



ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Βαθμονόμηση Μοντέλων Προσομοίωσης Μελών Τυπικού
Κτιρίου από Ο/Σ με Πυλωτή Σχεδιασμένου πριν το 1985**

**Calibration of Structural Members Behavior Models for
Typical R/C Building with Pilotis Designed prior to 1985**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΤΣΟΠΕΛΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΒΟΛΟΣ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ «ΜΑΛΑΚΟΥ ΟΡΟΦΟΥ» – ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΡΥΑΥΜΟΚΟ	7
1.1 Το πρόβλημα του μαλακού ορόφου	7
1.2 Μέθοδοι ενίσχυσης μαλακού ορόφου	10
1.2.1 Ενίσχυση πλαισίων με περιμετρικά τοιχώματα.....	11
1.2.2. Ενίσχυση πλαισίων από Ο/Σ με μεταλλικούς συνδέσμους δυσκαμψίας	11
1.3 Αντικείμενο της μελέτης	12
1.4 Λογισμικό ΡΥΑΥΜΟΚΟ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΣΕΩΝ.....	15
2.1 Εισαγωγή	15
2.2 Μοντέλο «Double Strut»	16
2.2.1 Ανάπτυξη αναλυτικού μοντέλου προσομοίωσης των τοιχοπληρώσεων	16
2.2.2 Συμπεριφορά αναλυτικού μοντέλου σε πολλούς «κύκλους» ανακυκλιζόμενης φόρτισης	19
2.3 Μοντέλο Panel Element.....	21
2.3.1 Ανάπτυξη αναλυτικού μοντέλου προσομοίωσης των τοιχοπληρώσεων	21
2.3.2 Συμπεριφορά αναλυτικού μοντέλου σε πολλούς «κύκλους» ανακυκλιζόμενης φόρτισης	26
2.4 Σύγκριση συμπεριφοράς των δύο μοντέλων τοιχοπλήρωσης του πλαισίου υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ «ΓΥΜΝΟΥ» ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΚΑΙ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΜΕ ΧΙΑΣΤΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΣΤΑΤΙΚΗ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	31
3.1 Διαθέσιμα Πειραματικά Αποτελέσματα «γυμνού πλαισίου»	31
3.2 Μοντέλο απλού πλαισίου στο ΡΥΑΥΜΟΚΟ	36
3.2.1 Ανάπτυξη αναλυτικού μοντέλου προσομοίωσης των υποστυλωμάτων	36
3.2.2. Αναλυτικό μοντέλο για την προσομοίωση της δοκού	39
3.3 Σύγκριση πειραματικής και αναλυτικής συμπεριφοράς απλού πλαισίου κάτω από ανακυκλική στατική φόρτιση	40
3.4 Συμπεριφορά αναλυτικού μοντέλου σε πολλούς «κύκλους» ανακυκλιζόμενης φόρτισης – Απομείωση αντοχής.....	44

3.5 Διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα πλαισίου ενισχυμένου με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους	45
3.5.1 Πειραματικά αποτελέσματα 1 ^{ου} συστήματος Χ-συνδέσμων (L20x3)	46
3.5.2 Πειραματικά αποτελέσματα 2 ^{ου} συστήματος Χ-συνδέσμων (2L20x3/5).....	55
3.5.3. Πειραματικά αποτελέσματα 3 ^{ου} συστήματος Χ-συνδέσμων (L25x3)	62
3.6 Μοντέλο πλαισίου ενισχυμένου με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους στο RUAUMOKO	65
3.6.1 Προσομοίωση του συνολικού πλαισίου	65
3.6.2 Ανάπτυξη αναλυτικού μοντέλου προσομοίωσης του 1ου συστήματος μεταλλικών συνδέσμων L20x3	66
3.6.3 Ανάπτυξη αναλυτικού μοντέλου προσομοίωσης του 2ου συστήματος μεταλλικών συνδέσμων 2L20x3/5	68
3.6.4 Ανάπτυξη αναλυτικού μοντέλου προσομοίωσης του 3ου συστήματος μεταλλικών συνδέσμων L25x3	70
3.7 Σύγκριση πειραματικής και αναλυτικής συμπεριφοράς πλαισίου ενισχυμένου με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους κάτω από ανακυκλική στατική φόρτιση	72
3.7.1 1 ^ο Σύστημα Χ-συνδέσμων (L20x3)	72
3.7.2 2 ^ο Σύστημα Χ-συνδέσμων (2L20x3/5).....	75
3.7.3 3 ^ο Σύστημα Χ-συνδέσμων (L25x3)	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	84

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ελλάδα είναι μία από τις πλέον σεισμογενείς χώρες στην Ευρώπη και οι συνέπειες που έχουν επέλθει από σεισμούς τις τελευταίες δεκαετίες είναι τεράστιες, τόσο σε ανθρώπινα θύματα, όσο και σε υλικές ζημιές στις κατασκευές. Ο πρώτος αντισεισμικός κανονισμός το 1959 εισήγαγε τη δυνατότητα υπολογισμού των σεισμικών δράσεων και σχεδιασμού των στοιχείων από Ο/Σ. Βέβαια, σε σχέση με τους σύγχρονους κανονισμούς, η διαστασιολόγηση των μελών παλαιών κατασκευών παρουσιάζει μειωμένη αντοχή. Ως αποτέλεσμα, κρίνεται απαραίτητη στις περισσότερες περιπτώσεις η ενίσχυση παλαιών κατασκευών ώστε να παρέχουν την απαιτούμενη ασφάλεια. Ένα ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα των κτιρίων της δεκαετίας του '80 είναι η ύπαρξη ενός κατώτατου μαλακού ορόφου ("Πυλωτή" ή "pilotis"), λόγω απουσίας της τοιχοποιίας πλήρωσης, προσδίδοντας πολύ μειωμένη δυσκαμψία και αντοχή σε σχέση με τους υπερκείμενους ορόφους της κατασκευής. Αυτό το πρόβλημα απαιτεί την εύρεση μιας αποδοτικής, οικονομικής και καλαίσθητης λύσης.

Μια αποδοτική προσέγγιση του ζητήματος είναι η διερεύνηση και αξιολόγηση μέσω παραμετρικών αναλύσεων της επίδρασης της χρήσης χαλύβδινων χιαστί συνδέσμων δυσκαμψίας (X- braces) ώστε να βελτιωθεί η συμπεριφορά σε σεισμό των πλαισίων παλαιών κτιρίων της δεκαετίας πριν το 1985, τα οποία αποτελούν συνολικά ένα μεγάλο μέρος των κατασκευών στην Ελλάδα.

Ο βαθμός όμως στον οποίο μια τέτοια σειρά αναλύσεων είναι ρεαλιστική εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, μεταξύ των οποίων είναι και η συμπεριφορά των αναλυτικών μοντέλων προσομοίωσης των μελών του κτιρίου που θα αναλυθεί. Πιο συγκεκριμένα, η βαθμονόμηση τέτοιων μοντέλων είναι ένα σημαντικό ζήτημα για την ορθότητα των αποτελεσμάτων μιας ανάλυσης, το οποίο αποτελεί και κεντρικό θέμα της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Με τη χρήση του λογισμικού RUAUMOKO, βαθμονομούνται τα μοντέλα που αφορούν τα μέλη ενός κτιρίου, δηλαδή την φέρουσα τοιχοποιία, που παίζει σημαντικό ρόλο στην απόκριση του κτιρίου κάτω από σεισμικές διεγέρσεις, τα υποστυλώματα από Ο/Σ και τους Χ-συνδέσμους που θα τοποθετηθούν για ενίσχυση. Όσον αφορά τα υποστυλώματα και τους χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους, τα μοντέλα βασίστηκαν σε πειραματικά αποτελέσματα για ίδιας γεωμετρίας πλαίσια, που δοκιμάστηκαν στο εργαστήριο οπλισμένου

σκυροδέματος του πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από πειράματα που έγιναν για δύο διαφορετικές διατάξεις των Χ-συνδέσμων. Για την προσομοίωση τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ανάλυση του προβλήματος του «μαλακού ορόφου» – Αντικείμενο της μελέτης – Λογισμικό RUAUMOKO

1.1 Το πρόβλημα του μαλακού ορόφου

Οποιαδήποτε ασυνέχεια του κτιρίου κατά την κατακόρυφη ή οριζόντια διεύθυνση απαιτεί αντιμετώπιση, δηλαδή κατάλληλα κατασκευαστικά μέτρα και ιδιαίτερη μελέτη. Η κλασικότερη περίπτωση είναι ο «μαλακός» όροφος, στο ισόγειο ως pilotis («πυλωτή») ή σε άλλη στάθμη, για παράδειγμα οι πάσης φύσεως εκθέσεις και καταστήματα supermarket , υποδοχή ξενοδοχείων, νοσοκομείων κλπ. Η συχνότερη περίπτωση κτιρίων με πυλωτή στην Ελλάδα είναι κτίρια πολυκατοικιών με χώρο στάθμευσης στο ισόγειο (Σχήμα 1.1.1 και Σχήμα 1.1.2).

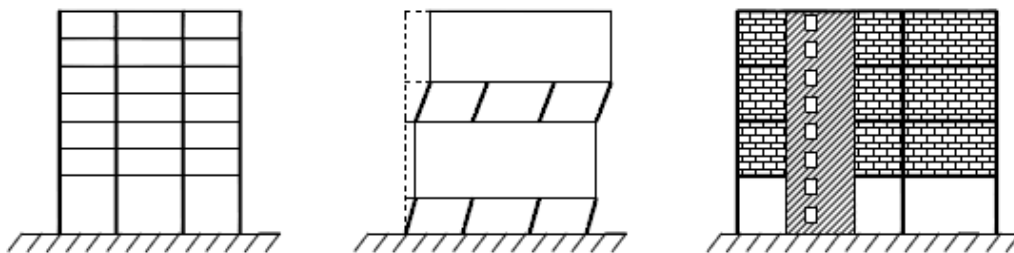


Σχήμα 1.1.1: Εξωτερική όψη πυλωτής



Σχήμα 1.1.2: Εσωτερικό πυλωτής

Με τον όρο μαλακός όροφος νοείται ο όροφος που παρουσιάζει σημαντικά μειωμένη δυσκαμψία ή αντοχή σε οριζόντια φορτία σε σχέση με τους υπόλοιπους ορόφους του κτιρίου. Αναλυτικότερα, επρόκειτο για την ύπαρξη ενός ορόφου με πολύ μειωμένη δυσκαμψία σε σχέση με τους υπερκείμενούς του, λόγω απουσίας τοιχοποιίας πλήρωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι, παρ' όλο που οι τοιχοποιίες πλήρωσης δεν αποτελούν δομικό στοιχείο του φέροντος οργανισμού, η παρουσία τους αυξάνει την δυσκαμψία των πλαισίων στα οποία εντάσσονται. Διάφορες περιπτώσεις μαλακού ορόφου παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.1.3.

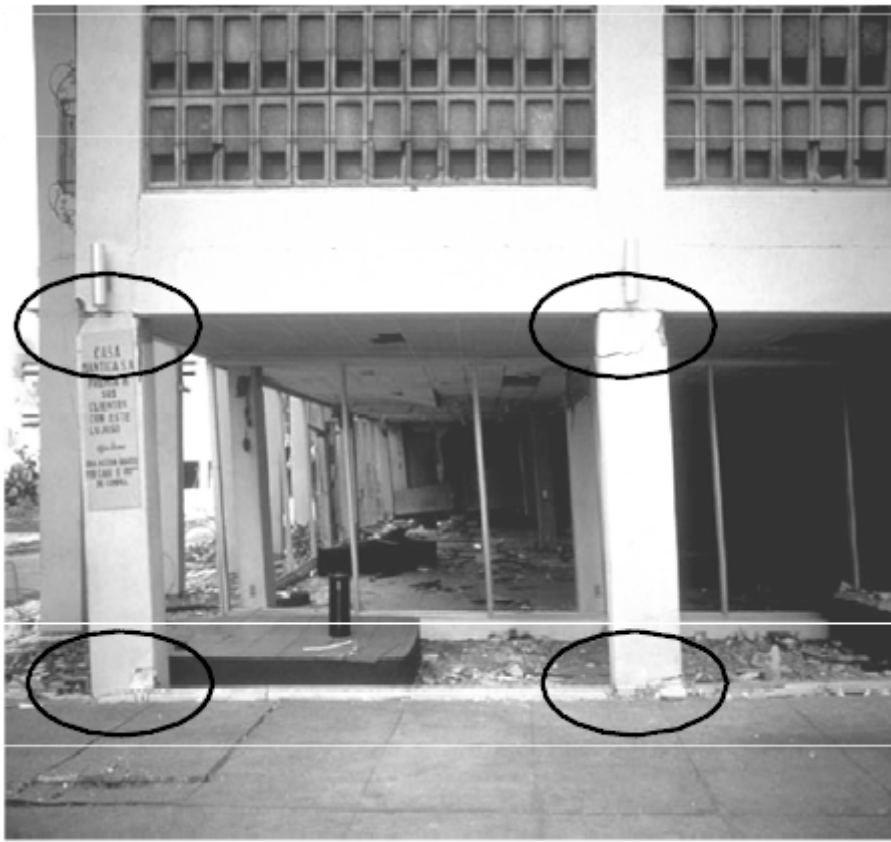


Σχήμα 1.1.3 : Κυριότεροι τύποι μαλακού ορόφου

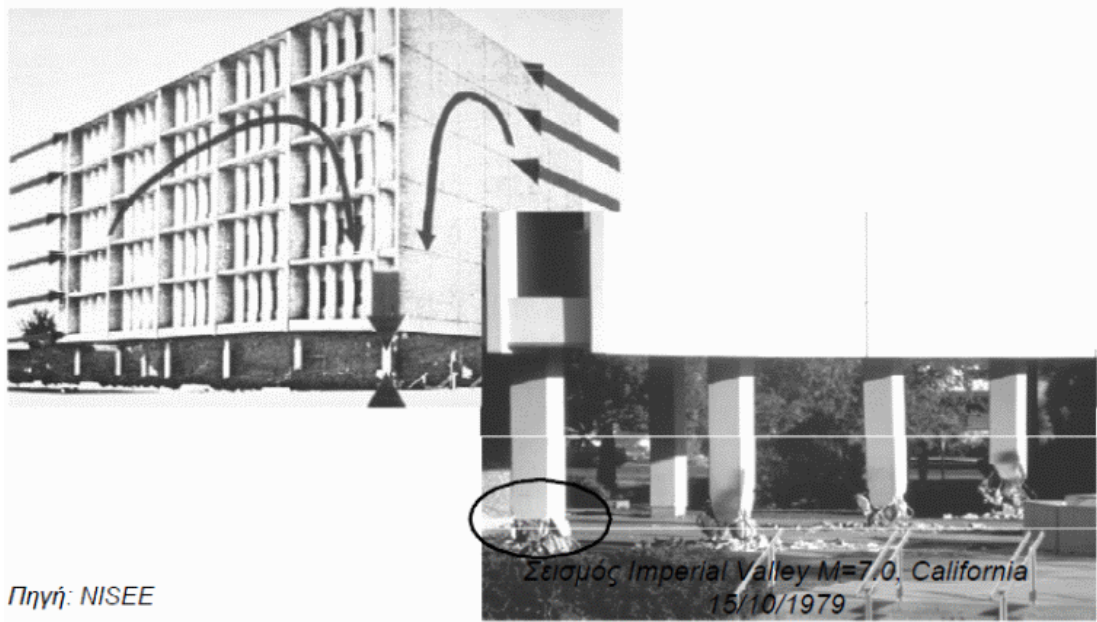
Η μορφή αστοχίας του μαλακού ορόφου είναι καμπτικού τύπου. Λόγω της σημαντικής παραμόρφωσής του σε σχέση με τους γειτονικούς ορόφους και την μεγάλη καταπόνηση των υποστυλωμάτων, επέρχεται ταυτόχρονη δημιουργία καμπτικών πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των υποστυλωμάτων του ορόφου, με

αποτέλεσμα ο όροφος να «καταρρέει». Τέτοιου είδους αστοχίες παρουσιάζονται στα Σχήματα 1.1.4 και 1.1.5.

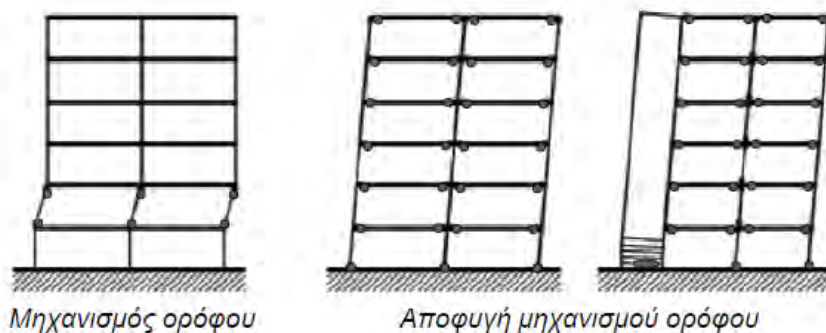
Είναι εμφανές λοιπόν πως ο συγκεκριμένος μηχανισμός αστοχίας δεν βασίζεται στην ιεραρχημένη αστοχία δομικών μελών. Γι' αυτό το λόγο οι βασικές αρχές των κανονισμών ΕΑΚ 2000 και EC8 προβλέπουν την ιεραρχημένη αστοχία δοκών προτού των υποστυλωμάτων (Ικανοτικός σχεδιασμός). Στόχος είναι ο σχηματισμός μεγάλου αριθμού πλαστικών αρθρώσεων στις δοκούς της κατασκευής, έτσι ώστε να υπάρξει μεγάλη απόσβεση της σεισμικής ενέργειας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1.6.



Σχήμα 1.1.4 : Αστοχία καμπτικού τύπου στα άκρα του υποστυλώματος του μαλακού ορόφου



Σχήμα 1.1.5 : Ζημιές υποστυλωμάτων απο το σεισμό της California του 1979



Σχήμα 1.1.6 : Αποφυγή μηχανισμού ορόφου

1.2 Μέθοδοι ενίσχυσης μαλακού ορόφου

Η ανάγκη επίλυσης του προαναφερθέντος προβλήματος, οδήγησε σε εξεύρεση «εκ των υστέρων λύσεων» (retrofit solutions) και επεμβάσεις στα κτίρια. Η εύρεση μιας βέλτιστης λύσης αποτελεί ένα πολύπλοκο πρόβλημα και είναι ακόμα αντικείμενο έντονης μελέτης. Η πυλωτή, όντας «γυμνό» πλαίσιο από Ο.Σ., ακολουθεί την εύρεση μεθόδων ενίσχυσης γυμνών πλαισίων. Μερικές από αυτές είναι η ενίσχυση με πλευρικά τοιχώματα, η τοιχοπλήρωση του μαλακού ορόφου ή η τοποθέτηση χιαστί μεταλλικών συνδέσμων δυσκαμψίας στα άκρα των υποστυλωμάτων του πλαισίου προς ενίσχυση.

