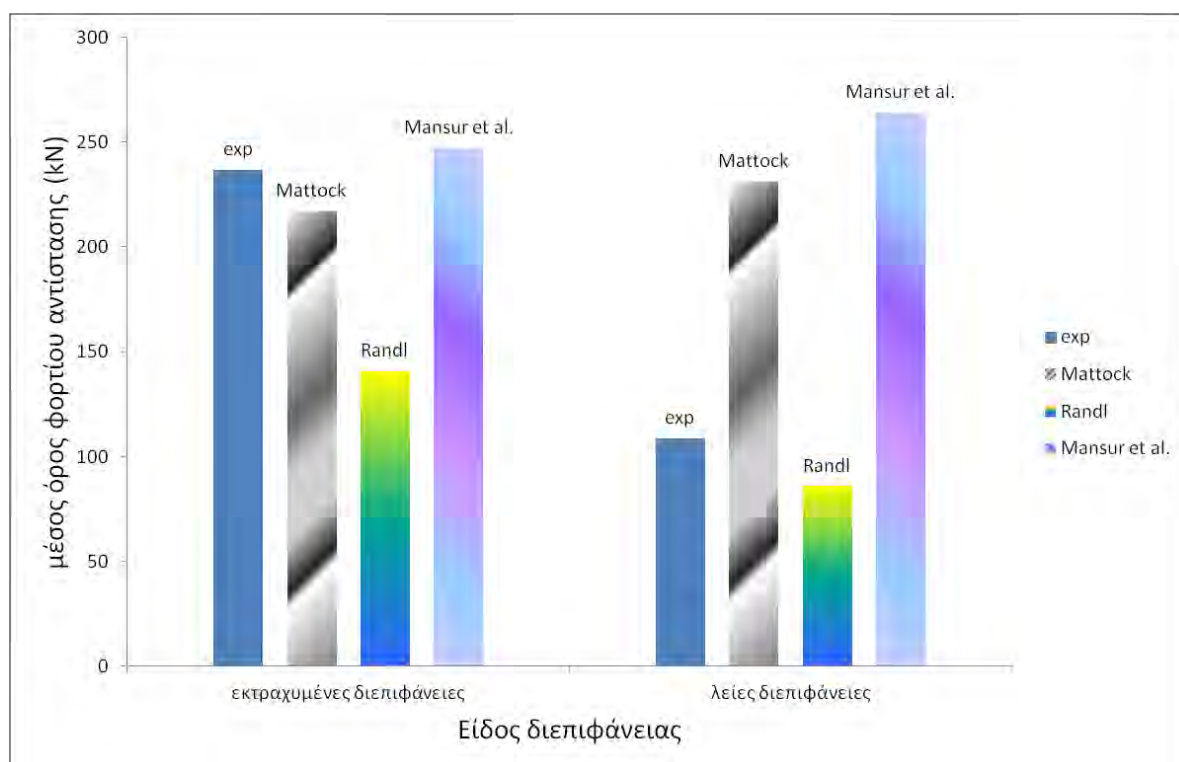
Το είδος της διεπιφάνειας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον μηχανισμό τριβής ιδιαίτερα στην περίπτωση μονοτονικής φόρτισης και για μικρές τιμές της ολίσθησης (<0.5 mm). Όταν η διεπιφάνεια είναι εκτραχυμένη ενεργοποιείται κατά κύριο λόγο ο μηχανισμός τριβής και αλληλοεμπλοκής αδρανών και δευτερευόντως ο μηχανισμός δράσης βλήτρου (εκτός και αν έχουμε μεγάλες τιμές της ολίσθησης στην αστοχία).

Τα μοντέλα των Mattock και Mansur et al., που βασίζονται κατά κύριο λόγο στον μηχανισμό τριβής, δίνουν αρκετά ικανοποιητικές προβλέψεις στην περίπτωση εκτραχυμένων διεπιφανειών, με μέσο όρο λόγου  $\frac{V_{cal}}{V_{exp}}$  0.92 και 1.04 αντίστοιχα. Το μοντέλο του Mattock θα μπορούσε να είναι ακόμα πιο ακριβές στις προβλέψεις του αν λαμβανόταν υπόψη τιμή της τάσης λόγω συνάφειας συναρτήσει της αντοχής του σκυροδέματος. Αντίθετα στην περίπτωση των λείων διεπιφανειών, τα παραπάνω μοντέλα δεν δίνουν καθόλου καλές προβλέψεις για την τιμή της μέγιστης τέμνουσας. Ο μέσος όρος του λόγου  $\frac{V_{cal}}{V_{exp}}$  είναι 2.13 και 2.43 αντίστοιχα. Και στα δύο μοντέλα δεν λαμβάνεται διαφορετικός συντελεστής τριβής ανάλογα με το είδος της

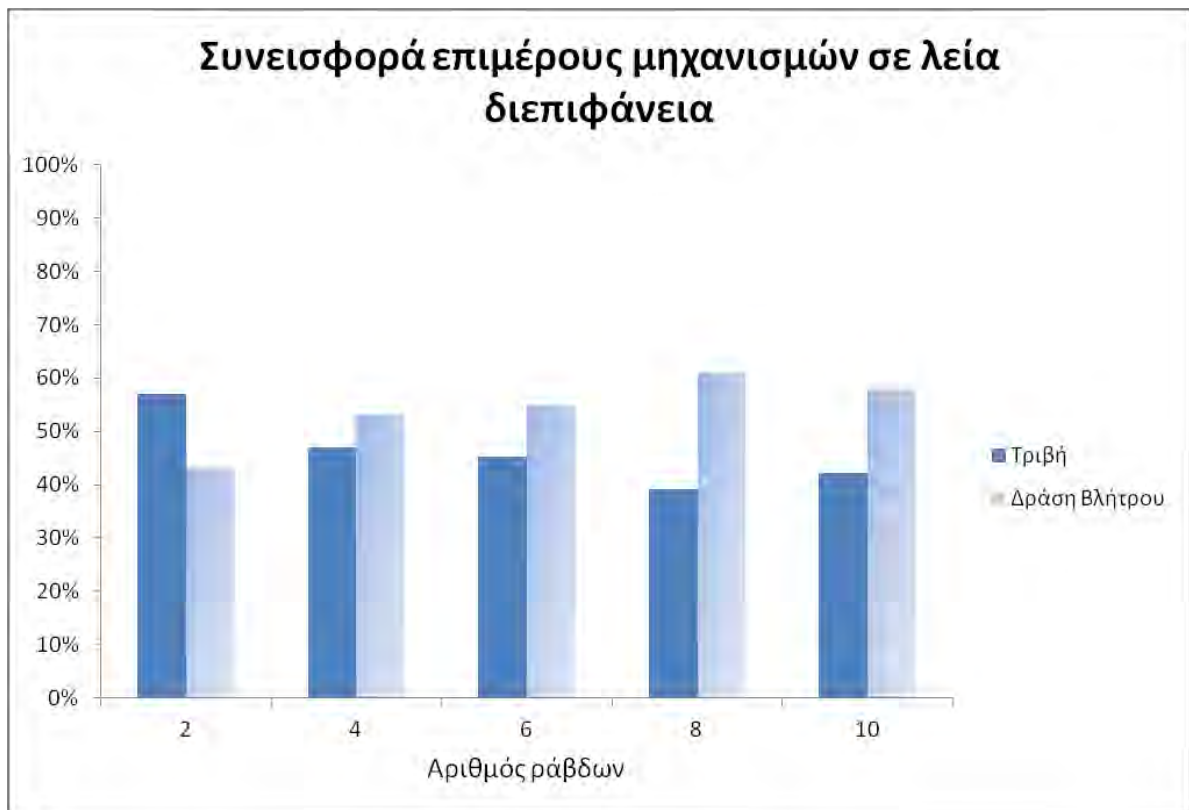


διεπιφάνειας. Έτσι η τριβή υπερεκτιμάται στην περίπτωση των λείων διεπιφανειών, καθώς θα έπρεπε να λαμβάνεται μειωμένος συντελεστής τριβής (προτεινόμενες τιμές: 0.2 - 0.4).

Στην περίπτωση των λείων διεπιφανειών, στα μοντέλα BEF και του Rasmussen, λήφθηκε μηδενική συμμετοχή της τριβής. Εξαιτίας των μεγάλων σχετικών ολισθήσεων και του αυξημένου εύρους ρωγμής που παρατηρήθηκαν στην αστοχία, έγινε η υπόθεση ότι ο μηχανισμός τριβής δεν συνεισφέρει στην αντίσταση της διεπιφάνειας. Προκειμένου να γίνει μια εκτίμηση για το κατά πόσο συμμετέχει ο μηχανισμός τριβής στην ανάληψη διατμητικών τάσεων στην περίπτωση των δοκιμών με λεία διεπιφάνεια, από την αντοχή που μετρήθηκε στα πειράματα αφαιρέθηκε η δύναμη λόγω δράσης βλήτρου που υπολογίζεται από το προσομοίωμα BEF (Σχήμα 8.5.7). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για χαμηλό αριθμό βλήτρων υπάρχει συνεισφορά του μηχανισμού τριβής, η οποία σταδιακά ελαττώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των βλήτρων.



**Σχήμα 8.5.6:** Φέρουσα ικανότητα για τα μοντέλα που βασίζονται στην τριβή (Mattock, Randl, Mansur et al.) ανάλογα με τη διεπιφάνεια

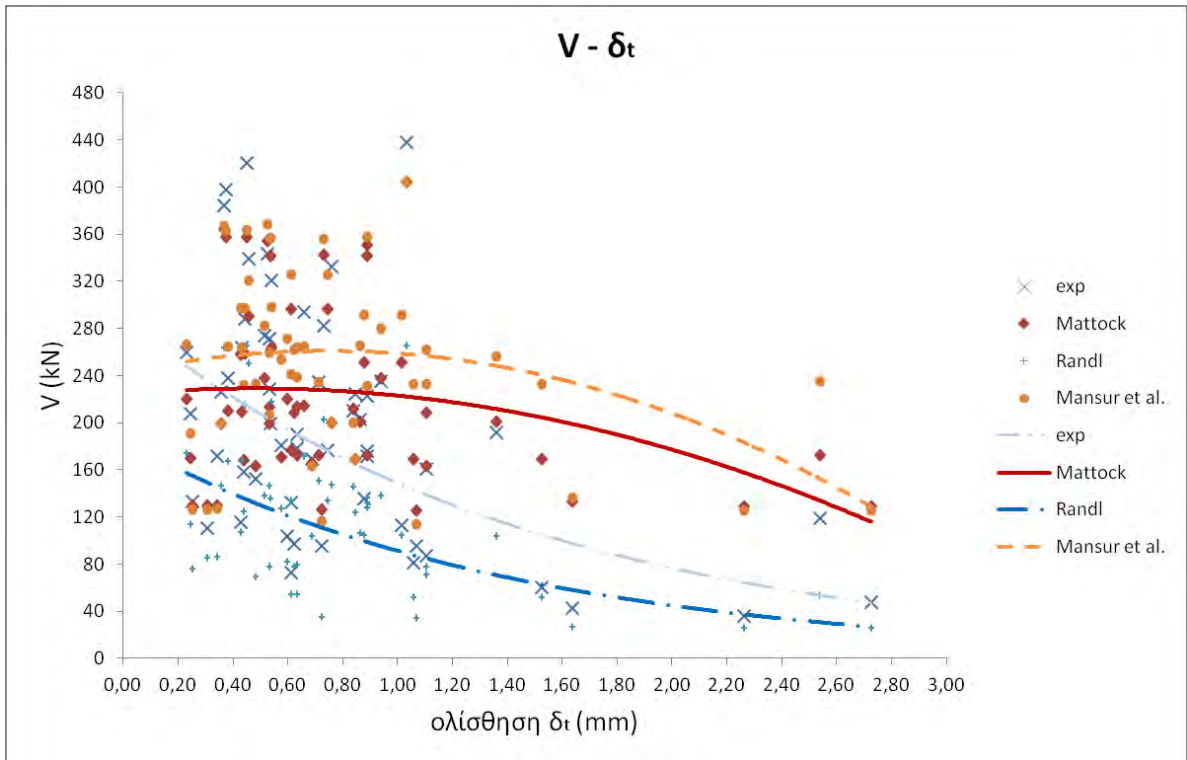


**Σχήμα 8.5.7:** Συνεισφορά των μηχανισμών τριβής και βλήτρου σε λεία διεπιφάνεια όπως προκύπτει από τα μοντέλα BEF

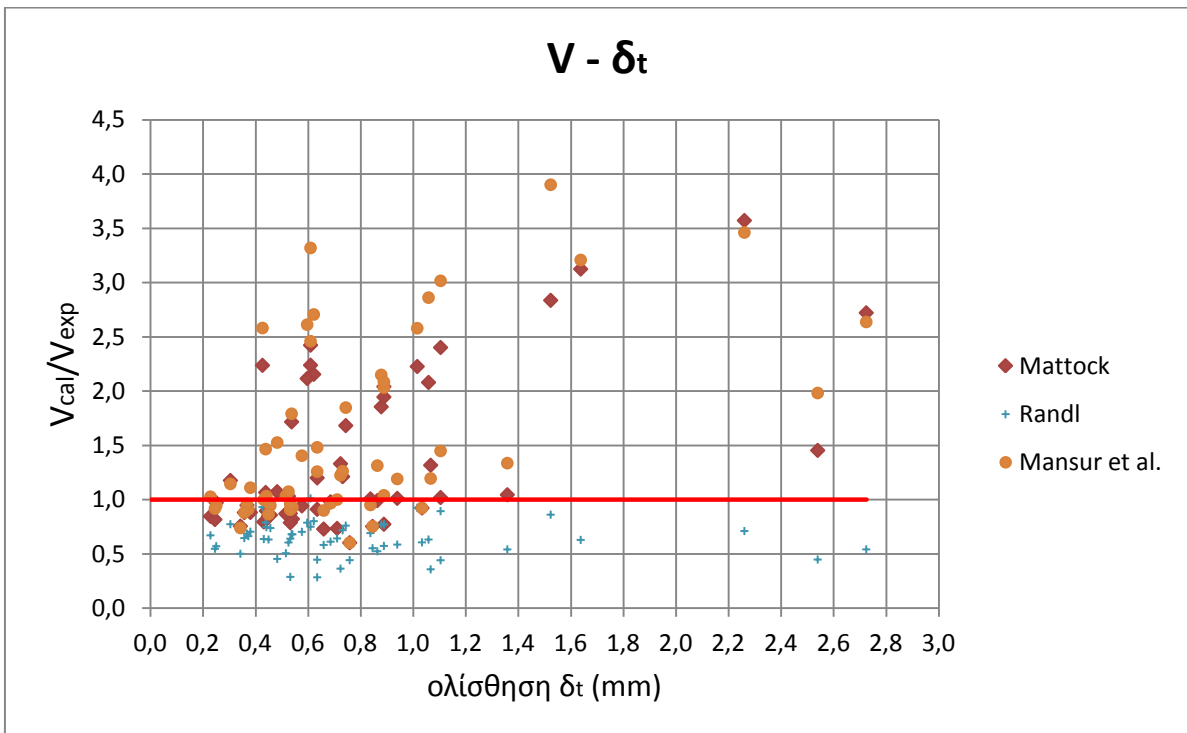
Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των λείων διεπιφανειών, στην περίπτωση μικρού αριθμού ράβδων (2 – 6 βλήτρα), αυτές αστοχούν εξαιτίας διαρροής σε διάτμηση.

#### - Σχετική ολίσθηση και εύρος ρωγμής

Προκειμένου να ενεργοποιηθούν οι επιμέρους μηχανισμοί ανάληψης διατμητικών τάσεων σε μια διεπιφάνεια είναι απαραίτητο να ολισθήσει η μια παρειά σχετικά με την άλλη. Τα μοντέλα των Mattock, Randl και Mansur et al. δεν εισάγουν στον υπολογισμό του φορτίου αντίστασης την τιμή της σχετικής ολίσθησης που παρατηρείται στην αστοχία. Ωστόσο παρατηρείται μια πτωτική τάση της αντοχής που προκύπτει από την εφαρμογή των μοντέλων όσο αυξάνεται η τιμή της σχετικής ολίσθησης. Στο σημείο αυτό δεν πρέπει να αμελήσουμε το γεγονός ότι για τα δοκίμια με λεία διεπιφάνεια η τιμή της ολίσθησης στην αστοχία είναι μεγαλύτερη από ότι σε αυτά με εκτραχυμένη διεπιφάνεια. Όπως έχει ήδη σχολιαστεί, τα προαναφερθέντα προσομοιώματα (Mattock, Mansur et al.) δίνουν προβλέψεις κατά της ασφαλείας για δοκίμια με λεία διεπιφάνεια. Επομένως δε μπορούμε να πούμε ότι υπάρχει άμεση συσχέτιση των προβλέψεων των προσομοιωμάτων με την ολίσθηση.

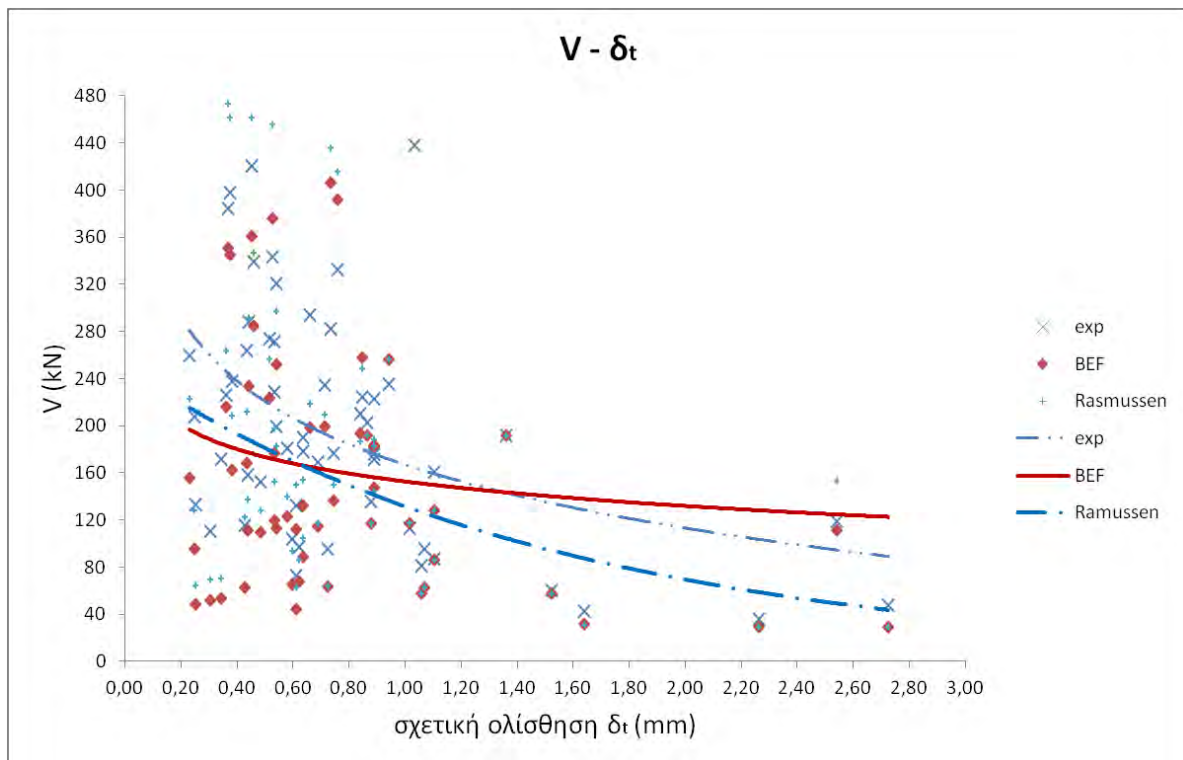


Σχήμα 8.5.8: Μέγιστη διατμητική δύναμη συναρτήσει της ολίσθησης (Mattock, Randl, Mansur et al.)

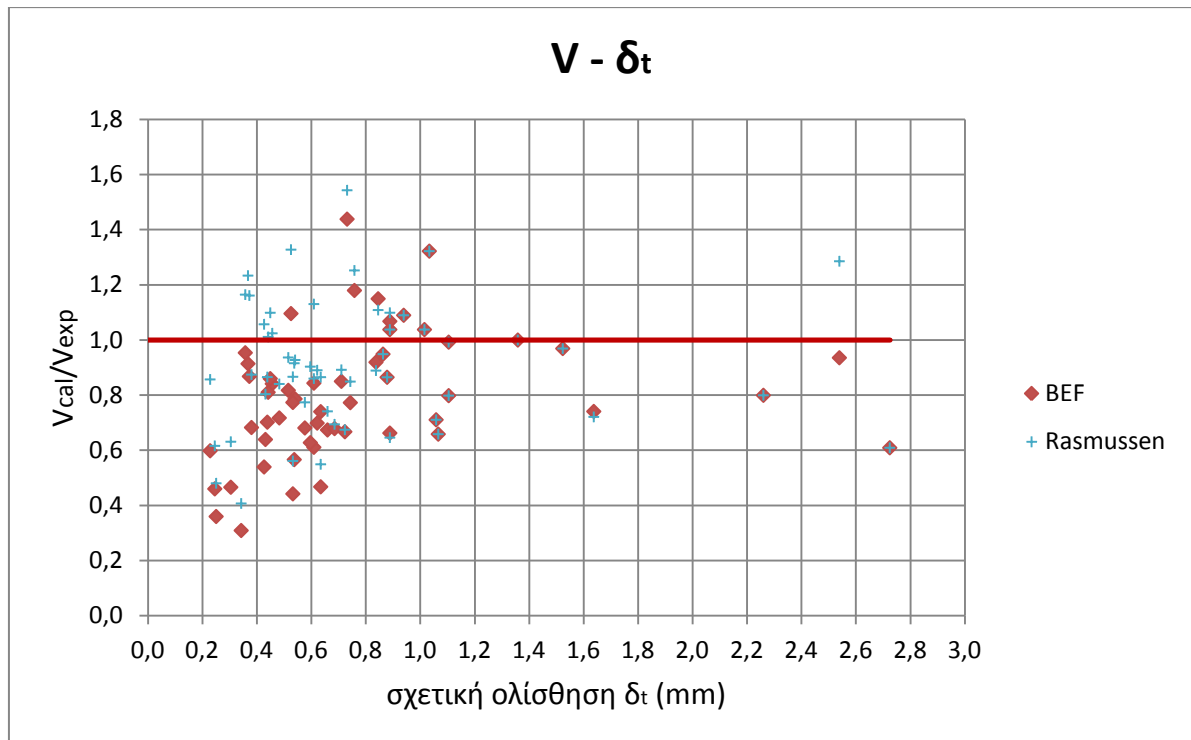


Σχήμα 8.5.9: Λόγος πειραματικών προς υπολογισμένων αντοχών (Mattock, Randl, Mansur et al.)

Το προσομοίωμα BEF λαμβάνει υπόψη στον υπολογισμό την τιμή της ολίσθησης στην αστοχία. Αυτό από τη μια είναι θετικό αλλά το αρνητικό είναι ότι πρέπει εκ των προτέρων να γνωρίζουμε την τιμή της ολίσθησης στην αστοχία. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει και σε μη ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με το ποσοστό ενεργοποίησης του μηχανισμού βλήτρου με αποτέλεσμα να υποεκτιμηθεί ή να υπερεκτιμηθεί η μέγιστη τάση στη διεπιφάνεια. Παρατηρούμε ότι για μικρές τιμές της ολίσθησης οι προβλέψεις του προσομοιώματος είναι υπέρ της ασφαλείας ενώ για μεγαλύτερες τιμές της ολίσθησης το προσομοίωμα φαίνεται να υπερεκτιμά την αντοχή της διεπιφάνειας.



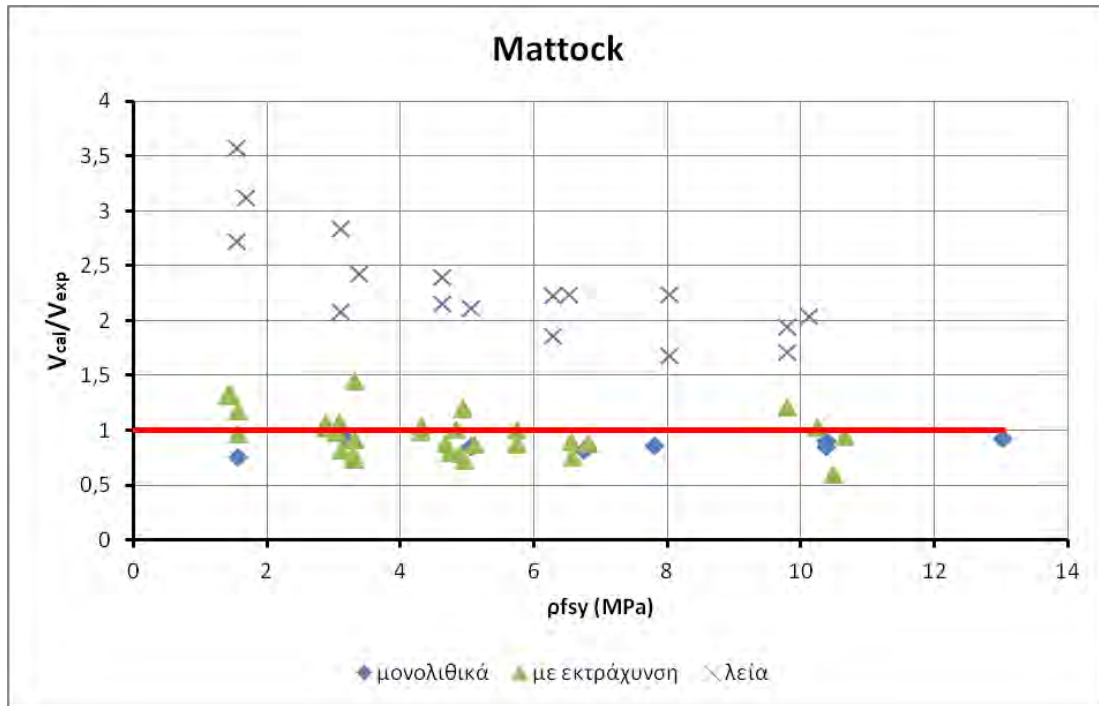
Σχήμα 8.5.10: Μέγιστη διατμητική δύναμη συναρτήσει της ολίσθησης (B.E.F., Rasmussen)



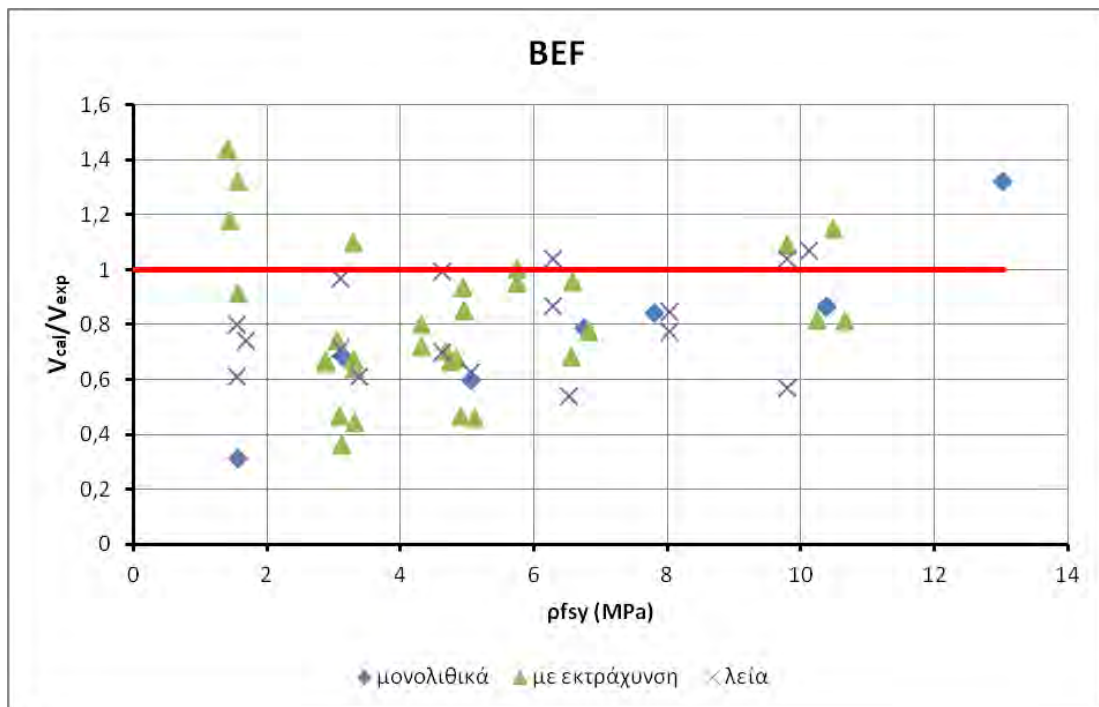
**Σχήμα 8.5.11:** Λόγος πειραματικών προς υπολογισμένων αντοχών (B.E.F., Rasmussen)

Κανένα από τα μοντέλα που εφαρμόστηκαν δεν λαμβάνει υπόψη στους υπολογισμούς την επιρροή του εύρους ρωγμής  $w$ . Το μέγεθος αυτό παίζει σημαντικό ρόλο στην συνεισφορά των μηχανισμών αλληλοεμπλοκής αδρανών και τριβής. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο μειωμένες είναι οι επιφάνειες επαφής των αδρανών των απέναντι παρειών της διεπιφάνειας. Επιπλέον, μεγαλύτερο εύρος συνεπάγεται μεγαλύτερη αξονική καταπόνηση στις ράβδους οπλισμού που διαπερνούν το επίπεδο ολίσθησης. Η ύπαρξη αξονικής καταπόνησης στον οπλισμό οδηγεί σε μειωμένη δύναμη λόγω δράσης βλήτρου, κάτι που δεν λαμβάνεται υπόψη από τα μοντέλα.

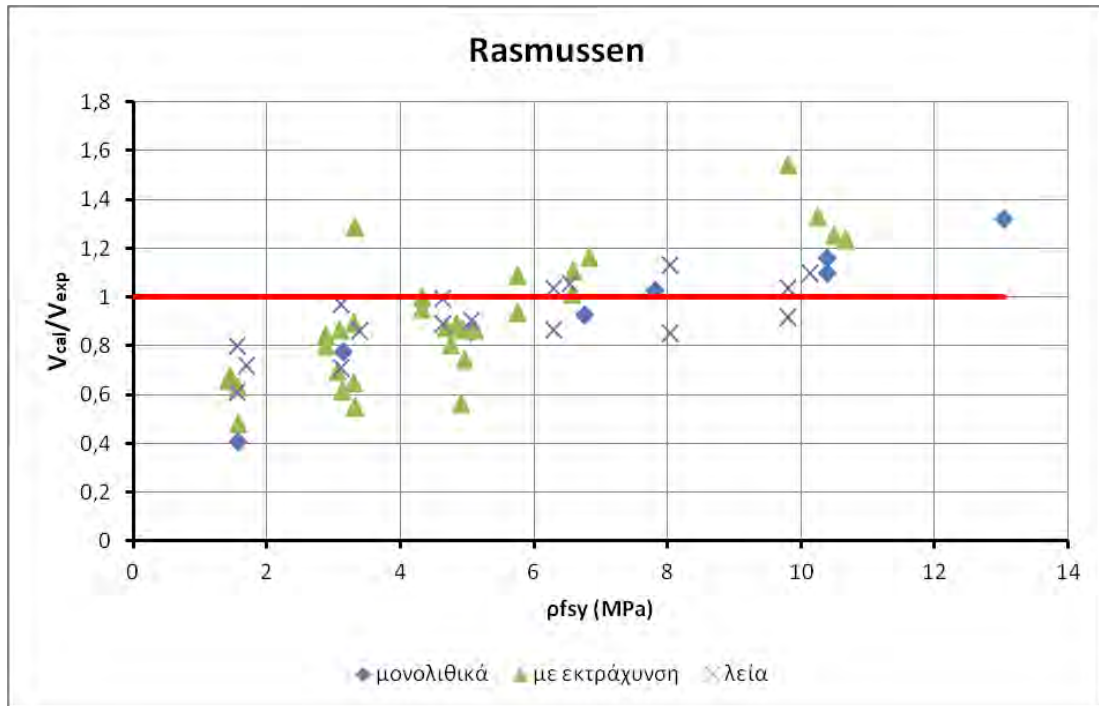
Τέλος, στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται ο λόγος των πειραματικών αντοχών προς των υπολογισμένων αντοχών με βάση το καθένα από τα προσομοιώματα που εφαρμόστηκαν στα δοκίμια της βιβλιογραφίας [15], [16], [19], προκειμένου να γίνει εμφανής η απόκλιση που παρουσιάζουν από τη μονάδα.



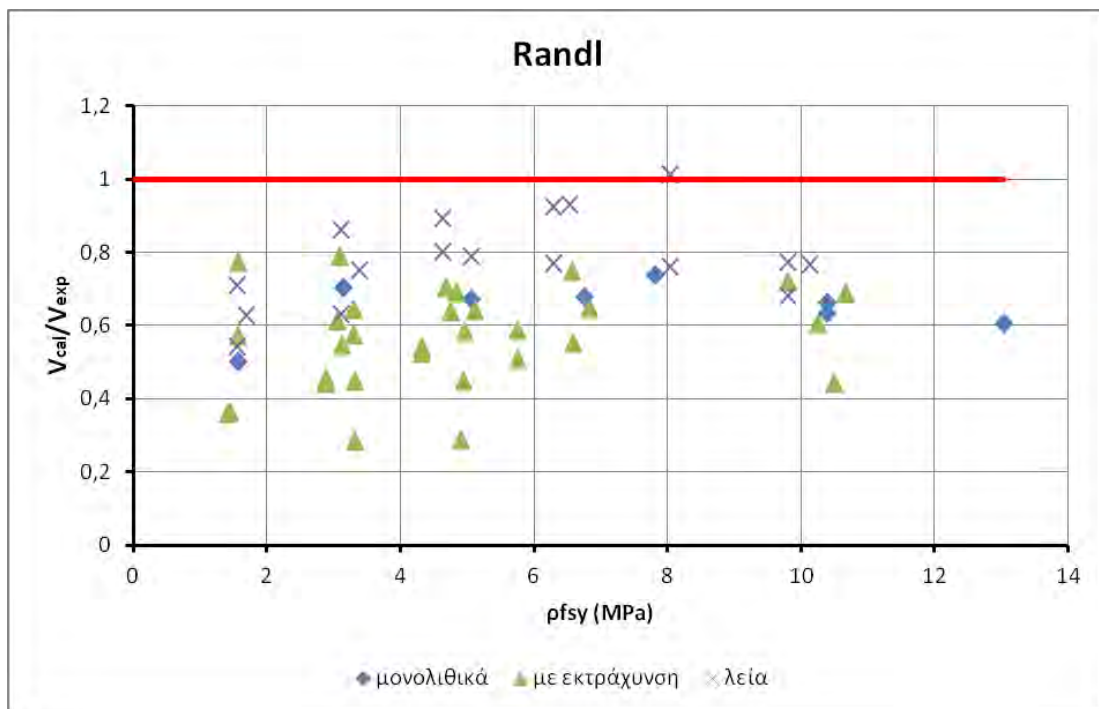
**Σχήμα 8.5.12:** Λόγος πειραματικών αντοχών προς υπολογισμένων αντοχών βάσει του μοντέλου του Mattock



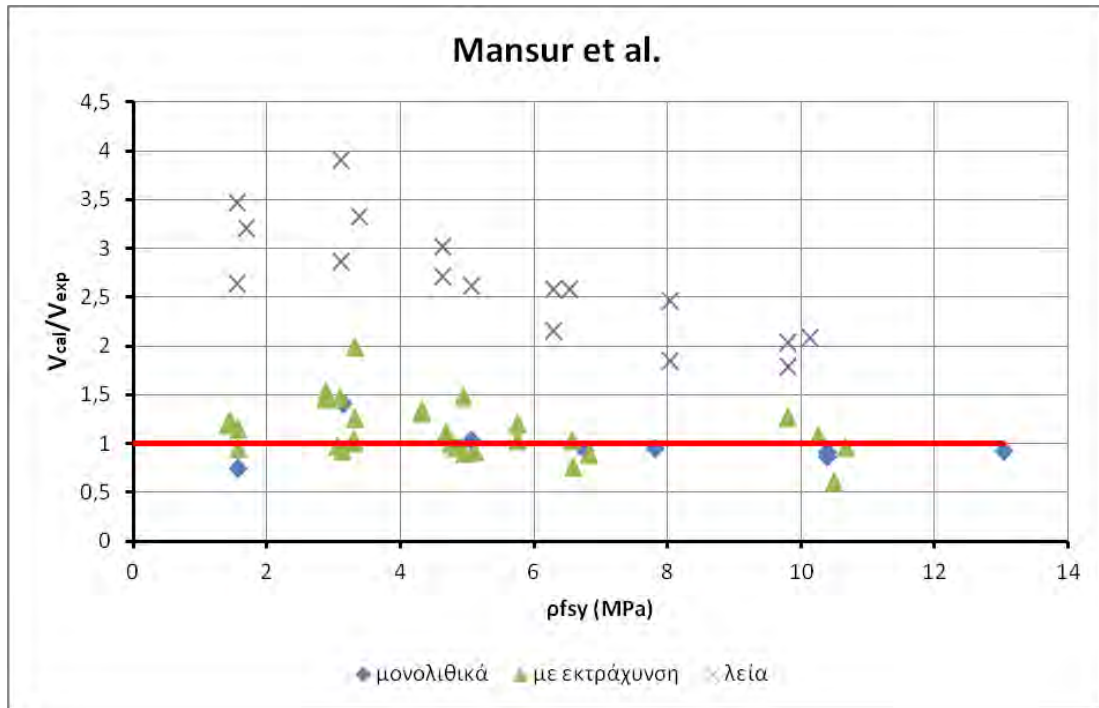
**Σχήμα 8.5.13:** Λόγος πειραματικών αντοχών προς υπολογισμένων αντοχών βάσει του προσομοιώματος BEF



**Σχήμα 8.5.14:** Λόγος πειραματικών αντοχών προς υπολογισμένων αντοχών βάσει του μοντέλου του Rasmussen



**Σχήμα 8.5.15:** Λόγος πειραματικών αντοχών προς υπολογισμένων αντοχών βάσει του μοντέλου του Randl



**Σχήμα 8.5.16:** Λόγος πειραματικών αντοχών προς υπολογισμένων αντοχών βάσει του μοντέλου των Mansur et al.



## **B) Ανακυκλιζόμενη φόρτιση**

Πρόκειται να εφαρμοστούν προσομοιώματα για τον υπολογισμό της διατμητικής δύναμης που αναπτύσσεται σε μια διεπιφάνεια υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Αυτά είναι:

1. Το τροποποιημένο μοντέλο διάτμησης – τριβής που προτάθηκε από το Mattock
2. Το μοντέλο του Randl
3. Το μοντέλο των Mansur et al.

Κατά την εφαρμογή τους έχουν γίνει οι εξής παραδοχές:

1. Για την εφαρμογή του μοντέλου του Randl, συγκεκριμένα, για την περίπτωση των μονολιθικών δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές που αντιστοιχούν σε διεπιφάνειες στις οποίες έχει γίνει έντονη εκτράχυνση με υδροβολή.
2. Επιπλέον για την εφαρμογή του μοντέλου του Randl, στην περίπτωση διεπιφανειών που έχει γίνει εκτράχυνση με απομάκρυνση μιας επιφανειακής στρώσης σκυροδέματος πολύ μικρού πάχους ή/και χρήση εποξεικής ρητίνης λαμβάνονται οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται για εκτράχυνση με υδροβολή.
3. Ως τελική αντοχή λαμβάνεται το 80% της τιμής τη διατμητικής τάσης που υπολογίζεται από την εφαρμογή των μοντέλων.

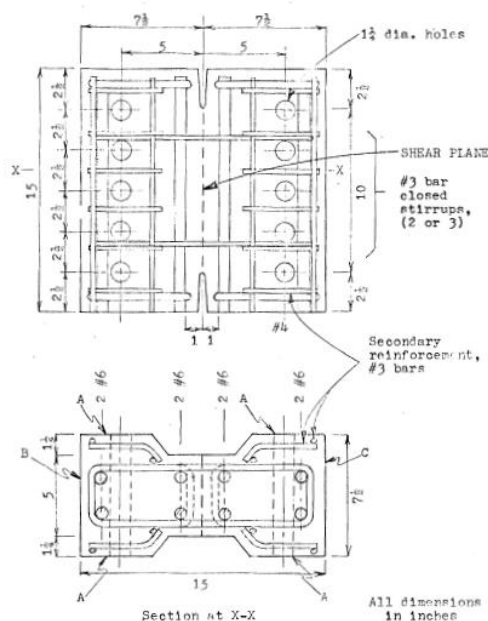
## 8.6.«Shear transfer under cyclically reversing loads, across an interface between concretes cast at different times», Alan H. Mattock

Αυτή η πειραματική μελέτη αφορά [16] τη μεταφορά διατμητικών τάσεων σε διεπιφάνειες μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι:

- Η ιστορία της φόρτισης (μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη φόρτιση)
- Η θλιπτική αντοχή του παλαιού και του νέου σκυροδέματος (αν έχουν την ίδια ή διαφορετική αντοχή)
- Η ύπαρξη ρωγμής στην διεπιφάνεια πριν την επιβολή εξωτερικού φορτίου
- Η τιμή της παραμέτρου  $\rho f_{sy}$

Σχετικά με τα χαρακτηριστικά των δοκιμών της συγκεκριμένης μελέτης έχει γίνει αναφορά στο κεφάλαιο για εφαρμογή των προσομοιωμάτων σε δοκίμια που υποβάλλονται σε μονοτονική φόρτιση.

