

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	4
Κεφάλαιο 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ	5
2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	12
Κεφάλαιο 2 : ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	
1 ΑΠΛΟ & ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΧΑΛΥΒΑ	13
2 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	18
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	18
2.1.1 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΙΝΩΝ	18
2.1.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	22
2.1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	24
2.1.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ	25
2.1.5 ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ	28
2.2 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ (Steel Fiber Reinforced Concrete).....	29
2.2.1 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	31
2.2.2 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ.....	34
2.2.3 ΑΠΟΚΡΙΣΗ SFRC ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ	54
2.2.4 ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΔΟΚΩΝ ΑΠΟ SFRC	59
2.2.5 ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑΣ – ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ.....	61
2.2.6 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	63

2.3	ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ	64
2.3.1	ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ GFRC	67
2.3.2	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ.....	67
2.3.3	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΑΟΠΛΟ ΚΑΙ ΑΠΛΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	68
2.3.4	ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΥ ΣΤΑ ΑΛΚΑΛΙΑ (AR), ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΓΥΑΛΙ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ.....	68
2.4	ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟΥ	70
2.4.1	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ.....	72
2.4.2	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ	74
Κεφάλαιο 3 : ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΟΥ ΙΝΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑΣ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ		
1	ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	76
2	ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	79
3	ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ	82
4	ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ.....	85
5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ.....	87
Κεφάλαιο 4 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ ΑΠΟ SFRC		
1	ΓΕΝΙΚΑ	89
2	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ της ΣΤΑΔΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	92
2.1	Υλικά.....	93
2.2	Σταδιακή κατασκευή και πλήρωση της λεκάνης.....	95
Κεφάλαιο 5 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		
1	ΦΡΑΓΜΑ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ ΙΝΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	96

1.1	ΣΤΑΔΙΟ 3 ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ: ΠΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΜΕΧΡΙ ΤΑ 148 m.....	97
1.1.1	$S_{min} = \sigma_3$ (MPa)	97
1.1.2	$S_{22} = \sigma_{22}$ (MPa)	98
1.1.3	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ U_2	98
1.2	ΣΤΑΔΙΟ 4 ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ : ΕΠΙΒΟΛΗ 1 m ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ ΣΤΗ ΣΤΕΨΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ	99
1.2.1	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ U_2	99
2	ΠΛΑΚΑ ΙΝΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	100
2.1	ΣΤΑΔΙΟ 3 ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ: ΠΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΜΕΧΡΙ ΤΑ 148 m.....	100
2.1.1	$S_{min} = \sigma_3$ (MPa)	100
2.1.2	$S_{max} = \sigma_1$ (MPa)	104
2.1.3	$S_{22} = \sigma_{22}$ (MPa).....	107
2.1.4	ΖΗΜΙΑ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ	111
2.1.5	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ SF ΣΕ ΘΛΙΨΗ (SF_c) ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ (SF_t)	
	114	
2.2	ΣΤΑΔΙΟ 4 ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ : ΕΠΙΒΟΛΗ 1 m ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ ΣΤΗ ΣΤΕΨΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ	116
2.2.1	$S_{min} = \sigma_3$ (MPa).....	117
2.2.2	$S_{max} = \sigma_1$ (MPa)	120
2.2.3	$S_{22} = \sigma_{22}$ (MPa).....	123
2.2.4	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ SF ΣΕ ΘΛΙΨΗ (SF_c)	126
	Κεφάλαιο 6 : ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	127
	Κεφάλαιο 7 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όλους όσους υποστήριξαν πρακτικά και ηθικά την προσπάθειά μας.

Πρωτίστως, ευχαριστώ θερμά τους Επιβλέποντες Καθηγητές, τον Κο. Ντακούλα Παναγιώτη και τον Κο. Περδικάρη Φίλιππο, για την άριστη καθοδήγησή τους, τις πολύτιμες υποδείξεις τους και την άριστη συνεργασία που είχαμε, κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Η συνεχής υποστήριξή τους, η διαρκής διαθεσιμότητά τους και ο επιστημονικός τους ζήλος, ενίσχυσαν την προσπάθειά μου για την περάτωση αυτής της έρευνας.

Επίσης, θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για τη συνεχή υποστήριξη και κατανόηση που έδειξε, καθώς και για τη σημαντική εμπύχωση που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια της προσπάθειάς μου.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου, που ενίσχυσαν την προσπάθειά μου αυτή, με την υποστήριξη που μου προσέφεραν και τη συμπαράσταση που μου έδωσαν.

Κεφάλαιο 1:

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

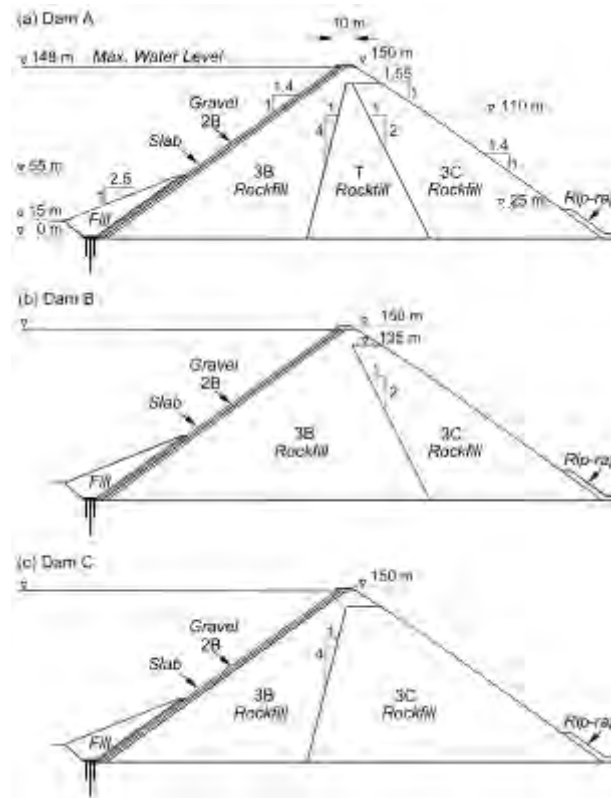
1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Τα φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος είναι ίσως ο πιο οικονομικός τύπος φραγμάτων. Η συνολική διάρκεια κατασκευής τέτοιων φραγμάτων είναι μικρή, με αποτέλεσμα να είναι αρκετά μειωμένο το κόστος κατασκευής τους. Σημειώνεται ότι λόγω της μεγάλης ζήτησης για ύδρευση και παραγωγή ενέργειας, υπάρχει στην παρούσα περίοδο παγκοσμίως μία μεγάλη δραστηριότητα για την κατασκευή υψηλών CFRDs ($H > 150$ m).

Κατά τα τελευταία είκοσι χρόνια κατασκευάστηκε ένας σημαντικός αριθμός φραγμάτων λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος (CFRDs) στην Κίνα, Βραζιλία, Μεξικό, Η.Π.Α., Αυστραλία, Νότιο-Ανατολική Ασία, και αλλού. Μέχρι το 2008 πάνω από 170 CFRDs είχαν ολοκληρωθεί μόνο στην Κίνα, εκ των οποίων περισσότερα από 40 ήταν υψηλότερα των 100 m και 14 ήταν υψηλότερα των 150 m. Το φράγμα Shuibuya βρίσκεται στην Κίνα, έχει ύψος 233 m, το οποίο ολοκληρώθηκε το 2007, και μέχρι πρόσφατα αποτελεί το υψηλότερο φράγμα του κόσμου. Μερικά από τα ψηλότερα φράγματα που συναντώνται στην Κίνα είναι τα εξής: Jiangpinghe με ύψος 221 m, Sanbanxi με ύψος 186 m, Hongjiadu με ύψος 179.5 m, Tianshengqiao I με ύψος 178 m και Tankeng με ύψος 162 m. Επισημαίνεται ότι κάποια από αυτά εμφάνισαν ρηγμάτωση στην πλάκα σκυροδέματος κατά την πλήρωση της λεκάνης.

Στο Σχήμα 1a δίδεται μία τυπική διατομή ενός CFRDs, αποτελούμενη από την ανάντη ζώνη λιθορριπής 3B, μία μεταβατική ζώνη T, και την κατάντη ζώνη λιθορριπής 3C. Η πλάκα σκυροδέματος στην ανάντη πλευρά τοποθετείται πάνω από μία ζώνη χαλίκων 2B. Για περαιτέρω προστασία, στο κάτω μέλος της πλάκας τοποθετείται ένα λεπτόκοκκο επίχωμα.



Σχήμα 1 ΜΕΡΙΚΕΣ ΤΥΠΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (a) ΦΡΑΓΜΑ ΜΕ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ T (b) ΦΡΑΓΜΑ ΜΕ ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΖΩΝΗ 3B (c) ΦΡΑΓΜΑ ΜΕ ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΖΩΝΗ 3C

Τα CFRDs προσφέρουν μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα (Sherard & Cooke 1987, Ma & Cao 2007, Gazetas & Dakoulas 1992):

- a) Η μεγάλη τιμή της γωνίας διατμητικής αντοχής συμπυκνωμένων χαλίκων και λιθορριπής, επιτρέπουν μεγάλες κλίσεις πρανών.
- b) Η σημαντική πίεση του νερού αυξάνει την δυσκαμψία και την αντοχή της λιθορριπής
- c) Η κατασκευή του επιχώματος είναι δυνατόν να γίνει υπό βροχή, επιτυγχάνοντας οικονομία χρόνου και μάλλον καλύτερη συμπύκνωση
- d) Λόγω μεγάλων κλίσεων πρανών υπάρχει οικονομία υλικών
- e) Απαιτούνται λιγότερα υλικά από μακρινές περιοχές
- f) Η κατασκευή είναι ταχύτερη, η λειτουργία ασφαλέστερη και η συντήρηση ευκολότερη
- g) Η σεισμική συμπεριφορά φαίνεται να είναι πολύ καλή, όπως π.χ. στο φράγμα Ziringru κατά τον σεισμό της 12-5-2008 (Wieland 2009, Guan 2009).

Η εξέλιξη του σχεδιασμού των CFRDs μέχρι τώρα βασίσθηκε κυρίως στην εμπειρία από την συμπεριφορά των ήδη κατασκευασμένων φραγμάτων. Τα βασικά χαρακτηριστικά του σχεδιασμού των CFRD's όπως αυτά καθορίστηκαν από την εμπειρία των B. Cooke & J. Sherard (Fitzpatrick&al.1985):

- το συμπακνωμένο λιθόρριπτο επίχωμα με τις μεταβατικές ζώνες, ικανό να παροχετεύσει χωρίς προβλήματα μεγάλες ροές διαμέσου του σώματος του χωρίς την ανάπτυξη πίεσης πόρων,
- την πλάκα σκυροδέματος, πάχους μεταβαλλόμενου ανάλογα με το ύψος νερού, με ειδικά σχεδιασμένους κατακόρυφους αρμούς,
- την πλίνθο, εδραζόμενη σε υγιή βράχο, με πλάτος υπολογισμένο ανάλογα με το υδραυλικό φορτίο και τον αρμό πλίνθου-πλάκας ικανό να παραλάβει τις παραμορφώσεις.

Όμως η επέκταση της εμπειρίας αυτής σε νέες κατασκευές με συνεχώς αυξανόμενα ύψη οδήγησε πρόσφατα σε προβλήματα (Marques Filho et al. 2005). Οι πρόσφατες αυτές εμπειρίες καθιστούν εμφανή την ανάγκη ο σχεδιασμός των CFRD να ξεφύγει από τον έντονο εμπειρισμό και να συμπεριλάβει νέες μεθοδολογίες αριθμητικής προσομοίωσης που σε συνδυασμό με τις εργαστηριακές δοκιμές και τις επιτόπου μετρήσεις, επιτρέπουν την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς και την αποτίμηση της επιρροής των σημαντικών παραμέτρων (Dakoulas et al. 2008).

Η κύρια ανησυχία για την ευστάθεια των CFRDs είναι η παραμόρφωση της πλάκας σκυροδέματος. Κατά την πλήρωση του φράγματος με νερό, η υδατική πίεση και οι παραμορφώσεις του φράγματος οδηγούν στην παραμόρφωση της πλάκας σκυροδέματος. Η πλάκα λειτουργεί σαν αδιαπέρατη μεμβράνη και οποιαδήποτε ρηγμάτωση της επιφάνειάς της θα επιτρέψει στο νερό να διεισδύσει στον πυρήνα λιθορριπής του φράγματος με αποτέλεσμα τη μερική διάβρωση και περαιτέρω αύξηση των καθιζήσεων της λιθορριπής με άμεση συνέπεια την αύξηση των ζημιών της πλάκας σκυροδέματος.

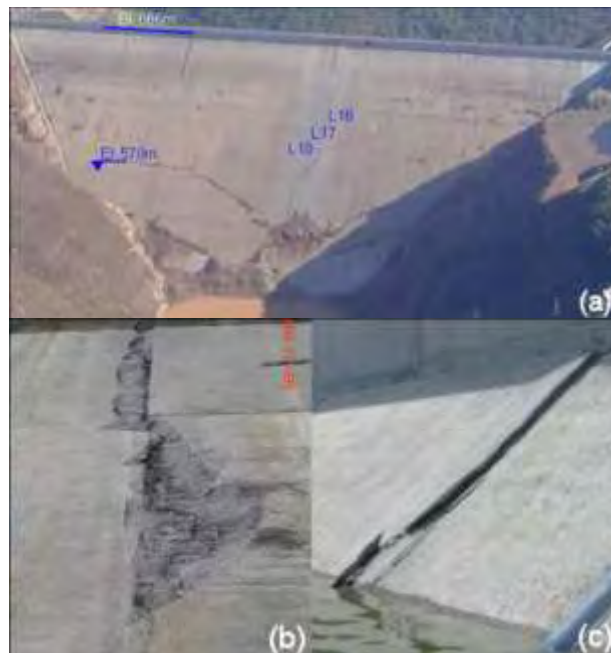
Κατά την κατασκευή, την πλήρωση και λειτουργία του φράγματος λαμβάνουν χώρα καθιζήσεις. Οι καθιζήσεις των CFRDs οφείλονται κυρίως στην συμπίεση, μεταβολή ενεργών τάσεων, και τον ερπυσμό της λιθορριπής και του υλικού θεμελίωσης υπό το ίδιο βάρος και το βάρος του νερού και εξαρτώνται από την φύση του υλικού, την διαβάθμιση και το βαθμό συμπύκνωσης. Επίσης, καθιζήσεις είναι δυνατόν να προκύψουν κατά την διάρκεια σημαντικής σεισμικής δόνησης λόγω της δυναμικής συνίζησης και της παραμόρφωσης των πρανών (bulging). Σε παλαιότερα φράγματα, η ελαφρά συμπύκνωση ή η χρήση μεγάλου και ομοιόμορφου μεγέθους λιθορριπής είχε ως συνέπεια την εμφάνιση σημαντικών καθιζήσεων.

Σε σύγχρονα φράγματα επιδιώκεται καλή συμπύκνωση με στρώσεις πάχους ≤ 1 m και αρκετές διελεύσεις του συμπακνωτή. Η μακροπρόθεσμη καθίζηση ενός καλά συμπακνωμένου φράγματος κυμαίνεται από 0.1 % σε 0.2 % του ύψους του φράγματος. Ισχυρές σεισμικές δονήσεις μπορούν να προκαλέσουν καθιζήσεις της

τάξεως του 0.5 με 1.0 m. Όμως, με την συνεχή αύξηση του ύψους των νέων φραγμάτων αλλά και την υιοθέτηση ταχύτερων ρυθμών κατασκευής με σταδιακή σκυροδέτηση της πλάκας, αυξάνονται σημαντικά οι τάσεις και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις, με αποτέλεσμα προβλήματα έντονης παραμόρφωσης του επιχώματος και αστοχίες στην πλάκα σκυροδέματος. Στα Σχήματα 2 και 3 παρουσιάζονται σημαντικές ρωγμές που εμφανίσθηκαν στις πλάκες των φραγμάτων Mohale (H=145 m) Campos Novos (H=202 m) και Barra Grande (H=186 m).



Σχήμα 2 ΡΩΓΜΕΣ ΣΤΗΝ ΠΛΑΚΑ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΜΟΗΑΛΕ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΛΗΡΩΣΗ



Σχήμα 3 ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ: (a) CAMPOS NOVOS (b) BARRA GRANDE (c) ΜΟΗΑΛΕ (MARULANDA, C. 2009)

Οι εφελκυστικές ρηγματώσεις λόγω ανομοιογενών καθιζήσεων που παρουσιάσθηκαν σε μερικά φράγματα όπως στα Aquamilpa (187m) και TSQ-I (178 m) καθώς και οι θλιπτικές αστοχίες στο σκυρόδεμα των Barra Grande (185 m), Campos Novos (202 m) και σε άλλα έργα που κατασκευάσθηκαν σε στενές

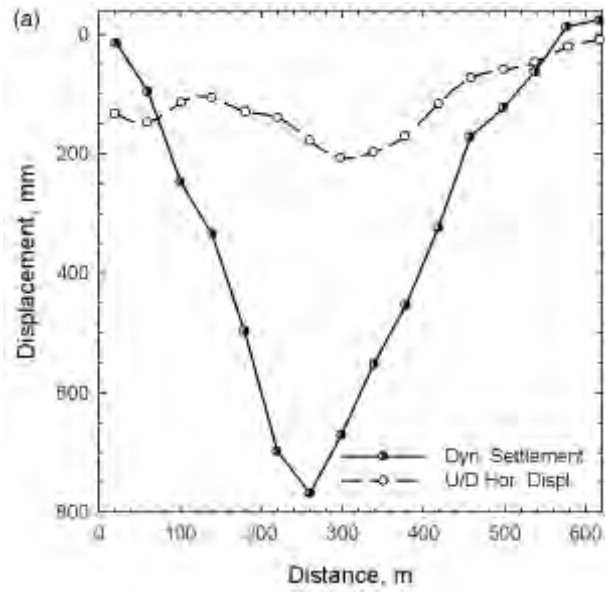
κοιλάδες, ήταν μερικά φαινόμενα που έδωσαν την ευκαιρία να διερευνηθούν βαθύτερα οι μηχανισμοί και οι παράμετροι που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των CFRDs. Ρηγματώσεις στην πλάκα σκυροδέματος και τελικά αστάθεια της κατασκευής μπορεί να προκληθούν τόσο από κατασκευαστική αστοχία όσο και από κάποια ισχυρή σεισμική δόνηση.

Οι πιο κοινές αιτίες των αστοχιών των φραγμάτων είναι:

- Υπερχείλιση των αναχωμάτων λόγω ανεπάρκειας του υπερχειλιστή
- Λάθη στο σχεδιασμό ή στη κατασκευή
- Γεωλογικά προβλήματα στη θεμελίωση
- Κατολισθήσεις στον ταμιευτήρα
- Ανθρώπινοι παράγοντες
- Λειτουργικοί παράγοντες

Παράδειγμα ζημίας της πλάκας σκυροδέματος φράγματος λιθορριπής αποτελεί το φράγμα Ziringru, στην Κίνα, το οποίο υπέστη σημαντικές ρωγμές και θλιπτικές αστοχίες στην ανάντη πλάκα σκυροδέματος όταν στις 12 Μαΐου 2008 επλήγη από τον ισχυρό σεισμό Wenchuan μεγέθους $M=8$, που δόνησε την περιοχή Sichuan της Κίνας. Το φράγμα, το οποίο λειτουργεί από το 2006, έχει ύψος 156 m, μήκος στέψης 635 m και κλίσεις πρανών 1:1.4 ανάντη και 1:1.5 κατόντη. Η θέση του φράγματος απείχε μόλις 17.17 km από το επίκεντρο του σεισμού, κατά τον οποίο καταγράφηκαν επιταχύνσεις στον βράχο της βάσης που ξεπέρασαν το 0.5g, ενώ η ένταση ήταν ΙΧ έως Χ (Guan 2009).

Το φράγμα Ziringru είχε σχεδιασθεί για μία αρκετά μικρότερη μέγιστη επιτάχυνση ίση προς 0.26g. Σημειώνεται ότι η κατεύθυνση της σεισμικής διάρρηξης σχηματίζει σχετικά μικρή γωνία με τον διαμήκη άξονα το φράγματος. Το φράγμα υπέστη μέγιστη δυναμική συνίζηση στην στέψη ίση προς 0.76 m και κατόντη μετατόπιση ίση προς 0.21 m, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, όπου δίδονται οι κατανομές συνίζησης και μετατόπισης κατά μήκος της στέψης (Guan 2009). Στο Σχήμα 5 φαίνεται η αστοχία του σκυροδέματος λόγω ανάπτυξης σημαντικών θλιπτικών τάσεων στους κατακόρυφους αρμούς της πλάκας σκυροδέματος (Wieland 2009). Αξίζει να τονισθεί ότι παρά την πολύ ισχυρή δόνηση και τις ζημίες που υπέστη η πλάκα σκυροδέματος, το φράγμα επιτέλεσε με εξαιρετικό τρόπο τον βασικό στόχο σχεδιασμού και μετά από μερικές επιδιορθώσεις σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα τέθηκε πάλι σε λειτουργία.



Σχήμα 4 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΝΙΖΗΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΣΤΕΨΗΣ (GUAN 2009)



Σχήμα 5 ΘΡΑΥΞΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΛΟΓΩ ΘΛΙΨΗΣ ΣΤΟΥΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥΣ ΑΡΜΟΥΣ ΤΗΣ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑΣ (WIELAND 2009)

Η ανάπτυξη σημαντικών θλιπτικών σεισμικών τάσεων στους κατακόρυφους αρμούς μεταξύ των πλακών οφείλεται κυρίως στους εξής παράγοντες:

- την προς ανάντη μετατόπιση του φράγματος κατά την δόνηση
- τη δυναμική συνίζηση της λιθορριπής και
- τη διαμήκη ταλάντωση του φράγματος λόγω ισχυρής διέγερσης στην κατεύθυνση αυτή

Λόγω όλων των προαναφερθέντων στοιχείων, ορισμένοι πρακτικοί κανόνες είναι χρήσιμο να υιοθετηθούν στο σχεδιασμό των νέων έργων και κάποιες σημαντικές βελτιώσεις έχουν ήδη γίνει σε πρόσφατα κατασκευασμένα φράγματα όπως το Karahnukar (202m) και το Shuibuya (233m). Οι βελτιώσεις αυτές αφορούν σε (MA Hongqi, CAO Keming 2008) :

- Αύξηση της ακαμψίας του επιχώματος στην ανάντη περιοχή στα $\frac{2}{3}$ της διατομής και στο πάνω $\frac{1}{4}$ Η τμήματος του φράγματος, με βελτίωση της πυκνότητας του. Υιοθέτηση δηλαδή στα τμήματα αυτά καλύτερης διαβάθμισης στην λιθορριπή, στρώσης συμπύκνωσης 0.6 - 0.8m, περισσότερες διελεύσεις δονητικού οδοστρωτήρα (6 - 8) και συστηματικής διαβροχής.
- Καθορισμό των σταδίων κατασκευής του φράγματος ώστε να προβλέπεται χρόνος για ολοκλήρωση του μέγιστου μέρους των καθιζήσεων πριν την κατασκευή της πλάκας.
- Ενίσχυση της πλάκας ώστε να αντιμετωπίζονται τα φαινόμενα θλιπτικής αστοχίας της. Στο μέτρο αυτό περιλαμβάνονται: Αύξηση του πάχους της, τοποθέτηση οπλισμού σε δύο εσχάρες και στις παρειές των αρμών, πρόβλεψη ανοίγματος για απορρόφηση των παραμορφώσεων σε δύο κατακόρυφους αρμούς, επανασχεδιασμό των λεπτομερειών που αδυνατίζουν το πάχος της πλάκας, κ. ά.

Το πιο σημαντικό, όμως, βήμα για την ενίσχυση της πλάκας σκυροδέματος ενός φράγματος λιθορριπής είναι η κατασκευή της πλάκας με ένα τεχνολογικά προηγμένο και περισσότερο ανθεκτικό σκυρόδεμα. Αυτό είναι το ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες από χάλυβα, γυαλί, προπυλένιο ή από κάποιο άλλο υλικό, το οποίο παρουσιάζει βελτιωμένες ιδιότητες και πιο πλάσטיμη συμπεριφορά σε σχέση με το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα. Η ανωτερότητα του υλικού αυτού αποδεικνύεται στη συνέχεια, στην εργασία αυτή.

2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς του ενισχυμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα (SFRC) ώστε να καταστεί δυνατή η χρήση του ως υλικό κατασκευής της ανάντη πλάκας ενός φράγματος λιθορριπής. Σε ένα έργο τέτοιας εμβέλειας, ζητούμενο είναι η μείωση της πιθανότητας αστοχίας και η αντοχή στο χρόνο μέσα από τη χρήση υλικών με αυξημένη πλαστιμότητα και βέλτιστη συμπεριφορά σε οριακές καταστάσεις φόρτισης. Διότι μία πιθανή ζημία, η οποία μπορεί να εξελιχθεί σε αστοχία του φράγματος, μπορεί να αποφέρει συνέπειες τρομακτικές τόσο σε απώλειες ανθρώπινων ζώων, όσο και σε καταστροφές περιουσιών και γενικά επιπτώσεις στην οικονομία ενός τόπου.

Κεφάλαιο 2 :

ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1 ΑΠΛΟ & ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΧΑΛΥΒΑ

Για αιώνες, το σκυρόδεμα έχει χρησιμοποιηθεί ως ανθεκτικό οικοδομικό υλικό. Από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, λόγω της εμφάνισης της ενίσχυσης του σκυροδέματος με χάλυβα, το σκυρόδεμα έχει γίνει το ευρύτετα χρησιμοποιούμενο υλικό στον κατασκευαστικό τομέα. Ανθεκτικό στους περιβαλλοντικούς παράγοντες και στη διάβρωση, το σκυρόδεμα μπορεί να αντισταθεί στην προσβολή από το φως του ήλιου, την υγρασία, τους περισσότερους μικροοργανισμούς και τις χημικές ουσίες. Είναι σε θέση να αναπτύξει αντοχή σε θλίψη τόσο υψηλή, έως και 96460 kPa, όμως έχει σχετικά χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη. Ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των πρώτων υλών και των εναλλακτικών προϊόντων οικοδόμησης, το σκυρόδεμα μπορεί να είναι σχετικά οικονομικό για να παραχθεί και απλό ώστε να διαμορφωθεί σε σύνθετες μορφές οικοδόμησης.

Το σκυρόδεμα παρασκευάζεται με μίξη σε κατάλληλες αναλογίες τσιμέντου, λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών, νερού και τακτικά χρησιμοποιούνται και πρόσμικτα, εφόσον απαιτείται, τα οποία βελτιώνουν τις παραμέτρους του, όπως την εργασιμότητα, την ταχύτητα σκλήρυνσης, κ. ά. Η χρησιμοποιούμενη ποσότητα και η ποιότητα κάθε υλικού (δηλ. τσιμέντο, νερό και αδρανή) επηρεάζουν τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος.

Πιο συγκεκριμένα, καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει η ποσότητα του νερού στο μίγμα σε σχέση με την περιεκτικότητά του σε τσιμέντο. Η σχέση αυτή αναφέρεται ως ο λόγος νερού προς τσιμέντο ή απλά w / c και αποτελεί θεμελιώδη βάση για το « νόμο του Abram » , ο οποίος δηλώνει ότι υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ των χαρακτηριστικών της αντοχής του τσιμέντου που συνθέτει το σκυρόδεμα και της ποσότητας του νερού το οποίο χρησιμοποιείται ανά μονάδα βάρους του τσιμέντου. Όσο πιο μικρός είναι ο λόγος w / c , τόσο πιο βελτιωμένες φυσικές ιδιότητες θα εμφανίσει το παραγόμενο σκυρόδεμα.

Στόχος είναι να αναμιχθούν όλα τα υλικά του μίγματος σε συγκεκριμένες ποσότητες ώστε να παραχθεί σκυρόδεμα το οποίο θα είναι εύκολο να μεταφερθεί, να τοποθετηθεί, να συμπιεστεί, να επεξεργαστεί, να διαμορφωθεί σε καλούπια κάθε σχήματος και το οποίο θα σταθεροποιηθεί και θα στερεοποιηθεί δίνοντας τελικά ένα ισχυρό και ανθεκτικό προϊόν. Έχει τη μοναδική ιδιότητα να περνά σε μικρό χρονικό διάστημα από τη ρευστή κατάσταση (νωπό), στη στερεά.

Το σκυρόδεμα, μέχρι να αποκτήσει τα τελικά του χαρακτηριστικά περνά από τρεις φάσεις, σε κάθε μία από τις οποίες παρουσιάζει και διαφορετικές ιδιότητες. Μετά την προσθήκη των συστατικών που συνθέτουν το σκυρόδεμα, δημιουργείται ένα νωπό μίγμα το οποίο είναι εύπλαστο και μπορεί να διαμορφωθεί σε διάφορα σχήματα, καθώς επίσης εμφανίζει αυξημένη πλαστικότητα. Αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική για τη χύτευση, διάστρωση και συμπίεση του σκυροδέματος. Έπειτα, λόγω της έκθεσης στον ατμοσφαιρικό αέρα, και μετά τη συμπύκνωση και τη διάστρωσή του, το υλικό αρχίζει να γίνεται άκαμπτο και να αποκτά ένα μέρος της αντοχής του. Το υλικό καταλήγει στη φάση της σκλήρυνσης, όπου και αποκτά την τελική του αντοχή και γενικά τις τελικές ιδιότητες του.

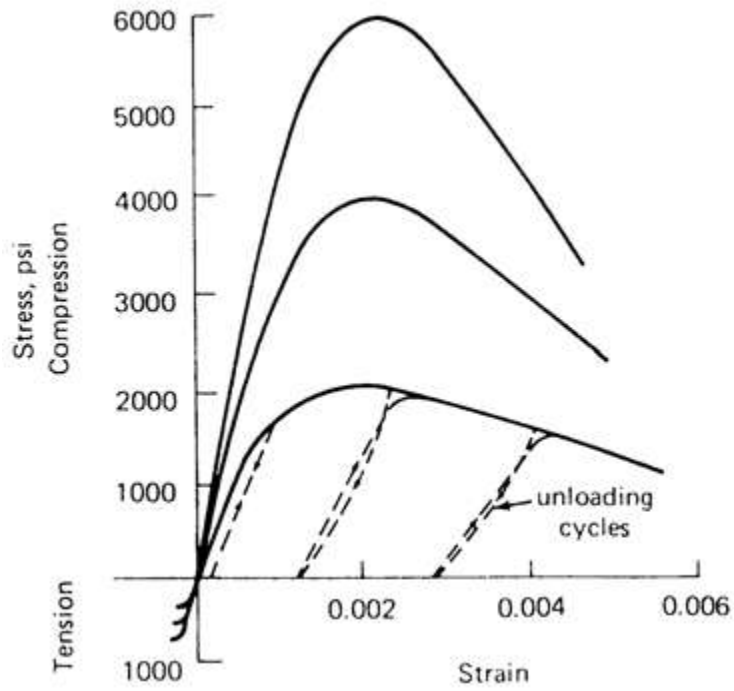
Σε ό, τι αφορά στο ρυθμό σκλήρυνσης του σκυροδέματος, σε γενικές γραμμές, σε τρεις μέρες αποκτά το 50 % της τελικής του αντοχής, σε μία εβδομάδα αποκτά το 70 % και σε εικοσιοκτώ μέρες αποκτά το 90 % της τελικής του αντοχής. Το 100 % το αποκτά με την παρέλευση πολλών ετών. Υπό καλές συνθήκες περιβάλλοντος το όριο ηλικίας του σκυροδέματος μπορεί αν ξεπεράσει κατά πολύ τα 100 χρόνια χωρίς σημαντικές αλλοιώσεις στη μάζα του και στον οπλισμό.

Οι βασικότερες ιδιότητες του σκυροδέματος είναι :

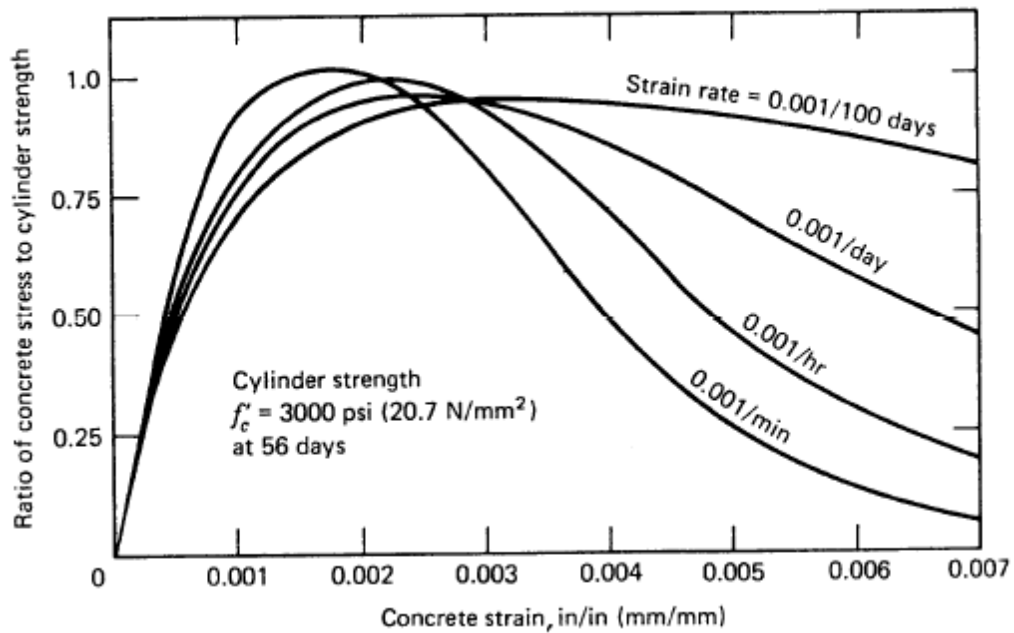
- η ανθεκτικότητα – διάρκεια στο χρόνο
- η αντοχή
- η εργασιμότητα
- η συνεκτικότητα

Το απλό σκυρόδεμα έχει υψηλή θλιπτική αντοχή, πολύ χαμηλή εφελκυστική, σχεδόν μηδενική, και πολύ χαμηλή διατμητική. Αντίθετα, το συμβατικά οπλισμένο με χάλυβα σκυρόδεμα παρουσιάζει πολύ υψηλή θλιπτική αντοχή, υψηλή εφελκυστική και υψηλή διατμητική αντοχή.

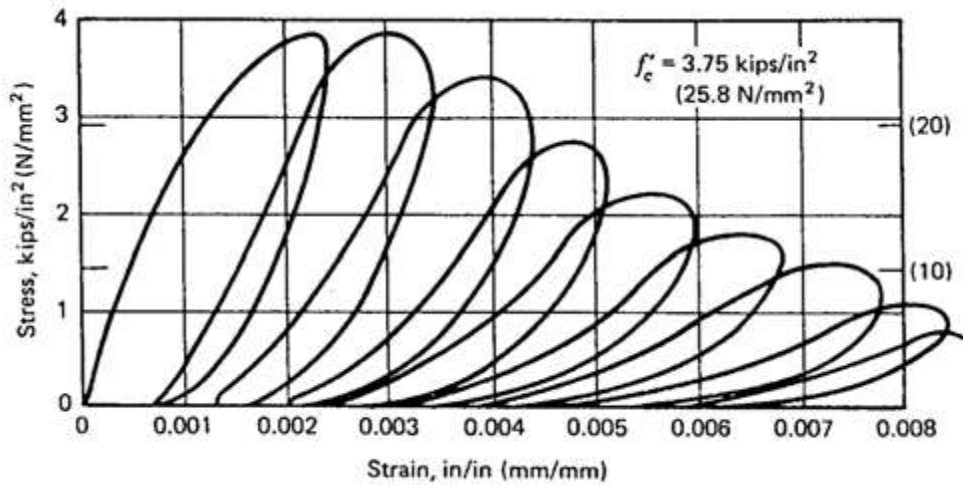
Άοπλο είναι το σκυρόδεμα που δεν είναι ενισχυμένο με ράβδους ή ίνες οπλισμού. Παρασκευάζεται από κοινό τσιμέντο πόρτλαντ και αδρανή υλικά. Η περιεκτικότητά του σε τσιμέντο είναι χαμηλή γι' αυτό και ονομάζεται ισχνό σκυρόδεμα ή γκρομπετόν. Χρησιμοποιείται συνήθως σε δάπεδα, σε υποστυλώματα για τα πέδιλα και σε πρόχειρες κατασκευές. Είναι σχετικά ψαθυρό υλικό, ιδίως σε εφελκυσμό. Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων για σκυρόδεμα σε εφελκυσμό, θλίψη και σε επαναλαμβανόμενη θλίψη, δίνονται στα σχήματα που ακολουθούν .



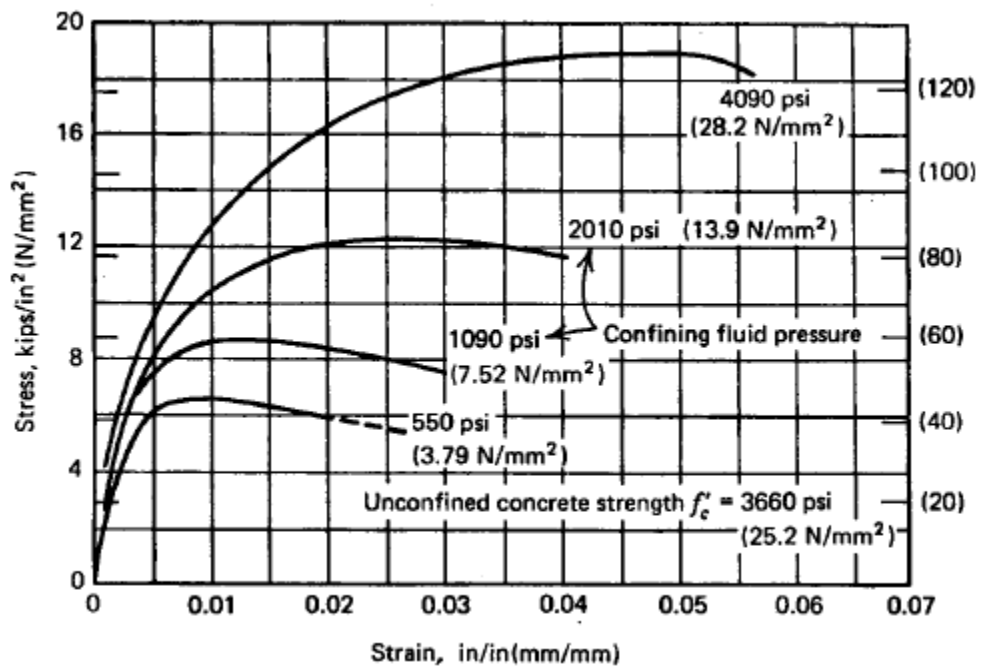
Σχήμα 1 ΤΥΠΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΑΣΕΩΝ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (MACGREGOR 1972)



Σχήμα 2 ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (RÜSCH 1960)



Σχήμα 3 ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (SINHA ET AL 1964)



Σχήμα 4 ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ (RICHART ET AL 1928)

Η κλασική χρήση του σκυροδέματος, έως το πρόσφατο παρελθόν, είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα (reinforced concrete), όπου η μάζα του ενισχύεται με σιδηρό οπλισμό (χάλυβα), ο οποίος του προσδίδει τη θλιπτική και διατμητική αντοχή που του λείπει, ενώ συνεισφέρει και στην παραλαβή των θλιπτικών τάσεων. Τα δύο υλικά συνεργάζονται άριστα (καλή αμοιβαία πρόσφυση, ίδια θερμοκρασιακή διαστολή, προστασία του οπλισμού από το σκυρόδεμα έναντι σκουριάς). Οπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά συστηματικά από το Γάλλο J.Monier το 1867.