1.2.1 Ενίσχυση πλαισίων με περιμετρικά τοιχώματα

Η ενίσχυση της υφιστάμενης κατασκευής με περιμετρικά τοιχώματα αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους τρόπους ενίσχυσης υφιστάμενων κτιρίων τα οποία παρέχουν χαμηλό επίπεδο ασφαλείας έναντι σεισμού. Ο ρόλος τους είναι να παραλαμβάνουν μέσω της μεγάλης δυσκαμψίας τους το μεγαλύτερο μέρος των σεισμικών δράσεων σε μία διεύθυνση. Η προσθήκη τοιχωμάτων γίνεται προς την επιδιωκόμενη διεύθυνση αύξησης της αντίστασης της κατασκευής (Αναγνωστόπουλος, 2009). Η ίδια διαδικασία χρησιμοποιείται και για την ενίσχυση παλαιότερων κτιρίων όπως κτίρια με πυλωτή. Παρά την αποδοτικότητα της μεθόδου, η ανάγκη εύρεσης μιας οικονομικότερης και πιο εύχρηστης λύσης απαιτεί τη διερεύνηση της αποδοτικότητας ενός εναλλακτικού τρόπου ενίσχυσης του μαλακού ορόφου, της ενίσχυσης πλαισίων με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους δυσκαμψίας.

1.2.2. Ενίσχυση πλαισίων από Ο/Σ με μεταλλικούς συνδέσμους δυσκαμψίας

Οι μεταλλικοί σύνδεσμοι δυσκαμψίας χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την αντοχή σε πλευρική φόρτιση πλαισίων από Ο.Σ. . Οι αξονικές δυνάμεις των συνδέσμων αναλαμβάνουν κυρίως τις σεισμικές δράσεις. Κατηγοριοποιούνται ως εξής (Λάτσος και Τουσμάνης, 2012):

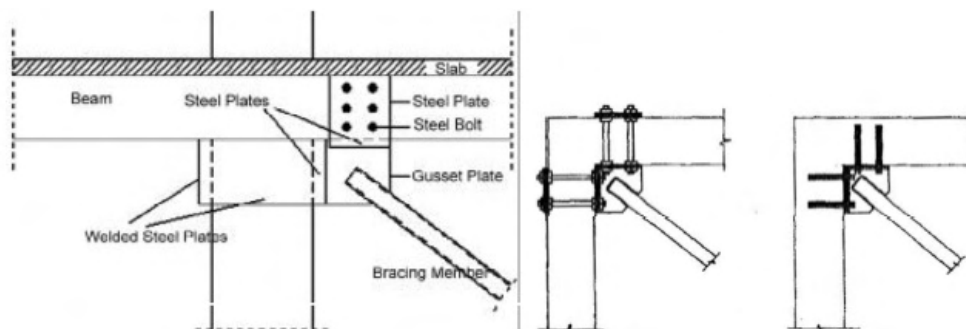
- Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των μελών με το ζύγωμα του φατνώματος σε κεντρικούς και έκκεντρους
- Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των συνδέσμων με την υφιστάμενη κατασκευή Ο.Σ. σε συνδέσμους με εξωτερική και εσωτερική σύνδεση

Η πιο συνηθισμένη μορφή ενίσχυσης πλαισίων Ο.Σ. αποτελούν οι χιαστί διαγώνιοι σύνδεσμοι . Η ανάληψη των οριζόντιων δράσεων οφείλεται στο κορμό των διαγωνίων τους. Με τη δράση εφελκυστικής δύναμης το εφελκυόμενο μέλος αναλαμβάνει το φορτίο και διαρρέει, ενώ κατά την εφαρμογή του θλιπτικού φορτίου τα μέλη παραμορφώνονται πλευρικά και σχηματίζουν πλαστική άρθρωση στο μέσον του μήκους τους, που συνεπάγεται μείωση της αντοχής τους σε θλίψη. Ακολουθεί ο λυγισμός του θλιβόμενου μέλους.

Εν γένει, η διατμητική αντοχή εντός επιπέδου ενός πλαισίου αυξάνεται σημαντικά με τη χρήση χιαστί μεταλλικών συνδέσμων. Τα προβλήματα που προκύπτουν όμως αφορούν την φτωχή μετελαστική συμπεριφορά λόγω λυγισμού των μελών και συνεπώς την ανεπιθύμητη απότομη αστοχία του μέλους, χωρίς την επιθυμητή απορρόφηση ενέργειας των σεισμικών δράσεων (Λάτσος και Τουσμάνης ,2012) .



Σχήμα 1.2.2.1 : Χ-Μεταλλικοί σύνδεσμοι δυσκαμψίας για την ενίσχυση πλαισίων από Ο.Σ.



Σχήμα 1.2.2.2 : Μορφές σύνδεσης μεταλλικών συνδέσμων

1.3 Αντικείμενο της μελέτης

Η ανάγκη διερεύνησης της αποδοτικότητας της μεθόδου ενίσχυσης πυλωτής με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους δυσκαμψίας, έναντι της κλασσικής μεθόδου ενίσχυσης με περιμετρικά τοιχώματα, αποτελεί αντικείμενο έντονης μελέτης. Τα πλεονεκτήματα αφορούν το πιθανό μικρότερο κόστος της πρώτης μεθόδου και τη δυνατότητα άμεσης αντικατάστασης των μεταλλικών συνδέσμων σε περίπτωση πρόκλησης ζημιών σε αυτούς. Η διερεύνηση θα περιελάμβανε μια σειρά παραμετρικών αναλύσεων για διάφορες διατομές των μεταλλικών συνδέσμων σε

πολυώροφα κτίρια, κάτω από προκαθορισμένες σεισμικές διεγέρσεις. Σκοπός θα ήταν, εάν αυτό είναι εφικτό, να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο ο αριθμός των πλαστικών αρθρώσεων που δημιουργούνται καθ' ύψος του κτιρίου, καθώς επίσης και να γίνει η προσπάθεια να συγκεντρωθούν στα σημεία του κτιρίου όπου υπάρχουν οι μεταλλικοί σύνδεσμοι, ώστε οι υλικές ζημιές να μην αφορούν τα μέρη του κτιρίου, αλλά τους μεταλλικούς συνδέσμους της πυλωτής, οι οποίοι είναι εύκολα αντικαταστάσιμοι. Για να αποφανθούμε όμως για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητη η εύρεση αναλυτικών μοντέλων για την προσομοίωση των μελών του κτιρίου, δηλαδή της τοιχοποιίας, των υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα και των χιαστί μεταλλικών συνδέσμων που θα τοποθετηθούν. Αυτό είναι και το κεντρικό θέμα της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι για την βαθμονόμηση των αναλυτικών μοντέλων των υποστυλωμάτων και των Χ-συνδέσμων χρησιμοποιήθηκαν αποτελέσματα από πειράματα που έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Ως υπολογιστικό βοήθημα, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RUAUMOKO 2D, για το οποίο γίνεται μια σύντομη περιγραφή στην επόμενη ενότητα που ακολουθεί.

1.4 Λογισμικό RUAUMOKO

Το πρόγραμμα Ruaumoko αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο του Canterbury της Νέας Ζηλανδίας υπό την εποπτεία του καθηγητή A. Carr. Όσον αφορά το πρόγραμμα, πραγματοποιεί πολλά είδη αναλύσεων (στατική, δυναμική, ανάλυση χρονοϊστοριών, φασματική, αλλά και pushover ή adaptive pushover κ.α.), σε δισδιάστατα ή τρισδιάστατα πλαίσια. Η προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς του μέλους πραγματοποιείται με έναν από τους 63 διαθέσιμους νόμους υστέρησης. Η μεγάλη ποικιλία των ανελαστικών προσομοιωμάτων το καθιστά πολύ χρήσιμο εργαλείο για τους αναλυτές μη γραμμικών αναλύσεων. Η εισαγωγή των δεδομένων για ανάλυση δισδιάστατων πλαισίων, γίνεται είτε μέσω βοηθητικών προγραμμάτων που παρέχονται μαζί με το κυρίως πρόγραμμα, είτε μέσω αρχείου σε κειμενογράφο, ενώ για τρισδιάστατα πλαίσια μόνο μέσω κειμενογράφου. Το Ruaumoko έχει χρησιμοποιηθεί σε όλο τον κόσμο στα δύο ιδρύματα της ακαδημαϊκής έρευνας και για επαγγελματική πρακτική. Έχει εφαρμοστεί στη μελέτη των δυναμικών επιδόσεων του σκυροδέματος, χάλυβα και ξύλου, σε κατασκευές όπως κτίρια και γέφυρες. Το πρόγραμμα έχει επίσης χρησιμοποιηθεί στην αξιολόγηση των συστημάτων σεισμικής μόνωσης και σε σεισμικές έρευνες των κτιρίων όταν υποβάλλονται σε διεγέρσεις του

εδάφους. Κανένα άλλο μη γραμμικό δυναμικό πρόγραμμα ανάλυσης αντισεισμικής μηχανικής δεν έχει τις δυνατότητες του Ruaumoko όσον αφορά τη μοντελοποίηση, τις μορφές της διέγερσης, ή υποστήριξη πρόσθετων εφαρμογών. Το Ruaumoko επιτρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα ευρύ φάσμα μεταβλητών προσομοίωσης, και αυτό είναι ένα από τα δυνατά σημεία του προγράμματος. Το Ruaumoko προσφέρει τις παρακάτω δυνατότητες:

Ruaumoko2D: Μη-γραμμική ανάλυση για κατασκευές δύο διαστάσεων.

Ruaumoko3D: Μη-γραμμική ανάλυση για τρισδιάστατες κατασκευές.

Dynaplot: Post-processor program for Ruaumoko2D and Ruaumoko3D:

Παράγει διαγράμματα των αποτελεσμάτων κόμβων και μελών καθώς και συνδυασμούς αυτών των αποτελεσμάτων. Μπορεί επίσης να παράγει φάσματα απόκρισης για κάθε κόμβο στην κατασκευή.

Combplot: A post-processor program for Dynaplot: Σχεδιασμένο να συνδυάζει τα διαγράμματα για διαφορετικές κατασκευές ή για διαφορετικές αναλύσεις σχετικά με την ίδια κατασκευή.

Hysteres: A hysteresis rule exerciser: Δημιουργεί νόμους υστέρησης. Χρησιμοποιείται επίσης για την επιλογή των παραμέτρων βρόγχου υστέρησης για να ταιριάζει με τους πειραματικούς βρόγχους.

Spectra: Παράγει ελαστικά φάσματα απόκρισης επιτάχυνσης για κάθε χρόνο-ιστορία σεισμού.

Pquake: Παράγει διαγράμματα της επιτάχυνσης συναρτήσει του χρόνου για κάθε επιτάχυνση χρόνο-ιστορίας σεισμού.

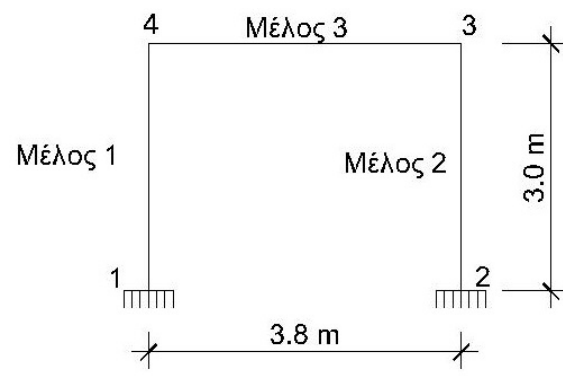
Simqke: Δημιουργεί μια τεχνητή επιτάχυνση χρόνο-ιστορίας σεισμού για ένα συγκεκριμένο φάσμα ψευδοταχυτήτων ή ένα συγκεκριμένο φάσμα επιτάχυνσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Προσομοίωση Τοιχοπληρώσεων

2.1 Εισαγωγή

Ως επί τω πλείστον, οι κατασκευές στην Ελλάδα αποτελούνται από φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα με ομοιόμορφες τοιχοπληρώσεις και ύπαρξη πυλωτής. Οι τοιχοπληρώσεις προσδίδουν αυξημένη δυσκαμψία στις κατασκευές, εμφανίζουν όμως πολλά σημαντικά μειονεκτήματα. Είναι ιδιαίτερα ασθενείς και η μορφή αστοχίας τους είναι ψαθυρού τύπου. Επιπλέον η παρουσία τους προκαλεί έντονες διαφοροποιήσεις στην απόκριση του φέροντα οργανισμού υπό σεισμικές διεγέρσεις. Ιδιαίτερα η παρουσία τους σε ανώτερους ορόφους σε συνδυασμό με την απουσία αυτών στα κατώτερα επίπεδα (ύπαρξη πυλωτής) επιφέρει το φαινόμενο δημιουργίας μηχανισμού «μαλακού» ορόφου.

Για την προσομοίωση των τοιχοπληρώσεων χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα τα οποία προγραμματίστηκαν στο λογισμικό RUAUMOKO, και θα αναλυθούν εκτενώς παρακάτω. Εν συντομία το πρώτο μοντέλο ή «**Double Strut model**» προσομοιώνει την τοιχοπλήρωση με δύο διαγώνιους συνδέσμους-ελατήρια (spring members) σε διάταξη χιαστί και το δεύτερο μοντέλο ή «**Panel Element model**» την προσομοιώνει με τέσσερις διαγώνιους μέλη-συνδέσμους(strut members) σε διάταξη χιαστί (ανά δύο παράλληλοι σύνδεσμοι) και ένα διατμητικό ελατήριο (shear spring) ανάμεσά τους. Τα μοντέλα αυτά τοποθετήθηκαν σε ένα τυπικό για τις Ελλαδικές κατασκευές, της δεκαετίας του '80, πλαίσιο από οπλισμένο σκυρόδεμα μήκους $L = 3.8 \text{ m}$ και ύψους $H = 3 \text{ m}$, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1.1.

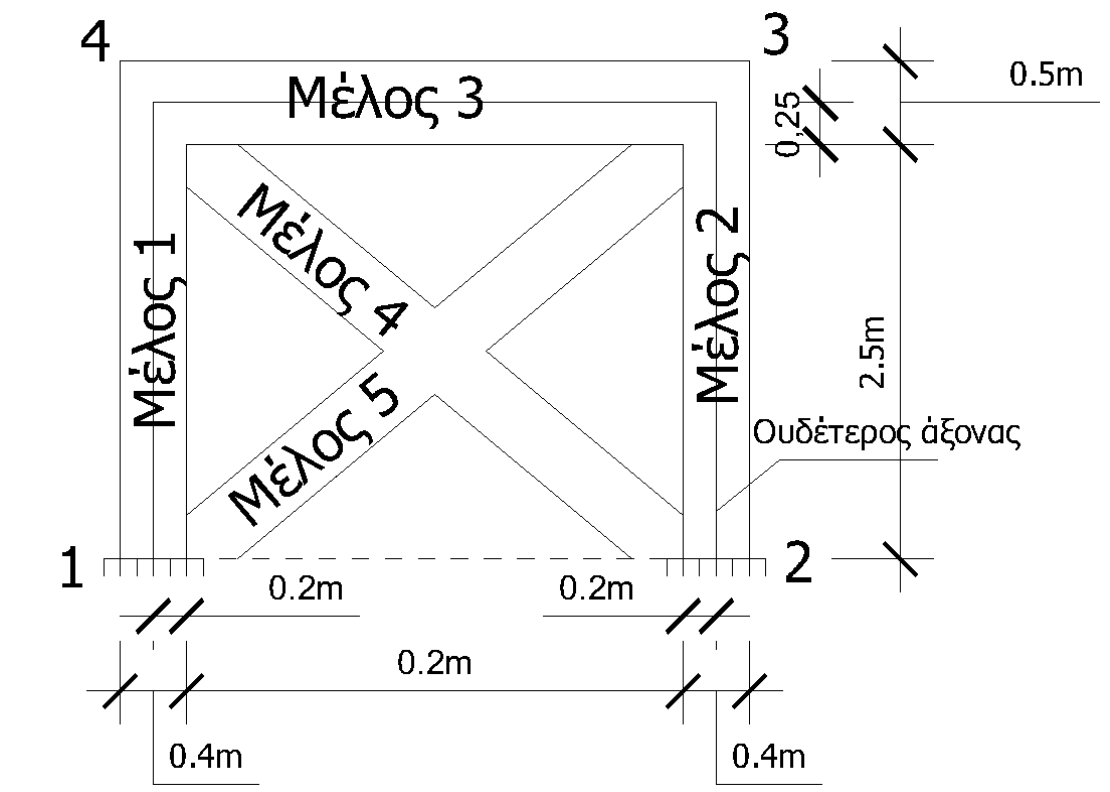


Σχήμα 2.1.1 : Πλαίσιο από οπλισμένο σκυρόδεμα το οποίο θα εφοδιαστεί με μοντέλα τοιχοπληρώσεων

2.2 Μοντέλο «Double Strut»

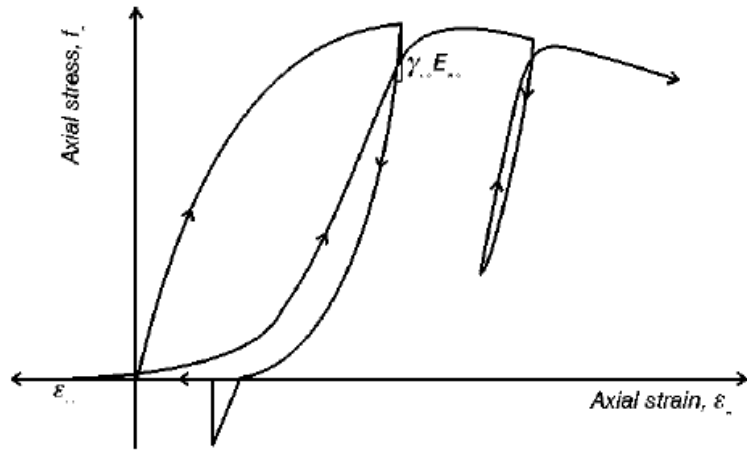
2.2.1 Ανάπτυξη αναλυτικού μοντέλου προσομοίωσης των τοιχοπληρώσεων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω για την ανάπτυξη αυτού του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν δύο σύνδεσμοι-μέλη ελατηρίου (spring members) κατά τη διεύθυνση των δύο διαγωνίων του πλαισίου, σε διάταξη χιαστί. Με αυτόν τον τρόπο προσομοιώνονται οι «διαγώνιοι θλιπτήρες» που δημιουργούνται κατά τη φόρτιση της τοιχοποιίας. Το μήκος αυτών των συνδέσμων είναι $d'_m = 4.3 \text{ m}$ και η γωνία που σχηματίζουν με το οριζόντιο επίπεδο είναι $\theta' = 39^\circ$. Αυτό συμβαίνει διότι έχουν συνυπολογιστεί το μισό του ύψους της διατομής της δοκού και το πλάτος των υποστυλωμάτων που συνθέτουν το πλαίσιο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.1.1. Η δοκός είναι διαστάσεων 20x50, τα υποστύλωματα 40x40 [b x h] (b = πλάτος, h = ύψος), με μέτρο ελαστικότητας 27.5 GPa και το πάχος της τοιχοποιίας $t_w = 0.25 \text{ m}$, που αποτελούν τυπικές διαστάσεις ενός κτιρίου σχεδιασμένο πριν από το 1985 στην Ελλάδα (Ρεπάκης, 2007).

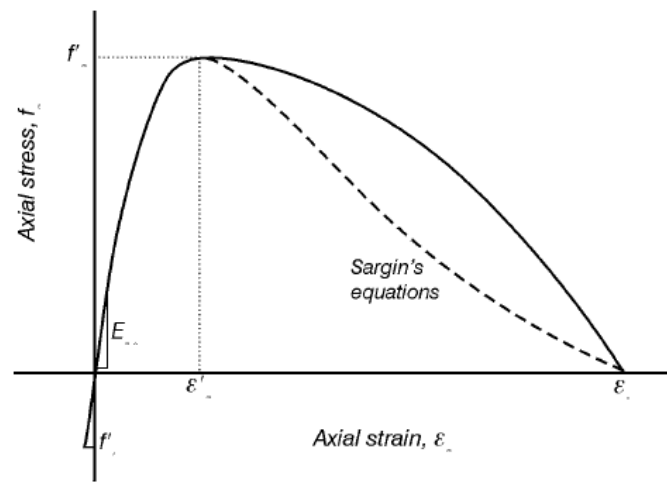


Σχήμα 2.2.1.1 : Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου που εισάχθηκε στο λογισμικό RUAUMOKO

Στο συγκεκριμένο μοντέλο τα στοιχεία ελατηρίου (spring type elements) εφοδιάστηκαν με τον νόμο υστέρησης Crisafulli (Crisafulli, 1997), που αντιστοιχεί στο νόμο υστέρησης με αριθμό 33 με βάση το «RUAUMOKO appendices» manual. Στο Σχήμα 2.2.1.2 φαίνεται ο νόμος υστέρησης Crisafulli και στο σχήμα 2.2.1.3 φαίνεται η περιβάλλουσα αντοχής των συνδέσμων.