Στην περίπτωση των δοκιμών που υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, ασκείται φορτίο συνεχώς αυξανόμενο μέχρι η τιμή του να φτάσει το 50% της μέγιστης προβλεπόμενης διατμητικής δύναμης. Στη συνέχεια η διεπιφάνεια αποφορτίζεται και φορτίζεται όμοια με πριν στην αντίθετη κατεύθυνση. Έτσι ολοκληρώνεται ο πρώτος κύκλος φόρτισης. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθούν 10 κύκλοι. Στους επόμενους 5 κύκλους το φορτίο αυξάνεται κατά 8% δηλαδή γίνεται 58% του μέγιστου προβλεπόμενου φορτίου αντίστασης. Μετά το τέλος κάθε 5 κύκλων το φορτίο αυξάνεται κατά 8% μέχρι την αστοχία.



Σχήμα 8.6.1: Τυπική μορφή δοκιμίων [16]

**Πίνακας 8.6.1:** Γενικά χαρακτηριστικά δοκιμίων [16]

Σειρά	Είδος δοκιμίου	$f_{cc}$ (MPa)	Ύπαρξη συνάφειας	Αρχική κατάσταση
L	μονολιθικό	42	---	ρηγματωμένο
M	σύνθετο	42	ναι	ρηγματωμένο
		42		
N	σύνθετο	42	όχι	μη ρηγματωμένο
		42		
P	σύνθετο	42	όχι	ρηγματωμένο
		42		
Q	σύνθετο	42	ναι	ρηγματωμένο
		21		

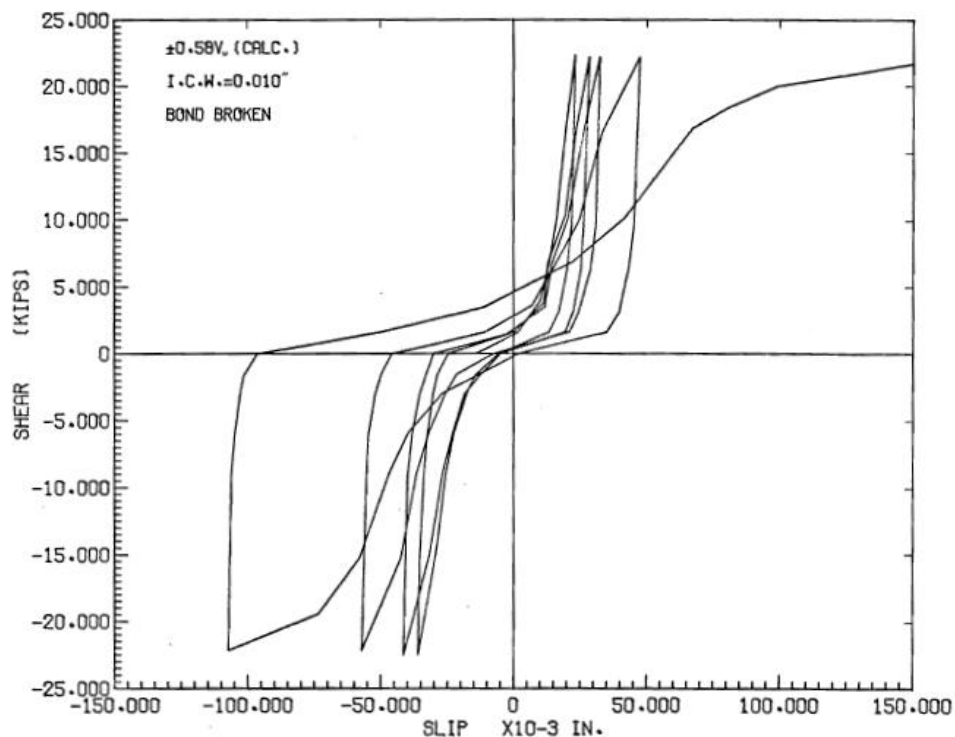
## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Κατά τον πρώτο κύκλο φόρτισης, η διατμητική δυσκαμψία είναι υψηλή και η αύξηση του εύρους της ρωγμής είναι μηδαμινή ή απειροελάχιστη. Στο στάδιο αυτό ο μηχανισμός που είναι περισσότερο ενεργός στην ανάληψη διατμητικών δυνάμεων είναι ο μηχανισμός αλληλοεμπλοκής αδρανών. Καθώς το φορτίο αυξάνει προς τη μέγιστη τιμή του πρώτου κύκλου φόρτισης, όλο και περισσότερα αδρανή συνθλίβονται, με αποτέλεσμα η ένταση που δημιουργείται σε όσα δεν έχουν ακόμα συνθλιβεί να αυξάνεται με ρυθμό μεγαλύτερο από αυτόν που αυξάνεται το επιβαλλόμενο φορτίο. Συνέπεια αυτού είναι η μείωση της διατμητικής δυσκαμψίας. Όταν το εξωτερικό φορτίο μηδενίζεται η τιμή της ολίσθησης τείνει να μειωθεί λόγω της ελαστικής παραμόρφωσης του οπλισμού και του περιβάλλοντος σκυροδέματος. Παρόλα αυτά η τιμή της ολίσθησης δεν μηδενίζεται αλλά υπάρχει μια παραμένουσα ολίσθηση η οποία προέρχεται από την αντίδραση της τριβής στην ελαστική παραμόρφωση του οπλισμού. Όμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στην αντίθετη διεύθυνση φόρτισης για τον πρώτο κύκλο.

Στους επόμενους κύκλους φόρτισης, προκειμένου να δημιουργηθούν επιφάνειες επαφής των αδρανών της μιας παρείας με αυτά της απέναντι, θα πρέπει να επιτευχθεί ολίσθηση ίση με τη μέγιστη του προηγούμενου κύκλου. Τότε, ενεργοποιείται ο μηχανισμός δράσης βλήτρου του οπλισμού που διαπερνά τη ρωγμή και μαζί με την τριβή είναι οι δύο μηχανισμοί που είναι υπεύθυνοι για την ανάληψη διατμητικών τάσεων. Η διατμητική δυσκαμψία είναι πολύ μικρότερη από ότι ήταν στον πρώτο κύκλο φόρτισης. Όταν τα αδρανή έρθουν σε επαφή, με επιπλέον αύξηση της ολίσθησης αυτά παραμορφώνονται. Αυτή η αντίσταση που οφείλεται στην παραμόρφωση των αδρανών αυξάνει την δυσκαμψία μέχρι να επιτευχθεί η μέγιστη τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου του κύκλου.

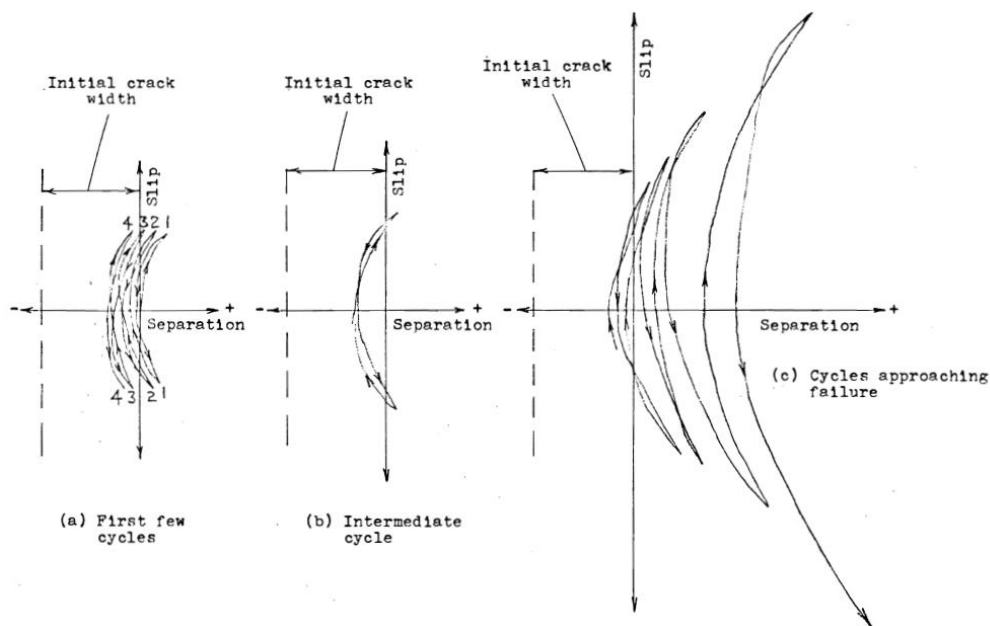
Στην περίπτωση των δοκιμίων που δεν επιτράπηκε να αναπτυχθεί συνάφεια στη διεπιφάνεια, η τιμή της ολίσθησης αυξάνεται πολύ περισσότερο από ότι στα δοκίμια που επιτράπηκε η συνάφεια. Ιδιαίτερα στη σειρά P παρατηρήθηκε αύξηση της ολίσθησης ακόμα και όταν το φορτίο είχε πάρει τη μέγιστη τιμή του στον

εκάστοτε κύκλο φόρτισης. Αυτό μπορεί να οφείλεται και στο γεγονός ότι εκτός της απουσίας συνάφειας τα δοκίμια της σειράς P είχαν ρηγματωθεί πριν την έναρξη της δοκιμής.



Σχήμα 8.6.2: Κύκλοι υστέρησης 11-15 για το δοκίμιο P2C [16]

Σε όλα τα δοκίμια που είχαν ρηγματωθεί πριν την έναρξη της δοκιμής, η τιμή της αποκόλλησης μειώθηκε κατά τους πρώτους 5 κύκλους. Για μηδενικό φορτίο η παραμένουσα αποκόλληση είχε τιμή μεταξύ 0.076 mm και 0.127 mm μικρότερη από την αρχική της τιμή πριν την έναρξη του πειράματος. Όταν συμβαίνει αυτό η καμπύλη φορτίου – ολίσθησης παίρνει σταθερή τιμή.



Σχήμα 8.6.3: Καμπύλες ολίσθησης – αποκόλλησης [16]

Στην περίπτωση των δοκιμών της σειράς N, στα οποία δεν υπήρχε συνάφεια και η αρχική αποκόλληση ήταν μηδενική, το εύρος της ρωγμής κατά μήκος της διεπιφάνειας δεν μειωνόταν κατά την αποφόρτιση για τους πρώτους κύκλους. Στους επόμενους κύκλους, όμως παρατηρήθηκε ίδια συμπεριφορά με τα ρηγματωμένα δοκίμια.

Πίνακας 8.6.2: Χαρακτηριστικά δοκιμών και αποτελέσματα δοκιμών

A/A	Σκυρόδεμα	Χάλυβας	Αριθμός ράβδων	$d_b$ (mm)	$\rho f_{sy}$ (MPa)	$\delta_t$ (mm)	w (mm)	$V_{u,exp}$ (Kn)
	$f_{cc}$ (Mpa)	$f_{sy}$ (Mpa)						
L2C	42.00	365.17	4	9.53	3.23	0.813	1.626	185.57
L3C	43.02	359.66	6	9.53	4.77	0.838	0.914	249.20
M2C	40.39	367.93	4	9.53	3.25	0.762	0.432	196.69
M3C	41.79	362.41	6	9.53	4.81	0.559	1.219	242.53
N2C	42.84	371.37	4	9.53	3.28	1.676	0.711	114.37
N3C	40.74	368.62	6	9.53	4.89	0.762	0.762	158.87
P2C	40.25	365.17	4	9.53	3.23	1.956	0.838	99.68
P3C	41.51	369.30	6	9.53	4.90	1.549	0.762	141.96
Q2C	19.53	352.08	4	9.53	3.11	0.965	1.143	172.66
Q3C	21.07	369.30	6	9.53	4.90	0.813	1.016	193.13

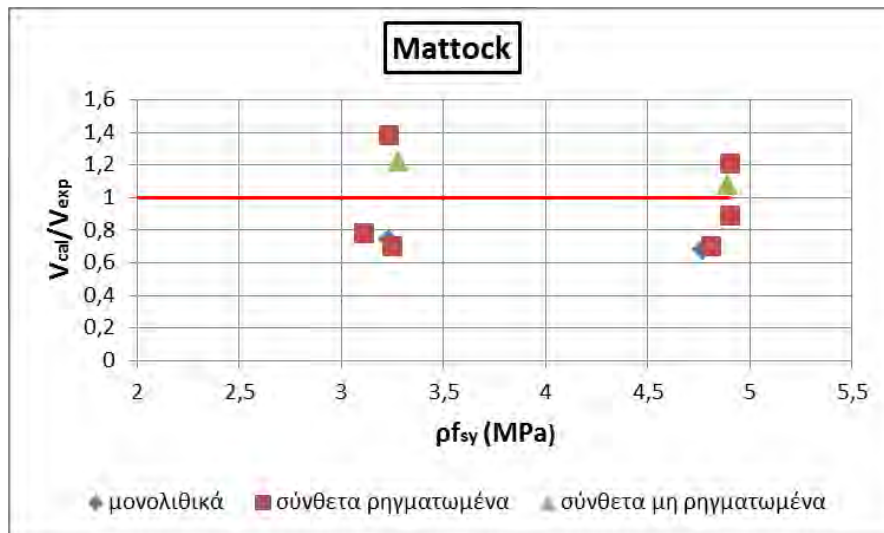
## ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην περίπτωση των μονολιθικών δοκιμίων της σειράς L, τα αποτελέσματα που δίνουν τα μοντέλα του Mattock και των Mansur et al. είναι πολύ κοντά σε αυτά που προέκυψαν από τα πειράματα. Τα μοντέλα αυτά λαμβάνουν υπόψη τους μηχανισμούς αλληλοεμπλοκής αδρανών και τριβής, οι οποίοι συμμετέχουν σε μεγάλο βαθμό στην ανάληψη των διατμητικών τάσεων στο επίπεδο ολίσθησης. Επειδή τα δοκίμια ήταν μονολιθικά, αποδείχθηκε ότι η επιρροή των ανακυκλίσεων στην τραχύτητα της διεπιφάνειας και στην μείωση των επιφανειών επαφής των αδρανών ήταν πολύ μικρή. Το μοντέλο του Randl δίνει πολύ συντηρητικά αποτελέσματα καθώς οι τιμές που λαμβάνονται για τη συνάφεια και το συντελεστή τριβής φαίνεται να είναι αρκετά συντηρητικές για την περίπτωση μονολιθικού σκυροδέματος.

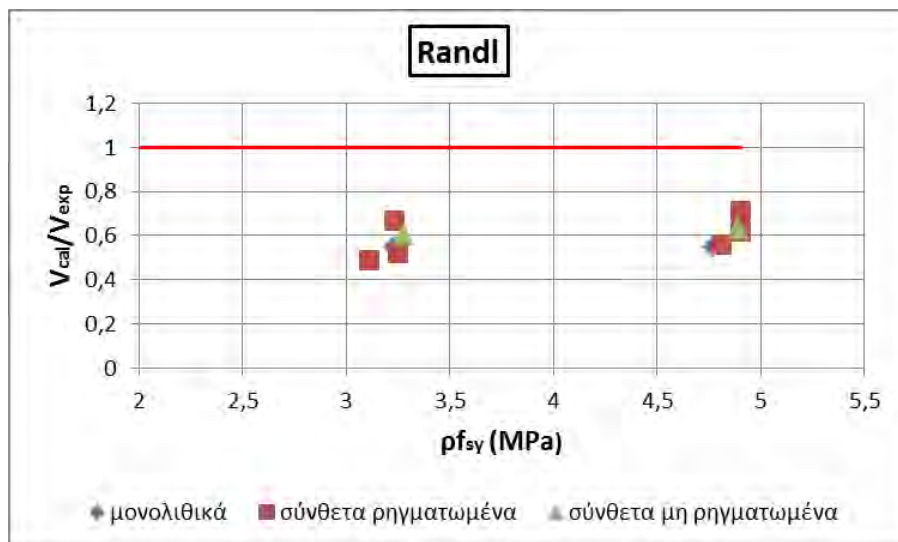
Στις σειρές δοκιμίων που αποτράπηκε η συνάφεια στη διεπιφάνεια, η πτώση της αντίστασης με την πρόοδο των ανακυκλίσεων είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που παρατηρήθηκε στα μονολιθικά δοκίμια και στα δοκίμια που υπήρχε συνάφεια. Τα μοντέλα των Mattock και Mansur et al., που δεν λαμβάνουν υπόψη τις συνθήκες που επικρατούν στη διεπιφάνεια, δίνουν μη ασφαλείς προβλέψεις για το μέγιστο φορτίο αντοχής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα δοκίμια της σειράς P, στα οποία δεν υπάρχει συνάφεια και είναι ρηγματωμένα, με το λόγο  $V_{cal}/V_{exp}$  να λαμβάνει τιμές 1.50 και 1.87 για το μοντέλο των Mansur et al. και 1.38 και 1.21 για το μοντέλο του Mattock. Το μοντέλο του Randl δίνει ασφαλείς προβλέψεις για την μέγιστη διατμητική τάση, καθώς λαμβάνει υπόψη την απουσία συνάφειας στη διεπιφάνεια λαμβάνοντας  $c=0$ . Οι τιμές που προκύπτουν είναι και πάλι συντηρητικές.

**Πίνακας 8.6.3:** Αποτελέσματα εφαρμογής μοντέλων

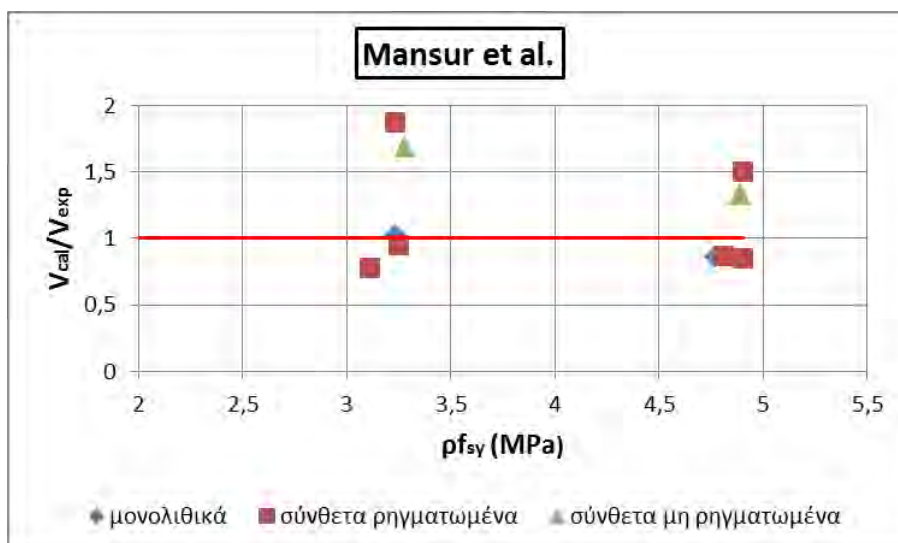
A/A	$V_{u,cal,1}$ (Kn)	$V_{u,cal,3}$ (Kn)	$V_{u,cal,4}$ (Kn)	$\frac{V_{u,cal,1}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,2}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,3}}{V_{u,exp}}$
L2C	137.87	102.96	189.77	0.74	0.55	1.02
L3C	169.69	136.02	213.77	0.68	0.55	0.86
M2C	138.38	102.42	186.70	0.70	0.52	0.95
M3C	170.44	135.74	211.72	0.70	0.56	0.87
N2C	139.01	68.26	192.31	1.22	0.60	1.68
N3C	172.14	100.82	210.66	1.08	0.63	1.33
P2C	137.87	66.55	186.05	1.38	0.67	1.87
P3C	172.33	101.32	212.42	1.21	0.71	1.50
Q2C	135.48	84.99	134.07	0.78	0.49	0.78
Q3C	172.33	118.87	163.69	0.89	0.62	0.85



Σχήμα 8.6.4: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  για το μοντέλο του Mattock



Σχήμα 8.6.5: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  για το μοντέλο του Randl



Σχήμα 8.6.6: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  για το μοντέλο των Mansur et al.



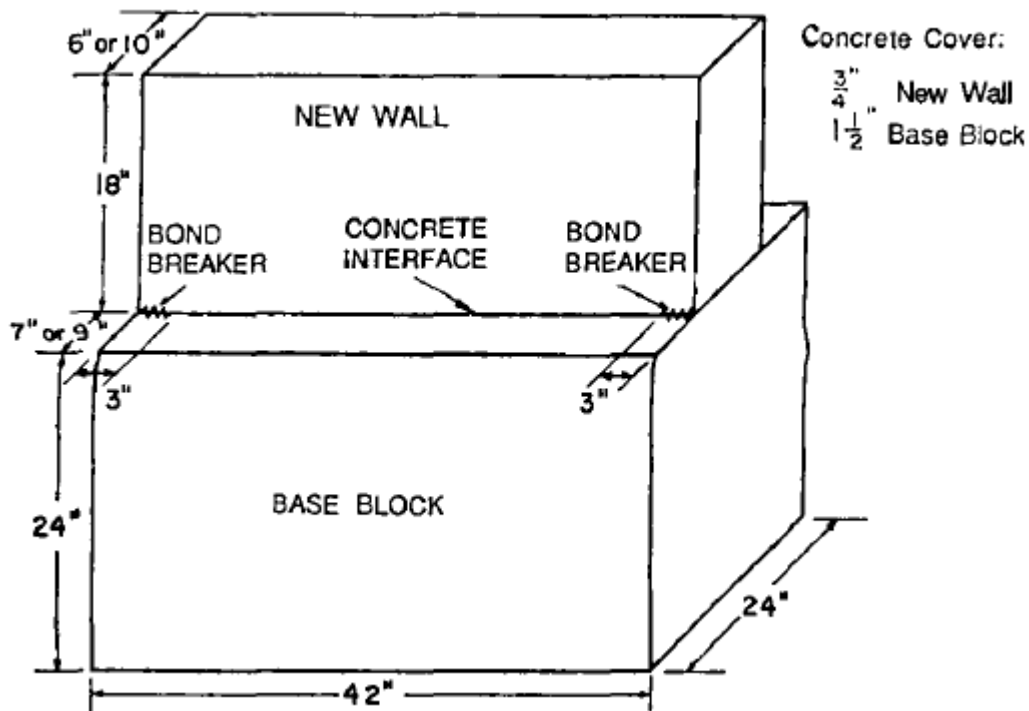
## 8.7.«Shear Transfer across New and Existing Concrete Interfaces», Robert A. Bass, Ramon L. Carrasquillo, and James O. Jirsa

Τα πειράματα έχουν περιγραφεί εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφ.6). Υπενθυμίζονται μόνο τα εξής:

Το πειραματικό πρόγραμμα [1] περιλαμβάνει 33 δοκίμια τα οποία υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, με σκοπό τον προσδιορισμό της απόκρισης της διεπιφάνειας ανάλογα με κάποιες μεταβλητές. Οι μεταβλητές αυτές είναι:

- Το ποσοστό οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια
- Το βάθος έμπηξης των βλήτρων
- Η τιμή της θλιπτικής αντοχής του παλιού και νέου σκυροδέματος
- Η προετοιμασία της διεπιφάνειας πριν τη σκυροδέτηση του δεύτερου μισού των δοκιμίων
- Το εμβαδόν της επιφάνειας ολίσθησης

Τα δοκίμια των πειραμάτων φαίνονται στο σχήμα 8.7.1:



Σχήμα 8.7.1: Τυπική μορφή δοκιμίων [1]

Σε όλα τα δοκίμια το πλάτος του προστιθέμενου στοιχείου είναι 25.4 cm με εξαίρεση το δοκίμιο 1B που έχει πλάτος 15.24 cm.

**Πίνακας 8.7.1:** Γενικά χαρακτηριστικά δοκιμών και αποτελέσματα δοκιμών

A/A	Σκυρόδεμα f <sub>cc</sub> (MPa)	Χάλυβας f <sub>sy</sub> (MPa)	Αριθμός ράβδων	d <sub>b</sub> (mm)	ρ <sub>f</sub> f <sub>sy</sub> (MPa)	Επεξεργασία διεπιφάνειας*	Βάθος έμπηξης	V <sub>u,exp</sub> (kN)
1A	21.37	265	3	20	1.075	S	8db	645.25
2A	21.37	265	3	20	1.075	S	8db	680.85
3A	21.37	265	3	20	1.075	S	8db	676.40
4A	21.37	265	3	20	1.075	S	8db	734.25
5A	21.37	265	3	20	1.075	S	8db	667.50
6A	21.37	265	3	20	1.075	S	8db	734.25
7A	21.37	265	2	20	0.717	S	8db	587.40
8A	21.37	265	6	20	2.150	S	8db	934.50
9A	21.37	265	3	20	1.075	S	16db	845.50
10A	21.37	265	3	20	1.075	S	4db	578.50
11A	18.62	265	3	20	1.075	SV	8db	462.80
12A	18.96	265	3	20	1.075	C	8db	525.10
13A	18.96	265	3	20	1.075	K	8db	569.60
14A	18.96	265	3	20	1.075	U	8db	400.50
15A	18.96	265	3	20	1.075	DO	8db	391.60
16A	18.96	265	3	20	1.075	DOE	8db	467.25
17A	18.62	265	3	20	1.075	S	8db	556.25
18A	18.96	265	3	20	1.075	C	8db	525.10
19A	18.96	265	3	20	1.075	K	8db	565.15

20A	19.78	265	3	20	1.075	S	8db	596.30
21A	25.51	265	3	20	1.075	C	8db	511.75
22A	27.23	265	3	20	1.075	K	8db	658.60
23A	27.23	265	3	20	1.075	S	4db	600.75
24A	27.23	265	3	20	1.075	S	8db	712.00
1B	22.13	265	3	20	1.791	S	8db	453.90
2B	22.13	265	3	20	1.075	S	8db	667.50
3B	22.13	265	3	20	1.075	SV	8db	720.90
4B	22.13	265	2	20	0.717	S	16db	609.65
5B	22.13	265	3	20	1.075	S	8db	738.70
6B	22.13	265	3	20	1.075	S	16db	765.40
17B	19.78	265	3	20	1.075	S	16db	671.95
20B	18.62	265	3	20	1.075	COD	8db	333.75
21B	24.60	265	3	20	1.075	S	16db	587.40

\* S, SV,DO

C

K

DOE

COD

αμμοβολή

εκτράχυνση με απομάκρυνση εξωτερικής στρώσης σκυροδέματος βάθους 6.35 mm

χρήση 'διατμητικών κλειδιών' (shear keys)

αμμοβολή με ταυτόχρονη χρήση εποξεικής ρητίνης

εκτράχυνση με απομάκρυνση εξωτερικής στρώσης σκυροδέματος βάθους 6.35 mm με ταυτόχρονη χρήση εποξεικής ρητίνης

Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των θεωρητικών μοντέλων:

**Πίνακας 8.7.2:** Αποτελέσματα εφαρμογής μοντέλων

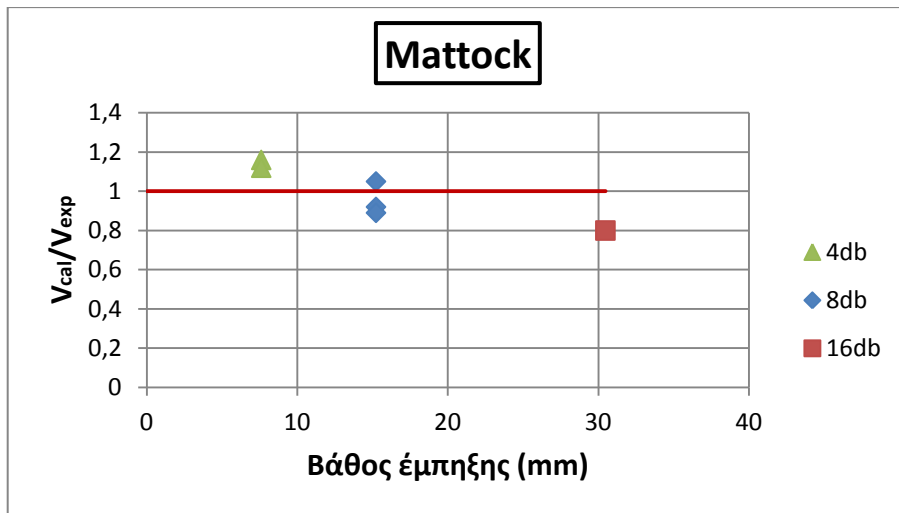
A/A	$V_{u,cal,1}$ (kN)	$V_{u,cal,2}$ (kN)	$V_{u,cal,3}$ (kN)	$\frac{V_{u,cal,1}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,2}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,3}}{V_{u,exp}}$
1A	672.59	132.28	499.26	1.04	0.21	0.77
2A	672.59	132.28	499.26	0.99	0.19	0.73
3A	672.59	132.28	499.26	0.99	0.20	0.74
4A	672.59	132.28	499.26	0.92	0.18	0.68
5A	672.59	132.28	499.26	1.01	0.20	0.75
6A	672.59	132.28	499.26	0.92	0.18	0.68
7A	587.40	88.19	332.84	1.05	0.15	0.57
8A	832.35	264.56	998.52	0.89	0.28	1.07
9A	672.59	132.28	499.26	0.80	0.16	0.59
10A	672.59	132.28	499.26	1.16	0.23	0.86
11A	672.59	128.13	499.26	1.45	0.28	1.08
12A	672.59	326.14	499.26	1.28	0.62	0.95
13A	672.59	326.14	499.26	1.18	0.57	0.88
14A	672.59	80.13	499.26	1.68	0.20	1.25
15A	672.59	128.66	499.26	1.72	0.33	1.27
16A	672.59	326.14	499.26	1.44	0.70	1.07
17A	672.59	128.13	499.26	1.21	0.23	0.90
18A	672.59	326.14	499.26	1.28	0.62	0.95
19A	672.59	326.14	499.26	1.19	0.58	0.88
20A	672.59	129.91	499.26	1.13	0.22	0.84

21A	672.59	354.43	499.26	1.31	0.69	0.98
22A	672.59	361.09	499.26	1.02	0.55	0.76
23A	672.59	140.31	499.26	1.12	0.23	0.83
24A	672.59	140.31	499.26	0.94	0.20	0.70
1B	467.46	133.38	529.17	1.03	0.29	1.17
2B	672.59	133.38	499.26	1.01	0.20	0.75
3B	672.59	133.38	499.26	0.93	0.19	0.69
4B	619.33	88.92	332.84	1.02	0.15	0.55
5B	672.59	133.38	499.26	0.91	0.18	0.68
6B	672.59	133.38	499.26	0.88	0.17	0.65
17B	672.59	129.91	499.26	1.00	0.19	0.74
20B	672.59	324.51	499.26	2.02	0.97	1.50
21B	672.59	136.83	499.26	1.15	0.23	0.85

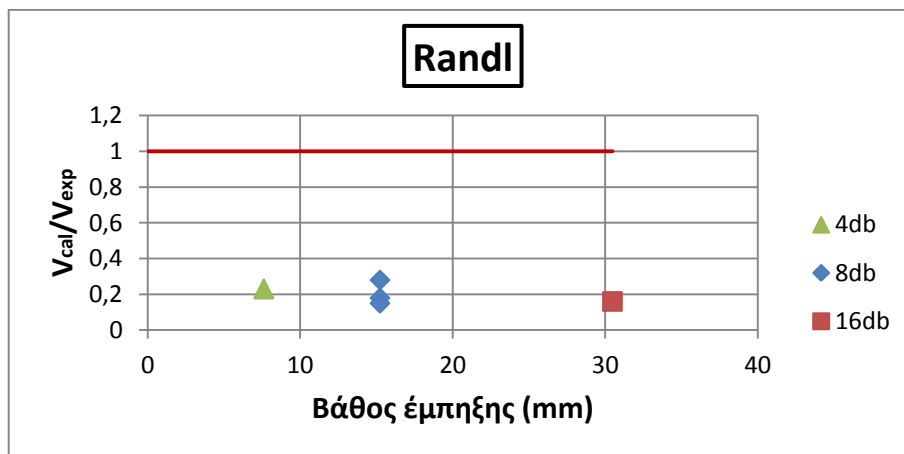
## ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος έμψηξης των βλήτρων τόσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο αντοχής που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια. Βλήτρα με βάθος έμψηξης ίσο με  $4d_b$  (76.2 mm) παρουσίασαν μειωμένη αντίσταση κατά 30% σε σχέση με βλήτρα με βάθος έμψηξης  $8d_b$  (152.4 mm) και  $16d_b$  (304.8 mm). Για τιμές της ολίσθησης μικρότερες από 5 mm, τα καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν για επεξεργασία της διεπιφάνειας με έντονη αμμοβολή. Η παραπάνω τιμή της ολίσθησης είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την τιμή ενεργοποίησης όλων των μηχανισμών ανάληψης τέμνουσας στη διεπιφάνεια. Επομένως, όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας, το παραπάνω όριο θα ήταν καλύτερο να τεθεί περίπου στο 1 mm όταν από το σημείο αυτό και μετά η δράση της τριβής και του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών αρχίζει και φθίνει. Για μεγάλες τιμές της ολίσθησης και λόγω των ανακυκλίσεων η διεπιφάνεια αρχίζει και λειαίνεται με αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται η συμβολή των παραπάνω μηχανισμών, σε αντίθεση με το μηχανισμό δράσης βλήτρου του οπλισμού που είναι ουσιαστικά ο μόνος μηχανισμός που αναλαμβάνει διατμητικά φορτία στο στάδιο αυτό.

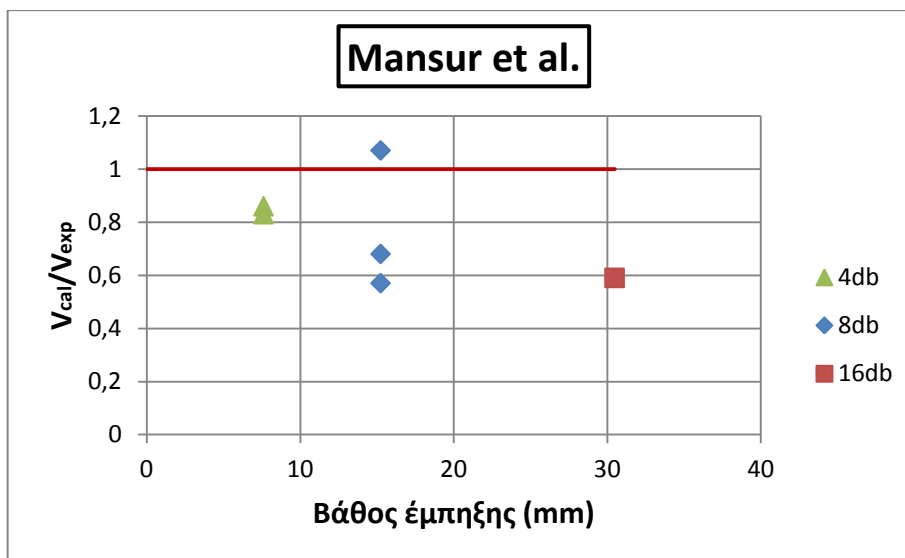
Κανένα από τα μοντέλα που εφαρμόστηκαν δεν λαμβάνει υπόψη στον υπολογισμό του φορτίου αντίστασης της διεπιφάνειας το βάθος έμψηξης των βλήτρων. Παρατηρούμε ότι τα μοντέλα των Mattock και Mansur et al. δίνουν καλά αποτελέσματα που πλησιάζουν πολύ αυτά που προέκυψαν από τα πειράματα. Μεταξύ των δύο, όμως, πιο συντηρητικά αποτελέσματα προκύπτουν από το μοντέλο των Mansur et al. καθώς λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της συνάφειας ως συνάρτηση της αντοχής του σκυροδέματος. Το μοντέλο του Mattock θεωρεί σταθερή συνεισφορά του μηχανισμού συνάφειας (ίση με 2.76 MPa). Οι προβλέψεις των μοντέλων ξεπέρασαν τις μέγιστες τιμές που καταγράφηκαν στα πειράματα για τα δοκίμια εκείνα που το βάθος έμψηξης ήταν ίσο με  $4d_b$ . Όπως έχει αποδειχθεί και πειραματικά προκειμένου να διαρρέυσει διατμητικά ο οπλισμός δεν επαρκεί βάθος έμψηξης  $4d_b$ . Επομένως, η εισαγωγή της τάσης διαρροής χωρίς κάποια μείωση στην εφαρμογή των μοντέλων είναι εσφαλμένη γιατί ακριβώς ο οπλισμός δεν διέρρησε. Το μοντέλο του Randl έδωσε τις μικρότερες τιμές για το μέγιστο φορτίο. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι οι συντελεστές που λαμβάνει για τη συνάφεια και την τριβή να είναι πολύ συντηρητικοί, ιδιαίτερα στην περίπτωση που η διεπιφάνεια, εκτός της εκτράχυνσης που έγινε, διαστρώθηκε και εποξεική ρητίνη.



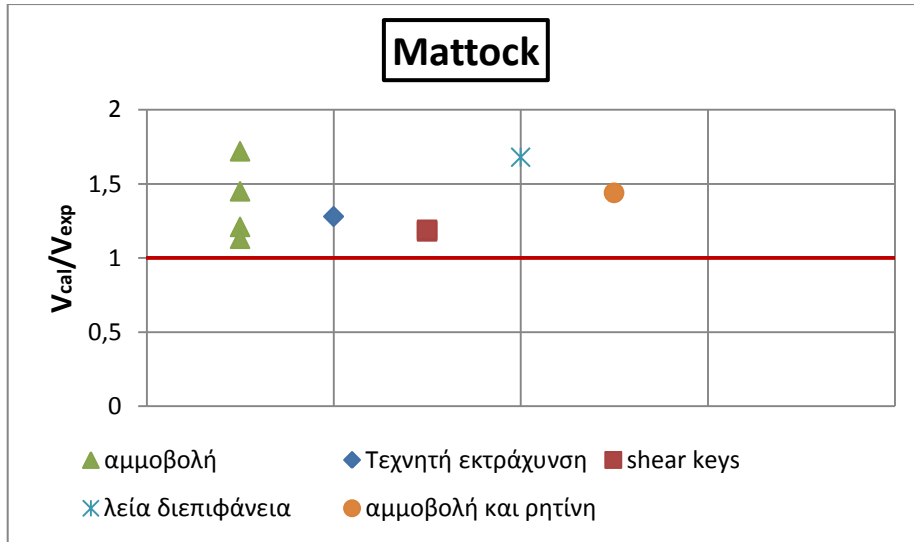
Σχήμα 8.7.2: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει του βάθους έμπτυξης των βλήτρων για το μοντέλο του Mattock



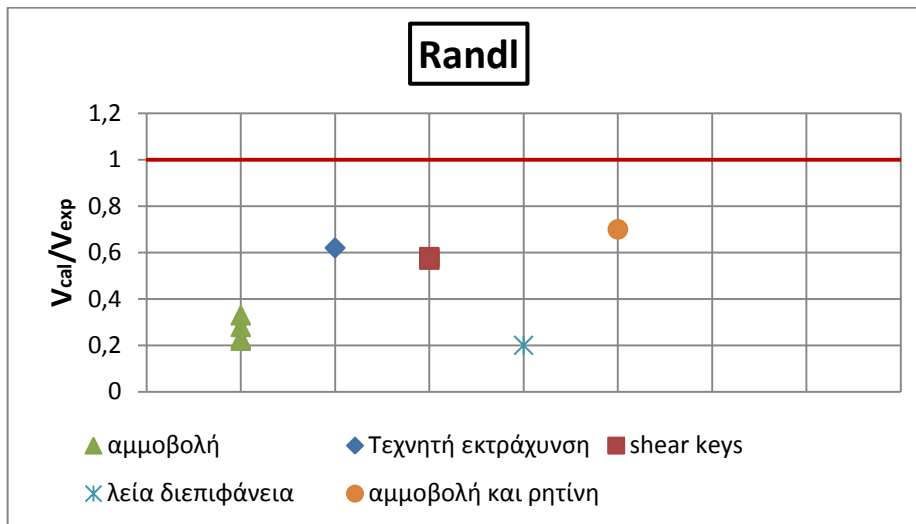
Σχήμα 8.7.3: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει του βάθους έμπτυξης των βλήτρων για το μοντέλο του Randl



Σχήμα 8.7.4: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  συναρτήσει του βάθους έμπτυξης των βλήτρων για το μοντέλο των Mansur et al.