Επόμενο βήμα στην ενίσχυση του σκυροδέματος είναι η χρήση ινών, καινοτομία η οποία σύντομα θα αποτελεί και πρώτη επιλογή σύνθετου υλικού στον κατασκευαστικό τομέα. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

2 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, το σκυρόδεμα προσφέρεται για μια ποικιλία καινοτόμων σχεδίων και κατασκευών ως αποτέλεσμα των πολλών επιθυμητών ιδιοτήτων του. Όχι μόνο μπορεί να διαμορφωθεί σε ποικίλα σχήματα, είναι δηλαδή εύπλαστο, αλλά διαθέτει επίσης υψηλή θλιπτική αντοχή, ακαμψία, χαμηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και χαμηλή αναφλεξιμότητα και τοξικότητα. Δύο χαρακτηριστικά του, ωστόσο, περιορίζουν τη χρήση του: είναι ψαθυρό και έχει μικρή αντοχή σε εφελκυσμό. Ωστόσο, η ανάπτυξη των ινοπλισμένων μιγμάτων τη δεκαετία του '80 παρέχει μια τεχνική βάση για τη βελτίωση των μειονεκτημάτων αυτών. Η υπόσχεση για στοιχεία λεπτότερα και ισχυρότερα, μειωμένου βάρους και με ελεγχόμενες ρωγμές, προσθέτοντας απλώς μία μικρή ποσότητα ινών, είναι ένα ελκυστικό χαρακτηριστικό του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα (Fiber Reinforced Concrete) αποτελείται κυρίως από υδραυλικό τσιμέντο, αδρανή, και διακριτές ίνες οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση του. Για το λόγο αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα είδη ινών, ως επί το πλείστον από χάλυβα, γυαλί και οργανικά πολυμερή (συνθετικές ίνες). Οι μήτρες για την παρασκευή του σκυροδέματος μπορεί να είναι κονίαμα, συνήθως μίγματα με συγκεκριμένες αναλογίες, ή μίγματα ειδικά σχεδιασμένα για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Γενικά, το μήκος και η διάμετρος τα οποία έχουν οι ίνες που χρησιμοποιούνται για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα δεν υπερβαίνουν τα 80 mm και 1 mm, αντίστοιχα.

2.1.1 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΙΝΩΝ

Δεδομένου ότι τα ψαθυρά υλικά δεν έχουν σημαντική ολκιμότητα μετά τη ρηγμάτωση, ενώδη σύνθετα υλικά έχουν αναπτυχθεί για να προσδώσουν σε εύθραυστα υλικά μηχανικές ιδιότητες και όλκιμο χαρακτήρα. Το άοπλο σκυρόδεμα υπό εφελκυστική φόρτιση αρχικά παραμορφώνεται ελαστικά, έπειτα ακολουθεί μικρορηγμάτωση η οποία σύντομα αντικαθίσταται από διευρυμένα ρήγματα και τελικά επέρχεται θραύση. Όταν τα φορτία που επιβάλλονται στο σκυρόδεμα προσεγγίζουν τα φορτία αστοχίας του, οι ρωγμές που δημιουργούνται διευρύνονται, μερικές φορές ακόμα και με ταχύ ρυθμό.

Οι ίνες στο σκυρόδεμα λειτουργούν περιοριστικά, παρεμποδίζοντας αυτή ακριβώς την ανάπτυξη των ρωγμών. Η εισαγωγή ινών στο σκυρόδεμα οδηγεί σε αλλαγή της συμπεριφοράς του υλικού, αυξάνοντας την παραμόρφωσή του λόγω εφελκυσμού, μετά την ελαστική περιοχή, μετά την πρώτη ρηγμάτωση. Η αλλαγή αυτή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες στους οποίους συμπεριλαμβάνονται η αντοχή της μήτρας, το είδος των ινών, το μέτρο ελαστικότητας των ινών, η αναλογία διαστάσεων των ινών, η αντοχή των ινών, τα χαρακτηριστικά συγκόλλησης της επιφάνειας των ινών στην περίπτωση συσσωματωμάτων, η περιεκτικότητα του μίγματος σε ίνες, ο προσανατολισμός των ινών σε σχέση με την κατεύθυνση φόρτισης και η επίδραση του μεγέθους των αδρανών.

Οι χαλύβδινες ράβδοι του απλά οπλισμένου σκυροδέματος έχουν το ίδιο ευεργετικό αποτέλεσμα διότι ενεργούν ως επιμήκεις συνεχείς ίνες. Ωστόσο, μεμονωμένες, αν και συνήθως είναι συσσωματωμένες σε ομάδες ώστε να ενισχύεται η συνάφεια με το σκυρόδεμα, μικρού μήκους, ασυνεχείς ίνες έχουν το πλεονέκτημα ότι αναμειγνύονται ομοιόμορφα και είναι διάσπαρτες σε όλη τη μάζα του σκυροδέματος.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων, δεν αυξάνεται η αντοχή της μήτρας μετά την πρώτη ρηγμάτωση. Η συμβολή των ινών αφορά στην αύξηση της δυσθραυστότητας του υλικού, δηλαδή της ικανότητας να απορροφήσει ενέργεια κατά την παραμόρφωση, η οποία εκφράζεται από το εμβαδόν της περιοχής κάτω από την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης. Το εμβαδόν αυτό είναι συχνά 10 – 40 φορές μεγαλύτερο για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα απ' ό,τι στο άοπλο.

Εάν είναι σωστά σχεδιασμένο και κατασκευασμένο το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, ένα από τα μεγαλύτερά του οφέλη είναι ότι βελτιώνεται η μακροπρόθεσμη λειτουργικότητα της κατασκευής ή του προϊόντος. Λειτουργικότητα είναι η δυνατότητα μιας συγκεκριμένης κατασκευής, ή κάποιου τμήματός της, να διατηρήσει την αντοχή και την ακεραιότητά της και να εκπληρώσει το σκοπό για τον οποίο σχεδιάστηκε κατά την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής της. Η λειτουργικότητα μπορεί να εξασφαλιστεί και να ενισχυθεί με τη χρήση ινών, καθώς αυτές προκαλούν ελεγχόμενη ρηγμάτωση.

Οι ίνες μπορούν να αποτρέψουν την εμφάνιση ρωγμών μεγάλου πλάτους, δηλαδή ρωγμών οι οποίες όχι μόνο είναι αντιαισθητικές αλλά και επιτρέπουν τη διείσδυση του νερού και άλλων προσμείξεων στο σκυρόδεμα, προκαλώντας διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού ή ακόμα και αλλοίωση του σκυροδέματος. Εκτός από τα πλεονεκτήματα των ινών σε ότι αφορά στην ελεγχόμενη ρηγμάτωση και στη λειτουργικότητα της κατασκευής, η χρήση σκυροδεμάτων με ίνες σε υψηλά ποσοστά κατ' όγκο (5 έως 10 τοις εκατό ή υψηλότερα με ειδικές τεχνικές παραγωγής) μπορεί να αυξήσει σημαντικά την εφελκυστική αντοχή του υλικού.

Μεταξύ των πιο κοινά χρησιμοποιούμενων ινών είναι ίνες από χάλυβα, γυαλί, πολυπροπυλένιο, ωστόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ίνες από και από άλλα συνθετικά και φυσικά υλικά (Πίνακας 1).

Ίνες	Διάμετρος (μm)	Μήκος (mm)	Πυκνότητα	Παραμόρφωση θραύσης (%)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Τυπική αναλογία (% κ. ό.)
Χάλυβας	100-600	10-60	7.86	3.5	200	700-2000	0.5-2
Ανοξ. Χάλυβας	10-330	10-60	7.86	3	160	2100	0.5-2
Γυαλί E	8-12	10-50	2.54	4.8	72-75	3500	2-8
Γυαλί AR	8-12	10-50	2.27	3-4.6	70-76	2000-3500	2-8
Πολυπροπυλένιο	500-4000	15-75	0.90	8-25	3-8	400-700	0.2-1.2
Άνθρακας							
Υψηλού E	8	10-50	1.90	0.5	380	1800	2-12
Υψηλής f_t	9	10-50	1.90	1.2	230	2600	2-12
Νάυλον	5-200	5-50	1.14	16-20	1-5	750-900	0.1-6
Ξύλο	100-5000	5-50	1.50	1-2	50-75	700-1000	2-4

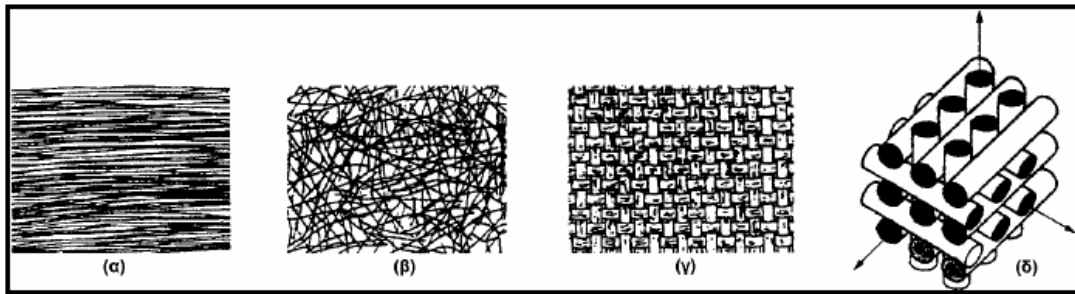
Πίνακας 1 ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΙΝΩΝ



Σχήμα 5 ΤΥΠΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΙΝΩΝ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΑ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Αν το μέτρο ελαστικότητας της ίνας είναι υψηλό σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος ή του συνδετικού κονιάματος, οι ίνες βοηθούν στη μεταφορά της φόρτισης, αυξάνοντας έτσι την αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού. Αύξηση του λόγου μήκος : διάμετρος των ινών (l_f / d_f), προκαλεί συνήθως αύξηση της καμπτικής αντοχής και της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος. Οι τιμές αυτού του λόγου συνήθως περιορίζονται μεταξύ 100 και 200, με δεδομένο ότι ίνες οι οποίες είναι σημαντικά επιμήκεις τείνουν να "μπλέκονται" στο μείγμα και δημιουργούν προβλήματα εργασιμότητας του σκυροδέματος.

Κατά κανόνα, οι ίνες είναι γενικά τυχαία κατανομημένες στο σκυρόδεμα. Ωστόσο, η επεξεργασία του σκυροδέματος έτσι ώστε οι ίνες να στοιχηθούν παράλληλα προς την κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης τάσης θα οδηγήσει σε ακόμη μεγαλύτερη εφελκυστική ή καμπτική αντοχή. Οι κοντές ίνες, λόγω του μικρού μήκους τους, δεν χρησιμοποιούνται ως μονοδιευθυντική ενίσχυση, αλλά εφαρμόζονται συνήθως με τη μορφή πλέγματος ινών τυχαίας διεύθυνσης. Η διάταξη που μπορεί να έχουν οι ίνες ή τα πλέγματα αυτών μέσα στο σκυρόδεμα φαίνονται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 6 ΤΥΠΟΙ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΙΝΩΝ: (α) ΜΟΝΟΔΙΕΥΘΥΝΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ, (β) ΙΝΕΣ ΤΥΧΑΙΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ, (γ) ΙΝΕΣ ΜΕ ΠΛΕΞΗ ΥΦΑΝΣΗΣ ΚΑΙ (δ) ΙΝΕΣ ΣΕ ΤΡΙΣΩΡΘΟΓΩΝΙΑ ΠΛΕΞΗ.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των ινών τα οποία καθορίζουν την αποτελεσματικότητά τους ως οπλισμό ψαθυρών μητρών είναι:

- αναλογία διαστάσεων, δηλαδή λόγο μήκους προς διάμετρο (l_f / d_f), βάση του οποίου οι ίνες χαρακτηρίζονται ως :
 - *Συνεχείς ή μεγάλης μήκους ίνες* (continuous fibers), όταν είναι $l_f / d_f \geq 100$.
 - *Ασυνεχείς ή κοντές ίνες* (discontinuous fibers), όταν είναι $l_f / d_f < 100$.
 - *Νηματίδια ή τριχίτες* (whiskers): Με $d_f < 1\mu\text{m}$ και $l_f \cong 100\mu\text{m}$.
- ιδιότητες της επιφάνειάς τους και επιπλέον, καμπύλωση στα άκρα
- μηχανικές ιδιότητες του υλικού, δηλαδή αντοχή σε εφελκυσμό και ολκιμότητα.

2.1.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Πριν από την ανάμειξη του σκυροδέματος, το μήκος, η ποσότητα των ινών και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά σχεδιασμού των ινών προσαρμόζονται για να αποτρέψουν το « σβόλιασμα » αυτών. Ικανοποιητικά ενισχυμένα μίγματα συνήθως περιέχουν όγκο κονιάματος της τάξεως του 70% περίπου σε σύγκριση με τυπικά, μη οπλισμένα μίγματα σκυροδέματος τα οποία περιέχουν όγκο κονιάματος της τάξεως του 50%.

Ινοπλισμένα στοιχεία τσιμέντου δεν περιέχουν χονδρόκοκκα αδρανή. Τα στοιχεία αυτά γίνονται συνήθως με ψεκασμό κονιάματος και τεμαχισμένων ινών ταυτόχρονα. Κονιάμα με υψηλή αναλογία νερό : τσιμέντο χρησιμοποιούνται για να διευκολυνθεί ο ψεκασμός. Άλλες μέθοδοι που τίθενται σε εφαρμογή περιλαμβάνουν απλή χύτευση, η οποία είναι λιγότερο ευέλικτη από τον ψεκασμό, και χύτευση με εφαρμοζόμενη πίεση, η οποία οδηγεί σε μικρότερο λόγο νερό : τσιμέντο, δημιουργώντας έτσι ένα ισχυρότερο προϊόν.

Όταν προστεθούν υπερρευστοποιητές στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, μπορούν να μειώσουν την αναλογία νερό : τσιμέντο και να βελτιώσουν την αντοχή, την ογκομετρική σταθερότητα και τα χαρακτηριστικά χειρισμού του υγρού μίγματος. Χημικά πρόσμικτα προστίθενται σε μίγματα ινοπλισμένου σκυροδέματος κατά κύριο λόγο για την αύξηση της εργασιμότητας του μείγματος.

Η συνολική ποσότητα των ινών σε ένα σύνθετο υλικό προσδιορίζεται ως ποσοστό όγκου κατ' όγκο του συνολικού αντί κατά μάζα. Γενικά οι τιμές που χρησιμοποιούνται ποικίλλουν μεταξύ 0.25% v/v και 2.0% v/v και το ανώτατο όριο βασίζεται στην αξιολόγηση των εξής παραγόντων :

- Η εργασιμότητα του νωπού μίγματος μειώνεται ραγδαία όταν προστίθεται ένας μεγάλος όγκος από ίνες και το πορώδες, εξαιτίας της πλήρωσης των κενών με αέρα, αυξάνεται. Ακόμη και με χρήση έντονων δονήσεων είναι δύσκολο να τοποθετηθεί και να συμπυκνωθεί σωστά το νωπό μείγμα μέσα σε φόρμες, όταν προστίθενται πάρα πολλές ίνες.
- Οι ίνες έχουν την τάση να μπλέκονται και να δημιουργούν κόμπους στην έκτασή τους, συνεπώς ένα υψηλότερο ποσοστό ινών κατ' όγκο μίγματος είναι πολύ δύσκολο να κατανεμηθούν σωστά.
- Το συνολικό κόστος του μίγματος αυξάνεται σημαντικά αν προστεθεί υψηλό ποσοστό ινών.
- Η βέλτιστη απόδοση των ινών – δηλαδή αν η αντοχή σε εφελκυσμού μετά τη ρηγμάτωση είναι ίση με ή μεγαλύτερη από την αντοχή σε ρηγμάτωση της μήτρας (matrix cracking strength) – εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις αντιστοιχεί σε όγκο μεταξύ 1% και 2%. Έχουν αναπτυχθεί ειδικές μέθοδοι για την επίτευξη σημαντικά μεγαλύτερων όγκων ινών κατ' όγκο μίγματος, ακόμα και έως το 20% κατ' όγκο. Μια τέτοια τεχνολογία ονομάζεται SIFCON (Slurry Infiltrated Concrete) και έχει εφαρμοστεί σε έργα επιδιόρθωσης κατασκευών από σκυρόδεμα.

2.1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η εξάπλωση των νέων επιτευγμάτων της τεχνολογίας του ινοπλισμένου σκυροδέματος έχει επεκτείνει σε μεγάλο βαθμό το φάσμα των εφαρμογών του (Πίνακας 2).

ΤΥΠΟΣ ΙΝΑΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ
Γυαλί	Επίχριση τοίχων πληρώσεως, σωλήνες υπονόμων, κελύφη, κονιάματα, πλαίσια τύπου sandwich, συστήματα περίφραξης
Χάλυβας	Κυψελωτές μονάδες οροφής, επικάλυψη πεζοδρομίων, καταστρώματα γεφυρών, σωλήνες, διάδρομοι αεροδρομίων, δοχεία πίεσης, κατασκευές ανθεκτικές σε ανεμοριπές, επενδύσεις τούνελ, κατασκευή φλοιού πλοίου
Πολυπροπυλένιο	Πάσσαλοι θεμελίωσης, προεντεταμένοι πάσσαλοι, επίχριση πλαισίων, επιράμματα δρόμων, μανδύες για υποβρύχιους σωλήνες
Αμιάντος	Πλέγματα, σωλήνες, μονωτικά υλικά, πυρίμαχα υλικά, ελάσματα οροφής, επένδυση τοίχων
Άνθρακας	Πτυχωτές μονάδες για κατασκευή ορόφων, μεμβρανοειδείς κατασκευές μονής και διπλής καμπυλότητας, σανίδες
Νιφάδες μαρμαρυγία	Μερική αντικατάσταση αμιάντου σε πλαίσια, σωλήνες από σκυρόδεμα, υλικά επιδιόρθωσης
Φυσικές ίνες (ίνα καρύδας, sisal, bamboo, ζαχαροκάλαμο)	Σε κατασκευές χαμηλού κόστους – αντιπαρέχεται στη μεγάλη ζήτηση κατοικίας σε τριτοκοσμικές χώρες, διαχωριστικοί τοίχοι
Συνδυασμοί περισσότερων από ένα τύπο ινών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ειδικούς σκοπούς.	

Πίνακας 2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΙΝΩΝ ΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.1.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ

Οι ίνες μπορούν να βελτιώσουν την δυσθραυστότητα, την καμπτική αντοχή, ή και τα δύο, και επιλέγονται βάσει της διαθεσιμότητάς τους, του κόστους και των ιδιοτήτων τους. Για παράδειγμα, ίνες πολυπροπυλενίου αυξάνουν σημαντικά την δυσθραυστότητα του σκυροδέματος αλλά έχουν μικρή επίδραση στην αντοχή σε εφελκυσμό. Μείγματα ινών πολυπροπυλενίου και γυαλιού, από την άλλη πλευρά, παράγουν σκυρόδεμα με μεγάλη όχι μόνο δυσθραυστότητα αλλά και καμπτική αντοχή (Πίνακας 3 & 4).

ΥΛΙΚΟ	ΙΝΕΣ ΚΑΤ' ΟΓΚΟ (%)	ΣΧΕΤΙΚΗ ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ *
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ		
Χάλυβας	0.5	2.5-4.0
Χάλυβας	1.0	4.0-5.5
Χάλυβας	1.5	10-25
Γυαλί	1.0	1.7-2.0
πολυπροπυλένιο	0.5	1.5-2.0
πολυπροπυλένιο	1.0	2.0-3.5
πολυπροπυλένιο	1.5	3.5-15.0
ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ		
Χάλυβας	1.3	15.0
ΠΑΣΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ		
Γυαλί	4.5	2.0-3.0

ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ ΙΝΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

νιφάδες μαρμαρυγία	2.0-3.0	3.0-3.5
<p>*Οι τιμές αυτές είναι αντιπροσωπευτικές και ενδέχεται να αποκλίνουν ανάλογα με τη μέθοδο υπολογισμού από την οποία προκύπτουν, τη διαδικασία που ακολουθείται και τις μεταβλητές που λαμβάνονται υπόψη.</p>		

Πίνακας 3 ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΤΙΜΩΝ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΜΕ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΜΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ

ΣΥΝΘΕΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ	ΙΝΕΣ ΚΑΤ' ΟΓΚΟ (%)	ΣΧΕΤΙΚΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ*
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ		
Χάλυβας	1-2	2.0
Γυαλί	1-2	2.5-3.5
ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ		
Χάλυβας	1.3	1.5-1.7
Γυαλί	2	1.4-2.3
ΠΑΣΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ		
Γυαλί	4.5	1.7-2.0
νιφάδες μαρμαρυγία	2-4	2-2.5
πολυπροπυλένιο	1-2	1.0
* Οι τιμές αυτές είναι αντιπροσωπευτικές και ενδέχεται να αποκλίνουν ανάλογα με τη μέθοδο υπολογισμού από την οποία προκύπτουν, τη διαδικασία που ακολουθείται και τις μεταβλητές που λαμβάνονται υπόψη		

Πίνακας 4 ΛΟΓΟΣ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟ ΜΕ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΜΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ

Οι ίνες μειώνουν γενικά την καταπόνηση λόγω ερπυσμού, η οποία ορίζεται ως η εξαρτώμενη από το χρόνο παραμόρφωση του σκυροδέματος υπό συνεχή φόρτιση. Για παράδειγμα, ινοπλισμένο με χάλυβα σκυρόδεμα μπορεί να εμφανίσει τιμές ερπυσμού λόγω εφελκυσμού ίσες με το 50% - 60% των τιμών του κανονικού

σκυροδέματος. Οι τιμές ερπυσμού λόγω θλίψης, ωστόσο, μπορεί να είναι μόνο το 10 - 20 τοις εκατό των τιμών του κανονικού σκυροδέματος.

Η συστολή λόγω ξήρανσης του σκυροδέματος, φαινόμενο το οποίο προκαλείται από την αποστράγγιση του νερού από το σκυρόδεμα κατά την ξήρανση, μειώνεται από την παρουσία των ινών. Η συρρίκνωση ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες γυαλιού μειώθηκε μέχρι και 35% με την προσθήκη ινών 1,5% κατά όγκο.

Άλλες ιδιότητες του σκυροδέματος, όπως η αντοχή σε θλίψη και το μέτρο ελαστικότητας, δεν συμπεριλαμβάνονται στους πίνακες δεδομένου ότι επηρεάζονται σε πολύ μικρότερο βαθμό από την παρουσία των ινών.

2.1.5 ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Η ανθεκτικότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η δράση του παγετού εξαρτάται από την ποιότητα του υλικού της μήτρας σκυροδέματος και δε διαφέρει σημαντικά από εκείνη του συμβατικού σκυροδέματος. Οι ίνες μπορούν να είναι αποτελεσματικές, ωστόσο, στη μείωση των επιπτώσεων λόγω παγετού εξαιτίας της ιδιότητάς τους να δεσμεύουν και να περιορίζουν τις ρωγμές. Ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να δοθεί ώστε να εξασφαλιστεί ότι μια επαρκής ποσότητα φυσαλίδων αέρα έχει ενσωματωθεί στο μείγμα ώστε να παράσχει πρόσθετη ανθεκτικότητα στην πήξη και στη διάβρωση από το αλάτι.

Άλλα περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως η επίθεση οξέων, επίθεση θείου και αδρανών, τα οποία αντιδρούν με τα αλκάλια, γενικά δεν εντείνονται από την παρουσία των ινών εκτός εάν υπάρξει κάποια χημική αντίδραση μεταξύ των ινών και του σκυροδέματος.

2.2 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ (Steel Fiber Reinforced Concrete)

Η χρήση ινών από χάλυβα για την ενίσχυση του σκυροδέματος δεν αποτελεί καινούρια έννοια, καθώς προσπάθειες είχαν γίνει και στο παρελθόν και συγκεκριμένα οι πρώτες πατέντες για την ενίσχυση του σκυροδέματος με ίνες χρονολογούνται το 1874 (A. Berard, USA). Οι ίνες που χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα στο υλικό αυτό κατασκευάστηκαν στο παρελθόν το 1927 (G. Martin, USA), το 1939 (Zitkevic, Britain) και 1943 (G. Constantinesco, England).

Οι μοναδικές ιδιότητες του ινοπλισμένου με χάλυβα σκυροδέματος (SFRC) καθιστούν διαδεδομένη τη χρήση αυτού του υλικού σε πολλές κατασκευές, με ή και χωρίς παραδοσιακό εσωτερικό οπλισμό. Η χρήση του SFRC είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για κατασκευές οι οποίες υποβάλλονται σε φορτία μεγαλύτερα από το όριο λειτουργικότητας σε κάμψη και διάτμηση και για κατασκευές οι οποίες υφίστανται κρουστικές ή δυναμικές καταπονήσεις λόγω σεισμικής ή κυκλικής φόρτισης.

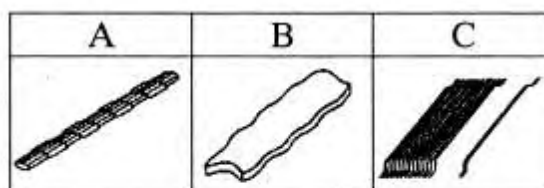
Υπό θλιπτική φόρτιση, όταν εμφανίζονται μικρορωγμές εξαιτίας εγκάρσιων εφελκυστικών δυνάμεων, οι ίνες του χάλυβα προκαλούν δυνάμεις που τείνουν να κλείσουν τις ρωγμές. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής, όμως η ανάμιξη των ινών στο σκυρόδεμα προκαλεί αύξηση του πορώδους με αποτέλεσμα τη μείωση της θλιπτικής αντοχής. Κατά συνέπεια οι δύο αυτές δράσεις αλληλοαναιρούνται. Επιπλέον, πειράματα έδειξαν ότι οι ίνες δεν επηρεάζουν την άμεση εφελκυστική αντοχή, αφού και με αυτό το υλικό παρουσιάζεται θραύση μετά την εμφάνιση της τελικής ρωγμής. Μόνο η αντοχή σε λυγισμό αυξάνεται λίγο μετά την ανάμιξη του σκυροδέματος με ίνες χάλυβα. Συνεπώς, τα πλεονεκτήματα του SFRC δεν βρίσκονται σε ό, τι έχει να κάνει με την αντοχή του υλικού συγκριτικά με το απλά οπλισμένο σκυρόδεμα.

Σύμφωνα με τον Williamson (1974) η αύξηση της θλιπτικής αντοχής στο σκυρόδεμα κυμαίνεται αμελητέα έως στις περισσότερες περιπτώσεις 23 % για κυλινδρικά δοκίμια 150 x 300 mm με 2% κ.ό. ίνες, $l_f/d_f = 100$ και 19 mm μέγιστο κόκκο αδρανούς. Σε άλλη περίπτωση η χρήση ινών από χάλυβα αύξησε τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος από 4 % έως 19 % , όταν εξετάστηκαν διαφορετικοί λόγοι διατάσεων ινών και ποσοστά όγκου ινών (Semsı Yazıcı 2006). Γενικά, η προσθήκη ινών δεν αυξάνει σημαντικά τη θλιπτική αντοχή, αλλά αυξάνει τη θλιπτική παραμόρφωση του φορτίου θραύσης (ACI 544.3R-93).

Οι ίνες του χάλυβα αυξάνουν σημαντικά την ολκιμότητα και την ικανότητα παραμόρφωσης του σκυροδέματος και κατ' επέκταση την πλαστιμότητα του. Η ικανότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος να απορροφά ενέργεια, έχει αναγνωριστεί ως το πιο σημαντικό πλεονέκτημα της προσθήκης ινών στο άοπλο σκυρόδεμα (Gopalaratnam 1995). Μία δοκός από σκυρόδεμα που περιέχει ίνες, θραύεται έπειτα από σταδιακή ανάπτυξη μιας ή πολλαπλών ρηγματώσεων με αυξανόμενο βέλος κάμψης, αλλά διατηρεί ως ένα βαθμό τη δομική ακεραιότητα και τη μετα – ρηγματική αντίσταση, ακόμα και όταν αποκτήσει αξιόλογο βέλος κάμψης. Όμοια δοκός χωρίς ίνες θα θραυστεί απότομα σε μικρό βέλος κάμψης, με διαχωρισμό σε δύο κομμάτια (ACI 544.1R-96).

Έρευνες έχουν αποδείξει ότι η αύξηση του ποσοστού όγκου των ινών οδηγεί σε αύξηση της δυσθραυστότητας. Οι S.A. Saif Eldeen και Takeo Taniguchi (2007) μελετώντας αρκετά μοντέλα με διαφορετικά ποσοστά όγκου ινών (1 % , 2 % , 3 %), απέδειξαν ότι οι χαλύβδινες ίνες μπορούν να αυξήσουν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Κάθε 1 % ποσότητα ινών αυξάνει την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας περίπου 50 % σε σχέση με την ικανότητα απορρόφησης του άοπλου σκυροδέματος και αυξάνει το μέγιστο βέλος κάμψης πάνω από 20 %.

Οι ίνες από χάλυβα με σύνηθες μήκος, που κυμαίνεται από 12.7 έως 63.5 mm, πρέπει να έχουν λόγο μορφής (λόγος μήκος ίνας / διάμετρος ίνας) μεταξύ 30 και 100, ενώ η ποσότητά τους κυμαίνεται μεταξύ 0.25 έως 2 % κ. ό. (ACI 544.3R- 93). Η μορφή που μπορεί να έχουν οι ίνες χάλυβα φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα :

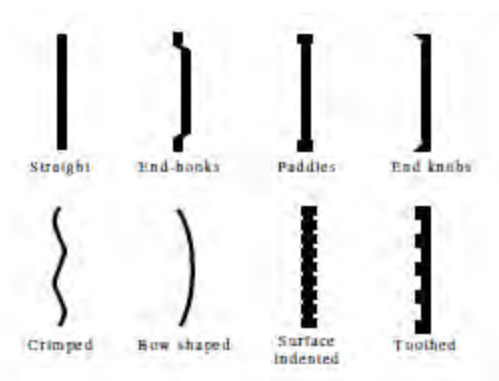


Σχήμα 7 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΙΝΩΝ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ

Nominal properties of steel fiber					
Series	Size (mm)			Aspect ratio	Specific gravity
	Thickness	Width	Length		
A	0.2	ϕ 0.6	30	50	7.85
B		1.3	30	52	7.85
C		ϕ 0.6	30	50	7.85

Πίνακας 5 ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΠΑΝΩ ΙΝΩΝ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ

Περισσότερες ίνες :



Σχήμα 8 ΜΟΡΦΗ ΚΟΝΤΩΝ ΙΝΩΝ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ (Brandt 1995)

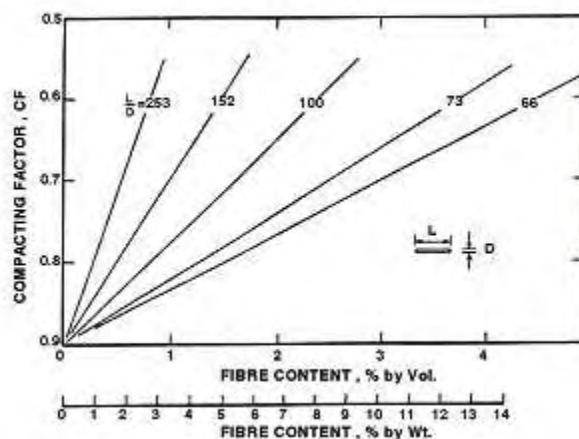
Υπάρχει, όμως, ακόμη ελλιπής γνώση σχετικά με το σχεδιασμό και την ανάλυση δομικών στοιχείων από ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Η ανάλυση στους τομείς των κατασκευών απαιτεί, ως βασική προϋπόθεση, τον ορισμό μιας κατάλληλης σχέσης τάσης - παραμόρφωσης για κάθε υλικό του οποίου η συμπεριφορά επηρεάζει την απόκριση της κατασκευής. Έχουν προταθεί από διαφορετικούς συντάκτες στη βιβλιογραφία πολλές σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έναντι εφελκυσμού και θλίψης, μερικές από τις οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

2.2.1 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Όπως και σε κάθε άλλη περίπτωση, οι αναλογίες του μίγματος για την κατασκευή του σκυροδέματος εξαρτώνται από το σκοπό για τον οποίο προορίζεται αυτό το υλικό, τι αντοχή απαιτείται, τι εργασιμότητα. Όμως, υπάρχουν κάποιες ιδιαιτερότητες οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη για την κατασκευή αυτού του σύνθετου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα.

Η χρήση ινών στο σκυρόδεμα επιφέρει γενικά μείωση της εργασιμότητας, η οποία είναι ανάλογη του ποσοστού ινών. Η σημαντική μείωση της ρευστότητας του νωπού σκυροδεματος, ακόμα και για μικρά ποσοστά ινών, είναι χαρακτηριστική, αρκεί να αναφερθεί ότι ποσοστό ινών χάλυβα ή γυαλιού γύρω στο 1,5% κ.ό. μπορεί να μειώσει την κάθισή από 200mm σε 25mm, χωρίς όμως να μειώνεται αναλογικά και η ευκολία διάστρωσης ή συμπύκνωσης. Γι' αυτό η δόκιμη κάθισή θεωρείται ακατάλληλη για τη μέτρηση της εργασιμότητας του ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα

σκυροδέματος. Γενικά, η κάθιση ινοπλισμένου σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες πρέπει να είναι τουλάχιστον 1 ίντσα, αλλά όχι μεγαλύτερη από 4 ίντσες (25 με 100mm) (ACI 544.3R-93). Πιο κατάλληλη θεωρείται η δόκιμη Vebe. Η επίδραση του λόγου (l_f/d_f) και του ποσοστού ινών χάλυβα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 9 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΩΝ ΙΝΩΝ ΣΤΗΝ ΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Είναι σαφές ότι αύξηση του λόγου αυτού έχει δυσμενή αποτελέσματα για την εργασιμότητα, ενώ βελτιώνει τη μηχανική συμπεριφορά. Επίσης έχει αποδειχθεί ότι, τουλάχιστον για ίνες χάλυβα, λόγοι (l_f/d_f) πάνω από 100 προκαλούν αλληλεμπλοκές ινών και συσσωματώσεις που επιφέρουν ανομοιογένεια στη μάζα του σκυροδέματος, γι' αυτό και πρέπει να αποφεύγονται. Γενικά ο λόγος $l_f/d_f=100$ καθώς και το ποσοστό ινών 2% κ.ό. θεωρούνται άνω όρια για τις ίνες χάλυβα.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει αρνητικά την εργασιμότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι η αύξηση του μέγιστου κόκκου αδρανών, που δεν πρέπει να ξεπερνά τα 20mm. Τέλος, οι απαιτήσεις για καλή εργασιμότητα περιλαμβάνουν τη χρήση προσθέτων (π.χ. ρευστοποιητικών), την αύξηση της ποσότητας τσιμεντοπολτού και τη χρήση ινών που είναι κολλημένες μεταξύ τους (ανά ομάδες των 10 - 30) με υδροδιαλυτή κολλά.

Ο Πίνακας 6 δίνει το εύρος τυπικών αναλογιών σύνθεσης ινοπλισμένου σκυροδέματος, βάσει των Αμερικανικών Προδιαγραφών (ACI 544.1R-82). Για σύγκριση με το άοπλο σκυρόδεμα δίνεται ο Πίνακας 7, που δείχνει ότι για δεδομένο λόγο $N/T (w/c)$ η απαιτούμενη ποσότητα τσιμεντοπολτού είναι μεγαλύτερη στο

ινοπλισμένο σκυρόδεμα από ότι στο άοπλο. Γενικά, σε σύγκριση με το άοπλο, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει περισσότερο τσιμέντο, μεγαλύτερο ποσοστό λεπτών αδρανών και χονδρά αδρανή με μικρότερο κόκκο. Για κάθε τύπο ινών η βέλτιστη σύνθεση προσδιορίζεται με διαδοχικές δοκιμές, φροντίζοντας να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις αντοχής, εργασιμότητας και ανθεκτικότητας σε διάρκεια.