Σχήμα 2.2.1.2 : Νόμος υστέρησης διαγωνίων συνδέσμων(diagonal struts) μοντέλου



Σχήμα 2.2.1.3 : Περιβάλλουσα αντοχής συνδέσμων μοντέλου

Οι οχτώ παράμετροι που απαιτούνται στο RUAUMOKO είναι οι FC, FT, UC, UUL, UCL, EMO, GUN, ARE που φαίνονται στον πίνακα 2.2.1.1 και εκφράζουν τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων που αφορούν τους δύο διαγώνιους συνδέσμους.

Πίνακας 2.2.1.1 : Παράμετροι σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων για κάθε σύνδεσμο

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
FC	Compressive strength (stress units)	-2500(kPa)
FT	Tensile strength (stress units)	10(kPa)
UC	Strain at FC	-0.003325
UUL	Ultimate strain	-0.06650
UCL	Closing strain	0.001000
EMO	Initial masonry modulus	1875000(kPa)
GUN	Stiffness unloading factor	1.40
ARE	Strain reloading factor	0.40

Οι τιμές FC,FT αναφέρονται στις χαρακτηριστικές τιμές ενός τυπικού κτιρίου από Ο/Σ, κτισμένου πριν από το 1985, ενώ η παράμετρος EMO ισούται με 750 φορές την FC (Ρεπάκης, 2007). Για τις παραμέτρους UC, UCL, UUL, GUN, ARE λαμβάνονται οι χαρακτηριστικές τιμές, όπως ορίζονται στη Σελίδα 59 του «RUAUMOKO appendices» manual.

Ο συγκεκριμένος νόμος υστέρησης απαιτεί και την εισαγωγή των δεδομένων για τους δύο διαγώνιους συνδέσμους του μοντέλου (strut data). Οι 4 παράμετροι που απαιτούνται στο RUAUMOKO είναι οι AREA1, AREA2, R1, R2, IENV που φαίνονται στον πίνακα 2.2.1.2.

Πίνακας 2.2.1.2 : Παράμετροι δεδομένων διαγωνίων συνδέσμων

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
AREA1	Initial strut cross-sectional area	0.0375(m ²)
AREA2	Final strut cross-sectional area	0.0375(m ²)
R1	Displacement at 1 (ΔR1)	-0.002895(m)
R2	Displacement at 2 (ΔR2)	-0.01429(m)
IENV	= 0 ; sargin stress-strain envelope descending branch = 1 ; parabolic stress-strain envelope descending branch	1

Οι παράμετροι AREA1 και AREA2 (εμβαδό διατομής των struts) ορίστηκαν ίσες, ώστε να αποφευχθεί η υπερβολική αύξηση της αντοχής της τοιχοποιίας (Σελίδα 59 «RUAUMOKO appendices» manual). Οι αρχικές τιμές ισούνται με το πάχος της τοιχοποιίας $t_w=0.25m$ επί το πλάτος της θλιβόμενης διαγωνίου της τοιχοπλήρωσης, το οποίο υπολογίζεται ως το μήκος του διαγωνίου μέλους, $d'_m= 4.3m$, επί ένα

συντελεστή 0.15, ο οποίος επιλέχθηκε μέσα στα όρια 0.1 έως 0.25, όπως ορίζονται στη Σελίδα 59 του «RUAUMOKO appendices» manual. Η τιμή αυτή σύμφωνα με την παράγραφο 7.4.1 του ΚΑΝΕΠΕ αντιστοιχεί σε στάθμη επιτελεστικότητας για «Άμεση χρήση μετά το σεισμό»(ΚΑΝΕΠΕ,2005). Οι τελικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν διαφοροποιούνται, διότι εφόσον για την προσομοίωση της τοιχοπλήρωσης στο μοντέλο “Double strut” χρησιμοποιούνται δύο ελατήρια (spring members του RUAUMOKO), οι αρχικές τιμές των AREA1 και AREA2 πρέπει να διαιρεθούν με το μήκος των διαγωνίων συνδέσμων(diagonal struts), d'_m , σύμφωνα με την σημείωση 6 (Note 6) στη Σελίδα 35 του «RUAUMOKO 2D» manual. Συνεπώς οι τελικές τιμές ισούνται με:

$$AREA1 = AREA2 = \frac{0.15 \times d'_m \times t_w}{4.3} = 0.15 \times 0.25 = 0.0375m^2 \quad (\text{Σχέση 2.2.1.1})$$

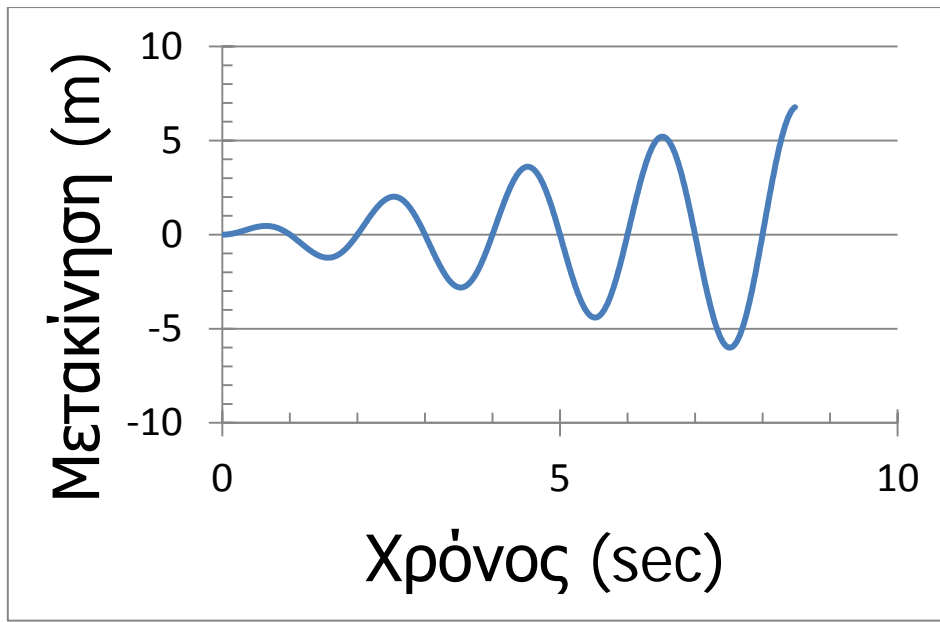
Οι παράμετροι R1,R2 ορίζονται όπως στην Σελίδα 59 του «RUAUMOKO appendices» manual.

$$R1 = \frac{UC \times d_m}{5} = \frac{-0.003325 \times 4.3}{5} = -0.002895m \quad (\text{Σχέση 2.2.1.2})$$

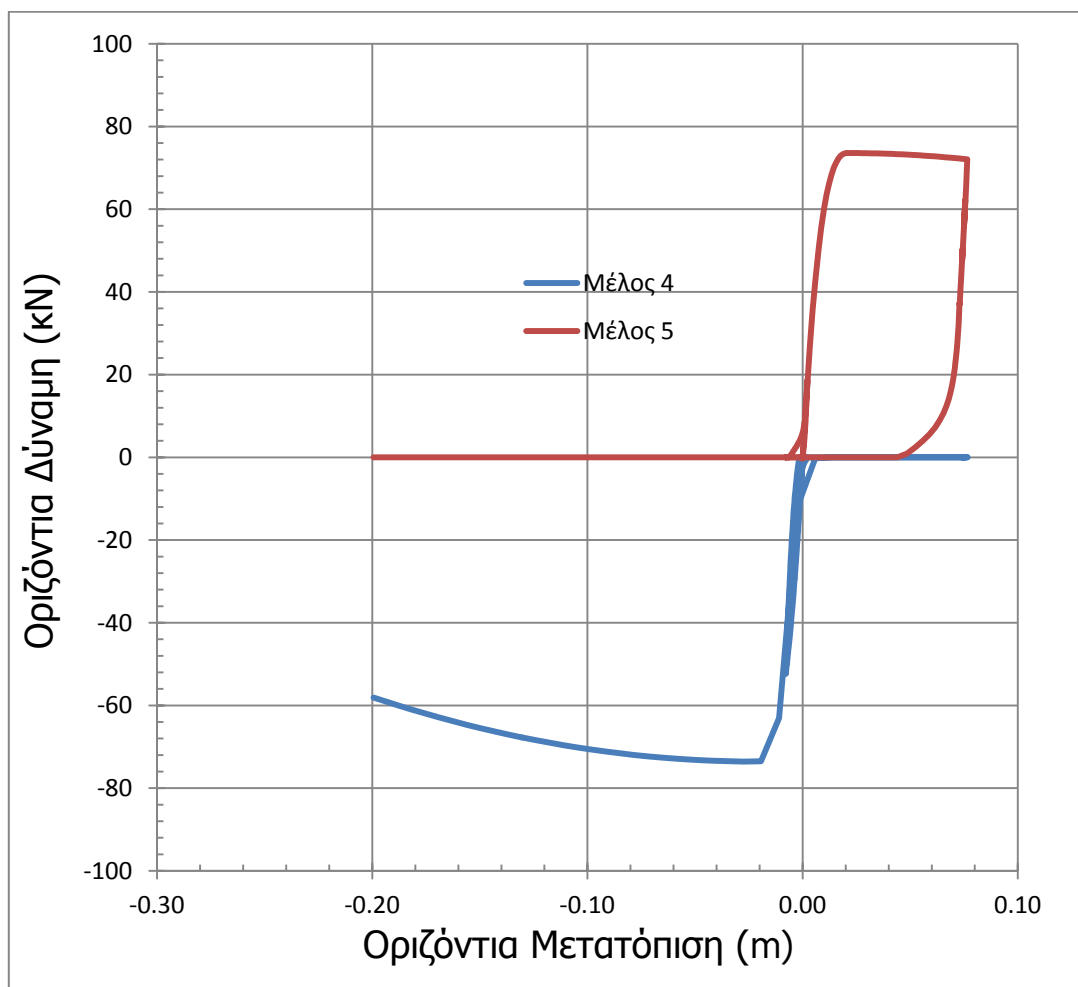
$$R2 = UC \times d'_m = -0.003325 \times 4.3 = -0.01429m \quad (\text{Σχέση 2.2.1.3})$$

2.2.2 Συμπεριφορά αναλυτικού μοντέλου σε πολλούς «κύκλους» ανακυκλιζόμενης φόρτισης

Μετά την υλοποίηση του μοντέλου μέσω του προγράμματος RUAUMOKO, αυτό υποβλήθηκε στη διέγερση που φαίνεται στο σχήμα 2.2.2.1. Η συγκεκριμένη ημιτονοειδής διέγερση επιλέχθηκε ώστε να είναι εμφανής η αναλυτική συμπεριφορά των μοντέλων και πιο «ομαλές» οι καμπύλες δύναμης μετακίνησης των αποτελεσμάτων μέχρι το πλαίσιο με τοιχοπλήρωση να αστοχήσει και να σταματήσει η ανάλυση . Προφανώς σε καμία περίπτωση η διέγερση δεν φτάνει τις μέγιστες τιμές, ούτε θα «τρέξει» για όλο το χρονικό διάστημα. Έπειτα καταγράφηκαν η δύναμη και η μετακίνηση που αναπτύχθηκαν κατά τη διεύθυνση του οριζόντιου άξονα των X σε κάθε σύνδεσμο ξεχωριστά. Αυτές φαίνονται συγκεντρωτικά στο σχήμα 2.2.2.2.



Σχήμα 2.2.2.1 : Επιβαλλόμενη μετακίνηση (πολλές ανακυκλήσεις)

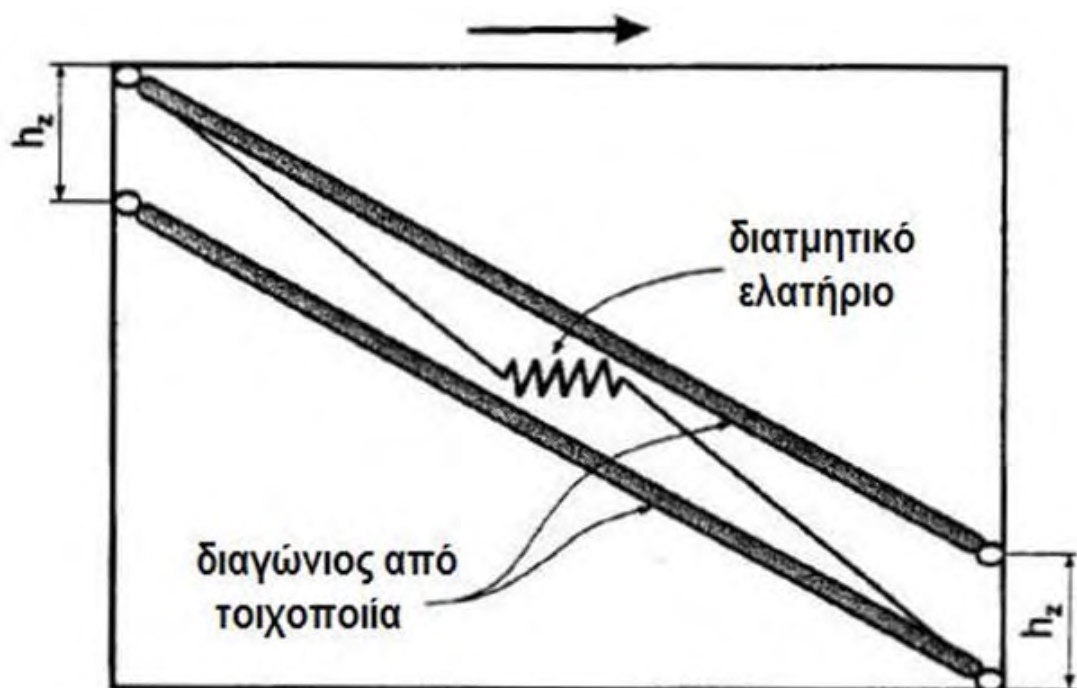


Σχήμα 2.2.2.2 : Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης κατά τον οριζόντιο άξονα (άξονα των X)

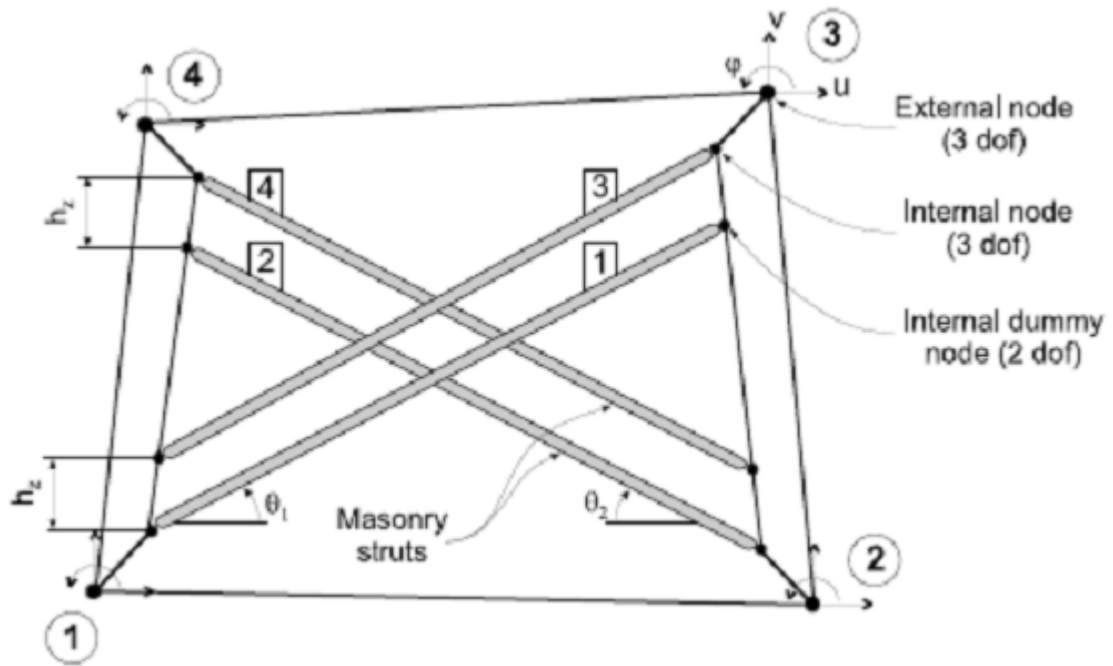
2.3 Μοντέλο Panel Element

2.3.1 Ανάπτυξη αναλυτικού μοντέλου προσομοίωσης των τοιχοπληρώσεων

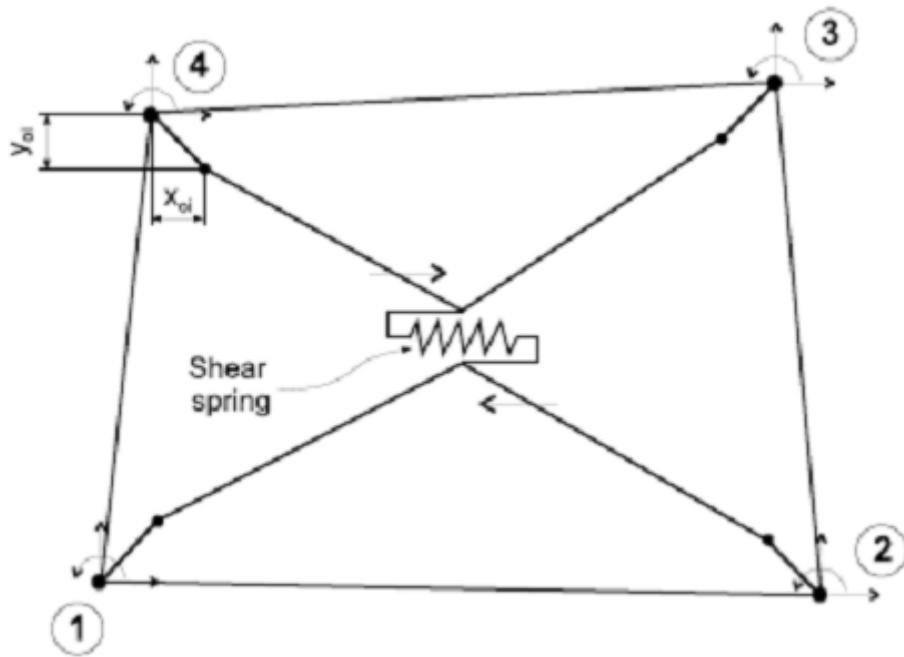
Σε αυτό το μοντέλο για την προσομοίωση των τοιχοπληρώσεων χρησιμοποιήθηκε ένα ενιαίο στοιχείο «πάνελ», το οποίο είναι σχεδιασμένο να αντικατοπτρίζει τη συμπεριφορά μιας μη οπλισμένης τοιχοπλήρωσης μέσα σε ένα πλαίσιο από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπου δεν υπάρχει κανένα κενό μεταξύ τους. Το πάνελ αποτελείται από τέσσερα μέλη-συνδέσμους (Masonry Struts- Μέλη #1 έως #4), δύο παράλληλους συνδέσμους σε κάθε διαγώνιο. Ακόμα αποτελείται από ένα διατμητικό ελατήριο (Μέλος 5) το οποίο δρα ανάμεσα στα δύο διαγώνια ζευγάρια συνδέσμων και προσομοιώνει τη διατμητική δύναμη μεταξύ των οπτόπλινθων της τοιχοποιίας. Όλα αυτά παριστάνονται αναλυτικά στα σχήματα 2.3.1.1, 2.3.1.2, 2.3.1.3. Επιπλέον στο σχήμα 2.3.1.4 φαίνεται η διαμόρφωση των εσωτερικών και εξωτερικών κόμβων του μοντέλου.