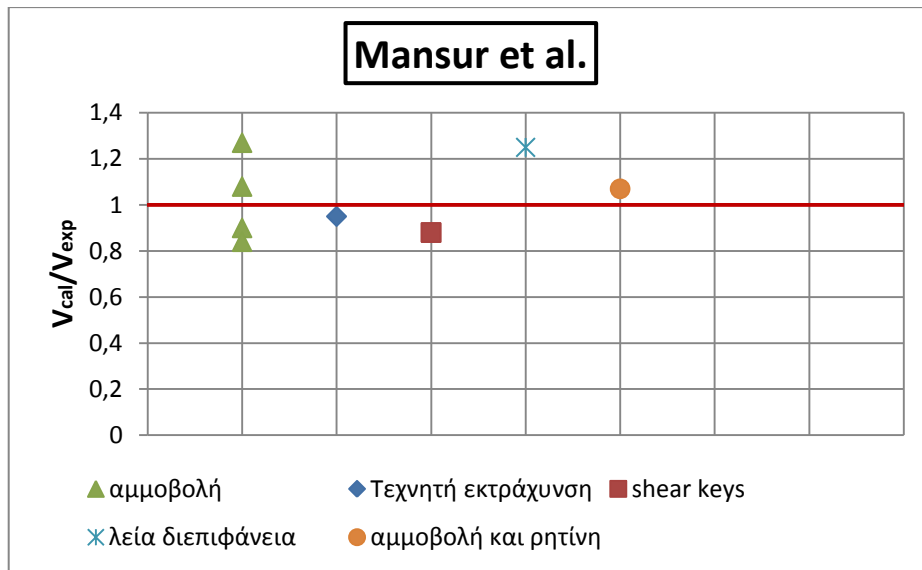


Σχήμα 8.7.5: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  ανάλογα με την επεξεργασία της διεπιφάνειας για το μοντέλο του Mattock



Σχήμα 8.7.6: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  ανάλογα με την επεξεργασία της διεπιφάνειας για το μοντέλο του Randl





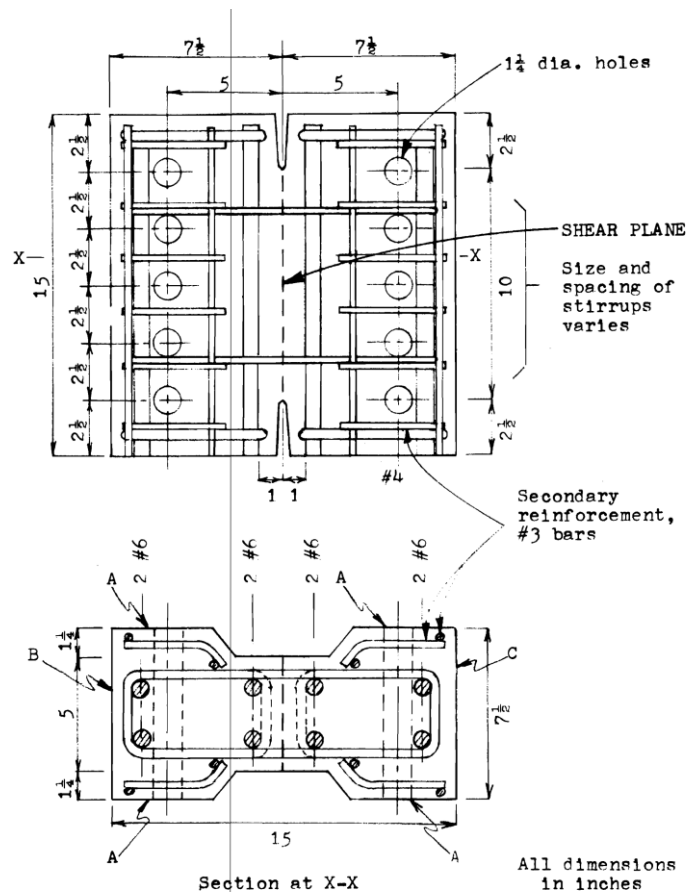
**Σχήμα 8.7.7:** Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  ανάλογα με την επεξεργασία της διεπιφάνειας για το μοντέλο των Mansur et al.

## 8.8.«Shear Transfer – Reversing along cracks», A. H. Mattock

Οι μεταβλητές που εξετάστηκαν στα πειράματα [18] είναι οι εξής:

- Ποσοστό οπλισμού στη διεπιφάνεια
- Ύπαρξη ρωγμής στο διατμητικό επίπεδο πριν την επιβολή εξωτερικής φόρτισης
- Είδος φόρτισης (μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση)

Στην ενότητα αυτή πρόκειται να εφαρμοστούν τα μοντέλα μόνο για τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η τυπική μορφή δοκιμίων φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Το εμβαδόν της διεπιφάνειας είναι  $322.58 \text{ cm}^2$ . Η φόρτιση επιβάλλεται χωρίς να αναπτύσσεται ροπή στη διεπιφάνεια. Ο οπλισμός που διαπερνά τη διεπιφάνεια είναι υπό μορφή κλειστών συνδετήρων για να αντιμετωπιστεί έτσι το πρόβλημα της αγκύρωσης του οπλισμού εκατέρωθεν της διεπιφάνειας. Τη διεπιφάνεια διαπερνούν 2 ή 3 κλειστοί συνδετήρες διαμέτρου 6.35 mm ή 9.53 mm. Η τάση διαρροής του οπλισμού είναι  $f_{sy}=344.5 \text{ MPa}$ . Η αντοχή του σκυροδέματος είναι ίδια για όλα τα δοκίμια (28 MPa).



Σχήμα 8.8.1: Τυπική μορφή δοκιμίων [18]

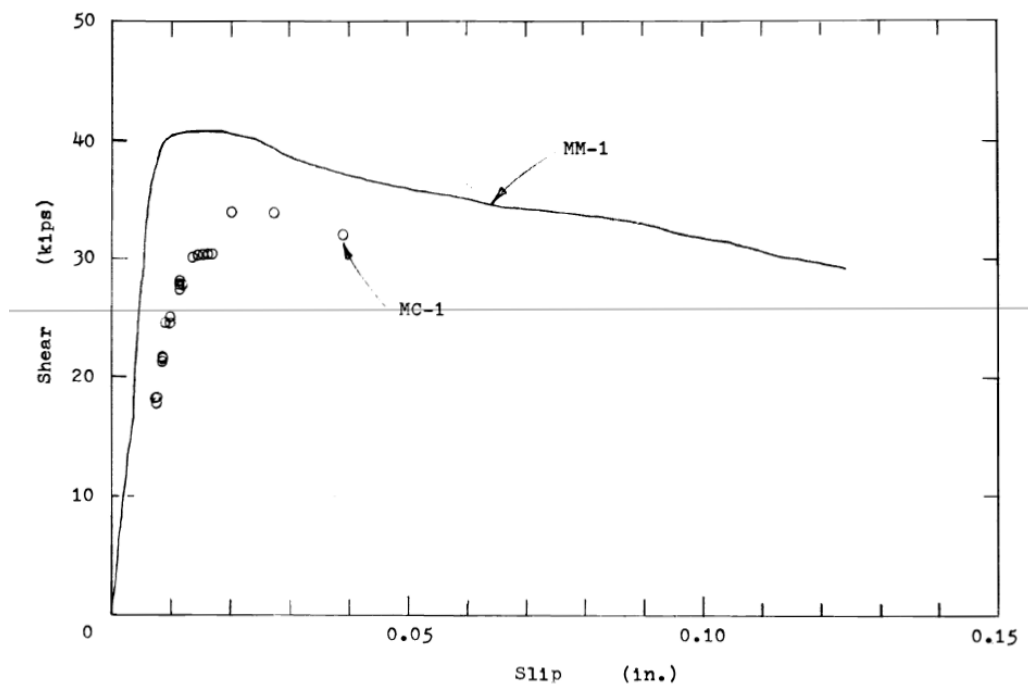
Το πρώτο γράμμα στην ονομασία του δοκιμίου αναφέρεται στο ποσοστό σπλισμού (L -  $\rho f_{sy}=2.52$  MPa, M -  $\rho f_{sy}=3.08$  MPa, H -  $\rho f_{sy}=4.62$  MPa), το δεύτερο γράμμα στο είδος της φόρτισης (M – μονοτονική, C – ανακυκλιζόμενη) και ο αριθμός αναφέρεται στην αρχική τιμή του εύρους της ρωγμής κατά μήκος της διεπιφάνειας (1 – 0.254 mm, 2 – 0.381 mm, 3 – 0.635 mm).

Η αρχική ρωγμή έγινε επιβάλλοντας ένα κατανεμημένο φορτίο κατά μήκος της διεπιφάνειας των δοκιμίων. Μετά την απομάκρυνση του φορτίου το παραμένον άνοιγμα της ρωγμής είναι περίπου 0.254 mm. Για τα δοκίμια που προβλεπόταν αρχικό εύρος ρωγμής, τοποθετήθηκαν λεπτές μεταλλικές πλάκες προκειμένου να μειωθεί η αντίσταση λόγω της τριβής. Μετά την απομάκρυνση των πλακών αυτών η παραμένουσα τιμή της αποκόλλησης είναι 0.381 mm και 0.635 mm αντίστοιχα.

Στην περίπτωση της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, αρχικά επιβαλλόταν φορτίο ίσο με το 50% του μέγιστου φορτίου που είχε υπολογιστεί θεωρητικά. Στη συνέχεια, γινόταν αποφόρτιση των δοκιμίων και φόρτιση προς την αντίθετη κατεύθυνση με ίδια τιμή φορτίου. Ακολουθούσε και πάλι αποφόρτιση και έτσι ολοκληρώνεται ο πρώτος κύκλος φόρτισης. Η παραπάνω διαδικασία ακολουθείται μέχρι να ολοκληρωθούν 10 κύκλοι. Μετά την ολοκλήρωση των 10 κύκλων, το φορτίο αυξάνεται στο 58% του μέγιστου προβλεπόμενου μέχρι να ολοκληρωθούν 5 κύκλοι. Μετά την επιτυχία 5 κύκλων το φορτίο αυξάνεται κατά 8% του μέγιστου προβλεπόμενου φορτίου μέχρι την αστοχία.

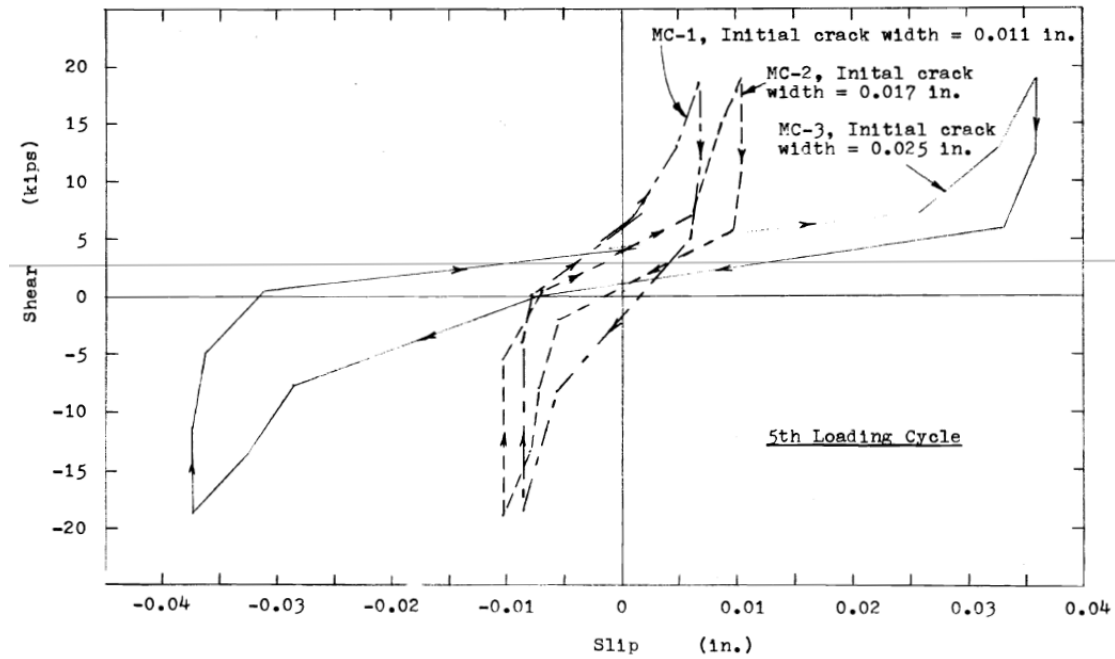
## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η μειωμένη φέρουσα ικανότητα των δοκιμίων που υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση οφείλεται στην εξομάλυνση των παρειών της διεπιφάνειας. Πρέπει να τονιστεί ότι το δοκίμιο MC-1 ( $f_c=27.16$  MPa,  $\rho f_{sy}=3.08$  MPa, 4Φ9.53,  $w_o=0.254$  mm) δεν εμφάνισε πτώση της αντοχής του ακόμα και μετά το πέρας 28 κύκλων φόρτισης. Στο στάδιο αυτό, το συγκεκριμένο δοκίμιο δεν είχε φτάσει ακόμα στο σημείο εκείνο στο οποίο για μηδενικό επιβαλλόμενο φορτίο η τιμή της αποκόλλησης και της ολίσθησης αυξάνονται. Κατά συνέπεια, είναι φανερό ότι η αντοχή της διεπιφάνειας εξαρτάται από αν έχουν συμβεί σοβαρές βλάβες σε αυτή.



**Σχήμα 8.8.2:** Σχέση φορτίου – ολίσθησης για μονοτονική φόρτιση (MM-1) και ανακυκλιζόμενη φόρτιση (MC-1) [18]

Η ύπαρξη ρωγμής κατά μήκος της διεπιφάνειας φαίνεται πως μειώνει την δυσκαμψία και έτσι η τιμή της ολίσθησης αυξάνεται σε όλα τα στάδια φόρτισης. Αυτό φαίνεται να οφείλεται στην προοδευτική μείωση των επιφανειών επαφής των αδρανών των παρειών της διεπιφάνειας, καθώς αυξάνεται η τιμή του αρχικού εύρους ρωγμής. Για δεδομένη τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου, το πεδίο των τάσεων είναι αρκετά πιο έντονο με αποτέλεσμα να παραμορφώνονται πολύ περισσότερο τα αδρανή που βρίσκονται σε επαφή. Συνέπεια αυτού είναι μεγάλες τιμές της ολίσθησης. Ταυτόχρονα όμως με την αύξηση της τιμής της σχετικής ολίσθησης αυξάνει και η τιμή της αποκόλλησης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η εφελκυστική καταπόνηση των ράβδων. Όμως, αύξηση του εφελκυσμού του οπλισμού σημαίνει μείωση της απόκρισης του μηχανισμού δράσης βλήτρου. Για παράδειγμα το δοκίμιο MC-1 ( $f_c=27.16$  MPa,  $\rho_{f_{sy}}=3.08$  MPa, 4Φ9.53,  $w_o=0.254$  mm) εμφανίζει μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα ( $V_{u,exp}=150.86$  kN) σε σχέση με τα MC-2 ( $f_c=27.51$  MPa,  $\rho_{f_{sy}}=3.20$  MPa, 4Φ9.53,  $w_o=0.381$  mm,  $V_{u,exp}=137.06$  kN) και MC-3 ( $f_c=27.72$  MPa,  $\rho_{f_{sy}}=3.05$  MPa, 4Φ9.53,  $w_o=0.635$  mm,  $V_{u,exp}=96.12$  kN).



**Σχήμα 8.8.3:** Διακύμανση του κύκλου υστέρησης για τη σειρά δοκιμών MC σε σχέση με την αρχική αποκόλληση [18]

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά των δοκιμών και τα αποτελέσματα των δοκιμών.

**Πίνακας 8.8.1:** Γενικά χαρακτηριστικά δοκιμών και αποτελέσματα δοκιμών

A/A	Σκυρόδεμα f <sub>cc</sub> (MPa)	Χάλυβας f <sub>sy</sub> (MPa)	Αριθμός ράβδων	d <sub>b</sub> (mm)	ρf <sub>sy</sub> (MPa)	Αριθμός κύκλων (n)	V <sub>u,exp</sub> (kN)
LC-1	27.02	420.29	6	6.35	2.47	36	160.65
LC-2	31.50	427.18	6	6.35	2.52	46	175.78
LC-3	29.61	427.18	6	6.35	2.52	26	129.05
MC-1	27.16	347.95	4	9.53	3.08	31	150.86
MC-2	27.51	362.41	4	9.53	3.20	31	137.06
MC-3	27.72	344.50	4	9.53	3.05	11	96.12
HC-1	27.62	339.68	6	9.53	4.50	46	231.85
HC-2	27.79	347.26	6	9.53	4.60	41	215.83
HC-3	30.10	344.50	6	9.53	4.57	31	189.13

**Πίνακας 8.8.2:** Αποτελέσματα εφαρμογής προσομοιωμάτων

A/A	$V_{u,cal,1}$ (kN)	$V_{u,cal,2}$ (kN)	$V_{u,cal,3}$ (kN)	$\frac{V_{u,cal,1}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,2}}{V_{u,exp}}$	$\frac{V_{u,cal,3}}{V_{u,exp}}$
LC-1	122.31	71.09	144.87	0.76	0.44	0.90
LC-2	123.15	74.42	156.31	0.70	0.42	0.89
LC-3	123.15	73.28	151.80	0.95	0.57	1.18
MC-1	134.73	82.74	153.76	0.89	0.55	1.02
MC-2	137.37	84.74	156.44	1.00	0.62	1.14
MC-3	134.10	82.74	154.72	1.40	0.86	1.61
HC-1	164.22	107.53	175.16	0.71	0.46	0.76
HC-2	166.29	109.06	177.02	0.77	0.51	0.82
HC-3	165.54	110.63	182.12	0.88	0.58	0.96

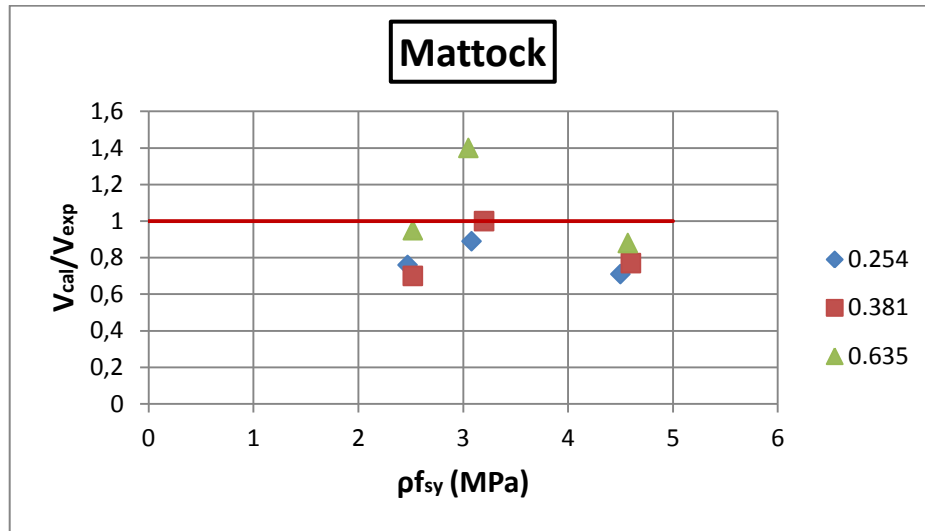
#### ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Ως προς τη συμπεριφορά των δοκιμίων με την πρόοδο των ανακυκλίσεων, αναλυτική περιγραφή έχει γίνει στην πρώτη δημοσίευση του παρόντος κεφαλαίου.

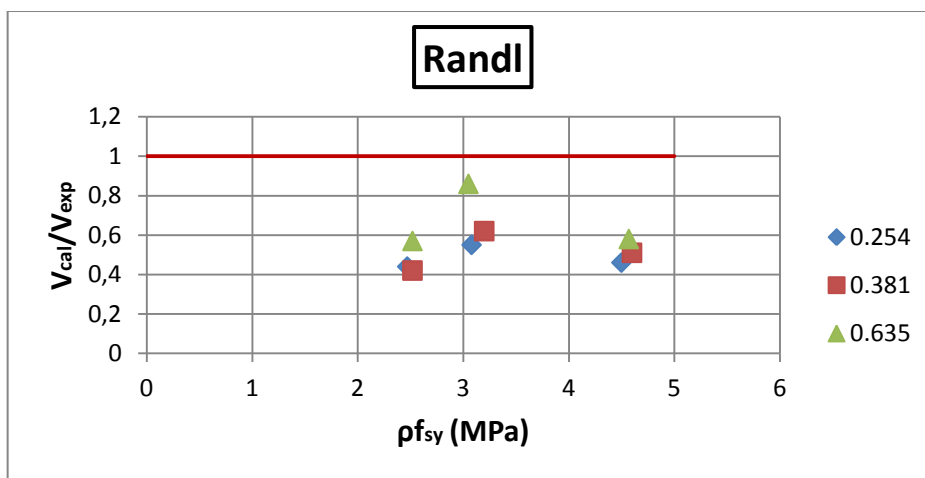
Το μοντέλο του Mattock δίνει τις καλύτερες προβλέψεις που, με εξαίρεση το δοκίμιο MC-3, η τιμή της προβλεπόμενης διατμητικής δύναμης αντίστασης στη διεπιφάνεια δεν ξεπερνά την τιμή που προέκυψε από τα πειράματα. Λιγότερο συντηρητικές τιμές δίνει το μοντέλο των Mansur et al. συγκριτικά με το προαναφερθέν μοντέλο. Τις πλέον συντηρητικές τιμές δίνει το μοντέλο του Randl.

Όπως φαίνεται από τη στήλη των υπολογισμένων δυνάμεων αντίστασης, οι τιμές που προκύπτουν από όλα τα μοντέλα πλησιάζουν όλο και περισσότερο την πραγματική τιμή του φορτίου αντοχής καθώς αυξάνεται η τιμή του αρχικού εύρους ρωγμής. Στην πραγματικότητα, όμως, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κανένα από τα εφαρμοσμένα μοντέλα δεν λαμβάνει υπόψη την επιρροή του αρχικού εύρους της ρωγμής. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του αρχικού εύρους, τόσο μικρότερο είναι το φορτίο αντοχής τελικά. Επειδή η τιμή του αρχικού εύρους δεν χρησιμοποιείται σε κανένα από τα μοντέλα είναι λογικό ο λόγος  $\frac{V_{u,cal}}{V_{u,exp}}$  να πλησιάζει τη μονάδα από τη

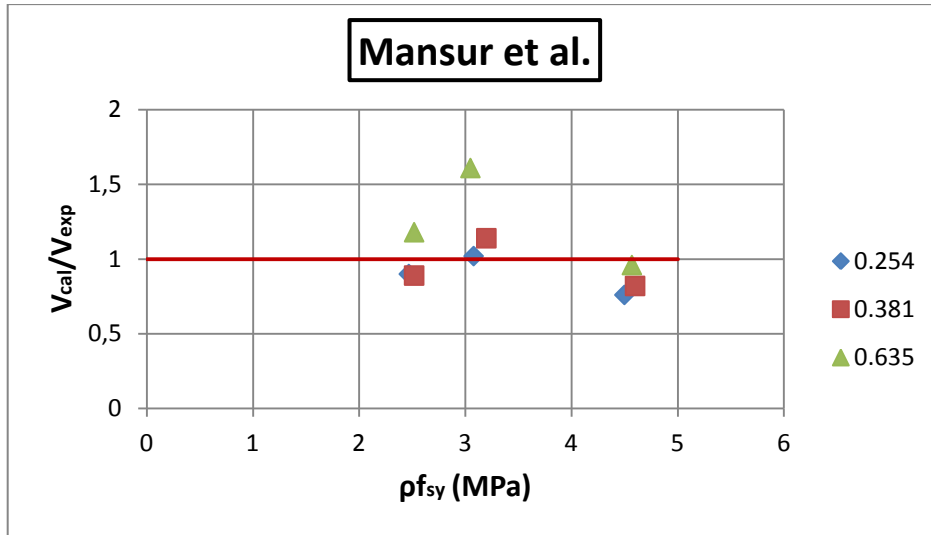
στιγμή που η τιμή  $V_{u,cal}$  παραμένει σχεδόν σταθερή και η τιμή  $V_{u,exp}$  μειώνεται όσο αυξάνεται η τιμή του αρχικού εύρους ρωγμής.



Σχήμα 8.8.4: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  σε συνάρτηση της τάσης  $\rho_{fsy}$  και του αρχικού εύρους ρωγμής για το μοντέλο του Mattock



Σχήμα 8.8.5: Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  σε συνάρτηση της τάσης  $\rho_{fsy}$  και του αρχικού εύρους ρωγμής για το μοντέλο του Randl



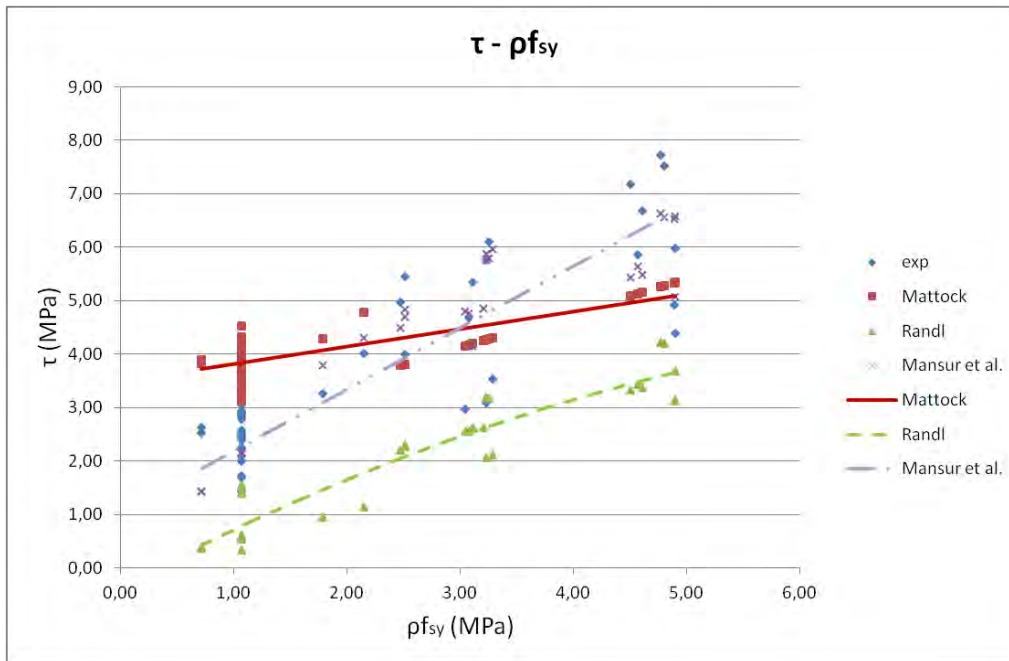
**Σχήμα 8.8.6:** Λόγος  $V_{cal}/V_{exp}$  σε συνάρτηση της τάσης  $\rho f_{sy}$  και του αρχικού εύρους ρωγμής για το μοντέλο των Mansur et al.



## 8.9.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την εφαρμογή των μοντέλων των Mattock, Randl και Mansur et al., για την περίπτωση ανακυκλιζόμενης φόρτισης, προκύπτουν, εν γένει, τα ίδια συμπεράσματα με αυτά που προέκυψαν για μονοτονική φόρτιση.

Όσο αυξάνει το ποσοστό οπλισμού τόσο αυξάνει και η διατμητική τάση αντίστασης που αναπτύσσεται από τους μηχανισμούς που ενεργοποιούνται στη διεπιφάνεια.



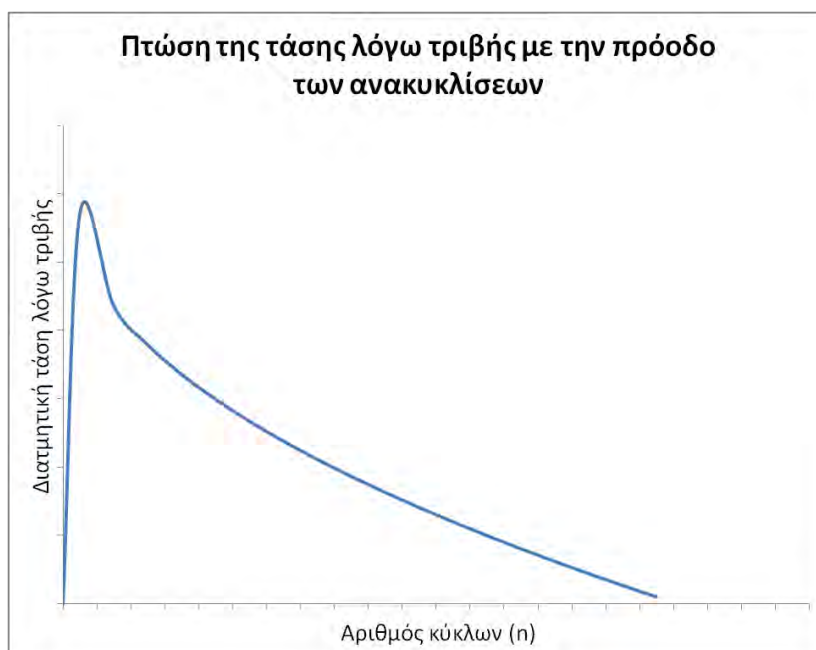
Σχήμα 8.9.1: Διατμητική τάση ως συνάρτηση της ορθής τάσης του οπλισμού  $\rho f_{sy}$

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανακυκλιζόμενης φόρτισης με τα αντίστοιχα για μονοτονική φόρτιση, προκύπτει ότι το μέγιστο φορτίο αντίστασης είναι μειωμένο κατά περίπου 20% σε σχέση με τη μονοτονική φόρτιση. Επομένως, καλώς λήφθηκε υπόψη στην εφαρμογή των μοντέλων το 80% της μέγιστης τέμνουσας που προκύπτει από τους υπολογισμούς για την περίπτωση μονοτονικής φόρτισης [Mattock].

Η παραπάνω μείωση μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι με την πρόοδο των ανακυκλίσεων εξομαλύνονται οι παρειές της διεπιφάνειας με αποτέλεσμα να μειώνεται η συνεισφορά του μηχανισμού τριβής. Επιπλέον, η τιμή της ολίσθησης στην αστοχία είναι μεγαλύτερη από αυτή που παρατηρήθηκε για μονοτονική φόρτιση, ενώ παράλληλα αναπτύχθηκε ρωγμή μικρότερου εύρους. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην ελαστική αξονική παραμόρφωση που υφίστανται οι ράβδοι του οπλισμού κατά το στάδιο της αποφόρτισης του κάθε κύκλου.

Από την άλλη, όμως, στην περίπτωση ανακυκλιζόμενης φόρτισης, και κατά τους πρώτους κύκλους φόρτισης, παρατηρούνται μεγάλες ορθές τάσεις εξαιτίας του μηχανισμού αλληλοεμπλοκήςαδρανών με αποτέλεσμα τη σημαντική αξονική καταπόνηση του οπλισμού, κάτι που δεν λαμβάνεται υπόψη στα μοντέλα που εφαρμόστηκαν. Ίσως, το μοναδικό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη το παραπάνω είναι αυτό του Randl μέσω του συντελεστή  $k$ , ο οποίος χρησιμοποιείται προκειμένου να ποσοτικοποιήσει την ικανότητα του οπλισμού να αναλάβει εφελκυσμό. Ο συντελεστής  $k$  παίρνει μη μηδενικές τιμές στη περίπτωση που η διεπιφάνεια δεν είναι λεία.

Η προετοιμασία της διεπιφάνειας παίζει ρόλο μόνο στην αρχή της φόρτισης. Στην περίπτωση εκτραχυμένων διεπιφανειών, μέχρι ολίσθηση  $<0.5$  mm. Στη συνέχεια, όπως σημειώθηκε και παραπάνω, οι παρειές της διεπιφάνειας εξομαλύνονται και επέρχεται πτώση της απόκρισης των μηχανισμών τριβής και αλληλοεμπλοκήςαδρανών. Η αντίσταση της διεπιφάνειας στην επιβαλλόμενη φόρτιση οφείλεται, από το σημείο αυτό και ύστερα, στον μηχανισμό δράσης βλήτρου. Βέβαια, πρέπει να επισημανθεί, όπως έγινε και στη μονοτονική φόρτιση, ότι στα προσομοιώματα που εξετάζονται, εκτός του μοντέλου του Randl, δεν λαμβάνεται υπόψη η προετοιμασία της διεπιφάνειας στους υπολογισμούς. Επιπλέον, δεν λαμβάνεται υπόψη η μείωση της τριβής στους επόμενους κύκλους φόρτισης από κανένα μοντέλο. Όμως, η μείωση κατά 20% της τελικής τάσης που προκύπτει από τους υπολογισμούς φαίνεται να είναι αρκετή προκειμένου να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα (και συγκεκριμένα για το μοντέλο του Randl πολύ συντηρητικά αποτελέσματα).



**Σχήμα 8.9.2:** Ποιοτική παρουσίαση πτώσης της απόκρισης του μηχανισμού τριβής με αύξηση του αριθμού των κύκλων

## 8.10. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Τα προσομοιώματα των Mattock και Mansur et al. δίνουν ικανοποιητικές προβλέψεις στην περίπτωση των ρηγματωμένων μονολιθικών δοκιμίων και των δοκιμίων των οποίων η διεπιφάνεια έχει υποστεί τεχνητή εκτράχυνση.
- Αντίθετα, στα δοκίμια των οποίων η διεπιφάνεια είναι λεία τα προαναφερθέντα μοντέλα δεν μπορούν να εφαρμοστούν καθώς δίνουν προβλέψεις που είναι κατά της ασφαλείας.
- Το προσομοίωμα του Randl μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία σε όλα τα δοκίμια. Οι προβλέψεις είναι συντηρητικές αλλά λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες που προκύπτουν για την ενεργοποίηση του κάθε μηχανισμού, το προσομοίωμα αυτό κρίνεται ως το πλέον αξιόπιστο.
- Το προσομοίωμα του Rasmussen μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για μικρά ποσοστά οπλισμού διεπιφάνειας. Όσο αυξάνεται το ποσοστό  $\rho$  του οπλισμού (για δεδομένη τάση διαρροής του χάλυβα  $f_{sy}$ ) τόσο περισσότερο φαίνεται να υπερεκτιμάται και η συνεισφορά του μηχανισμού δράσης βλήτρου.
- Το προσομοίωμα της δοκού σε ελαστική στήριξη (BEF model) δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για μικρές τιμές διαμέτρου ( $d_b \leq 16$  mm). Για μεγαλύτερες διαμέτρους το προσομοίωμα υποεκτιμά την αντοχή του περιβάλλοντος σκυροδέματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του βλήτρου τόσο μικρότερη είναι η κατανεμημένη δυσκαμψία του σκυροδέματος  $K_f$ . Σύμφωνα με τη σχέση υπολογισμού της δύναμης λόγω δράσης βλήτρου του προσομοιώματος, αυτή προκύπτει μειωμένη όσο αυξάνεται η διάμετρος του οπλισμού της διεπιφάνειας.

## 9. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΕ ΕΜΦΑΤΝΟΥΜΕΝΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

### 9.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

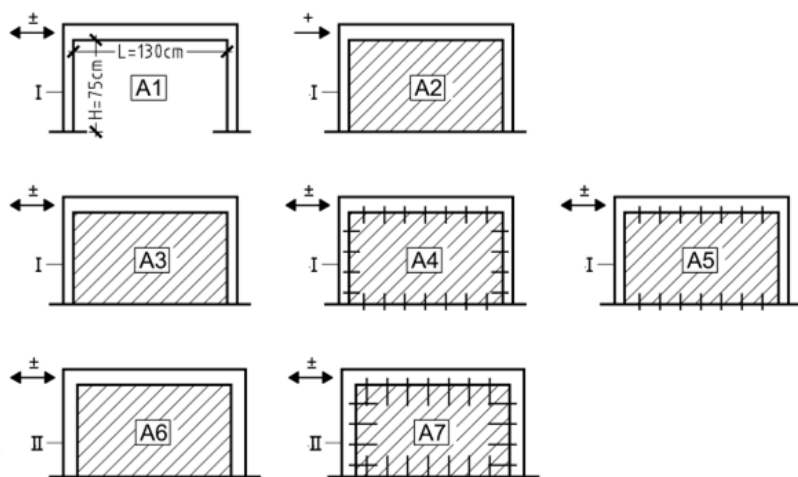
Στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος που ανατέθηκε από τον Ο.Α.Σ.Π. (Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας), πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές στο εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας με σκοπό να διερευνηθεί η αντοχή σε σεισμό εμφατνούμενων τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος (Ο/Σ) εντός πλαισίων από Ο/Σ (4<sup>η</sup> έκθεση προόδου Ο.Α.Σ.Π., [42]).

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε δύο σειρές δοκιμών, Α και Β. Τα δοκίμια της σειράς Α είχαν λόγο  $L/h = 1.73$  ενώ αυτά της σειράς Β  $L/h = 1.20$  (Σχ. 1 και 2). Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν σε κλίμακα 1/3 και έγινε προσπάθεια η ίδια κλίμακα να τηρηθεί και στη σύνθεση του σκυροδέματος. Διακρίνονται δύο τύποι δοκιμών: Τύπου Ι και Τύπου ΙΙ. Τα δοκίμια τύπου Ι δεν έχουν ενισχυμένα υποστυλώματα, ενώ στα δοκίμια Τύπου ΙΙ τα υποστυλώματα ενισχύθηκαν με μανδύα Ο/Σ.

Τα δοκίμια Α1 και Α2 φορτίστηκαν υπό μονοτονική φόρτιση και τα δοκίμια Α3-Α7 και Β1-Β3 υπό ανακυκλιζόμενη, βαθμιαία αυξανόμενη μέσω γρύλλου ο οποίος ασκούσε οριζόντιο φορτίο κατά μήκος του κεντροβαρικού άξονα της δοκού.

Το δοκίμιο Α1 είναι ένα γυμνό πλαίσιο από οπλισμένο σκυροδέμα το οποίο υποβάλλεται σε μονοτονικά αυξανόμενο οριζόντιο φορτίο. Τα δοκίμια Α2 και Α3 αποτελούνται από πλαίσιο Ο/Σ ενισχυμένο με την προσθήκη τοιχώματος οπλισμένου σκυροδέματος εντός του φαντώματος, το οποίο δεν συνδέεται με το περιβάλλον πλαίσιο. Το δοκίμιο Α4 είναι παρόμοιο με τα δοκίμια Α2 και Α3 με τη διαφορά ότι το εμφατνούμενο τοίχωμα συνδέεται με το περιβάλλον πλαίσιο μέσω αγκυρίων και βλήτρων που τοποθετούνται περιμετρικά της διεπιφάνειας τοιχώματος – πλαισίου. Στο δοκίμιο Α5 έχουν τοποθετηθεί βλήτρα μόνο στις διεπιφάνειες του τοιχώματος με τη δοκό (πάνω) και το θεμέλιο (κάτω). Το Α6 δεν διαθέτει βλήτρα σε καμία διεπιφάνεια και είναι Τύπου ΙΙ, ενώ το Α7 είναι όμοιο με το Α6 με τη διαφορά ότι έχουν τοποθετηθεί βλήτρα σε όλες τις επιφάνειες περιμετρικά του τοιχώματος.

Σε όσα δοκίμια της σειράς Α προβλεπόταν η χρήση οπλισμού στις διεπιφάνειες σύνδεσης του τοιχώματος με το περιβάλλον πλαίσιο, τοποθετήθηκαν «κοντά» βλήτρα (εκτός του Α7) Φ6/100 με βάθος έμπτηξης ίσο με 50 mm ( $8d_b$ ) για αγκύρωση με ρητίνη στα υποστυλώματα, θεμέλιο και δοκό και μήκος αναμονής στο τοίχωμα 100 mm ( $16d_b$ ). Η μέση τιμή της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος είναι  $f_c=28$  MPa και η τάση διαρροής του χάλυβα των βλήτρων που διαπερνούν τη διεπιφάνεια είναι  $f_{sy}=470$  MPa.

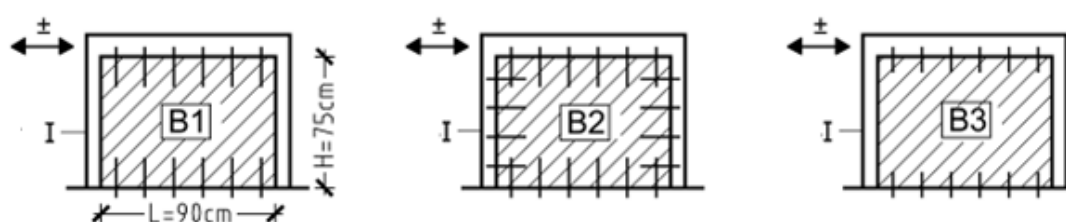


Σχήμα 9.1.1: Δοκίμια σειράς A [42]

Πίνακας 9.1.1: Χαρακτηριστικά δοκιμών σειράς A[42]

A/A	περιγραφή	τρόπος ενίσχυσης υπ/των	Είδος φόρτισης	Υλικά	
				Σκυρόδεμα $f_c$ (MPa)	Χάλυβας $f_{sy}$ (MPa)
A1	πλαίσιο	-	μονοτονική	32.90	470.00
A2	πλαίσιο + τοίχωμα χωρίς βλήτρα	-	μονοτονική	27.90	470.00
A3	πλαίσιο + τοίχωμα χωρίς βλήτρα	-	ανακυκλιζόμενη	27.90	470.00
A4	πλαίσιο + τοίχωμα με βλήτρα περιμετρικά (μικρό μήκος αγκύρωσης)	-	ανακυκλιζόμενη	27.90	470.00
A5	πλαίσιο + τοίχωμα με βλήτρα πάνω/κάτω (μικρό μήκος αγκύρωσης)	-	ανακυκλιζόμενη	27.50	470.00
A6	πλαίσιο + τοίχωμα χωρίς βλήτρα	με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος	ανακυκλιζόμενη	28.00	470.00
A7	πλαίσιο + τοίχωμα με βλήτρα περιμετρικά (μεγάλο μήκος αγκύρωσης)	με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος	ανακυκλιζόμενη	28.30	470.00

Η σειρά Β περιλαμβάνει τρία δοκίμια (B1, B2, B3). Η διαφορά τους με αυτά της σειράς Α είναι ότι έχουν λόγο  $L/h = 1.20$  και ότι στις διεπιφάνειες του τοιχώματος με το περιβάλλον πλαίσιο έχουν τοποθετηθεί «μακριά» βλήτρα (εκτός του B3) με βάθος έμπηξης 120 mm ( $20d_b$ ) για αγκύρωση με ρητίνη στο θεμέλιο (κάτω), 60 mm ( $10d_b$ ) στα υποστυλώματα και δοκό (πάνω) και μήκος αναμονής στο τοίχωμα 200 mm ( $33d_b$ ). Το δοκίμιο B1 αποτελείται από πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένο με την προσθήκη τοιχώματος οπλισμένου σκυροδέματος εντός του φατνώματος, το οποίο συνδέεται με βλήτρα  $\Phi 6/100$  στις διεπιφάνειες με τη δοκό (πάνω) και το θεμέλιο (κάτω). Τα δοκίμια B2 και B3 είναι όμοια με το B1 με τη διαφορά ότι στο B2 το τοίχωμα συνδέεται με το πλαίσιο με βλήτρα περιμετρικά και το B3 συνδέεται με «κοντά» βλήτρα άνω και κάτω μόνο. Τα υποστυλώματα του πλαισίου είναι τύπου I.