	Μέγιστος κόκκος 10mm	Μέγιστος κόκκος 20 mm
τσιμέντο(kgr/m ³)	350-580	290-500
Λόγος N/T	0,35-0,45	0,40-0,50
% Λόγος προς χονδρά αδρανή	45-60	45-55
Εγκλωβισμένος αέρας (%)	4-7	4-6
ποσοστό ινών (%)		
παραμορφ. ίνες χάλυβα	0,4-0,9	0,3-0,8
λείες ίνες χάλυβα	0,9-1,8	0,8-1,6
ίνες γυαλιού	0,3-1,2	

Πίνακας 6 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΕΣ ΙΝΕΣ

Υλικό	άοπλο σκυρ.	ινοπλ. σκυρ
τσιμέντο	440	510
νερό(N/T=0.45)	200	230
λεπτά αδρανή	850	750
χονδρά αδρανή	670	600
ίνες χάλυβα 2% κ.ο		150

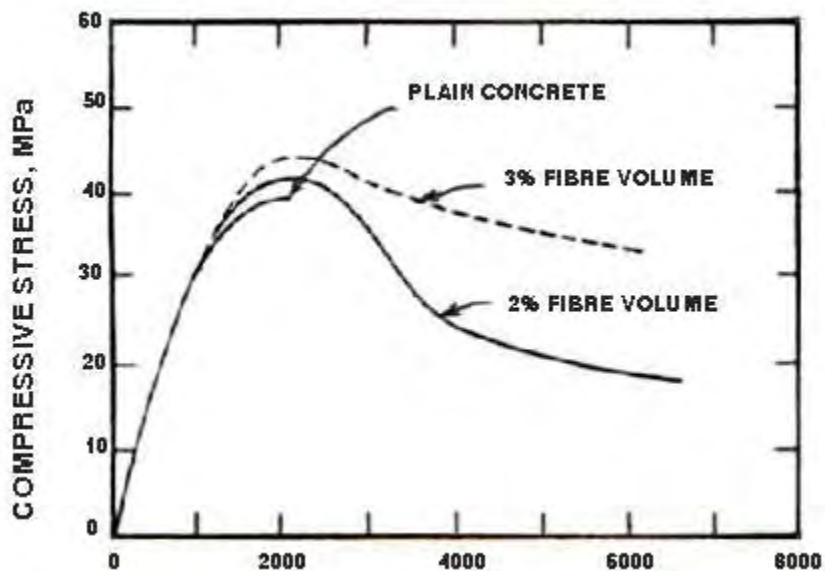
Πίνακας 7 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΑΟΠΛΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (kgr/m³)

2.2.2 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

Σε ό, τι αφορά στη συμπεριφορά σε θλίψη του υλικού που εξετάζεται, έχουν αναφερθεί εκτεταμένα πειραματικά δεδομένα και αναλυτικά μοντέλα κατά την περίοδο από το 1989 έως και σήμερα, τα οποία παρατίθενται στη συνέχεια. Η συμπεριφορά ενός σύνθετου υλικού επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του κάθε στοιχείου από το οποίο αποτελείται, την αλληλεπίδραση μεταξύ των επιμέρους συστατικών και από την αναλογία αυτών στο μείγμα.

Επιπλέον, πρέπει να υπογραμμιστεί ότι διακυμάνσεις στη γεωμετρία του δείγματος, στη γεωμετρία των ινών, η κατεύθυνση φόρτισης έναντι της κατεύθυνσης χύτευσης, ο ρυθμός φόρτισης και η μέγιστη διάμετρος κόκκου αδρανών επίσης τροποποιούν τη συμπεριφορά σε θλίψη του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Εκτεταμένα πειραματικά δεδομένα τα οποία προκύπτουν από δοκιμές που πραγματοποιούνται σύμφωνα με καθιερωμένα διεθνή πρότυπα είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη και τελειοποίηση μοντέλων τα οποία είναι λογικά και αξιόπιστα και που αντικατοπτρίζουν πλήρως την επίδραση όλων των παραπάνω παραγόντων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται διάφορα πειραματικά δεδομένα σε συνδυασμό με αποτελέσματα που λαμβάνονται από ένα σύνολο δοκιμών σε κυβικά και κυλινδρικά δοκίμια και αφορούν στην αντοχή αυτών σε θλίψη.



Σχήμα 10 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΑΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΓΙΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΩΝ ΣΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΕΣ ΙΝΕΣ

2.2.2.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Για την τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στην συνέχεια σχετικά με την αντοχή σε θλίψη του υλικού που εξετάζεται, περιγράφεται συνοπτικά ένα πείραμα το οποίο έγινε από τους Francesco Bencardino, Lidia Rizzuti, Giuseppe Spadea και Ramnath N. Swamy. Στόχοι του πειράματος αυτού ήταν η αξιολόγηση της εγκυρότητας διαφόρων μοντέλων που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για τον καθορισμό της συμπεριφοράς του SFRC μετά τη μέγιστη τάση και για τον υπολογισμό της αντοχής σε θλίψη. Οι ερευνητές πήραν αυτά τα θεωρητικά μοντέλα, τα εφάρμοσαν σε πειραματικά δεδομένα και τα αποτελέσματα τα συνέκριναν με τα τρέχοντα πρότυπα.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ήταν απλό σκυρόδεμα και ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα περιεκτικότητας 1 % , 1.6 % και 3 % . Ο πίνακας στον οποίο φαίνεται η σύνθεση των υλικών είναι ο εξής :

Material		SFRC			
		PC	S1%	S1.6%	S3%
Cement	(kg)	500	500	500	500
Quartz	0/2 mm	377	377	377	377
	3/6 mm	273	273	273	273
Coarse aggregate	0/5 mm	693	615	567	458
	5/10 mm	290	290	290	290
	10/15 mm	317	317	317	317
Fiber	V_f (%)	0	1	1.6	3
	(kg)	—	78	126	235
Silica fume	%	6	6	6	6
	(kg)	30	30	30	30
Superplasticizer	%	1.5	1.5	1.5	1.5
	(kg)	7.5	7.5	7.5	7.5
Water	w/c	0.35	0.35	0.35	0.35
	(l)	175	175	175	175

Πίνακας 8 ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα ήταν κυλινδρικά 150 mm × 300 mm και κυβικά πλευράς 150 mm και φορτίστηκαν μονοαξονικά. Η αντοχή των δοκιμίων αυτών σε θλίψη λήφθηκε στις 28 μέρες.

Η πειραματική διάταξη ήταν :



Σχήμα 11 ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΣΕ ΔΟΚΙΜΗ ΕΝΑΝΤΙ ΘΛΙΨΗΣ

2.2.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Η θλιπτική αντοχή των κυβικών δοκιμών μετρήθηκε :

	Test (MPa)	Mean (MPa)	Standard deviation (MPa)	Coefficient of variation (%)
PC_1	75.5	71.5	3.8	5.3
PC_2	67.9			
PC_3	71.1			
S1%_1	69.8	74.1	4.6	6.2
S1%_2	79.0			
S1%_3	73.6			
S1.6%_1	62.8	60.5	5.4	8.9
S1.6%_2	54.3			
S1.6%_3	64.5			
S3%_1	64.4	62.8	1.6	2.5
S3%_2	62.8			
S3%_3	61.2			

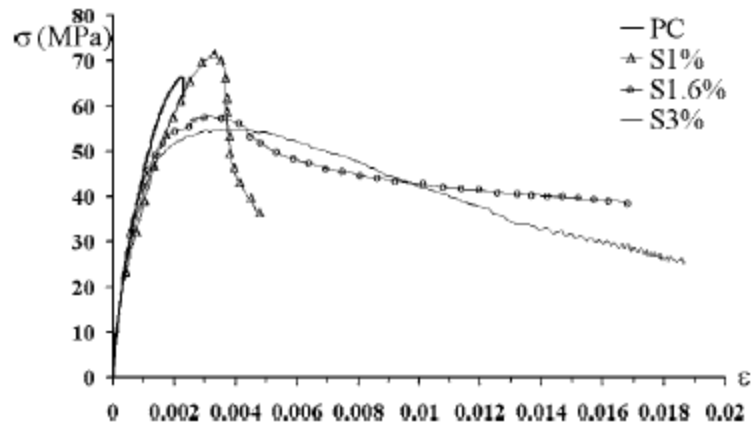
Πίνακας 9 ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Και των κυλινδρικών :

	Test (MPa)	Mean (MPa)	Standard deviation (MPa)	Coefficient of variation (%)
PC_1	64.1	66.7	2.8	4.2
PC_2	66.3			
PC_3	69.8			
S1%_1	67.2	69.6	2.4	3.4
S1%_2	71.9			
S1%_3	69.8			
S1.6%_1	61.1	58.2	2.7	4.6
S1.6%_2	55.7			
S1.6%_3	57.7			
S3%_1	59.8	58.5	3.8	6.5
S3%_2	54.2			
S3%_3	61.5			

Πίνακας 10 ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Από αυτά τα δεδομένα μια τυπική μορφή καμπύλη τάσης παραμόρφωσης των κυλινδρικών δοκιμών είναι :



Σχήμα 12 ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

Η εικόνα κυλινδρικών δοκιμών χωρίς σπλισμό με ίνες, μετά από αυτό το πείραμα θα ήταν :



Σχήμα 13 ΕΙΚΟΝΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΧΩΡΙΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΟ

Ενώ με τις ίνες χάλυβα και περιεκτικότητα 3 % κ. ό. σε ίνες είναι :



Σχήμα 13 ΕΙΚΟΝΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΟ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ

Τα μοντέλα με τα οποία έγινε η σύγκριση των πειραματικών δεδομένων αναλύονται στη συνέχεια.

2.2.2.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε όλα τα δημοσιευμένα αρχεία επιβεβαιώνουν ότι η πιο σημαντική συμβολή των ινών στο σκυρόδεμα αφορά στη βελτίωση της συμπεριφοράς του υλικού μετά το όριο αντοχής του γεγονός πολύ σημαντικό, τόσο σε θλίψη όσο και σε εφελκυσμό (Dwarakanath και Nagaraj 1991, Taerwe 1992, Wafa και Ashour 1992, Vandewalle 2007). Οι ίνες αντισταθμίζουν την ανάπτυξη, διεύρυνση και πολλαπλασιασμό των ρωγμών μετά την πρώτη ρωγμή, και επιτρέπουν στο σκυρόδεμα να υφίσταται πολύ μεγάλες παραμορφώσεις, περίπου πέντε με έξι φορές την τιμή σύνθλιψης του άοπλου σκυροδέματος. Η σημαντική αύξηση της δυσθραυστότητας και της ολκιμότητας των ινοπλισμένων υλικών δηλώνει ότι οι ίνες έχουν σημαντική περιοριστική δράση μέσα σε ένα φορτισμένο μέλος μιας κατασκευής.

Αξιόπιστες σχέσεις τάσης - παραμόρφωσης είναι διαθέσιμες για το άοπλο σκυρόδεμα (Hognestad 1951, Sargin 1971, Mander et al. 1988 a, b), ενώ για το ινοπλισμένο με χάλυβα, ένας μεγάλος αριθμός μοντέλων έχει προταθεί ώστε να προκύψει η βέλτιστη σχέση τάσης - παραμόρφωσης σε θλίψη. Για το σχεδιασμό σε οριακή κατάσταση αντοχής, ορισμένες κατευθυντήριες γραμμές όπως RILEM TC 162-TDF (2003) και CNR-DT 204 (2006) πρότειναν για το FRC την ίδια μορφή καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης για τη θλίψη όπως αυτή που χρησιμοποιείται για το συμβατικό σκυρόδεμα (παραβολικό ορθογώνιο) με μέγιστη θλιπτική

παραμόρφωση (f_u) της τάξεως του 0.0035 και παραμόρφωση η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση (p_f), της τάξεως του 0.002. Η θλιπτική αντοχή του SFRC πρέπει να προσδιορίζεται με τη βοήθεια τυποποιημένων δοκιμών, οι οποίες χρησιμοποιούν δοκίμια από σκυρόδεμα ή κυλινδρικά ή κυβικά.

Οι αρχές του σχεδιασμού βασίζονται στην χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη των 28 ημερών. Στην προσπάθεια αξιολόγησης των πειραματικών δεδομένων τους, διάφοροι συγγραφείς (Soroushia και Lee 1989, Ezeldin και Balaguru 1992, Barros και Figueiras 1999, Mansur et al. 1999, Nataraja et al. 1999), πρότειναν διαφορετικές αναλυτικές εξισώσεις για να αποτυπώσουν την πραγματική συμπεριφορά του FRC υλικού σε συμπίεση. Αυτά τα μοντέλα ανάλυσης περιγράφονται παρακάτω.

ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ ΙΝΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Authors	Standard adopted	Specimens		Steel fibers type	V_f (%)	L_f/D_f	ϵ_{pt}	ϵ_{fu}	f_{cr} (MPa)	f_{tu} (MPa)
		D, H (mm)	N							
Soroushian and Lee (1989)	—	150, 300	—	Straight	—	—	0.0033	0.0067	41.2	5.2
					2.00	47	0.0033	0.0116	40.7	23.3
					2.00	83	0.0050	0.0116	43.2	31.2
					2.00	100	0.0050	0.0116	44.6	39.5
Dwarakanath and Nagaraj (1991)	—	100, 200	—	Straight	—	—	0.0020	0.0044	24.5	17.6
					1.00	72	0.0021	0.0060	26.0	19.4
					2.00	72	0.0025	0.0070	26.7	19.7
					3.00	72	0.0030	0.0072	31.6	26.5
Ezeldin and Balaguru (1992)	ASTM C39	100, 200	36	Hooked end	—	—	0.0022	0.0104	35.9	8.2
					0.38	60	0.0025	0.0177	40.7	7.4
					0.57	60	0.0025	0.0200	40.7	9.6
					0.76	60	0.0031	0.0400	37.9	13.5
Wafa and Ashour (1992)	ASTM C39, C31, C192	150, 300	126	Hooked end	—	—	0.0020	0.0027	91.5	80.0
					0.5	75	0.0024	0.0107	94.6	18.3
					1.0	75	0.0018	0.0107	95.6	39.5
					1.5	75	0.0018	0.0107	100.0	57.5
Barros and Figueiras (1999)	JSCE SF5	150, 300	32	Hooked end	0.76	75	0.0022	0.0400	38.2	1.8
Mansur et al. (1999)	—	100, 200	54	Hooked end	—	—	0.0024	0.0045	103.6	27.0
					0.50	60	0.0026	0.0140	104.7	23.5
					1.00	60	0.0027	0.0140	107.0	39.0
					1.50	60	0.0029	0.0140	103.5	40.0
Nataraja et al. (1999)	ASTM C39	150, 300	14	Crimped	—	—	0.0027	—	43.0	—
					0.50	55	0.0031	0.0155	45.8	13.8
					0.75	55	0.0033	0.0167	41.6	17.4
					1.00	55	0.0034	0.0170	47.0	21.2
Jo et al. (2001)	JCI SF2	150, 300	75	Hooked end	—	—	0.0021	0.0060	41.8	1.0
					0.50	75	0.0026	0.0050	41.8	5.4
					0.75	75	0.0020	0.0100	37.7	11.6
					1.00	75	0.0020	0.0090	34.3	17.7
					1.50	75	0.0023	0.0100	33.1	25.0
					—	—	0.0021	0.0052	61.4	3.8
					0.50	75	0.0021	0.0050	60.0	5.4
					0.75	75	0.0024	0.0043	60.1	30.0
					1.00	75	0.0023	0.0100	53.8	9.2
					1.50	75	0.0021	0.0100	60.9	3.2
					—	—	0.0020	0.0080	64.6	1.3
					0.50	75	0.0022	0.0080	70.0	1.2
					0.75	75	0.0022	0.0100	71.4	0.0
					1.00	75	0.0022	0.0091	71.0	1.1
1.50	75	0.0027	0.0075	62.8	3.4					
Campione and Mendola (2004)	—	100, 200	12	Hooked end	—	—	0.0020	0.0150	20.8	1.5
					0.50	60	0.0022	0.0150	20.0	4.4
					1.00	60	0.0022	0.0150	19.7	5.2
					2.00	60	0.0026	0.0150	18.4	9.9
Campione et al. (2005)	—	100, 200	12	Hooked end	—	—	0.0021	0.0150	22.4	1.3
					0.50	60	0.0026	0.0150	25.8	7.4
					1.00	60	0.0030	0.0150	27.4	7.9
					2.00	60	0.0031	0.0150	28.9	12.9
Bencardino et al. (2007)	UNI EN 12390	1, 50, 300	12	Hooked end	—	—	0.0020	0.0026	64.1	56.2
					—	—	0.0022	0.0023	66.3	—
					—	—	0.0015	0.0016	69.8	—
					1.00	40	0.0026	0.0045	67.2	36.0
					1.00	40	0.0028	0.0048	71.9	36.0
					1.00	40	0.0027	0.0048	69.8	43.0
					1.60	40	0.0030	0.0090	61.1	44.0
					1.60	40	0.0026	0.0140	55.7	20.0
					1.60	40	0.0030	0.0170	57.7	38.6
					3.00	40	0.0027	0.0110	59.8	20.0
					3.00	40	0.0028	0.0180	54.2	25.6
					3.00	40	0.0026	0.0110	61.5	23.0

Πίνακας 11 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

(1) Soroushian και Lee (1989)

Το μοντέλο που προτάθηκε από τους δύο αυτούς μελετητές αποτελείται από έναν καμπυλόγραμμο αύξοντα κλάδο ο οποίος ακολουθείται από έναν διγραμμικό φθίνοντα κλάδο (εξ. (1α) και (1β)).

$$\sigma = -f_{cf} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pf}} \right)^2 + 2f_{cf} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pf}} \right) \quad \text{για } \varepsilon \leq \varepsilon_{pf} \quad (1\alpha)$$

$$\sigma = z(\varepsilon - \varepsilon_{pf}) + f_{cf} \geq f_o \quad \text{για } \varepsilon > \varepsilon_{pf} \quad (1\beta)$$

Σε αυτό το μοντέλο η μέγιστη τιμή της τάσης και της παραμόρφωσης (f_{cf}, ε_{pf}), η παραμένουσα τάση (f_o) και η κλίση του φθίνοντα κλάδου(z) έχουν εκτιμηθεί εμπειρικά ως συναρτήσεις της θλιπτικής αντοχής της μήτρας και του λόγος όπλισης με ίνες ($I_f = V_f L_f / D_f$). Η αντοχή σε συμπίεση του ινοπλισμένου σκυροδέματος (f_{cf}) και η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση (ε_{pf}) εκτιμώνται με τη συμβολή ενός επιπλέον παράγοντα στην αντοχή της μήτρας (f_c) και στην παραμόρφωση αιχμής, $\varepsilon_{co} = 0.0021$. Αυτός ο πρόσθετος παράγοντας προκύπτει από το λόγο ινοπλισμού (I_f) ο οποίος πολλαπλασιάζεται με έναν σταθερό όρο. Μια εμπειρική εξίσωση για τις διάφορες μεταβλητές αυτού του προτεινόμενου μοντέλου, ορίστηκε με τη χρήση της καμπύλης ελάχιστων τετραγώνων η οποία προσαρμόστηκε στα πειραματικά αποτελέσματα που λήφθηκαν από τους ίδιους συγγραφείς. Η εξίσωση αυτή παρατίθεται κατωτέρω :

$$f_{cf} = f_c + 3.6I_f \quad (2)$$

$$f_o = 0.12f_{cf} + 14.8I_f \quad (3)$$

$$z = -343f_c(1 - 0.66\sqrt{I_f}) \leq 0 \quad (4)$$

$$\varepsilon_{pf} = 0.0007I_f + 0.0021 \quad (5)$$

Στο μοντέλο αυτό η παραμένουσα παραμόρφωση αστοχίας για το ινοπλισμένο με χάλυβα σκυρόδεμα δεν έχει καθοριστεί.

(2) Ezeldin και Balaguru (1992)

Πρότειναν μία αναλυτική εξίσωση (εξ. 6) για να αποτυπώσουν την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης για κανονικής αντοχής ινοπλισμένο με χάλυβα σκυρόδεμα και βασίστηκαν στην εξίσωση που προτάθηκε από τους Carreira και Chu (1985) η οποία αφορά στη μονοαξονική θλίψη του άοπλου σκυροδέματος . Αυτή η εξίσωση περιλαμβάνει μία παράμετρο β του υλικού, η οποία είναι η κλίση της ευθείας στο σημείο καμπής του φθίνοντα κλάδου.

$$\frac{\sigma}{f_{cf}} = \frac{\beta \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pf}} \right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pf}} \right)^\beta} \quad (6)$$

Προκειμένου να ποσοτικοποιήσουν την επίδραση των ινών στη συμπεριφορά σε θλίψη του ινοπλισμένου σκυροδέματος , χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση ελαχίστων τετραγώνων ώστε να καθορίσει μία σχέση ανάμεσα στο δείκτη όπλισης με ίνες με καμπυλωμένα (σαν γάτζους) άκρα ($RI = W_f L_f / D_f$, W_f : το βάρος των ινών από χάλυβα) και στις βασικές παραμέτρους της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης. Από αυτές της παραμέτρους οι πιο σημαντικές και χρήσιμες είναι η αντοχή σε θλίψη (f_{cf}) και η αντίστοιχη μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης (ε_{pf}).

Ακόμα, στην εξίσωση αυτή, τα δύο παραπάνω μεγέθη υπολογίζονται με τη βοήθεια ενός επιπλέον παράγοντα ο οποίος συνδέεται με τις ιδιότητες των ινών και προστίθεται στη θλιπτική αντοχή (f_c) και παραμόρφωση (ε_{co}) του απλού σκυροδέματος αντίστοιχα. Οι ακόλουθες εξισώσεις προέκυψαν με τη χρήση της γραμμικής παλινδρόμησης, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξήγαγαν οι μελετητές αυτοί.

$$f_{cf} = f_c + 3.51(RI) \quad (7)$$

$$\varepsilon_{pf} = \varepsilon_{co} + 446 \times 10^{-6}(RI) \quad (8)$$

Για ίνες με καμπυλωμένα άκρα :

$$\beta = 1.093 + 0.7132(RI)^{-0.926} \quad (9)$$

Χρησιμοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα των Fanell και Naaman (1985) για οπλισμένα κονιάματα με ευθύγραμμες ίνες, προτάθηκε η ακόλουθη σχέση για την παράμετρο β :

$$\beta = 1.093 + 7.4818(RI)^{-1.387} \quad (10)$$

Χωρίς σαφή πειραματικά δεδομένα, οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν $\varepsilon_{co} = 0.002$, σύμφωνα με διεθνή πρότυπα.

Οι παραπάνω σχέσεις υπολογισμού της τιμής β μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τιμές του δείκτη όπλισης οι οποίες κυμαίνονται από 0.75 έως 2.5 για ίνες με καμπυλωμένα άκρα και από 2 έως 5 για ευθύγραμμες ίνες. Η παραμόρφωση που αντιστοιχεί σε αστοχία δεν έχει καθοριστεί.

(3) Barros και Figueiras (1999)

Βασίστηκαν στα πειραματικά αποτελέσματα και ακολούθησαν τη διαδικασία των Mebarkia και Virulanandan (1992) και πρότειναν την εξής σχέση τάσης – παραμόρφωσης :

$$\sigma = f_{cf} \frac{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pf}}}{(1-p-q) + q \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pf}} \right) + p \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pf}} \right)^{(1-q)/p}} \quad (11)$$

Με :

$$q = 1 - p - \frac{E_{pf}}{E_c} \quad (12)$$

$$p + q \in]0,1[\quad \frac{1-q}{p} > 0 \quad (13)$$

$$E_{pf} = \frac{f_{cf}}{\varepsilon_{pf}} \quad E_c = 21,500 \sqrt[3]{\frac{f_{cf}}{10}} \quad (14)$$

f_{cf} : μέση αντοχή σε θλίψη όπως υπολογίζεται πειραματικά

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, οι μελετητές κατέληξαν στις εξής εξισώσεις :

- Για ίνες με καμπυλωμένα άκρα ($L_f = 30$ mm, $D_f = 0.5$ mm, $L_f / D_f = 60$)

$$\varepsilon_{pf} = \varepsilon_{co} + 0.0002W_f \quad (15)$$

$$p = 1 - 0.919e^{-0.394W_f} \quad (16)$$

- Για ίνες με καμπυλωμένα άκρα ($L_f = 60$ mm, $D_f = 0.8$ mm, $L_f / D_f = 75$)

$$\varepsilon_{pf} = \varepsilon_{co} + 0.00026W_f \quad (17)$$

$$p = 1 - 0.722e^{-0.144W_f} \quad (18)$$

όπου :

- ε_{co} : η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση του άοπλου σκυροδέματος. Η τιμή αυτής λήφθηκε ίση με 0.0022, σύμφωνα με το CEB-FIP (1993)
- W_f : το ποσοστό του βάρους των ινών χάλυβα στο μίγμα
- Οι τιμές για τη μέγιστη παραμόρφωση (ε_{pf}) και την παράμετρο p υπολογίζονται από τις προαναφερθείσες εξισώσεις
- f_{cf} : η αντοχή σε θλίψη του ινοπλισμένου σκυροδέματος η οποία παίρνει τιμές από 30 MPa έως 60 MPa και για σκυρόδεμα με περιεκτικότητα σε ίνες παρόμοια με αυτή που χρησιμοποίησαν οι συγγραφείς

Η τιμή της παραμόρφωσης αστοχίας ε_{fu} δεν έχει προσδιοριστεί.

(4) Nataraja, Dhang, και Gupta (1999)

Οι Nataraja et al. (1999) πρότειναν μία αναλυτική εξίσωση παρόμοια με αυτή των Ezeldin και Balaguru (1992) (εξ. 6), αλλά χρησιμοποίησαν τα πειραματικά τους δεδομένα και κατέληξαν σε πρόσθετους παράγοντες οι οποίοι σχετίζονται με το λόγο όπλισης με ίνες (RI) και οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για να καθορίσουν την αντοχή, την παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της τάσης και την τιμή της παραμέτρου β. Οι αντίστοιχες σχέσεις είναι :

$$f_{cf} = f_c + 2.1604(RI) \quad (19)$$

$$\varepsilon_{pf} = \varepsilon_{co} + 0.0006(RI) \quad (20)$$

$$\beta = 0.5811 + 1.93(RI)^{-0.7406} \quad (21)$$

Σύμφωνα με τους μελετητές :

- $\varepsilon_{co} = 0.002$
- f_{cf} : έως 50 MPa
- ίνες πτυχωτές με τιμή δείκτη όπλισης η οποία κυμαίνεται από 0.9 – 2.7
- η τιμή της παραμόρφωσης αστοχίας ε_{fu} δεν έχει προσδιοριστεί

2.2.2.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΝΑΝΤΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ : Κριτική Επισκόπηση

Τα πειραματικά δεδομένα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11 υπογραμμίζουν την επίδραση που έχει η περιεκτικότητα σε ίνες σε δύο μηχανικές ιδιοότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος, συγκεκριμένα στην θλιπτική αντοχή και στην παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση. Τα δεδομένα του πίνακα επιβεβαιώνουν ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα των ινών στο μίγμα, και οι δύο αυτές τιμές παρουσιάζουν μικρή αύξηση (ακόμα και μείωση).

Για να αξιολογήσουν πώς οι προβλέψεις των μοντέλων που περιγράφονται ανωτέρω συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα, εκτιμήθηκαν οι τιμές της θλιπτικής αντοχής και της παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στη μέγιστη καταπόνηση για μίγμα το οποίο αποτελείται από συμβατικό άοπλο σκυρόδεμα και ίνες χάλυβα. Οι εκτιμήσεις αυτές έγιναν για τρία από τα παραπάνω μοντέλα, χωρίς οποιονδήποτε περιορισμό σχετικά με την περιοχή ισχύος, όπως φαίνεται παρακάτω:

- Soroushian and Lee (1989)
 - $V_f = 1 \% , f_{cf} = 32.2 \text{ MPa (+ 7.3 \%)}, \varepsilon_{pf} = 0.0025 (+ 25 \%)$
 - $V_f = 2 \% , f_{cf} = 34.3 \text{ MPa (+ 14.3 \%)}, \varepsilon_{pf} = 0.0029 (+ 45 \%)$
 - $V_f = 3 \% , f_{cf} = 36.5 \text{ MPa (+ 21.7 \%)}, \varepsilon_{pf} = 0.0034 (+ 70 \%)$
- Ezeldin and Balaguru (1992)
 - $V_f = 1 \% , f_{cf} = 36.3 \text{ MPa (+ 21 \%)}, \varepsilon_{pf} = 0.0028 (+ 40 \%)$
 - $V_f = 2 \% , f_{cf} = 42.6 \text{ MPa (+ 42 \%)}, \varepsilon_{pf} = 0.0036 (+ 80 \%)$
 - $V_f = 3 \% , f_{cf} = 48.9 \text{ MPa (+ 63 \%)}, \varepsilon_{pf} = 0.0044 (+ 120 \%)$
- Nataraja et al. (1999)
 - $V_f = 1 \% , f_{cf} = 34.1 \text{ MPa (+ 13.7 \%)}, \varepsilon_{pf} = 0.0032 (+ 60 \%)$
 - $V_f = 2 \% , f_{cf} = 38.3 \text{ MPa (+ 27.7 \%)}, \varepsilon_{pf} = 0.0043 (+ 115 \%)$
 - $V_f = 3 \% , f_{cf} = 42.4 \text{ MPa (+ 41.3 \%)}, \varepsilon_{pf} = 0.0055 (+ 175 \%)$

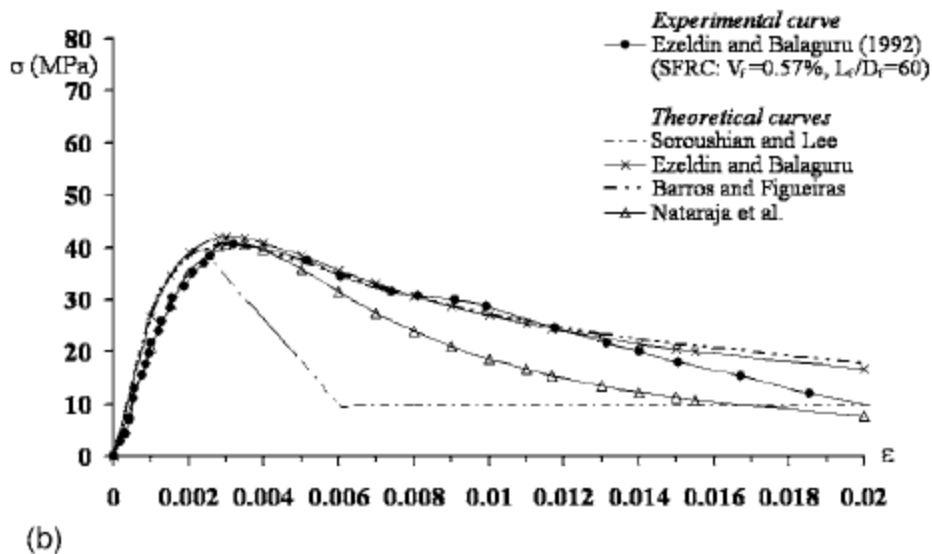
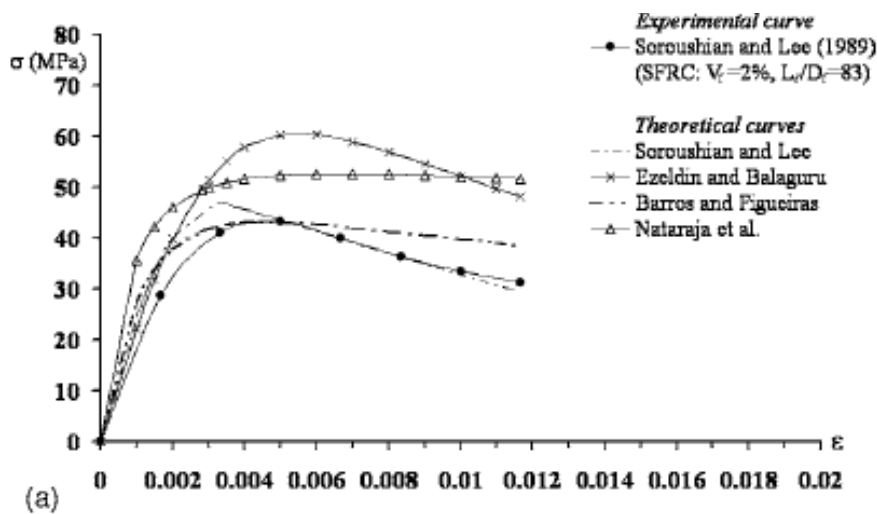
Άοπλο σκυρόδεμα : $f_c = 30 \text{ mm} , \varepsilon_{co} = 0.002$

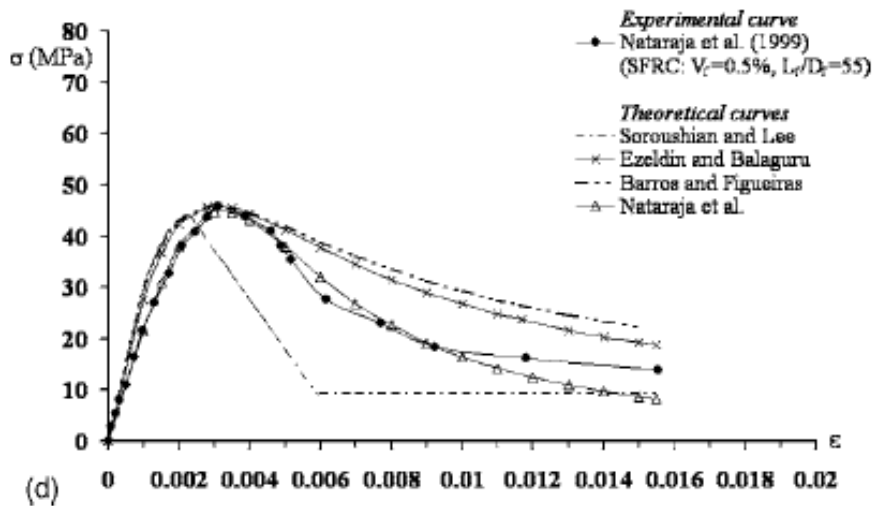
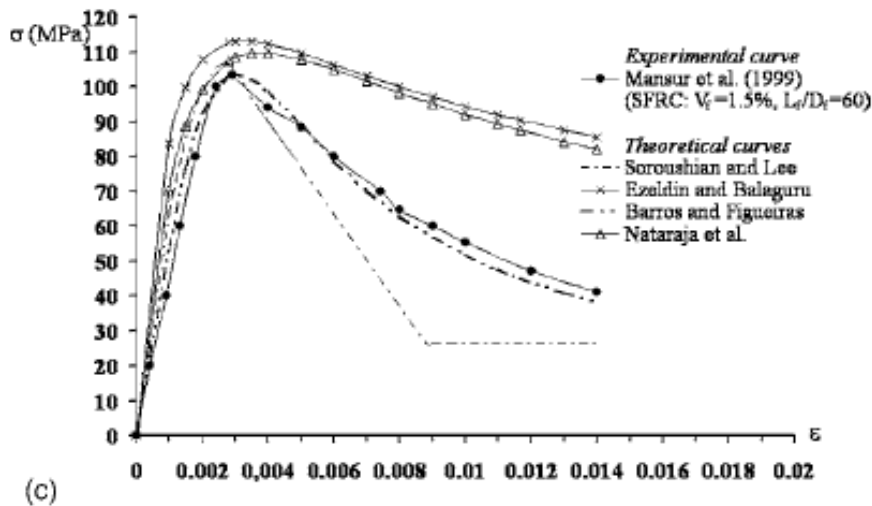
Ίνες χάλυβα : $L_f = 30 \text{ mm}, D_f = 0.5 \text{ mm}, L_f / D_f = 60$

Είναι ξεκάθαρο ότι τα μοντέλα δίνουν πολύ διαφορετικές τιμές για την αντοχή f_{cf} και την παραμόρφωση ε_{pf} και αυτό αντικατοπτρίζεται στις καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης οι οποίες παρατίθενται παρακάτω.

2.2.2.5 ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ

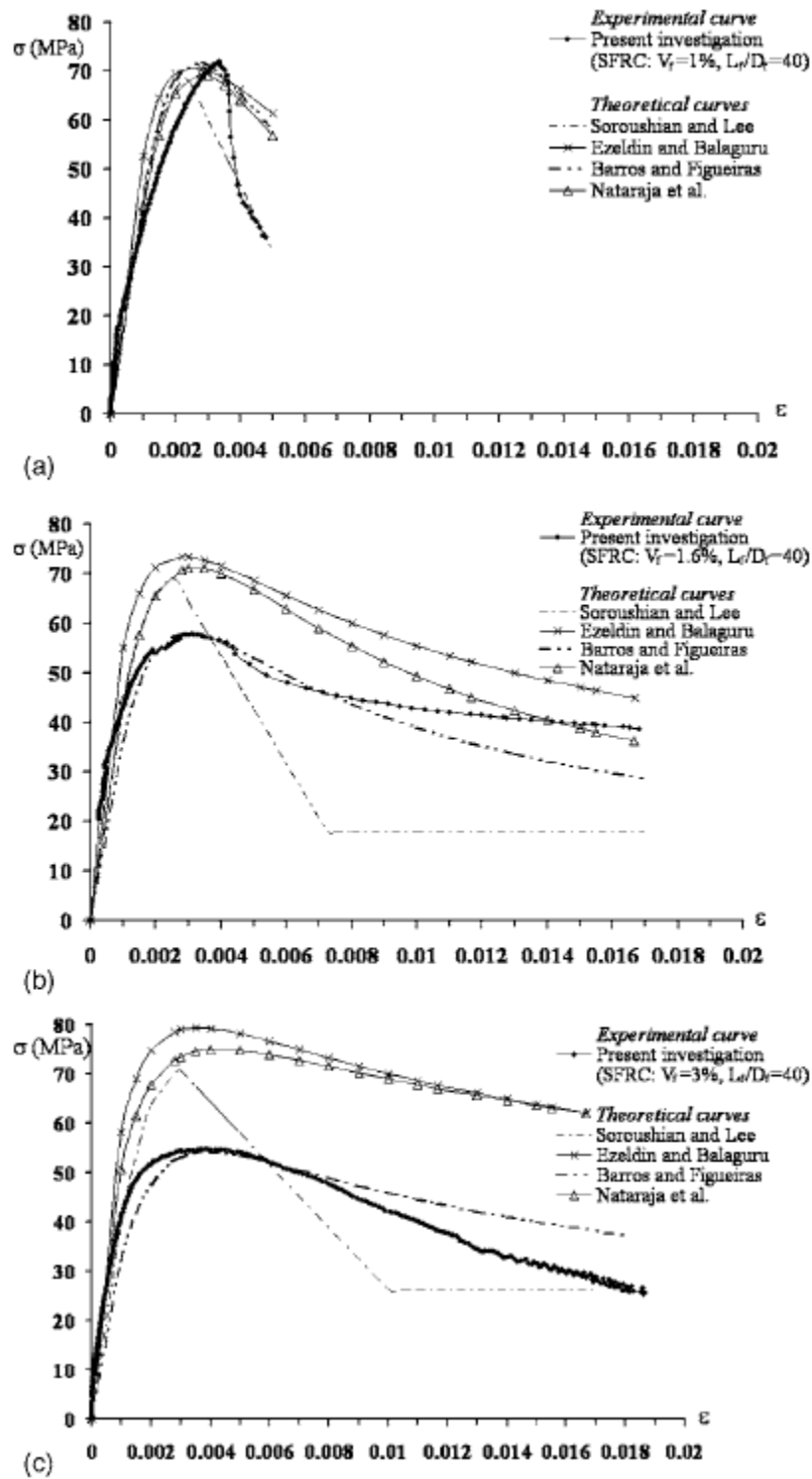
Διεξήχθη μία συνδυαστική σύγκριση ανάμεσα στις πειραματικές καμπύλες, οι οποίες προέκυψαν από πειραματικές δοκιμές, και σε αυτές οι οποίες προέκυψαν από τα θεωρητικά μοντέλα. Η σύγκριση αυτή τονίζει ότι κάθε μοντέλο συγκλίνει με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα :





Σχήμα 14 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΑ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΟΥΣ : (a) Soroushian και Lee, (b) Ezeldin and Balaguru, (c) Mansur et al. , (d) Nataraja et al.