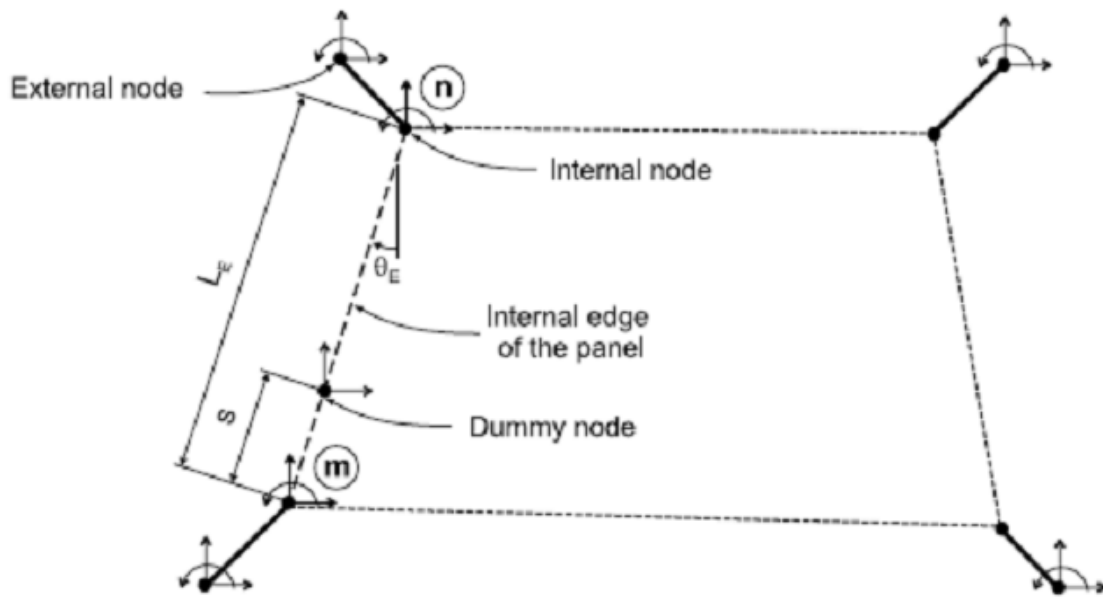
Σχήμα 2.3.1.1 : Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στο λογισμικό RUAUMOKO (απεικονίζεται μόνο το ένα από τα δύο ζευγάρια συνδέσμων που αποτελούν το μοντέλο).



Σχήμα 2.3.1.2 : Διαμόρφωση των διαγώνιων συνδέσμων τοιχοποιίας (Masonry struts- Μέλη #1έως#4) στο μοντέλο



Σχήμα 2.3.1.3 : Διαμόρφωση του διαγώνιου διατμητικού ελατηρίου (Μέλος #5) στο μοντέλο



Σχήμα 2.3.1.4 : Διαμόρφωση των εσωτερικών και εξωτερικών κόμβων του μοντέλου

Για την μοντελοποίησή του στο RUAUMOKO απαιτούνται τέσσερις βασικές πληροφορίες για το μοντέλο. Αρχικά, δίνονται δέκα παράμετροι που αφορούν τα γεωμετρικά δεδομένα των συνδέσμων-μελών #1 έως #4 του πάνελ, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.3.1.1. Αυτοί είναι οι εξής: IHYST, HZ, XO1, YO1, XO2, YO2, XO3, YO3, XO4, YO4. Οι παράμετροι XO_i και YO_i αντιπροσωπεύουν την μείωση των διαστάσεων της τοιχοπλήρωσης, λόγω της παρουσίας δοκών και υποστυλωμάτων του πλαισίου, ενώ η παράμετρος HZ καταδεικνύει την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των συνδέσμων (struts) και υπολογίζεται ως εξής (Smyrou, 2006):

$$HZ = \frac{1}{3} z \sim \frac{1}{2} z \quad (\text{Σχέση 2.3.1.1})$$

όπου

$$z = \frac{\pi}{2\lambda} \text{ και } \lambda = \sqrt[4]{\frac{EMO \times t_w \times \sin(2\theta)}{4 \times E_c \times I_c \times h_w}} \quad (\text{Σχέση 2.3.1.2})$$

Και στη σχέση 2.3.1.2 οι παράμετροι είναι οι εξής:

- EMO=1875000 kPa (Μέτρο Ελαστικότητας Τοιχοπλήρωσης Πίνακας 2.2.2.1)
- $t_w=0.25\text{m}$ (Πάχος τοιχοποιίας)
- $\theta=39^\circ$ (Γωνία που σχηματίζουν οι διαγώνιοι θλιπτήρες της τοιχοποιίας με το οριζόντιο επίπεδο)
- $E_c=27500000 \text{ kPa}$ (Υποστυλώματα από Ο/Σ)
- $I_c=0.00213 \text{ m}^4$ (Υποστυλωμάτων)

- $h_w=2.75$ m (Ύψος τοιχοπλήρωσης πλαισίου, μειωμένο κατά το ήμισυ του ύψους της δοκού)

Κατόπιν υπολογισμών, οι τελικές τιμές είναι $z=1.71$ m και $h_z=0.85$ m (αν θεωρηθεί ότι το HZ ισούται με το $1/2$ του z).

Πίνακας 2.3.1.1 : Παράμετροι γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πάνελ

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
IHYST	= 0 ; member is elastic only. = 1 ; member is inelastic (IHYST actually = 33)	1
HZ	Vertical separation between struts	0.85(m)
XO1	X distance from external node to internal node 1	0.2(m)
YO1	Y distance from external node to internal node 1	0
XO2	X distance from external node to internal node 2	-0.2(m)
YO2	Y distance from external node to internal node 2	0
XO3	X distance from external node to internal node 3	-0.2(m)
YO3	Y distance from external node to internal node 3	-0.25(m)
XO4	X distance from external node to internal node 4	0.2(m)
YO4	Y distance from external node to internal node 4	-0.25(m)

Σαν δεύτερη πληροφορία που απαιτείται εισάγονται επτά παράμετροι που αφορούν τις γενικές ιδιότητες του διατμητικού ελατηρίου (Μέλος #5) του Panel element.

Πίνακας 2.3.1.2 : Παράμετροι γενικών ιδιοτήτων του διατμητικού ελατηρίου(Μέλος 5)

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
T0	Bond shear strength T_0	0.01 (kPa)
MU	Coefficient of friction μ	0.8
TMAX	Maximum shear stress $\geq T_0$	250 (kPa)
SSF	Shear stress factor α_s	1.5
KTF	Shear stiffness factor γ_s	0.65
TH	Panel thickness t	0.25 (m)
WGT	Weight/unit volume	0

Οι παράμετροι T_0, T_{MAX}, MU μπορούν να ληφθούν από δοκιμές διάτμησης ή να οριστούν με βάση συγκεκριμένες προδιαγραφές σχεδιασμού (Smyrou, 2006). Στο

μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε έγινε η υπόθεση των τιμών αυτών μέσα σε προκαθορισμένα όρια που έχουν οριστεί από προηγούμενες μελέτες και βαθμονομήθηκαν με στόχο την προσέγγιση της αναλυτική συμπεριφορά του μοντέλου «Double Strut» που περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.2. Για τις εμπειρικές παραμέτρους SSF και KTF ορίστηκαν προτεινόμενες τιμές που έχουν οριστεί από πειραματικά αποτελέσματα, μέσα σε συγκεκριμένο εύρος τιμών (Smyrou, 2006).

Τέλος επειδή ο νόμος υστέρησης που χρησιμοποιήθηκε είναι ο #33 όπως και στο προηγούμενο μοντέλο, οι δύο τελευταίες πληροφορίες αφορούν αυτόν και περιέχουν τις ίδιες παραμέτρους με αυτούς που είδαμε στην παράγραφο 2.2.1. Οι παράμετροι αυτές απεικονίζονται στους πίνακες 2.3.1.3 και 2.3.1.4.

Πίνακας 2.3.1.3 : Παράμετροι σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων για κάθε σύνδεσμο

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
FC	Compressive strength (stress units)	-2500(kPa)
FT	Tensile strength (stress units)	10(kPa)
UC	Strain at FC	-0.003325
UUL	Ultimate strain	-0.06650
UCL	Closing strain	0.001000
EMO	Initial masonry modulus	1875000(kPa)
GUN	Stiffness unloading factor	1.40
ARE	Strain reloading factor	0.40

Πίνακας 2.3.1.4 : Παράμετροι δεδομένων διαγωνίων συνδέσμων

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
AREA1	Initial strut cross-sectional area	0.0806(m ²)
AREA2	Final strut cross-sectional area	0.0806(m ²)
R1	Displacement at 1 ($\Delta R1$)	-0.002895(m)
R2	Displacement at 2 ($\Delta R2$)	-0.01429(m)
IENV	= 0 ; sargin stress-strain envelope descending branch = 1 ; parabolic stress-strain envelope descending branch	1

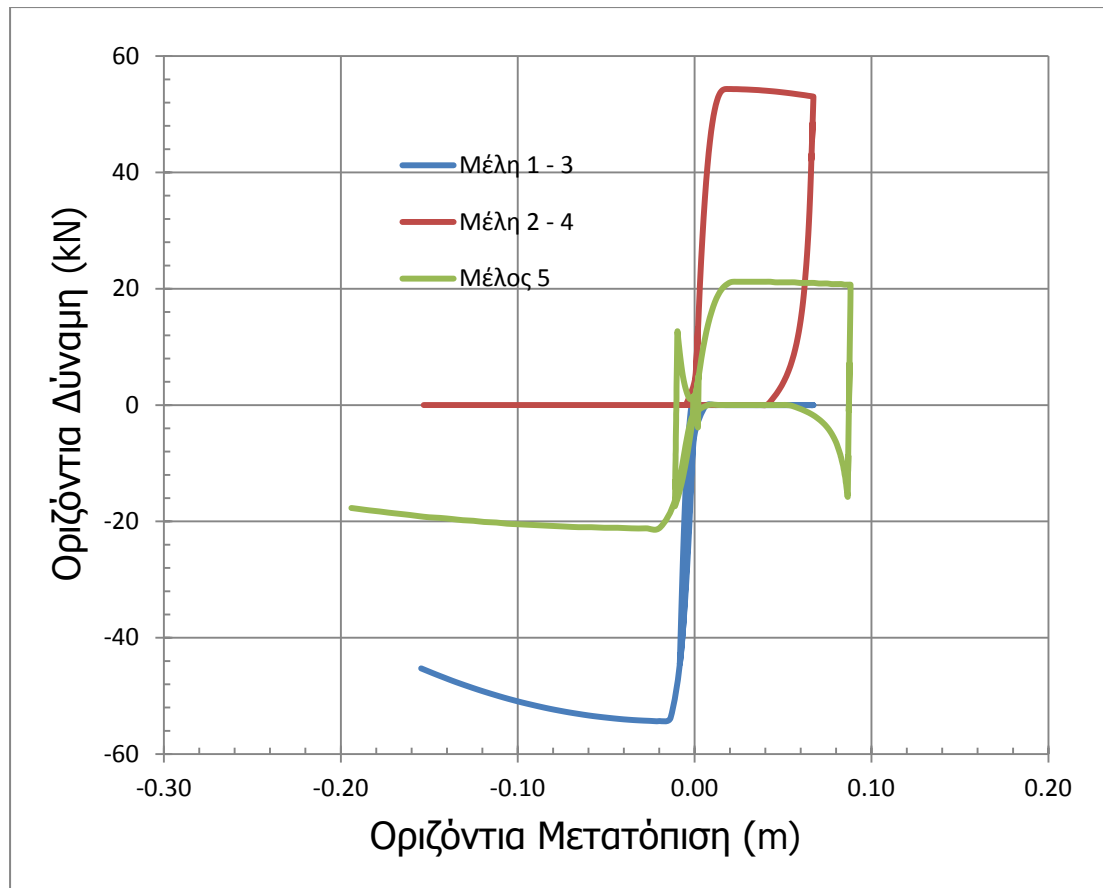
Παρατηρούμε ότι οι μόνες τιμές που διαφοροποιούνται σε σχέση με το πρώτο μοντέλο είναι αυτές των παραμέτρων που αφορούν το εμβαδόν διατομής των

συνδέσμων, AREA1 και AREA2. Αυτό συμβαίνει διότι το εμβαδόν αυτό αφορά την διατομή κάθε διαγωνίου συνδέσμου ξεχωριστά. Για το πρώτο μοντέλο το πρόγραμμα απαιτεί η τιμή του εμβαδού διατομής των συνδέσμων (AREA1,AREA2) να διαιρεθεί με το αντίστοιχο μήκος τους(d'_m). Στο παρόν μοντέλο δεν απαιτείται κάτι τέτοιο, αλλά απαιτείται να διαιρεθεί αυτό το εμβαδόν δια δύο, εφόσον στην συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε συνολικά τέσσερις συνδέσμους και όχι δύο όπως στο μοντέλο "Double Strut" που ορίζουν μια «ζώνη θλίψης». Στο RUAUMOKO ζητείται να προσδιοριστούν οι παράμετροι δεδομένων για τον κάθε ένα σύνδεσμοι εκ των 4 συνδέσμων. Συνεπώς αναλυτικά υπολογίζεται ως:

$$AREA1 = AREA2 = \frac{0.15 \times tw \times d'm}{2} = \frac{0.15 \times 0.25 \times 4.3}{2} = 0.0806m^2 \quad (\text{Σχέση 2.3.1.3})$$

2.3.2 Συμπεριφορά αναλυτικού μοντέλου σε πολλούς «κύκλους» ανακυκλιζόμενης φόρτισης

Όπως και για το πρώτο μοντέλο έτσι και στο παρόν επιβλήθηκε η ίδια διέγερση του σχήματος 2.2.2.1., ώστε τα αποτελέσματα δύναμης και μετακίνησης να είναι συγκρίσιμα. Καταγράφηκαν οι τιμές οριζόντιας δύναμης και μετακίνησης που αναπτύχθηκαν, δηλαδή η συνιστώσα της αξονικής δύναμης και μετατόπισης στον οριζόντιο άξονα των X για κάθε μέλος-σύνδεσμο ξεχωριστά και η οριζόντια δύναμη και μετατόπιση του διατμητικού ελατηρίου. Στο σχήμα 2.3.2.1. δίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα δύναμης - μετατόπισης για το διατμητικό ελατήριο(Μέλος #5) και για τα μέλη-συνδέσμους(masonry struts), έχοντας επαλληλιστεί οι δυνάμεις των συνδέσμων-μελών(masonry struts) που δρουν σε παράλληλες διευθύνσεις, δηλαδή των μελών #1 - #3 και #2 - #4 αντίστοιχα. Η αρίθμηση των μελών-συνδέσμων(Masonry struts) απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3.1.2, ενώ ως Μέλος #5 ορίζεται το διατμητικό ελατήριο(Shear Spring).

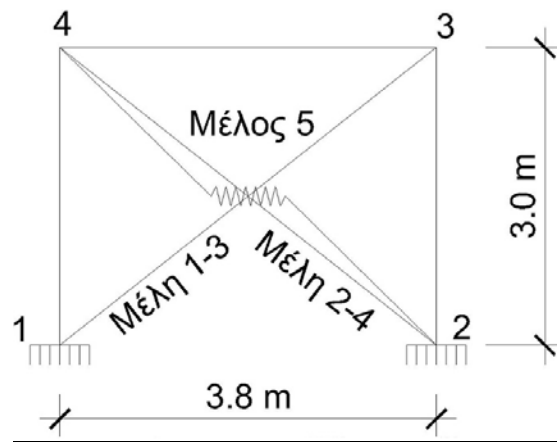


Σχήμα 2.3.2.1 : Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης κατά τον οριζόντιο άξονα

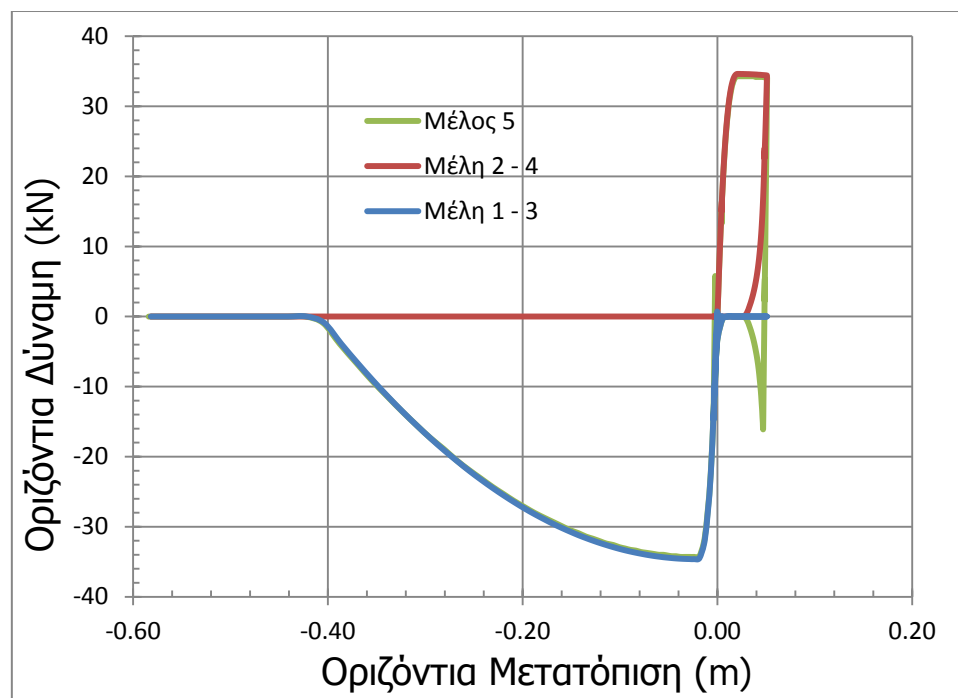
Παρατηρούμε ότι το διατμητικό ελατήριο παρουσιάζει μια απόκλιση στις μετακινήσεις σε σχέση με τα διαγώνια μέλη-συνδέσμοι, κάτι που είναι άτοπο, εφόσον όλα τα μέλη είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους στο ίδιο πλαίσιο. Αυτή η παραβίαση του συμβιβαστού των μετακινήσεων εμφανίζεται, διότι το λογισμικό RUAUMOKO μετράει τις τιμές δύναμης και μετακίνησης που αφορούν το διατμητικό ελατήριο στους εξωτερικούς κόμβους του πλαισίου, ενώ τις αντίστοιχες τιμές που αφορούν τους συνδέσμοι τοιχοποιίας τις μετράει στους εσωτερικούς κόμβους του πλαισίου, αφού αυτά είναι τα «σύνορα» των τοιχοπληρώσεων(βλ. Σχήμα 2.3.1.4 – εσωτερικοί και εξωτερικοί κόμβοι του πάνελ).