Σχήμα 9.1.2: Δοκίμια σειράς Β [42]

Πίνακας 9.1.2: Χαρακτηριστικά δοκιμών σειράς Β [42]

Α/Α	περιγραφή	τρόπος ενίσχυσης υπ/των	Είδος φόρτισης	Υλικά	
				Σκυρόδεμα $f_c$ (MPa)	Χάλυβας $f_{sy}$ (MPa)
B1	πλαίσιο + τοίχωμα με βλήτρα πάνω/κάτω (μεγάλο μήκος αγκύρωσης)	-	ανακυκλιζόμενη	29.40	470.00
B2	πλαίσιο + τοίχωμα με βλήτρα περιμετρικά (μεγάλο μήκος αγκύρωσης)	-	ανακυκλιζόμενη	26.90	470.00
B3	πλαίσιο + τοίχωμα με βλήτρα πάνω/κάτω (μικρό μήκος αγκύρωσης)	-	ανακυκλιζόμενη	29.30	470.00

Τα δοκίμια A1 και A2 φορτίστηκαν μονοτονικά ενώ τα υπόλοιπα δοκίμια υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, με δύο πλήρεις κύκλους ανά βήμα φόρτισης. Αρχικά, στα δοκίμια επιβλήθηκε ανακυκλιζόμενη φόρτιση ( $n=2$  κύκλοι) για 3 τιμές επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου,  $\pm 20$ ,  $\pm 40$  και  $\pm 60$  kN (στα δοκίμια A6 και A7 επιβλήθηκαν επιπλέον φορτία  $\pm 80$  και  $\pm 100$  kN), και στην συνέχεια εφαρμόστηκε ανακυκλιζόμενη φόρτιση 2 κύκλων με βαθμιαία αυξανόμενες μετακινήσεις. Ως βάση μετακίνησης για την ανακυκλιζόμενη φόρτιση επιλέγη η τιμή  $\delta_1=0.15$  mm και η επιβαλλόμενη μετακίνηση ήταν πολλαπλάσια της  $\delta_1$ . Ακολουθήθηκε γενικά παρόμοιο ιστορικό φόρτισης καθόσον αφορά στην επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση σε όλα τα δοκίμια. Η δοκιμή του πλαισίου B2 δεν ολοκληρώθηκε επιτυχώς. Αφού ολοκληρώθηκε κανονικά η ανακυκλιζόμενη φόρτιση μέχρι την επιβαλλόμενη οριζόντια μετατόπιση  $\delta=\pm 1.50$  mm, και αφού είχε επιτευχθεί η μέγιστη αντοχή, το δοκίμιο φορτίστηκε ανεξέλεγκτα έως την αστοχία λόγω λανθασμένου προγραμματισμού του ρυθμού επιβολής της μετακίνησης και δεν ήταν δυνατή η ολοκληρωμένη καταγραφή της συμπεριφοράς του.

## 9.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα δοκίμια αστόχησαν λόγω μεταφοράς της καταπόνησης από το τοίχωμα στο πλαίσιο εξαιτίας της μεγάλης σχετικής ολίσθησης και αποκόλλησης στις διεπιφάνειες του τοιχώματος με τη δοκό πάνω, με το θεμέλιο κάτω και με τα υποστυλώματα. Για μικρές τιμές της ολίσθησης, ο μηχανισμός που αναλαμβάνει κατά κύριο λόγο το οριζόντιο φορτίο που επιβάλλεται στα δοκίμια είναι αυτός του διαγώνιου θλιπτήρα. Το υπόλοιπο φορτίο αναλαμβάνεται από τα υποστυλώματα και τους μηχανισμούς αλληλοεμπλοκής αδρανών και δράσης βλήτρου του οπλισμού στις διεπιφάνειες περιμετρικά του τοιχώματος. Στην περίπτωση δοκιμών στα οποία έχουν τοποθετηθεί διατμητικοί σύνδεσμοι, το παραπάνω γίνεται για τιμές της σχετικής ολίσθησης μέχρι  $0.3 - 0.6$  mm ( $(0.05 - 0.1)d_b$ ), για τις οποίες ενεργοποιείται πλήρως ο μηχανισμός δράσης βλήτρου. Για μεγαλύτερες τιμές της ολίσθησης, το φορτίο καταπονεί το περιβάλλον πλαίσιο και η αντοχή των δοκιμών εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πλαισίου πλέον. Τα δοκίμια A6 ( $P_{\max}=278.7$  kN) και A7 ( $P_{\max}=363.1$  kN), που έχουν ενισχυμένα υποστυλώματα και κόμβους εμφανίζουν αυξημένη αντοχή σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια της ίδιας σειράς A2 ( $P_{\max}=61.3$  kN), A3 ( $P_{\max}=100$  kN), A4 ( $P_{\max}=141.2$  kN) και A5 ( $P_{\max}=149.2$  kN). Επιπλέον, συγκρίνοντας τα δοκίμια A6 και A3 που υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση και δεν συνδέονται με διατμητικούς συνδέσμους με το πλαίσιο, παρατηρούμε ότι η τιμή της ολίσθησης για το μέγιστο φορτίο είναι μηδενική για το A3 σε σχέση με το A6 (2.22 mm) κάτι που επισημαίνει τη μεγαλύτερη αντοχή των ενισχυμένων υποστυλωμάτων και κόμβων του πλαισίου για το A6 και την πρόωρη αστοχία του A3. Στην περίπτωση τοποθέτησης βλήτρων περιμετρικά του τοιχώματος επιτεύχθηκε περιορισμός της αποκόλλησης με το πλαίσιο (A4 – βλήτρα περιμετρικά – (0.03 mm), A5 – βλήτρα πάνω και κάτω – (0.22 mm)).

**Πίνακας 9.2.1:** Μέγιστες πειραματικές τιμές οριζοντίου φορτίου,  $P_{max}$ , αντίστοιχης μετακίνησης  $\delta_h$ , και σχετικών μετακινήσεων τοιχώματος και πλαισίου [42]

A/A	$P_{max}$ (kN)	$\delta_h$ (mm)	πάνω δοκός		κάτω δοκός (θεμέλιο)	
			αποκόλληση (mm)	ολίσθηση (mm)	αποκόλληση (mm)	ολίσθηση (mm)
A1	-14.1	-21.02	-	-	-	-
A2	61.3	0.81	0	0	-	-
	-67.7	-1.08	0	-0.03	-	-
A3	100.0	1.31	-0.03	0	-	-
	-82.5	-0.65	-0.03	-0.03	-	-
A4	141.2	1.38	-0.03	0.36	-	-
	-155.6	-1.41	-0.02	-0.56	-	-
A5	149.2	2.18	-0.22	0.26	-0.82	0.28
	-126.1	-1.54	-0.10	-0.19	-1.33	-0.51
A6	278.7	3.75	-1.04	2.22	-0.11	0.46
	-259.1	-2.40	-0.46	-2.16	-0.30	-0.99
A7	363.1	3.34	-0.46	1.22	-0.07	0.33
	-358.0	-2.70	-0.36	-2.02	-0.10	-0.49
B1	120.5 (122.7) <sup>(*)</sup>	2.83 (4.23) <sup>(*)</sup>	-0.09 (-0.19) <sup>(*)</sup>	0.27 (0.36) <sup>(*)</sup>	-0.42 (-0.94) <sup>(*)</sup>	0.32 (0.53) <sup>(*)</sup>
	-115.2	-2.53	-0.05	-0.17	-1.02	-0.93
B2	133.2	1.24	-0.14	0.03 <sup>(**)</sup>	-0.03 <sup>(**)</sup>	0.21
	-112.2	-1.83	-1.13 <sup>(**)</sup>	-0.03 <sup>(**)</sup>	0 <sup>(**)</sup>	-0.72
B3	100.2	2.53	-0.10	0.18	-0.23	0.06 <sup>(**)</sup>
	-98.8	-2.51	-0.03	-0.13	-1.22	-0.87

(\*) οι τιμές P και  $\delta$  σε παρένθεση αντιστοιχούν σε 2<sup>ο</sup> τοπικό μέγιστο

(\*\*) αναξιόπιστη μέτρηση

Σε όλα τα δοκίμια εμφανίζονται οριζόντιες ρωγμές στα υποστυλώματα ως αποτέλεσμα της εφελκυστικής δύναμης που τα καταπονεί λόγω της οριζόντιας εξωτερικής φόρτισης. Οι κόμβοι των πλαισίων αστοχούν διατμητικά με την εμφάνιση διαγώνιων ρωγμών, ως συνέπεια της αποκόλλησης και σχετικής ολίσθησης στις διεπιφάνειες με το πλαίσιο. Η ίδια αιτία προκαλεί τριχοειδείς ρωγμές στις ίδιες θέσεις.

Πιο συγκεκριμένα στα δοκίμια A2 και A3, στα οποία δεν υπάρχουν διατμητικοί σύνδεσμοι περιμετρικά, επέρχεται αστοχία των άνω κόμβων του πλαισίου. Στα δοκίμια A4 και A5 η αστοχία των υποστυλωμάτων στη βάση τους χαρακτηρίζεται καμποδιατμητική σε συνδυασμό με αποδιοργάνωση των γειτονικών κάτω γωνιών του τοιχώματος και βλάβη στην κάτω διεπιφάνεια του τοιχώματος, ενώ στην πάνω διεπιφάνεια τοιχώματος – δοκού υπήρξε ελάχιστη αποκόλληση ιδιαίτερα στο A4. Στην περίπτωση των δοκιμίων A6 και A7 τα υποστυλώματα αστοχούν διατμητικά στην κορυφή τους, κάτω από τη θέση εφαρμογής του φορτίου και παράλληλα προκαλείται σημαντική βλάβη στην πάνω διεπιφάνεια (τοιχώματος – δοκού) και στο πάνω τμήμα του τοιχώματος στην περιοχή αγκύρωσης των βλήτρων στο A7, με τελική θραύση του μανδύα και όλων των βλήτρων (για το δοκίμιο A7) στην

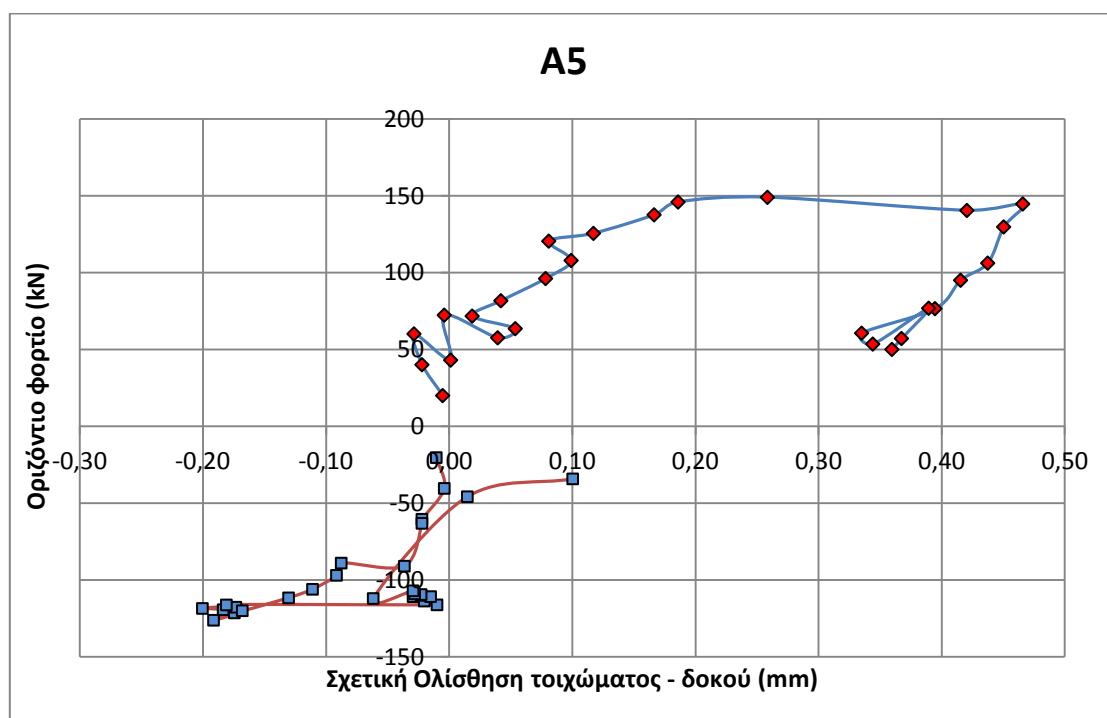


διεπιφάνεια τοιχώματος-δοκού. Στο δοκίμιο A6 (χωρίς βλήτρα), ενώ η αστοχία ήταν παρόμοια με αυτή του A7 στην κορυφή των υποστυλωμάτων, παρατηρήθηκε περιορισμένη βλάβη στην διεπιφάνεια τοιχώματος – δοκού.

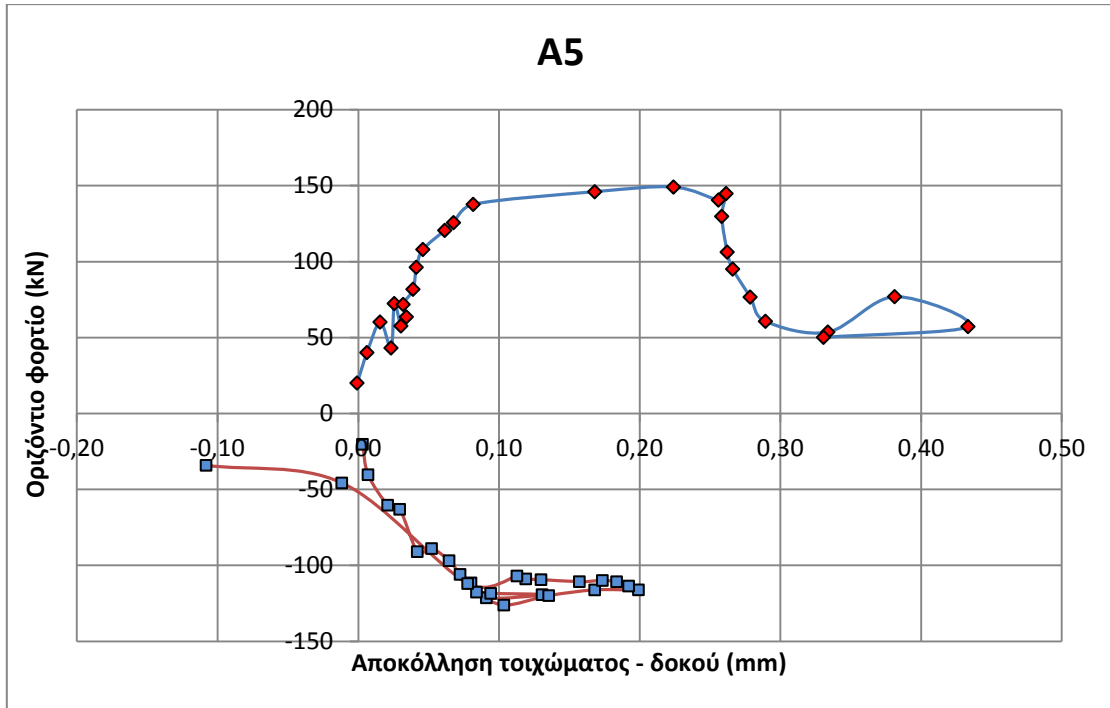
Σε κανένα από τα δοκίμια δεν εμφανίστηκαν εκτεταμένες ρωγμές στο τοίχωμα εκτός του δοκιμίου A7 του οποίου τα υποστύλωματα είναι ενισχυμένα με μανδύα και έχουν χρησιμοποιηθεί «μακριά» βλήτρα. Μεμονωμένες ρωγμές εμφανίστηκαν στο δοκίμιο A4.

Στα δοκίμια B1 και B2, επέρχεται καμπτική αστοχία στην βάση των υποστυλωμάτων με σημαντική αποκόλληση και σχετική ολίσθηση στην διεπιφάνεια τοιχώματος-θεμελίου (τελική θραύση των βλήτρων στην διεπιφάνεια τοιχώματος – θεμελίου μετά το μέγιστο φορτίο λόγω της ανακυκλιζόμενης φόρτισης), ενώ παρατηρούνται λοξές ρωγμές περιορισμένου μήκους και εύρους στους κόμβους δοκού – υποστυλωμάτων. Τέλος, στο δοκίμιο B3 αστοχούν διατμητικά οι κόμβοι υποστυλωμάτων – δοκού, παρατηρείται αποδιοργάνωση του σκυροδέματος στις πάνω γωνίες του τοιχώματος και ταυτόχρονα θραύση των βλήτρων στη διεπιφάνεια δοκού – τοιχώματος. Μεμονωμένες ρωγμές εμφανίστηκαν στα B1 και B2 οι οποίες δεν επεκτάθηκαν σημαντικά.

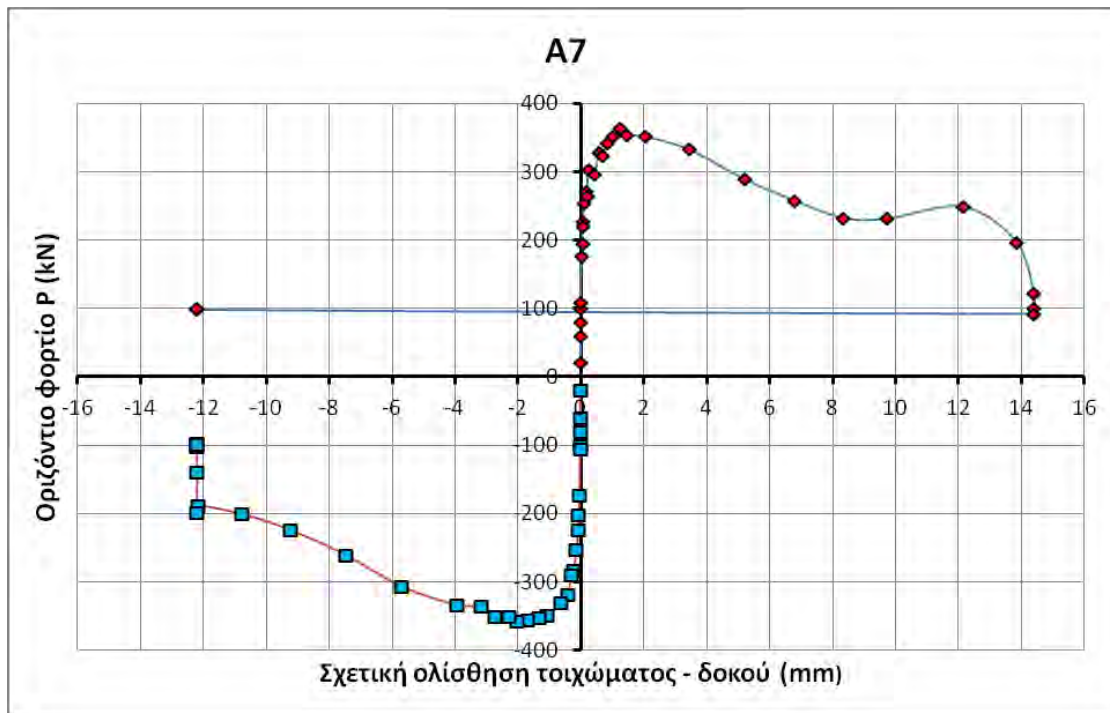
Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται η σχέση οριζόντιου φορτίου – σχετικής ολίσθησης ή αποκόλλησης που μετρήθηκε κατά τις δοκιμές.



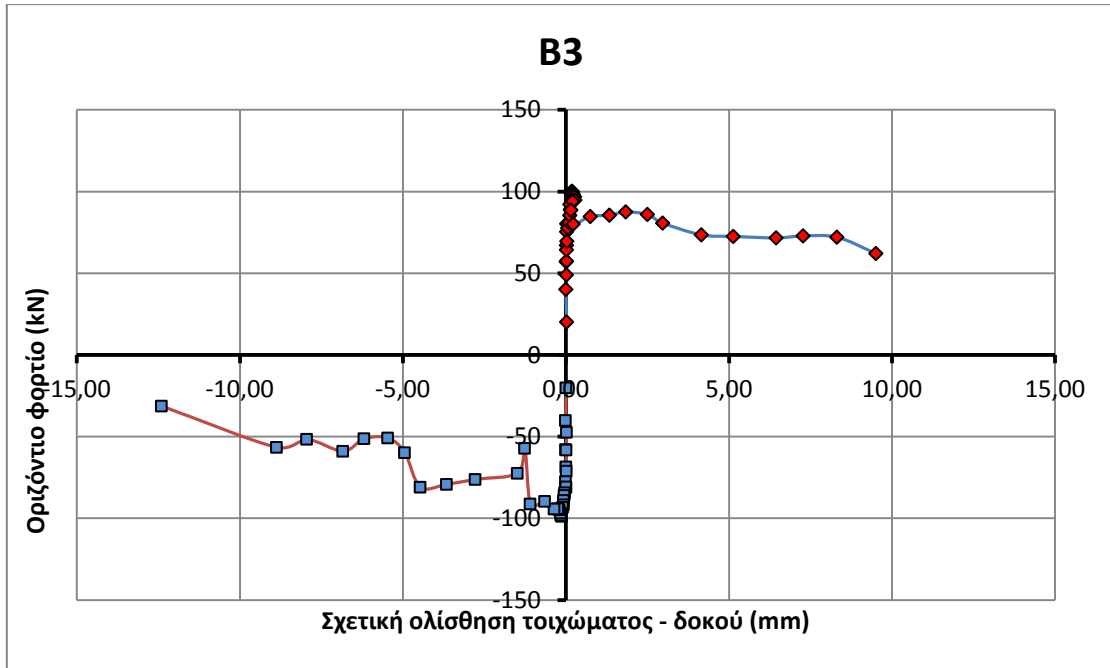
Σχήμα 9.2.1: Φορτίο – σχετική ολίσθηση τοιχώματος – δοκού για το δοκίμιο A5



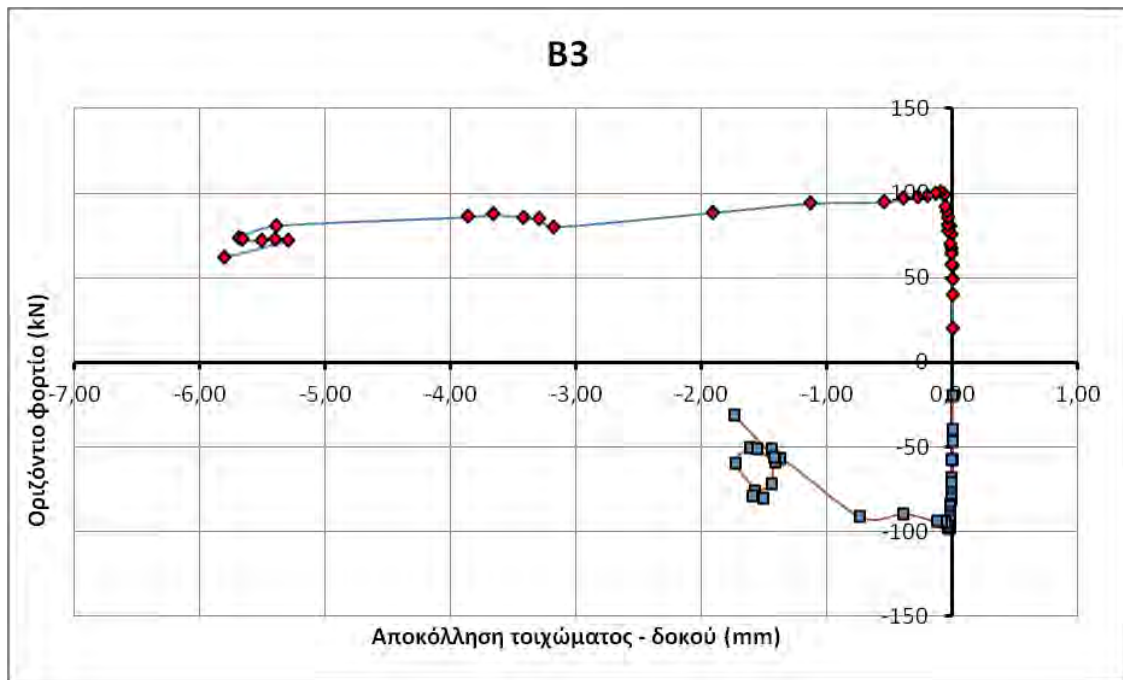
Σχήμα 9.2.2: Φορτίο – αποκόλληση τοιχώματος – δοκού για το δοκίμιο A5



Σχήμα 9.2.3: Φορτίο – σχετική ολίσθηση τοιχώματος – δοκού για το δοκίμιο A7



Σχήμα 9.2.4: Φορτίο – σχετική ολίσθηση τοιχώματος – δοκού για το δοκίμιο B3



Σχήμα 9.2.5: Φορτίο – αποκόλληση τοιχώματος – δοκού για το δοκίμιο B3

### 9.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΑΝΩ ΚΑΙ ΚΑΤΩ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ – ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Η φέρουσα ικανότητα των διεπιφανειών προκύπτει ως άθροισμα της αντίστασης των επιμέρους μηχανισμών που ενεργοποιούνται: α) του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών και β) του μηχανισμού δράσης βλήτρου. Γίνεται η υπόθεση ότι ο μηχανισμός αλληλοεμπλοκής αδρανών συνεισφέρει σημαντικά στην περιοχή επαφής του τοιχώματος με το πλαίσιο και ότι ενεργοποιείται ο μισός αριθμός βλήτρων της διεπιφάνειας. Ακολουθείται η επόμενη διαδικασία υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας των διεπιφανειών:

- Αρχικά υπολογίζεται το μήκος επαφής της επιφάνειας του τοιχώματος με το περιβάλλον πλαίσιο  $l_{b,eff}$  (Σχήμα 9.3.1). Το πλάτος του διαγωνίου θλιπτήρα δίνεται από τη σχέση (FEMA 356, 2008):

$$W = 0.175 (\lambda \cdot h_{col})^{-0.4} \cdot r_{inf} \quad (\text{Mainstone, 1971}) \quad (9.3.1)$$

όπου

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E_m t_{inf} \sin 2\theta}{4E_f I_{col} h_{inf}}} \quad (9.3.2)$$

$E_m$ : το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος του τοιχώματος

$t_{inf}$ : το πάχος του τοιχώματος

$h_{inf}$ : το ύψος του τοιχώματος

$E_f$ : το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος του πλαισίου

$h_{col}$ : το ύψος των υποστυλωμάτων του πλαισίου

$I_{col}$ : η ροπή αδράνειας των υποστυλωμάτων του πλαισίου

$r_{inf}$ : το μήκος της διαγωνίου του τοιχώματος

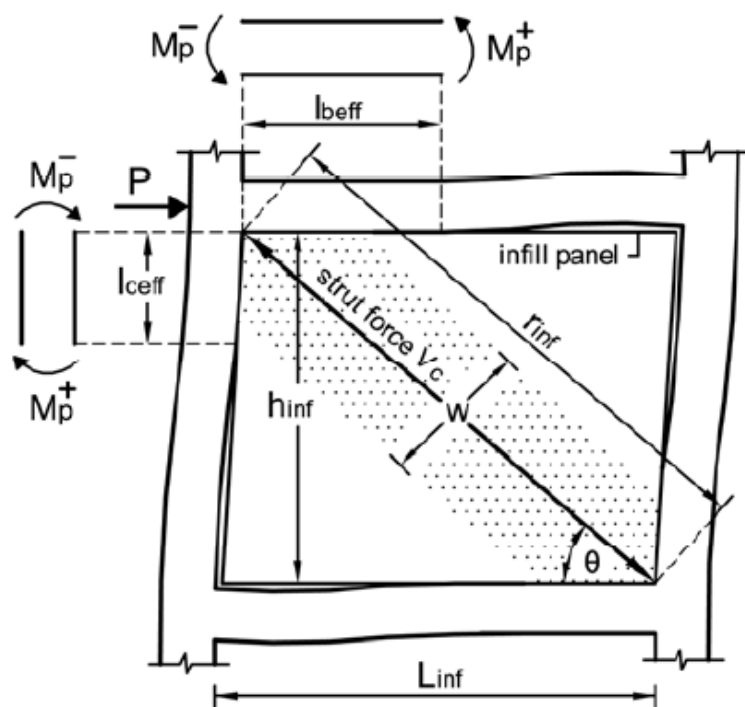
$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{h_{inf}}{L_{inf}} \right)$$

Το μήκος της επιφάνειας επαφής του τοιχώματος με το περιβάλλον πλαίσιο  $l_{b,eff}$  δίνεται από την σχέση 9.3.3:

$$l_{b,eff} = \frac{W}{\sin \theta_b} \quad (9.3.3)$$

όπου

$$\theta_b = \tan^{-1} \left( \frac{h_{inf}}{L_{inf} - \frac{W}{\sin \theta_b}} \right)$$



Σχήμα 9.3.1: Παραμορφωμένη κατάσταση τοιχώματος - πλαισίου

#### ΔΥΝΑΜΗ ΑΛΛΗΛΟΕΜΠΛΟΚΗΣ ΑΔΡΑΝΩΝ

- Υπολογισμός των επιφανειών επαφής μεταξύ των αδρανών των παρειών της διεπιφάνειας, θεωρώντας τη φόρτιση μονοτονική.

Παράμετροι: (a) πειραματικές τιμές ολίσθησης ( $s$ ) και αποκόλλησης ( $w$ )  
 (b) διάμετρος μεγαλύτερου αδρανούς ( $D_{max}$ )  
 (c) λόγος όγκου αδρανών προς όγκο σκυροδέματος ( $p_k$ )

- Υπολογισμός μειωτικών συντελεστών  $\lambda_x$  και  $\lambda_y$  σύμφωνα με το προσομοίωμα μειωμένων επιφανειών επαφής του Walraven για ανακυκλιζόμενη φόρτιση (σχέσεις 7.1.5 και 7.1.6).

Παράμετροι: (a) αρχικό εύρος ρωγμής κατά μήκος της διεπιφάνειας ( $w_o$ )  
 (b) ολίσθηση κατά τον κύκλο που μελετάται και μέγιστη τιμή της ολίσθησης του προηγούμενου κύκλου

- Υπολογισμός των τάσεων  $\tau_a$  και  $\sigma_a$  σύμφωνα με το προσομοίωμα των μειωμένων επιφανειών επαφής (Σχέσεις 7.1.3, 7.1.4). Υπολογίζεται ο συντελεστής ενεργοποίησης του μηχανισμού,  $Y_a$ , βάσει της σχέσης (6.4.7).

- Υπολογισμός του μήκους  $l_{b,eff}$  της επιφάνειας επαφής του τοιχώματος με το περιβάλλον πλαίσιο και της δύναμης που οφείλεται στην ενεργοποίηση του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών σύμφωνα με την επόμενη σχέση:

$$V_a = Y_a \cdot \tau_a \cdot l_{b,eff} \cdot t_{inf} \quad (9.3.4)$$

#### ΔΡΑΣΗ ΒΛΗΤΡΟΥ

- Υπολογισμός δύναμης δράσης βλήτρου ανάλογα με την τιμή της ολίσθησης  $s$  του κύκλου που μελετάται, σύμφωνα με το προσομοίωμα BEF (Σχέση 6.3.1).
- Υπολογισμός της δύναμης εξόλκευσης που καταπονεί τα βλήτρα λόγω των ανακυκλίσεων (Σχέση 7.3.1).
- Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή  $Y_d$  λόγω της ταυτόχρονης δράσης αγκυρίου (Σχέση 6.3.7)
- Υπολογισμός δύναμης λόγω δράσης βλήτρου από τη σχέση:

$$V_d = Y_d \cdot F_d \quad (9.3.5)$$

Τέλος η δύναμη αντίστασης της διεπιφάνειας δίνεται από τη σχέση:

$$V_{\delta\epsilon\pi.} = V_a + V_d \quad (9.3.6)$$

Δίνεται το επόμενο παράδειγμα εφαρμογής του προσομοιώματος που περιγράφηκε παραπάνω:

#### Δοκίμιο A7:

Αρχικά υπολογίζεται το μήκος  $l_{b,eff}$ :

$$l_{b,eff} = \frac{W}{\sin\theta_b}$$

Το πλάτος  $W$  του διαγώνιου θλιπτήρα είναι:

$$W = 0.175 (\lambda \cdot h_{col})^{-0.4} \cdot r_{inf}$$

όπου

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E_m t_{inf} \sin 2\theta}{4 E_f I_{col} h_{inf}}}$$

$$E_m = 9.50(f_c + 8)^{1/3} = 9.50(28.3 + 8)^{1/3} = 31.46 \text{ GPa}$$

$$E_f = 9.50(f_c + 8)^{1/3} = 9.50(28.5 + 8)^{1/3} = 31.48 \text{ GPa}$$

$$I_{col} = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12}0.16 \cdot (0.16)^3 = 0.000055 \text{ m}^4$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{h_{inf}}{L_{inf}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.75}{1.14}\right) = 33.34^\circ$$

Άρα

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E_m t_{inf} \sin 2\theta}{4E_f I_{col} h_{inf}}} = \sqrt[4]{\frac{31.46 \cdot 0.05 \cdot 0.918}{4 \cdot 31.48 \cdot 0.000055 \cdot 0.75}} = 4.08$$

$$W = 0.175 (4.08 \cdot 0.75)^{-0.4} \cdot \sqrt{1.14^2 + 0.75^2} = 156 \text{ mm}$$

Συνεπώς

$$l_{b,eff} = \frac{W}{\sin \theta_b} = \frac{156}{\sin 35.97} = 265.74 \text{ mm}$$

Για τον κύκλο φόρτισης  $n=6$  ( $P_{max}=176.66 \text{ kN}$ ), βρέθηκαν πειραματικά οι εξής τιμές για την σχετική ολίσθηση και την αποκόλληση αντίστοιχα:

$$s=0.02 \text{ mm και } w=0.04 \text{ mm}$$

Από το προσομοίωμα του Walraven υπολογίζονται οι επιφάνειες επαφής των αδρανών  $A_y$  (Σχέση 6.2.15) και  $A_x$  (Σχέση 6.2.16) για την περίπτωση που  $s < w$ . Έτσι έχουμε:

$$A_y=0.025342 \text{ και } A_x=0.009918$$

Από το προσομοίωμα των μειωμένων επιφανειών επαφής του Walraven προσδιορίζονται οι μειωτικοί συντελεστές  $\lambda_x$  και  $\lambda_y$  (σχέσεις 7.1.5 και 7.1.6):

$$\lambda_x = \min \left[ 0.8 \left( \frac{s - \delta_o}{s_m - \delta_o} \right)^2 ; 0.8 \right]$$

$$\lambda_y = \min \left[ 0.7 \left( \frac{s - \delta_o}{s_m - \delta_o} \right)^3 ; 0.7 \right]$$

$$\text{με } \delta_o = w_m - \sqrt{w_m^2 - w_o^2} = 0.01 - \sqrt{(0.01)^2 - (0)^2} = 0$$

επομένως:

$$\lambda_x = \min \left[ 0.8 \left( \frac{s - \delta_o}{s_m - \delta_o} \right)^2 ; 0.8 \right] = \min \left[ 0.8 \left( \frac{0.02 - 0}{0.01 - 0} \right)^2 ; 0.8 \right] = 0.80$$

$$\lambda_y = \min \left[ 0.7 \left( \frac{s - \delta_o}{s_m - \delta_o} \right)^3 ; 0.7 \right] = \min \left[ 0.7 \left( \frac{0.02 - 0}{0.01 - 0} \right)^3 ; 0.7 \right] = 0.70$$

$$\text{Επίσης: } \sigma_{pu} = 4.5 \cdot f_c^{0.67} = 4.5 \cdot (28.3)^{0.67} = 42.26 \text{ MPa}$$

Η διατμητική και η ορθή τάση που οφείλονται στο μηχανισμό αλληλοεμπλοκής αδρανών υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} \tau_\alpha &= \sigma_{pu} (\lambda_y A_y + \lambda_x \mu A_x) = 42.26 \cdot (0.70 \cdot 0.025342 + 0.80 \cdot 0.4 \cdot 0.009918) \\ &= 0.884 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha &= \sigma_{pu} (\lambda_x A_x - \lambda_y \mu A_y) = 42.26 \cdot (0.80 \cdot 0.009918 - 0.70 \cdot 0.4 \cdot 0.025342) \\ &= 0.035 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Ο συντελεστής ενεργοποίησης του μηχανισμού υπολογίζεται ως εξής:

$$Y_a = \min \left[ \frac{f_{sy}}{\sigma_s} = \frac{0.5 \rho f_{sy}}{\sigma_\alpha} ; 1.00 \right] = \min \left[ \frac{0.5 \cdot 0.0057 \cdot 470}{0.035} ; 1.00 \right] = 1.00$$

Επομένως η δύναμη αλληλοεμπλοκής αδρανών είναι:

$$\begin{aligned} V_a &= Y_a \cdot \tau_\alpha \cdot l_{b,eff,b} \cdot t_{inf} = 1.00 \cdot 0.884 \cdot 265.74 \cdot 50 = 11745.71 \text{ N} \\ &= 11.75 \text{ kN} \end{aligned}$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η διατμητική δύναμη στη διεπιφάνεια λόγω δράσης βλήτρου του οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια βάσει του προσομοιώματος BEF:

$$F_d = 2\beta^3 \cdot EI \cdot s$$

όπου

$$K_f = 127 \frac{\sqrt{f_c}}{(d_b)^{2/3}} = 127 \frac{\sqrt{28.3}}{(6)^{2/3}} = 204.61 \text{ MPa/mm}$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_f \cdot d_b}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{204.61 \cdot 6}{4 \cdot 200000 \cdot 63.585}} = 0.07$$



Επομένως:

$$F_d = 2\beta^3 \cdot EI \cdot s = 2 \cdot (0.07)^3 \cdot 200000 \cdot 63.585 \cdot 0.02 = 770 \text{ N} \\ = 0.77 \text{ kN}$$

Η δύναμη εξόλκευσης που καταπονεί τα βλήτρα είναι:

$$F_s = \left\{ \max \left[ \frac{3}{(n+2)}; 0.25 \right] \right\} \cdot 0.5 \rho f_{sy} \cdot (\delta_n - \delta_{n,o}) \cdot A_{\delta_{\text{ιεπ.}}} \\ = \left\{ \max \left[ \frac{3}{(6+2)}; 0.25 \right] \right\} \cdot 6.691 \cdot (0.04 - 0) \cdot 65000 \\ = 6.80 \text{ kN}$$

Άρα η μείωση λόγω ταυτόχρονης δράσης αγκυρίου υπολογίζεται σε:

$$Y_d = \sqrt{1 - \left( \frac{F_s}{F_{sy}} \right)^2} = \sqrt{1 - \left( \frac{6.80}{86.33} \right)^2} = 1.00$$

Έτσι η αντίσταση του μηχανισμού δράσης βλήτρου είναι:

$$V_d = Y_d \cdot F_d = 1.00 \cdot 0.77 = 0.77 \text{ kN}$$

Η συνολική αντίσταση της διεπιφάνειας προκύπτει ως άθροισμα των δυνάμεων αντίστασης του κάθε μηχανισμού:

$$V_{\delta_{\text{ιεπ.}}} = 11.75 + 0.77 = 12.52 \text{ kN}$$

Η δύναμη που μπορεί να παραλειφθεί από τη διεπιφάνεια μεταξύ συγκολλητικής ουσίας και σκυροδέματος είναι:

$$R_c = 4.5 \cdot \pi \cdot l_b \cdot \sqrt{f_c \cdot D} \quad [\text{N}] \quad (9.3.7)$$

όπου  $l_b$ : το βάθος έμπηξης των βλήτρων [mm]

$f_c$ : η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος του πλαισίου [MPa]

$D$ : η διάμετρος της οπής τοποθέτησης των βλήτρων (8 mm)

Κάνοντας αντικατάσταση των τιμών των μεγεθών στην παραπάνω σχέση έχουμε:

$$R_c = 6.5 \cdot (4.5 \cdot \pi \cdot 60 \cdot \sqrt{28.3 \cdot 8}) = 82.92 \text{ kN} > F_s = 6.80 \text{ kN}$$

άρα ικανοποιείται ο έλεγχος έναντι εξόλκευσης.