Ακόμα, η σύγκριση αυτή δείχνει ότι υπάρχει απόκλιση ανάμεσα στα προαναφερθέντα θεωρητικά μοντέλα και στα πειραματικά δεδομένα όπως προσδιορίστηκαν από άλλους μελετητές, καθώς κάθε προτεινόμενη εξίσωση προέκυψε από ανάλυση παλινδρόμησης για να παρεμβληθούν τα δικά τους πειραματικά δεδομένα. Από τη μελέτη αυτή, οι πειραματικές καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τις προβλέψεις των διαφόρων θεωρητικών μοντέλων ως εξής :



Σχήμα 15 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΣΤΑ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ : (a) S1 % , (b) S1.6 % ΚΑΙ (c) S3 %

Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι οι θεωρητικές καμπύλες των Soroushian και Lee (1989) έχουν εντελώς διαφορετική μορφή από εκείνες οι οποίες προέκυψαν πειραματικά. Οι θεωρητικές καμπύλες υπερεκτιμούν την περιοχή γύρω από τη μέγιστη τάση, υποεκτιμούν όμως την παραμένουσα αντοχή η οποία εμφανίζεται για παραμόρφωση 0.01. Η παραμένουσα αυτή αντοχή είναι το 42 % και 55 % από την τιμή που έχει καταγραφεί πειραματικά για το SFRC με περιεκτικότητα σε ίνες 1.6 % και 3 % αντίστοιχα. Οι σχέσης τάσης – παραμόρφωσης που προτείνονται από τους Ezeldin και Balaguru (1992) και από Nataraja et al. (1999) υπερεκτιμούν τη μέγιστη τάση καθώς και τους κλάδους της καμπύλης πριν και μετά τη μέγιστη τάση, αλλά εμφανίζουν παρόμοια κλίση με τους κλάδους αποτόνωσης που δίνουν τα πειραματικά δεδομένα.

Αυτές οι θεωρητικές καμπύλες έχουν παρόμοια μορφή, τόσο για τους φθίνοντες όσο και για τους αύξοντες κλάδους, με εκείνες οι οποίες καταγράφηκαν από πειραματικές διατάξεις. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μια αριθμητική μετατόπιση στις θεωρητικές καμπύλες σε σχέση με την πραγματική συμπεριφορά που παρατηρήθηκε πειραματικά. Από την άλλη, το μοντέλο το οποίο προτάθηκε από τους Barros and Figueiras (1999) γενικά είναι συμβατό με τις πειραματικές καμπύλες, όμως ελαφρώς υποεκτιμά τον φθίνοντα κλάδο για περιεκτικότητα του υλικού σε ίνες χάλυβα $V_f = 1.6 \%$ και υπερεκτιμά τον φθίνοντα κλάδο για $V_f = 3 \%$ (Σχήμα 3)

Η σύγκριση με τις άλλες πειραματικές καμπύλες που αναλύθηκαν δείχνει ότι το μοντέλο των Soroushian και Lee (1989) συγκλίνει προς τη συμπεριφορά που καταγράφεται για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα με περιεκτικότητα σε ευθύγραμμες ίνες έως $V_f = 3 \%$. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, στην περίπτωση που στη μήτρα σκυροδέματος προστεθεί χαμηλό ποσοστό ιών ($V_f < 1\%$), πτυχωτών ή καμπυλόγραμμων, η απόκριση του μοντέλου μετά τη μέγιστη τάση υποεκτιμάται.

Σε ό, τι αφορά στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα μέσης περιεκτικότητας σε ίνες ($V_f > 1\%$) το θεωρητικό μοντέλο των Ezeldin και Balaguru (1992) και Nataraja et al. (1999) προβλέπει ένα άκαμπτο αύξοντα κλάδο και υποεκτιμά τον φθίνοντα. Η εκτίμηση των μελετητών αυτών για το SFRC έγινε βάση δειγμάτων χαμηλής περιεκτικότητας σε ίνες. Ο φθίνοντας κλάδος σε αυτές τις σχέσεις τάσης παραμόρφωσης επηρεάζεται από την παράμετρο β. Όσο η τιμή αυτής μειώνεται, δε διαμορφώνεται πειραματική επίδραση της αποτόνωσης. Η σχέση τάσης - παραμόρφωσης, όπως διαμορφώθηκε από τους Barros and Figueiras (1999) είναι συμβατή με τα πειραματικά δεδομένα των Ezeldin και Balaguru (1992) και των Mansur et al. (1999).

Στην πραγματικότητα, οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν αυτά τα πειραματικά δεδομένα για να ορίσουν το μοντέλο τους. Αυτό το μοντέλο, όμως, υπερεκτιμά την απόκριση του ινοπλισμένου σκυροδέματος μετά τη μέγιστη τιμή της τάσης για ίνες των οποίων το μήκος δεν ξεπερνά τα 30 mm και η περιεκτικότητα αυτών στο υλικό είναι έως 1% . Αν οι ίνες χάλυβα είναι ευθύγραμμες , οι σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης οι οποίες περιγράφονται ως τώρα υπερεκτιμούν την παραμένουσα αντοχή για ίνες με λόγο πλευρών μικρότερο από 50, ενώ για μεγαλύτερο λόγο πλευρών οι σχέσεις αυτές συγκλίνουν με τις καμπύλες. Σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται η μέση θλιπτική αντοχή του FRC, ενώ τα άλλα μοντέλα υπολογίζουν την θλιπτική αντοχή του SFRC, προσθέτοντας έναν εμπειρικό παράγοντα στην τάση της μήτρας.

2.2.2.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις μελέτες που περιγράφηκαν παραπάνω, τα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν είναι τα εξής :

- Οι πειραματικές καμπύλες στις οποίες κατέληξαν παραπάνω, δείχνουν ότι η ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας για το ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα σκυρόδεμα παίρνει τιμή μεγαλύτερη από 0.0035. η προσθήκη περισσότερων ινών στο μίγμα δεν επηρεάζει σημαντικά τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Η αύξηση αυτής της περιεκτικότητας βελτιώνει τη συμπεριφορά του υλικού μετά τη μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση και παρατηρείται ένας περισσότερο εκτενής κλάδος αποτόνωσης στην καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης.
- Τα δείγματα σκυροδέματος ενισχυμένο με ίνες χάλυβα με περιεκτικότητα σε ίνες 1.6 % και 3 % παρουσιάζουν για ανηγμένη παραμόρφωση 0.01, παραμένουσα τάση 74 % και 78 % της τιμής της μέγιστης τάσης που εμφανίζουν αντίστοιχα. Σε αυτή την περιεκτικότητα ινών, η ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας παίρνει τιμές τρεις με πέντε φορές μεγαλύτερες από αυτές του απλού σκυροδέματος.
- Τα θεωρητικά μοντέλα που παρουσιάστηκαν παραπάνω βασίστηκαν σε εξισώσεις όμοιες με αυτές που περιγράφουν τη συμπεριφορά του άοπλου σκυροδέματος, όμως η εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής και της απόκρισης του υλικού στη μέγιστη τάση έγιναν με εμπειρικές εξισώσεις. Συγκεκριμένα, προέκυψαν με την προσθήκη ενός αδιάστατου παράγοντα στη μέγιστη τάση

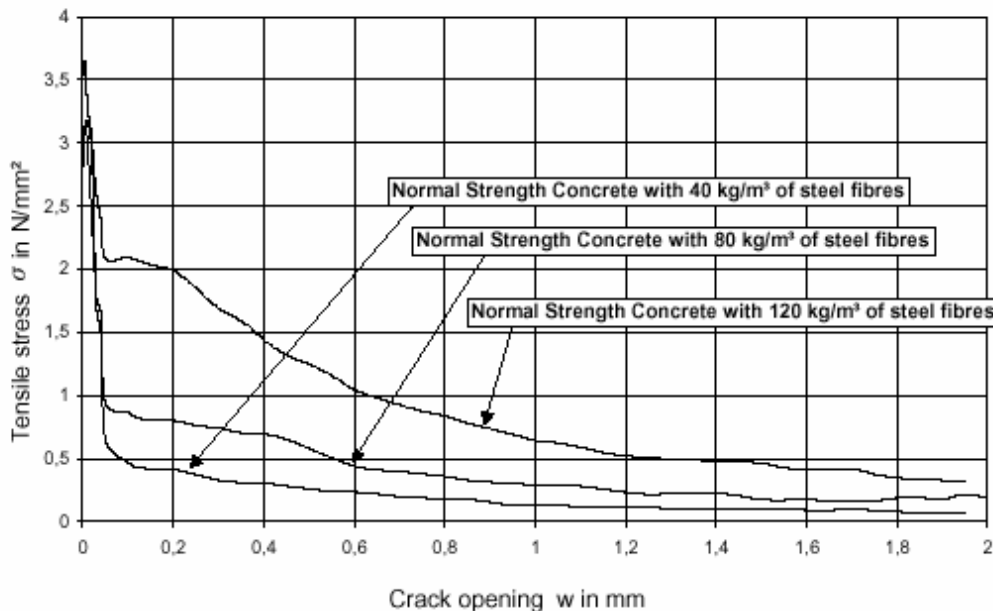
και στην αντίστοιχη παραμόρφωση του άοπλου σκυροδέματος. Κάθε θεωρητικό μοντέλο είναι συμβατό με τα πειραματικά δεδομένα από τα οποία λήφθηκαν οι εξισώσεις για το εκάστοτε μοντέλο. Δεν είναι, όμως συμβατά με άλλα δημοσιευμένα πειραματικά δεδομένα. Γενικά, η σχέση τάσης – παραμόρφωσης του ινοπλισμένου με χάλυβα σκυροδέματος προσδιορίζεται επαρκώς από το μοντέλο των Barros και Figueiras (1999). Βέβαια, περαιτέρω βελτίωση της προσομοίωσης του SFRC σε θλίψη θα επέτρεπε μεγαλύτερη εκμετάλλευση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού αυτού και βέλτιστο σχεδιασμό στον κατασκευαστικό τομέα.

Κάποια επιπλέον συμπεράσματα το SFRC είναι :

- Η συμβολή των ινών στη θλιπτική αντοχή ποικίλει, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της μήτρας και των ινών.
- Το μέτρο ελαστικότητας παρουσιάζει μία τάση μείωσης καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε ίνες.
- Η ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση αυξάνεται με την αύξηση της αντοχής του SFRC.
- Όσο πιο μεγάλης αντοχής είναι το σκυρόδεμα τόσο η ενίσχυση με ίνες χάλυβα επηρεάζει τη δυσθραυστότητα του σύνθετου υλικού.

2.2.3 ΑΠΟΚΡΙΣΗ SFRC ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα για την ολκιμότητα Σκυροδέματος Κανονικής Αντοχής (NSC) ενισχυμένου με ίνες χάλυβα που υπόκειται σε μονοαξονική εφελκυστική φόρτιση.



Σχήμα 15 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ – ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΡΩΓΜΩΝ

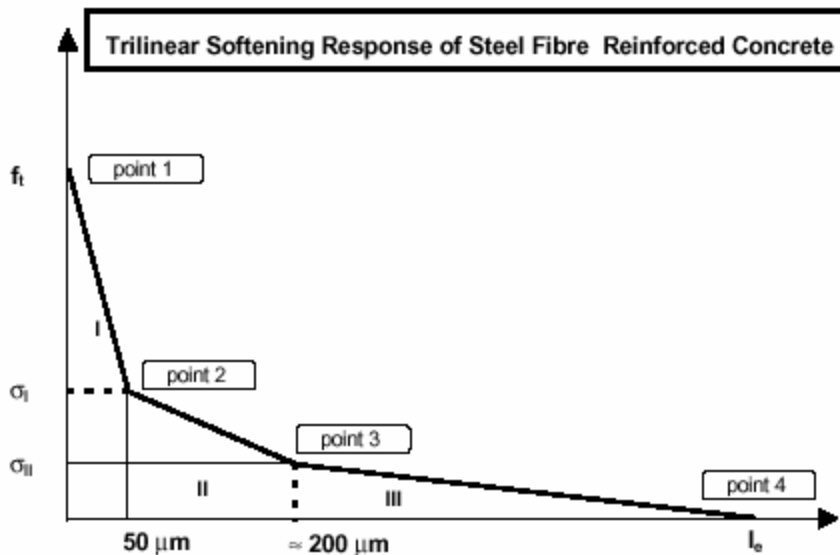
Για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων της ποσότητας των ινών και της γεωμετρίας τους αναπτύχθηκε ένα τριγωνικό ομαλοποιημένο διάγραμμα.

2.2.3.1 ΤΡΙΓΡΑΜΜΙΚΟ ΟΜΑΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΓΙΑ SFRC

Το ομαλοποιημένο διάγραμμα για τον εφελκυσμό του ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος είναι η σχέση ανάμεσα στην εφελκυστική τάση και στο άνοιγμα της ρωγμής (ή στην παραμόρφωση λόγω εφελκυσμού) στη ζώνη θραύσης. Η ενέργεια θραύσεως απεικονίζεται στο διάγραμμα αυτό ως η επιφάνεια κάτω από το ομαλοποιημένο διάγραμμα. Το διάγραμμα αυτό περιγράφει τη συμπεριφορά του υλικού μετά τη ρηγμάτωση και εκφράζει την αντίσταση του σκυροδέματος στη διεύρυνση των ρωγμών. Το ομαλοποιημένο διάγραμμα και η ενέργεια θραύσης αποτελούν αποτελεσματικούς δείκτες για την εκτίμηση των ιδιοτήτων του SFRC και της συμπεριφοράς του μετά τη ρηγμάτωση.

Η μορφή του ομαλοποιημένου διαγράμματος για τον εφελκυσμό αποτελεί ένα τριγραμμικό μοντέλο το οποίο βασίζεται στις προτάσεις του Muller, ο οποίος υπολόγισε τη διασπορά των δυνάμεων στις ίνες σε σχέση με το άνοιγμα της ρωγμής και υπέθεσε μια σταθερή διανομή της έντασης στους δεσμούς σκυροδέματος - ινών. Μετά την ρηγμάτωση, η εφελκυστική ένταση ασκείται στις ίνες μέχρι να ξεπεραστεί η αντοχή του δεσμού. Έπειτα οι ίνες διαχωρίζονται από το υλικό. Στο τριγραμμικό μοντέλο αυτός ο μηχανισμός συνδυάζεται με την τάση του σκυροδέματος να μειώσει αυτή την ένταση.

Παρακάτω φαίνεται το τριγραμμικό ομαλοποιημένο διάγραμμα και ξεχωρίζονται οι τρεις διαφορετικοί κλάδοι του.



Σχήμα 16 ΤΡΙΓΡΑΜΜΙΚΟ ΟΜΑΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Στον πρώτο κλάδο (I) το σκυρόδεμα μόνο του αναλαμβάνει την μεταφορά της φόρτισης. Στη συνέχεια, στο δεύτερο κλάδο (II), συνεργάζεται με τις ίνες του χάλυβα για την μεταφορά αυτή. Με την αύξηση του πλάτους της ρωγμής η επιρροή του σκυροδέματος στην αντοχή μειώνεται ραγδαία και οι ίνες καλούνται να αναλάβουν όλη τη φόρτιση και να διατηρήσουν την αντοχή του υλικού. Έχει σημειωθεί ότι το όριο του ανοίγματος ρωγμής για το οποίο το σκυρόδεμα είναι ενεργό στην μεταφορά δύναμης είναι 160-250 μm , ανάλογα με την κυβική αντοχή του σκυροδέματος και το είδος των αδρανών. Κατά συνέπεια στον τρίτο κλάδο (III) οι ίνες δρουν μόνες τους, δεν υπάρχει πλέον συνεργασία με το σκυρόδεμα του οποίου η αντοχή έχει πρακτικά μηδενιστεί.

Τα τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος υπολογίζονται με αξιώσεις οι οποίες παρατίθενται στη συνέχεια.

Επειδή οι ίνες του χάλυβα δεν επηρεάζουν καθόλου τις παραμέτρους της αντοχής, το σημείο1 (point 1) στο διάγραμμα αντιστοιχεί στην εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, η οποία είναι :

$$f_t = 2.12 \ln \left(1 + \frac{f_c}{10} \right) \quad (22)$$

όπου,

- f_t είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος
- f_c είναι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

Ο δεσμός μεταξύ της μήτρας του σκυροδέματος και των ινών αστοχεί όταν το πλάτος ρωγμής είναι περίπου 50 μm . Η αντίστοιχη τάση σ_1 μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση (2) η οποία φαίνεται παρακάτω. Ο μειωτικός συντελεστής της επιρροής των ινών, ένεκα του τυχαίου προσανατολισμού τους στο χώρο εκτιμάται ότι είναι 0,30.

$$\sigma_1 = f_{t2} \left(1 - \frac{0.05}{w_2} \right) + 0.30 \eta_{vol} \sigma_\tau \left(1 - \frac{0.05}{l_E} \right) \quad (23)$$

όπου,

- f_{t2} : 0.70 N / mm^2 για σκυρόδεμα με αμμοχάλικο και 0.85 N / mm^2 για σκυρόδεμα με χονδρόκοκκα αδρανή
- w_2 : είναι το άνοιγμα της τελικής ρωγμής, πριν από τη θραύση
- η_{vol} : είναι το ποσοστό των ινών επί του όγκου του μίγματος
- σ_τ : είναι η τάση στις ίνες κατά το διαχωρισμό (εξίσωση 3)
- l_E : είναι το μέσο μήκος δεσμού ινών σκυροδέματος, περίπου $0.25 l_{iνας}$

$$\sigma_\tau = 4 \frac{l_E}{d_f} \tau_m \quad (24)$$

όπου,

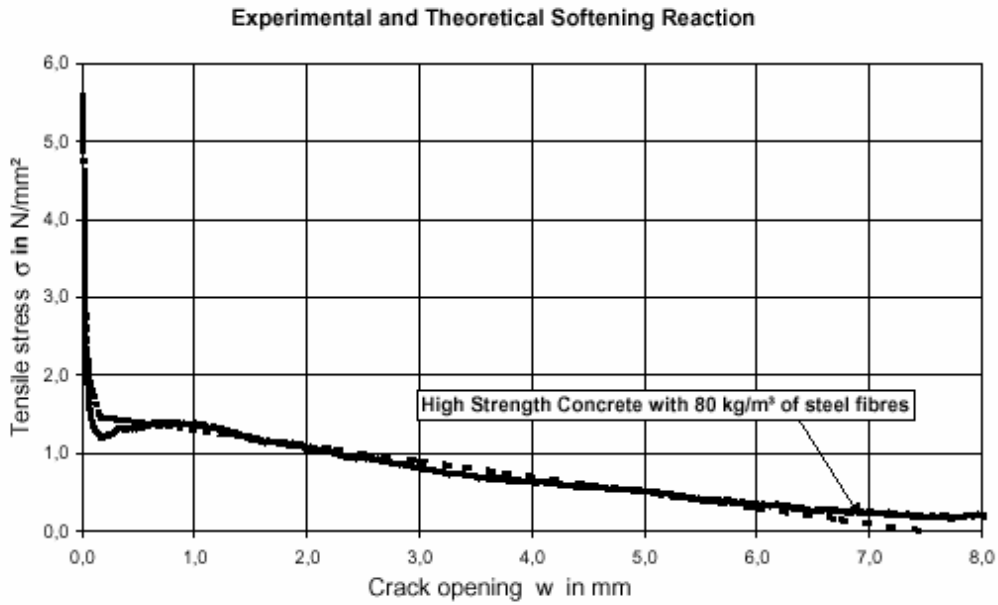
- d_f : είναι η μέση διάμετρος των ινών
- τ_m : η μέση τιμή της τάσης στο δεσμό κατά το διαχωρισμό των ινών από το σκυρόδεμα

Μετά την ανάπτυξη του χαρακτηριστικού πλάτους ρωγμής w_2 , οι ίνες του χάλυβα αναλαμβάνουν την μεταφορά της γόρτισης. Η τάση $\sigma_{||}$ (point 3) μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση :

$$\sigma_{||} = 0.30 \eta_{vol} \sigma_T \left(1 - \frac{w_2}{l_E} \right) \quad (25)$$

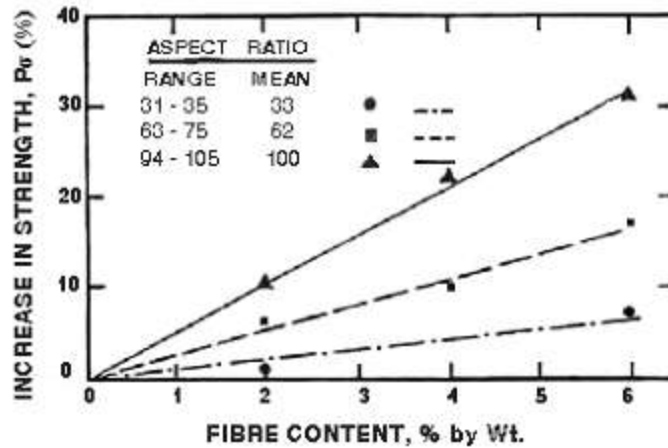
Όταν το πλάτος ρωγμής φτάσει το $1 / 4$ του μήκους της ίνας, η ίνα διαχωρίζεται από τη μήτρα και η μεταφορά έντασης διακόπτεται.

Με τις παραπάνω εξισώσεις μπορεί να υπολογιστεί η απόκριση(πλάτος ρωγμής), σε σχέση με την φορτίο που δέχεται το SFRC, και κατ' επέκταση μπορεί να υπολογιστεί η ενέργεια θραύσης με την ολοκλήρωση του διαγράμματος. Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η σύγκλιση μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων των δοκιμών άμεσου εφελκυσμού.



Σχήμα 17 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕ ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Η επιρροή της περιεκτικότητας σε ίνες του ινοπλισμένου με χάλυβα σκυροδέματος φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα :



Σχήμα 18 ΑΝΤΟΧΗ – ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΙΝΕΣ

2.2.4 ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΔΟΚΩΝ ΑΠΟ SFRC

Οι μέθοδοι υπολογισμού της διατμητικής αντοχής μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία έχει να κάνει με τον καθορισμό της αντοχής μέσω εμπειρικών παραμέτρων που βασίζονται σε πειραματικά συμπεράσματα. Η δεύτερη κατηγορία έχει να κάνει με μαθηματικά μοντέλα που στηρίζονται στη Μηχανική των Θραύσεων.

Το πραγματικό κριτήριο για τη διατμητική αστοχία είναι η δημιουργία μιας διαγώνιας ρωγμής που εκτείνεται από το σημείο στο οποίο ασκείται το φορτίο μέχρι τη στήριξη. Αυτή η υπόθεση είναι μια απλοποίηση που υποδηλώνει ότι μόνο μία ρωγμή είναι υπεύθυνη για την αστοχία. Με την μηχανική των θραύσεων η μεταφορά της έντασης στην κρίσιμη διατμητική ρωγμή μπορεί να υπολογιστεί. Με την εξέλιξη της θεωρίας αυτής ο Hillerborg παρέθεσε μία εξίσωση που εκφράζει την εξάρτηση της διατμητικής αντοχής με το χαρακτηριστικό μήκος

$$V_u \propto \sqrt[4]{l_{ch}}$$

Με το τριγωνικό μοντέλο τάσης-μετατόπισης μπορεί να προσδιοριστεί η ενέργεια θραύσεως G_f καθώς και το χαρακτηριστικό μήκος l_{ch} για το SFRC. Αυτοί οι παράμετροι επιτρέπουν τον υπολογισμό ενός αναλογικού συντελεστή f και κατ' επέκταση της διατμητικής αντοχής. Παρακάτω φαίνονται οι θεωρητικές εκτιμήσεις σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα :

Concrete type	l_{ch} in mm	f	V_{calc} in kN	V_{exp} in kN	Δ
NSC + 0 kg/m ³	292,3	1,00	-	95,6	-
NSC + 40 kg/m ³	3237,4	1,82	174,0	179,9	0,97
NSC + 40 kg/m ³	3470,6	1,73	165,4	176,6	0,94
HSC + 0 kg/m ³	318,8	1,00	-	121,5	-
HSC + 40 kg/m ³	3728,2	1,87	227,2	226,4	1,00
HSC + 80 kg/m ³	7071,4	2,27	275,4	252,5	1,09

Πίνακας 12 ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΜΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

2.2.4.1 Μηχανική των Θραύσεων

Η Μηχανική των θραύσεων μελετά την αστοχία των κατασκευών, η οποία προκαλείται από την ύπαρξη αρχικών ρωγμών. Εξετάζεται η εντατική κατάσταση στα άκρα της ρωγμής, τα κριτήρια διάδοσης της ρωγμής, η επίδραση της δυναμικής φόρτισης, της κόπωσης και οι μικροσχηματισμοί αστοχίας των υλικών.

Σαν ενέργεια θραύσης G_f ορίζεται η ενέργεια που χρειάζεται για τη θραύση του υλικού, ή αλλιώς για τη δημιουργία μιας μονάδας ρηγματωμένης επιφάνειας.(Hillerborg, 1985) και σαν χαρακτηριστικό μήκος l_{ch} ο λόγος $G_f E / f_t^2$ (Hillerborg, 1975), όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και f_t η εφελκυστική αντοχή. Το χαρακτηριστικό μήκος είναι ιδιότητα που εκφράζει την θραύση για κάθε υλικό και δείχνει ότι η ευθραυστότητα αυξάνει με την αύξηση της αντοχής και μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας που χρειάζεται για την θραύση.

2.2.5 ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑΣ – ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

Για την αποτίμηση της δυσθραυστότητας των δοκιμίων ακολουθήθηκε η διαδικασία που προδιαγράφεται στο ASTM C1609/C 1609M-05. Τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε πειράματα κάμψης στα τρίτα ήταν 10x10x40 cm, με άνοιγμα μεταξύ των στηρίξεων 30 cm.

Η φόρτιση έγινε με σερβο-υδραυλική μηχανή Instron 8801 με μέγιστο στατικό και δυναμικό φορτίο ± 100 kN, ενώ το σύστημα εφαρμογής και υποστήριξης του δοκιμίου σχεδιάστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή C78-02 και τις διαστάσεις των δοκιμίων, ώστε να παράγει φόρτιση τεσσάρων σημείων χωρίς εκκεντρότητα ή στρέψη. Για την ακριβή μέτρηση του βέλους κάμψης, χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρονικό μηκυσιόμετρο (mitutoyo) το οποίο τοποθετείται πάνω σε ένα ζυγό (yoke). Με τον τρόπο αυτό, το βέλος κάμψης μετρείται από τον ουδέτερο άξονα μέχρι την επάνω επιφάνεια του δοκιμίου.



Σχήμα 19 ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑΣ

Η δοκιμή τερματίζει, όταν το βέλος κάμψης φθάσει τουλάχιστον το $1 / 150$ του ανοίγματος του δοκιμίου, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση τα 2 mm. Στην πειραματική αυτή μέθοδο δεν υπολογίζονται δείκτες δυσθραυστότητας, όπως στη μέθοδο C1018-97. Υπολογίζεται η δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$, ως η ενέργεια, η οποία είναι ισοδύναμη με τη συνολική επιφάνεια κάτω από την καμπύλη φορτίου – βέλους κάμψης μέχρι το βέλος κάμψης να φθάσει τα 2mm. Μπορούν, επιπλέον, να υπολογισθούν η μέγιστη αντοχή αιχμής, η μέγιστη καμπτική αντοχή, καθώς και η παραμένουσα αντοχή, όταν το βέλος κάμψης είναι 0.5 και 2 mm.

Από τις δοκιμές δυσθραυστότητας παρατηρείται ότι, μετά την πρώτη ρωγμή, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα διατηρεί ακόμα την ικανότητά του να φέρει φορτία. Η ικανότητα αυτή, την οποία προσδίδουν στο σκυρόδεμα οι ίνες, οδηγεί στην αύξηση της δυσθραυστότητάς του. Το άοπλο σκυρόδεμα, αντίθετα, δεν έχει τη δυνατότητα να φέρει φορτία μετά την πρώτη ρωγμή και διαχωρίζεται σε δύο κομμάτια. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών, παρατηρείται και η σημαντική επίδραση του ποσοστού κατ' όγκο των ινών στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Η αύξηση του ποσοστού όγκου των ινών, αυξάνει σημαντικά τη μέγιστη αντοχή αιχμής, την καμπτική αντοχή, την παραμένουσα αντοχή, καθώς και τη δυσθραυστότητα του σκυροδέματος.

Οι ίνες με κεκαμένα άκρα εμφανίζουν αυξημένη παραμένουσα αντοχή για βέλος κάμψης 0.5 mm και 2mm και δυσθραυστότητα σε σχέση με τις κυματοειδείς ίνες, οι οποίες εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή αιχμής και μεγαλύτερη καμπτική αντοχή.

Όλα τα στοιχεία τα οποία αναφέρονται στην ενότητα αυτή, έχουν ληφθεί από το δημοσιευμένο άρθρο « Επίδραση των Χαλύβδινων Ινών στις Μηχανικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος » το οποίο συντάχθηκε από τους Κα. Δήμητρα Β. Σουλιώτη και τον Κο. Θεόδωρο Ε. Ματίκα.

2.2.6 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και βάσει πειραμάτων, εργαστηριακών αποτελεσμάτων και θεωρητικών μοντέλων, έχουν διεξαχθεί συμπεράσματα σχετικά με την απόκριση του σκυροδέματος, ενισχυμένου με ίνες χάλυβα, σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Συνοπτικά τα συμπεράσματα αυτά είναι :

- Η θλιπτική αντοχή του σύνθετου αυτού σκυροδέματος είναι πολύ υψηλότερη από αυτή που επιδεικνύει το απλό σκυρόδεμα σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Η παρουσία των χαλύβδινων ινών αυξάνει την παραμόρφωση θραύσης και βελτιώνει την ολκιμότητα του στοιχείου από ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα σκυροδέματος.
- Το ενισχυμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα παρουσιάζει σε υψηλές θερμοκρασίες μηχανικές ιδιότητες οι οποίες είναι πολύ ωφέλιμες σε περίπτωση πυρκαγιάς, καθώς προσδίδουν στο υλικό επιπλέον αντοχή, κάτι που δε συμβαίνει με το απλό σκυρόδεμα.
- Σε υψηλές θερμοκρασίες το τεχνολογικά εξελιγμένο αυτό υλικό επιδεικνύει θερμικές ιδιότητες οι οποίες είναι παρόμοιες με αυτές του απλού σκυροδέματος.
- Σε κάθε περίπτωση, οι σχέσεις που περιγράφουν τις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του υλικού, σε υψηλές θερμοκρασίες, μπορούν να εισαχθούν σε μαθηματικά μοντέλα και να υπολογιστεί η αντοχή των κατασκευασμένων από SFRC στοιχείων σε πυρκαγιά.

2.3 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ (Glass Fiber Reinforced Concrete)

Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες γυαλιού (GRC) είναι μια ποικιλία ινοπλισμένου σκυροδέματος η οποία έχει κατασκευαστεί από λεπτόκοκκο σκυρόδεμα και έχει ενισχυθεί με χορδές από ίνες γυαλιού που κατανέμονται ομοιόμορφα σε ολόκληρη τη μάζα του προϊόντος ή σε συγκεκριμένα μέρη του. Η συνεργασία σκυροδέματος και ινών εξασφαλίζεται με τη συγκόλληση κατά μήκος των επιφανειών τους, παρέχοντας μια τεράστια περιοχή επαφής (η οποία μπορεί να κυμαίνεται από 10.000 έως 50.000 τ. μ. ανάλογα με την εφαρμογή του τελικού προϊόντος). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ολοκαίνουριες ιδιότητες του σύνθετου υλικού GRC.

Οι ίνες γυαλιού που χρησιμοποιούνται είναι :

- ίνες γυαλιού ανθεκτικές στα αλκάλια
- συμβατικές ίνες γυαλιού

Η ενίσχυση με ίνες γυαλιού έχει αποδειχθεί ότι είναι η πιο οικονομική και τεχνολογικά εφικτή λύση.

Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E, C και S, των οποίων οι κύριες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			
	E	C	S	SiO ₂ καθαρή
Χημική σύσταση (%)				
SiO ₂	54	60	65	>99,5
Al ₂ O ₃	16	25	25	-
B ₂ O ₃	8	-	-	-
CaO	17	9	-	-
MgO	5	6	10	-
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	75	80	84	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100-3400	2500-4400	2800-4800	3500-8800
Πυκνότητα (g/cm ³)	2,54	2,50	2,48	2,20
Θερμοκρασία τήξης (°C)	900-1200	1400-1600	1400-1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία γρήσης (°C)	550	650	650	750

Πίνακας 13 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ

E-glass (E=electrical) : Πρόκειται για τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υαλονήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία, καθώς και πολύ καλή

συμπεριφορά στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών, αλλά με μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.

C-glass (C=corrosion) : Υαλονήματα με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, αλλά και με καλλίτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E, από τις οποίες όμως είναι ακριβότερες.

S-glass (S=stiffness) : Ακριβότερο υλικό από το E-glass, αλλά με υψηλότερη δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία.



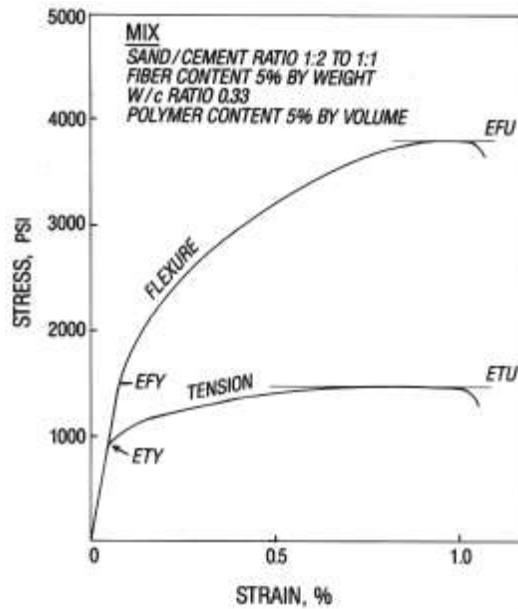
Σχήμα 20 ΥΦΑΣΜΑ ΑΠΟ ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ

Ανάλογα με την εφαρμογή του, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες γυαλιού μπορεί να διαιρεθεί σε κατασκευαστικό, αδιάβροχο, αρχιτεκτονικό και ειδικό GRC. Σύμφωνα με την εφαρμογή του λοιπόν, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες γυαλιού μπορεί να έχει μία ποικιλία από συγκεκριμένες ιδιότητες που επιτυγχάνονται με διαφορετικούς συνδυασμούς κοντών και μακριών ινών κατασκευασμένων από γυαλί και επίσης από την επιλογή της τεχνικής παραγωγής του σκυροδέματος.

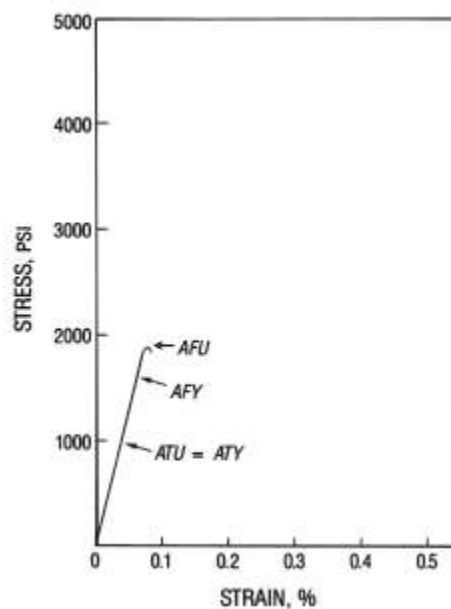
Το GRC έχει εξαιρετικά καλές ιδιότητες που διευκολύνουν την επεξεργασία του, μπορεί να διαμορφωθεί σε σχεδόν οποιοδήποτε σχήμα, έχει υψηλή αντοχή σε κάμψη, ανθεκτικότητα στις κρούσεις, ελαστικότητα, αντοχή στις ρωγμές, είναι αδιάβροχο και μπορεί να έχει μία διακοσμητικά φινιρισμένη επιφάνεια όταν αυτό είναι απαραίτητο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση περίτεχνων αρχιτεκτονικών σχεδίων γεγονός που το καθιστά εκτός συναγωνισμού σε σχέση με κάθε άλλο παρόμοιο υλικό όσον αφορά στη μορφοποίηση, στην ικανότητα αναπαραγωγής μιας γεωμετρικής επιφάνειας και στην ελαφρότητά του.

Το GRC είναι ελαφρύ, εύκολο στη χρήση, φθηνό στην εγκατάσταση και τη μεταφορά, πυρίμαχο, προσφέρει ηχομόνωση, έχει χαμηλό επίπεδο

υδατοπερατότητας και επίσης μειώνει τα φορτία που φέρει το κτίριο πράγμα το οποίο οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση χρημάτων στις υπερκατασκευές και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την ανακατασκευή και ανακαίνιση κατασκευών.



Σχήμα 21 ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ GFRC ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΚΑΙ ΚΑΜΨΗ ΜΕ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ 28 ΗΜΕΡΕΣ



Σχήμα 22 ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ GFRC ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΚΑΙ ΚΑΜΨΗ ΜΕ ΧΡΟΝΟ ΖΩΗΣ 50 ΧΡΟΝΙΑ

2.3.1 ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ GFRC

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ
ΞΗΡΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	1700 – 2250 kg / m ³
ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ	49 – 84 MPa
ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	(1 – 2.5) * 10 ⁴ MPa
ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ	7 – 11.2 MPa
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	0.6 % - 1.2 %
ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ	7 – 10.2 MPa

2.3.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ

Οι κατασκευές από GFRC μπορούν να έχουν τα ακόλουθα είδη ενίσχυσης:

- Ενίσχυση με ίνες, όταν η κατασκευή ενισχύεται μόνο με ίνες γυαλιού ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλο το σκυρόδεμα ή κομμάτι αυτού.
- Συνδυασμένη ενίσχυση, όταν ένα προϊόν ενισχύεται και με ράβδους ή σύρματα χάλυβα αλλά και με ίνες γυαλιού ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλη την ποσότητα (ή σε συγκεκριμένο τμήμα) αυτού.