Για να εξηγηθεί αυτό το φαινόμενο, προγραμματίστηκε ένα μοντέλο , όπου θεωρήθηκε ότι και οι τέσσερις σύνδεσμοι τοιχοποιίας, αλλά και το διατμητικό ελατήριο συνδέονται στους εξωτερικούς κόμβους του πλαισίου (ουσιαστικά αφού δύο σύνδεσμοι συνδέονται σε δύο ίδιους κόμβους, ταυτίζονται, αμελώντας τις διαστάσεις του πλαισίου). Μέσω αυτής της αλλαγής έγινε εφικτό οι μετατοπίσεις των τεσσάρων συνδέσμων και του διατμητικού ελατηρίου να μετρώνται στους εξωτερικούς κόμβους του πλαισίου. Το μοντέλο αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 2.3.2.2. Το νέο μοντέλο

υποβλήθηκε στην ίδια διέγερση με τα προηγούμενα (Σχήμα 2.2.2.1) και προέκυψαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στο σχήμα 2.3.2.3. Σε αυτό το διάγραμμα, βλέπουμε ότι υπάρχει απόλυτη ταύτιση των τιμών μετακίνησης όλων των μελών.



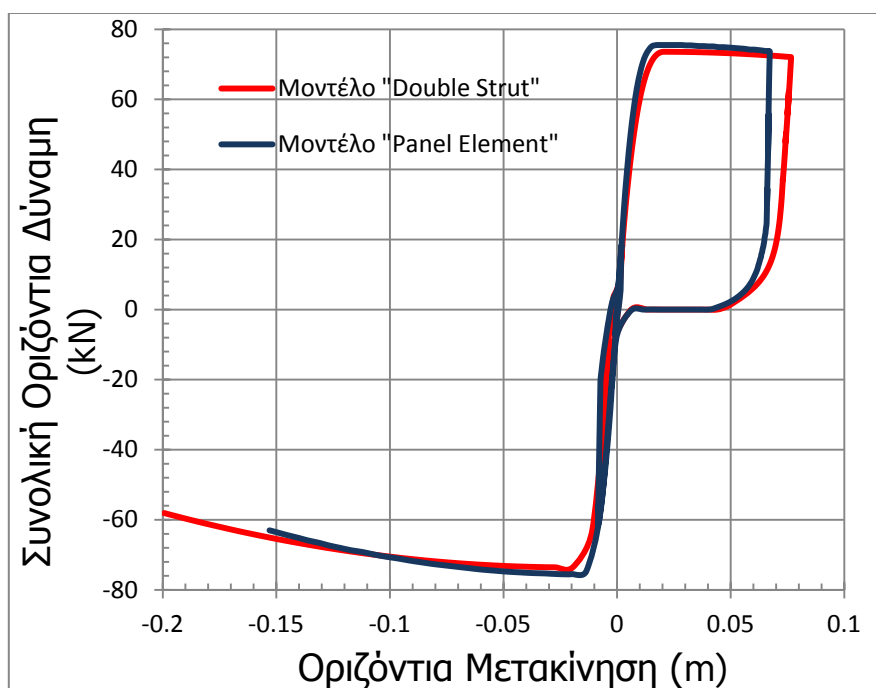
Σχήμα 2.3.2.2 : Μοντέλο «φανταστικής» γεωμετρίας, που χρησιμοποιήθηκε για την εξακρίβωση των αποτελεσμάτων του λογισμικού RUAUMOKO



Σχήμα 2.3.2.3 : Διάγραμμα δύναμης μετατόπισης κατά τον άξονα των X, έπειτα από αλλαγή θέσης μέτρησης των αποτελεσμάτων

2.4 Σύγκριση συμπεριφοράς των δύο μοντέλων τοιχοπήρωσης του πλαισίου υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Αφού λοιπόν και τα δύο μοντέλα, μετά την δημιουργία τους, υποβλήθηκαν στην ίδια ανακυκλιζόμενη φόρτιση και καταγράφηκαν η δύναμη και η μετακίνηση που αναπτύχθηκαν σε κάθε μέλος τους, τα αποτελέσματα που προέκυψαν τοποθετήθηκαν σε ένα συνολικό (αθροιστικό) διάγραμμα (σχήμα 2.4.1). Αυτό πραγματοποιήθηκε για λόγους εποπτείας και κυρίως σύγκρισης των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 2.4.1 : Συγκριτικό συνολικό διάγραμμα, δύναμης-μετακίνησης κατά τον οριζόντιο άξονα(άξονας των X) των δύο μοντέλων

Στο παραπάνω διάγραμμα η συνολική οριζόντια δύναμη του μοντέλου "Double Strut" είναι το άθροισμα των συνιστωσών των αξονικών δυνάμεων των διαγωνίων μελών #4 και #5 (Σχήμα 2.2.1.1) στον οριζόντιο άξονα. Ως οριζόντια μετακίνηση ορίστηκε η προβολή της αξονικής μετακίνησης ενός εκ των 2 μελών (Μέλους #4) στον οριζόντιο άξονα. Η συνολική οριζόντια δύναμη για το μοντέλο "Panel Element" είναι το άθροισμα των συνιστωσών των αξονικών δυνάμεων των Μελών-συνδέσμων #1 έως #4 (Σχήμα 2.3.1.2) στον οριζόντιο άξονα συν την οριζόντια (διατμητική) δύναμη του διατμητικού ελατηρίου(Μέλος #5), όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 2.3.2.1. Σημειώνεται ότι ως οριζόντια μετακίνηση του μοντέλου "Panel element" ορίστηκε η προβολή της αξονικής μετακίνησης ενός μέλους-συνδέσμου (Strut member #1 –

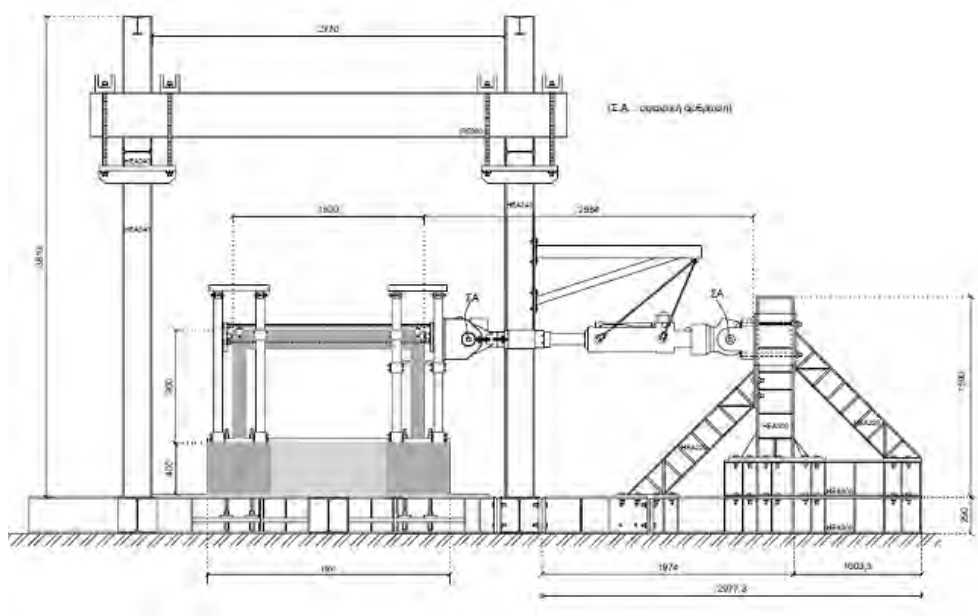
Σχήμα 2.3.1.2), παρόλο που υπάρχουν αποκλίσεις μεταξύ των μετακινήσεων των μελών-συνδέσμων #1-#4 και του διατμητικού ελατηρίου (Μέλος #5), όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 2.3.2.

Παρατηρούμε ότι οι τιμές της μέγιστης οριζόντιας δύναμης για τα δύο μοντέλα είναι παρόμοιες. Η απόκλιση που εμφανίζεται στις μετατοπίσεις αφορά την διαφορά στην εξαγωγή αποτελεσμάτων των μετατοπίσεων του RUAUMOKO για το μοντέλο "Panel Element" και "Double Strut" , λόγω αλλαγής της γεωμετρίας του κάθε μοντέλου. Όσον αφορά το μοντέλο "Double Strut" τα μέλη-σύνδεσμοι #4 και #5 συνδέονται με τους εξωτερικούς κόμβους του πλαισίου, ενώ στο μοντέλο "Panel Element" τα μέλη-σύνδεσμοι #1 έως #4 συνδέονται με εσωτερικούς κόμβους του πλαισίου(Σχήμα 2.3.1.4). Έτσι τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων των συνδέσμων εξάγονται σε διαφορετικά σημεία του πλαισίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Προσομοίωση «γυμνού» πλαισίου και πλαισίου ενισχυμένου με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους κάτω από στατική μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση

3.1 Διαθέσιμα Πειραματικά Αποτελέσματα «γυμνού πλαισίου»

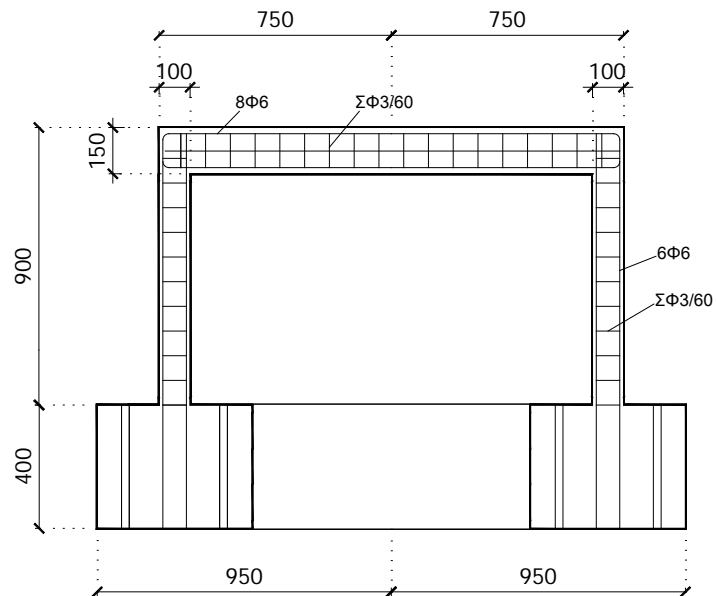
Η προσομοίωση των υποστυλωμάτων έγινε μέσω του λογισμικού RUAUMOKO. Τα μοντέλα (υλικών, διατομών και μελών) που επιλέχτηκαν από το RUAUMOKO βαθμονομήθηκαν με βάση τα αποτελέσματα του πειράματος ενός «Γυμνού πλαισίου» (bare frame) που διεξήχθη στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κάτω από ανακυκλιζόμενη οριζόντια μετακίνηση στο ύψος της δοκού. Η διαμόρφωση της σχετικής πειραματικής διάταξης μπορεί να βρεθεί στην έκθεση Περδικάρης Φ. (2011) και παρατίθεται εδώ στα Σχήματα 3.1.1 και 3.1.2. Το κατασκευαστικό μοντέλο «γυμνού» πλαισίου καθώς επίσης και οι διατομές των δοκών και υποστυλωμάτων του πλαισίου παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.1.3 και 3.1.4. Τέλος στον Πίνακα 3.1 φαίνονται αναλυτικά οι οπλισμοί των διατομών των μελών του πλαισίου.



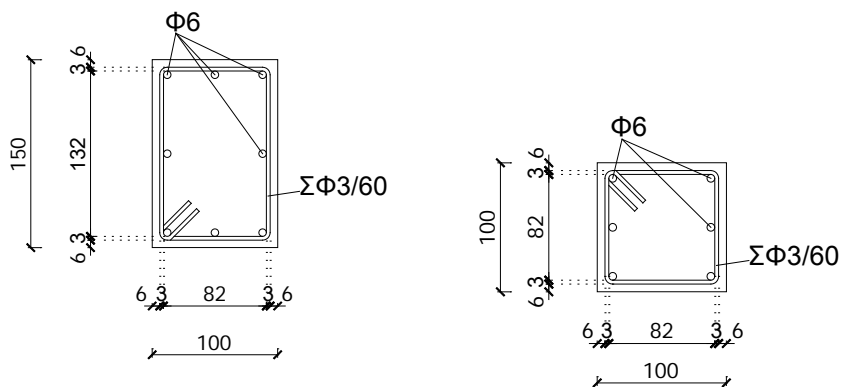
Σχήμα 3.1.1 : Πειραματική διάταξη για ανακυκλιζόμενη φόρτιση «Γυμνού Πλαισίου»



Σχήμα 3.1.2 : Γενική όψη μοντέλου πλαισίου στην πειραματική διάταξη



Σχήμα 3.1.3 : Κατασκευαστικό μοντέλο «Γυμνού πλαισίου». (Διαστάσεις σε mm.)



Σχήμα 3.1.4: Διατομή δοκού και υποστυλωμάτων «Γυμνού πλαισίου» (Διαστάσεις σε mm.)

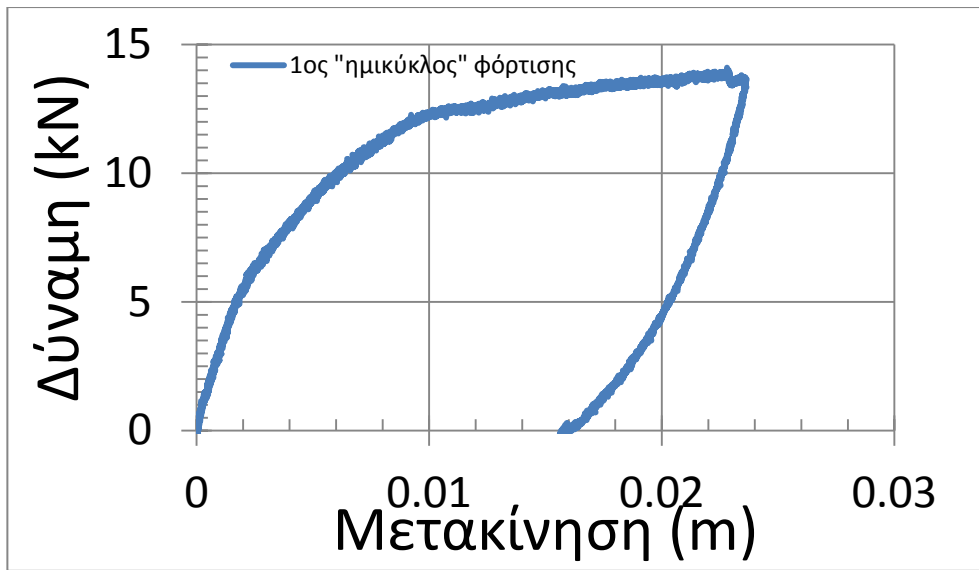
Πίνακας 3.1 Οπλισμοί δοκού και υποστυλωμάτων

Ράβδοι οπλισμού	Διάμετρος	Είδος Χάλυβα	Περιγραφή	f_{sy} (MPa)	ϵ_{sy} (‰)
Διαμήκεις:					
δοκοί πλαισίου	Φ6	λείος	8Φ6	350	1,75
υπ/τα πλαισίου	Φ6	λείος	6Φ6	350	1,75
Συνδετήρες:					
δοκοί	Φ3	σύρμα	Σ Φ3/60	560	-
υπ/τα πλαισίου	Φ3	σύρμα	Σ Φ3/60	560	-

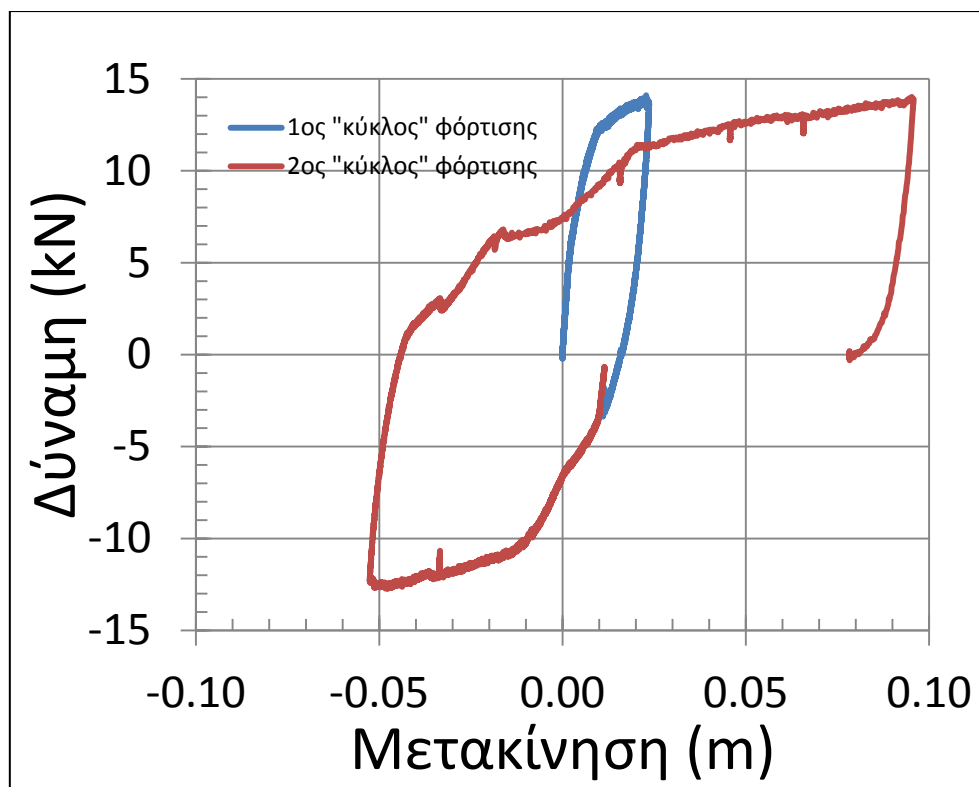
Η διαστασιολόγηση του πλαισίου έγινε βάσει παλαιότερων κανονισμών (Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος 1954) και αντικατοπτρίζει τις αδυναμίες που εμφανίζουν παλαιές πλαισιωτές κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τέτοιες αδυναμίες είναι: η ύπαρξη ισχυρών δοκών και ασθενών υποστυλωμάτων, η αραιή τοποθέτηση συνδετήρων στα υποστυλώματα και στους κόμβους, η χρήση λείων ράβδων διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού στα υποστυλώματα και στις δοκούς. Η δοκός του πλαισίου σχεδιάστηκε έτσι ώστε να είναι ισχυρότερη από τα υποστυλώματα ώστε να αποκλειστεί η αστοχία του ζυγώματος. (Περδικάρης Φ., 2011).

Το σύστημα υποβλήθηκε σε μονοτονική φόρτιση μέχρι τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα ($\delta u \approx 21$ mm, $F_u \approx 14$ kN) με ταχύτητα φόρτισης σε μετακίνηση εμβόλου 0,005 mm/sec. Στην συνέχεια το δοκίμιο υποβλήθηκε σε αποφόρτιση και φόρτιση στην αντίθετη κατεύθυνση μέχρι την πλήρη αστοχία του (Περδικάρης Φ., 2011). Το διάγραμμα φορτίου-οριζόντιας μετακίνησης για τον πρώτο ημικύκλο φόρτισης παρουσιάζεται στο Σχ. 3.1.5, ενώ το συνολικό διάγραμμα για 1 και ¼ κύκλους φόρτισης παρουσιάζεται στο Σχ. 3.1.6. Στον κατακόρυφο άξονα είναι το άθροισμα των διατμητικών δυνάμεων των δύο κολονών και στον οριζόντια η κοινή μετακίνηση ενός εκ των άνω δύο κόμβων.