Στη συνέχεια πρέπει να γίνει έλεγχος αν ικανοποιείται η σχέση αλληλεπίδρασης δράσης βλήτρου – αγκυρίου (Σχέση 6.3.7):

$$\left(\frac{F_d}{F_{du}}\right)^2 + \left(\frac{F_s}{F_{sy}}\right)^2 \leq 1$$

όπου  $F_d$ : η δύναμη βλήτρου που υπολογίζεται από το προσομοίωμα BEF για δεδομένη τιμή της ολίσθησης  
 $F_s$ : η δύναμη εξόλκευσης που καταπονεί τα βλήτρα για δεδομένη τιμή της αποκόλλησης  
 $F_{du}$ : η αντοχή του μηχανισμού δράσης βλήτρου που δίνεται από τη σχέση

$$F_{du} = 0.65d_b^2 \sqrt{f_c \cdot f_{sy}}$$

$F_{sy}$ : η δύναμη διαρροής σε εφελκυσμό

$$F_{sy} = A_s f_{sy}$$

Έχουμε:

$$F_{du} = 6.5 \cdot \left(0.65d_b^2 \sqrt{f_c \cdot f_{sy}}\right) = 6.5 \cdot (0.65 \cdot 6^2 \sqrt{28.3 \cdot 470}) = 17.54 \text{ kN}$$

$$F_{sy} = A_s f_{sy} = 6.5 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 6^2}{4}\right) \cdot 470 = 86.33 \text{ kN}$$

άρα

$$\left(\frac{0.77}{17.54}\right)^2 + \left(\frac{6.80}{86.33}\right)^2 = 0.0081 \ll 1$$

## 9.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

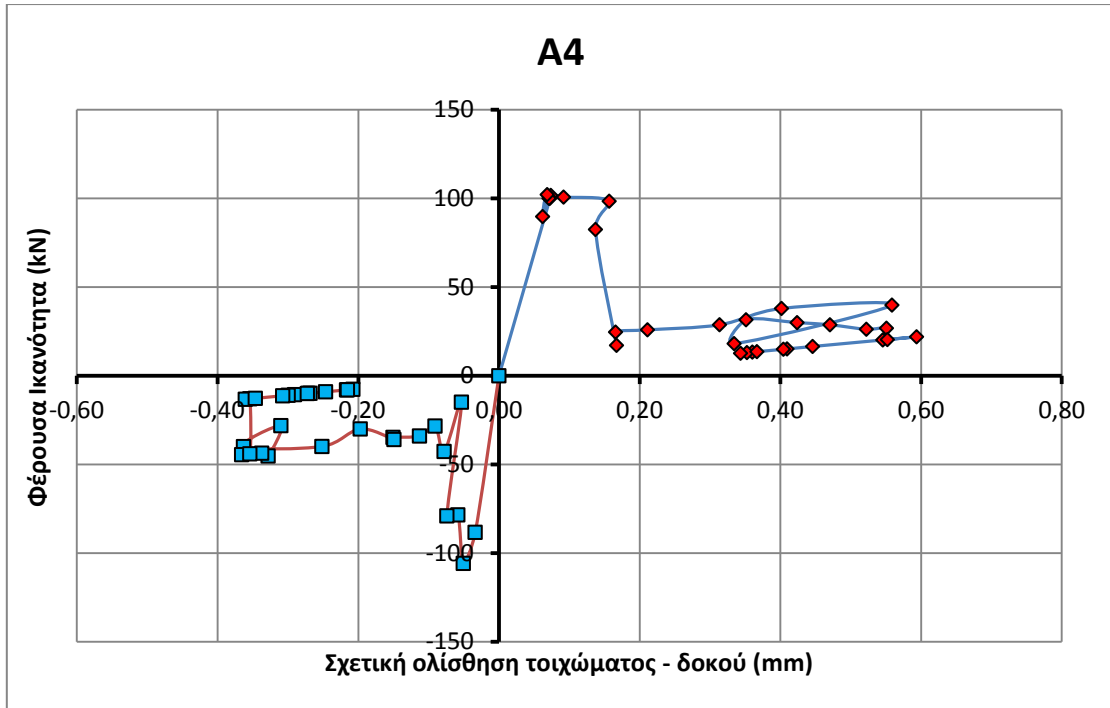
- Δοκίμιο A4

Στις διεπιφάνειες του τοιχώματος με το περιβάλλον πλαίσιο δεν έχει γίνει τεχνητή εκτράχυνση. Συνέπεια αυτού είναι να παρατηρηθούν πολύ μικρές τιμές της αποκόλλησης και μεγάλες τιμές της ολίσθησης κατά τους πρώτους κύκλους φόρτισης ( $n=1-9$ ) που οδηγούν σε αύξηση των επιφανειών επαφής επαφής που υπολογίζονται από το προσομοίωμα του Walraven. Έτσι, η αντίσταση του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών φαίνεται ότι υπερεκτιμάται. Για παράδειγμα για  $n=3$  ( $P_{\max,n=3}=39.83$  kN,  $s=0.07$  mm,  $w=0.00$  mm) η συνολική αντίσταση της διεπιφάνειας είναι  $V_{\text{διεπ.}}=100.13$  kN, δηλαδή περίπου 2.5 φορές μεγαλύτερη από την αντοχή ολόκληρου του συστήματος.

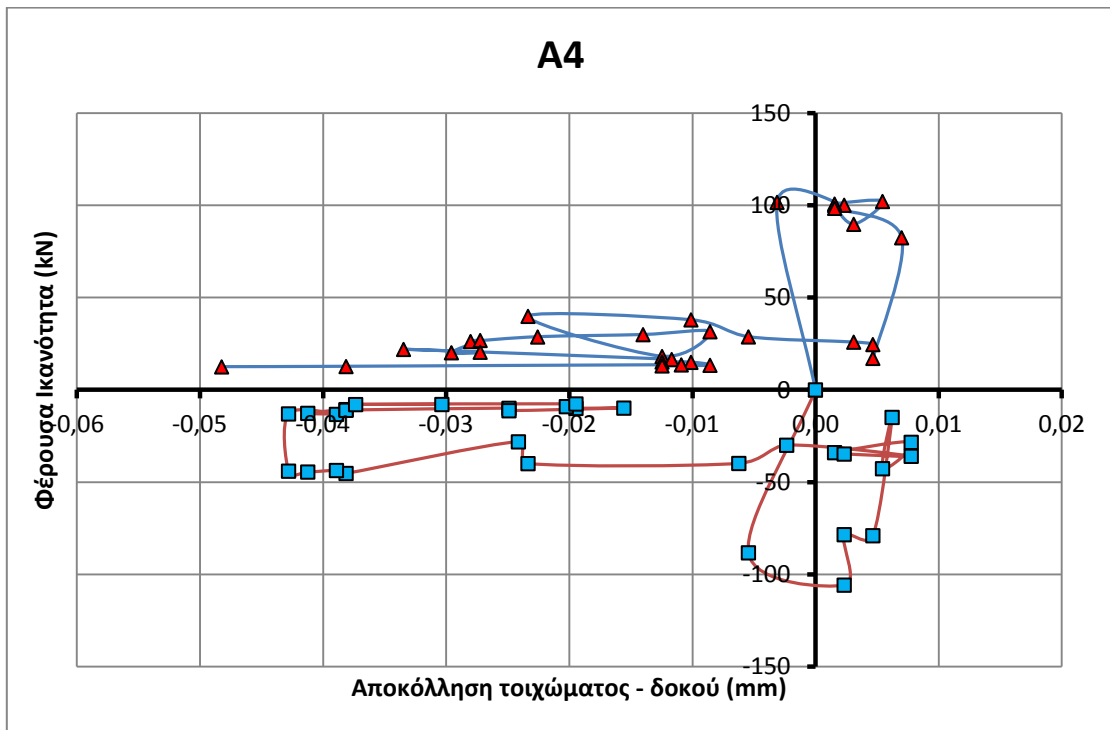
Επίσης, από την εφαρμογή του προσομοιώματος έγινε φανερό ότι το παραπάνω φαινόμενο συμβαίνει μέχρι τιμή της σχετικής ολίσθησης  $s=0.16$  mm και μηδενική αποκόλληση. Για  $s>0.17$  mm, οι επιφάνειες επαφής μειώνονται σημαντικά με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά και το φορτίο αντίστασης του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών. Έτσι, για  $n=10$  ( $P_{\max,n=10}=92.22$  kN,  $s=0.17$  mm,  $w=0.00$  mm) η αντίσταση της διεπιφάνειας προκύπτει μειωμένη σε σχέση με τους προηγούμενους κύκλους,  $V_{\text{διεπ.}}=17.12$  kN.

Για  $n>10$  η υπολογιζόμενη συνεισφορά του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών φθίνει ενώ παράλληλα αυξάνεται η δύναμη αντίστασης του μηχανισμού δράσης βλήτρου. Η μέγιστη τιμή του μηχανισμού δράσης βλήτρου που εκτιμάται, συμπίπτει με τον κύκλο φόρτισης που αναπτύσσεται και η μέγιστη αντίσταση όλου του συστήματος ( $n=24$ ,  $P_{\max,n=24}=121.09$  kN,  $s=0.59$  mm,  $w=0.03$  mm),  $V_{\text{διεπ.}}=21.95$  kN. Ωστόσο, δεν επιτυγχάνεται ποτέ η αντοχή των βλήτρων καθώς δεν επιτεύχθηκε η απαραίτητη ολίσθηση ( $s_{\max}=0.6$  mm).

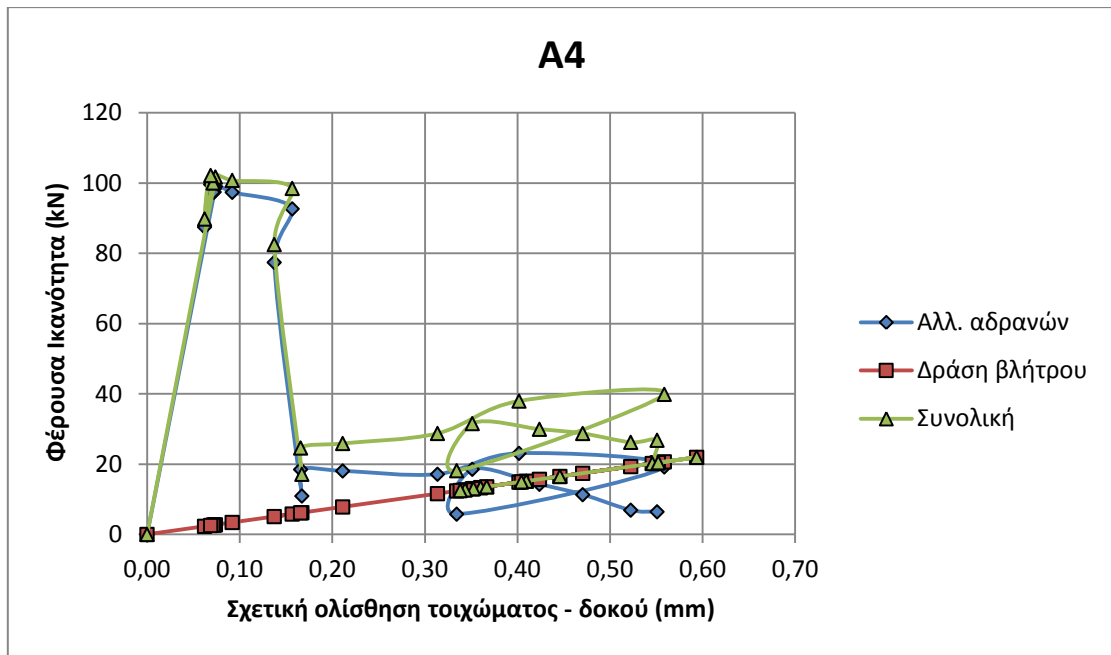
Στα επόμενα σχήματα με μπλε γραμμή και κόκκινους δείκτες παριστάνονται τα μέγιστα των θετικών κύκλων, ενώ με κόκκινη γραμμή και μπλε δείκτες τα μέγιστα των αρνητικών κύκλων.



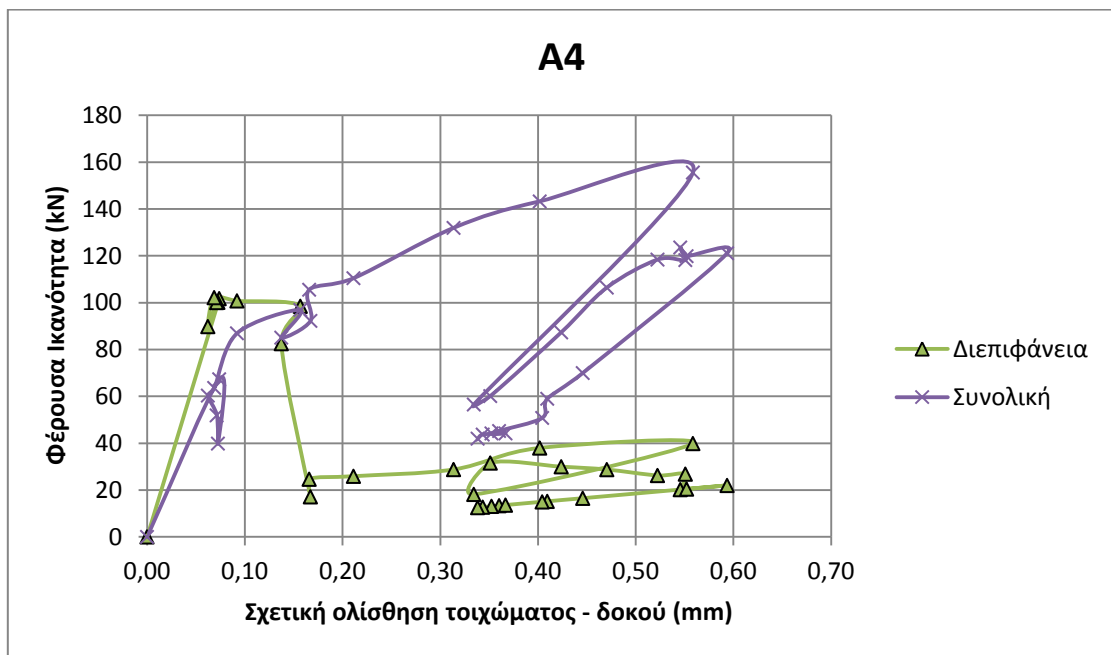
Σχήμα 9.4.1: Φέρουσα ικανότητα διεπιφάνειας συναρτήσει της ολίσθησης  $s$  βάσει του προσομοιώματος της συμβολής των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων της διεπιφάνειας



Σχήμα 9.4.2: Φέρουσα ικανότητα διεπιφάνειας συναρτήσει της αποκόλλησης  $w$  βάσει του προσομοιώματος της συμβολής των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων της διεπιφάνειας



Σχήμα 9.4.3: Ενεργοποίηση του κάθε μηχανισμού για τις διάφορες τιμές της ολίσθησης



Σχήμα 9.4.4: Σύγκριση φέρουσας ικανότητας της διεπιφάνειας τοιχώματος – δοκού με τη συνολική αντίσταση του συστήματος πλαισίου – τοιχώματος

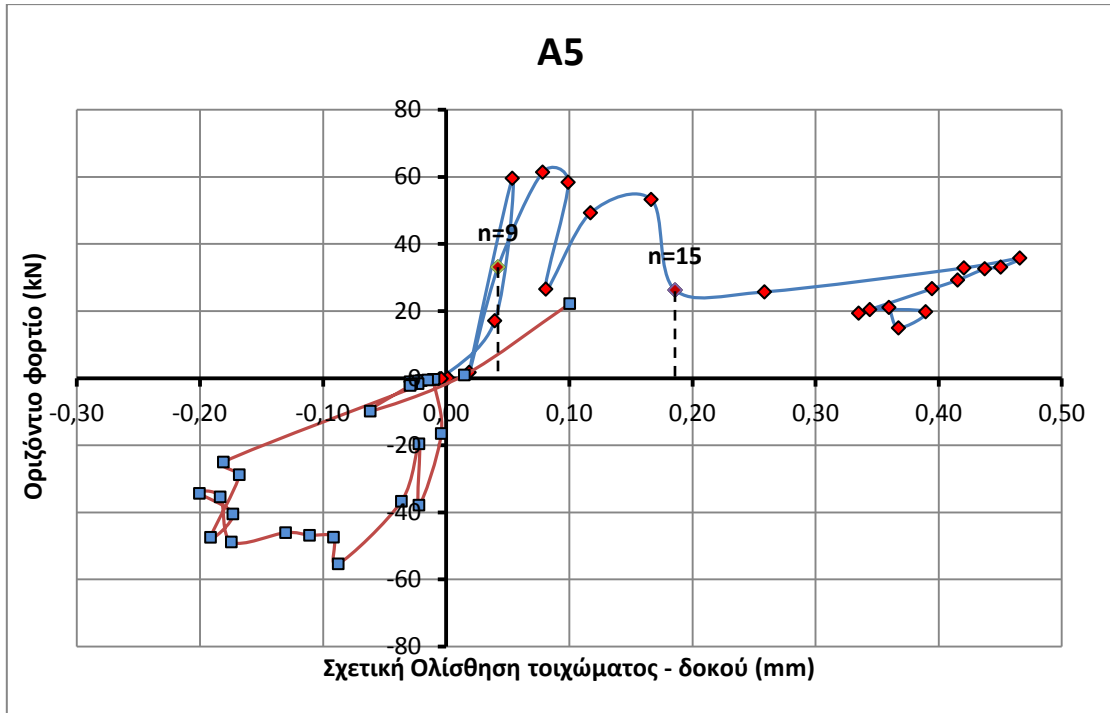
- Δοκίμιο A5

Όμοια με το δοκίμιο A4, δεν έχει γίνει τεχνητή εκτράχυνση στις διεπιφάνειες τοιχώματος – περιβάλλοντος πλαισίου. Στους πρώτους 5 κύκλους φόρτισης παρατηρείται αύξηση της αποκόλλησης χωρίς αυτή να συνοδεύεται από αξιόλογη ολίσθηση. ο περιορισμός της αποκόλλησης οφείλεται στην ύπαρξη μεταλλικών συνδέσμων κατά μήκος της των διεπιφανειών του τοιχώματος με τα υποστυλώματα. Έτσι, η αντίσταση της διεπιφάνειας είναι σχεδόν μηδενική. Στον 6<sup>ο</sup> κύκλο ( $P_{\max,n=6}=57.69$  kN,  $s=0.04$  mm,  $w=0.03$  mm), η ολίσθηση αυξάνεται ξαφνικά με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση των μηχανισμών της διεπιφάνειας ( $V_{\delta\epsilon\pi.}=17.14$  kN). Στον αμέσως επόμενο κύκλο ( $n=7$ ) παρατηρείται απότομη αύξηση της τιμής του φορτίου της διεπιφάνειας ( $V_{\delta\epsilon\pi.}=59.61$  kN). Στο στάδιο αυτό η τιμή της ολίσθησης και της αποκόλλησης ( $s=0.05$ ,  $w=0.03$ ) είναι τέτοιες έτσι ώστε να μεγιστοποιούνται οι επιφάνειες επαφής των αδρανών και η συμβολή της αλληλοεμπλοκής να γίνεται μέγιστη. Η δύναμη του μηχανισμού δράσης βλήτρου ακόμα βρίσκεται σε πολύ χαμηλές τιμές.

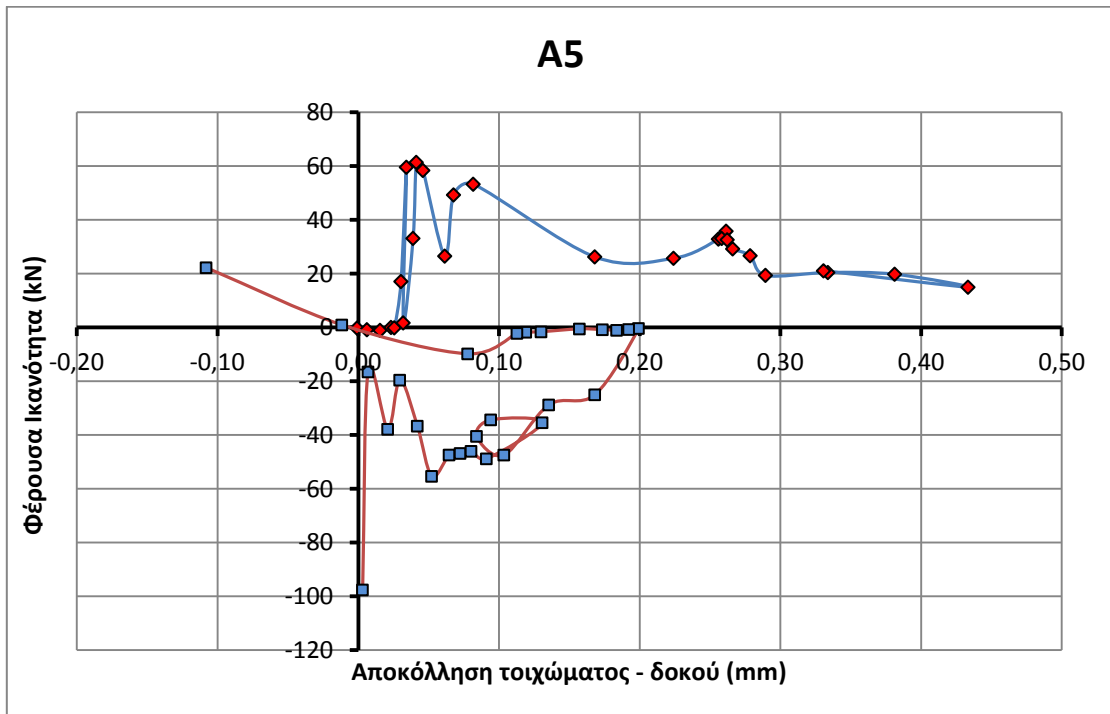
Μέχρι τον 9<sup>ο</sup> κύκλο ( $P_{\max,n=9}=81.82$  kN,  $s=0.04$  mm,  $w=0.04$  mm) προσωρινά το φορτίο αντίστασης της διεπιφάνειας μειώνεται και τούτο διότι όταν ο ρυθμός αύξησης της αποκόλλησης είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της ολίσθησης, η δράση του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών φθίνει. Στον 10<sup>ο</sup> κύκλο φόρτισης ( $P_{\max,n=10}=96.29$  kN,  $s=0.08$  mm,  $w=0.04$  mm) επιτυγχάνεται το μέγιστο φορτίο αντίστασης ( $V_{\delta\epsilon\pi.}=61.42$  kN). Ο διπλασιασμός της τιμής της ολίσθησης συμβάλλει στην αύξηση των επιφανειών επαφής και κατά συνέπεια στην αύξηση της δύναμης του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών. Επιπλέον αυξάνεται και η δύναμη του μηχανισμού δράσης βλήτρου αλλά ακόμα ο μηχανισμός αυτός δεν είναι ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς τέμνουσας.

Στον 15<sup>ο</sup> κύκλο επιτυγχάνεται το μέγιστο φορτίο ( $P_{\max,n=15}=146.05$  kN,  $s=0.19$  mm,  $w=0.17$  mm). Η αντίσταση στη διεπιφάνεια είναι  $V_{\delta\epsilon\pi.}=26.28$  kN (μειωμένη κατά 57% της μέγιστης).

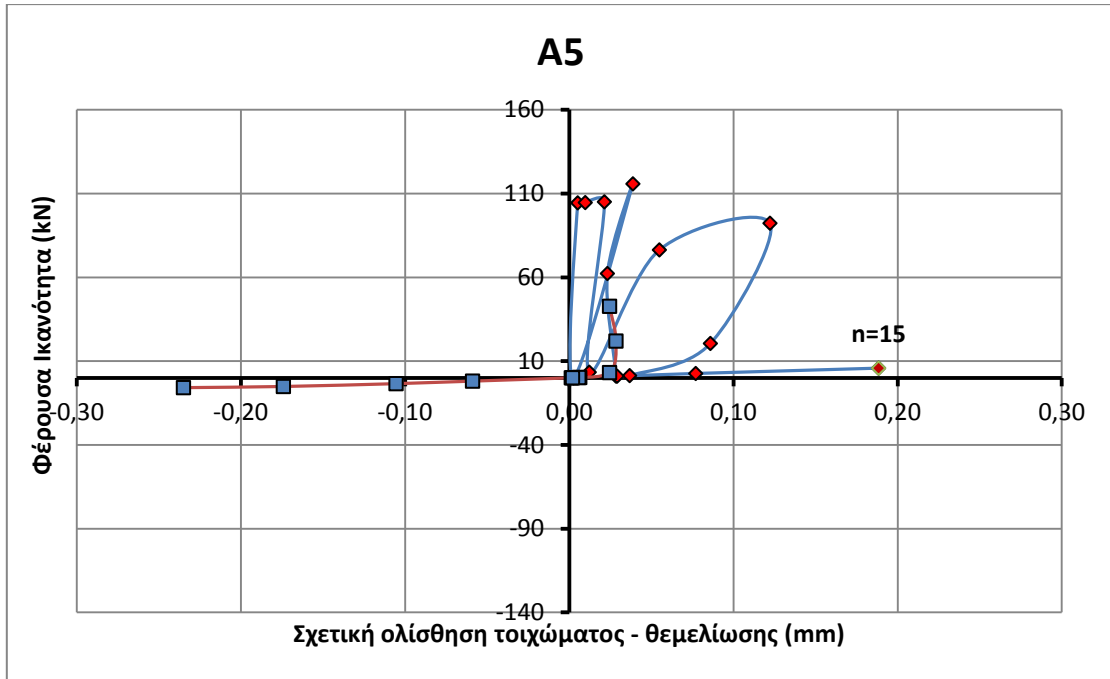
Πρέπει να τονιστεί ότι στο συγκεκριμένο δοκίμιο η αστοχία περιβάλλοντος πλαισίου δεν οφείλεται σε αστοχία στη διεπιφάνεια τοιχώματος – δοκού. Μετά τον 15<sup>ο</sup> κύκλο ( $s=0.19$  mm,  $w=0.48$  mm,  $V_{\delta\epsilon\pi.}=5.80$  kN στη διεπιφάνεια τοιχώματος – θεμελίωσης), επέρχεται εξόλκευση των βλήτρων εξαιτίας της μεγάλης τιμής της αποκόλλησης ( $F_s=88.56$  kN  $>$   $R_c=68.11$  kN) κοντά στη βάση των υποστυλωμάτων, με αποτέλεσμα η ένταση να μεταφέρεται στα ασθενή υποστυλώματα του περιβάλλοντος πλαισίου. Εν τέλει, αυτά αστοχούν καμπτοδιαμητικά στη βάση τους.



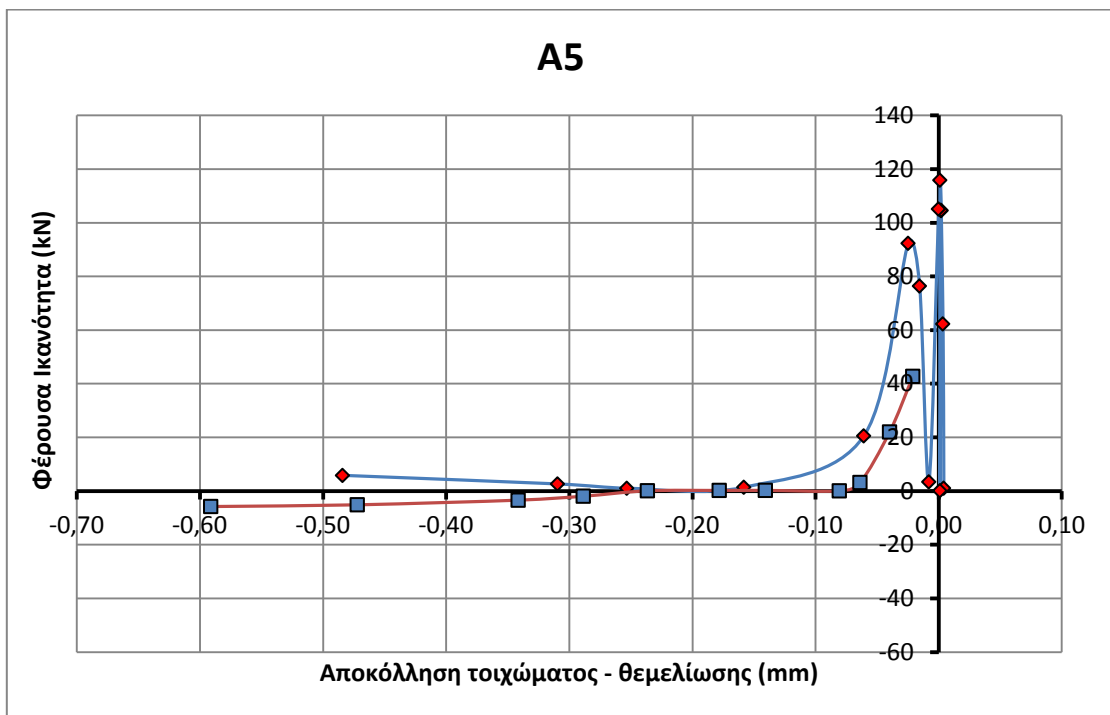
**Σχήμα 9.4.5:** Φέρουσα ικανότητα διεπιφάνειας συναρτήσεως της ολίσθησης  $s$  βάσει του προσομοιώματος της συμβολής των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων της διεπιφάνειας



**Σχήμα 9.4.6:** Φέρουσα ικανότητα διεπιφάνειας συναρτήσεως της αποκόλλησης  $w$  βάσει του προσομοιώματος της συμβολής των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων της διεπιφάνειας

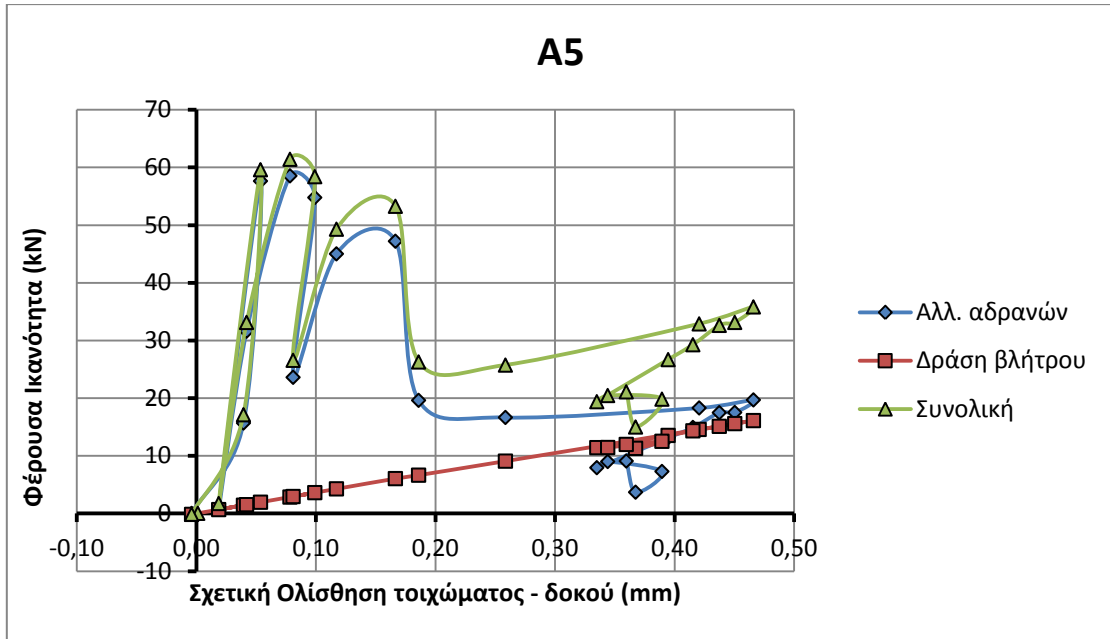


Σχήμα 9.4.7: Φέρουσα ικανότητα διεπιφάνειας συναρτήσει της ολίσθησης  $s$  βάσει του προσομοιώματος της συμβολής των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων της διεπιφάνειας

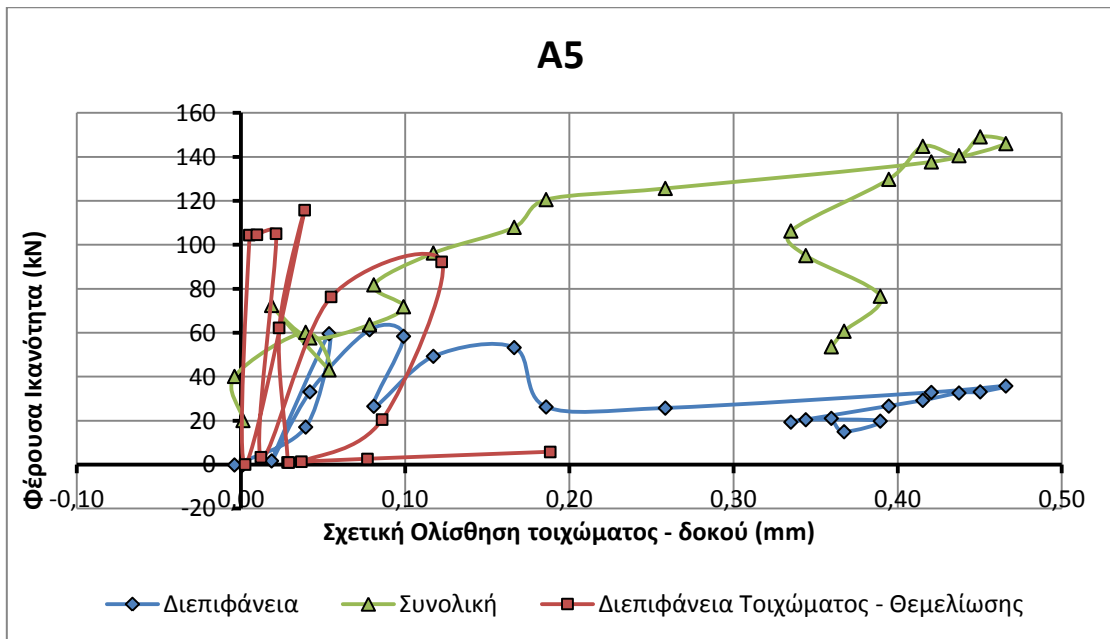


Σχήμα 9.4.8: Φέρουσα ικανότητα διεπιφάνειας συναρτήσει της αποκόλλησης  $w$  βάσει του προσομοιώματος της συμβολής των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων της διεπιφάνειας





Σχήμα 9.4.9: Ενεργοποίηση του κάθε μηχανισμού για τις διάφορες τιμές της ολίσθησης



Σχήμα 9.4.10: Σύγκριση φέρουσας ικανότητας της διεπιφάνειας τοιχώματος – δοκού & τοιχώματος – θεμελίωσης με τη συνολική αντίσταση του συστήματος πλαισίου – τοιχώματος

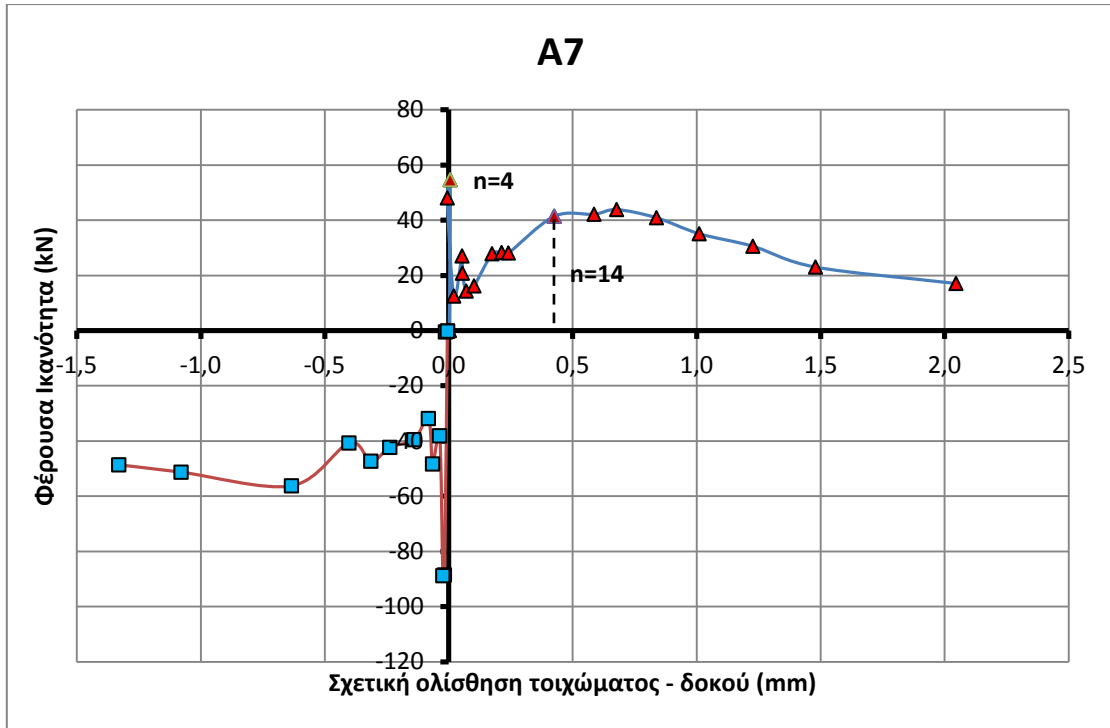
- Δοκίμιο A7

Κατά τους πρώτους κύκλους φόρτισης δεν παρατηρείται ολίσθηση και αποκόλληση στη διεπιφάνεια τοιχώματος – δοκού με αποτέλεσμα να μην ενεργοποιούνται οι μηχανισμοί στη διεπιφάνεια. Σε επόμενους κύκλους ( $n \geq 4$ ), που αυξάνεται η επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση στην κορυφή του πλαισίου, παρατηρείται σταδιακή αύξηση της ολίσθησης και της αποκόλλησης, με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων στη διεπιφάνεια.

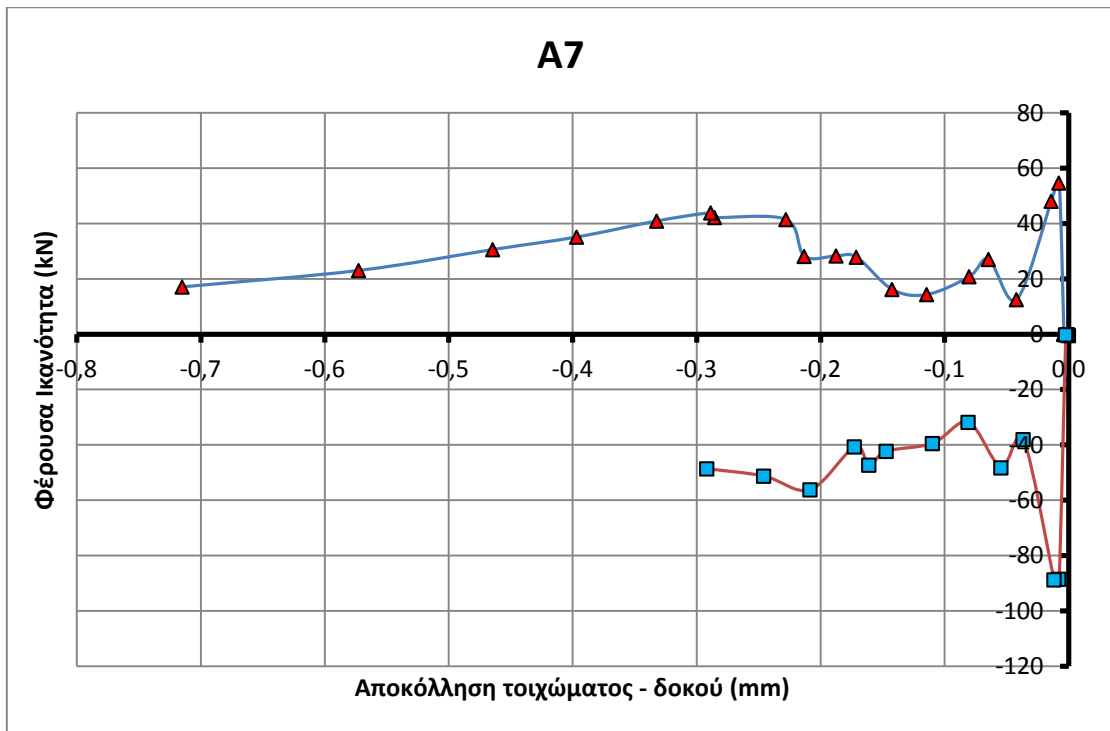
Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη αντίσταση της διεπιφάνειας επιστρατεύεται στον 4<sup>ο</sup> κύκλο φόρτισης ( $V_{\text{διεπ.}}=54.67 \text{ kN}$ ,  $P_{\text{max},n=4}=100.28 \text{ kN}$ ,  $s=0.01 \text{ mm}$ ,  $w=0.01 \text{ mm}$ ). Η αντίσταση της διεπιφάνειας στο στάδιο αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην αλληλοεμπλοκή των αδρανών που προεξέχουν στη διεπιφάνεια, και τούτο διότι λόγω της μικρής τιμής της ολίσθησης και της αποκόλλησης, αυξάνονται οι επιφάνειες επαφής μεταξύ των αδρανών με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αντίσταση από το συγκεκριμένο μηχανισμό. Ο μηχανισμός δράσης βλήτρου δίνει πολύ μικρή συνεισφορά εξαιτίας της μικρής τιμής της ολίσθησης.

Για το δοκίμιο A7 ο ρυθμός αύξησης της ολίσθησης είναι περίπου ίδιος με αυτόν της αποκόλλησης. Συνέπεια αυτού είναι οι επιφάνειες επαφής των αδρανών στη διεπιφάνεια να μειώνονται σταδιακά και έτσι η προσφορά του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής να φθίνει με την πρόοδο των ανακυκλίσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι μεταξύ του 13<sup>ου</sup> ( $P_{\text{max},n=13}=302.86 \text{ kN}$ ,  $s=0.24 \text{ mm}$ ,  $w=0.21 \text{ mm}$ ) και 14<sup>ου</sup> κύκλου φόρτισης ( $P_{\text{max},n=14}=295.56 \text{ kN}$ ,  $s=0.43 \text{ mm}$ ,  $w=0.23 \text{ mm}$ ) σημειώθηκε απότομη αύξηση της ολίσθησης. Λόγω της αύξησης αυτής, και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν συνοδεύεται από απότομη αύξηση της αποκόλλησης, αυξάνονται προς στιγμήν οι επιφάνειες επαφής των αδρανών με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συνεισφορά του μηχανισμού αλληλεμπλοκής. Παράλληλα, δεν πρέπει να αμελήσουμε και την αύξηση της αντίστασης του μηχανισμού δράσης βλήτρου. Κατά αυτόν τον τρόπο μπορεί να εξηγηθεί το άλμα της τιμής της αντίστασης της διεπιφάνειας ( $V_{\text{διεπ.},n=13}=28.15 \text{ kN}$ ,  $V_{\text{διεπ.},n=14}=41.45 \text{ kN}$ ).