2.3.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΑΟΠΛΟ ΚΑΙ ΑΠΛΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Πολλά από τα τεχνολογικά και οικονομικά πλεονεκτήματα που προσφέρει το GRC σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά είναι εκτός συναγωνισμού. Ως εκ τούτου, τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Βελτιωμένη αντίσταση έναντι ρωγμών, πυρόλυση, ολκιμότητα, αντοχή στην τριβή, αντοχή σε ψύξη - απόψυξη, σταθερότητα υλικού παρά την μεταβολή των καιρικών συνθηκών.
- Η δυνατότητα να χρησιμοποιούνται πιο αποτελεσματικές και έξυπνες κατασκευαστικές λύσεις σε σχέση με την συμβατική ενίσχυση, π.χ. η δυνατότητα να χρησιμοποιούνται λεπτού τοιχώματος στοιχεία και δομές που δεν χρειάζονται την ενίσχυση ράβδων οπλισμού σκυροδέματος, συνδετήρων ή δισδιαγώνιου οπλισμού.
- Η δυνατότητα να ελαχιστοποιηθεί ή να αποφευχθεί τελείως η χρήση ράβδων χάλυβα, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν το κόστος είναι ζωτικής σημασίας.
- Η εξοικονόμηση ενέργειας και εργατικού δυναμικού όσον αφορά την εγκατάσταση. Μεγαλύτερο βαθμό εκμηχάνισης και αυτοματοποίησης όσον αφορά την κατασκευή προϊόντων σκυροδέματος με ίνες, όπως προκατασκευασμένα λεπτότοιχα στοιχεία μόνωσης, λεπτές πλάκες με νευρώσεις για στέγες, αρμούς και δάπεδα μασίφ για δάπεδα βιομηχανικών και κοινόχρηστων κτιρίων, μόνιμες δομές ξυλότυπου κλπ.

2.3.4 ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΥ ΣΤΑ ΑΛΚΑΛΙΑ (AR), ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΓΥΑΛΙ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Από τα τέλη της δεκαετίας του '60, η χρήση ανθεκτικών στα αλκάλια γυάλινων ινών για ενίσχυση του τσιμέντου είναι ευρέως διαδεδομένη λόγω των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων των ινών αυτών. Υπήρξε ανησυχία, ωστόσο, για την πιθανή ανεπιθύμητη αντίδραση μεταξύ των ινών και της μήτρας, ακόμη κι αν οι ίνες ήταν ανθεκτικές στα αλκάλια.

Η αντοχή σε εφελκυσμό και η αντοχή σε κρούση των προϊόντων τσιμέντου, ενισχυμένων με ίνες γυαλιού, μειώνεται με την ηλικία όταν αυτά εκτίθενται στην ατμόσφαιρα. Η εξαρτώμενη από το χρόνο μείωση της καμπτικής αντοχής, η οποία σημειώθηκε αρχικά σε μίγματα ανθεκτικά στα αλκάλια και ενισχυμένα με ίνες από

γυαλί, έχει επίσης παρατηρηθεί σε μίγματα τσιμέντου με υψηλή συγκέντρωση σε θείο, στα οποία υπάρχουν μόνο μικρές ποσότητες αλκαλίων. Προϊόντα τσιμέντου ενισχυμένα με ίνες γυαλιού στα οποία μειώνεται με το χρόνο η αντοχή σε κρούση και σε εφελκυσμό, δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται σε βασικές κατασκευαστικές εφαρμογές. Ίνες από γυαλί έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για να αποφευχθούν προβλήματα ρωγμών λόγω των τάσεων συρρίκνωσης στην παραγωγή λεπτού φύλλου από σκυρόδεμα.

Οι περισσότερες άλλες ίνες που χρησιμοποιούνται είναι σχετικά σταθερές όταν ενσωματώνονται στο τσιμέντο. Μειώσεις αντοχής δεν έχουν παρατηρηθεί σε δείγματα που περιέχουν ίνες άνθρακα και Kevlar ίνες (ίνες πολυμερούς). Ο συνδυασμός τύπων ινών σε μίγματα τσιμέντου είναι μια νέα προσέγγιση με μεγάλες προσδοκίες για τη βελτίωση της μακροπρόθεσμης απόδοσης των ινοπλισμένων με γυαλί προϊόντων τσιμέντου. Μίξη ινών πολυπροπυλενίου και γυαλιού ή, εναλλακτικά, νιφάδες μαρμαρυγία χρησιμοποιούμενες σαν ίνες, μπορεί να βοηθήσει στην πρόληψη μακροπρόθεσμων μειώσεων στην αντοχή σε εφελκυσμό και σε κρούση.

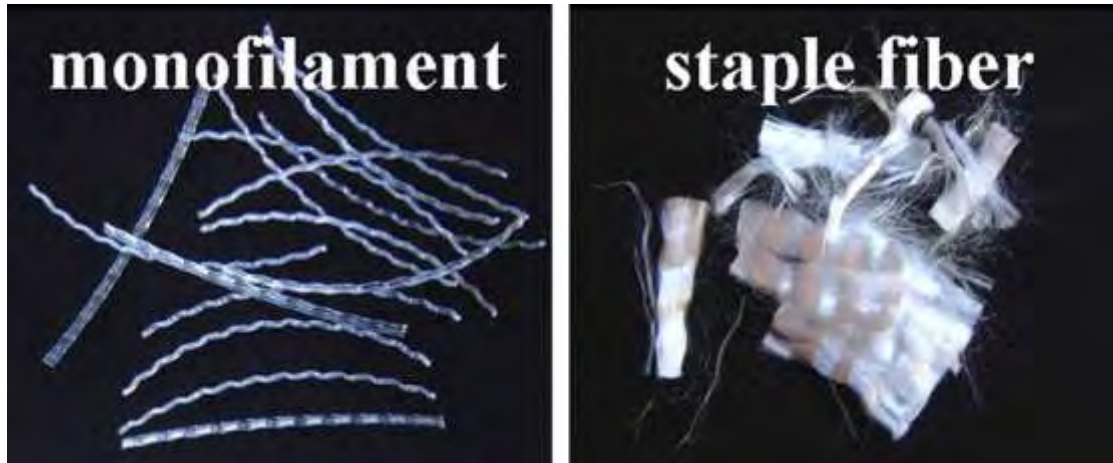
2.4 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟΥ (Polypropylene Fiber Reinforced Concrete)

Οι ίνες πολυπροπυλενίου (PF) είναι ένα δημοφιλές υλικό το οποίο χρησιμοποιείται στη βιομηχανία του σκυροδέματος και οι μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες πολυπροπυλενίου (PFRC) έχουν αποτελέσει αντικείμενο έρευνας πολλών μελετητών. Οι ίνες αυτές μπορούν να βελτιώσουν την ολκιμότητα, την θλιπτική αντοχή, τη δυσθραυστότητα, την εφελκυστική αντοχή, την αντοχή θραύσης, το μέτρο διάρρηξης και τη διάρκεια στο χρόνο του σκυροδέματος.

Επιπλέον, μειώνουν την πλαστική συστολή του σκυροδέματος, βελτιώνουν τη διαπερατότητα του υλικού και έχουν την ικανότητα να αποτονώνουν την τάση ατμών του σκυροδέματος και έτσι μειώνεται ο κίνδυνος θρυμματισμού του υλικού, ιδιαίτερα στις υψηλές θερμοκρασίες, εξαιτίας της πλήρωσης των πόρων του σκυροδέματος με λιωμένο πολυπροπυλένιο από τις ίνες ενίσχυσης του υλικού. Για τον ίδιο λόγο, σε περίπτωση πυρκαγιάς συμβάλλουν στην αποφυγή απολέπισης του σκυροδέματος . Οι ίνες πολυπροπυλενίου μπορούν να αναμιχθούν και με άλλες ίνες ώστε να βελτιστοποιηθεί η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού.

Από έρευνες που έχουν διεξαχθεί για το PFRC, έχει διαπιστωθεί ότι στο υλικό αυτό το πολυπροπυλένιο από τις ίνες γεμίζει τα κενά του κονιάματος και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται το πορώδες και να σταματά η διάδοση της μικρορηγμάτωσης με άμεση συνέπεια τη βελτίωση της εσωτερικής εφελκυστικής αντοχής και της αντοχής πρόσφυσης. Επιπροσθέτως, τα διάσπαρτα πολυμερή μέσα στο σκυρόδεμα μπορεί να συσσωματωθούν δημιουργώντας φιλμς, τα οποία δημιουργούν ένα δίκτυο με ενσωματωμένα αδρανή και περιορίζουν τη ροή ύδατος, τη γεφύρωση των μικρορωγμών, την ενίσχυση των μικροδομών και αυξάνουν την αντοχή των δεσμών του υλικού. Κάποια όμως πολυμερή, όπως το (PAM) μπορούν να τροποποιήσουν τις ιδιότητες του σκυροδέματος λόγω χημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται μέσα στο μίγμα.

Οι ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες πολυπροπυλενίου που παρουσιάζονται στη συνέχεια στηρίζονται στη βιβλιογραφία και σε διάφορες εργαστηριακές δοκιμές οι οποίες πραγματοποιήθηκαν. Τα πειράματα εξετάζουν δοκίμια κυβικά (15cm × 15cm × 15cm) σε μονοαξονική θλίψη και κυλινδρικά (50mm × 75mm) σε έμμεσο εφελκυσμό.



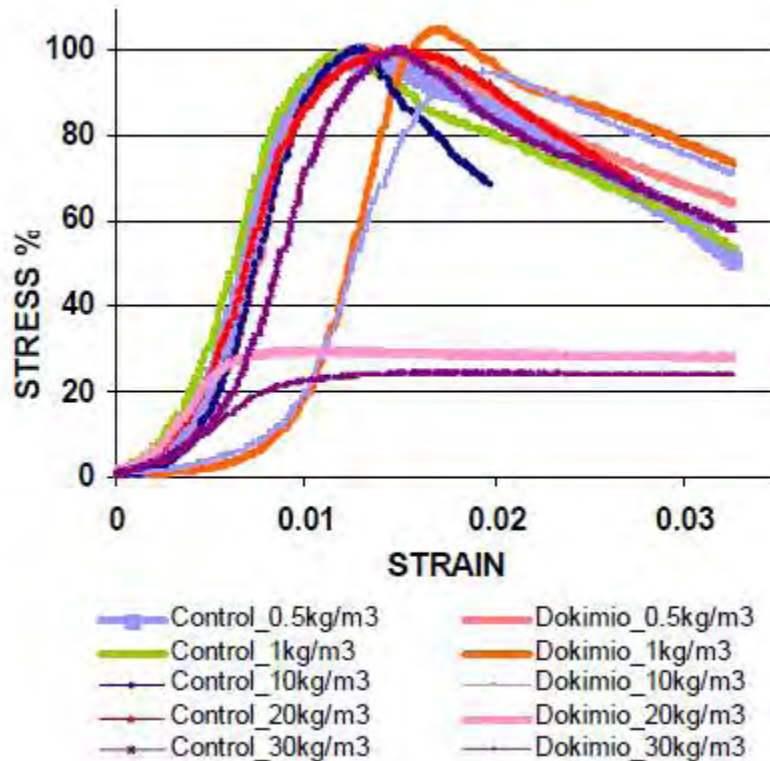
Σχήμα 23 ΙΝΕΣ ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟΥ

ΙΝΕΣ ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟΥ	
Μήκος (mm)	12 και 18
Διάμετρος (μm)	25
Επιμήκυνση θραύσης	29% ($\pm 10\%$) (EN ISO 2062)
Αντοχή σε εφελκυσμό	400 ($\pm 10\%$) N/mm ² (EN ISO 2062)
Χημική αντοχή	Εξαιρετική

Πίνακας 14 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΝΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΕΣ

2.4.1 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

Πείραμα μονοαξονικής θλίψης :



Σχήμα 24 ΑΝΗΓΜΕΝΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ ΑΟΠΛΑ ΚΑΙ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟΥ ΔΟΚΙΜΙΑ

Παρατηρήσεις :

- Η αντοχή του δοκιμίου μειώνεται σημαντικά μετά την αύξηση της ποσότητας πάνω από 1kg/m^3 . Ειδικά σε ποσότητες μεγαλύτερες του 20kg/m^3 η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη εμφανίζει έως και 75% απομείωση.
- Οι καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης εμφανίζουν μεγάλη μη γραμμική συμπεριφορά μέχρι παραμόρφωση 1% για την περίπτωση μικρών ποσοτήτων ινών $<1\text{ kg/m}^3$ ενώ στην συνέχεια εμφανίζουν μέτρα ελαστικότητας πα-ρόμοια με τα άοπλα δοκίμια.
- Η παρουσία μικρής ποσότητας ινών πολυπροπυλενίου δεν μεταβάλλει την μετελαστική συμπεριφορά των δοκιμίων. Η συμπεριφορά χαλάρωσης που

εμφανίζουν τα άοπλα δείγμα-τα δεν μεταβάλλεται μετά την μέγιστη αντοχή για τα δείγματα με ίνες πολυπροπυλενίου.

- Στις περιπτώσεις μεγάλης ποσότητας ινών πολυπροπυλενίου (>20 και 30kg/m^3) το ινοπλισμένο δοκίμιο εμφανίζει μια πλήρως ελαστοπλαστική συμπεριφορά με τιμές αντοχής μικρότερες από 50% της συμβατικής τιμής.

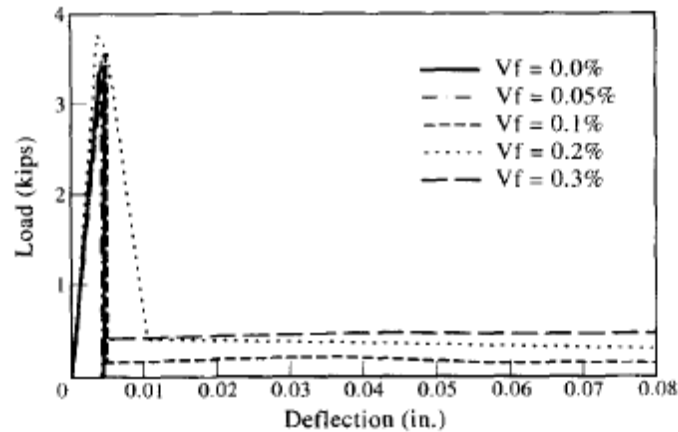
Τα δοκίμια, τα οποία δοκιμάστηκαν σε μονοαξονική θλίψη, αστόχησαν με δύο διαφορετικούς τρόπους: (α) με εμφανή πλευρική διόγκωση και (β) με πλευρική απολέπιση. Στο σχήμα 25 δίνονται φωτογραφικά οι τρόποι αστοχίας. Μια εξήγηση του σχετικά με τον τρόπο αστοχίας βασίζεται στην τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ πλακών φόρτισης και δοκιμίου.



Σχήμα 25 ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ: ΠΡΩΤΗ ΣΕΙΡΑ: ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΑΠΟΛΕΠΙΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ. ΔΕΥΤΕΡΗ ΣΕΙΡΑ: ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΔΙΟΓΚΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

2.4.2 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

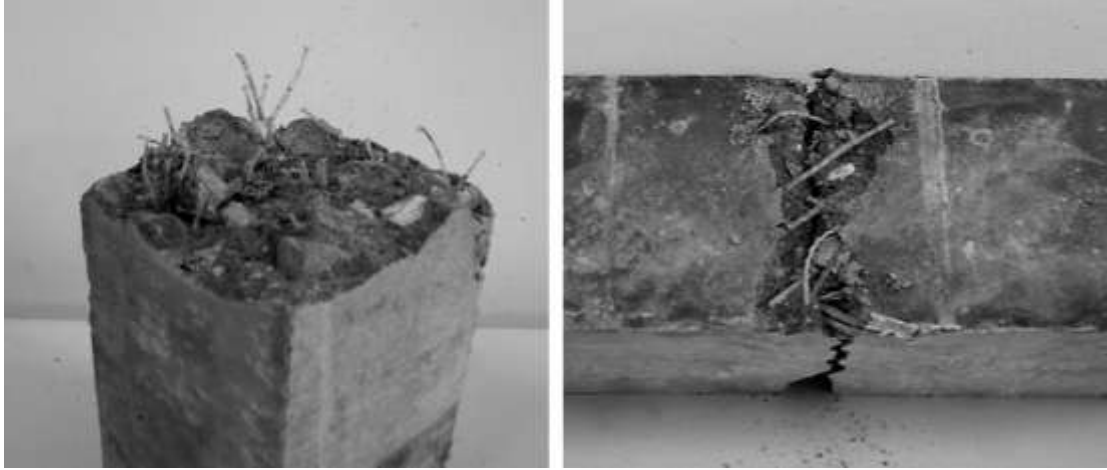
Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού :



Σχήμα 26 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΓΙΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΟ ΜΕ ΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ

Γενικά συμπεράσματα τα οποία αφορούν στο σύνθετο αυτό σκυρόδεμα είναι τα εξής :

- Όπως και στις άλλες περιπτώσεις ινοπλισμένου, έτσι κι εδώ δε βελτιώνεται σημαντικά η αντοχή του υλικού ούτε σε θλίψη ούτε σε εφελκυσμο.
- Η αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες προπυλενίου αυξάνει την ολκιμότητα του υλικού, με βέλτιστη περιεκτικότητα το $0.9 \text{ kg} / \text{m}^3$.
- Σημαντική μείωση της μονοαξονικής αντοχής με την χρήση μεγάλου ποσού ινών πολυπροπυλενίου. Εν γένει δεν παρατηρείτε κάποια βελτίωση του υλικού εξαιτίας της χρήσης μικρής ποσότητας ινών πολυπροπυλενίου.
- Όσο πιο μεγάλη η περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε ίνες προπυλενίου, τόσο πιο μεγάλος είναι ο δείκτης δυσθραυστότητας του υλικού.



Σχήμα 27 ΕΙΚΟΝΑ ΘΡΑΥΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΑΠΟ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟΥ – ΕΠΕΙΔΗ ΟΙ ΙΝΕΣ ΕΧΟΥΝ ΥΨΗΛΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΕΧΟΥΝ ΒΓΕΙ ΕΞΩ ΑΠΟ ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ – ΟΜΟΙΑ ΕΙΚΟΝΑ ΚΑΙ ΓΙΑ ΙΝΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΧΑΛΥΒΑ

Κεφάλαιο 3 :

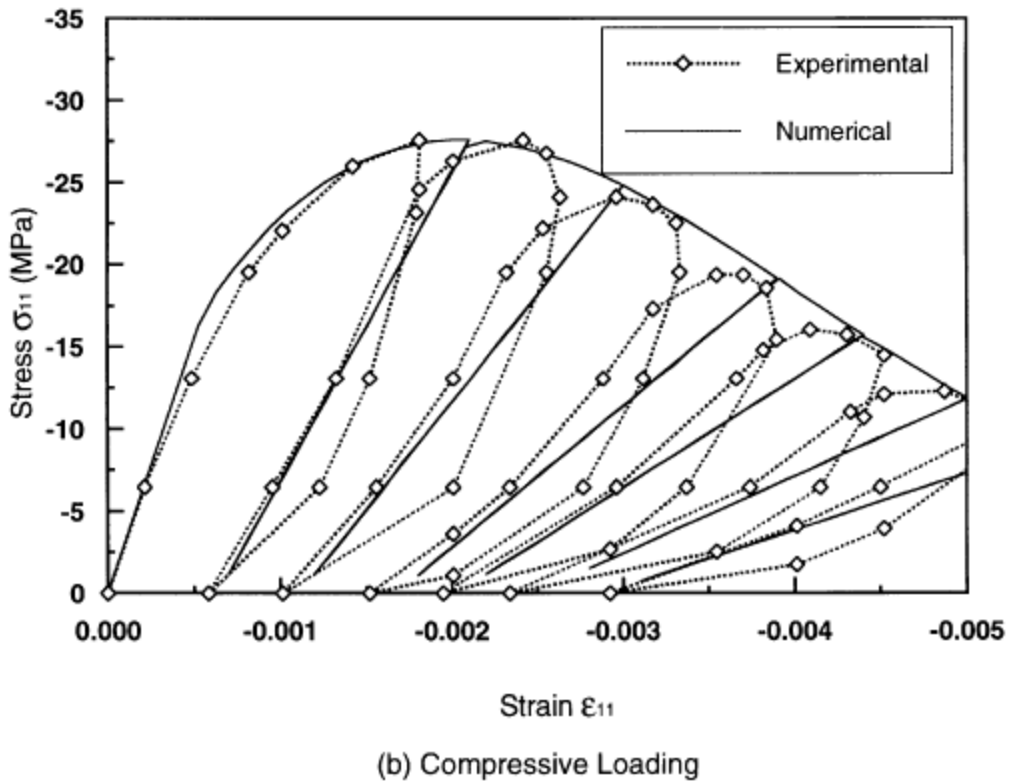
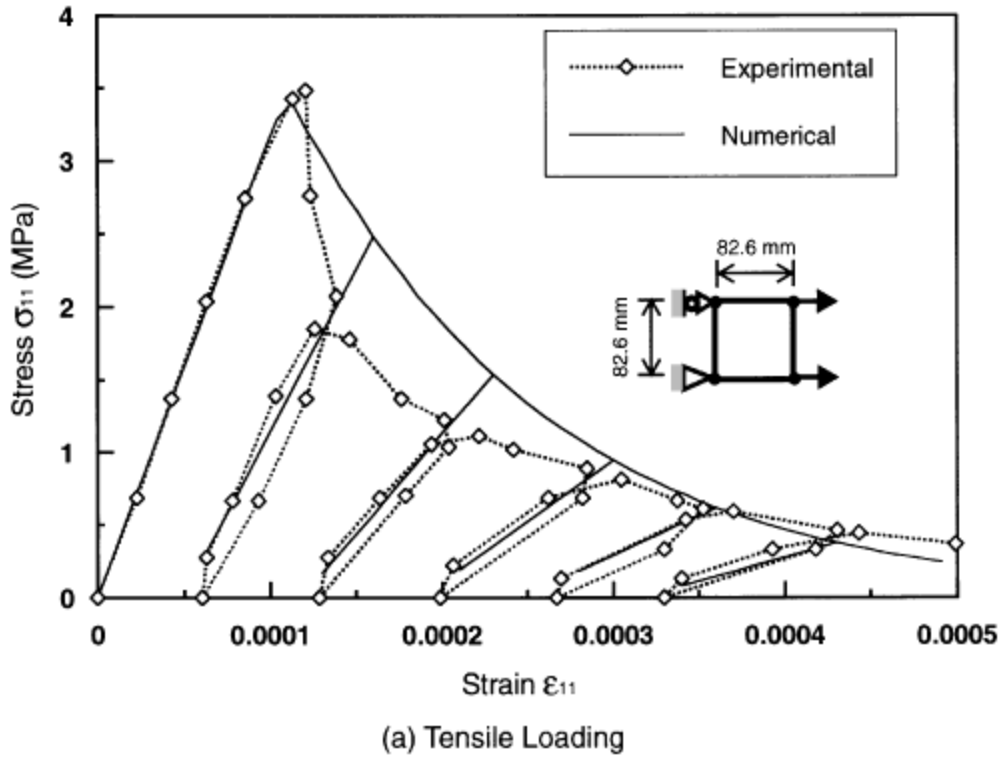
ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΟΥ ΙΝΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ

1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Για την προσομοίωση του ινοπλισμένου σκυροδέματος της ανάντη πλάκας του φράγματος λιθορριπής, χρησιμοποιήθηκε το ελαστο - πλαστικό καταστατικό μοντέλο που προτάθηκε από τους Lee και Fenves (1998) και είναι κατάλληλο για ανακυκλική φόρτιση σκυροδέματος και την ανάλυση φραγμάτων με πλάκα σκυροδέματος. Το μοντέλο αυτό αφορά στο απλό σκυρόδεμα και αποτελεί επέκταση του πλαστικού μοντέλου των Lubliner et al (το οποίο αποκαλείται μοντέλο Barcelona) και περιλαμβάνει δύο μεταβλητές βλάβης του σκυροδέματος, μία σε εφελκυσμό και μία σε θλίψη.

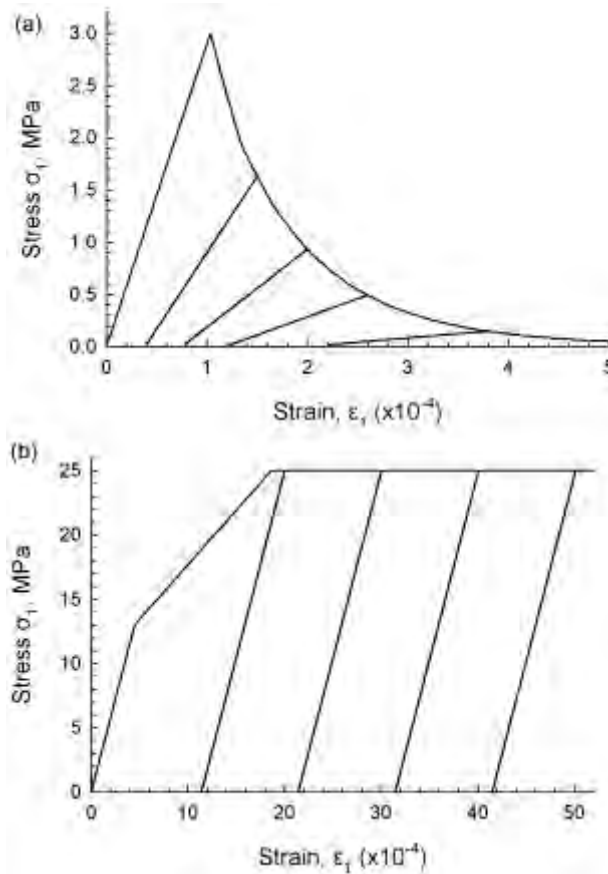
Το μοντέλο των Lee και Fenves αποτελεί ένα απλό μοντέλο το οποίο προσομοιώνει την επίδραση της ζημίας του σκυροδέματος στην αντοχή και στην ελαστική ακαμψία του υλικού. Με άλλα λόγια, ανάλογα με το βαθμό της βλάβης στο σκυρόδεμα, δείχνει πώς γίνεται η απομείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας του σκυροδέματος, αλλά και πώς γίνεται η ανάκτηση της δυσκαμψίας του μετά το κλείσιμο των ρωγμών, σε θλίψη και εφελκυσμό.

Συγκρίσεις με πειραματικά δεδομένα δοκιμών σκυροδέματος σε ανακυκλική φόρτιση (βλέπε Σχήμα 1 παρακάτω) δείχνουν μία αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ προσομοιώματος και πειραματικών μετρήσεων, όπως παρουσιάζεται από τους Lee & Fenves. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι σχέσεις τάσης - παραμόρφωσης σε εφελκυσμό και θλίψη αντίστοιχα. Οι καμπύλες αυτές αφορούν σε υλικό με αντοχή σε θλίψη $f_c = -27.6 \text{ MPa}$, αντοχή σε εφελκυσμό $f_t = 3.48 \text{ MPa}$, λόγο Poisson $\nu = 0.2$, μέτρο ελαστικότητας $E_t = 31.7 \text{ GPa}$ και $E_c = 31 \text{ GPa}$ (Lee & Fenves 1998) .



Σχήμα 1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΚΥΚΛΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Αντίστοιχες καμπύλες προσομοίωσης της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης σε ανακυκλική φόρτιση δοκιμής εφελκυσμού και θλίψης δίδονται στο Σχήμα 2. Στις παρούσες δοκιμές η αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη λαμβάνεται 25 MPa, η αντοχή σε εφελκυσμό 3 MPa, το μέτρο Young $E = 29 \text{ GPa}$, ο λόγος Poisson $\nu = 0.2$ και η πυκνότητα $\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$ (Dakoulas 2009).



Σχήμα 2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (a) ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ (b) ΘΛΙΨΗ

2 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω αφορούν στο απλό σκυρόδεμα. Το πρόβλημα που εξετάζεται στην παρούσα εργασία χρησιμοποιεί ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα σκυρόδεμα. Η σύνδεση των χαρακτηριστικών του απλού σκυροδέματος με αυτά του ινοπλισμένου σκυροδέματος γίνεται με τις εξισώσεις που εξέτασε ο M.C. Nataraja (1999), οι οποίες χρησιμοποιώντας αντοχή σε θλίψη και την αντίστοιχη παραμόρφωση του απλού σκυροδέματος καταλήγουν στις αντίστοιχες ιδιότητες του ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος και στις καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για το υλικό αυτό.

Από τις εξισώσεις αυτές, διαμορφώνονται οι καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για την κάθε επιμέρους αντοχή SFRC που εξετάζεται σε θλίψη και εφελκυσμό. Η αντοχή σε εφελκυσμό υπολογίζεται ίση με το 1 / 10 της αντίστοιχης σε θλίψη. Εν συνεχεία, τα δεδομένα του καταστατικού αυτού προσομοιώματος εισάγονται στο πρόγραμμα Abaqus και εξετάζεται η συμπεριφορά ενός κυβικού δοκιμίου από SFRC σε θλίψη και εφελκυσμό ώστε τελικά να προκύψουν αποτελέσματα, με κατάλληλη προσομοίωση, για το φράγμα λιθορριπής με ανάντη πλάκα SFRC το οποίο είναι και ο σκοπός της παρούσας μελέτης.

Σύμφωνα με τον Nataraja (1999), για σκυρόδεμα με θλιπτική αντοχή έως 50 MPa ισχύουν οι σχέσεις :

- Θλιπτική Αντοχή

$$f'_{cf} = f_c + 2.1604(RI) \quad (1)$$

Όπου :

- f_c : η θλιπτική αντοχή του απλού σκυροδέματος σε MPa
- f'_{cf} : η θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος (SFRC) σε MPa
- RI : ο δείκτης όπλισης ($RI = W_f L_f / D_f$, W_f : το βάρος των ινών από χάλυβα)

- Παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση

$$\epsilon_{of} = \epsilon_o + 0.0006RI \quad (2)$$

Όπου :

- ε_o : η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση για το απλό σκυρόδεμα
- ε_{of} : η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση για το SFRC

- Λόγος δυσθραυστότητας

$$TR_{cf} = TR_c + 0.0978RI \quad (3)$$

Όπου :

- TR_c : η δυσθραυστότητα για το απλό σκυρόδεμα
- TR_{cf} : η δυσθραυστότητας για το SFRC

Κάποιες άλλες εξισώσεις οι οποίες δίνουν την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του SFRC, είναι :

$$\frac{f_c}{f'_{cf}} = \frac{\beta \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{of}} \right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{of}} \right)^\beta} \quad (4)$$

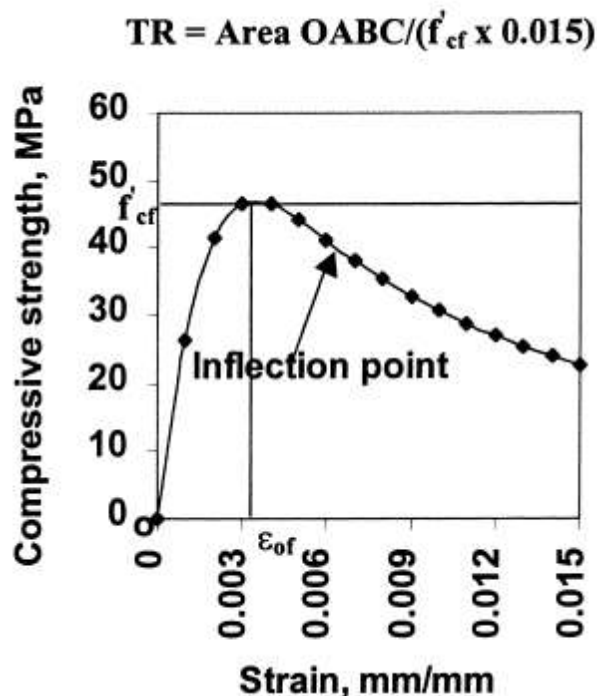
Όπου :

- f'_{cf} : η θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος
- ε_{of} : η αντίστοιχη μέγιστη παραμόρφωση
- f_c, ε_c : η τάση και η αντίστοιχη παραμόρφωση του απλού σκυροδέματος
- β : παράμετρος του υλικού η οποία εξαρτάται από τη μορφή του διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης

Από την (4), για να προκύψει η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης για ινοπλισμένο σκυρόδεμα δεδομένης θλιπτικής αντοχής, f'_{cf} , χρειάζονται μόνο οι τιμές των παραμέτρων ε_{of} και β .

Συνήθως στην πραγματικότητα, στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, η περιεκτικότητα σε ίνες, το μήκος και η διάμετρος των ινών είναι γνωστά με αποτέλεσμα να μπορεί να υπολογιστεί ο δείκτης όπλισης RI. Επιπλέον, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα που ακολουθούν και αφορούν στη θλίψη, οι ίνες στο σκυρόδεμα έχουν μεγαλύτερη επίδραση στον φθίνοντα κλάδο της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης. Για τον

υπολογισμό της παραμέτρου β , έχουν βρεθεί σχέσεις οι οποίες συνδέουν το β με το δείκτη όπλισης και την κλίση E_i στο σημείο καμπής του φθίνοντα κλάδου.



Σχήμα 3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑΣ

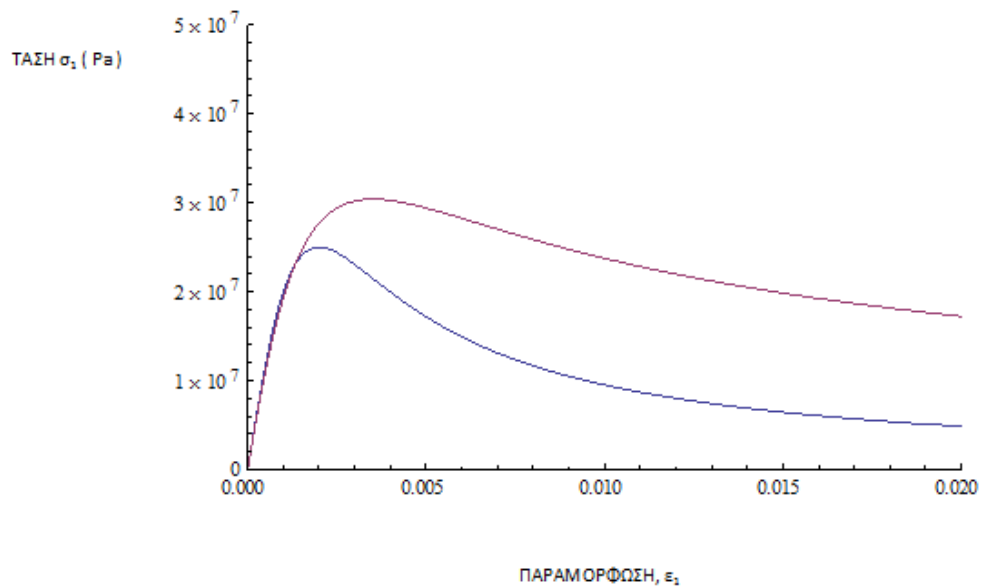
Για πτυχωτές ίνες και RI έως 3, οι σχέσεις που συνδέουν τις δύο αυτές παραμέτρους είναι :

$$\beta = 0.5811 + 1.93RI^{(-0,7406)} \quad (5)$$

Χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω σχέσεις προσαρμοσμένες στο μοντέλο Lee & Fernves ώστε να προκύψουν καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης σε εφελκυσμό και θλίψη για σκυρόδεμα απλό αντοχής 25 MPa , 37 MPa , 45 MPa καθώς και ενισχυμένο με ίνες χάλυβα με δείκτη IR = 2.5 (για τις τρεις αντοχές απλού σκυροδέματος). Τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται στη συνέχεια.

3 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

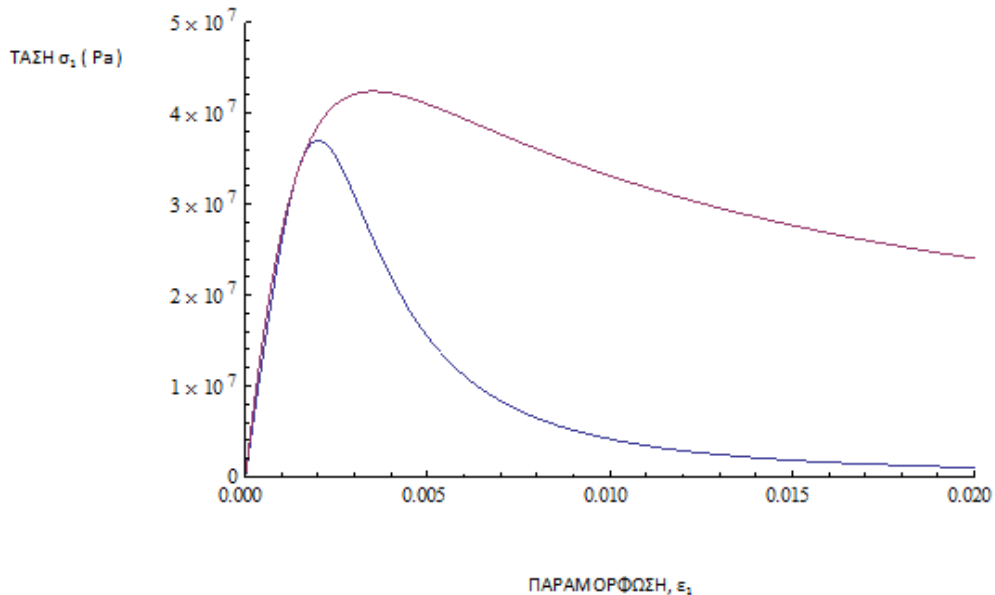
Α. ΑΠΛΟ ΚΑΙ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΜΕ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ 25 ΜΡα



Σχήμα 4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΧΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΑΠΛΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ C25 ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ 25 ΜΡα ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ Κ.Ή. ΣΕ ΙΝΕΣ $V_f = 2.5\%$

Στο Σχήμα 4 συγκρίνεται η σχέση τάσης – παραμόρφωσης του απλού σκυροδέματος και του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε θλίψη. Η μέγιστη θλιπτική αντοχή του απλού σκυροδέματος είναι 25 ΜΡα και του ινοπλισμένου περίπου 31 ΜΡα .