Στόχος ήταν να αναπτυχθεί ένα αξιόπιστο μοντέλο της κατασκευής στο RUAUMOKO το οποίο να είναι ικανό να προσεγγίζει την συμπεριφορά του πλαισίου σε μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η σημαντική συμπεριφορά που πρέπει να προσομοιωθεί με σχετική ακρίβεια είναι η πτώση της αντοχής (strength degradation) του πλαισίου με την πάροδο των «κύκλων» φόρτισης.



Σχήμα 3.1.5 : Απόκριση δύναμης – μετακίνησης πλαισίου στον 1^ο ημικύκλο φόρτισης



Σχήμα 3.1.6 : Απόκριση δύναμης – μετακίνησης πλαισίου (συνολικό)

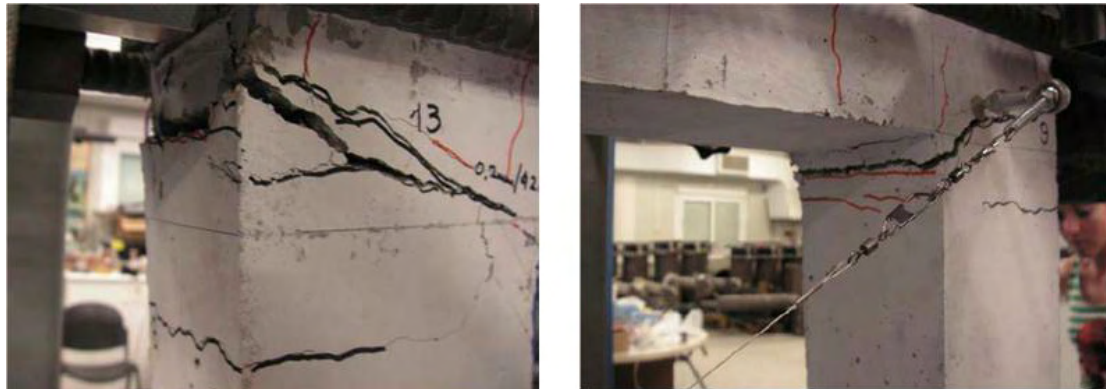
Το δοκίμιο αστόχησε καθαρά καμπτικά στα άκρα των υποστυλωμάτων σύμφωνα με τα προβλεπόμενα (Σχήμα 3.1.7). Οι πρώτες ρωγμές παρατηρήθηκαν για φορτίο $P \approx 6$ kN στα άκρα των υποστυλωμάτων λόγω κάμψης. Με την αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης δημιουργήθηκαν νέες καμπτικές ρωγμές καθ' ύψος των υποστυλωμάτων (Σχήμα 3.1.9). Παρόμοιες ρωγμές άνοιξαν και κατά την φόρτιση προς την αντίθετη

κατεύθυνση. Η ρηγμάτωση και στα δύο υποστυλώματα ήταν έντονη κυρίως στην βάση τους (Περδικάρης Φ., 2011).

Όπως παρατηρείται και στα Σχήματα 3.1.7–3.1.9 στη δοκό του πειράματος δεν εμφανίστηκε καμία ρωγμή, σύμφωνα με τον τρόπο σχεδιασμού παλαιών πλαισιωτών κατασκευών με ισχυρότερες δοκούς έναντι υποστυλωμάτων, όπως προαναφέρθηκε.



Σχήμα 3.1.7 : Εικόνα αστοχίας πλαισίου μετά το πέρας της δοκιμής



Σχήμα 3.1.8 : Μορφολογία ρηγμάτωσης κόμβου δοκού - υποστυλώματος



Σχήμα 3.1.9 : Ρηγμάτωση καθ' ύψος των υποστυλωμάτων

3.2 Μοντέλο απλού πλαισίου στο RUAUMOKO

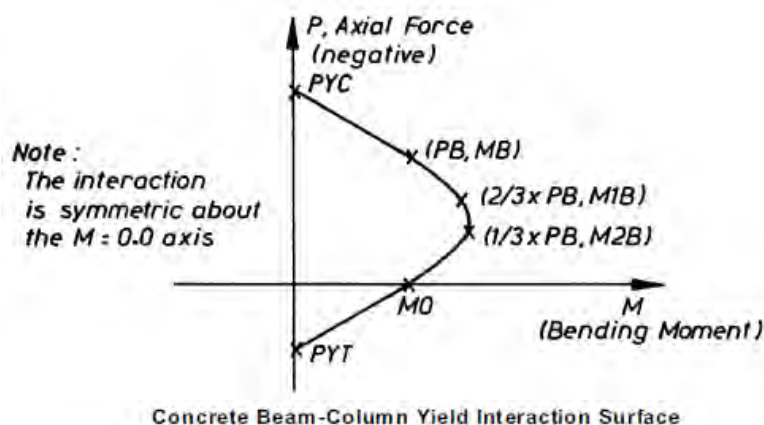
3.2.1 Ανάπτυξη αναλυτικού μοντέλου προσομοίωσης των υποστυλωμάτων

Για την αναλυτική πρόβλεψη της καμπύλης του Σχήματος 3.1.6 χρησιμοποιήθηκε στο λογισμικό του RUAUMOKO ένα στοιχείο δοκού-στύλου (beam – column member).

Αρχικά, με βάση την γεωμετρία των στοιχείων και τον οπλισμό που διαθέτουν, ζητείται στο πρόγραμμα να δοθούν τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης ανηγμένου αξονικού φορτίου – ανηγμένης ροπής. Οι παράμετροι και οι αντίστοιχες τιμές που χρησιμοποιεί το λογισμικό RUAUMOKO για το διάγραμμα αλληλεπίδρασης των υποστυλωμάτων φαίνονται στον Πίνακα 3.2.1.1. Επιπλέον δόθηκαν οι υπόλοιπες παράμετροι που απαιτούνται, οι οποίες φαίνονται στους Πίνακες 3.2.1.2 και 3.2.1.3.

Πίνακας 3.2.1.1 : Τιμές παραμέτρων διαγράμματος αλληλεπίδρασης υποστυλωμάτων

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
PYC	Axial compression yield force	-379(kN)
PB	Axial compression force at B	-275(kN)
MB	Yield moment at B	3.5(kNm)
M1B	Yield moment at $P=(2/3)*PB$	5.8(kNm)
M2B	Yield moment at $P=(1/3)*PB$	5.45(kNm)
M0	Yield moment at $P=0.0$	2.48(kNm)
PYT	Axial tension yield force	59.3(kN)
IEND	= 0; End 2 of the member has the same yield surface I = 1; A further line will be required to supply the parameters PYC to PYT for End 2 of the member.	0



Σχήμα 3.2.1.1 : Διάγραμμα αλληλεπίδρασης RUAUMOKO

Πίνακας 3.2.1.2 : Ελαστικές ιδιότητες διατομών

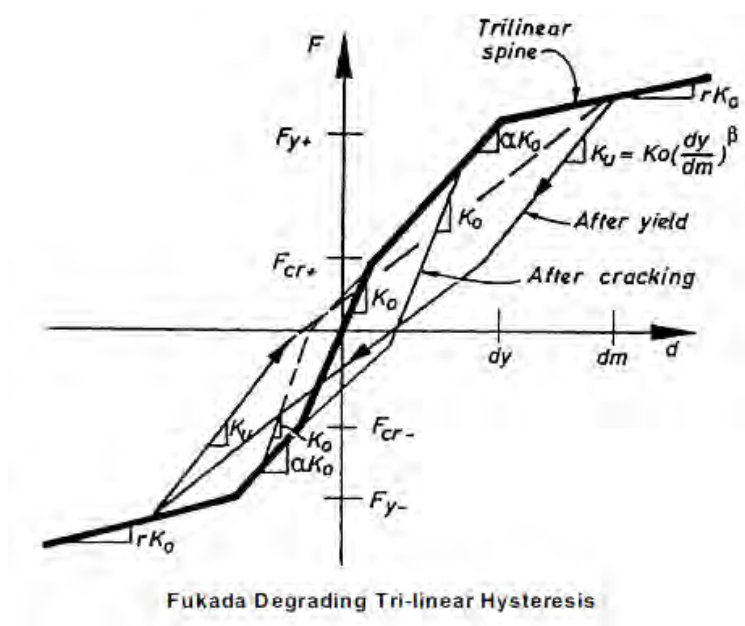
Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
E(kPa)	Elastic (Young's) Modulus of member material	31500000 (kPa)
G(kPa)	Shear Modulus of member material	13125000 (kPa)
A(m ²)	Cross-sectional AREA of the member section	0.01(m ²)
AS(m ²)	Effective SHEAR AREA of the member section (if AS=0.0 then shear deformations in the section are suppressed)	0
I(m ⁴)	MOMENT of INERTIA (2nd Moment of Area) of section	2.499E-06(m ⁴)
WGT(N/mm)	Weight/(unit length) of the member	0.25(N/mm)
END1	Length of Rigid End-block at End 1 of member	0
END2	Length of Rigid End-block at End 2 of member	0
FJ1	Joint flexibility at End 1 (radians/unit moment)	0
FJ2	Joint flexibility at End 2 (radians/unit moment)	0

Πίνακας 3.2.1.3 : Διγραμμικοί παράγοντες του μέλους και ιδιότητες των πλαστικών αρθρώσεων

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
RA	Bi-linear factor (or Ramberg-Osgood r) (Axial)	0.03
RF	Bi-linear factor (or Ramberg-Osgood r) (Flexure)	0.03
H1	Plastic Hinge Length at End 1	0.1
H2	Plastic Hinge Length at End 2	0.1

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των υποστυλωμάτων χρησιμοποιήθηκε ο Τρι-γραμμικός νόμος υστέρησης FUKADA (Fukada 1969), (νόμος υστέρησης με

αριθμό #14 στο «RUAUMOKO 2D» manual). Στο Σχήμα 3.2.1.2 φαίνεται ο νόμος υστέρησης Fukada. Οι 4 παράμετροι που απαιτούνται στο RUAUMOKO είναι οι α , β , F_{cr+} , F_{cr-} που φαίνονται στον Πίνακα 3.2.1.4



Σχήμα 3.2.1.2: Νόμος υστέρησης FUKADA

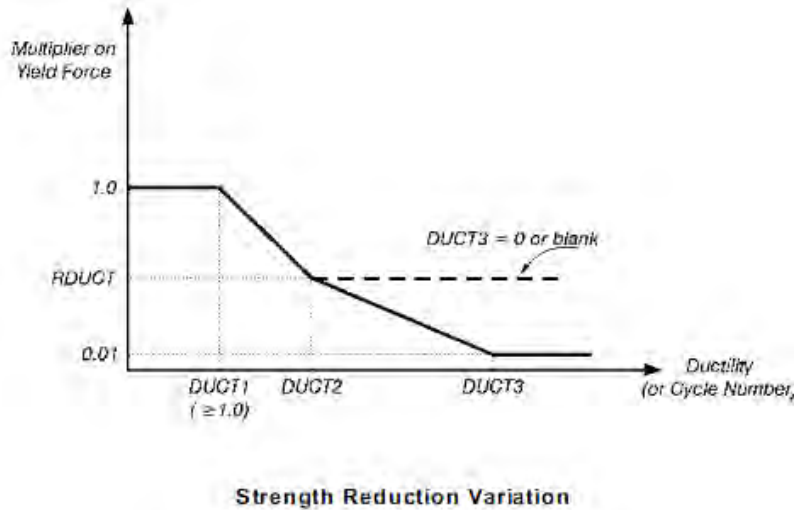
Πίνακας 3.2.1.4 : Παράμετροι Τρι-γραμμικού νόμου υστέρησης FUKADA

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
ALFA	Bi-linear factor (cracking to yield)	0.5
BETA	Unloading Stiffness factor (see Takeda ALFA)	0
FCR(i)+	Cracking moment or force at i (> 0.0)	2
FCR(i)-	Cracking moment or force at i (< 0.0)	-2

Τέλος, προκειμένου να επιτευχθεί και η επιθυμητή απομείωση της αντοχής των υποστυλωμάτων με την ανακύκλιση του φορτίου χρησιμοποιήθηκε η παράμετρος του RUAUMOKO ILOS=6, σύμφωνα με την οποία η μείωση της αντοχής σε κάθε διεύθυνση είναι συνάρτηση της μέγιστης πλαστιμότητας και επίσης εξαρτάται από τον αριθμό των «κύκλων» φόρτισης. Οι παράμετροι που πρέπει να δοθούν, αριθμητικά φαίνονται στον Πίνακα 3.2.1.5 και σχηματικά παριστάνονται στο Σχήμα 3.2.1.3.

Πίνακας 3.2.1.5 : Παράμετροι απομείωσης αντοχής(ILOS)

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
DUCT 1	Ductility at which degradation begins	4
DUCT 2	Ductility at which degradation stops	30
RDUCT	Residual Strength as a fraction of the Initial Yield Strength	0.5
DUCT3	Ductility at 0.01 initial strength	50
RCYC	% reduction of strength per cycle of inelastic behaviour	2



Σχήμα 3.2.1.3 : Σχηματική αναπαράσταση των παραμέτρων

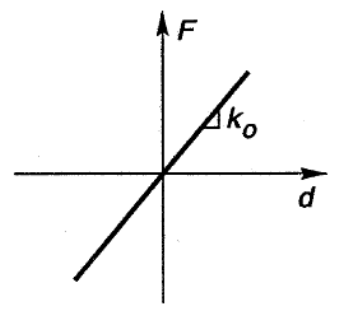
3.2.2. Αναλυτικό μοντέλο για την προσομοίωση της δοκού

Στην περίπτωση της δοκού χρησιμοποιήθηκε επίσης στοιχείο δοκού-στύλου (beam – column element). Οι γενικές παράμετροι, οι οποίες περιγράφηκαν ανωτέρω, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.2.1. Σημειώνεται ότι δεν απαιτούνται άλλα δεδομένα, διότι η δοκός συμπεριφέρεται ελαστικά (νόμος υστέρησης με αριθμό #0 στο RUAUMOKO 2D, Σχήμα 3.2.2.1).

Πίνακας 3.2.2.1 : Ελαστικές ιδιότητες διατομής

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
E (kPa)	Elastic (Young's) Modulus of member material	31500000 (kPa)
G (kPa)	Shear Modulus of member material	13125000 (kPa)
A(m ²)	Cross-sectional AREA of the member section	0.015 (m ²)
AS(m ²)	Effective SHEAR AREA of the member section	0
	(if AS=0.0 then shear deformations in the section are	

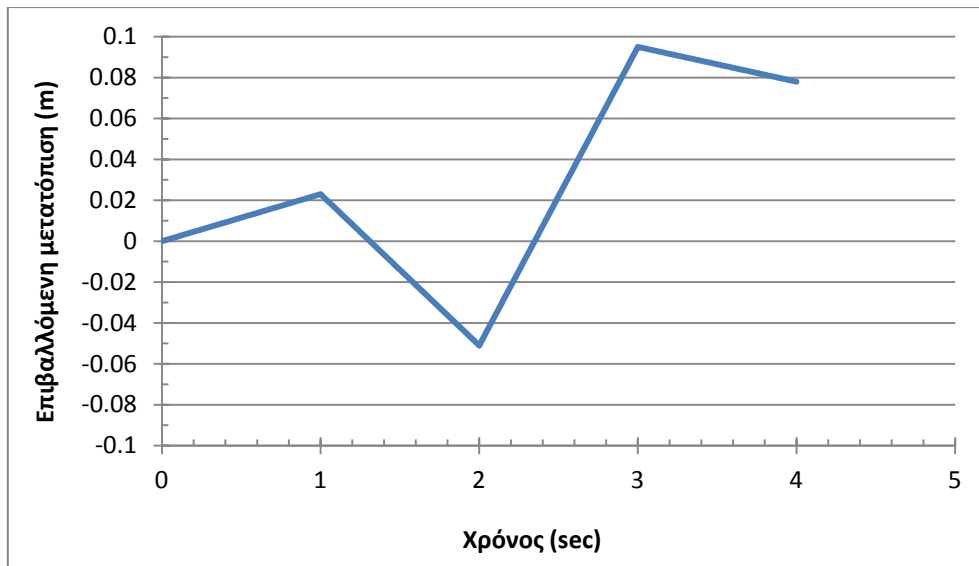
	suppressed)	
$I(m^4)$	MOMENT of INERTIA (2nd Moment of Area) of section	8.439E-06(m^4)
WGT(N/mm)	Weight/(unit length) of the member	0.375(N/mm)
END1	Length of Rigid End-block at End 1 of member	0
END2	Length of Rigid End-block at End 2 of member	0
FJ1	Joint flexibility at End 1 (radians/unit moment)	0
FJ2	Joint flexibility at End 2 (radians/unit moment)	0



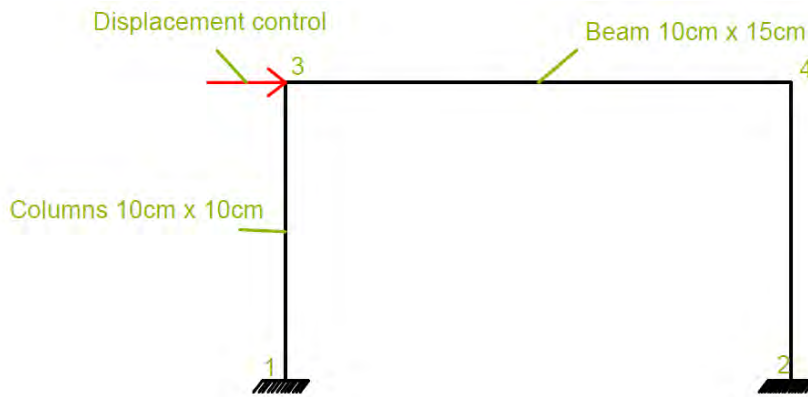
Σχῆμα 3.2.2.1 : Linear Elastic behavior

3.3 Σύγκριση πειραματικής και αναλυτικής συμπεριφοράς απλού πλαισίου κάτω από ανακυκλική στατική φόρτιση

Η επαναληπτική διαδικασία προσαρμογής των παραμέτρων για την βέλτιστη προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων έγινε για διέγερση ελεγχόμενης μετακίνησης στον κόμβο «3» του γυμνού πλαισίου (displacement control), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.1. Οι ακραίες τιμές της διέγερσης ορίστηκαν ως οι ακραίες τιμές της μετακίνησης που έφτανε το πείραμα κατά τις φάσεις φόρτιση, αποφόρτιση, επαναφόρτιση, του Σχήματος 3.1.6, για ψευδοχρόνο 4 δευτερολέπτων με χρονικό βήμα 0.01 sec μεταξύ των ακραίων τιμών. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.2. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι κόμβοι «3 και 4» του πλαισίου ορίστηκαν να έχουν την ίδια μετακίνηση (slavery).