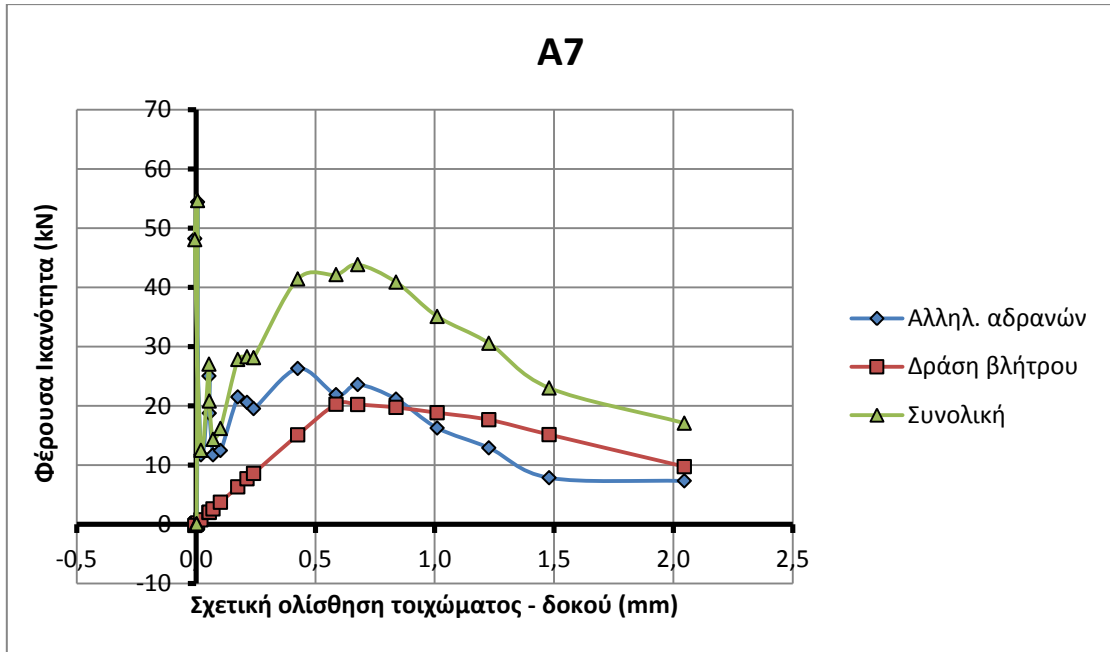
Για τους επόμενους κύκλους φόρτισης ( $n > 14$ ) ο ρυθμός μεταβολής της ολίσθησης και της αποκόλλησης σταδιακά αυξάνεται. Ήδη από τον 15<sup>ο</sup> κύκλο ( $V_{\text{διεπ.}}=42.18 \text{ kN}$ ,  $P_{\text{max},n=15}=327.98 \text{ kN}$ ,  $s=0.59 \text{ mm}$ ,  $w=0.29 \text{ mm}$ ) και θεωρώντας ότι η μέγιστη αντίσταση βλήτρου επιτυγχάνεται για ολίσθηση  $s_{\text{max}}=0.1d_b=0.6 \text{ mm}$  και έπειτα παραμένει σταθερή, η αντίσταση της διεπιφάνειας μειώνεται. Στον 19<sup>ο</sup> κύκλο φόρτισης ( $P_{\text{max},n=19}=363.05 \text{ kN}$ ,  $s=1.23 \text{ mm}$ ,  $w=0.46 \text{ mm}$ ) που παρατηρείται το μέγιστο φορτίο για όλο το σύστημα πλαισίου - τοιχώματος η αντίσταση της διεπιφάνειας έχει μειωθεί στην τιμή 30.59 kN (μείωση κατά 44% από τη μέγιστη τιμή της). Μεταξύ 21<sup>ου</sup> και 22<sup>ου</sup> κύκλου, τελικά, επέρχεται εξόλκευση των βλήτρων ( $P_{\text{max},n=22}=333.03 \text{ kN}$ ,  $s=3.44 \text{ mm}$ ,  $w=0.94 \text{ mm}$ ,  $F_s=101.26 > R_c=82.92 \text{ kN}$   $R_c$ : αντοχή έναντι εξόλκευσης)



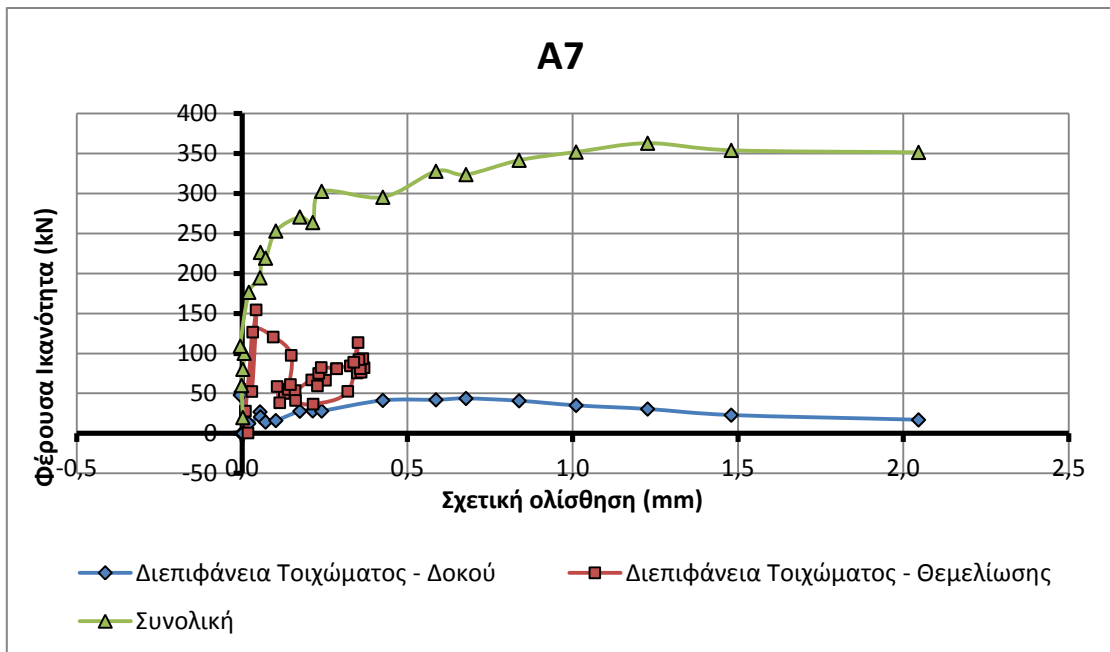
**Σχήμα 9.4.11:** Φέρουσα ικανότητα διεπιφάνειας συναρτήσεως της ολίσθησης  $s$  βάσει του προσομοιώματος της συμβολής των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων της διεπιφάνειας



**Σχήμα 9.4.12:** Φέρουσα ικανότητα διεπιφάνειας συναρτήσεως της αποκόλλησης  $w$  βάσει του προσομοιώματος της συμβολής των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων της διεπιφάνειας



Σχήμα 9.4.13: Ενεργοποίηση του κάθε μηχανισμού για τις διάφορες τιμές της ολίσθησης



Σχήμα 9.4.14: Σύγκριση φέρουσας ικανότητας της διεπιφάνειας τοιχώματος – δοκού & τοιχώματος – θεμελίωσης με τη συνολική αντίσταση του συστήματος πλαισίου – τοιχώματος

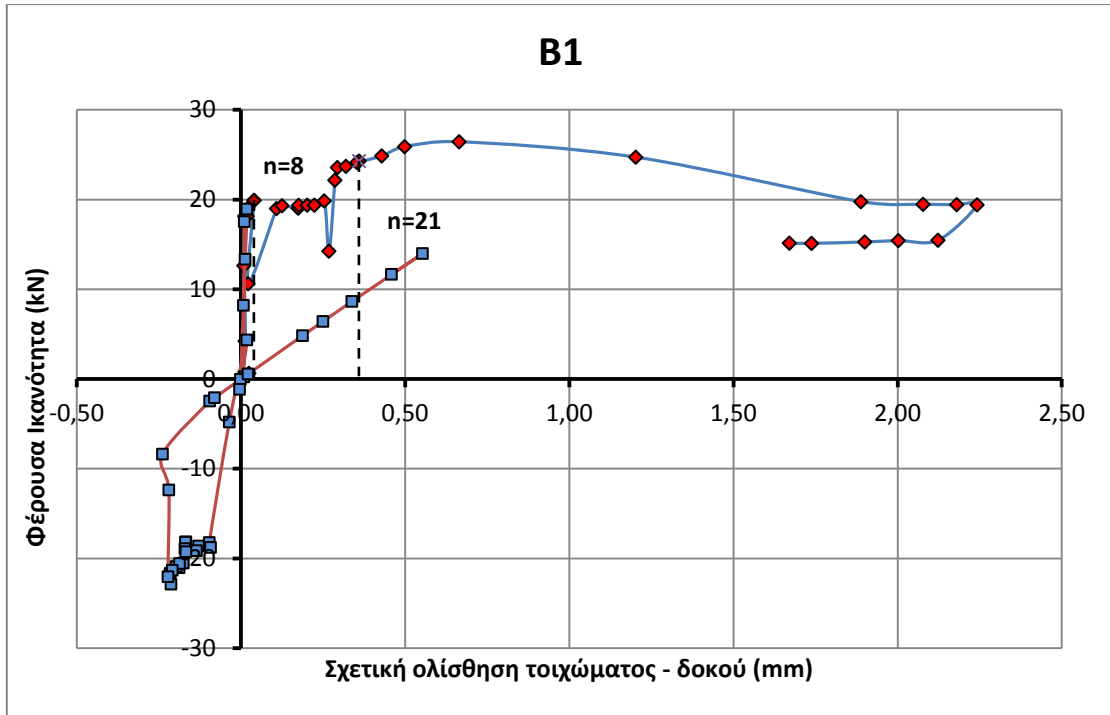
- Δοκίμιο B1

Μέχρι και τον 8<sup>ο</sup> κύκλο ( $P_{\max,n=8}=19.91$  kN,  $s=0.04$  mm,  $w=0.03$  mm,  $V_{\text{διεπ.}}=10.61$  kN) το φορτίο αντίστασης της διεπιφάνειας αυξάνεται με τον ίδιο ρυθμό αύξησης της αποκόλλησης και της ολίσθησης. Στον 10<sup>ο</sup> κύκλο φόρτισης παρατηρείται απότομη αύξηση της ολίσθησης που δεν ακολουθείται από ανάλογη αύξηση της αποκόλλησης. Εξαιτίας αυτού, μεταξύ του 9<sup>ου</sup> και 10<sup>ου</sup> κύκλου, ο μηχανισμός αλληλοεμπλοκής αδρανών ενεργοποιείται περισσότερο με αποτέλεσμα να υπάρχει και απότομη αύξηση της τιμής του φορτίου αντίστασης διεπιφάνειας ( $V_{\text{διεπ.}}=18.99$  kN).

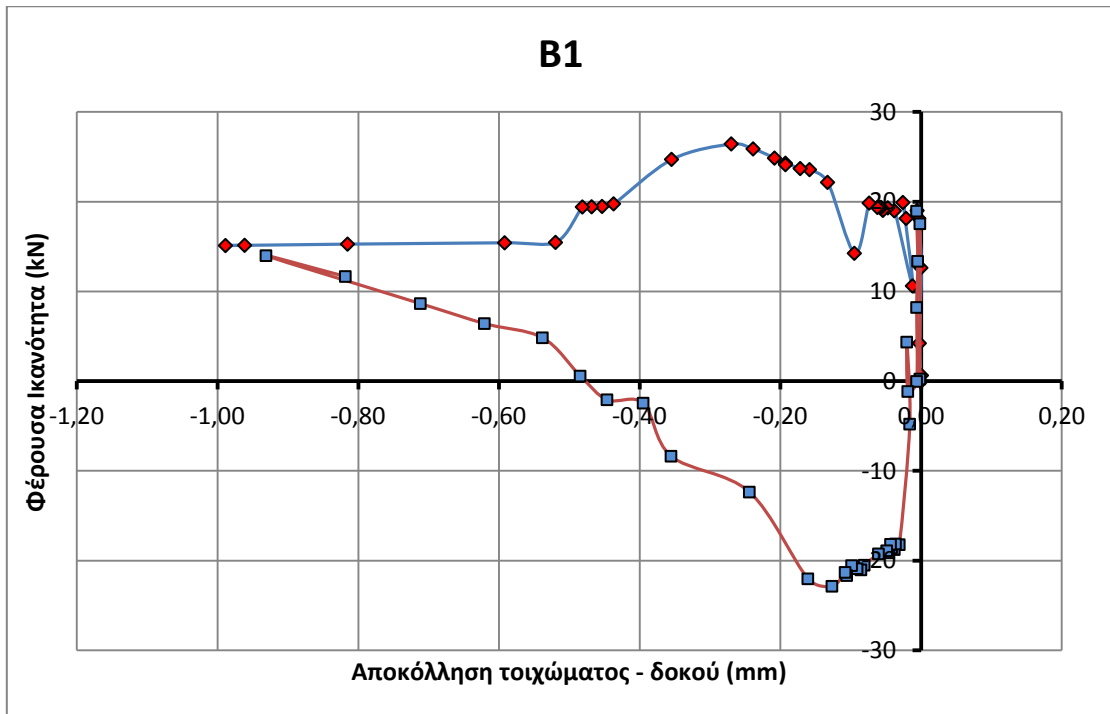
Το μέγιστο οριζόντιο φορτίο για ολόκληρο το σύστημα πλαισίου – τοιχώματος επιτυγχάνεται σε προγενέστερο κύκλο ( $n=21$ ,  $P_{\max}=122.69$  kN,  $s=0.36$  mm,  $w=0.19$  mm,  $V_{\text{διεπ.}}=24.13$  kN) από αυτόν που επιτυγχάνεται η μέγιστη αντίσταση της διεπιφάνειας ( $n=25$ ,  $P_{\max}=114.86$  kN,  $s=0.66$  mm,  $w=0.27$  mm,  $V_{\text{διεπ.}}=26.44$  kN). Στο συγκεκριμένο σημείο της δοκιμής έχει ενεργοποιηθεί πλήρως ο μηχανισμός δράσης βλήτρου ενώ η δράση του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών έχει πτωτική πορεία.

Καθόλη τη διάρκεια της δοκιμής οι μηχανισμοί της διεπιφάνειας τοιχώματος – δοκού συνέβαλαν στην συνολική αντοχή του συστήματος. Μετά τον 25<sup>ο</sup> κύκλο δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις στα βλήτρα (βάσει του προσομοιώματος BEF) κάτι που οδηγεί στην ανεξέλεγκτη σχετική ολίσθηση του τοιχώματος με το πλαίσιο. Αξίζει να σημειωθεί πως στον αμέσως επόμενο κύκλο η τιμή της ολίσθησης σχεδόν διπλασιάζεται ( $n=26$ ,  $P_{\max}=112.04$  kN,  $s=1.20$  mm,  $w=0.35$  mm,  $V_{\text{διεπ.}}=24.72$  kN). Έτσι η ένταση μεταφέρεται από το τοίχωμα στο περιβάλλον πλαίσιο προκαλώντας ρωγμές στους κόμβους της δοκού με τα υποστυλώματα.

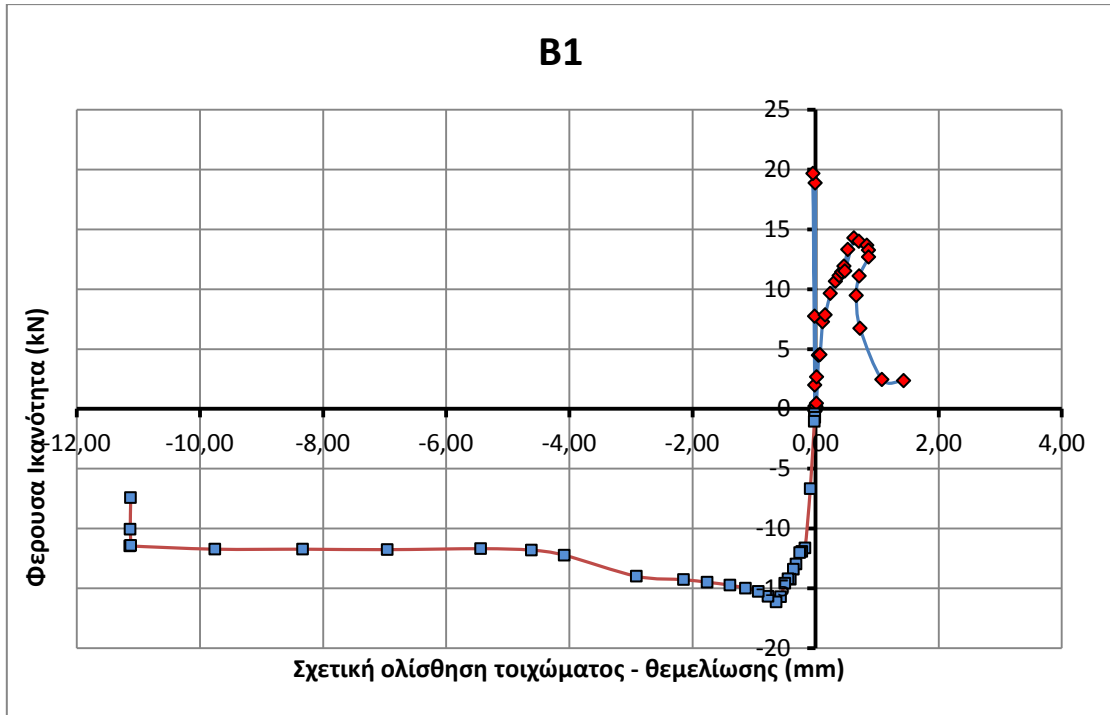
Στη διεπιφάνεια τοιχώματος – θεμελίωσης παρατηρούμε ότι η αντίσταση της διεπιφάνειας, όπως αυτή υπολογίζεται από το προσομοίωμα, συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι το σημείο που τα βλήτρα στη διεπιφάνεια διαρρέουν. Μετά το σχηματισμό των πλαστικών αρθρώσεων στα βλήτρα, υπάρχει αύξηση της τιμής της ολίσθησης, αλλά μικρότερου εύρους από αυτό των δοκιμίων της σειράς A, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στο μεγαλύτερο βάθος έμπηξης. Η ολίσθηση συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι το σημείο που τελικά γίνεται θραύση των βλήτρων (μεταξύ  $n=32$  και  $n=33$ ) (λόγω του μεγάλου βάθους έμπηξης (120 mm) δεν γίνεται εξόλκευση) οπότε η τιμή της ολίσθησης αυξάνεται απότομα και σε μεγάλο βαθμό. Έτσι μεγαλώνει και η ένταση που καταπονεί το πλαίσιο, ιδιαίτερα στη βάση των υποστυλωμάτων που τελικά αστοχούν καμποδοιατητικά.



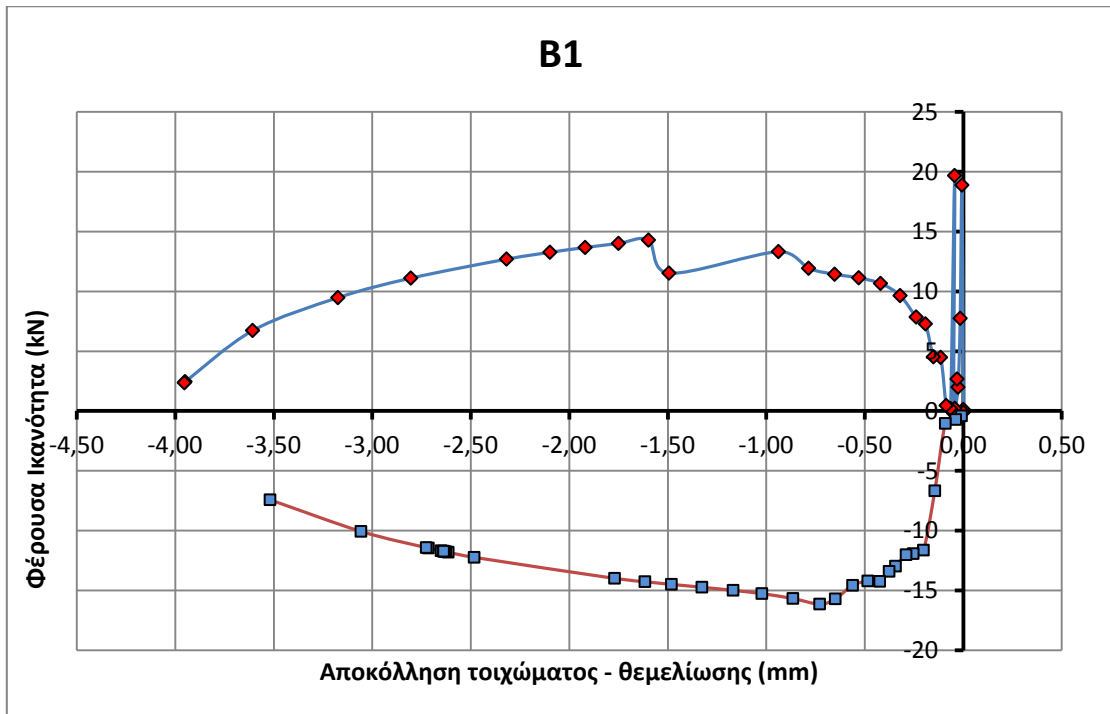
Σχήμα 9.4.15: Φέρουσα ικανότητα διεπιφάνειας συναρτήσει της ολίσθησης  $s$  βάσει του προσομοιώματος της συμβολής των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων της διεπιφάνειας



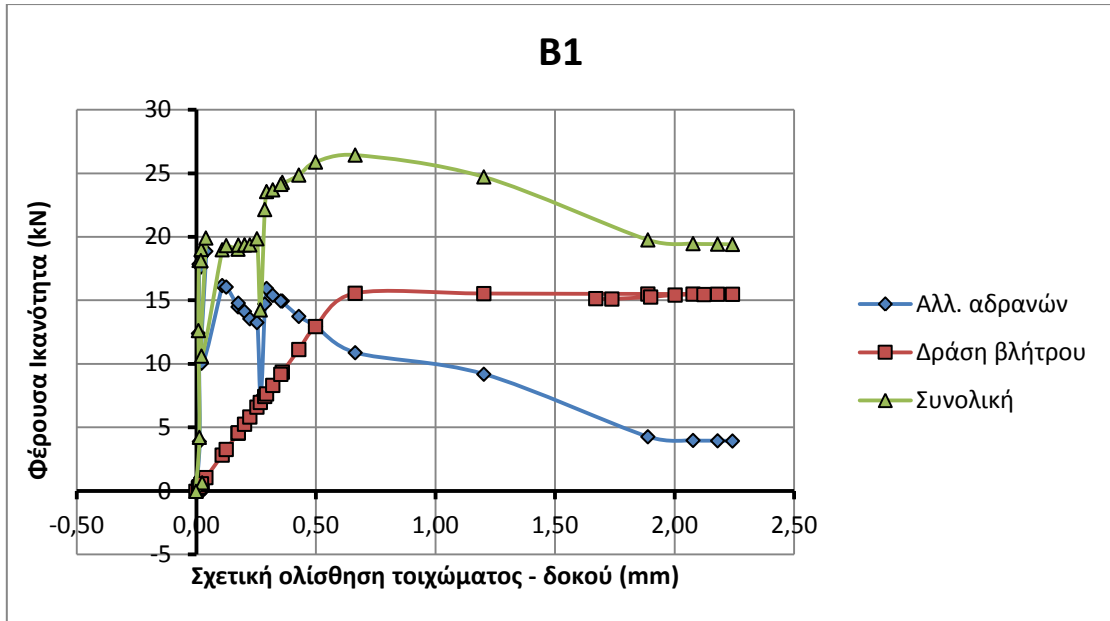
Σχήμα 9.4.16: Φέρουσα ικανότητα διεπιφάνειας συναρτήσει της αποκόλλησης  $w$  βάσει του προσομοιώματος της συμβολής των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων της διεπιφάνειας



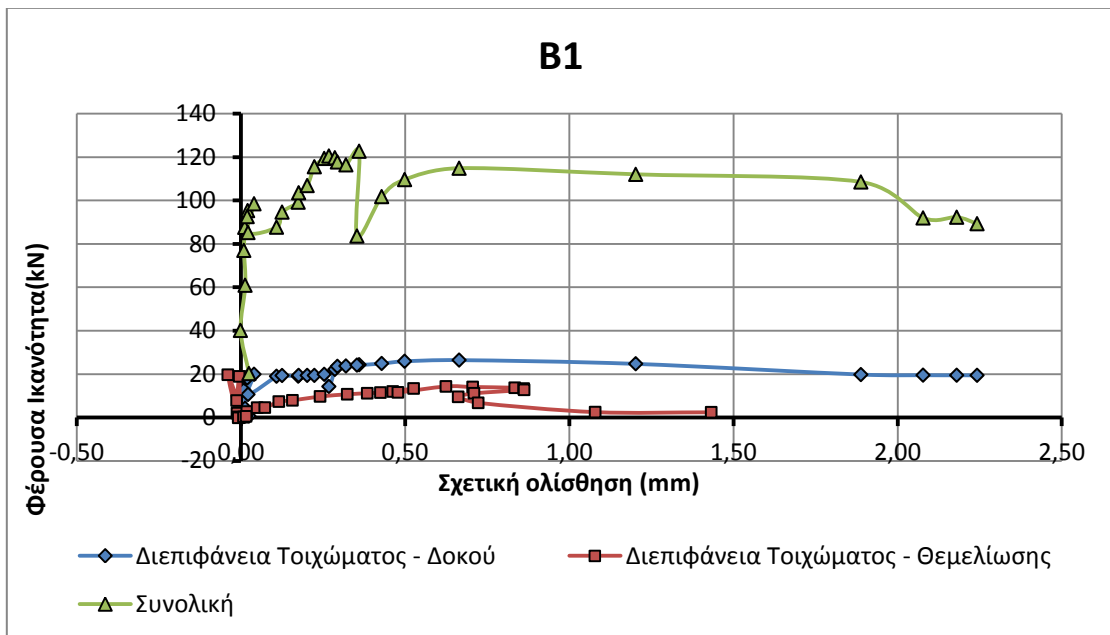
Σχήμα 9.4.17: Φέρουσα ικανότητα διεπιφάνειας συναρτήσει της ολίσθησης  $s$  βάσει του προσομοιώματος της συμβολής των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων της διεπιφάνειας



Σχήμα 9.4.18: Φέρουσα ικανότητα διεπιφάνειας συναρτήσει της αποκόλλησης  $w$  βάσει του προσομοιώματος της συμβολής των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων της διεπιφάνειας



Σχήμα 9.4.19: Ενεργοποίηση του κάθε μηχανισμού για τις διάφορες τιμές της ολίσθησης



Σχήμα 9.4.20: Σύγκριση φέρουσας ικανότητας της διεπιφάνειας τοιχώματος – δοκού & τοιχώματος – θεμελίωσης με τη συνολική αντίσταση του συστήματος πλαισίου – τοιχώματος

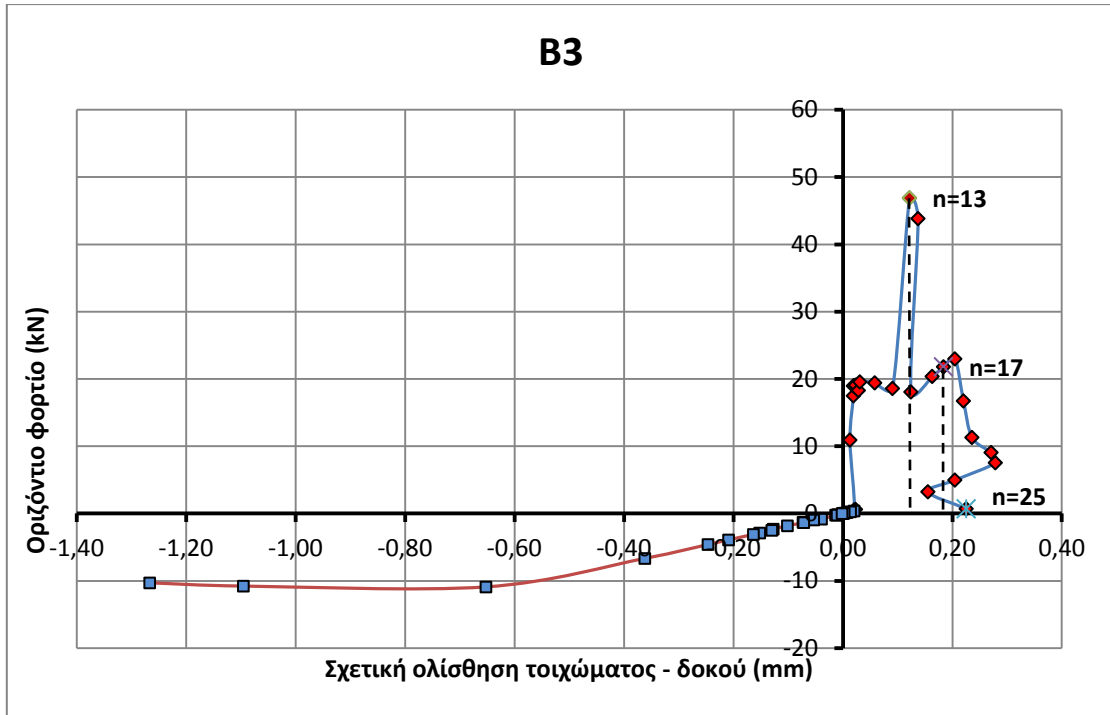


- Δοκίμιο Β3

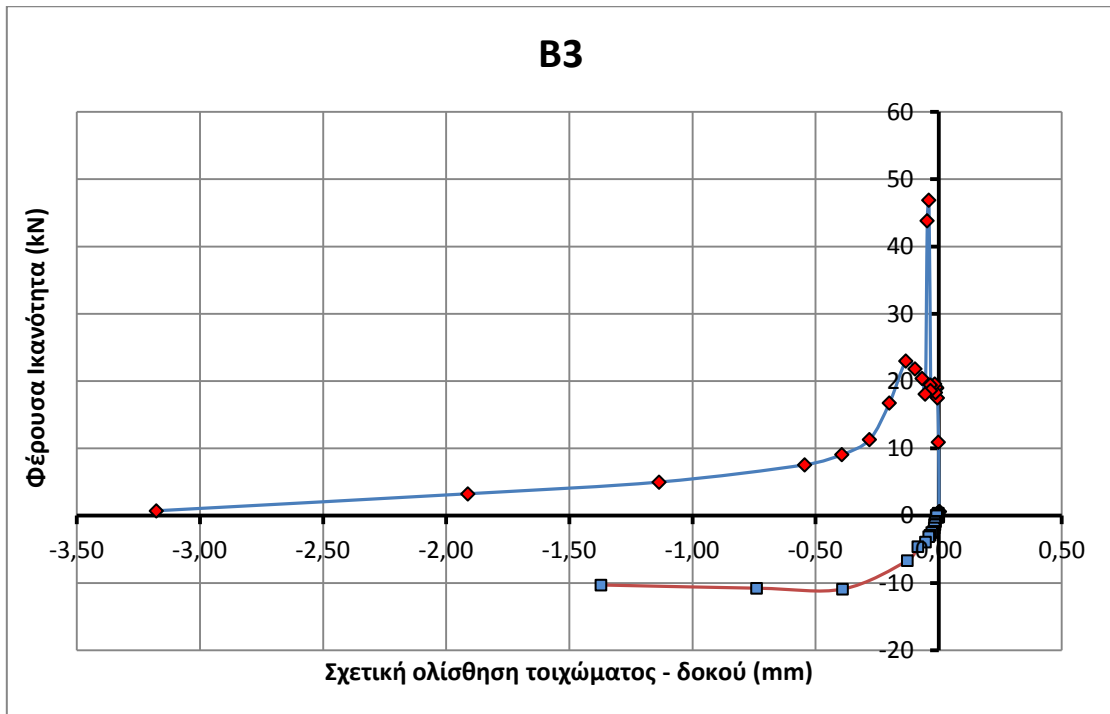
Το μέγιστο φορτίο αντίστασης της διεπιφάνειας εντοπίζεται στον κύκλο  $n=13$  ( $P_{\max}=85.40$  kN,  $s=0.12$  mm,  $w=0.04$  mm,  $V_{\text{διεπ.}}=46.83$  kN), δηλαδή 3 κύκλους πριν εμφανιστεί το μέγιστο φορτίο αντίστασης για ολόκληρο το σύστημα πλαισίου – τοιχώματος. Στο στάδιο αυτό ο βασικός μηχανισμός ανάληψης διατμητικών τάσεων είναι ο μηχανισμός αλληλοεμπλοκής αδρανών. Ο μηχανισμός δράσης βλήτρου ακόμα δεν έχει ενεργοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό (20% της αντοχής του) εξαιτίας της μικρής τιμής της ολίσθησης που έχει συμβεί μέχρι το σημείο αυτό.

Για  $n=17$  ( $P_{\max}=100.18$  kN,  $s=0.18$  mm,  $w=0.10$  mm,  $V_{\text{διεπ.}}=21.81$  kN), η αντίσταση της διεπιφάνειας βρίσκεται ήδη σε φθίνουσα πορεία. Μάλιστα μεταξύ  $n=22$  ( $P_{\max}=94.73$  kN,  $s=0.28$  mm,  $w=0.54$  mm,  $V_{\text{διεπ.}}=7.55$  kN) και  $n=23$  ( $P_{\max}=100.18$  kN,  $s=0.28$  mm,  $w=1.14$  mm,  $V_{\text{διεπ.}}=4.97$  kN) συνέβη απότομη αύξηση της αποκόλλησης που δεν ακολουθήθηκε από ανάλογη αύξηση της ολίσθησης. Συνέπεια αυτού είναι να μειωθεί αρκετά η απόκριση του μηχανισμού βλήτρου εξαιτίας της ταυτόχρονης δράσης αγκυρίου και να μηδενιστεί η δράση του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών. Για  $n=26$  ( $P_{\max}=84.74$  kN,  $s=0.75$  mm,  $w=3.29$  mm,  $V_{\text{διεπ.}}=11.05$  kN) γίνεται εξόλκευση των βλήτρων. Για  $n=30$  ( $P_{\max}=80.72$  kN,  $s=2.97$  mm,  $w=5.39$  mm,  $V_{\text{διεπ.}}=17.00$  kN) γίνεται θραύση των βλήτρων στη διεπιφάνεια με αποτέλεσμα η ένταση να μεταφέρεται στο περιβάλλον πλαίσιο. Τελικά επέρχεται διατμητική αστοχία των κόμβων δοκού – υποστυλωμάτων.

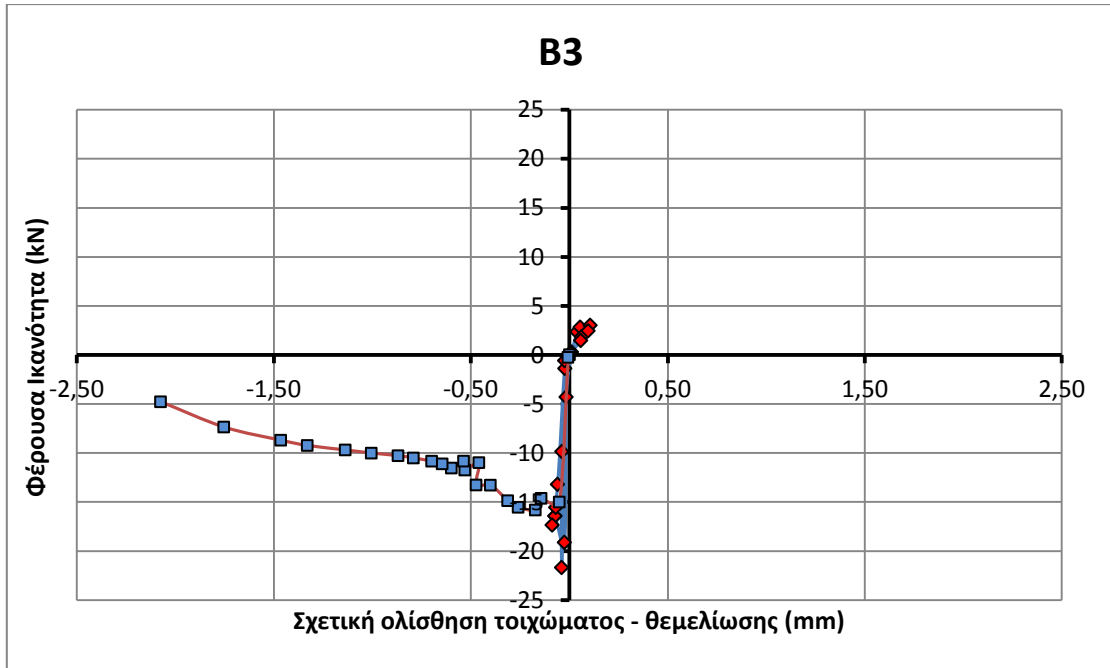
Στη διεπιφάνεια τοιχώματος – θεμελίωσης η αντίσταση που υπολογίζεται ότι επιστρατεύεται στην επιβαλλόμενη μετακίνηση είναι πολύ μικρότερη. Εμφανίζεται για  $n=3$  ( $P_{\max}=47.33$  kN,  $s=0.05$  mm,  $w=0.06$  mm) και είναι  $V_{\text{διεπ.}}=15.00$  kN. Για  $n=14$  ( $P_{\max}=91.67$  kN,  $s=0.64$  mm,  $w=0.78$  mm) ενεργοποιείται πλήρως ο μηχανισμός δράσης βλήτρου. Από το σημείο αυτό ο ρυθμός αύξησης της ολίσθησης γίνεται όλο και πιο έντονος ως αποτέλεσμα της διαρροής των βλήτρων και την αποδιοργάνωση του περιβάλλοντος σκυροδέματος. Μεταξύ των κύκλων  $n=22$  και  $n=23$  συμβαίνει εξόλκευση των βλήτρων στη διεπιφάνεια.