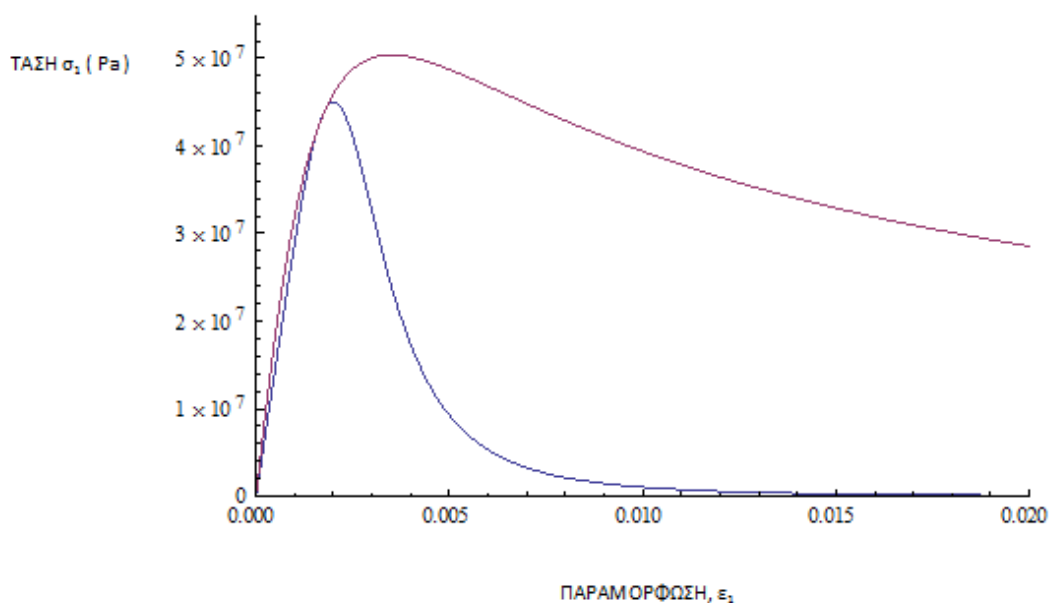
B. ΑΠΛΟ ΚΑΙ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΜΕ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ 37 ΜΡα



Σχήμα 5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΧΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΑΠΛΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ C37 ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ 37 ΜΡα ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ Κ.Ή. ΣΕ ΙΝΕΣ $V_f = 2.5\%$

Παρομοίως, τα Σχήματα 5 και 6 συγκρίνουν τη σχέση τάσης – παραμόρφωσης απλού και ινοπλισμένου σκυροδέματος σε θλίψη με αντοχές απλού ίσες προς 37 ΜΡα και 45 ΜΡα αντίστοιχα. Οι μέγιστες τιμές του ινοπλισμένου σκυροδέματος στα δύο σχήματα είναι περίπου 42 ΜΡα και 51 ΜΡα αντίστοιχα.

C. ΑΠΛΟ ΚΑΙ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΜΕ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ 45 MPa

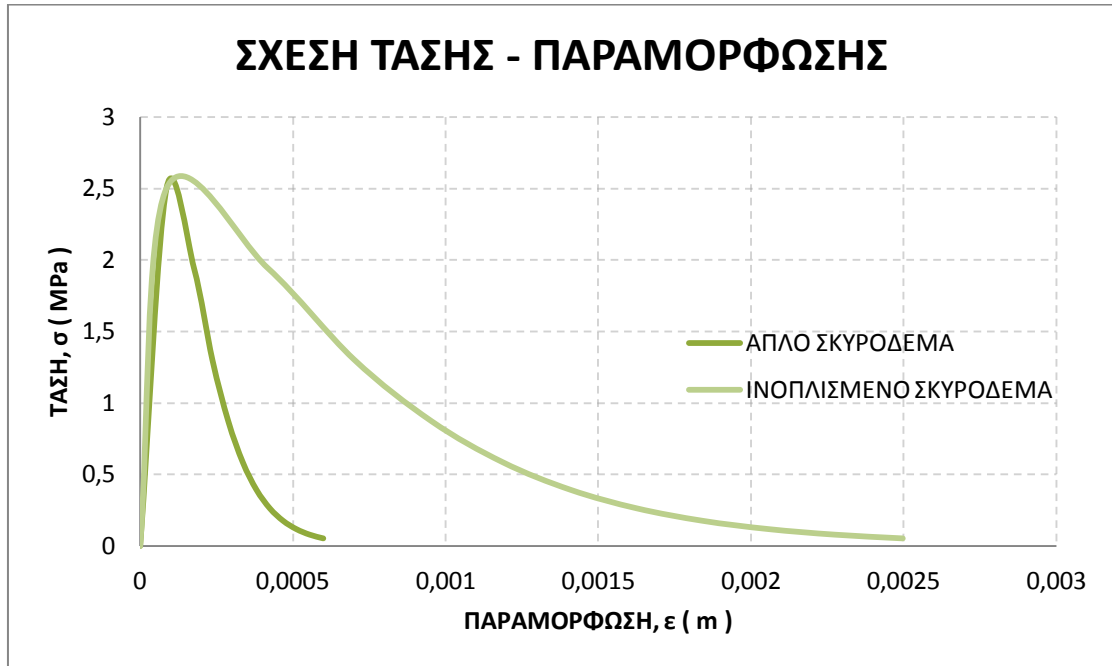


Σχήμα 6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΧΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΑΠΛΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ C45 ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ 45 MPa ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ Κ.Ή. ΣΕ ΙΝΕΣ $V_f = 2.5\%$

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι φανερό ότι η συμβολή των ινών σε θλίψη είναι σημαντική όχι τόσο επειδή αυξάνει την τιμή της αντοχής, καθώς η αύξηση αυτή δεν είναι τόσο μεγάλη, αλλά κυρίως επειδή προσδίδει περισσότερη πλαστιμότητα στο υλικό και καλύτερη συμπεριφορά μετά το όριο της αντοχής του. Μάλιστα, η διαφορά, ως προς τη συμπεριφορά, με το απλό σκυρόδεμα οξύνεται όσο μεγαλώνει η αντοχή του υλικού. Παρατηρείται ότι στην καμπύλη C45 – SFRC45, η ενέργεια που απορροφάται από το ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα σκυρόδεμα είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να αποσβέσει το απλό σκυρόδεμα.

4 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

A. ΑΠΛΟ ΚΑΙ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΜΕ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ 25 MPa

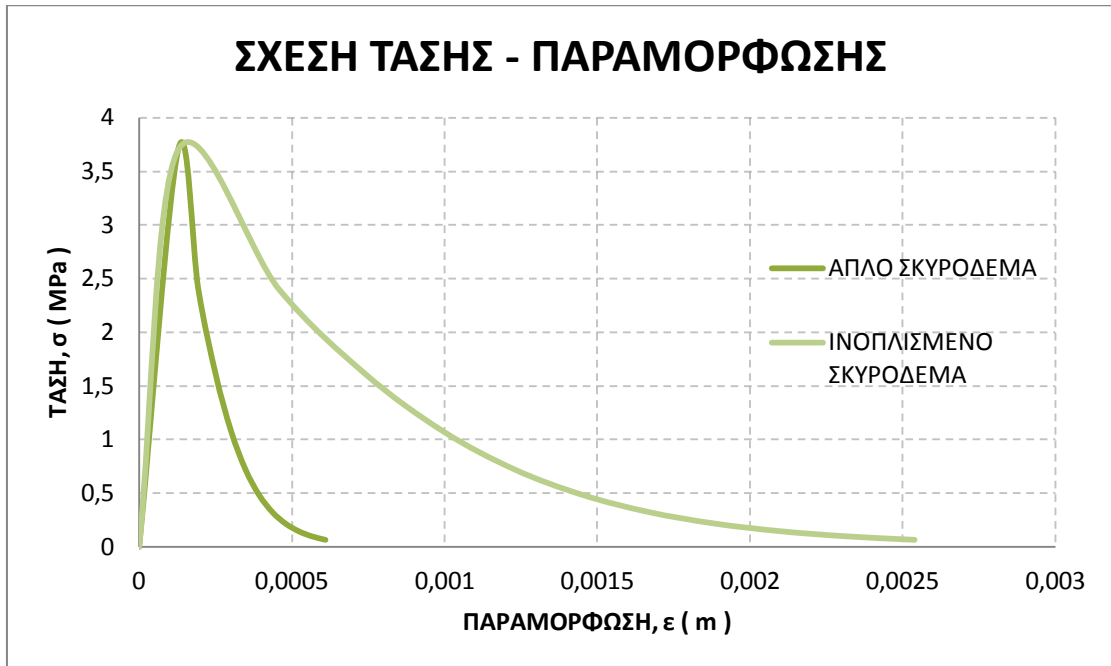


Σχήμα 7 ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΑΠΛΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ C25 ΚΑΙ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ Κ.΄Ο. ΣΕ ΙΝΕΣ $V_f = 2.5 \%$

Το Σχήμα 7 παρουσιάζει τη σχέση τάσης – παραμόρφωσης σε εφελκυσμό για το απλό σκυρόδεμα με αντοχή σε θλίψη 25 MPa σε σύγκριση με το σκυρόδεμα αντοχής σε θλίψη 25 MPa, ενισχυμένο με ίνες χάλυβα, περιεκτικότητας σε ίνες $V_f = 2.5 \%$. Παρατηρείται ότι το απλό σκυρόδεμα εμφανίζει πολύ μικρότερο εύρος παραμορφώσεων σε σχέση με το ινοπλισμένο σκυρόδεμα της ίδιας αντοχής σε θλίψη, για τις ίδιες τιμές τάσεων. Συγκεκριμένα, η τελική παραμόρφωση η οποία αντιστοιχεί σε σχεδόν μηδενική τάση και ανήκει στον κλάδο αποτόνωσης του υλικού είναι περίπου πέντε φορές μεγαλύτερη από αυτή που εμφανίζει το απλό σκυρόδεμα για την ίδια τιμή τάσης. Αυτή η συμπεριφορά του υλικού υποδηλώνει ότι το ενισχυμένο με ίνες χάλυβα σκυρόδεμα εμφανίζει σημαντικά μεγαλύτερη πλαστιμότητα αφού ξεπεραστεί η οριακή τιμή της αντοχής του.

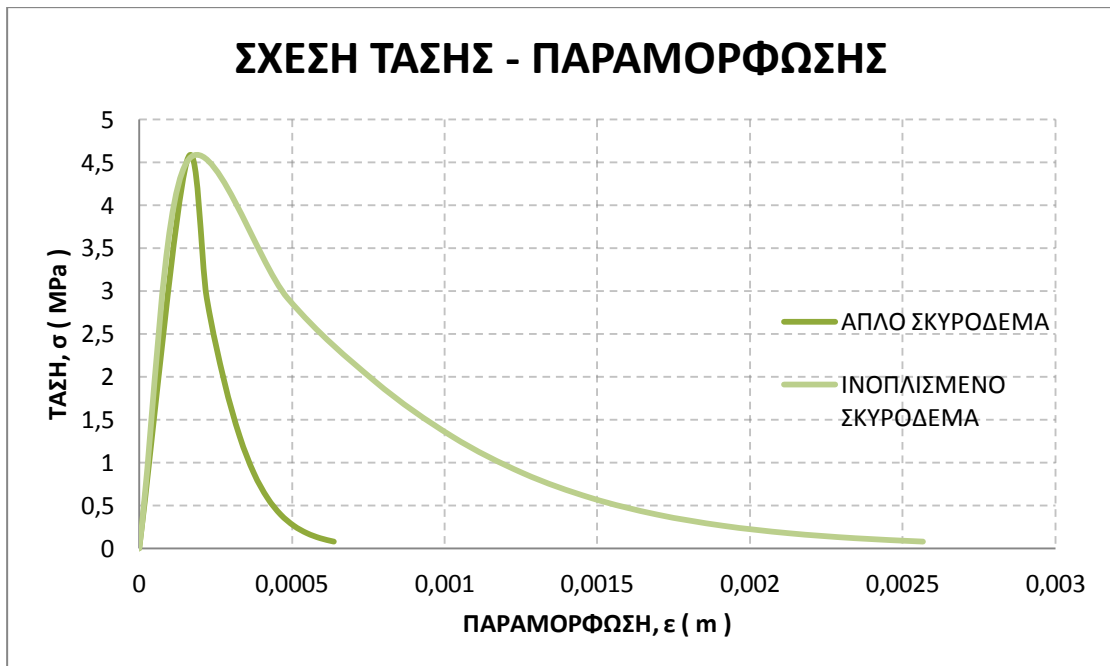
Όμοιες σχέσεις τάσης - παραμόρφωσης σε εφελκυσμό εμφανίζουν και τα άλλα δύο, διαφορετικής αντοχής, ινοσκυροδέματα που εξετάστηκαν, των οποίων η συμπεριφορά φαίνεται στα Σχήματα 8 και 9.

B. ΑΠΛΟ ΚΑΙ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΜΕ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ 37 ΜΡα



Σχήμα 8 ΣΧΕΣΗ ΚΑΜΛΥΛΗΣ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΑΠΛΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ C37 ΚΑΙ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ Κ.΄Ο. ΣΕ ΙΝΕΣ $V_f = 2.5 \%$

C. ΑΠΛΟ ΚΑΙ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΜΕ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ 45 ΜΡα

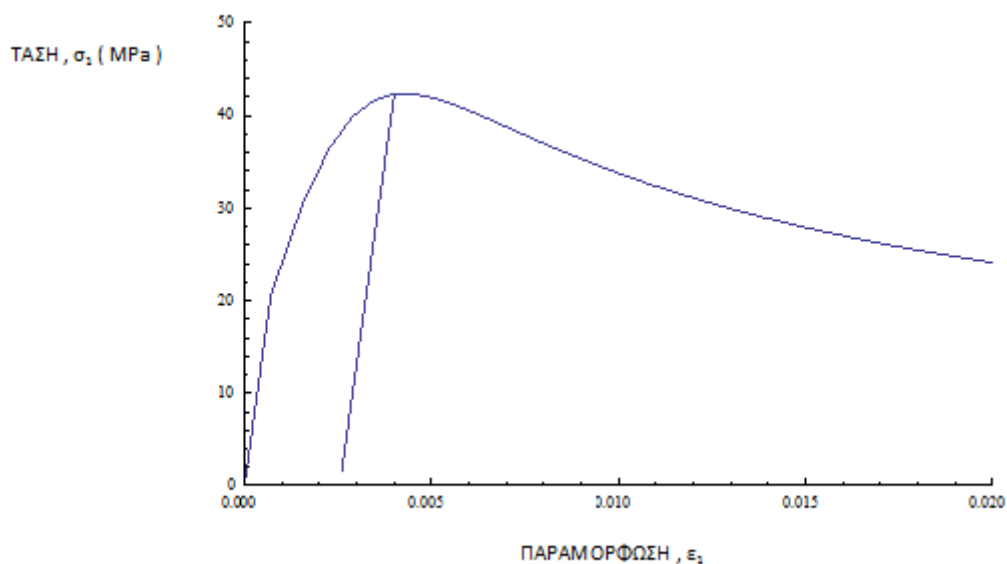


Σχήμα 9 ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΑΠΛΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ C45 ΚΑΙ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ Κ.΄Ο. ΣΕ ΙΝΕΣ $V_f = 2.5 \%$

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Οι παραπάνω σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση του καταστατικού προσομοιώματος των Lee και Fenves (1998) στο Abaqus και εν συνεχεία γίνονται προσομοιώσεις τριαξονικής δοκιμής σε κυβικά δοκίμια σε θλίψη και εφελκυσμό. Τέλος, εξετάζεται η συμπεριφορά της ανάντη πλάκας σκυροδέματος ενός φράγματος λιθορριπής.

▪ ΘΛΙΨΗ

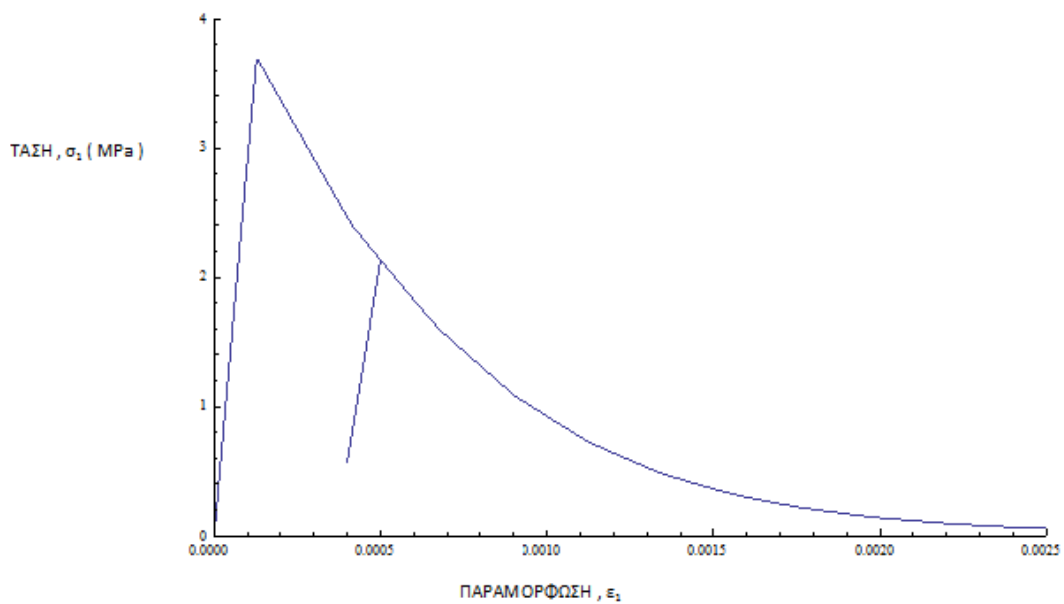


Σχήμα 10 ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος όπως προέκυψε από την τριαξονική δοκιμή κυβικού δοκιμίου σε θλίψη. Παρατηρείται ότι η σχέση τάσης – παραμόρφωσης (ανηγμένης) είναι ίδια με αυτή για το άοπλο σκυρόδεμα, όπως περιγράφεται παραπάνω από τους Lee & Fenves και Dakoulas (2009). Με άλλα λόγια, το θεωρητικό καταστατικό μοντέλο προσομοίωσης το οποίο εισάγεται στο υπολογιστικό πρόγραμμα, προσαρμοσμένο στις ανάγκες του προβλήματος ινοπλισμένου σκυροδέματος, συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα τα οποία λαμβάνονται από την τριαξονική δοκιμή.

Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν και από την τριαξονική δοκιμή κυβικού δοκιμίου σε εφελκυσμό. Και στην περίπτωση αυτή είναι ίδια η σχέση τάσης – παραμόρφωσης για τα διαφορετικής σύνθεσης σκυροδέματα (απλό και ινοπλισμένο). Η συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα φαίνεται στο Σχήμα 11 .

■ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ



Σχήμα 11 ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΗΣ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Κεφάλαιο 4 :

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ ΑΠΟ SFRC

1 ΓΕΝΙΚΑ

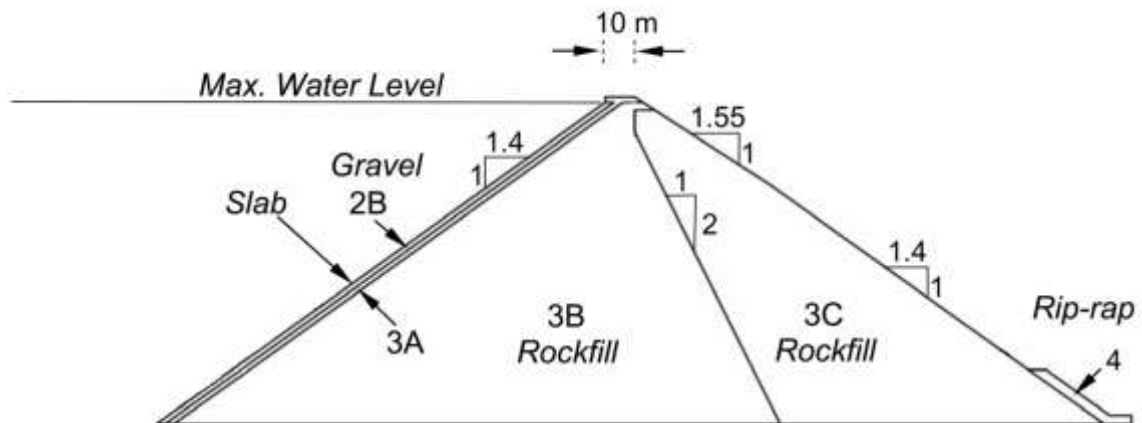
Το φράγμα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος το οποίο εξετάζεται δεν έχει κατασκευαστεί, καθώς η χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος για την κατασκευή της πλάκας αποτελεί μία καινοτόμα ιδέα η οποία δεν έχει υλοποιηθεί και αποτελεί το αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας. Χρησιμοποιείται η γεωμετρία και οι ιδιότητες της λιθορριπής του φράγματος Μεσοχώρας με ύψος 150 m στη μέγιστη διατομή και μήκος στέψης 330 m. Η όψη της ανάντη πλάκας φαίνεται στο Σχήμα 1, το οποίο είναι φωτογραφία από το φράγμα της Μεσοχώρας. Το φράγμα της Μεσοχώρας βρίσκεται σε μία στενή κοιλάδα του ποταμού Αχελώου στην βόρειο-δυτική Ελλάδα.



Σχήμα 1 ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΜΕΣΟΧΩΡΑΣ

Η γεωμετρία της μέγιστης διατομής και οι ζώνες των υλικών δίδονται στο Σχ. 2. Η ανάντη κλίση είναι 1:1.4, ενώ η κατόντη 1:1.4 στα κάτω 110 m και 1:1.55 στα άνω 40 m. Οι ζώνες 3B και 3C αποτελούνται από λιθορριπή λατομείου ή αναγκαστικές εκσκαφές, χρησιμοποιώντας υγιή ή ελαφρά αποσαθρωμένο ασβεστόλιθο. Το υλικό έχει συμπυκνωθεί με 4 διελεύσεις δονητικού συμπυκνωτή 12 τόνων,

χρησιμοποιώντας στρώσεις πάχους 1 m στη ζώνη 3B και 1.5 m στη ζώνη 3C. Επομένως η ζώνη 3B είναι σχετικά πιο δύσκαμπτη από την ζώνη 2C. Η μέση τιμή του λόγου κενών είναι 0.38. Η πλάκα ινοπλισμένου σκυροδέματος θεωρείται ότι έχει τοποθετηθεί πάνω σε μία στρώση καλά διαβαθμισμένου χαλικιού πάχους 4 m (ζώνη 2B). Λόγω της κοκκομετρικής διαβάθμισης και καλύτερης συμπύκνωσης, η ζώνη 2B είναι αρκετά πιο δύσκαμπτη από την ζώνη 3B.



Σχήμα 2 ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΚΑΙ ΖΩΝΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε, η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό να μελετήσει την συμπεριφορά της πλάκας από ινοπλισμένο με χάλυβα σκυρόδεμα και την επίδραση διαφόρων παραγόντων στην εντατική κατάσταση και πιθανή ρηγμάτωση της πλάκας. Μελέτες της συμπεριφοράς φραγμάτων λιθορριπής έχουν αναδείξει ότι πολλά φράγματα ανέπτυξαν μικρές ή μεγάλες ρωγμές στην πλάκα σκυροδέματος. Μερικές από τις πιο συχνές αιτίες είναι:

- συνολικά μικρή δυσκαμψία της λιθορριπής στην ανάντη και κατόντη ζώνη
- σημαντικά μικρότερη δυσκαμψία της κατόντη ζώνης σχετικά με εκείνη της ανάντη ζώνης με αποτέλεσμα σημαντικές βυθίσεις της πλάκας κοντά στην στέψη
- παρουσία τοπικά απότομων κλίσεων της πλίνθου και ανώμαλη επιφάνεια του βράχου στα αντερείσματα, που δημιουργούν συγκέντρωση τάσεων στην πλάκα
- ταυτόχρονη κατασκευή και μερική πλήρωση της λεκάνης που επιβάλλει σημαντικές καθιζήσεις στην πλάκα.

Για την διερεύνηση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων στην συμπεριφορά της πλάκας ινοσκυροδέματος με ίνες χάλυβα, έγινε μία παραμετρική ανάλυση με λεπτομερή μη-γραμμική προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής και εν συνεχεία πλήρωσης της λεκάνης. Η αριθμητική ανάλυση έγινε με 3Δ στοιχεία, όμως το προσομοίωμα εξετάστηκε ως 2Δ ως προς το πραγματικό πρόβλημα (το προσομοίωμα θεωρεί ότι το φράγμα είναι απειρόμηκες) .

2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΔΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η αριθμητική προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής και πλήρωσης της λεκάνης πραγματοποιείται στα εξής 4 στάδια:

- *Στάδιο 1:* Το επίχωμα κατασκευάζεται σταδιακά με 20 στρώσεις.
- *Στάδιο 2:* Κατασκευάζεται η πλάκα ινοσκυροδέματος στην ανάντη πλευρά.
- *Στάδιο 3:* Η στάθμη του νερού ανέρχεται σε υψόμετρο 148 m.
- *Στάδιο 4:* Επιβάλλεται (δυναμική) καθίζηση στη στέψη του φράγματος της τάξεως του 1 m.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΖΩΝΗ 3B	ΖΩΝΗ 3C	ΖΩΝΗ 2B
Πυκνότητα ρ (kg / m ³)	2150	2150	2150
K	720	540	1440
K _{ur}	1800	1350	1800
K _b	180	135	360
n	0.45	0.45	0.45
m	0.22	0.22	0.22
R _f	0.59	0.59	0.59
ϕ_0	51°	51°	51°
$\Delta\phi$	9°	9°	9°

Συντελεστής τριβής συροδέματος – χαλίκων , $\mu = 0.7$

Πίνακας 1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΤΙΜΕΣ
Πυκνότητα ρ , (kg / m ³)	2350
Μέτρο ελαστικότητας Young, E , (GPa)	20
Λόγος Poisson, ν	0.2
Συντελεστής τριβής σκυροδέματος-σκυροδέματος, μ_c	0.5

Πίνακας 2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.1 ΥΛΙΚΑ

Για την ρεαλιστική πρόβλεψη της συμπεριφοράς της λιθορριπής και των χαλίκων χρησιμοποιείται το καταστατικό προσομοίωμα Duncan et al. (1970). Το προσομοίωμα θεωρεί μία υπερβολική σχέση τάσης-παραμόρφωσης, στην οποία το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας Young δίδεται από την σχέση

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \phi)}{2\sigma_3 \sin \phi + 2c \cos \phi} \right]^2 \quad (1)$$

όπου σ_1, σ_3 = κύριες τάσεις, K , R_f , n = σταθερές του υλικού, ϕ = γωνία διατμητικής αντοχής, c = συνοχή, και p_a = ατμοσφαιρική πίεση. Η γωνία διατμητικής αντοχής εξαρτάται από την περιβάλλουσα τάση ως εξής

$$\phi = \phi_o - \Delta\phi \log \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right) \quad (2)$$

όπου ϕ_o και $\Delta\phi$ = σταθερές του υλικού. Το μέτρο Young κατά την αποφόρτιση δίδεται από την σχέση

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (3)$$

όπου K_{ur} = σταθερά η οποία λαμβάνει τιμές μεταξύ $1.2K \leq K_{ur} \leq 3K$. Επίσης το μέτρο διόγκωσης δίδεται από την σχέση

$$B = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \quad (4)$$

όπου K_b, m = σταθερές. Τα όρια της τιμής του B καθορίζονται από την σχέση $B = E_t / 3(1 - 2\nu)$, όπου ν είναι ο λόγος Poisson. Η μέγιστη τιμή είναι $B_{max} = 17E_t$ ($\nu = 0.49$), ενώ η ελάχιστη τιμή αντιστοιχεί σε γεωστατικές συνθήκες

$$B_{min} = \frac{E_t}{3} \left(\frac{2 - \sin \phi}{\sin \phi} \right) \quad (5)$$

Το κριτήριο φόρτισης / αποφόρτισης καθορίζεται από την σχέση (Clough 1984, Ebeling et al. 1992)

$$S = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}} \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{1/4} \quad (6)$$

όπου σ_{1f}, σ_{3f} = κύριες τάσεις στην αστοχία. Αν $S \geq S_{max}$ τότε χρησιμοποιούνται τα μέτρα φόρτισης, ενώ διαφορετικά τα μέτρα αποφόρτισης. Το καταστατικό προσομοίωμα ενσωματώθηκε στο κώδικα ABAQUS (2011) και επιβεβαιώθηκε εκτενώς (Dakoulas 2007).

2.2 ΣΤΑΔΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΠΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ

Στάδιο 1 : Η σταδιακή κατασκευή του επιχώματος προσομοιώνεται θεωρώντας 20 στρώσεις πάχους 7.5 m. Το αριθμητικό προσομοίωμα διακριτοποιεί με ακρίβεια την 3Δ γεωμετρία του επιχώματος, χρησιμοποιώντας 1258 πεπερασμένα στοιχεία. Εκτός των 20 οριζοντίων στρώσεων της κατασκευής, η διατομή υποδιαιρείται σε τρεις βασικές ζώνες: την ανάντη ζώνη 3B, την κατάντη ζώνη 3C, και την ζώνη χαλικιού 2B (Σχ. 2). Έτσι, η μέγιστη διατομή του φράγματος χωρίζεται συνολικά σε 60 ζώνες, κάθε μία από τις οποίες διακριτοποιείται χωριστά με μέγιστη διάσταση στοιχείων μεταξύ 4 m και 6 m.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν απευθείας μετρήσεις της δυσκαμψίας της λιθορριπής, αφού πρόκειται για μια ιδεατή κατασκευή, οι αρχικές τιμές των παραμέτρων του προσομοιώματος λήφθηκαν από δημοσιευμένα δεδομένα για παρόμοια υλικά σε παρόμοια φράγματα (Duncan et al. 1980), και στην συνέχεια βαθμονομήθηκαν οι σταθερές K , K_{ur} και K_b . Οι τιμές όλων των παραμέτρων του προσομοιώματος της βασικής ανάλυσης δίδονται στον Πίνακα 1.

Η προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής επαναλαμβάνεται δύο ή τρεις φορές και μετά από κάθε ανάλυση η αρχική γεωμετρία του φράγματος τροποποιείται έτσι ώστε μετά την επιβολή του 94% της βαρύτητας η επιφάνεια του ανάντη πρανούς να αποτελεί ένα τέλειο επίπεδο επάνω στο οποίο τοποθετείται η πλάκα στο Στάδιο 2.

Στάδιο 2 : Η πλάκα ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος έχει μήκος 5 m και διακριτοποιείται με συνολικά 780 στοιχεία. Το πάχος της πλάκας είναι 0.3 m στην στέψη, ενώ μεταβάλλεται σαν συνάρτηση της κατακόρυφης απόστασης h από το μέγιστο ύψος του νερού σύμφωνα με την σχέση $w=0.30+0.003h$. Για $h=148$ m, το πάχος στη βάση της μέγιστης διατομής είναι 0.74 m. Το πάχος της πλάκας διακριτοποιείται με δύο λεπτά πεπερασμένα στοιχεία, ενώ οι άλλες διαστάσεις των στοιχείων κυμαίνονται μεταξύ 2 m και 3.75 m, ώστε ο λόγος των διαστάσεων σε σχέση με το πάχος να είναι αποδεκτός. Οι ιδιότητες του σκυροδέματος δίδονται στον Πίνακα 2. Η αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος δίνεται παρακάτω.

Η διεπιφάνεια στη βάση της πλάκας αναπτύσσει τριβή με την υποκείμενη στρώση χαλικιού και έχει τη δυνατότητα αποχωρισμού. Το ίδιο συμβαίνει με τη διεπιφάνεια μεταξύ των κατακόρυφων τοιχωμάτων γειτονικών πλακών. Ο συντελεστής τριβής μεταξύ σκυροδέματος και χαλικιού λαμβάνεται 0.7, ενώ μεταξύ επιφανειών σκυροδέματος 0.5. Στο Στάδιο 2 η πλάκα φορτίζεται από το ίδιο βάρος, και επειδή η τριβή δεν επαρκεί, υποστηρίζεται στο κάτω μέρος της από την πλίνθο.

Στάδιο 3 : Η στάθμη του ύδατος ανέρχεται στο υψόμετρο 148 m σε 10 βήματα.

Στάδιο 4 : Επιβάλλεται καθίζηση (δυναμική) στη στέψη του φράγματος 1 m.

Κεφάλαιο 5 :

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

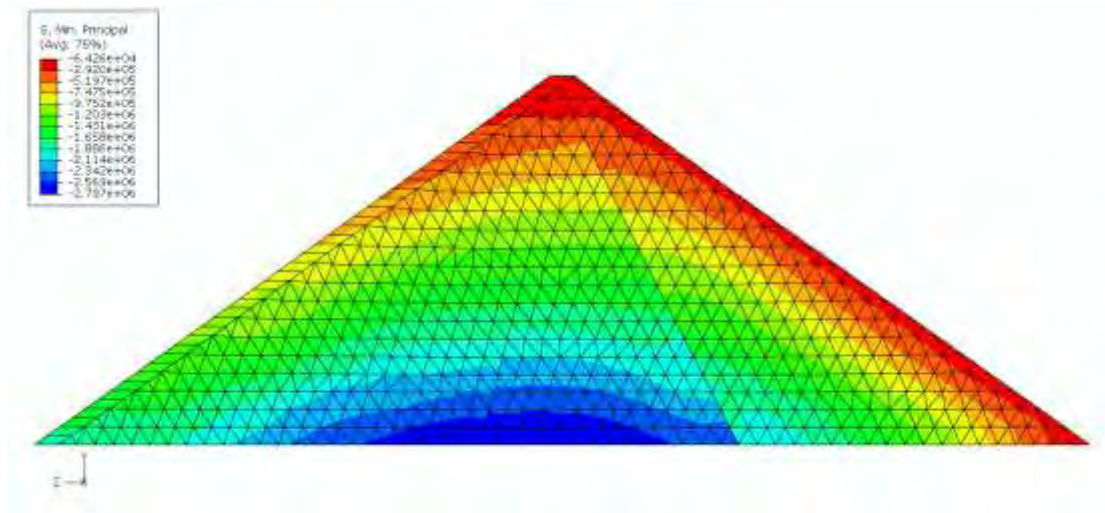
1 ΦΡΑΓΜΑ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ ΜΕ ΑΝΑΝΤΗ ΠΛΑΚΑ ΙΝΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η προσομοίωση του φράγματος λιθορριπής με το πρόγραμμα Abaqus (2011), λαμβάνοντας υπόψη τις καταστατικές εξισώσεις του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα, έδωσαν τη δυνατότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς του φράγματος μετά την πλήρωση της λεκάνης και την επιβολή 1 m δυναμικής καθίζησης στη στέψη της κατασκευής.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κατανομές των κυρίων τάσεων σ_1 (μέγιστη κύρια τάση) και σ_3 (ελάχιστη κύρια τάση) στο εσωτερικό του φράγματος, η κατανομή της κατακόρυφης τάσης σ_{22} στο εσωτερικό του φράγματος και η καθίζηση U_2 . Το στάδιο 3 είναι το στάδιο εκείνο κατά το οποίο, αφού έχει κατασκευαστεί το φράγμα και η πλάκα ινοπλισμένου σκυροδέματος, πληρώνεται η λεκάνη με νερό έως τα 148 m. Αντίστοιχα, στο στάδιο 4 επιβάλλεται δυναμική καθίζηση στη στέψη του φράγματος με μέγιστη τιμή 1 m.

1.1 ΣΤΑΔΙΟ 3 ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ: ΠΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΜΕΧΡΙ ΤΑ 148 m

1.1.1 $S_{min} = \sigma_3$ (MPa)

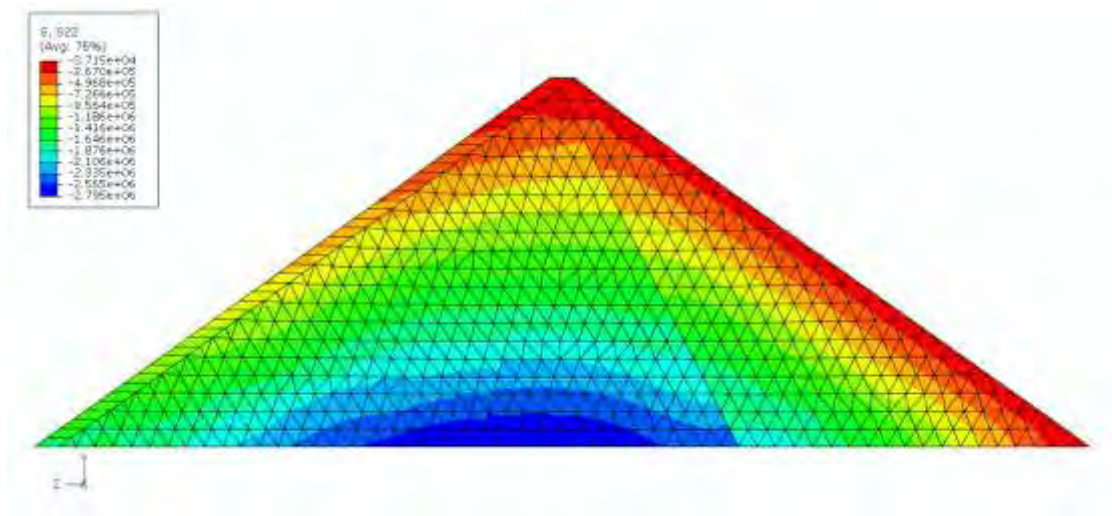


Σχήμα 1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΚΥΡΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΣΤΑ 148 m

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης (αρνητικές τιμές της τάσης υποδηλώνουν θλίψη) . Η μέγιστη θλίψη παρουσιάζεται στη βάση του φράγματος και είναι περίπου 2.8 MPa .

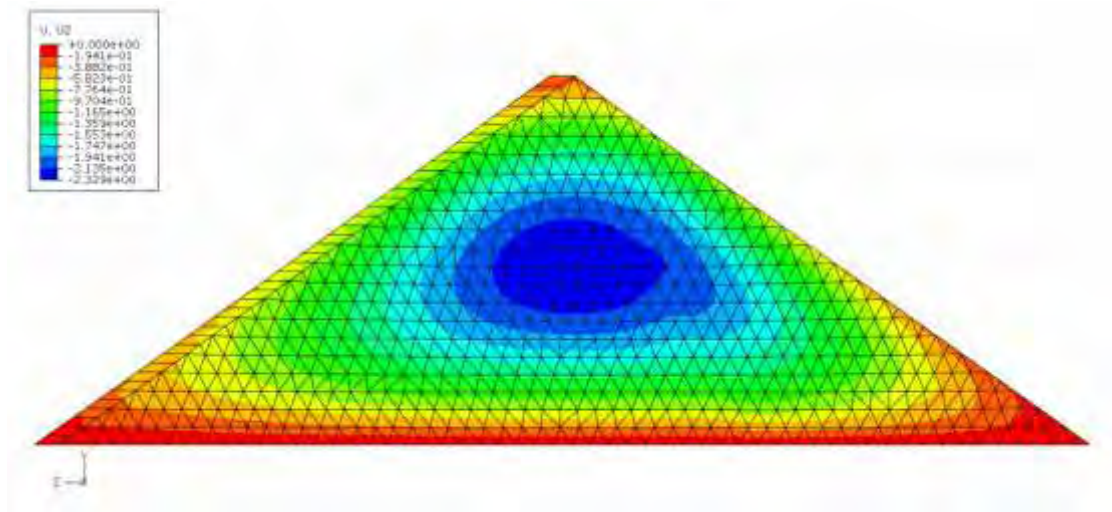
Στο Σχήμα 2 δίνεται επίσης η κατανομή της κατακόρυφης ορθής τάσης σ_{22} , η οποία λαμβάνει τιμές περίπου παρόμοιες με εκείνες της σ_3 .