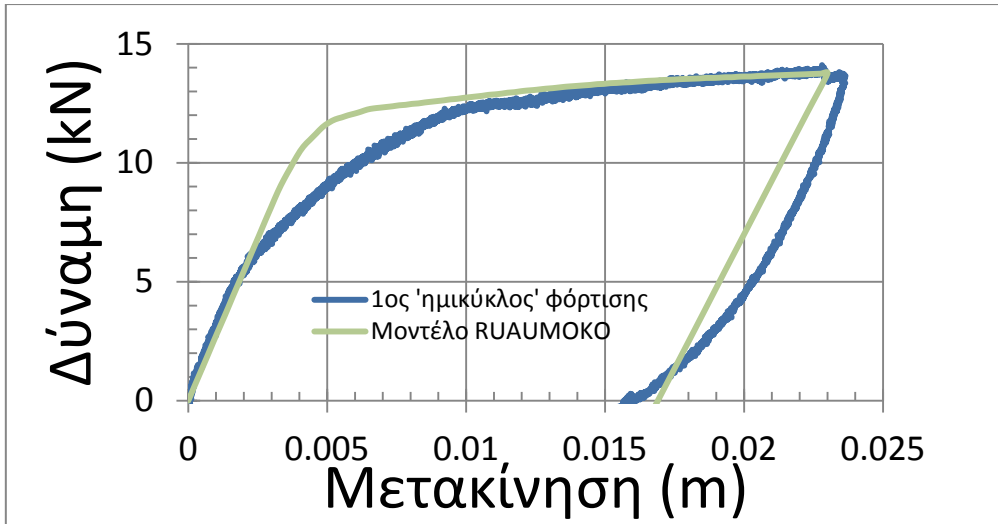


Σχήμα 3.3.1 : Διέγερση

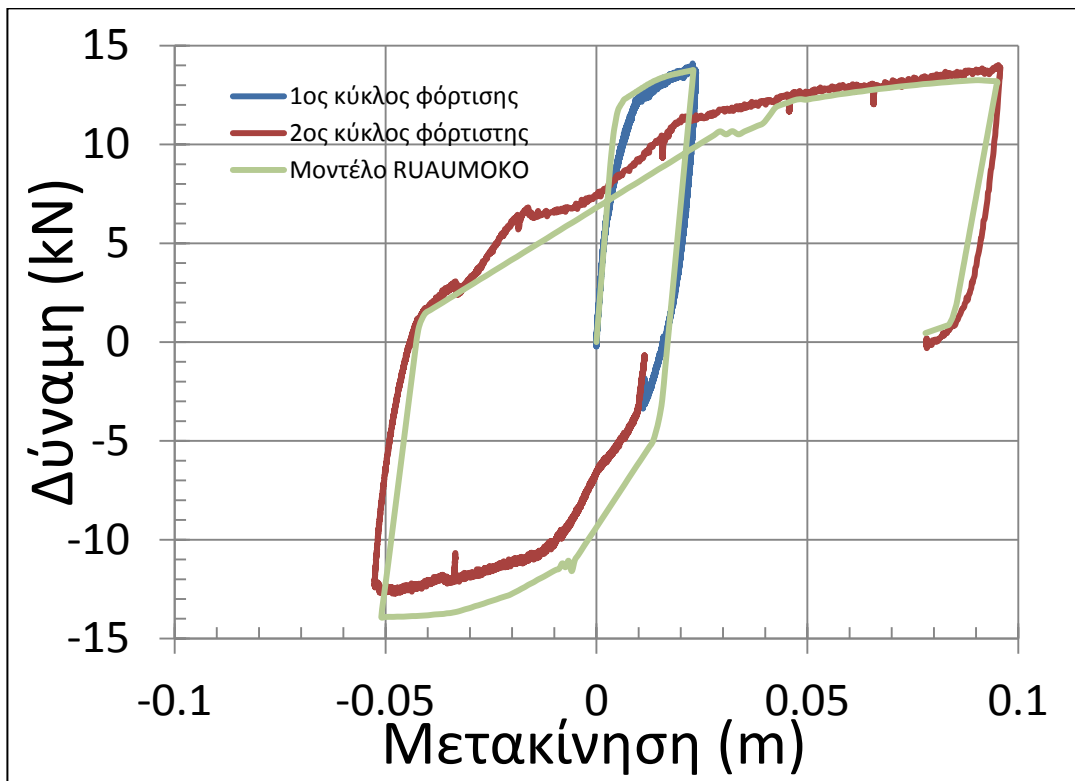


Σχήμα 3.3.2 : Επιβαλλόμενη μετακίνηση στον κόμβο 3 του πλαισίου

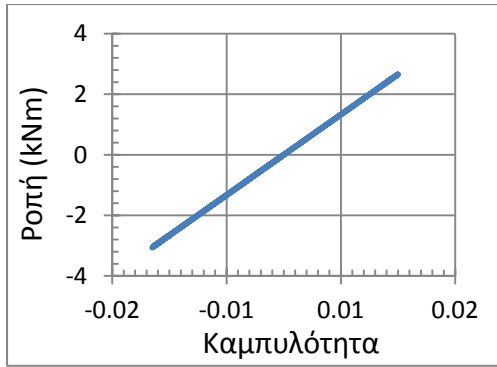
Η σύγκριση πειραματικών δεδομένων – αναλυτικής πρόβλεψης για τον πρώτο ημικύκλο φόρτισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.3. Το τελικό διάγραμμα της ανακυκλιζόμενης συμπεριφοράς του μοντέλου συγκριτικά με τα πειραματικά δεδομένα βρίσκεται στο Σχήμα 3.3.4. Επίσης παρατίθενται τα διαγράμματα ροπής-καμπυλότητας της ελαστικής δοκού για τα δύο άκρα της στο Σχήμα 3.3.5 και των υποστυλωμάτων στα Σχήματα 3.3.6 και 3.3.7 για λόγους εποπτείας.



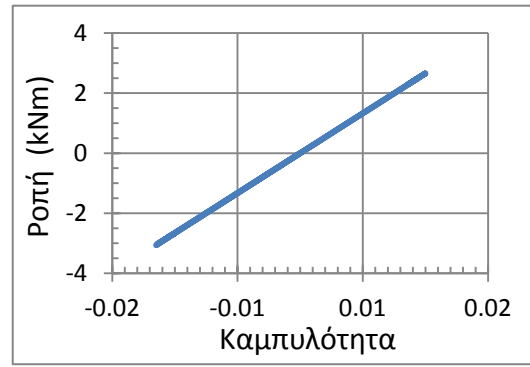
Σχήμα 3.3.3 : Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων – Αναλυτικού μοντέλου για τον 1^ο ημικύκλο φόρτισης



Σχήμα 3.3.4 : Συγκριτικά Αποτελέσματα πειράματος – αναλυτικού μοντέλου

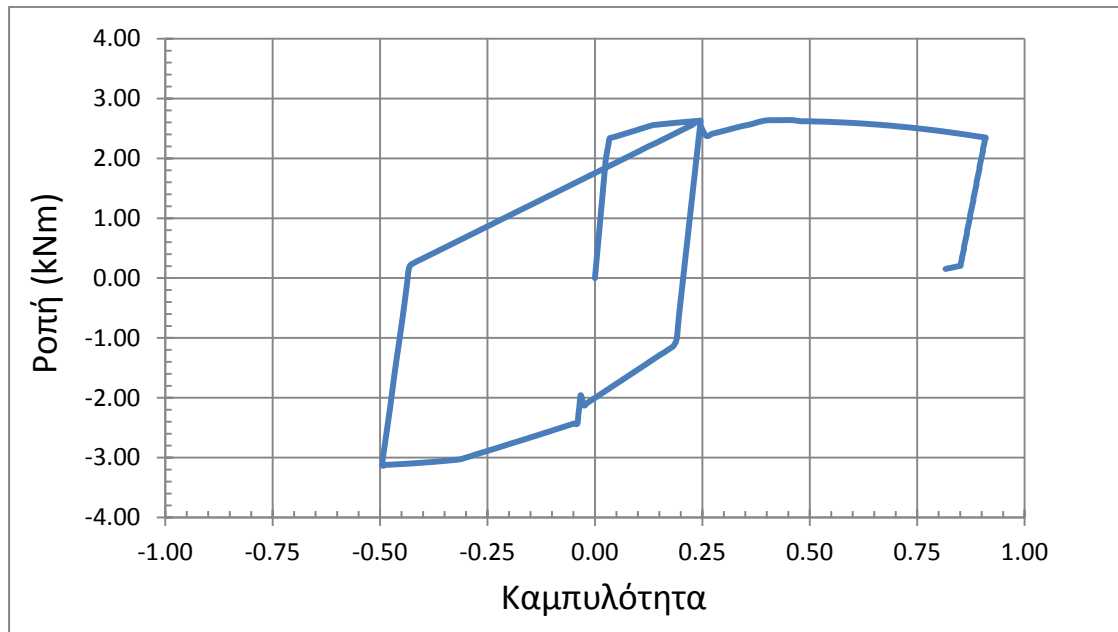


Άκρο Δοκού#1

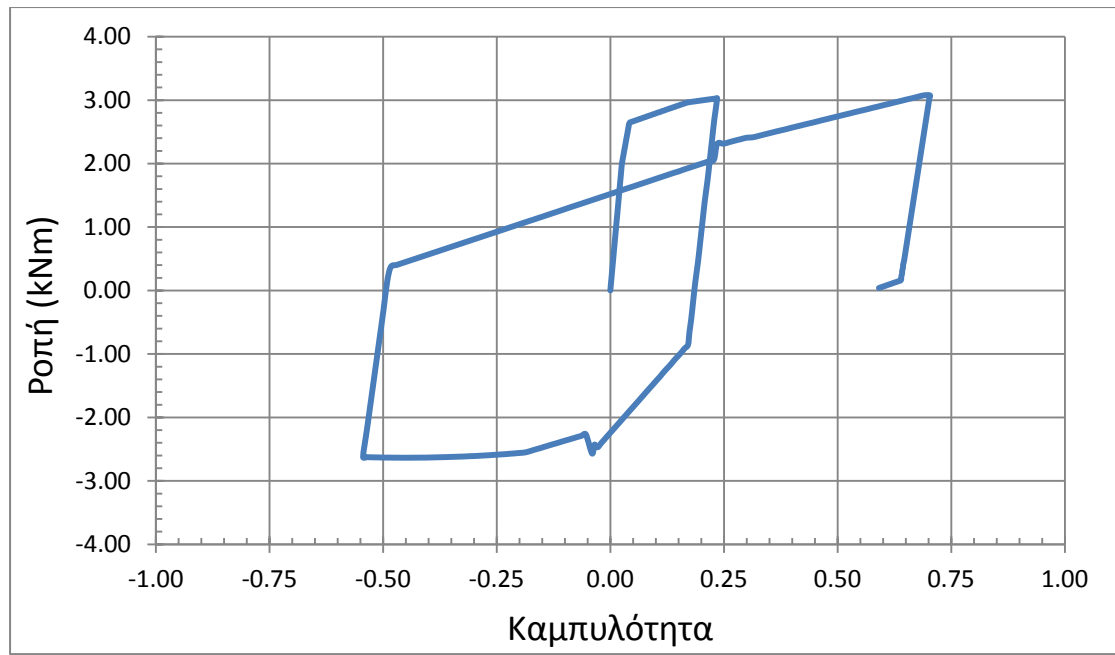


Άκρο Δοκού#2

Σχήμα 3.3.5. : Διαγράμματα M-k των δυο άκρων της ελαστικής δοκού



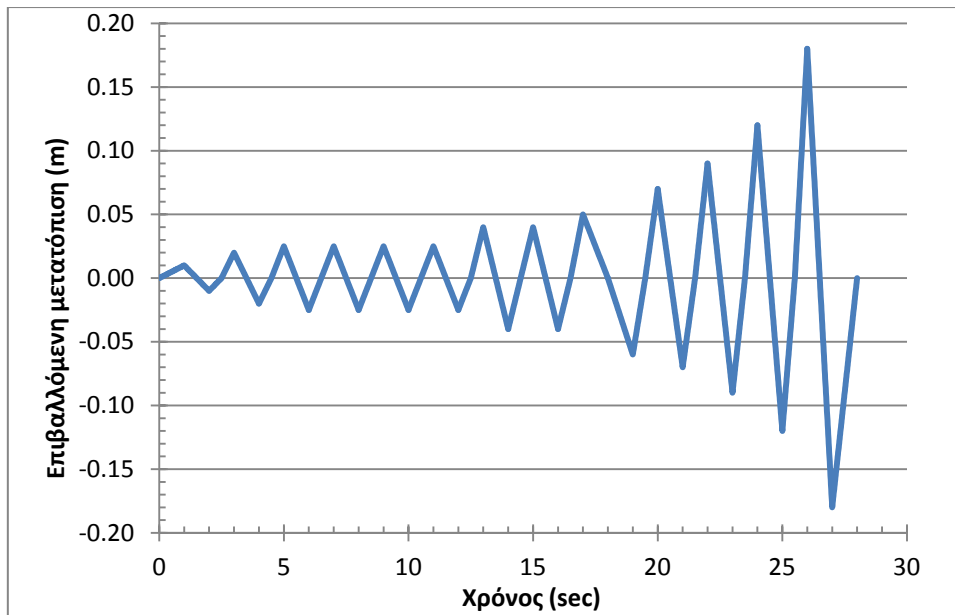
Σχήμα 3.3.6 : Διάγραμμα Ροπής – Καμπυλότητας άνω άκρου αριστερού υποστυλώματος



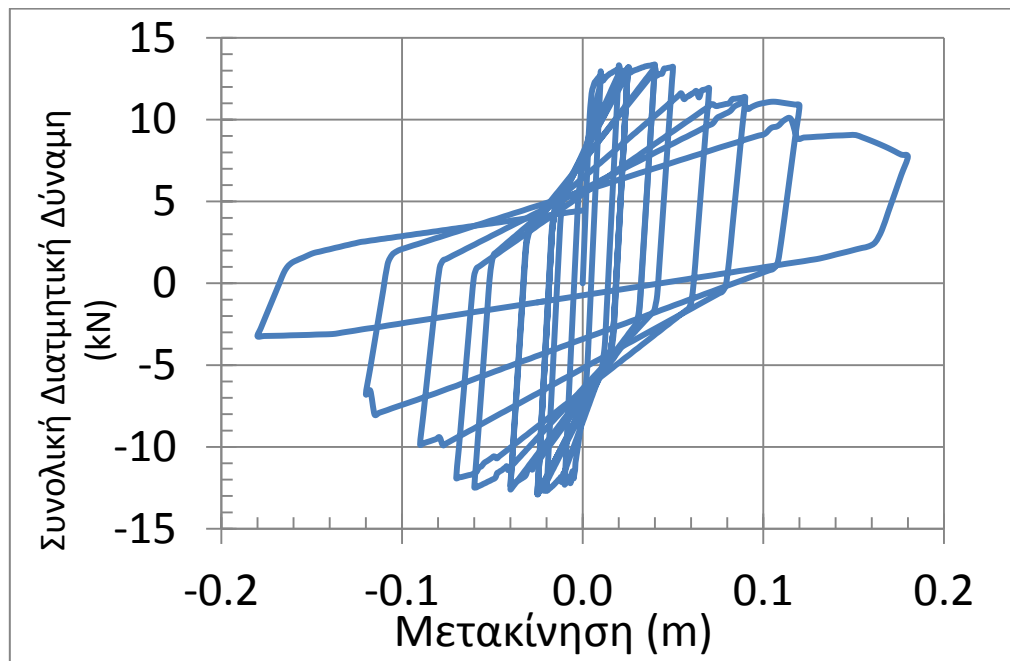
Σχήμα 3.3.7 : Διάγραμμα Ροπής καμυλότητας άνω άκρου δεξιού υποστυλώματος

3.4 Συμπεριφορά αναλυτικού μοντέλου σε πολλούς «κύκλους» ανακυκλιζόμενης φόρτισης – Απομείωση αντοχής

Για να γίνει εμφανής η απομείωση της αντοχής του μοντέλου με βάση τη μέγιστη πλαστιμότητα (η οποία ορίστηκε ως $DUCT2=30$) αλλά και με βάση τους κύκλους φόρτισης, όπως ορίστηκε από την παράμετρο του $RUAUMOKO$ $ILOS=6$, το πλαίσιο υποβλήθηκε στη διέγερση του Σχήματος 3.4.1. Σημειώνεται ότι η μετακίνηση της διέγερσης σκοπίμως ξεπερνά την τιμή 0.15 m ώστε η μέγιστη πλαστιμότητα να ξεπεράσει την τιμή 30, δηλαδή το 30πλάσιο της τιμής των (περίπου) 0.005m που συμβαίνει η πρώτη διαρροή. Το χρονικό βήμα είναι 0.01 δευτερόλεπτα. Τα αποτελέσματα της συμπεριφοράς παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4.2.



Σχήμα 3.4.1. : Επιβαλλόμενη μετακίνηση (πολλές ανακυκλήσεις)



Σχήμα 3.4.2. Απομείωση αντοχής με την πάροδο των ανακυκλήσεων

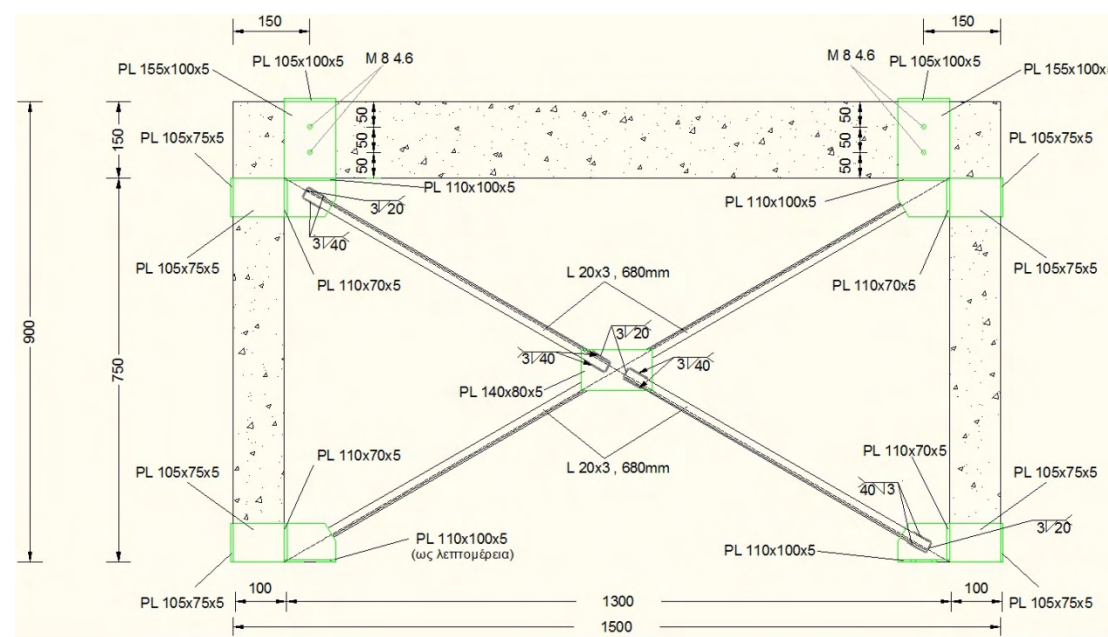
3.5 Διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα πλαισίου ενισχυμένου με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους

Στην περίπτωση πλαισίου ενισχυμένου με μεταλλικούς συνδέσμους, χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα των υποστυλωμάτων και της δοκού που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, ενώ τα μοντέλα των χιαστί

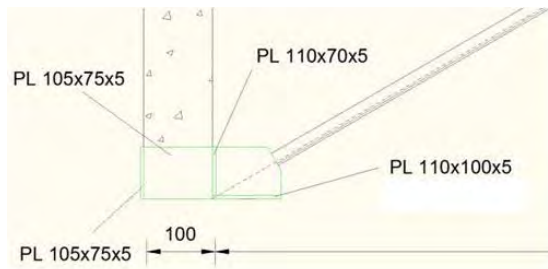
μεταλλικών συνδέσμων βαθμονομήθηκαν με βάση τα πειράματα που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για το ενισχυμένο πλαίσιο.