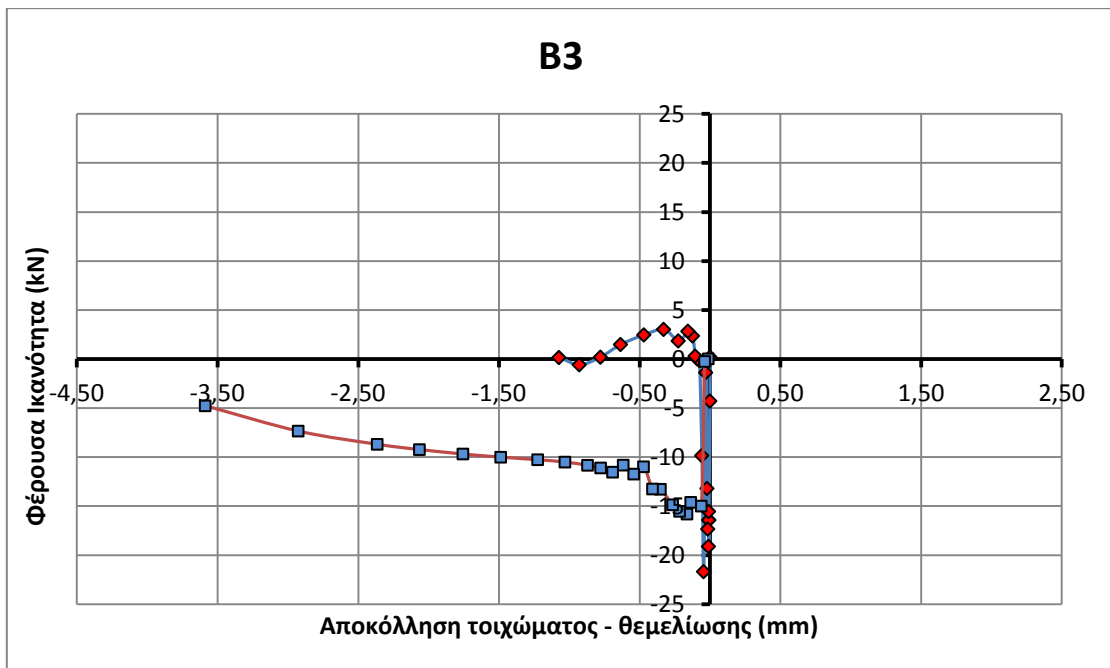
**Σχήμα 9.4.21:** Φέρουσα ικανότητα διεπιφάνειας συναρτήσει της ολίσθησης  $s$  βάσει του προσομοιώματος της συμβολής των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων της διεπιφάνειας



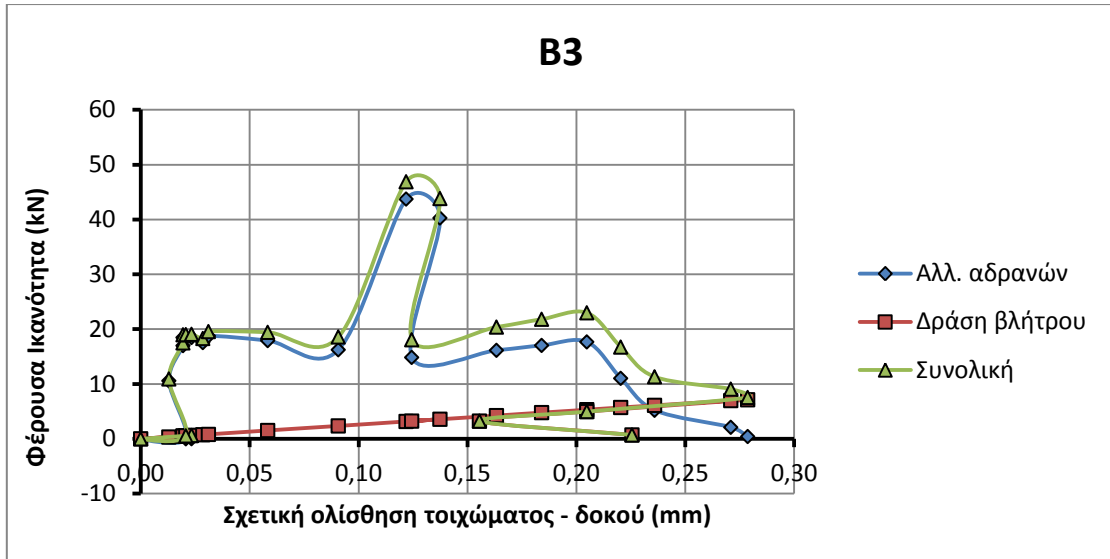
**Σχήμα 9.4.22:** Φέρουσα ικανότητα διεπιφάνειας συναρτήσει της αποκόλλησης  $w$  βάσει του προσομοιώματος της συμβολής των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων της διεπιφάνειας



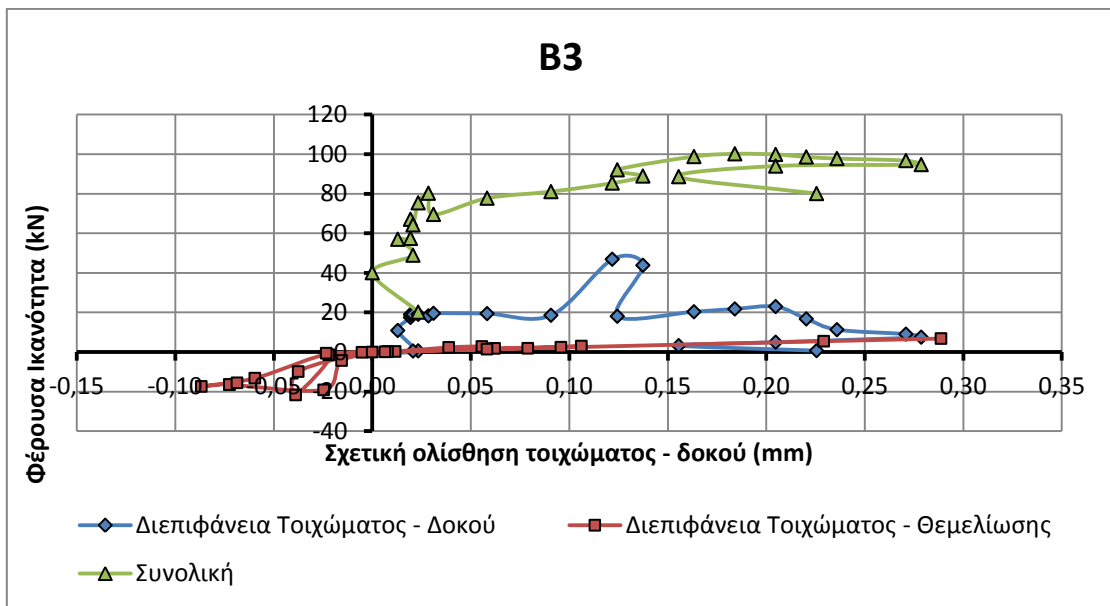
**Σχήμα 9.4.23:** Φέρουσα ικανότητα διεπιφάνειας συναρτήσει της ολίσθησης  $s$  βάσει του προσομοιώματος της συμβολής των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων της διεπιφάνειας



**Σχήμα 9.4.24:** Φέρουσα ικανότητα διεπιφάνειας συναρτήσει της αποκόλλησης  $w$  βάσει του προσομοιώματος της συμβολής των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων της διεπιφάνειας



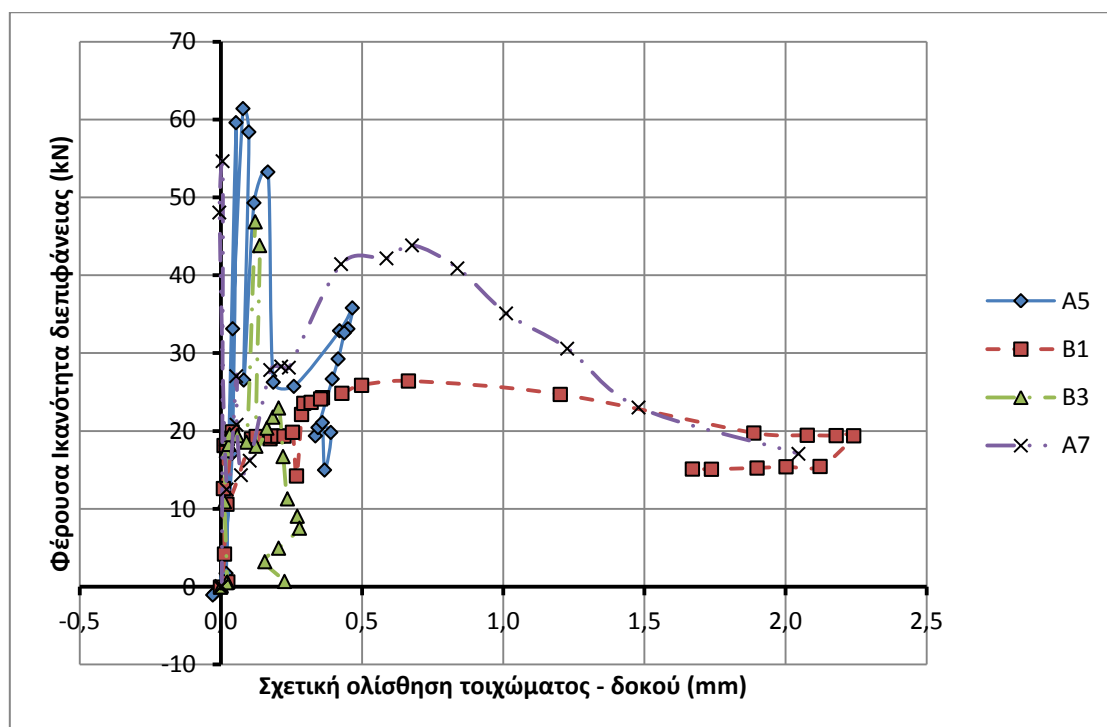
Σχήμα 9.4.25: Ενεργοποίηση του κάθε μηχανισμού για τις διάφορες τιμές της ολίσθησης



Σχήμα 9.4.26: Σύγκριση φέρουσας ικανότητας της διεπιφάνειας τοιχώματος – δοκού & τοιχώματος – θεμελίωσης με τη συνολική αντίσταση του συστήματος πλαισίου – τοιχώματος

## 9.5 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα δοκίμια A5, B1 και B3 έχουν βλήτρα στις διεπιφάνειες άνω και κάτω (με τη δοκό και τη θεμελίωση αντίστοιχα). Η διαφορά είναι ότι το A5 έχει μεγαλύτερο λόγο  $L/h$  ( $L/h=1.73$ ) ενώ τα B1 και B3 έχουν λόγο  $L/h=1.20$ . Επίσης το δοκίμιο B1 διαθέτει «μακριά βλήτρα» ενώ τα υπόλοιπα δύο δοκίμια «κοντά». Στο επόμενο σχήμα γίνεται σύγκριση της φέρουσας ικανότητας των διεπιφανειών που υπολογίστηκαν βάσει του προσομοιώματος για τα δοκίμια αυτά συναρτήσει της ολίσθησης.



Σχήμα 9.4.27: Σύγκριση φέρουσας ικανότητας διεπιφάνειας τοιχώματος - δοκού των δοκιμίων

Παρατηρούμε ότι τη μεγαλύτερη αντοχή παρουσιάζει το δοκίμιο A5. Το δοκίμιο B3 παρουσιάζει την τρίτη μεγαλύτερη αντοχή. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα προαναφερθέντα δοκίμια παρουσιάζουν τη μέγιστη αντοχή τους σε παραπλήσιες ολισθήσεις (0.08 mm για το A5 και 0.12 mm για το B3). Το μικρό μήκος έμπηξης των βλήτρων για τα δοκίμια A5 και B3 οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές της αποκόλλησης. Συνέπεια αυτού είναι με την πρόοδο των ανακυκλίσεων να αυξάνεται η δύναμη εξόλκευσης που καταπονεί τα βλήτρα μειώνοντας την αντοχή σε διάτμηση και οδηγώντας τελικά στη θραύση τους. Για τα δοκίμια A5 και B3 επέρχεται εξόλκευση των βλήτρων για πολύ μικρές τιμές της ολίσθησης, πριν επιτευχθεί το μέγιστο φορτίο αντίστασης του μηχανισμού δράσης βλήτρου ( $A5: s=0.19 \text{ mm} < s_{\max}(=0.6 \text{ mm})$ ,  $B3: s=0.23 \text{ mm} < s_{\max}$ ). Αντίθετα, το δοκίμιο B1, με «μακριά» βλήτρα, επιστρατεύει μικρότερη αντοχή διεπιφάνειας, αρχικά, στη συνέχεια, όμως,

για μεγαλύτερες τιμές της ολίσθησης παρουσιάζει σχεδόν σταθερή τιμή του φορτίου αντίστασης («παραμένουσα» αντοχή). Για τα δοκίμια A5 και B3, μετά την επίτευξη της μέγιστης αντίστασης της διεπιφάνειας, επέρχεται απότομη πτώση της αντοχής σε αντίθεση με το B1 στο οποίο η φέρουσα ικανότητα της διεπιφάνειας αρχίζει να μειώνεται για ολίσθηση μεγαλύτερη από περίπου 1.00 mm. Επίσης, ο ρυθμός πτώσης του φορτίου αντίστασης είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με τα άλλα δοκίμια. Επομένως, η διεπιφάνεια του B1 συμπεριφέρεται πιο πλαστικά σε σχέση με αυτή των δοκιμίων A5 και B3.

Το δοκίμιο A7 διέθετε «μακριά» βλήτρα σε όλες τις διεπιφάνειες περιμετρικά του τοιχώματος καθώς και ενισχυμένα υποστυλώματα. Παρουσιάζει αρχικά μέγιστη φέρουσα ικανότητα για πολύ μικρή ολίσθηση ( $s=0.01$  mm) εξαιτίας της ενεργοποίησης του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών. Στη συνέχεια η αντίσταση της διεπιφάνειας μειώνεται και αυξάνεται πάλι για τιμή της ολίσθησης  $s=0.68$  mm. Από το σημείο αυτό και μέχρι την θραύση των βλήτρων στη διεπιφάνεια ο ρυθμός μείωσης της αντίστασης είναι μικρός. Από το Σχήμα 9.4.27 είναι φανερό ότι το A7 συμπεριφέρεται πιο πλαστικά από όλα τα δοκίμια που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

## 9.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Υπερεκτίμηση της συνεισφοράς του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών στην περίπτωση μη εκτραχυμένης διεπιφάνειας
- Οι διεπιφάνειες δοκιμίων με «μακριά» βλήτρα παρουσιάζουν μια παραμένουσα αντοχή μέχρι να συμβεί εξόλκευση των βλήτρων. Για τα δοκίμια με «κοντά» βλήτρα η εξόλκευση συμβαίνει για μικρότερες τιμές της ολίσθησης και της αποκόλλησης. Η θραύση των βλήτρων όπου παρατηρήθηκε στο τέλος των δοκιμών οφείλεται στη μεγάλη τιμή της σχετικής ολίσθησης που σημειώθηκε στην αστοχία του συστήματος πλαισίου – τοιχώματος.
- Η εφαρμογή του προσομοιώματος του Walraven έχει νόημα στην περίπτωση που έχει γίνει τεχνητή εκτράχυνση στη διεπιφάνεια και έχουν τοποθετηθεί «μακριά» βλήτρα, έτσι ώστε να μπορούν να παραλάβουν τις δυνάμεις εξόλκευσης που οφείλονται στην αύξηση της αποκόλλησης λόγω της υπερπήδησης του ενός αδρανούς πάνω από το άλλο.
- Έτσι για το δοκίμιο A7 που έχει γίνει τεχνητή εκτράχυνση και έχουν τοποθετηθεί και μακριά βλήτρα η φέρουσα ικανότητα της διεπιφάνειας τοιχώματος – δοκού (αυτή είναι που αστοχεί) εμφανίζει 2 μέγιστα. Το πρώτο οφείλεται στην αλληλοεμπλοκή αδρανών λόγω αυξημένων επιφανειών επαφής αδρανών για μικρές τιμές της ολίσθησης και της αποκόλλησης. Το δεύτερο οφείλεται στο γεγονός ότι αυξάνεται η τιμή της ολίσθησης με ρυθμό μεγαλύτερο της αποκόλλησης, το οποίο έχει ως συνέπεια αφενός την αυξημένη συνεισφορά του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών και αφετέρου την μεγαλύτερη ενεργοποίηση του μηχανισμού βλήτρου (προσομοίωμα BEF).
- Η μέγιστη αντίσταση της διεπιφάνειας επιτυγχάνεται λίγο πριν επιτευχθεί η μέγιστη τιμή της αντίστασης του συστήματος πλαισίου – τοιχώματος. Από το σημείο αυτό η ένταση μεταφέρεται σταδιακά στο ασθενέστερο περιβάλλον πλαίσιο με αποτέλεσμα την πτώση της φέρουσας ικανότητας και τελικά την αστοχία.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] **Bass Robert A., Carrasquillo Ramon L., and Jirsa James O.,**  
Shear Transfer across New and Existing Concrete Interfaces, ACI Structural Journal / July-August 1989, 86-s34, pp. 383-393.
- [2] **Birkeland, P.W., Birkeland, U.W.,**  
Connections in precast concrete constructions, ACI-journal, Vol. 63, No.3, March 1966, pp. 345-368.
- [3] **Broms, B.B.,**  
Lateral resistance of piles in cohesive soils, ASCE, Journal of soil mechanics, Vol. 90, No.2, March 1964, pp. 27-59.
- [4] **Choi Dong-Uk, Fowler David W., and Jirsa James O.,**  
Interface Shear Strength of Concrete at Early Ages, ACI Structural Journal /May-June 1999, 96-s37, pp. 343-348
- [5] **Dei Poli S., Di Prisco M., and Gambarova P. G.,**  
Shear Response, Deformations, and Subgrade Stiffness of a Dowel Bar Embedded in Concrete, ACI Structural Journal / November-December 1992, 89-s63, pp. 665-675.
- [6] **Fenwick, R.C., Paulay, T.,**  
Mechanisms of shear resistance of concrete beams, ASCE, Structural Division, Vol. 94, No. 10, Oct. 1968, pp. 2325-2350.
- [7] **Finney, E.A.,**  
Structural design considerations for pavement joints, Subcommittee III, ACI-committee 325, ACI-journal, Proceeding Vol. 53, No 1, 1956, pp. 17-30.
- [8] **Friberg, B.F.,**  
Design of dowels in transverse joints of concrete pavements, Transactions, ASCE, Vol. 105, 1940, pp. 1078-1080.
- [9] **Hofbeck, J.A., Ibrahim, I.O., Mattock, A.U.,**  
Shear transfer in reinforced concrete, ACI-journal, Vol. 66, Febr. 1969, pp. 119-128.
- [10] **Houde, J., Mirza, M.S.,**  
A finite element analysis of shear strength of reinforced concrete beams, ACI-Special Publication 42, 'Shear in reinforced concrete', pp. 103-128.
- [11] **Jimenez, R., White, R.N., Gergely, P.,**  
Cyclic shear and dowel action models in reinforced concrete, ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 108, No. 5, May 1982, pp. 1106-1123.



- [12] **Laible, J.P., White, R.N., Gergely, P.,**  
Experimental investigation of seismic shear transfer across cracks in concrete nuclear containment vessels, ACI-Special Publication 53, Reinforced concrete structures in seismic zones, 1977, pp. 203-226.
- [13] **Mast, R.F.,**  
Auxiliary reinforcement in concrete connections, ASCE, Journal of Structural Division, Vol. 94, No. 6, June 1968, pp. 1485-1499.
- [14] **Mattock, A.H.,**  
Effect of moment torsion across the shear plane on single direction shear transfer strength in monolithic concrete, Report SM 74-3, Dept. of Civil Eng., University of Washington, Seattle, Washington, Aug. 1974.
- [15] **Mattock, A.H.,**  
Shear transfer under monotonic loading, across an interface between concretes cast at different times, Report SM 76-3, Dept. of Civil Eng., University of Washington, Seattle, Washington, Sept. 1976.
- [16] **Mattock, A.H.,**  
Shear transfer under cyclically reversing loads, across an interface between concretes cast at different times, Report SM 77-1, Dept. of Civil Eng., University of Washington, Seattle, Washington, June 1977.
- [17] **Mattock, A.H.,**  
Shear Transfer in Concrete Having Reinforcement at an Angle to the Shear Plane, ACI Special Publication, Vol. 42, 'Shear in reinforced concrete', January 1974, pp. 17-42.
- [18] **Mattock, A.H.,**  
The shear transfer behavior of cracked monolithic concrete subject to cyclically reversing shear, Report SM 74-4, Dept. of Civil Eng., University of Washington, Seattle, Washington, November 1974.
- [19] **Mattock, A.H.,**  
Effect of reinforcing bar size on shear transfer across a crack in concrete, Report SM 77-2, Dept. of Civil Eng., University of Washington, Seattle, Washington, Sept. 1977.
- [20] **Mattock Alan H., Hawkins Neil. M.,**  
SHEAR TRANSFER IN REINFORCED CONCRETE, PCI Journal / March-April 1972, pp.55-75
- [21] **Millard, S.C., Johnson, R.P.,**  
Shear transfer across cracks in reinforced concrete due to aggregate interlock and dowel action, Mag. of concrete research, Vol. 36, No. 126, March 1984, pp. 9-21.

- [22] **Millard, S.G., Johnson, R.P.,**  
Shear transfer in cracked reinforced concrete, Mag. of concrete research, Vol. 37, No. 130, March 1985, pp. 3-15.
- [23] **Paulay, T., Loeber, P.J.,**  
Shear transfer by aggregate interlock, ACI-Special Publication, Vol. 42, 'Shear in reinforced concrete', January 1974, pp. 1-15.
- [24] **Paulay, T., Park, R., Philips, M.H.,**  
Horizontal construction joints in cast in place reinforced concrete, ACI-Special Publication SP-42, Shear in reinforced concrete, Vol. II, pp. 599-616, 1974.
- [25] **Rasmussen, B.H.,**  
Strength of transversely loaded bolts and dowels cast into concrete, Laboratoriet for Bugningastatik, Denmark Technical University, Meddelelse, Vol. 34, No. 2, 1962.
- [26] **Santos Pedro M.D., Júlio Eduardo N.B.S.**  
A state-of-the-art review on shear-friction, ELSEVIER Engineering Structures, Vol.45, pp. 435-448, August 2012.
- [27] **Schaefer, H.,**  
Zur Berechnung von Stahlbetonplatten, Dissertation, University of Technology Darmstadt, 1976.
- [28] **Soroushian Parviz, Obaseki Kienuwa, and Rojas Maximo C.,**  
Bearing Strength and Stiffness of Concrete under Reinforcing Bars, ACI Materials Journal / May-June 1987, pp. 179-184
- [29] **Soroushian Parviz, Obaseki Kienuwa, Baiyasi Mohamad Imad, EI-Sweidan Basheer, and Choi Ki-Bong,**  
Inelastic Cyclic Behavior of Dowel Bars, ACI Structural Journal / January-February 1988, pp. 23-29
- [30] The structural design of concrete pavements, Pt. 4, Public Roads, Sept. 1936.
- [31] **Taylor, H.P.J.,**  
Fundamental behaviour in bending and shear of reinforced concrete, Thesis, London, 1971.
- [32] **Teller, L.W., Sutherland, E.J.,**  
A study of structural action of several types of transverse and longitudinal joint design, Public Roads, Vol. 17, No. 7, Sept. 1936.
- [33] **Timoshenko, S., Lessels, J.M.,**  
Applied elasticity, Westinghouse Technical Night School Press, East Pittsburg, 1925.

- [34] **Van Mier, J.G.M.**,  
Strain-softening of concrete under multi-axial loading conditions, Dissertation, University of Technology Eindhoven, 1984, pp. 349.
- [35] **Vintzeleou, E., Tassios, T.P.**,  
Mechanisms of load transfer along interfaces in reinforced concrete, prediction of shear force versus shear displacement curves, Studi e ricerche, Vol. 7, 1985, pp. 121-159.
- [36] **Vintzeleou, E., Tassios, T.P.**,  
Mathematical models for dowel action under monotonic and cyclic conditions, Mag. of concrete research, Vol. 38, No. 134, March 1986, pp. 13-22.
- [37] **Walraven, J.C.**,  
Aggregate interlock, a theoretical and experimental analysis, dissertation, Delft University of Technology, Oct. 1980, pp. 197.
- [38] **White, K.N., Holley, M.J.**,  
Experimental study of membrane shear transfer, ASCE, Structural Division, Vol. 98, No 8, aug. 1972, pp. 1835-1853.
- [39] **Δρίτσος Στέφανος**,  
‘ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ’, ΤΕΕ, ΑΘΗΝΑ, Νοέμβριος 2007
- [40] **Μωρέττη Μ., Λ.**,  
‘Διδακτικές Σημειώσεις του μαθήματος Ειδικά κεφάλαια οπλισμένου σκυροδέματος’, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
- [41] **Παλιεράκη Βασιλική**,  
‘Μεταφορά Τέμνουσας σε Διεπιφάνειες επισκευασμένων/ενισχυμένων Στοιχείων Οπλισμένου Σκυροδέματος, υποβαλλόμενες σε Ανακυκλιζόμενες Ολισθήσεις’, 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/ 2009, Πάφος, Κύπρος.
- [42] **Περδικάρης Φίλιππος, Μωρέττη Μαρίνα, Παπαθεοχάρης Θεοχάρης**,  
‘Διερεύνηση της Συμπεριφοράς Πλαισίων Ο.Σ. Ενισχυμένων με Εμφαντούμενα Τοιχώματα Ο.Σ.’, 4<sup>η</sup> Έκθεση Ερευνητικού Προγράμματος Ο.Α.Σ.Π., Σεπτέμβριος 2012.
- [43] **Σπυράκος Κ.**,  
‘Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία’, ΤΕΕ, ΑΘΗΝΑ 2004, σ. 2-7 και σ. 133-159.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- Κώδικας υπολογισμού επιφανειών επαφής των αδρανών για το προσομοίωμα του J C Walraven (MATHEMATICA 9.0)

```
Dmax=4;
w=0.003;
Δ=0.07;
pk=0.77;
umax=(-0.5*w*(w^2+Δ^2)+0.50*Sqrt[w^2*((w^2+Δ^2)^2)-
(w^2+Δ^2)*{(w^2+Δ^2)^2-(Δ^2)*(x^2)}])/(w^2+Δ^2);
F=0.727*((x/Dmax)^0.5)-
((x/Dmax)^2)+0.144*((x/Dmax)^4)+0.036*((x/Dmax)^6)+0.016*
((x/Dmax)^8)+0.01*((x/Dmax)^10);
G1=(x^(-3))*(Sqrt[x^2-
(w^2+Δ^2)]*(Δ/(Sqrt[w^2+Δ^2]))*umax-w*umax-(umax^2));
G2=(x^(-3))*{(Δ-Sqrt[(x^2)-
(w^2+Δ^2)])*(w/(Sqrt[w^2+Δ^2]))*umax+(umax+w)*(Sqrt[0.25*
(x^2)-((w+umax)^2)])-w*Sqrt[0.25*(x^2)-
(w^2)]+0.25*(x^2)*ArcSin[(w+umax)/(0.5*x)]-
0.25*(x^2)*ArcSin[(2*w)/x]};
G3=(x^(-3))*((0.5*x-w)^2);
G4=(x^(-3))*((Pi/8)*(x^2)-w*Sqrt[0.25*(x^2)-(w^2)]-
0.25*(x^2)*ArcSin[(2*w)/x]);
a=2*w;
b=(w^2+Δ^2)/w;

I1=NIntegrate[pk*(4/Pi)*F*G3,{x,a,b}];
I2=NIntegrate[pk*(4/Pi)*F*G1,{x,b,Dmax}];
I3=NIntegrate[pk*(4/Pi)*F*G4,{x,a,b}];
Ay=I1+I2
Ax=I3+I2
```

## ΔΟΚΙΜΙΟ Α4

Πίνακας Π.1: Υπολογισμός φορτίου αντίστασης της διεπιφάνειας τοιχώματος – δοκού για κάθε θετικό κύκλο βάσει του προσομοιώματος

Κύκλος (n)	Φορτίο $P_{max}$ (kN)	δοκός		Αλληλοεμπλοκή αδρανών						Δράση βλήτρου					Άθροισμα		
		w (mm)	s (mm)	$A_y$	$A_x$	$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\tau_a$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)	$F_{du}$ (kN)	$F_{sy}$ (kN)	$\alpha$	$F_s$ (kN)	$\tau_d$ (MPa)	$Y_a$	$Y_d$	$V_{cal}$ (kN)
1	0.00	0.00	0.00	-	-	-	-	0.000	0.000	0.00	86.33	1.00	0.00	0.000	1.00	1.00	<b>0.00</b>
2	67.31	0.00	0.07	0.2092	0.3148	0.80	0.70	10.496	8.205	2.73	86.33	0.75	-1.01	0.042	0.81	1.00	<b>101.72</b>
3	39.83	0.00	0.07	0.2092	0.3148	0.77	0.66	10.028	7.962	2.69	86.33	0.60	0.61	0.041	0.83	1.00	<b>100.13</b>
4	51.90	0.00	0.07	0.2092	0.3148	0.77	0.66	9.969	7.918	2.64	86.33	0.50	0.34	0.041	0.84	1.00	<b>100.05</b>
5	60.33	0.00	0.06	0.2140	0.3207	0.61	0.47	7.508	6.573	2.30	86.33	0.43	0.58	0.035	1.00	1.00	<b>89.78</b>
6	63.59	0.01	0.07	0.1827	0.2327	0.80	0.70	8.550	5.705	2.54	86.33	0.38	0.88	0.039	1.00	1.00	<b>102.16</b>
7	86.90	0.00	0.09	0.2020	0.3095	0.80	0.70	10.160	8.074	3.41	86.33	0.33	0.22	0.052	0.82	1.00	<b>100.77</b>
8	96.93	0.00	0.16	0.1835	0.2977	0.80	0.70	9.453	7.894	5.80	86.33	0.30	0.20	0.089	0.84	1.00	<b>98.47</b>
9	85.04	0.01	0.14	0.1835	0.2887	0.61	0.47	6.644	6.030	5.08	86.33	0.27	0.82	0.078	1.00	1.00	<b>82.50</b>
10	92.22	0.00	0.17	0.0249	0.0149	0.80	0.70	0.939	0.209	6.19	86.33	0.25	0.50	0.095	1.00	1.00	<b>17.12</b>
11	105.51	0.00	0.17	0.0376	0.0376	0.79	0.68	1.586	0.817	6.14	86.33	0.25	0.50	0.094	1.00	1.00	<b>24.62</b>
12	110.43	0.00	0.21	0.0359	0.0361	0.80	0.70	1.551	0.794	7.82	86.33	0.25	0.34	0.120	1.00	1.00	<b>25.89</b>
13	131.90	-0.01	0.31	0.0341	0.0343	0.80	0.70	1.471	0.757	11.61	86.33	0.25	-0.59	0.179	1.00	1.00	<b>28.75</b>
14	143.22	-0.01	0.40	0.0421	0.0544	0.80	0.70	1.982	1.341	14.87	86.33	0.25	-1.09	0.229	1.00	1.00	<b>37.96</b>
15	155.58	-0.02	0.56	0.0328	0.0501	0.80	0.70	1.648	1.305	20.67	86.33	0.25	-2.52	0.318	1.00	1.00	<b>39.87</b>
16	56.53	-0.01	0.33	0.0333	0.0585	0.29	0.15	0.495	0.625	12.38	86.33	0.25	-1.34	0.190	1.00	1.00	<b>18.14</b>
17	60.11	-0.01	0.35	0.0279	0.0568	0.80	0.70	1.592	1.591	13.00	86.33	0.25	-0.92	0.200	1.00	1.00	<b>31.55</b>
18	87.31	-0.01	0.42	0.0203	0.0461	0.80	0.70	1.224	1.320	15.69	86.33	0.25	-1.51	0.241	1.00	1.00	<b>29.95</b>
19	106.42	-0.02	0.47	0.0155	0.0380	0.80	0.70	0.972	1.103	17.41	86.33	0.25	-2.43	0.268	1.00	1.00	<b>28.73</b>
20	118.37	-0.03	0.52	0.0093	0.0234	0.80	0.70	0.592	0.680	19.33	86.33	0.25	-3.02	0.297	1.00	1.00	<b>26.22</b>
21	118.16	-0.03	0.55	0.0044	0.0312	0.80	0.70	0.553	1.002	20.39	86.33	0.25	-2.94	0.314	1.00	1.00	<b>26.82</b>

Κύκλος (n)	Φορτίο $P_{max}$ (kN)	δοκός		Αλληλοεμπλοκήαδρανών						Δράση βλήτρου					Άθροισμα		
		w (mm)	s (mm)	$A_y$	$A_x$	$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\tau_a$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)	$F_{du}$ (kN)	$F_{sy}$ (kN)	a	$F_s$ (kN)	$\tau_d$ (MPa)	$Y_a$	$Y_d$	$V_{cal}$ (kN)
22	123.56	-0.03	0.55	0.1116	32.3050	0.77	0.66	2.264	1.469	20.19	86.33	0.25	-3.19	0.311	0.00	1.00	<b>20.18</b>
23	119.84	-0.03	0.55	-	-	-	-	-	-	20.43	86.33	0.25	-2.94	0.314	-	1.00	<b>20.42</b>
24	121.09	-0.03	0.59	-	-	-	-	-	-	21.97	86.33	0.25	-3.61	0.338	-	1.00	<b>21.95</b>
25	69.95	-0.01	0.45	-	-	-	-	-	-	16.50	86.33	0.25	-1.26	0.254	-	1.00	<b>16.50</b>
26	58.97	-0.01	0.41	-	-	-	-	-	-	15.16	86.33	0.25	-1.34	0.233	-	1.00	<b>15.16</b>
27	50.80	-0.01	0.40	-	-	-	-	-	-	14.97	86.33	0.25	-1.09	0.230	-	1.00	<b>14.96</b>
28	45.23	-0.01	0.36	-	-	-	-	-	-	13.33	86.33	0.25	-0.92	0.205	-	1.00	<b>13.33</b>
29	44.17	-0.01	0.35	-	-	-	-	-	-	13.05	86.33	0.25	-1.34	0.201	-	1.00	<b>13.05</b>
30	44.17	-0.01	0.37	-	-	-	-	-	-	13.57	86.33	0.25	-1.18	0.209	-	1.00	<b>13.57</b>
31	43.67	-0.04	0.34	-	-	-	-	-	-	12.71	86.33	0.25	-4.11	0.196	-	1.00	<b>12.70</b>
32	41.94	-0.05	0.34	-	-	-	-	-	-	12.52	86.33	0.25	-5.20	0.193	-	1.00	<b>12.50</b>

όπου  $P_{max}$ : το φορτίο αντίστασης λόγω ενεργοποίησης όλων των μηχανισμών του συστήματος τοιχώματος – πλαισίου

w: η πειραματική τιμή της αποκόλλησης

s: η πειραματική τιμή της ολίσθησης

$A_y, A_x$ : επιφάνειες επαφής των αδρανών στη διεπιφάνεια σύμφωνα με το προσομοίωμα του Walraven

$\lambda_x, \lambda_y$ : μειωτικοί συντελεστές των  $A_x, A_y$  αντίστοιχα

$\tau_a, \sigma_a$ : διατμητική και ορθή τάση αντίστοιχα λόγω του μηχανισμού αλληλοεμπλοκήςαδρανών

$F_{du}$ : δύναμη βλήτρου σύμφωνα με το προσομοίωμα BEF

$F_{sy}$ : δύναμη διαρροής των βλήτρων σε εφελκυσμό

$F_s$ : δύναμη εξόλκευσης

$V_{cal}$ : η προβλεπόμενη τιμή του φορτίου αντίστασης της διεπιφάνειας βάσει του προσομοιώματος

## ΔΟΚΙΜΙΟ Α5

Πίνακας Π.2: Υπολογισμός φορτίου αντίστασης της διεπιφάνειας τοιχώματος – δοκού για κάθε θετικό κύκλο βάσει του προσομοιώματος

Κύκλος (n)	Φορτίο $P_{max}$ (kN)	δοκός		Αλληλοεμπλοκή αδρανών						Δράση βλήτρου					Άθροισμα		
		w (mm)	s (mm)	$A_y$	$A_x$	$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\tau_a$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)	$F_{du}$ (kN)	$F_{sy}$ (kN)	$\alpha$	$F_s$ (kN)	$\tau_d$ (MPa)	$Y_a$	$Y_d$	$V_{cal}$ (kN)
1	20.11	0.00	-0.01	0.2229	0.2361	-	-	0.000	0.000	-0.19	86.33	1.00	-0.34	-0.003	-	1.00	<b>-0.19</b>
2	40.19	0.01	-0.02	0.1535	0.1573	0.80	0.70	6.540	3.434	-0.81	86.33	0.75	2.02	-0.012	1.00	1.00	<b>-0.81</b>
3	60.25	0.02	-0.03	0.1192	0.1206	0.80	0.70	5.060	2.616	-1.04	86.33	0.60	4.03	-0.016	1.00	1.00	<b>-1.04</b>
4	43.2	0.02	0.00	0.0003	0.0000	0.00	0.00	0.000	0.000	0.05	86.33	0.50	5.04	0.001	1.00	1.00	<b>0.05</b>
5	72.45	0.03	0.00	0.0013	0.0002	0.80	0.00	0.002	0.005	-0.14	86.33	0.43	4.75	-0.002	1.00	1.00	<b>-0.12</b>
6	57.69	0.03	0.04	0.1008	0.1015	0.80	0.00	1.347	3.367	1.45	86.33	0.38	4.92	0.022	1.00	1.00	<b>17.14</b>
7	63.65	0.03	0.05	0.1161	0.1191	0.80	0.70	4.948	2.602	1.97	86.33	0.33	4.94	0.030	1.00	1.00	<b>59.61</b>
8	71.88	0.03	0.02	0.0455	0.0218	0.10	0.03	0.091	0.066	0.69	86.33	0.30	4.14	0.011	1.00	1.00	<b>1.75</b>
9	81.82	0.04	0.04	0.0718	0.0475	0.80	0.70	2.713	0.744	1.54	86.33	0.27	4.59	0.024	1.00	1.00	<b>33.15</b>
10	96.29	0.04	0.08	0.1165	0.1240	0.80	0.70	5.026	2.761	2.87	86.33	0.25	4.46	0.044	1.00	1.00	<b>61.42</b>
11	108.02	0.05	0.10	0.1086	0.1170	0.80	0.70	4.703	2.618	3.63	86.33	0.25	4.96	0.056	1.00	1.00	<b>58.41</b>
12	120.6	0.06	0.08	0.0818	0.0828	0.53	0.38	2.027	1.315	2.96	86.33	0.25	6.64	0.046	1.00	1.00	<b>26.57</b>
13	125.68	0.07	0.12	0.0898	0.0950	0.80	0.70	3.865	2.108	4.29	86.33	0.25	7.31	0.066	1.00	1.00	<b>49.31</b>
14	137.76	0.08	0.17	0.0918	0.1046	0.80	0.70	4.053	2.405	6.10	86.33	0.25	8.82	0.094	1.00	0.99	<b>53.28</b>
15	146.05	0.17	0.19	0.0398	0.0399	0.80	0.70	1.685	0.863	6.81	86.33	0.25	18.14	0.105	1.00	0.98	<b>26.28</b>
16	149.15	0.22	0.26	0.0337	0.0341	0.80	0.70	1.430	0.741	9.47	86.33	0.25	24.19	0.146	1.00	0.96	<b>25.75</b>
17	140.58	0.26	0.42	0.0351	0.0418	0.80	0.70	1.571	0.978	15.40	86.33	0.25	27.63	0.237	1.00	0.95	<b>32.89</b>
18	144.84	0.26	0.47	0.0365	0.0476	0.80	0.70	1.692	1.156	17.06	86.33	0.25	28.22	0.262	1.00	0.95	<b>35.83</b>
19	129.83	0.26	0.45	0.0360	0.0453	0.75	0.63	1.505	1.026	16.49	86.33	0.25	27.88	0.254	1.00	0.95	<b>33.14</b>
20	106.3	0.26	0.44	0.0357	0.0441	0.75	0.64	1.502	1.000	16.01	86.33	0.25	28.30	0.246	1.00	0.94	<b>32.62</b>
21	95.13	0.27	0.42	0.0330	0.0386	0.72	0.60	1.282	0.825	15.21	86.33	0.25	28.72	0.234	1.00	0.94	<b>29.27</b>

Κύκλος (n)	Φορτίο $P_{max}$ (kN)	δοκός		Αλληλοεμπλοκή αδρανών						Δράση βλήτρου					Άθροισμα		
		w (mm)	s (mm)	$A_y$	$A_x$	$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\tau_a$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)	$F_{du}$ (kN)	$F_{sy}$ (kN)	a	$F_s$ (kN)	$\tau_d$ (MPa)	$Y_a$	$Y_d$	$V_{cal}$ (kN)
22	76.69	0.28	0.39	0.0297	0.0325	0.72	0.60	1.129	0.677	14.45	86.33	0.25	30.07	0.222	1.00	0.94	<b>26.70</b>
23	60.74	0.29	0.34	0.0249	0.0253	0.58	0.43	0.683	0.428	12.27	86.33	0.25	31.24	0.189	1.00	0.93	<b>19.40</b>
24	53.66	0.33	0.34	0.0183	0.0183	0.80	0.70	0.774	0.395	12.60	86.33	0.25	36.03	0.194	1.00	0.91	<b>20.46</b>
25	76.98	0.38	0.39	0.0148	0.0148	0.80	0.70	0.626	0.320	14.26	86.33	0.25	41.15	0.219	1.00	0.88	<b>19.83</b>
26	57.27	0.43	0.37	0.0092	0.0078	0.71	0.59	0.318	0.141	13.45	86.33	0.25	46.78	0.207	1.00	0.84	<b>15.01</b>
27	50.18	0.33	0.36	0.0196	0.0197	0.77	0.66	0.782	0.412	13.17	86.33	0.25	35.69	0.203	1.00	0.91	<b>21.10</b>

όπου  $P_{max}$ : το φορτίο αντίστασης λόγω ενεργοποίησης όλων των μηχανισμών του συστήματος τοιχώματος – πλαισίου  
w: η πειραματική τιμή της αποκόλλησης  
s: η πειραματική τιμή της ολίσθησης  
 $A_y, A_x$ : επιφάνειες επαφής των αδρανών στη διεπιφάνεια σύμφωνα με το προσομοίωμα του Walraven  
 $\lambda_x, \lambda_y$ : μειωτικοί συντελεστές των  $A_x, A_y$  αντίστοιχα  
 $\tau_a, \sigma_a$ : διατμητική και ορθή τάση αντίστοιχα λόγω του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών  
 $F_{du}$ : δύναμη βλήτρου σύμφωνα με το προσομοίωμα BEF  
 $F_{sy}$ : δύναμη διαρροής των βλήτρων σε εφελκυσμό  
 $F_s$ : δύναμη εξόλκευσης  
 $V_{cal}$ : η προβλεπόμενη τιμή του φορτίου αντίστασης της διεπιφάνειας βάσει του προσομοιώματος



## ΔΟΚΙΜΙΟ A5

**Πίνακας Π.3:** Υπολογισμός φορτίου αντίστασης της διεπιφάνειας τοιχώματος – θεμελίωσης για κάθε θετικό κύκλο βάσει του προσομοιώματος

Κύκλος (n)	Φορτίο $P_{max}$ (kN)	δοκός		Αλληλοεμπλοκή αδρανών						Δράση βλήτρου					Άθροισμα		
		w (mm)	s (mm)	$A_y$	$A_x$	$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\tau_a$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)	$F_{du}$ (kN)	$F_{sy}$ (kN)	$\alpha$	$F_s$ (kN)	$\tau_d$ (MPa)	$Y_a$	$Y_d$	$V_{cal}$ (kN)
1	20.11	0.00	0.03	0.2027	0.2373	0	0	0.000	0.000	1.04	86.33	1.00	1.78	0.016	1.00	1.00	<b>1.04</b>
2	40.19	0.00	0.02	0.2045	0.2277	0.54	0.38	5.272	3.755	0.85	86.33	0.75	1.11	0.013	1.00	1.00	<b>62.27</b>
3	60.25	0.00	0.04	0.1961	0.3113	0.80	0.70	9.820	8.049	1.42	86.33	0.60	0.27	0.022	1.00	1.00	<b>115.83</b>
4	43.2	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.000	0.000	0.09	86.33	0.50	0.22	0.001	1.00	1.00	<b>0.09</b>
5	72.45	0.00	0.01	0.2000	0.2372	0.80	0.70	8.950	5.544	0.19	86.33	0.43	0.38	0.003	1.00	1.00	<b>104.46</b>
6	57.69	0.00	0.01	0.2000	0.2372	0.80	0.70	8.950	5.544	0.36	86.33	0.38	0.32	0.006	1.00	1.00	<b>104.63</b>
7	63.65	0.00	0.02	0.2045	0.2277	0.80	0.70	8.954	5.177	0.78	86.33	0.33	-0.01	0.012	1.00	1.00	<b>105.10</b>
8	71.88	-0.01	0.01	0.0950	0.0584	0.26	0.00	0.253	0.632	0.45	86.33	0.30	-1.03	0.007	1.00	1.00	<b>3.39</b>
9	81.82	-0.02	0.05	0.1477	0.1580	0.80	0.70	6.383	3.526	2.01	86.33	0.27	-1.83	0.031	1.00	1.00	<b>76.38</b>
10	96.29	-0.02	0.12	0.1608	0.2165	0.80	0.70	7.538	5.315	4.48	86.33	0.25	-2.68	0.069	1.00	1.00	<b>92.30</b>
11	108.02	-0.06	0.09	0.0887	0.0910	0.40	0.24	1.494	1.136	3.15	86.33	0.25	-6.56	0.048	1.00	1.00	<b>20.54</b>
12	120.6	-0.16	0.04	0.0016	0.0005	0.15	0.05	0.005	0.001	1.35	86.33	0.25	-17.08	0.021	1.00	0.98	<b>1.38</b>
13	125.68	-0.25	0.03	-	-	0.50	0.00	0.000	0.000	1.07	86.33	0.25	-27.33	0.016	-	0.95	<b>1.01</b>
14	137.76	-0.31	0.08	-	-	0.80	0.70	0.000	0.000	2.82	86.33	0.25	-33.40	0.043	-	0.92	<b>2.60</b>
15	146.05	-0.48	0.19	-	-	0.80	0.70	0.026	0.004	6.90	86.33	0.25	-52.25	0.106	-	0.80	<b>5.80</b>
16	149.15	-0.82	0.28	-	-	0.80	0.70	0.000	0.000	10.17	86.33	0.25	-88.56	0.156	-	-	<b>-</b>