1.1.2 $S_{22} = \sigma_{22}$ (MPa)



Σχήμα 2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΟΡΘΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΣΤΑ 148 m

1.1.3 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ U_2



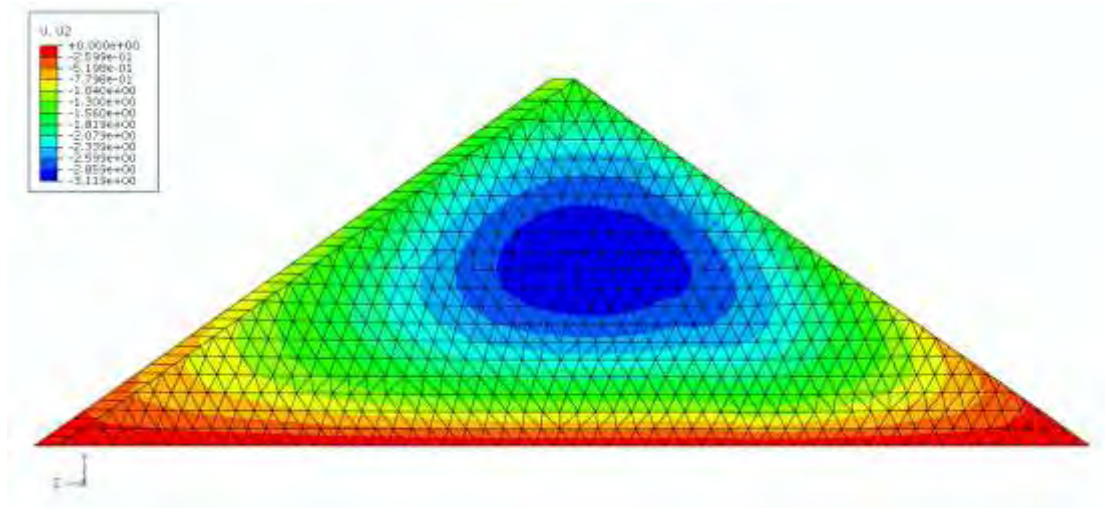
Σχήμα 3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΣΤΑ 148 m

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η κατανομή των καθιζήσεων στο εσωτερικό του φράγματος κατά το στάδιο της πλήρωσης της λεκάνης στα 148 m . Από αυτό το σχήμα συμπεραίνουμε ότι περισσότερο καταπονείται από καθιζήσεις ο πυρήνας του φράγματος με μέγιστη τιμή τα 2.33 m .

Παρομοίως, στο Σχήμα 4 δίνεται η κατανομή των καθιζήσεων μετά την επιβολή της δυναμικής συνίζησης 1 m στη στέψη του φράγματος, με μέγιστη τιμή τα 3.12 m στον πυρήνα του φράγματος λιθορριπής.

1.2 ΣΤΑΔΙΟ 4 ΤΗΣ ΚΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ : ΕΠΙΒΟΛΗ 1 m ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ ΣΤΗ ΣΤΕΨΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

1.2.1 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ U_2

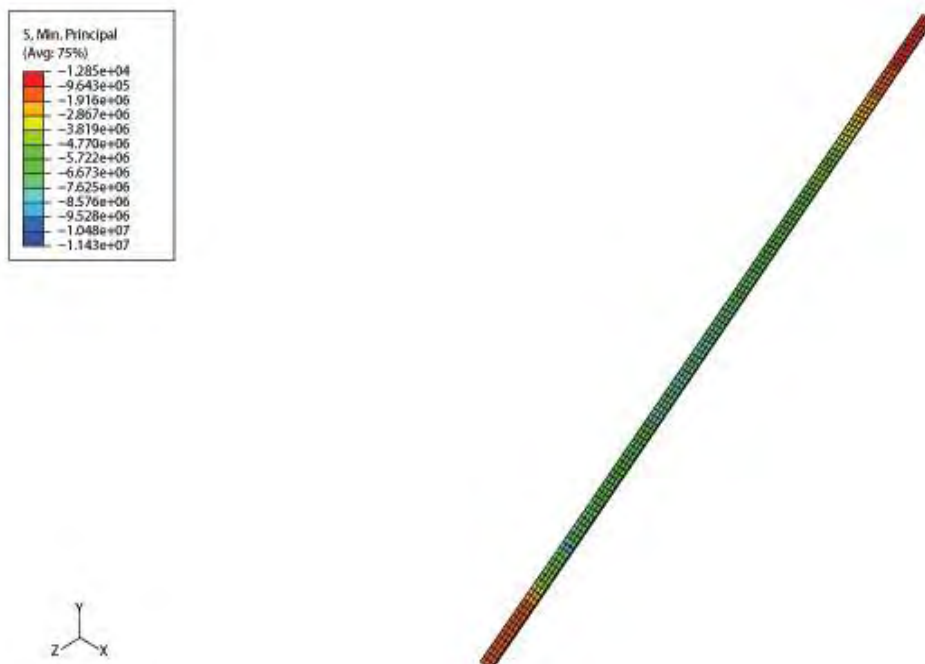


Σχήμα 4 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ 1 m ΣΤΗ ΣΤΕΨΗ

2 ΠΛΑΚΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.1 ΣΤΑΔΙΟ 3 ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ: ΠΛΗΡΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΜΕΧΡΙ ΤΑ 148 m

2.1.1 $S_{min} = \sigma_3$ (MPa)

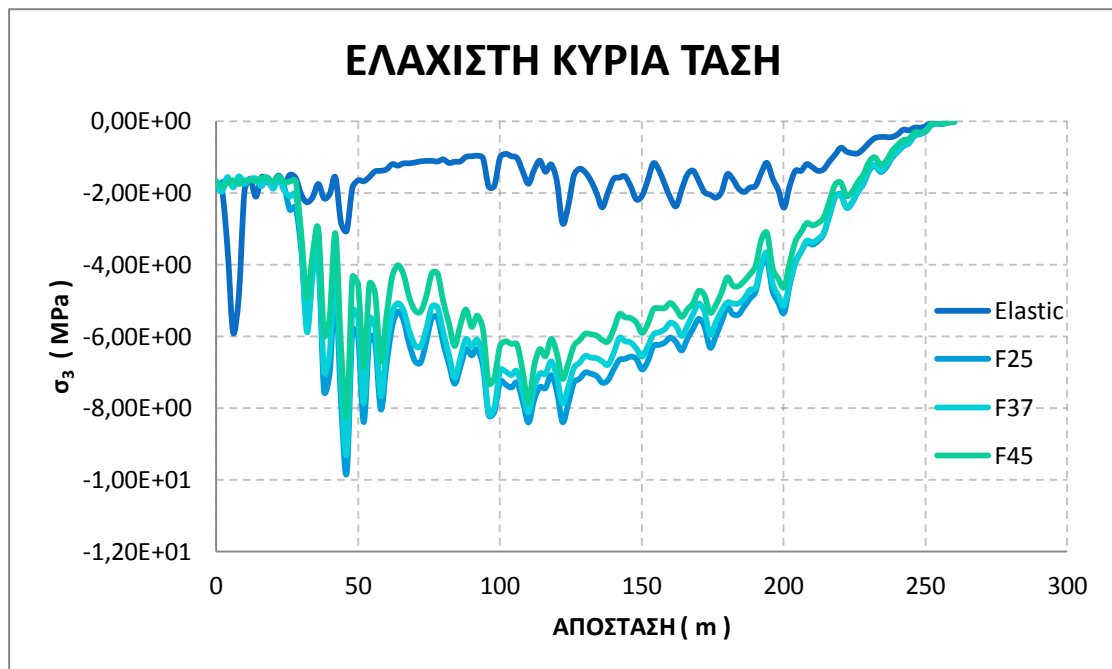


Σχήμα 5 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΚΥΡΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΛΑΚΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ($V_f = 2.5\%$) ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΜΕΧΡΙ ΤΑ 148 m

Στο Σχήμα 5 φαίνεται η κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης η οποία είναι θλιπτική κατά μήκος της πλάκας. Οι τιμές για την ελάχιστη κύρια τάση εξαρτώνται από την αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα, ενώ η κατανομή

είναι σχετικά παρόμοια για όλα τα διαφορετικής αντοχής σκυροδέματα που εξετάζονται. Το σχήμα αυτό αφορά στο σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 25 MPa, ενισχυμένο με ίνες χάλυβα, και η μέγιστη θλίψη που εμφανίζεται έχει τιμή περίπου 9.80 MPa.

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης σ_3 κατά μήκος της πλάκας για διάφορες αντοχές ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος και για το ελαστικό μοντέλο. Το σχήμα αυτό δίνει άμεση σύγκριση των τιμών της ελάχιστης κύριας τάσης για τις διάφορες περιπτώσεις σκυροδέματος.



Σχήμα 6 ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΚΥΡΙΑ ΤΑΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΜΕΧΡΙ ΤΑ 148 m

Στο παραπάνω σχήμα, εμφανίζονται τα εξής σύμβολα :

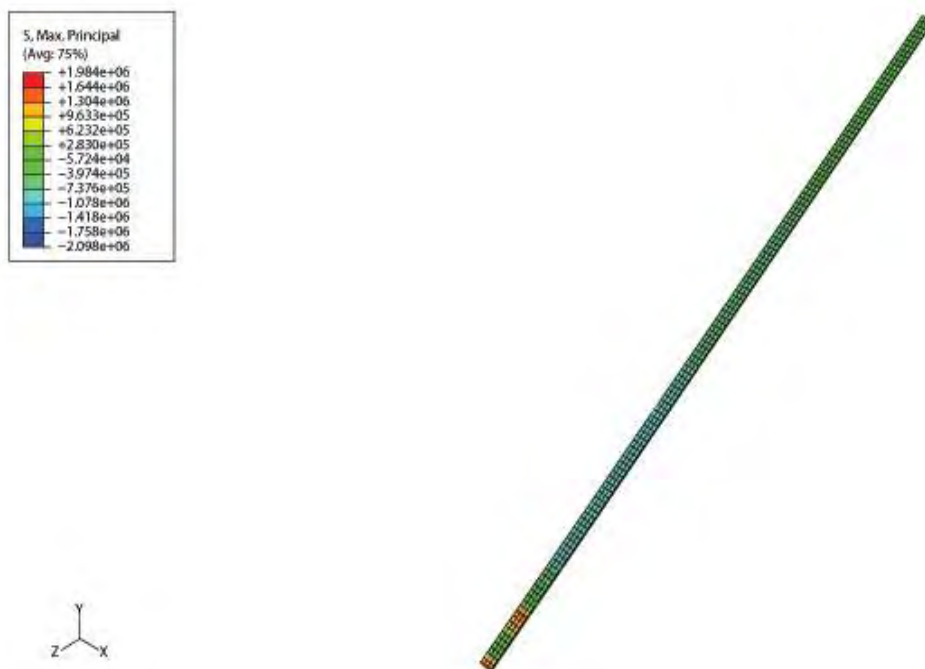
- F25 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 25 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- F37 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 37 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- F45 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 45 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- E : σκυρόδεμα με ελαστική συμπεριφορά

Από το Σχήμα 6 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

1. Για οριζόντια απόσταση $x = 0$ m και $x = 2,00$ m η ελάχιστη κύρια τάση λαμβάνει παραπλήσιες τιμές τόσο μεταξύ των διαφορετικής αντοχής σκυροδεμάτων όσο και με το ελαστικό μοντέλο.
2. Για όλες τις υπόλοιπες τιμές της οριζόντιας απόστασης από την αρχή της πλάκας παρατηρείται σημαντική απόκλιση των τιμών της τάσης στο ελαστικό μοντέλο με αυτές που λαμβάνει στα διαφορετικής αντοχής σκυροδέματα. Για όλες τις τιμές, βέβαια, η τάξη μεγέθους της σ_3 δεν αλλάζει.
3. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, για τις διάφορες τιμές επιδιωκόμενης αντοχής, εμφανίζει για το ίδιο σημείο μείωση της θλιπτικής τάσης, όσο αυξάνεται η αντοχή. Όταν είναι θετικές οι τάσεις, υποδηλώνουν εφελκυσμό, ενώ όταν είναι αρνητικές, υποδηλώνουν θλίψη. Με άλλα λόγια η μέγιστη δυνατή θλιπτική τάση που αναπτύσσεται στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα με αντοχή 25 MPa, δηλαδή η ελάχιστη σ_3 , είναι μεγαλύτερη από αυτή που εμφανίζεται στο F37 και ακόμα μεγαλύτερη από αυτή για το F45 στο ίδιο σημείο πάνω στην πλάκα.
4. Η μορφή της καμπύλης της τάσης είναι κοινή για τα τρία είδη σκυροδέματος, διαφέρει όμως από τη μορφή που έχει η καμπύλη αυτή για το ελαστικό μοντέλο.
5. Η ελάχιστη τιμή της σ_3 (μέγιστη θλίψη) που εμφανίζεται σε κάθε μοντέλο σκυροδέματος, καθώς και το σημείο στο οποίο αντιστοιχούν οι τιμές αυτές, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

	ELASTIC	F25	F37	F45
σ_{MIN} (MPa)	-5.90	-9.80	-9.28	-8.23
x_{MIN} (m)	6.00	46.03	46.03	46.03

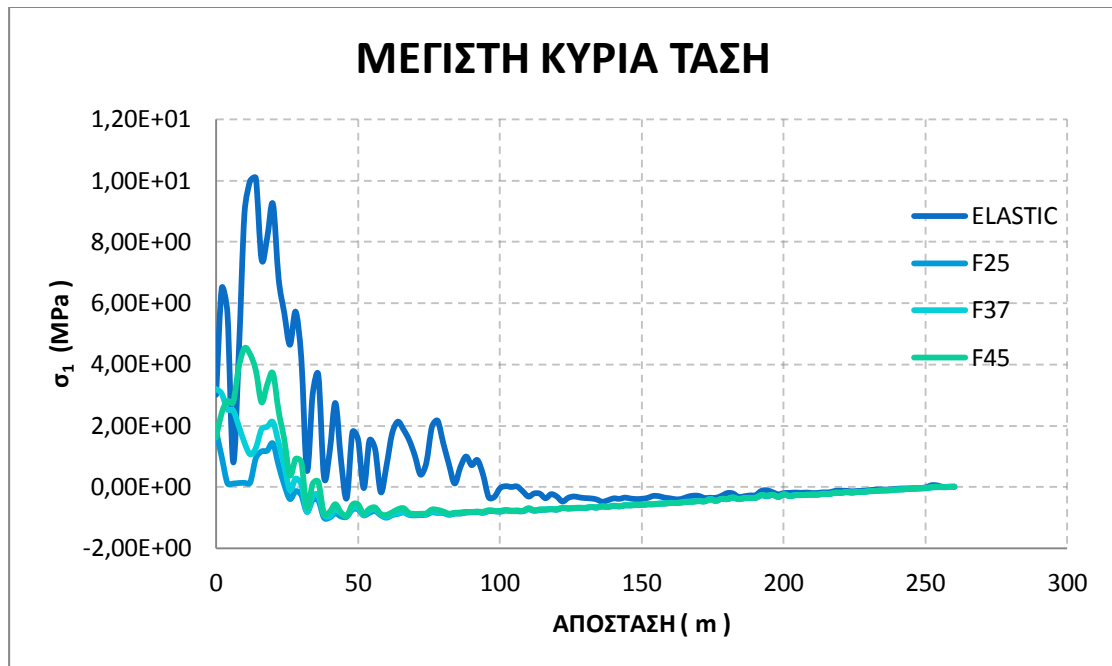
Πίνακας 1 ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΚΥΡΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΜΕΧΡΙ ΤΑ 148 m

2.1.2 $S_{max} = \sigma_1$ (MPa)

Σχήμα 7 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΥΡΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΛΑΚΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ($V_f = 2.5\%$) ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΜΕΧΡΙ ΤΑ 148 m

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης κατά μήκος της πλάκας, η οποία είναι όχι μόνο θλιπτική (αρνητικές τιμές) αλλά και εφελκυστική (θετικές τιμές). Και στην περίπτωση αυτή, η κατανομή αφορά στην πλάκα η οποία έχει κατασκευαστεί από σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 25 MPa, ενισχυμένο με ίνες χάλυβα. Ο μέγιστος εφελκυσμός που εμφανίζεται στην πλάκα για την αντοχή αυτή του σκυροδέματος είναι 1.82 MPa.

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται οι διάφορες τιμές τις οποίες λαμβάνει η μέγιστη κύρια τάση κατά μήκος της πλάκας ινοπλισμένου σκυροδέματος, για διάφορες αντοχές του σύνθετου αυτού σκυροδέματος και για το ελαστικό μοντέλο.



Σχήμα 8 ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΥΡΙΑ ΤΑΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΜΕΧΡΙ ΤΑ 148 m

Στο παραπάνω σχήμα, εμφανίζονται τα εξής σύμβολα :

- F25 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 25 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- F37 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 37 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- F45 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 45 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- E : σκυρόδεμα με ελαστική συμπεριφορά

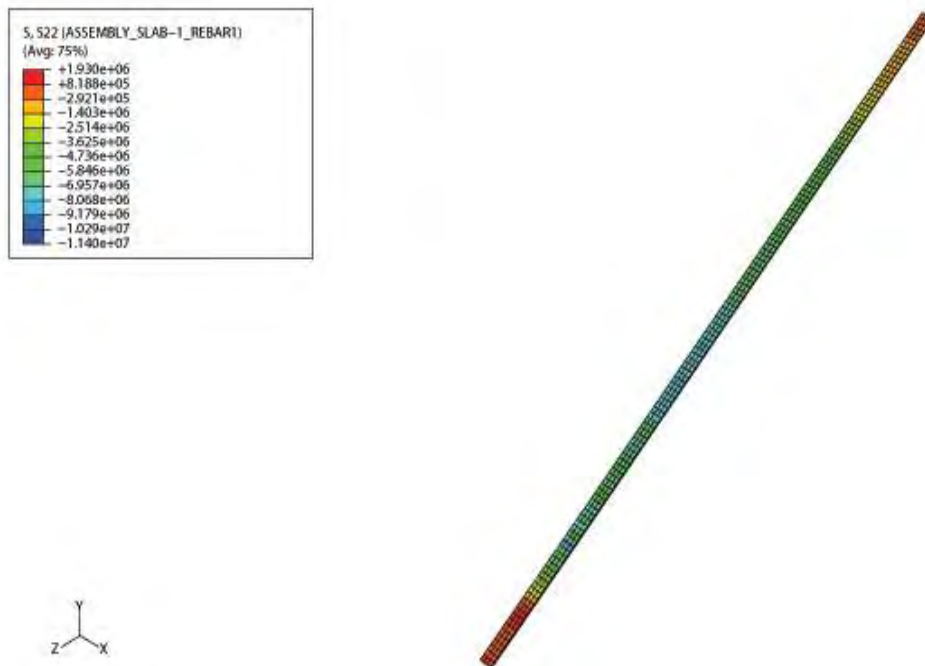
Από το Σχήμα 8 διεξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα :

1. Η ελαστική συμπεριφορά δίνει μέγιστη τιμή της τάσης σ_1 (μέγιστος εφελκυσμός) που φθάνει τα 10 MPa . Για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα F25, η μέγιστη τιμή εφελκυσμού είναι 1.8 MPa, για το F37 είναι περίπου 3 MPa και για το F45 είναι 4.5 MPa. Όλες αυτές οι τιμές φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.
2. Η μέγιστη τιμή της σ_1 που εμφανίζεται σε κάθε μοντέλο σκυροδέματος, καθώς και το σημείο στο οποίο αντιστοιχούν οι τιμές αυτές, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

	ELASTIC	F25	F37	F45
σ_{MAX} (MPa)	10.10	1.82	3.19	4.53
x_{MAX} (m)	14.01	0	0	10.00

Πίνακας 2 ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΥΡΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΜΕΧΡΙ ΤΑ 148 m

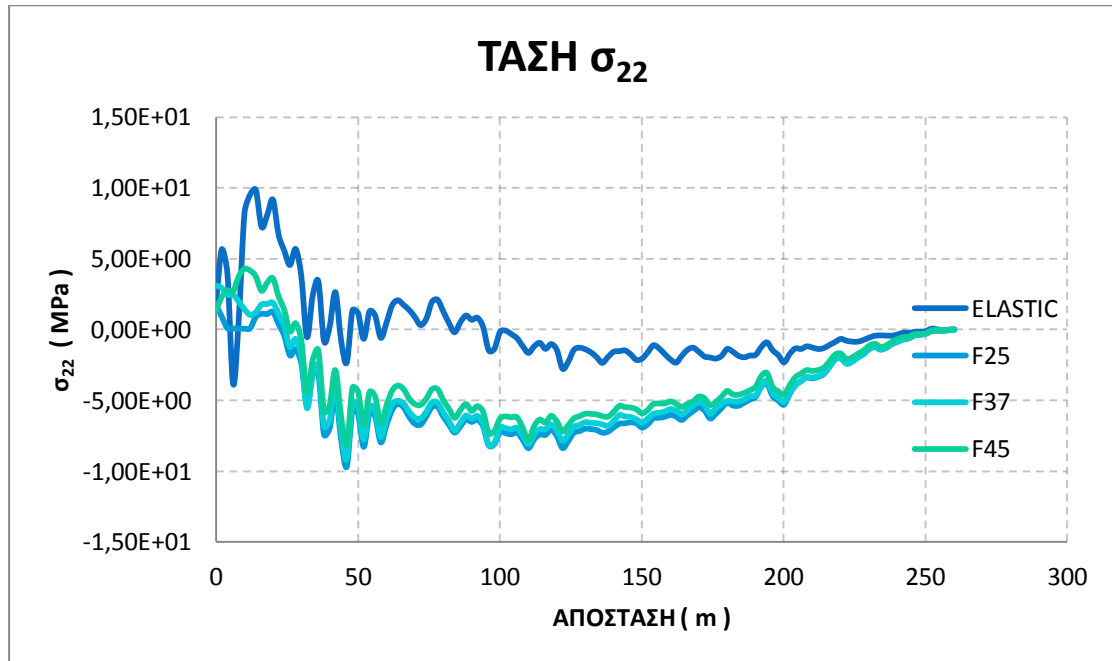
3. Η ελαστική συμπεριφορά της πλάκας δείχνει ανάπτυξη σημαντικών εφελκυστικών τάσεων από 0 m έως 100 m από τον πόδα της πλάκας. Αντίθετα τα ελαστο – πλαστικά μοντέλα (F25, F37, F45) επιδεικνύουν μικρότερο εφελκυσμό και περιορισμένο στην περιοχή από 0 m έως \cong 30 m.

2.1.3 $S_{22} = \sigma_{22}$ (MPa)

Σχήμα 9 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΟΡΘΗΣ ΤΑΣΗΣ σ_{22} ΣΤΗΝ ΠΛΑΚΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ($V_f = 2.5\%$) ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΜΕΧΡΙ ΤΑ 148 m

Στο Σχήμα 9 απεικονίζεται η κατανομή της κατακόρυφης ορθής τάσης σ_{22} σε όλο το μήκος της πλάκας ινοσκυροδέματος για το στάδιο 3 της κατασκευής. Ομοίως με τη σ_1 , η τάση σ_{22} είναι και θλιπτική και εφελκυστική κατά μήκος της πλάκας με μέγιστη τιμή εφελκυσμού 1.76 MPa και μέγιστη τιμή θλίψης 9.69 MPa για σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 25 MPa, ενισχυμένο με ίνες χάλυβα.

Στο Σχήμα 10 απεικονίζονται οι τιμές της κατακόρυφης ορθής τάσης σ_{22} οι οποίες εμφανίζονται πάνω στην πλάκα ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος. Οι τιμές αυτές της τάσης είναι για τις διάφορες αντοχές ινοπλισμένου σκυροδέματος που εξετάζονται αλλά και για το ελαστικό μοντέλο.



Σχήμα 10 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ σ_{22} ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΜΕΧΡΙ ΤΑ 148 m

Στο παραπάνω σχήμα, εμφανίζονται τα εξής σύμβολα :

- F25 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 25 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- F37 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 37 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- F45 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 45 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- E : σκυρόδεμα με ελαστική συμπεριφορά

Από τα αποτελέσματα του Σχήματος 10 προκύπτει ότι :

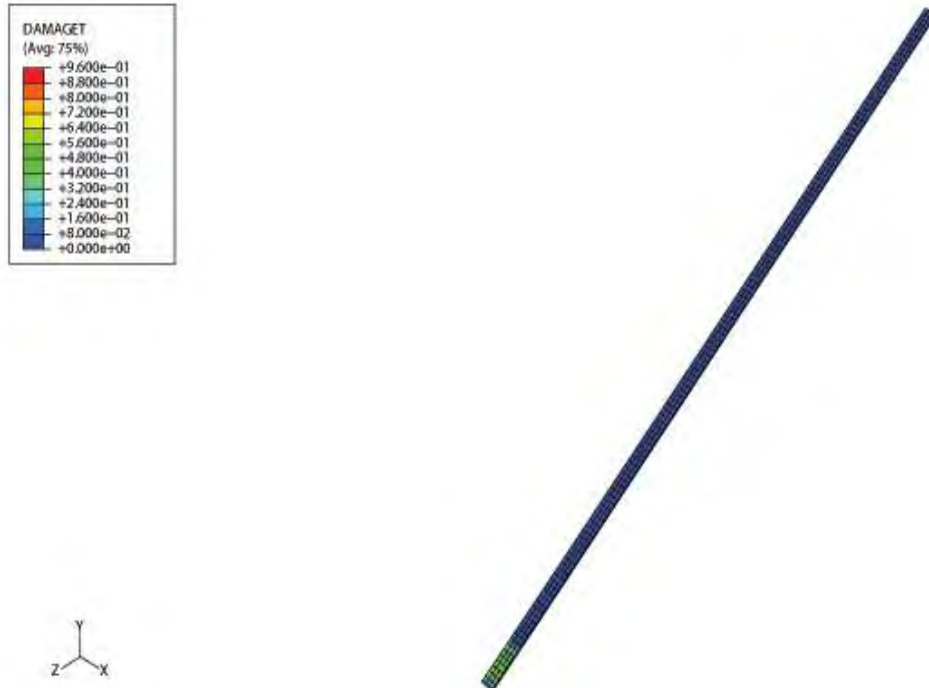
1. Η κατακόρυφη ορθή τάση σ_{22} λαμβάνει όχι μόνο θετικές αλλά και αρνητικές τιμές κατά την οριζόντια απόσταση της πλάκας από τον πόδα του φράγματος και στα τέσσερα μοντέλα σκυροδέματος που μελετήθηκαν. Παρατηρείται περιοχή εφελκυσμού από 0 m - \cong 30 m και περιοχή θλίψης από 30 m - 260 m .
2. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, για τις διάφορες τιμές επιδιωκόμενης αντοχής, εμφανίζει για το ίδιο σημείο αναμενόμενη αύξηση των αλγεβρικών τιμών της τάσης κατά τον άξονα γ , όσο αυξάνεται η αντοχή του. Δηλαδή η μέγιστη δυνατή σ_{22} που αναπτύσσεται στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα με αντοχή 45 MPa είναι μεγαλύτερη από αυτή που εμφανίζεται στο F37 και ακόμα μεγαλύτερη από αυτή για το F25 στο ίδιο σημείο πάνω στην πλάκα. Στα ελαστο – πλαστικά μοντέλα, ο μέγιστος εφελκυσμός και η μέγιστη θλίψη παρουσιάζονται στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα με αντοχή 45 MPa.
3. Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της σ_{22} που εμφανίζεται σε κάθε μοντέλο σκυροδέματος, καθώς και το σημείο στο οποίο αντιστοιχούν οι τιμές αυτές, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

	ELASTIC	F25	F37	F45
σ_{MAX} (MPa)	9.85	1.76	3.10	4.31
x_{MAX} (m)	14.01	0	0	10.00
σ_{MIN} (MPa)	-3.86	-9.69	-9.15	-8.08
x_{MIN} (m)	6.00	46.03	46.03	46.03

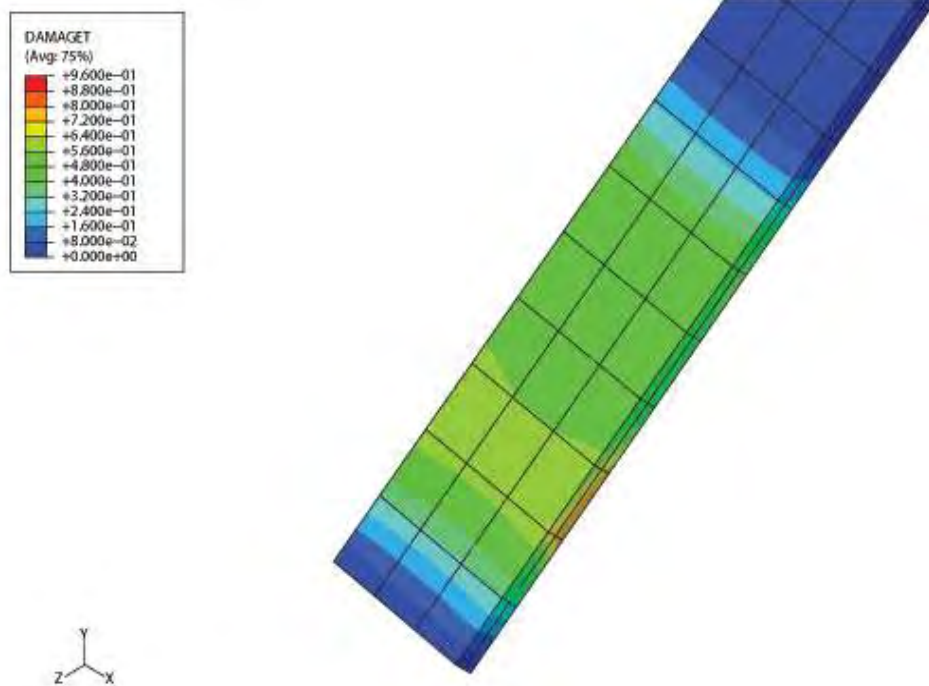
Πίνακας 4 ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΙ ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΟΡΘΗΣ ΤΑΣΗΣ σ_{22} ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΜΕΧΡΙ ΤΑ 148 m

Όπως αναμενόταν, το ελαστικό μοντέλο αναπτύσσει τη μέγιστη και την ελάχιστη κατακόρυφη ορθή τάση σ_{22} συγκρινόμενο με τα ελαστο – πλαστικά μοντέλα (F25, F37, F45). Κανένα από τα επιμέρους υλικά δεν πλησιάζει τις τιμές που εμφανίζονται στο πρότυπο αυτό μοντέλο. Η μέγιστη σ_{22} που παρουσιάζεται σε αυτά είναι σημαντικά μικρότερη, ενώ η ελάχιστη σ_{22} είναι αξιοπρόσεκτα μεγαλύτερη, ακόμα και υπερτριπλάσια. Δηλαδή η θλίψη καταπονεί περισσότερο αυτά τα υλικά .

2.1.4 ΖΗΜΙΑ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ



Σχήμα 11 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΖΗΜΙΑΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΣΤΗΝ ΠΛΑΚΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ($V_f = 2.5\%$) ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΜΕΧΡΙ ΤΑ 148 m



Σχήμα 12 ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΒΛΑΒΗ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΙ Ο ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ ΠΑΝΩ ΣΤΗΝ ΠΛΑΚΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Τα Σχήματα 11 και 12 δείχνουν τη ζημία της πλάκας σε εφελκυσμό. Το Σχήμα 12 απεικονίζει λεπτομέρεια της ζημίας πάνω στο τμήμα της πλάκας που επηρεάζεται σημαντικά και ουσιαστικά από τον εφελκυσμό. Σε όλη την υπόλοιπη έκταση της πλάκας η βλάβη λόγω της καταπόνησης αυτής είναι μηδενική, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 11. Και τα δύο σχήματα αφορούν ανάντη πλάκα κατασκευασμένη από σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 25 MPa ενισχυμένο με ίνες, στην οποία η μέγιστη βλάβη που καταγράφεται έχει τιμή 0.614 m .



Σχήμα 13 ΖΗΜΙΑ ΛΟΓΩ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΜΕΧΡΙ ΤΑ 148 m

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 13, η ζημία λόγω εφελκυσμού επικεντρώνεται σε μία ζώνη μήκους ≈ 15 m στον πόδα της πλάκας για σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 25 MPa ενισχυμένο με ίνες.

Στο στάδιο αυτό, στο οποίο πραγματοποιείται πλήρωση της λεκάνης στα 148 m, παρατηρείται η μέγιστη βλάβη λόγω εφελκυσμού. Αυτό συμβαίνει διότι στο επόμενο βήμα της ανάλυσης και ενώ η λεκάνη έχει πληρωθεί με νερό, επιβάλλεται καθίζηση 1 m στη στέψη του φράγματος. Η καθίζηση αυτή μειώνει τον εφελκυσμό και αυξάνει σημαντικά τη θλίψη στην πλάκα.

Η αύξηση αυτή στη θλίψη οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς πραγματοποιούνται καθιζήσεις στο εσωτερικό του φράγματος και το φορτίο που ασκείται από το νερό στην πλάκα είναι πολύ μεγάλο, αναπτύσσονται πολύ σημαντικές δυνάμεις τριβής ανάμεσα στα χονδρόκοκκα αδρανή (χαλίκια) και στην πλάκα ινοπλισμένου σκυροδέματος. Αποτέλεσμα αυτού είναι η πλάκα να πιέζεται προς τα κάτω και να της ασκούνται πιέσεις και από το έδαφος στο ένα της άκρο με άμεση συνέπεια την εξάλειψη οποιασδήποτε εφελκυστικής καταπόνησης.

2.1.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ (SF_c) ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ (SF_t)

Οι παρακάτω συντελεστές ασφαλείας αφορούν στο ινοπλισμένο με ίνες χάλυβα σκυρόδεμα, από το οποίο συντίθεται η ανάντη πλάκα του φράγματος λιθορριπής, και δείχνουν κατά πόσο το κάθε ινοπλισμένο σκυρόδεμα που εξετάζεται είναι κατάλληλο για τη χρήση του ως υλικό κατασκευής της πλάκας. Τα διαφορετικής αντοχής σκυροδέματα εξετάζονται σε θλιπτική και εφελκυστική καταπόνηση και οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας παρουσιάζονται στα κάτωθι σχήματα.

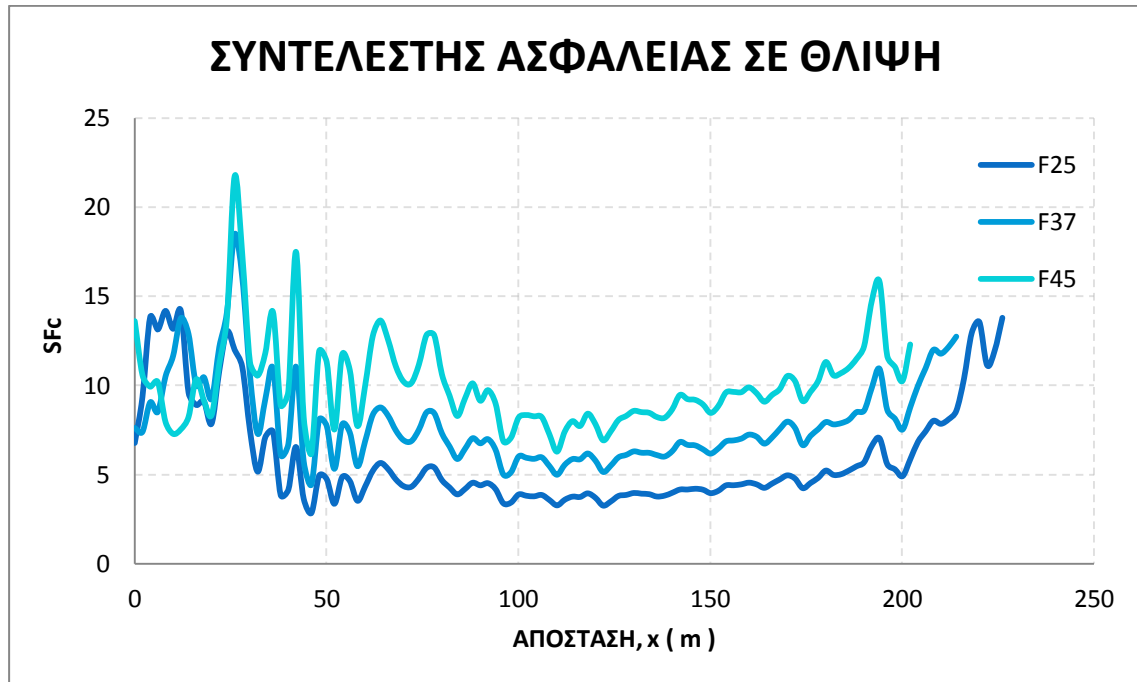
Ο συντελεστής ασφαλείας σε θλίψη υπολογίζεται από τη σχέση :

$$SF_c = \frac{\sigma_{1fc}}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

Αντίστοιχα, ο συντελεστής ασφαλείας σε εφελκυσμό υπολογίζεται από τη σχέση :

$$SF_t = \frac{\sigma_{1ft}}{\sigma_1}$$

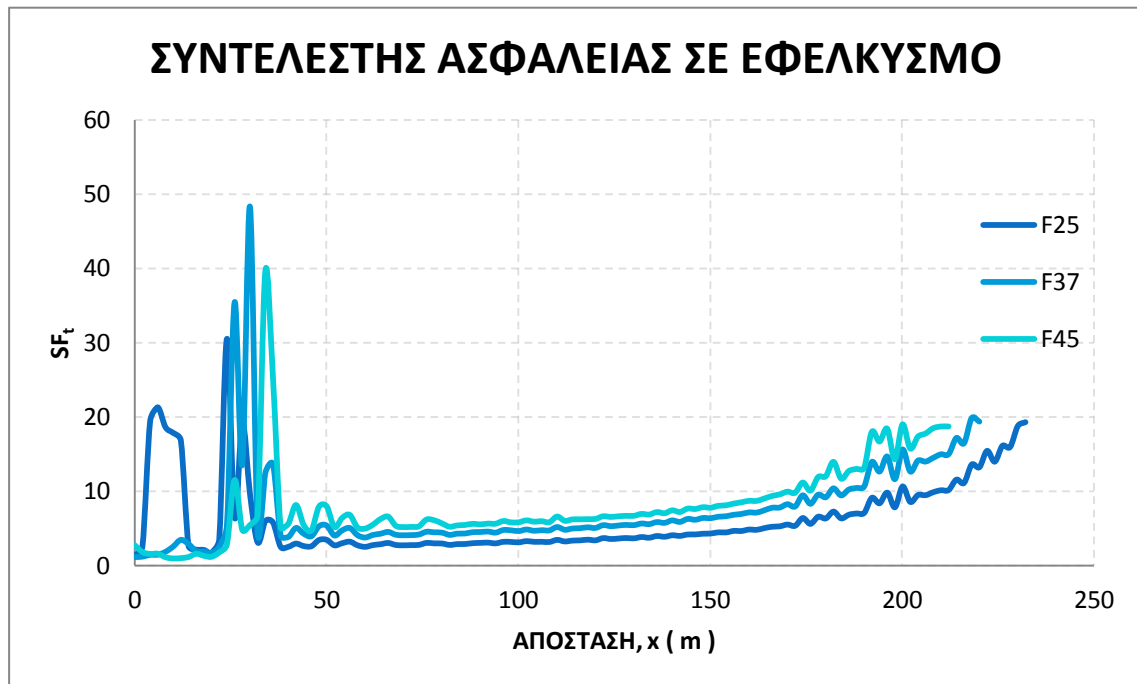
Η μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας σε θλίψη και εφελκυσμό πάνω στην ανάντη πλάκα ινοσκυροδέματος κατά την οριζόντια απόσταση από τον πόδα του φράγματος απεικονίζεται στα Σχήματα 14 και 15.



Σχήμα 14 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΝΕΡΟ ΜΕΧΡΙ ΤΑ 148 m

Στο παραπάνω σχήμα, αλλά και στο επόμενο, εμφανίζονται τα εξής σύμβολα :

- F25 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 25 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- F37 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 37 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- F45 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 45 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- E : σκυρόδεμα με ελαστική συμπεριφορά



Σχήμα 15 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΣΤΑ 148 m

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται με την αύξηση της αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος για την περίπτωση της ανάντη πλάκας του φράγματος λιθορριπής. Αυτό σημαίνει ότι στο στάδιο κατά το οποίο πραγματοποιείται πλήρωση της λεκάνης με νερό έως τα 148 m, τόσο σε θλίψη όσο και σε εφελκυσμό, το σκυρόδεμα με θλιπτική αντοχή 45 MPa ενισχυμένο με ίνες χάλυβα, έχει μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας κατά μήκος της πλάκας σε σύγκριση με τα άλλα δύο σκυροδέματα μικρότερης αντοχής.

2.2 ΣΤΑΔΙΟ 4 ΚΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ : ΕΠΙΒΟΛΗ 1 m ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ ΣΤΗ ΣΤΕΨΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

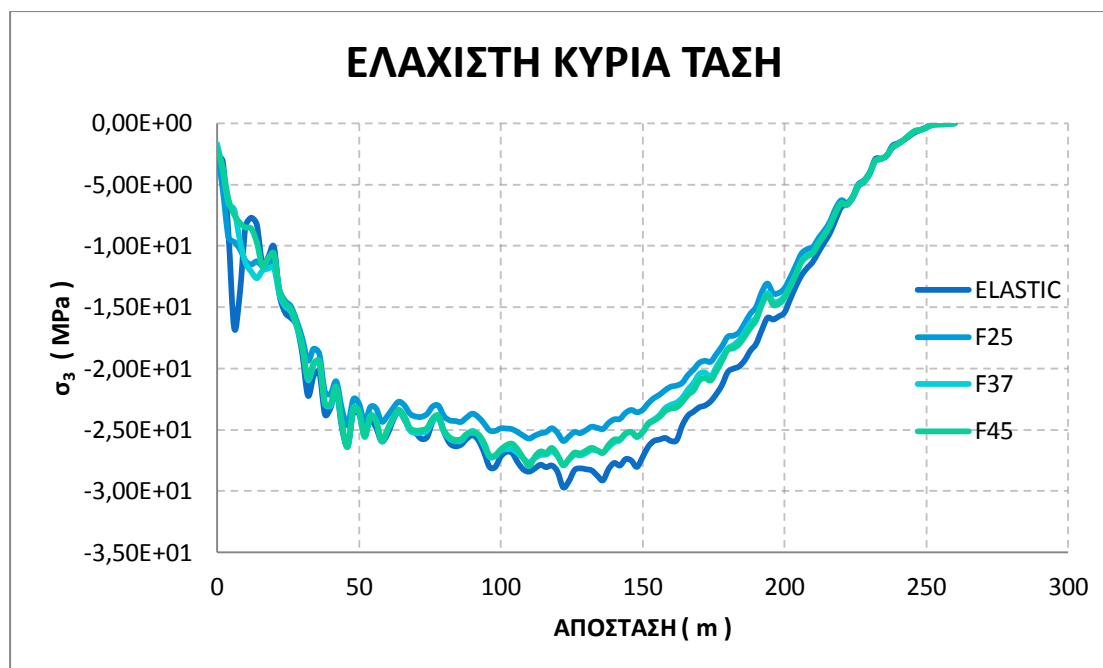
2.2.1 $S_{min} = \sigma_3$ (MPa)



Σχήμα 16 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΚΥΡΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ 1 m ΣΤΗ ΣΤΕΨΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Στο Σχήμα 16 παρουσιάζεται η κατανομή της ελάχιστης κύριας τάσης κατά μήκος της πλάκας μετά την επιβολή καθίζησης 1 m στη στέψη του φράγματος. Όμοια με το στάδιο 3, οι τάσεις αυτές είναι θλιπτικές με μέγιστη θλίψη 25.9 MPa για σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 25 MPa, ενισχυμένο με ίνες. Η κατανομή της τάσης είναι κοινή για όλες τις αντοχές σκυροδεμάτων.

Στο Σχήμα 18 δίνεται η μεταβολή της σ_3 κατά μήκος της ανάντη πλάκας του φράγματος λιθορριπής για τις διάφορες αντοχές του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα που εξετάζεται και για το ελαστικό μοντέλο.



Σχήμα 17 ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΚΥΡΙΑ ΤΑΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ 1 m ΣΤΗ ΣΤΕΨΗ

Στο παραπάνω σχήμα, εμφανίζονται τα εξής σύμβολα :

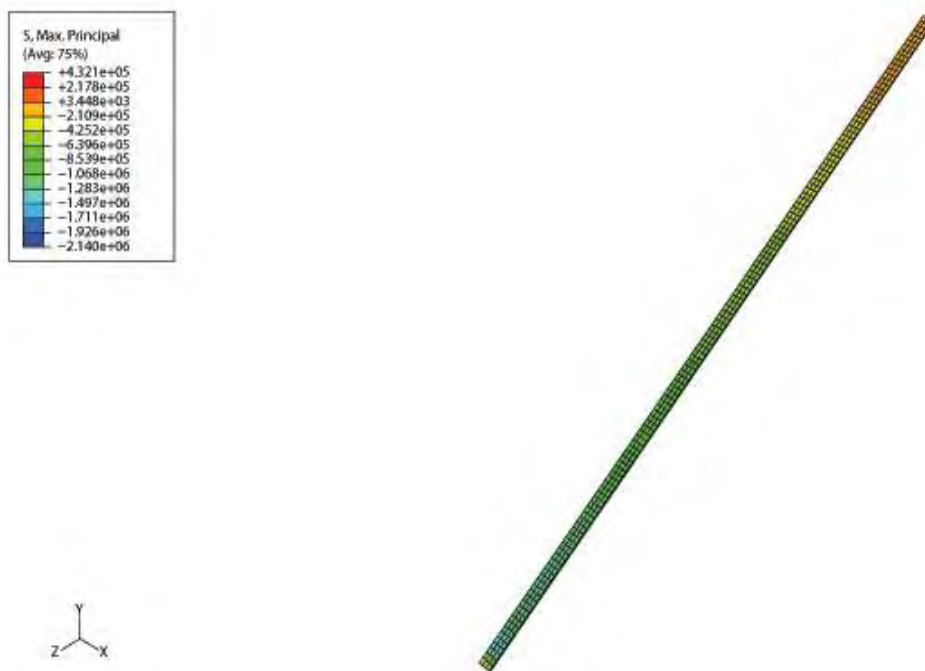
- F25 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 25 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- F37 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 37 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- F45 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 45 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- E : σκυρόδεμα με ελαστική συμπεριφορά

Από τα αποτελέσματα του Σχήματος 17 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

1. Η ελάχιστη τάση σ_3 λαμβάνει μόνο αρνητικές τιμές σε όλα τα σημεία κατά την οριζόντια απόσταση της πλάκας και στα τέσσερα μοντέλα σκυροδέματος που μελετήθηκαν. Με άλλα λόγια, η ελάχιστη κύρια τάση είναι μόνο θλιπτική πάνω στην πλάκα μετά την επιβολή δυναμικής καθίζησης με μέγιστη τιμή ίση προς 1 m στη στέψη του φράγματος.
2. Στην πλειονότητα των σημείων από την αρχή της πλάκας, κατά την οριζόντια διεύθυνση, παρατηρείται σύγκλιση των τιμών της τάσης που αναπτύσσονται στο ελαστικό μοντέλο με αυτές που εμφανίζονται στα διαφορετικής αντοχής σκυροδέματα. Μπορεί να αναφερθεί ότι μόνο στα πρώτα 35 m περίπου οι τάσεις που παρατηρήθηκαν στα επιμέρους ινοπλισμένα σκυροδέματα απέχουν αρκετά από τις τιμές για το ελαστικό μοντέλο.
3. Κατά κύριο λόγο, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, για τις διάφορες τιμές επιδιωκόμενης αντοχής, εμφανίζει για το ίδιο σημείο αύξηση των τιμών της ελάχιστης τάσης, όσο αυξάνεται η αντοχή. Υπάρχουν, ωστόσο, σημεία στα οποία το ινοπλισμένο σκυρόδεμα F37 αποκτά μεγαλύτερες, κατ' απόλυτη τιμή, τιμές τάσης σ_3 από τις αντίστοιχες για το ινοπλισμένο F45.
4. Η μορφή της καμπύλης της κύριας τάσης σ_3 είναι ίδια στο μεγαλύτερο μέρος της έκτασης της και για τα τέσσερα μοντέλα σκυροδέματος. Εξαιρεση αποτελούν τα πρώτα 15 περίπου μέτρα της οριζόντιας απόστασης στα οποία η κατανομή για το ελαστικό μοντέλο παρουσιάζει πιο έντονες διακυμάνσεις στις τιμές της σ_3 .
5. Η ελάχιστη τιμή της σ_3 (μέγιστη θλίψη) που εμφανίζεται σε κάθε μοντέλο σκυροδέματος, καθώς και το σημείο στο οποίο αντιστοιχούν οι τιμές αυτές, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

	ELASTIC	F25	F37	F45
σ_{MIN} (MPa)	-29.7	-25.9	-27.9	-28.0
x_{MIN} (m)	122	122	122	110

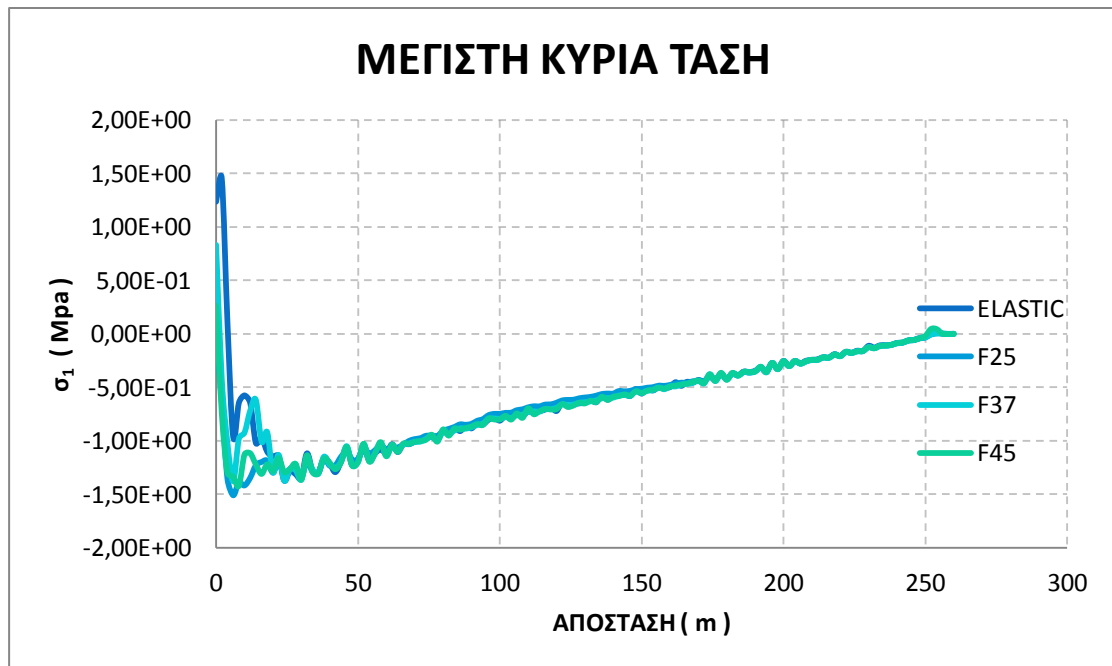
Πίνακας 7 ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΚΥΡΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ 1 m ΣΤΗ ΣΤΕΨΗ

2.2.2 $S_{max} = \sigma_1$ (MPa)

Σχήμα 18 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΥΡΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ 1 m ΣΤΗ ΣΤΕΨΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Στο Σχήμα 18 απεικονίζεται η κατανομή της μέγιστης κύριας τάσης κατά μήκος της πλάκας για το στάδιο 4 της ολοκλήρωσης του φράγματος. Όπως και για το προηγούμενο στάδιο, οι τάσεις είναι εφελκυστικές και θλιπτικές κατά μήκος της πλάκας ινοσκυροδέματος και ο μέγιστος εφελκυσμός για σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής 25 MPa, ενισχυμένο με ίνες, είναι 2.53 MPa.

Το Σχήμα 19, στη συνέχεια, παρουσιάζει τις διάφορες τιμές της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 κατά μήκος της πλάκας ινοσκυροδέματος οι οποίες αντιστοιχούν στις διάφορες αντοχές ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος και στο ελαστικό μοντέλο.



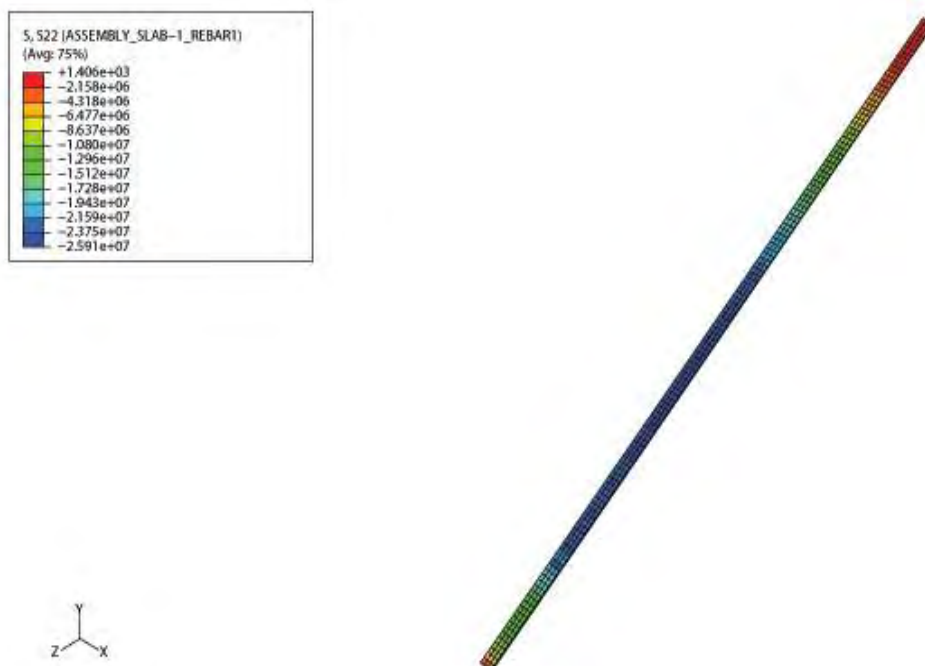
Σχήμα 19 ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΥΡΙΑ ΤΑΣΗ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ 1 m ΣΤΗ ΣΤΕΨΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Στο παραπάνω σχήμα, εμφανίζονται τα εξής σύμβολα :

- F25 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 25 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- F37 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 37 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- F45 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 45 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- E : σκυρόδεμα με ελαστική συμπεριφορά

Από τα αποτελέσματα του Σχήματος 19 προκύπτει ότι στην πλειονότητα των σημείων από την αρχή της πλάκας, κατά την οριζόντια διεύθυνση, παρατηρείται

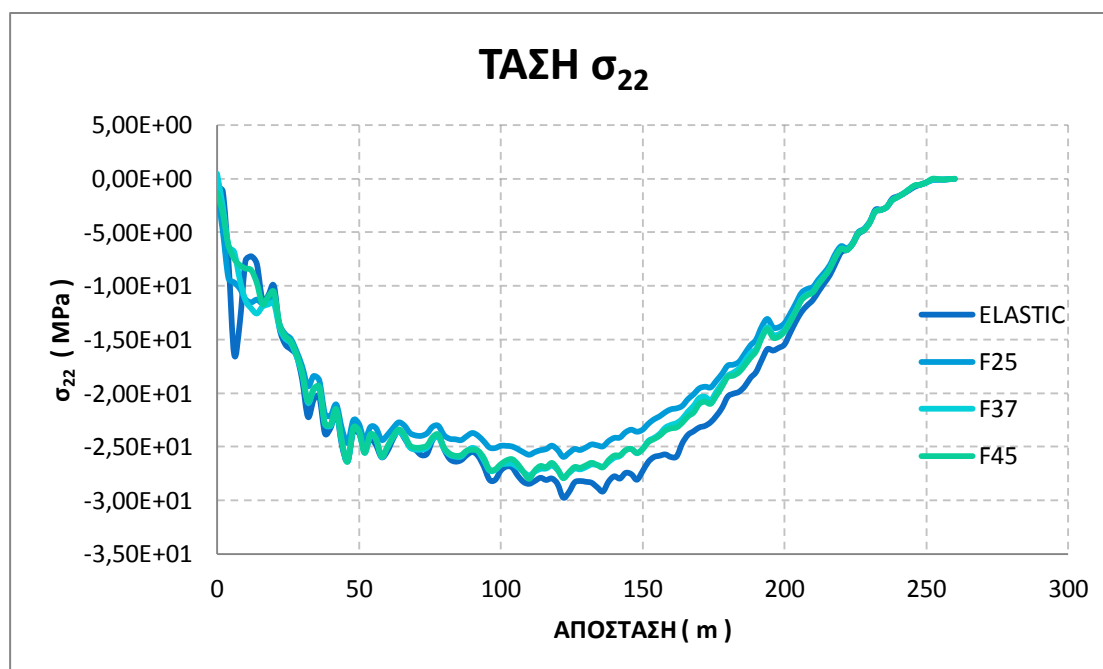
σύγκλιση των τιμών της τάσης που αναπτύσσονται στο ελαστικό μοντέλο με αυτές που εμφανίζονται στα διαφορετικής αντοχής σκυροδέματα. Μπορεί να σημειωθεί ότι μόνο στα πρώτα 25 m περίπου οι τάσεις σ_1 που παρατηρηθήκαν στα επιμέρους ινοπλισμένα σκυροδέματα απέχουν από τις τιμές για το ελαστικό μοντέλο.

2.2.3 $S_{22} = \sigma_{22}$ (MPa)

Σχήμα 20 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΟΡΘΗΣ ΤΑΣΗΣ σ_{22} ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ 1 m ΣΤΗ ΣΤΕΨΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Η κατακόρυφη ορθή τάση σ_{22} μετά την πλήρωση της λεκάνης και την επιβολή κατακόρυφης συνίζησης 1 m στη στέψη του φράγματος, παρουσιάζεται στο Σχήμα 20. Η τάση αυτή είναι κατά κύριο λόγο θλιπτική με μέγιστη τιμή θλίψης 25.9 MPa για σκυρόδεμα με θλιπτική αντοχή 25 MPa, ενισχυμένο με ίνες χάλυβα. Οι τιμές για τη σ_{22} είναι όμοιες με αυτές για τη σ_3 για όλες τις αντοχές ινοπλισμένου με χάλυβα σκυροδέματος.

Στο Σχήμα 21 φαίνεται η μεταβολή των τιμών της κατακόρυφης τάσης σ_{22} κατά μήκος της ανάντη πλάκας του φράγματος για τις διάφορες αντοχές ινοπλισμένου σκυροδέματος που εξετάζονται και για το ελαστικό μοντέλο.



Σχήμα 21 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ σ_{22} ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ 1 m ΣΤΗ ΣΤΕΨΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

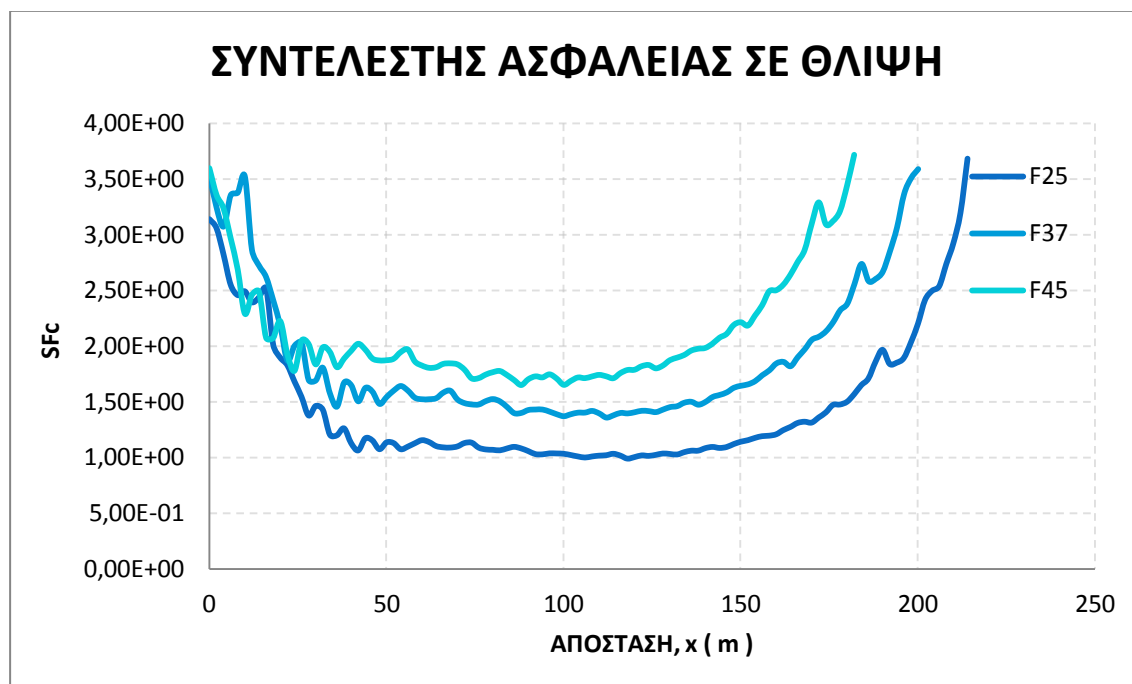
Στο παραπάνω σχήμα, εμφανίζονται τα εξής σύμβολα :

- F25 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 25 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- F37 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 37 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- F45 : σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής ίσης προς 45 MPa, ενισχυμένο με ίνες
- E : σκυρόδεμα με ελαστική συμπεριφορά

Από τα αποτελέσματα του Σχήματος 21 προκύπτει ότι τα αποτελέσματα για την τάση σ_{22} είναι όμοια με αυτά για την ελάχιστη κύρια τάση σ_3 . Συνεπώς δε χρειάζεται περαιτέρω σχολιασμός από αυτόν για τη σ_3 .

2.2.4 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ (SF_c)

Ο συντελεστής ασφαλείας σε θλίψη, στο στάδιο αυτό, για τις διάφορες αντοχές σκυροδεμάτων είναι :



Σχήμα 22 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ 1 m ΣΤΗ ΣΤΕΨΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Όπως και στο στάδιο 3, έτσι και στο στάδιο 4, κατά το οποίο επιβάλλεται δυναμική καθίζηση 1 m στη στέψη του φράγματος, το γενικό επίπεδο των τιμών είναι υψηλότερο για το συντελεστή ασφαλείας του σκυροδέματος με αντοχή 45 MPa, ενισχυμένο με ίνες, συγκρινόμενο με αυτό των άλλων δύο σκυροδεμάτων διαφορετικών αντοχών. Αυτό ισχύει τόσο σε θλίψη όσο και σε εφελκυσμό. Από την παρατήρηση αυτή, η οποία είναι κοινή για τα δύο τελευταία στάδια ολοκλήρωσης της κατασκευής του φράγματος, θα μπορούσε να σημειωθεί ότι το ινοπλισμένο σκυρόδεμα αντοχής 45 MPa με ίνες χάλυβα περιεκτικότητας 2.5 % είναι το πιο κατάλληλο από τα τρία εξεταζόμενα για την κατασκευή της ανάντη πλάκας του φράγματος λιθορριπής. Όμως, η καταλληλότητα ενός υλικού ως δομικό υλικό για την υλοποίηση ενός έργου εξαρτάται και από τον παράγοντα κόστος. Πρέπει να εξετάζεται αν αποτελεί οικονομικά συμφέρουσα επιλογή.

Κεφάλαιο 6 :

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα τεχνολογικά προηγμένο, σύνθετο δομικό υλικό το οποίο επιδεικνύει σημαντικές ιδιότητες οι οποίες το καθιστούν ένα πολύ χρήσιμο υλικό σε εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις. Η επιρροή των ινών στην αντοχή του σκυροδέματος δεν είναι το χαρακτηριστικό το οποίο συνιστά τη σπουδαιότητα του υλικού αυτού, αλλά η βελτιωμένη πλάστιμη συμπεριφορά του. Έχει την ικανότητα να απορροφά πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας κατά τη διάρκεια ανακυκλιζόμενης φόρτισης, έως και σαράντα φορές μεγαλύτερα απ' ό, τι το απλό σκυρόδεμα, με αποτέλεσμα τη μείωση των διευρυμένων ρηγματώσεων και των βλαβών στην κατασκευή την οποία συνιστά.

Οι τελικές ιδιότητες του ενισχυμένου αυτού σκυροδέματος εξαρτώνται από την περιεκτικότητά του σε ίνες. Υπάρχει όμως ένα βέλτιστο ποσοστό ινών το οποίο εξασφαλίζει την μέγιστη απόδοση του υλικού. Πολύ μεγάλος όγκος ινών προκαλεί προβλήματα, τροποποιεί τη συμπεριφορά του υλικού και τελικά δεν του προσδίδει τις επιθυμητές ιδιότητες. Για τον λόγο αυτό συνιστώνται ανώτατα όρια του ποσοστού των ινών, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση του σκυροδέματος.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα υλικά ως ίνες ενίσχυσης του σκυροδέματος, όπως το γυαλί, το προπυλένιο, ανακυκλώσιμες ίνες και πρωτίστως ο χάλυβας του οποίου η συνεργασία με το σκυρόδεμα είναι δοκιμασμένη στο χρόνο, καθώς όλες οι κατασκευές αποτελούνται από ράβδους σιδηρού οπλισμού. Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα εξετάστηκε και στην παρούσα διπλωματική εργασία, με εφαρμογή την κατασκευή της ανάντη πλάκας σκυροδέματος φράγματος λιθορριπής.

Αρχικά εξετάσθηκε η συμπεριφορά του ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος σε δοκίμια κυλινδρικά ή κυβικά τα οποία υφίστανται εφελκυστικές, θλιπτικές, καθώς και δοκοί σε καμπτικές στατικές φορτίσεις. Εν συνεχεία, εξετάσθηκαν καταστατικές σχέσεις που προκύπτουν από τα πειράματα, περιγράφουν συμπεριφορά του υλικού αυτού και είναι ενσωματωμένες σε αριθμητικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2011).

Το βασικό αντικείμενο της διπλωματικής είναι η διερεύνηση ενός απειρομήκους φράγματος λιθορριπής με ανάντη πλάκα ινοπλισμένου σκυροδέματος. Με τη χρήση υπολογιστικού προγράμματος ABAQUS προσομοιώθηκε σταδιακή κατασκευή και φόρτιση του φράγματος, και προσδιορίστηκε η καταπόνηση της ανάντη πλάκας ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Η επιλογή απειρομήκους φράγματος έγινε για λόγους ευκολίας της ανάλυσης. Όμως τα απειρομήκη φράγματα αυτά παρουσιάζουν μία σημαντικά μικρότερη δυσκαμψία σε σχέση με τα φράγματα σε στενή κοιλάδα, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη σημαντικών τάσεων και άλλων μηχανισμών καταπόνησης σε σχέση με τα φράγματα σε στενή κοιλάδα.

Εξετάσθηκαν τρεις περιπτώσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος, με αντοχή σε θλίψη αντίστοιχα 31 MPa (25 MPa αντοχή άοπλου σκυροδέματος), 43 MPa (37 MPa αντοχή άοπλου σκυροδέματος), και 51 MPa (45 MPa αντοχή άοπλου σκυροδέματος). Επίσης, εξετάσθηκαν δύο στάδια ανάλυσης: (α) το στάδιο της πλήρωσης της λεκάνης του φράγματος με νερό μέχρι τα 148 m και (β) το στάδιο τεχνητής επιβολής «δυναμικής καθίζησης» 1 m στη στέψη του φράγματος. Απώτερος σκοπός της μελέτης είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων για το υλικό αυτό, ώστε να ελεγχθεί η μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας όχι μόνο στη στατική φόρτιση αλλά και σε αναμενόμενες δυναμικές φορτίσεις, με βάση την υπάρχουσα εμπειρία.

Η απόκριση της πλάκας του ινοπλισμένου σκυροδέματος περιγράφεται με την ελάχιστη και μέγιστη κύρια τάση, την κατακόρυφη ορθή τάση σε κατεύθυνση παράλληλη με τον επιμήκη άξονα της πλάκας, και την κατακόρυφη μετατόπιση για τις διάφορες αντοχές σκυροδέματος.

Παρατηρήθηκε ότι μέγιστη θλίψη στην περιοχή από 30 μ έως 150 περίπου μέτρα από το πόδα της πλάκας. Οι σχετικά χαμηλές τιμές του συντελεστή ασφαλείας σε θλίψη για το φράγμα αυτό για το σκυρόδεμα με την μικρότερη αντοχή οφείλονται στο ότι η αποκλίνουσα τάση σ_1 - σ_3 σε ένα (ιδεατό) απειρομήκες φράγμα είναι μεγαλύτερη λόγω έλλειψης ορθής τάσης στην κατά μήκος κατεύθυνση του φράγματος. Η χρήση ινοπλισμένου (ή και άοπλου) σκυροδέματος μεγαλύτερης αντοχής είναι δυνατόν να δώσει σημαντικά ενισχυμένους συντελεστές ασφαλείας. Για όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται εφελκυστική τάση και ρηγμάτωση μικρής έκτασης στον πόδα της πλάκας. Ατυχώς, η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με αντίστοιχα από άοπλο σκυρόδεμα δεν ήταν δυνατή, λόγω της αριθμητικής αστάθειας που προκύπτει από την ρεαλιστική προσομοίωση της απότομης μείωσης της αντοχής (χαλάρωσης) του άοπλου σκυροδέματος που έχει πολύ μικρή πλαστικότητα.

Μία πιο ρεαλιστική θεώρηση του συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε φράγματα με ανάντη πλάκα είναι δυνατόν να διεξαχθεί με μία 3D ανάλυση λαμβάνοντας υπόψη την γεωμετρία της κοιλάδας.

Κεφάλαιο 7 :

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ντακούλας Π. (2010) « Επίδραση Διαμήκους Σεισμικής Διέγερσης στην Συμπεριφορά της Ανάντη Πλάκας Σκυροδέματος Λιθόρριπτων Φραγμάτων », 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος, Οκτ. 2010 .
2. Ντακούλας, Π., (2010) « Επίδραση της δυσκαμψίας της λιθορριπής στην συμπεριφορά φραγμάτων με ανάντη πλάκα σκυροδέματος », 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος, Οκτ. 2010.
3. Π. Ντακούλας, Γ. Θανόπουλος, Κ. Αναστασόπουλος (2008) « Μη γραμμική 3Δ προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής και πλήρωσης του Φράγματος Μεσοχώρας», 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Φραγμάτων, ΤΕΕ, Λάρισα 2008, 315-327 .
4. Jeeho Lee, Gregory L. Fenves (1998) « A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams » Earthquake Engineering and Structural Dynamics 27, 937 – 956.
5. M.C. Nataraja, N. Dhang, A.P. Gupta (1999) « Stress – strain curves for steel – fiber reinforced concrete under compression », Cement & Concrete Composites, 21, 383 – 390.
6. Francesco Bencardino, Lidia Rizzuti, Giuseppe Spadea, Ramnath N. Swamy (2008) « Stress – Strain Behavior of Steel Fiber – Reinforced Concrete in Compression », Journal of Materials in Civil Engineering ASCE, Vol. 20, No. 3, 255–263.
7. Παγάνης Λ.Κ. , Αγιουτάντης Ζ. , Μαυριγιαννάκης Σ. , Στειακάκης Χ. « Μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος με πιθανές εφαρμογές του στην υποστήριξη υπόγειων τεχνικών έργων », 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος, Οκτ. 2010.

8. Σταυρόπουλος Φώτιος (2007) « Σεισμική ενίσχυση μέσω περισφιγξης υποστηλωμάτων σκυροδέματος με πλέγματα συνεχών ινών σε ανόργανη μήτρα », Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.
9. Βρεττού Ιωάννη (2009) « Καμπτική ενίσχυση υποστηλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά και χρήση αφκυρίων σύνθετων υλικών τύπου θυσάνου » Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.
10. Martin Wieland (2009) « Concrete face rockfill dams in highly seismic regions », The 1st International Symposium on Rockfill Dams (Chengdu, China 2009).
11. Γιαννόπουλος Π. Ι. (2003) « Πλαστιμότητα κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα », 14^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, Κως, Οκτ. 2003.
12. R. D. Neves and J. C. O. Fernandes de Almeida (2005) « Compressive behavior of steel fibre reinforced concrete », Structural Concrete, 6, No 1, 1 – 8.
13. Norihiko Kurihara, Minoru Kunieda, Toshiro Kamada, Yuichi Uchida, Keitetsu Rokugo (2000) « Tension softening diagrams and evaluation of properties of steel fiber reinforced concrete » Engineering Fracture Mechanics, 65, 235 – 245.
14. Δήμητρα Β. Σουλιώτη, Θεόδωρος Ε. Ματίκας (2009) « Επίδραση των Χαλύβδινων Ινών στις Μηχανικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος, 16^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Πάφος, Κύπρος.
15. T. Desai, R. Shah, A. Peled, B. Mobasher (2003) « Mechanical Properties of Concrete with AR – Glass Fibers » Πρακτικά από : 7th International Symposium on Brittle Matrix Composites (BMC7), Warsaw pp. 223 – 232.
16. P.S. Song, S. Hwang (2004) « Mechanical properties of high – strength steel fiber – reinforced concrete » Construction and Building Materials, 18, 669 – 679.
17. « Physical properties of GFRC » Stonewear, Διαδικτυακή Πηγή, link:<http://www.stonewear.com> .

18. L. J. Sluys, R. de Borst (1996) « Failure in plain and reinforced concrete – an analysis of crack width and crack spacing » Inf. J. Solids Structures Vol. 33, No. 2S22, 3251-3276.
19. Payman Ameen, Mikael Szymanski (2006) «Fatigue in Plain Concrete», Master’s Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2006 : 5.
20. Mohamed S. Issa, Ibrahim M. Metwally, Sherif M. Elzeiny (2011) « Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars », Engineering Structures, 33, 1754 – 1763.
21. A. M. Alhozaimy, P. Soroushiad, F. Mirza (1996) « Cement and Concrete Composites », Vol. 34, 85 – 92.
22. Zengzhi Sun, Qinwu Xu (2009) « Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete », Materials Science and Engineering, A527, 198 – 204.
23. P.S. Song, S. Hwang, B.C. Sheu (2004) « Strength properties of nylon – polypropylene – fiber – reinforced concretes », Cement and Concrete Research, 35, 1546 – 1550.
24. Li Bei-xing, Chen Ming-xiang, Cheng Fang, Liu Lu-ping (2004) « The mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete » Journal of Wuhan University of Technology, Vol. 19, No 3, 68 -71.
25. Ν. Μαρκαντωνάτος, Κ. Δεμαρτίνοσ (2003) « Ινοπλισμένο σκυρόδεμα – συμπεριφορά SFRC υπό φόρτιση και πιθανότητα σε διάτμηση δικών (προσέγγιση με τη μηχανική των θραύσεων) », Πρακτικά από 9^ο Φοιτητικό Συνέδριο « Επισκευές – Ενισχύσεις Κατασκευών – 03 », Πάτρα.
26. Duncan J. M. and C. Y. Chang, (1970) « Nonlinear analysis of stress and strain in soils », J. of Soil Mech. And Found. Engineering, ASCE, 96(5), 1629-1653.
27. ABAQUS (2011) : Users’ Manual, Version 6.7, Simulia, Providence, RI, USA.
28. Clough, G. W., (1984) « Users’ Manual for Program SOILSTRUCT », Virginia Polytechnic Institute and State University, Blackburg, Virginia.

29. Dakoulas, P., (2007) « Messochora CFR Dam: slab and dam performance during reservoir filling based on 3D nonlinear analysis », Research Report, Dept. of Civil Engineering, University of Thessaly, Volos, Greece.
30. Duncan J. M. and Byrne, P, Wong, K. and Mabry P. (1980) « Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses », Report UCB/GT/80-01, University of California, Berkeley, CA, USA.