## ΔΟΚΙΜΙΟ Α7

**Πίνακας Π.4:** Υπολογισμός φορτίου αντίστασης της διεπιφάνειας τοιχώματος – δοκού για κάθε θετικό κύκλο βάσει του προσομοιώματος

Κύκλος ς (n)	Φορτίο $P_{max}$ (kN)	δοκός		Αλληλοεμπλοκή αδρανών						Δράση βλήτρου					Άθροισμα		
		w (mm)	s (mm)	$A_y$	$A_x$	$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\tau_a$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)	$F_{du}$ (kN)	$F_{sy}$ (kN)	$\alpha$	$F_s$ (kN)	$\tau_d$ (MPa)	$Y_a$	$Y_d$	$V_{cal}$ (kN)
1	19.93	0.00	0.00	-	-	-	-	-	-	0.10	86.33	1.00	0.00	0.001	-	1.00	<b>0.10</b>
2	60.09	0.00	0.00	-	-	-	-	-	-	-0.05	86.33	0.75	-1.26	-0.001	-	1.00	<b>-0.05</b>
3	80.27	0.00	0.00	-	-	-	-	-	-	0.10	86.33	0.60	-1.01	0.001	-	1.00	<b>0.10</b>
4	100.28	-0.01	0.01	0.0950	0.0950	0.80	0.70	4.097	2.089	0.24	86.33	0.50	-1.68	0.004	1.00	1.00	<b>54.67</b>
5	109.23	-0.01	-0.01	0.0950	0.0950	0.51	0.70	3.633	0.929	-0.19	86.33	0.43	-2.59	-0.003	1.00	1.00	<b>48.08</b>
6	176.66	-0.04	0.02	0.0253	0.0099	0.80	0.70	0.884	0.035	0.77	86.33	0.38	-6.80	0.012	1.00	1.00	<b>12.51</b>
7	194.73	-0.06	0.05	0.0500	0.0301	0.80	0.70	1.885	0.426	2.01	86.33	0.33	-9.29	0.031	1.00	0.99	<b>27.06</b>
8	226.58	-0.08	0.06	0.0378	0.0218	0.80	0.70	1.413	0.288	2.06	86.33	0.30	-10.38	0.032	1.00	0.99	<b>20.82</b>
9	219.34	-0.11	0.07	0.0240	0.0128	0.80	0.70	0.883	0.147	2.64	86.33	0.27	-13.46	0.041	1.00	0.99	<b>14.34</b>
10	253.25	-0.14	0.10	0.0249	0.0149	0.80	0.70	0.939	0.209	3.79	86.33	0.25	-15.37	0.058	1.00	0.98	<b>16.20</b>
11	270.79	-0.17	0.18	0.0376	0.0376	0.80	0.70	1.620	0.827	6.48	86.33	0.25	-18.47	0.100	1.00	0.98	<b>27.85</b>
12	263.86	-0.19	0.21	0.0359	0.0361	0.80	0.70	1.551	0.794	7.91	86.33	0.25	-20.23	0.122	1.00	0.97	<b>28.30</b>
13	302.86	-0.21	0.24	0.0341	0.0343	0.80	0.70	1.471	0.757	8.92	86.33	0.25	-23.01	0.137	1.00	0.96	<b>28.15</b>
14	295.56	-0.23	0.43	0.0421	0.0544	0.80	0.70	1.982	1.341	15.76	86.33	0.25	-24.60	0.243	1.00	0.96	<b>41.45</b>
15	327.98	-0.29	0.59	0.0328	0.0501	0.80	0.70	1.648	1.305	21.71	86.33	0.25	-30.81	0.334	1.00	0.93	<b>42.18</b>
16	323.82	-0.29	0.68	0.0333	0.0585	0.80	0.70	1.777	1.585	21.71	86.33	0.25	-31.15	0.334	1.00	0.93	<b>43.86</b>
17	341.76	-0.33	0.84	0.0279	0.0568	0.80	0.70	1.592	1.591	21.71	86.33	0.25	-35.85	0.334	1.00	0.91	<b>40.91</b>
18	352.01	-0.40	1.01	0.0203	0.0461	0.80	0.70	1.224	1.320	21.71	86.33	0.25	-42.82	0.334	1.00	0.87	<b>35.12</b>
19	363.05	-0.46	1.23	0.0155	0.0380	0.80	0.70	0.972	1.103	21.71	86.33	0.25	-50.12	0.334	1.00	0.81	<b>30.59</b>
20	354.13	-0.57	1.48	0.0093	0.0234	0.80	0.70	0.592	0.680	21.71	86.33	0.25	-61.80	0.334	1.00	0.70	<b>23.03</b>
21	351.65	-0.72	2.05	0.0044	0.0312	0.80	0.70	0.553	1.002	21.71	86.33	0.25	-77.16	0.334	1.00	0.45	<b>17.09</b>
22	333.03	-0.94	3.44	-	-	0.80	0.70	-	-	21.71	86.33	0.25	-101.26	0.334	0.01	-	-

## ΔΟΚΙΜΙΟ Α7

Πίνακας Π.5: Υπολογισμός φορτίου αντίστασης της διεπιφάνειας τοιχώματος – θεμελίωσης για κάθε θετικό κύκλο βάσει του προσομοιώματος

Κύκλος (n)	Φορτίο $P_{max}$ (kN)	δοκός		Αλληλοεμπλοκή αδρανών						Δράση βλήτρου					Άθροισμα		
		w (mm)	s (mm)	$A_y$	$A_x$	$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\tau_a$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)	$F_{du}$ (kN)	$F_{sy}$ (kN)	$\alpha$	$F_s$ (kN)	$\tau_d$ (MPa)	$Y_a$	$Y_d$	$V_{cal}$ (kN)
1	19.93	0.00	0.02	0.2176	0.2582	0.00	0.00	0.000	0.000	0.67	86.33	1.00	0.74	0.010	1.00	1.00	<b>0.67</b>
2	60.09	0.00	0.01	0.2048	0.2160	0.26	0.13	2.084	1.933	0.38	86.33	0.75	0.78	0.006	1.00	1.00	<b>28.08</b>
3	80.27	0.00	0.04	0.2276	0.3541	0.80	0.70	11.521	9.278	1.58	86.33	0.60	0.18	0.024	1.00	1.00	<b>154.66</b>
4	100.28	0.00	0.03	0.2130	0.2646	0.39	0.24	3.871	3.492	1.10	86.33	0.50	0.52	0.017	1.00	1.00	<b>52.53</b>
5	109.23	0.00	0.03	0.2067	0.2469	0.80	0.70	9.455	5.902	1.20	86.33	0.43	0.63	0.018	1.00	1.00	<b>126.82</b>
6	176.66	-0.01	0.09	0.1832	0.2516	0.80	0.70	8.822	6.336	3.50	86.33	0.38	-1.55	0.054	1.00	1.00	<b>120.72</b>
7	194.73	-0.03	0.15	0.1449	0.1964	0.80	0.70	6.943	4.923	5.51	86.33	0.33	-4.84	0.085	1.00	1.00	<b>97.75</b>
8	226.58	-0.07	0.14	0.0956	0.1054	0.68	0.55	3.425	2.141	5.08	86.33	0.30	-8.66	0.078	1.00	0.99	<b>50.56</b>
9	219.34	-0.07	0.13	0.0930	0.1004	0.70	0.57	3.426	2.064	4.74	86.33	0.27	-7.96	0.073	1.00	1.00	<b>50.24</b>
10	253.25	-0.08	0.14	0.0855	0.0916	0.80	0.70	3.769	2.086	5.17	86.33	0.25	-8.18	0.080	1.00	1.00	<b>55.23</b>
11	270.79	-0.09	0.16	0.0814	0.0883	0.80	0.70	3.603	2.023	5.94	86.33	0.25	-9.40	0.091	1.00	0.99	<b>53.78</b>
12	263.86	-0.08	0.21	0.0962	0.1195	0.80	0.70	4.461	2.903	7.81	86.33	0.25	-8.85	0.120	1.00	0.99	<b>67.04</b>
13	302.86	-0.09	0.25	0.0913	0.1194	0.80	0.70	4.316	2.956	9.34	86.33	0.25	-9.22	0.144	1.00	0.99	<b>66.64</b>
14	295.56	-0.07	0.23	0.1050	0.1412	0.65	0.52	3.852	2.981	8.44	86.33	0.25	-7.34	0.130	1.00	1.00	<b>59.60</b>
15	327.98	-0.07	0.23	0.1050	0.1412	0.80	0.70	5.016	3.531	8.59	86.33	0.25	-8.04	0.132	1.00	1.00	<b>75.20</b>
16	323.82	-0.06	0.24	0.1136	0.1619	0.80	0.70	5.549	4.128	8.87	86.33	0.25	-6.89	0.137	1.00	1.00	<b>82.57</b>
17	341.76	-0.07	0.29	0.1062	0.1600	0.80	0.70	5.306	4.153	10.55	86.33	0.25	-7.08	0.162	1.00	1.00	<b>81.02</b>
18	352.01	-0.07	0.29	0.1062	0.1600	0.80	0.70	5.306	4.153	10.60	86.33	0.25	-7.56	0.163	1.00	1.00	<b>81.06</b>
19	363.05	-0.07	0.33	0.1065	0.1707	0.80	0.70	5.458	4.511	12.13	86.33	0.25	-8.08	0.187	1.00	1.00	<b>84.60</b>
20	354.13	-0.09	0.35	0.0934	0.1461	0.80	0.70	4.738	3.836	12.90	86.33	0.25	-9.41	0.198	1.00	0.99	<b>75.77</b>
21	351.65	-0.09	0.36	0.0934	0.1484	0.80	0.70	4.770	3.913	13.33	86.33	0.25	-9.74	0.205	1.00	0.99	<b>76.63</b>

Κύκλος (n)	Φορτίο $P_{max}$ (kN)	δοκός		Αλληλοεμπλοκή αδρανών						Δράση βλήτρου					Άθροισμα		
		w (mm)	s (mm)	$A_y$	$A_x$	$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\tau_a$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)	$F_{du}$ (kN)	$F_{sy}$ (kN)	a	$F_s$ (kN)	$\tau_d$ (MPa)	$Y_a$	$Y_d$	$V_{cal}$ (kN)
22	333.03	-0.08	0.37	0.0997	0.1644	0.80	0.70	5.172	4.379	13.67	86.33	0.25	30.07	0.222	1.00	0.94	<b>82.31</b>
23	289.52	-0.07	0.36	0.1065	0.1776	0.75	0.64	5.114	4.485	13.24	86.33	0.25	31.24	0.189	1.00	0.93	<b>81.13</b>
24	258.14	-0.06	0.37	0.1143	0.1963	0.80	0.70	6.034	5.282	13.52	86.33	0.25	36.03	0.194	1.00	0.91	<b>93.66</b>
25	232.57	-0.05	0.35	0.1231	0.2113	0.75	0.64	5.982	5.374	13.09	86.33	0.25	41.15	0.219	1.00	0.88	<b>92.55</b>
26	231.49	-0.05	0.34	0.1231	0.2096	0.73	0.61	5.772	5.203	12.52	86.33	0.25	46.78	0.207	1.00	0.84	<b>89.19</b>
27	249.10	-0.02	0.35	0.1614	0.2770	0.80	0.70	8.520	7.455	13.00	86.33	0.25	35.69	0.203	1.00	0.91	<b>113.84</b>
28	197.09	0.01	0.32	0.1836	2.7119	0.66	0.53	34.581	74.527	11.85	86.33	0.25	-8.96	0.210	1.00	0.99	<b>52.79</b>
29	121.70	0.05	0.22	0.1225	0.1748	0.36	0.21	2.170	2.231	7.96	86.33	0.25	-8.00	0.204	1.00	1.00	<b>36.78</b>
30	99.53	0.05	0.16	0.1201	0.1498	0.45	0.30	2.669	2.267	6.00	86.33	0.25	-6.78	0.208	1.00	1.00	<b>41.45</b>
31	92.12	0.05	0.15	0.1192	0.1451	0.65	0.52	4.211	2.969	5.43	86.33	0.25	-5.67	0.201	1.00	1.00	<b>61.36</b>
32	97.79	0.05	0.11	0.1120	0.1235	0.49	0.33	2.581	1.908	4.23	86.33	0.25	-5.71	0.193	1.00	1.00	<b>38.51</b>
33	100.55	0.05	0.11	0.1120	0.1235	0.69	0.57	4.132	2.554	3.94	86.33	0.25	-1.67	0.200	0.89	1.00	<b>58.84</b>

## ΔΟΚΙΜΙΟ Β1

Πίνακας Π.6: Υπολογισμός φορτίου αντίστασης της διεπιφάνειας τοιχώματος – δοκού για κάθε θετικό κύκλο βάσει του προσομοιώματος

Κύκλος (n)	Φορτίο $P_{max}$ (kN)	δοκός		Αλληλοεμπλοκή αδρανών						Δράση βλήτρου					Άθροισμα		
		w (mm)	s (mm)	$A_y$	$A_x$	$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\tau_a$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)	$F_{du}$ (kN)	$F_{sy}$ (kN)	$\alpha$	$F_s$ (kN)	$\tau_d$ (MPa)	$Y_a$	$Y_d$	$V_{cal}$ (kN)
1	20.24	0.00	0.02	0.2265	0.2924	0.00	0.00	0.000	0.000	0.64	59.77	1.00	0.05	0.014	0	1.00	<b>0.64</b>
2	40.11	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	0.000	0.000	-0.03	59.77	0.75	0.00	-0.001	0	1.00	<b>-0.03</b>
3	60.92	0.00	0.01	0.2048	0.2160	0.80	0.00	2.997	7.492	0.34	59.77	0.60	-0.08	0.007	0.18	1.00	<b>4.22</b>
4	76.98	0.00	0.01	0.2048	0.2160	0.39	0.24	3.601	2.819	0.24	59.77	0.50	0.00	0.005	0.47	1.00	<b>12.63</b>
5	87.60	0.00	0.01	0.2048	0.2160	0.80	0.70	9.211	5.007	0.30	59.77	0.43	-0.08	0.007	0.27	1.00	<b>18.15</b>
6	95.34	-0.01	0.02	0.1535	0.1573	0.80	0.70	6.840	3.592	0.54	59.77	0.38	-0.12	0.012	0.37	1.00	<b>19.01</b>
7	92.57	-0.02	0.02	0.0849	0.0849	0.70	0.58	3.161	1.740	0.51	59.77	0.33	-0.42	0.011	0.76	1.00	<b>18.13</b>
8	98.48	-0.03	0.04	0.1008	0.1015	0.80	0.70	4.469	2.298	1.04	59.77	0.30	-0.46	0.023	0.58	1.00	<b>19.91</b>
9	85.21	-0.01	0.02	0.1535	0.1573	0.23	0.11	1.376	1.301	0.56	59.77	0.27	-0.20	0.013	1.00	1.00	<b>10.61</b>
10	87.68	-0.04	0.11	0.1267	0.1458	0.80	0.70	5.866	3.520	2.82	59.77	0.25	-0.57	0.063	0.38	1.00	<b>18.99</b>
11	94.65	-0.05	0.13	0.1165	0.1350	0.80	0.70	5.409	3.268	3.26	59.77	0.25	-0.70	0.072	0.41	1.00	<b>19.31</b>
12	99.21	-0.05	0.17	0.1208	0.1544	0.80	0.70	5.806	3.887	4.54	59.77	0.25	-0.81	0.101	0.34	1.00	<b>19.03</b>
13	103.55	-0.06	0.18	0.1112	0.1393	0.80	0.70	5.308	3.483	4.57	59.77	0.25	-0.84	0.102	0.38	1.00	<b>19.35</b>
14	106.86	-0.06	0.20	0.1124	0.1473	0.80	0.70	5.454	3.745	5.25	59.77	0.25	-0.87	0.117	0.35	1.00	<b>19.37</b>
15	115.55	-0.06	0.22	0.1131	0.1548	0.80	0.70	5.580	3.995	5.82	59.77	0.25	-0.93	0.129	0.33	1.00	<b>19.36</b>
16	119.37	-0.07	0.25	0.1056	0.1478	0.80	0.70	5.255	3.845	6.59	59.77	0.25	-1.10	0.147	0.35	1.00	<b>19.85</b>
17	120.51	-0.09	0.27	0.0155	0.0380	0.80	0.70	0.997	1.132	6.97	59.77	0.25	-1.41	0.155	1.00	1.00	<b>14.25</b>
18	119.68	-0.13	0.29	0.0708	0.0891	0.80	0.70	3.384	2.231	7.44	59.77	0.25	-1.98	0.165	0.60	1.00	<b>22.15</b>
19	117.74	-0.16	0.29	0.0576	0.0671	0.80	0.70	2.678	1.630	7.64	59.77	0.25	-2.37	0.170	0.81	1.00	<b>23.57</b>
20	116.43	-0.17	0.32	0.0556	0.0670	0.80	0.70	2.617	1.649	8.31	59.77	0.25	-2.56	0.185	0.81	1.00	<b>23.70</b>
21	122.69	-0.19	0.36	0.0507	0.0629	0.80	0.70	2.413	1.566	9.36	59.77	0.25	-2.88	0.208	0.85	1.00	<b>24.29</b>

Κύκλος (n)	Φορτίο $P_{max}$ (kN)	δοκός		Αλληλοεμπλοκή αδρανών						Δράση βλήτρου					Άθροισμα		
		w (mm)	s (mm)	$A_y$	$A_x$	$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\tau_a$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)	$F_{du}$ (kN)	$F_{sy}$ (kN)	a	$F_s$ (kN)	$\tau_d$ (MPa)	$Y_a$	$Y_d$	$V_{cal}$ (kN)
22	83.62	-0.19	0.35	0.0503	0.0612	0.77	0.66	2.264	1.469	9.19	59.77	0.25	-2.88	0.204	0.90	1.00	<b>24.13</b>
23	101.77	-0.21	0.43	0.0472	0.0637	0.80	0.70	2.315	1.635	11.14	59.77	0.25	-3.11	0.248	0.81	1.00	<b>24.86</b>
24	109.63	-0.24	0.50	0.0413	0.0592	0.80	0.70	2.074	1.554	12.96	59.77	0.25	-3.56	0.288	0.85	1.00	<b>25.88</b>
25	114.86	-0.27	0.66	0.0366	0.0643	0.80	0.70	2.002	1.785	15.59	59.77	0.25	-4.03	0.346	0.74	1.00	<b>26.44</b>
26	112.04	-0.35	1.20	0.0254	0.0561	0.80	0.70	1.550	1.637	15.59	59.77	0.25	-5.30	0.346	0.81	1.00	<b>24.72</b>
27	108.52	-0.44	1.89	0.0175	0.4581	0.80	0.70	6.885	15.67	15.59	59.77	0.25	-6.53	0.346	0.08	0.99	<b>19.76</b>
28	91.93	-0.45	2.08	0.0198	2.0352	0.80	0.70	28.834	70.34	15.59	59.77	0.25	-6.77	0.346	0.02	0.99	<b>19.47</b>
29	92.27	-0.47	2.18	0.0210	3.2428	0.80	0.70	45.623	112.21	15.59	59.77	0.25	-6.99	0.346	0.01	0.99	<b>19.43</b>
30	89.27	-0.48	2.24	0.0228	4.4041	0.80	0.70	61.789	152.46	15.59	59.77	0.25	-7.19	0.346	0.01	0.99	<b>19.41</b>
31	74.67	-0.52	2.12	-	-	-	-			15.59	59.77	0.25	-7.76	0.346	0	0.99	<b>15.46</b>
32	58.94	-0.59	2.00	-	-	-	-			15.59	59.77	0.25	-8.84	0.346	0	0.99	<b>15.42</b>
33	38.10	-0.82	1.90	-	-	-	-			15.59	59.77	0.25	-12.18	0.346	0	0.98	<b>15.26</b>
34	28.21	-0.99	1.74	-	-	-	-			15.59	59.77	0.25	-14.77	0.346	0	0.97	<b>15.11</b>
35	20.91	-0.96	1.67	-	-	-	-			15.59	59.77	0.25	-14.36	0.346	0	0.97	<b>15.13</b>

όπου  $P_{max}$ : το φορτίο αντίστασης λόγω ενεργοποίησης όλων των μηχανισμών του συστήματος τοιχώματος – πλαισίου

w: η πειραματική τιμή της αποκόλλησης

s: η πειραματική τιμή της ολίσθησης

$A_y, A_x$ : επιφάνειες επαφής των αδρανών στη διεπιφάνεια σύμφωνα με το προσομοίωμα του Walraven

$\lambda_x, \lambda_y$ : μειωτικοί συντελεστές των  $A_x, A_y$  αντίστοιχα

$\tau_a, \sigma_a$ : διατμητική και ορθή τάση αντίστοιχα λόγω του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών

$F_{du}$ : δύναμη βλήτρου σύμφωνα με το προσομοίωμα BEF

$F_{sy}$ : δύναμη διαρροής των βλήτρων σε εφελκυσμό

$F_s$ : δύναμη εξόλκευσης

$V_{cal}$ : η προβλεπόμενη τιμή του φορτίου αντίστασης της διεπιφάνειας βάσει του προσομοιώματος

## ΔΟΚΙΜΙΟ Β1

Πίνακας Π.7: Υπολογισμός φορτίου αντίστασης της διεπιφάνειας τοιχώματος – θεμελίωσης για κάθε θετικό κύκλο βάσει του προσομοιώματος

Κύκλος (n)	Φορτίο $P_{max}$ (kN)	δοκός		Αλληλοεμπλοκή αδρανών						Δράση βλήτρου					Άθροισμα		
		w (mm)	s (mm)	$A_y$	$A_x$	$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\tau_a$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)	$F_{du}$ (kN)	$F_{sy}$ (kN)	$\alpha$	$F_s$ (kN)	$\tau_d$ (MPa)	$Y_a$	$Y_d$	$V_{cal}$ (kN)
1	20.11	0.00	0.03	0.2250	0.2399	-	-	0.000	0.000	0.13	59.77	1.00	0.04	0.003	-	1.00	<b>0.13</b>
2	40.19	0.00	0.02	0.0000	0.0000	0.45	0.00	0.000	0.000	-0.10	59.77	0.75	0.03	-0.002	-	1.00	<b>-0.10</b>
3	60.25	0.00	0.04	0.0950	0.0950	0.80	0.70	4.203	2.143	-0.13	59.77	0.60	-0.23	-0.003	0.62	1.00	<b>18.89</b>
4	43.2	0.00	0.00	0.0312	0.0115	0.80	0.70	1.107	0.020	-0.34	59.77	0.50	-0.46	-0.007	1.00	1.00	<b>7.75</b>
5	72.45	0.00	0.01	0.0125	0.0034	0.65	0.51	0.315	-0.015	-0.30	59.77	0.43	-0.68	-0.007	1.00	1.00	<b>1.99</b>
6	57.69	0.00	0.01	0.0057	0.0013	0.36	0.21	0.059	-0.001	-0.20	59.77	0.38	-0.95	-0.004	1.00	1.00	<b>0.23</b>
7	63.65	0.00	0.02	0.0455	0.0218	0.80	0.00	0.303	0.756	0.47	59.77	0.33	-0.62	0.010	1.00	1.00	<b>2.68</b>
8	71.88	-0.01	0.01	0.0029	0.0005	0.15	0.00	0.001	0.003	-0.20	59.77	0.30	-0.87	-0.004	1.00	1.00	<b>-0.19</b>
9	81.82	-0.02	0.05	0.0718	0.0475	0.80	0.70	2.837	0.778	-1.03	59.77	0.27	-0.71	-0.023	1.00	1.00	<b>19.68</b>
10	96.29	-0.02	0.12	0.0015	0.0003	0.03	0.00	0.000	0.000	0.21	59.77	0.25	-0.97	0.005	1.00	1.00	<b>0.21</b>
11	108.02	-0.06	0.09	0.0002	0.0000	0.80	0.70	0.008	-0.002	0.41	59.77	0.25	-1.29	0.009	1.00	1.00	<b>0.47</b>
12	120.6	-0.16	0.04	0.0122	0.0050	0.80	0.70	0.439	0.027	1.29	59.77	0.25	-1.71	0.029	1.00	1.00	<b>4.49</b>
13	125.68	-0.25	0.03	0.0099	0.0044	0.80	0.70	0.362	0.033	1.89	59.77	0.25	-2.26	0.042	1.00	1.00	<b>4.54</b>
14	137.76	-0.31	0.08	0.0153	0.0088	0.80	0.70	0.587	0.120	3.00	59.77	0.25	-2.87	0.067	1.00	1.00	<b>7.29</b>
15	146.05	-0.48	0.19	0.0133	0.0083	0.80	0.70	0.519	0.127	4.08	59.77	0.25	-3.56	0.091	1.00	1.00	<b>7.86</b>
16	149.15	-0.82	0.28	0.0116	0.0083	0.80	0.70	0.467	0.148	6.27	59.77	0.25	-4.78	0.139	1.00	1.00	<b>9.66</b>
17	140.58	-1.37	0.17	0.0077	0.0059	0.80	0.70	0.315	0.112	8.42	59.77	0.25	-6.27	0.187	1.00	0.99	<b>10.67</b>
18	144.84	-2.11	0.46	0.0041	0.0032	0.80	0.70	0.168	0.061	10.00	59.77	0.25	-7.92	0.222	1.00	0.99	<b>11.14</b>
19	129.83	-2.90	1.27	0.0018	0.0014	0.80	0.70	0.074	0.026	11.05	59.77	0.25	-9.75	0.245	1.00	0.99	<b>11.44</b>
20	106.3	-3.23	2.28	0.0005	0.0004	0.80	0.70	0.020	0.006	12.02	59.77	0.25	-11.73	0.267	1.00	0.98	<b>11.94</b>
21	95.13	-3.53	3.86	0.0001	0.0001	0.80	0.70	0.005	0.002	13.67	59.77	0.25	-14.01	0.304	1.00	0.97	<b>13.33</b>

Κύκλος (n)	Φορτίο $P_{max}$ (kN)	δοκός		Αλληλοεμπλοκή αδρανών						Δράση βλήτρου					Άθροισμα		
		w (mm)	s (mm)	$A_y$	$A_x$	$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\tau_a$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)	$F_{du}$ (kN)	$F_{sy}$ (kN)	a	$F_s$ (kN)	$\tau_d$ (MPa)	$Y_a$	$Y_d$	$V_{cal}$ (kN)
22	83.62	-1.49	0.48	-	-	-	-	0	0	12.43	59.77	0.25	-22.32	0.276	1.00	0.93	<b>11.53</b>
23	101.77	-1.60	0.62	-	-	-	-	0	0	15.59	59.77	0.25	-23.87	0.346	-	0.92	<b>14.29</b>
24	109.63	-1.75	0.71	-	-	-	-	0	0	15.59	59.77	0.25	-26.14	0.346	-	0.90	<b>14.02</b>
25	114.86	-1.92	0.83	-	-	-	-	0	0	15.59	59.77	0.25	-28.68	0.346	-	0.88	<b>13.68</b>
26	112.04	-2.10	0.86	-	-	-	-	0	0	15.59	59.77	0.25	-31.35	0.346	-	0.85	<b>13.27</b>
27	108.52	-2.32	0.86	-	-	-	-	0	0	15.59	59.77	0.25	-34.64	0.346	-	0.81	<b>12.71</b>
28	91.93	-2.80	0.71	-	-	-	-	0	0	15.59	59.77	0.25	-41.90	0.346	-	0.71	<b>11.12</b>
29	92.27	-3.17	0.66	-	-	-	-	0	0	15.59	59.77	0.25	-47.43	0.346	-	0.61	<b>9.49</b>
30	89.27	-3.61	0.72	-	-	-	-	0	0	15.59	59.77	0.25	-53.90	0.346	-	0.43	<b>6.74</b>
31	74.67	-3.95	1.08	-	-	-	-	0	0	15.59	59.77	0.25	-59.02	0.346	-	0.16	<b>2.46</b>
32	58.94	-3.95	1.43	-	-	-	-	0	0	15.59	59.77	0.25	-59.08	0.346	-	0.15	<b>2.37</b>
33	38.10	-5.18	-11.13	-	-	-	-	0	0	15.59	59.77	0.25	-77.34	0.346	-	-	-
34	28.21	-5.01	-11.13	-	-	-	-	0	0	15.59	59.77	0.25	-74.86	0.346	-	-	-
35	20.91	-5.10	-11.13	-	-	-	-	0	0	15.59	59.77	0.25	-76.19	0.346	-	-	-



### ΔΟΚΙΜΙΟ Β3

Πίνακας Π.8: Υπολογισμός φορτίου αντίστασης της διεπιφάνειας τοιχώματος – δοκού για κάθε θετικό κύκλο βάσει του προσομοιώματος

Κύκλο ς (n)	Φορτίο P <sub>max</sub> (kN)	δοκός		Αλληλοεμπλοκή αδρανών						Δράση βλήτρου					Άθροισμα		
		w (mm )	s (mm )	A <sub>y</sub>	A <sub>x</sub>	λ <sub>x</sub>	λ <sub>y</sub>	τ <sub>a</sub> (MPa )	σ <sub>a</sub> (MPa )	F <sub>du</sub> (kN)	F <sub>sy</sub> (kN)	α	F <sub>s</sub> (kN)	τ <sub>d</sub> (MPa )	Y <sub>a</sub>	Y <sub>d</sub>	V <sub>cal</sub> (kN)
1	20.18	0.00	0.02	0.2009	0.2211	0.00	0.00	0.002	0.004	0.61	47.82	1.00	0.23	0.013	1.00	1.00	<b>0.62</b>
2	40.12	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	0.000	0.000	0.00	47.82	0.75	-0.03	0.000	1.00	1.00	<b>0.00</b>
3	48.97	0.00	0.02	0.2009	0.2211	0.00	0.00	0.000	0.000	0.54	47.82	0.60	0.03	0.012	1.00	1.00	<b>0.54</b>
4	57.03	0.00	0.01	0.2260	0.2569	0.31	0.17	3.058	2.803	0.34	47.82	0.50	-0.02	0.007	0.47	1.00	<b>10.92</b>
5	57.45	0.00	0.02	0.2009	0.2211	0.80	0.70	9.142	5.218	0.50	47.82	0.43	-0.12	0.011	0.25	1.00	<b>17.50</b>
6	67.10	-0.01	0.02	0.1535	0.1573	0.80	0.70	6.824	3.583	0.50	47.82	0.38	-0.16	0.011	0.37	1.00	<b>18.98</b>
7	64.28	-0.01	0.02	0.1535	0.1573	0.80	0.70	6.824	3.583	0.54	47.82	0.33	-0.19	0.012	0.37	1.00	<b>19.01</b>
8	75.42	-0.01	0.02	0.1535	0.1573	0.80	0.70	6.824	3.583	0.61	47.82	0.30	-0.18	0.013	0.37	1.00	<b>19.08</b>
9	80.27	-0.01	0.03	0.1713	0.1833	0.80	0.70	7.725	4.267	0.74	47.82	0.27	-0.20	0.016	0.31	1.00	<b>18.30</b>
10	69.58	-0.02	0.03	0.1192	0.1206	0.80	0.70	5.279	2.729	0.81	47.82	0.25	-0.23	0.018	0.49	1.00	<b>19.57</b>
11	77.79	-0.03	0.06	0.1259	0.1324	0.80	0.70	5.644	3.057	1.51	47.82	0.25	-0.50	0.034	0.43	1.00	<b>19.42</b>
12	81.09	-0.03	0.09	0.1393	0.1597	0.80	0.70	6.427	3.840	2.35	47.82	0.25	-0.49	0.052	0.35	1.00	<b>18.59</b>
13	85.40	-0.04	0.12	0.1284	0.1518	0.80	0.70	5.988	3.698	3.16	47.82	0.25	-0.59	0.070	1.00	1.00	<b>46.89</b>
14	88.95	-0.05	0.14	0.1180	0.1402	0.80	0.70	5.514	3.422	3.57	47.82	0.25	-0.70	0.079	1.00	1.00	<b>43.83</b>
15	92.12	-0.05	0.12	0.1146	0.1295	0.66	0.52	4.047	2.645	3.23	47.82	0.25	-0.81	0.072	0.50	1.00	<b>18.07</b>
16	98.82	-0.07	0.16	0.0994	0.1146	0.80	0.70	4.595	2.760	4.24	47.82	0.25	-1.00	0.094	0.48	1.00	<b>20.39</b>
17	100.18	-0.10	0.18	0.0775	0.0852	0.80	0.70	3.526	2.008	4.78	47.82	0.25	-1.43	0.106	0.66	1.00	<b>21.81</b>
18	99.88	-0.13	0.20	0.0616	0.0656	0.80	0.70	2.773	1.522	5.32	47.82	0.25	-1.99	0.118	0.87	1.00	<b>22.98</b>
19	98.61	-0.20	0.22	0.0342	0.0343	0.80	0.70	1.511	0.773	5.72	47.82	0.25	-2.99	0.127	1.00	1.00	<b>16.74</b>
20	97.80	-0.28	0.24	0.0174	0.0134	0.80	0.70	0.713	0.251	6.12	47.82	0.25	-4.20	0.136	1.00	1.00	<b>11.31</b>
21	96.75	-0.39	0.27	0.0072	0.0051	0.80	0.70	0.287	0.089	7.03	47.82	0.25	-5.87	0.156	1.00	0.99	<b>9.07</b>
22	94.73	-0.54	0.28	0.0015	0.0009	0.80	0.70	0.057	0.014	7.23	47.82	0.25	-8.13	0.161	1.00	0.99	<b>7.55</b>
23	94.01	-1.14	0.20	0.0000	0.0000	0.43	0.28	0.001	0.000	5.32	47.82	0.25	-16.96	0.118	1.00	0.93	<b>4.97</b>
24	88.62	-1.91	0.16	-	-	-	-	-	-	4.04	47.82	0.25	-28.56	0.090	1.00	0.80	<b>3.24</b>
25	80.10	-3.18	0.23	-	-	-	-	-	-	5.85	47.82	0.25	-47.47	0.130	1.00	0.12	<b>0.71</b>

### ΔΟΚΙΜΙΟ Β3

Πίνακας Π.9: Υπολογισμός φορτίου αντίστασης της διεπιφάνειας τοιχώματος – θεμελίωσης για κάθε θετικό κύκλο βάσει του προσομοιώματος

Κύκλος (n)	Φορτίο $P_{max}$ (kN)	δοκός		Αλληλοεμπλοκή αδρανών						Δράση βλήτρου					Άθροισμα		
		w (mm)	s (mm)	$A_y$	$A_x$	$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\tau_a$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)	$F_{du}$ (kN)	$F_{sy}$ (kN)	$\alpha$	$F_s$ (kN)	$\tau_d$ (MPa)	$Y_a$	$Y_d$	$V_{cal}$ (kN)
1	20.18	0.00	0.01	0.1343	0.1349	0	0	0.000	0.000	0.20	59.77	1.00	0.04	0.004	1.00	1.00	0.20
2	40.12	0.00	-0.02	0.1773	0.1863	0.80	0.00	-2.578	6.445	-0.40	59.77	0.75	-0.03	-0.009	0.21	1.00	-4.28
3	48.97	-0.01	-0.02	0.1535	0.1573	0.80	0.70	-6.824	3.583	-0.64	59.77	0.60	-0.37	-0.014	0.37	1.00	-19.11
4	57.03	-0.01	-0.07	0.1827	0.2327	0.80	0.70	-8.752	5.839	-1.88	59.77	0.50	-0.22	-0.042	0.23	1.00	-16.42
5	57.45	-0.01	-0.07	0.1827	0.2327	0.80	0.70	-8.752	5.839	-1.88	59.77	0.43	-0.23	-0.042	0.23	1.00	-16.42
6	67.10	-0.01	-0.07	0.1827	0.2327	0.72	0.59	-7.575	5.337	-1.78	59.77	0.38	-0.21	-0.040	0.25	1.00	-15.55
7	64.28	-0.02	-0.09	0.1592	0.1955	0.80	0.70	-7.525	4.838	-2.25	59.77	0.33	-0.30	-0.050	0.27	1.00	-17.34
8	75.42	-0.02	-0.06	0.1528	0.1696	0.38	0.23	-2.604	2.168	-1.55	59.77	0.30	-0.38	-0.034	0.61	1.00	-13.20
9	80.27	-0.03	-0.02	0.0455	0.0218	0.11	0.04	-0.111	0.075	-0.57	59.77	0.27	-0.49	-0.013	1.00	1.00	-1.38
10	69.58	-0.04	-0.04	0.0718	0.0475	0.80	0.70	-2.831	0.776	-1.01	59.77	0.25	-0.67	-0.022	1.00	1.00	-
11	77.79	-0.06	-0.04	0.0358	0.0183	0.75	0.63	-1.215	0.199	-0.97	59.77	0.25	-0.87	-0.022	1.00	1.00	-9.85
12	81.09	-0.08	-0.01	0.0004	0.0001	0.02	0.00	0.000	0.000	-0.13	59.77	0.25	-1.12	-0.003	1.00	1.00	-0.13
13	85.40	-0.09	0.00	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.000	0.000	0.00	59.77	0.25	-1.33	0.000	1.00	1.00	0.00
14	88.95	-0.11	0.01	0.0001	0.0000	0.00	0.00	0.000	0.000	0.30	59.77	0.25	-1.57	0.007	1.00	1.00	0.30
15	92.12	-0.12	0.04	0.0053	0.0018	0.80	0.70	0.185	-0.003	1.01	59.77	0.25	-1.85	0.022	1.00	1.00	2.36
16	98.82	-0.16	0.06	0.0054	0.0021	0.80	0.70	0.191	0.006	1.45	59.77	0.25	-2.34	0.032	1.00	1.00	2.84
17	100.18	-0.23	0.06	0.0010	0.0003	0.80	0.70	0.034	-0.001	1.61	59.77	0.25	-3.36	0.036	1.00	1.00	1.86
18	99.88	-0.33	0.11	0.0011	0.0005	0.80	0.70	0.039	0.003	2.76	59.77	0.25	-4.92	0.061	1.00	1.00	3.03
19	98.61	-0.47	0.10	0.0000	0.0000	0.65	0.51	0.000	0.000	2.49	59.77	0.25	-7.02	0.055	1.00	0.99	2.47
20	97.80	-0.64	0.06	0.0000	0.0000	0.30	0.16	0.000	0.000	1.51	59.77	0.25	-9.50	0.034	1.00	0.99	1.49
21	96.75	-0.78	0.01	0.0000	0.0000	0.01	0.00	0.000	0.000	0.20	59.77	0.25	-	0.004	1.00	0.98	0.20

Κύκλος (n)	Φορτίο $P_{max}$ (kN)	δοκός		Αλληλοεμπλοκή αδρανών						Δράση βλήτρου					Άθροισμα		
		w (mm)	s (mm)	$A_y$	$A_x$	$\lambda_x$	$\lambda_y$	$\tau_a$ (MPa)	$\sigma_a$ (MPa)	$F_{du}$ (kN)	$F_{sy}$ (kN)	a	$F_s$ (kN)	$\tau_d$ (MPa)	$Y_a$	$Y_d$	$V_{cal}$ (kN)
22	94.73	-0.93	-0.02	-	-	-	-	-	-	-0.60	59.77	0.25	- 13.88	-0.013	-	0.97	<b>-0.59</b>
23	94.01	-1.07	0.01	-	-	-	-	-	-	0.17	59.77	0.25	- 16.04	0.004	-	0.96	<b>0.16</b>
24	88.62	-1.18	0.08	-	-	-	-	-	-	2.05	59.77	0.25	- 17.66	0.046	-	0.96	<b>1.96</b>
25	80.10	-1.25	0.23	-	-	-	-	-	-	5.95	59.77	0.25	- 18.75	0.132	-	0.95	<b>5.66</b>
26	84.74	-1.32	0.29	-	-	-	-	-	-	7.49	59.77	0.25	- 19.68	0.167	-	0.94	<b>7.08</b>
27	85.56	-1.45	0.31	-	-	-	-	-	-	8.17	59.77	0.25	- 21.72	0.181	-	0.93	<b>7.61</b>
28	87.55	-1.58	0.35	-	-	-	-	-	-	9.07	59.77	0.25	- 23.64	0.202	-	0.92	<b>8.33</b>
29	85.98	-1.69	0.34	-	-	-	-	-	-	8.74	59.77	0.25	- 25.27	0.194	-	0.91	<b>7.92</b>
30	80.72	-2.15	0.47	-	-	-	-	-	-	12.20	59.77	0.25	- 32.11	0.271	-	0.84	<b>10.29</b>
31	73.50	-1.97	0.55	-	-	-	-	-	-	14.22	59.77	0.25	- 29.48	0.316	-	0.87	<b>12.37</b>
32	72.54	-1.96	0.58	-	-	-	-	-	-	15.09	59.77	0.25	- 29.32	0.335	-	0.87	<b>13.15</b>
33	71.65	-2.02	0.61	-	-	-	-	-	-	15.80	59.77	0.25	- 30.12	0.351	-	0.86	<b>13.64</b>
34	72.85	-2.15	0.60	-	-	-	-	-	-	15.59	59.77	0.25	- 32.15	0.347	-	0.84	<b>13.14</b>
35	72.09	-2.31	0.56	-	-	-	-	-	-	14.45	59.77	0.25	- 34.45	0.321	-	0.82	<b>11.81</b>
36	62.08	-2.27	0.58	-	-	-	-	-	-	15.12	59.77	0.25	- 33.89	0.336	-	0.82	<b>12.46</b>