3.5.1 Πειραματικά αποτελέσματα 1^{ου} συστήματος Χ-συνδέσμων (L20x3)

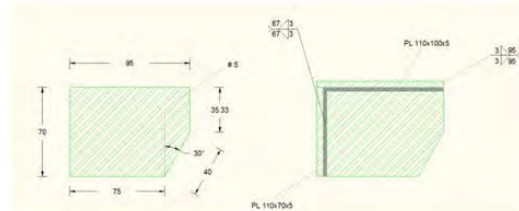
Το σύστημα Χ-συνδέσμων αποτελείται από διαγώνια μέλη L20x3, συγκολλημένα στις τέσσερις γωνίες (κόμβους δοκών-συνδέσμων και βάσεις συνδέσμων). Η όψη και οι σχετικές λεπτομέρειες της όλης διάταξης φαίνονται στα Σχήματα 3.5.1.1 και 3.5.1.2.



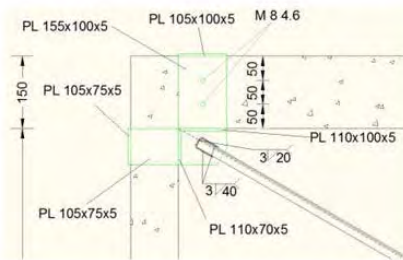
Σχήμα 3.5.1.1 : Πρόσωση της πειραματικής διάταξης ενισχυμένου πλαισίου με Χ-συνδέσμους L20x3



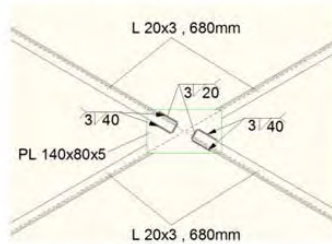
(α) Λεπτομέρεια σύνδεσης στη βάση των στύλων



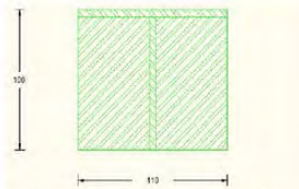
(ε) Λεπτομέρεια γεωμετρίας κομβοελάσματος και συγκολλήσεων με περιμετρικά ελάσματα



(β) Λεπτομέρεια σύνδεσης στον κόμβο δοκού - στύλου



(γ) Λεπτομέρεια σύνδεσης κεντρικού κομβοελάσματος

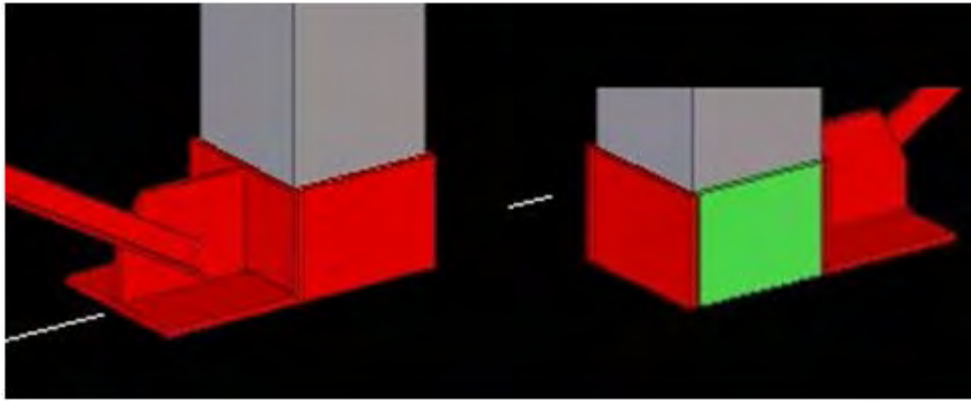


(στ) Λεπτομέρεια γεωμετρίας ελάσματος βάσης

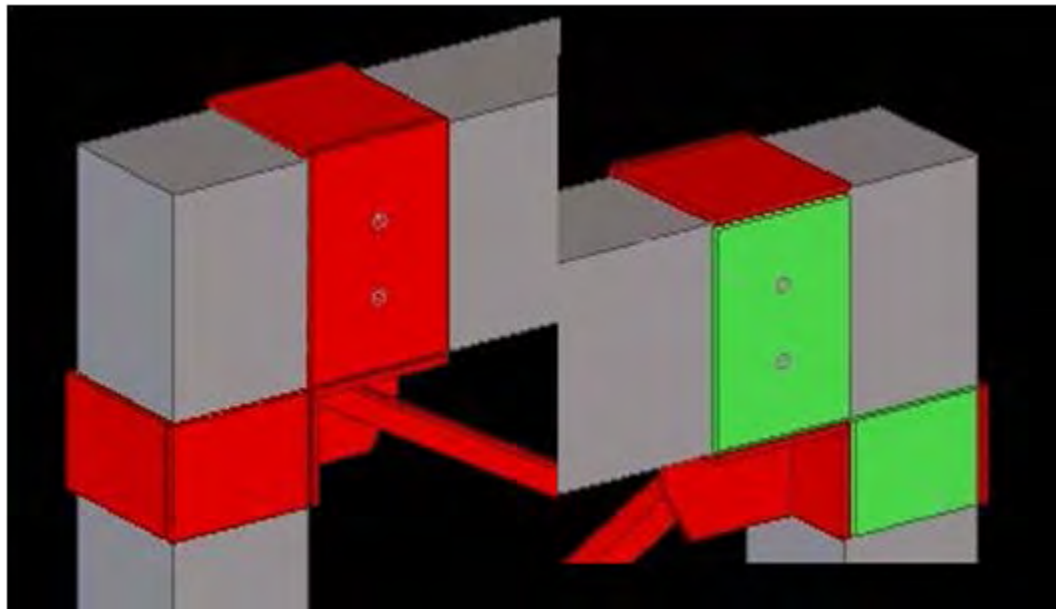
Σχήμα 3.5.1.2 : Λεπτομέρειες πειραματικής διάταξης ενισχυμένου πλαισίου με Χ-συνδέσμους L20x3

Ιδιαίτερη σημασία για το σχεδιασμό είχε ο τρόπος υλοποίησης των συνδέσεων με κομβοελάσματα των Χ-συνδέσμων στις τέσσερις γωνίες του «γυμνού» πλαισίου. Λόγω των δυσκολιών σύνδεσης των κομβοελασμάτων στις βάσεις των συνδέσμων με τη θεμελίωση αποφασίστηκε τα κομβοελάσματα να μην συνδεθούν με τη θεμελίωση κατά την οριζόντια διεύθυνση. Πιο συγκεκριμένα, η σύνδεση με τη βάση του υποστυλώματος υλοποιήθηκε μέσω μεταλλικού κολάρου από συγκολλημένα γύρω-γύρω μεταλλικά ελάσματα. Στο εν λόγω κολάρο αφέθηκε ελεύθερη η προς τα πάνω ολισθήση του κατά μήκος του υποστυλώματος (Σοφιανόπουλος, 2012). Προς τα κάτω τούτο απεφεύχθη μέσω ελάσματος βάσης συγκολλημένου στο κομβοέλασμα, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με το οριζόντιο επίπεδο στη βάση του συνδέσμου (επιφάνεια έδρασης). Η εμπρόσθια και οπίσθια όψη απεικονίζονται στο Σχήμα 3.5.1.3. Αντιθέτως, η σύνδεση των Χ-συνδέσμων στους δυο άνω κόμβους επετεύχθη μέσω δυο μεταλλικών κολάρων, ενός περί των υποστυλωμάτων και περί της δοκού, όπως

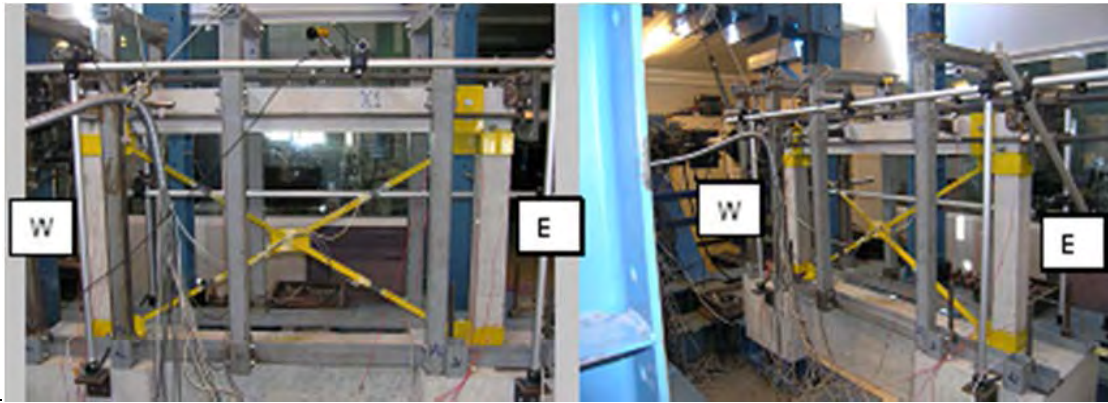
απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5.1.4. Οι σχετικές φωτογραφίες απεικονίζονται στα Σχήματα 3.5.1.5 και 3.5.1.6.



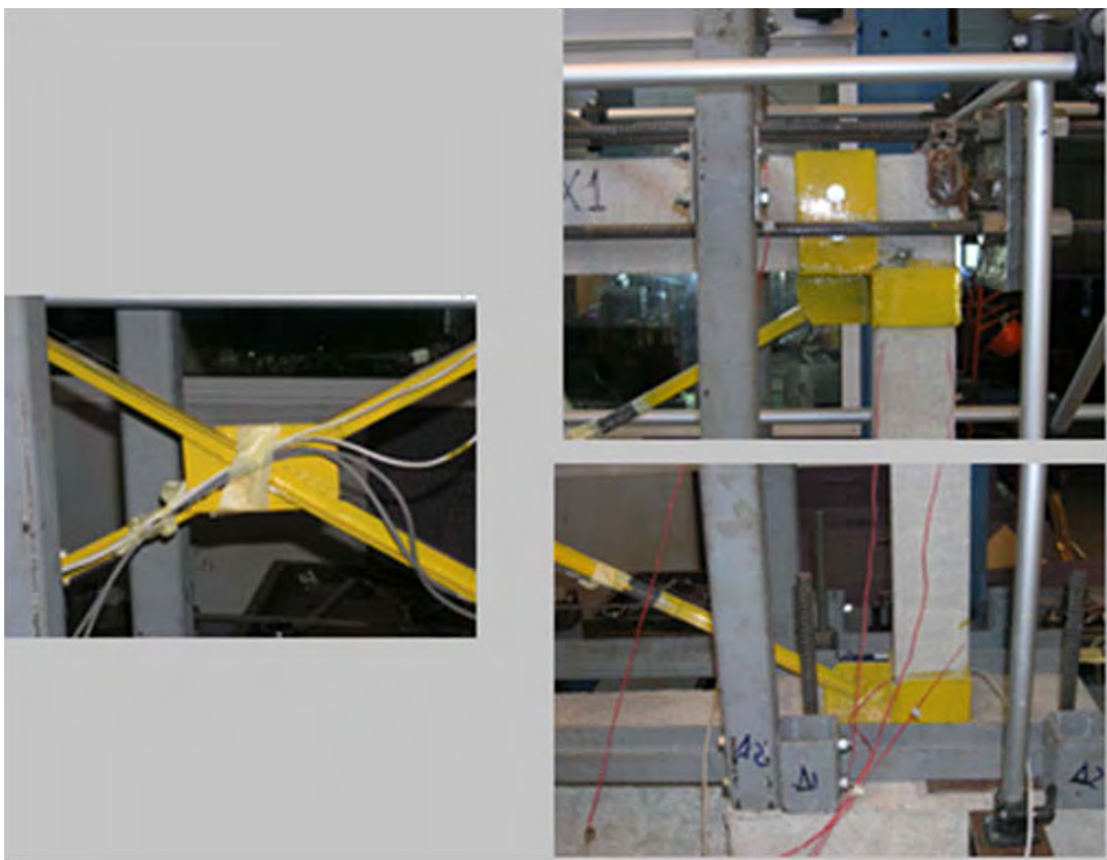
Σχήμα 3.5.1.3 : Τρισδιάστατη απεικόνιση σύνδεσης X-συνδέσμων με τη βάση των υποστυλωμάτων.



Σχήμα 3.5.1.4 : Τρισδιάστατη απεικόνιση σύνδεσης X-συνδέσμων με τον κόμβο δοκού-στύλου του πλαισίου



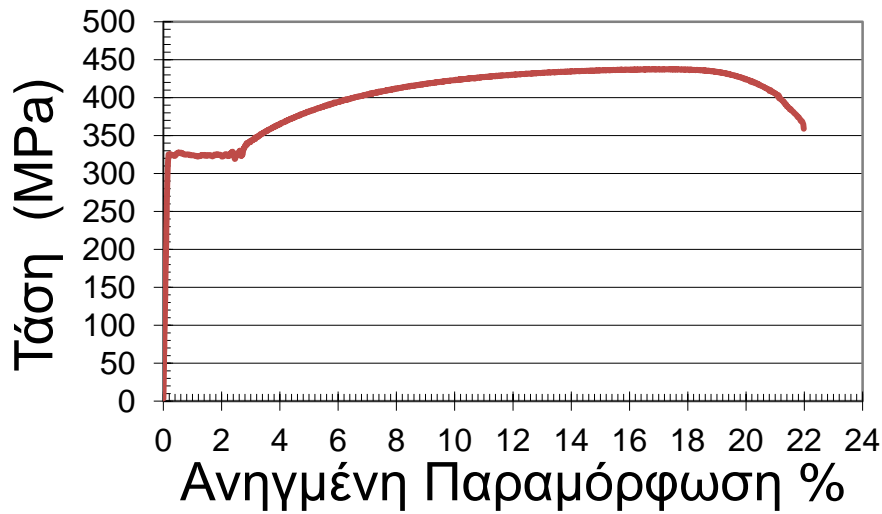
Σχήμα 3.5.1.5 : Χαρακτηριστικές όψεις της πειραματικής διάταξης του συστήματος Χ-
συνδέσμων L20x3



Σχήμα 3.5.1.6 : Λεπτομέρεια συγκόλλησης κομβοελασμάτων με το «γυμνό» πλαίσιο

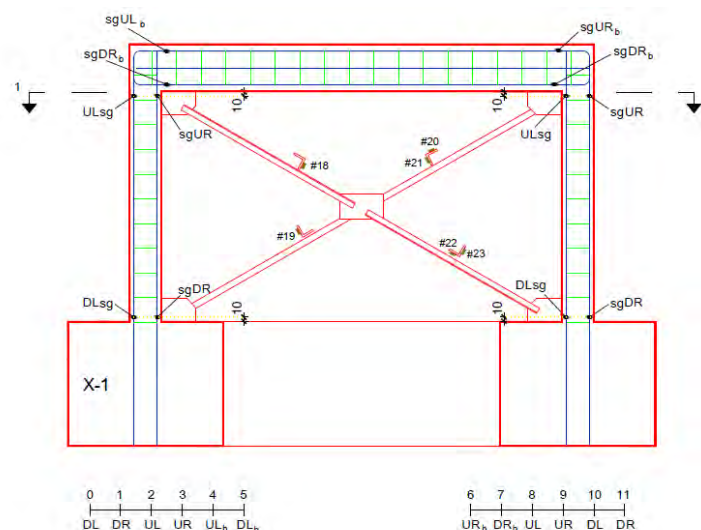
Όσον αφορά τη σχέση τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης του χάλυβα, η τάση διαρροής βρέθηκε ίση με $f_y = 325 \text{ MPa}$, η παραμόρφωση διαρροής $\epsilon_y = 0.178 \%$ και τάση θραύσης $f_u = 437 \text{ MPa}$. Το διάγραμμα αναπαρίσταται στο Σχήμα 3.5.1.7. Τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά της διατομής L20x3 είναι: $A = 1.12 \text{ cm}^2$ και $I_y = I_z = 0.39 \text{ cm}^4$. Η εφελκυστική αντοχή είναι ίση με 26.32 kN . Η αντοχή αυτή αντιστοιχεί στην ονομαστική τιμή της τάσης διαρροής του χάλυβα S235. Αν αντί

αυτής χρησιμοποιηθεί η πειραματική της τιμή ($f_y = 325 \text{ MPa}$), η αντίστοιχη τιμή της αντοχής βρέθηκε ίση με 36.4 kN .



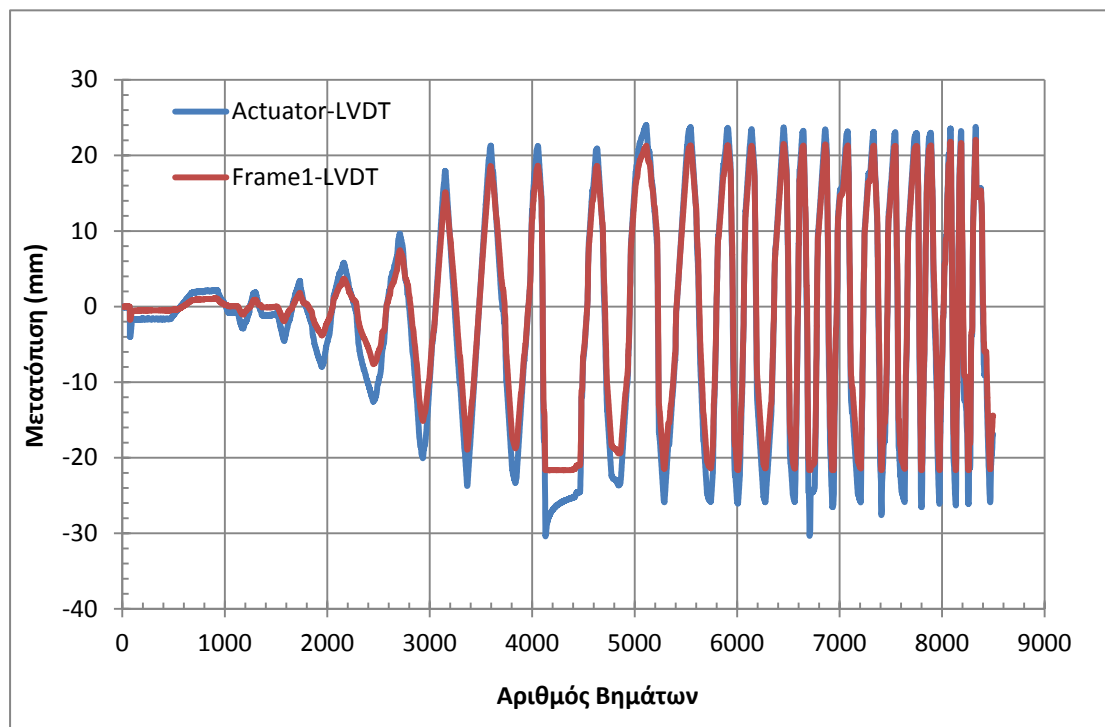
Σχήμα 3.5.1.7 : Σχέση τάσης – ανηγμένης παραμορφώσεως X – συνδέσμων $L20 \times 3$

Στο Σχήμα 3.5.1.8 απεικονίζεται η διάταξη των μηχανομετρών (strain gauges, sg) επί του δοκιμίου. Οι αριθμοί δίπλα από κάθε μηχανομετρο καταδεικνύουν τον αριθμό καναλιού στο σύστημα απόκτησης δεδομένων (data acquisition). Πέραν των μηχανομετρών τοποθετήθηκαν και δύο αισθητήρια καλώδια (wire transducers) κατά μήκος των διαγωνίων, δύο LVDT's (Linear Variable Differential Transformer) με μέγιστη ικανότητα $\pm 24 \text{ mm}$, η δυναμοκυψέλη του ενεργοποιητή (actuator load cell) και ο Temposonic του ενεργοποιητή (ο έλεγχος του πειράματος έγινε μέσω αισθητήρων μετατόπισης) (Σοφιανόπουλος, 2012).



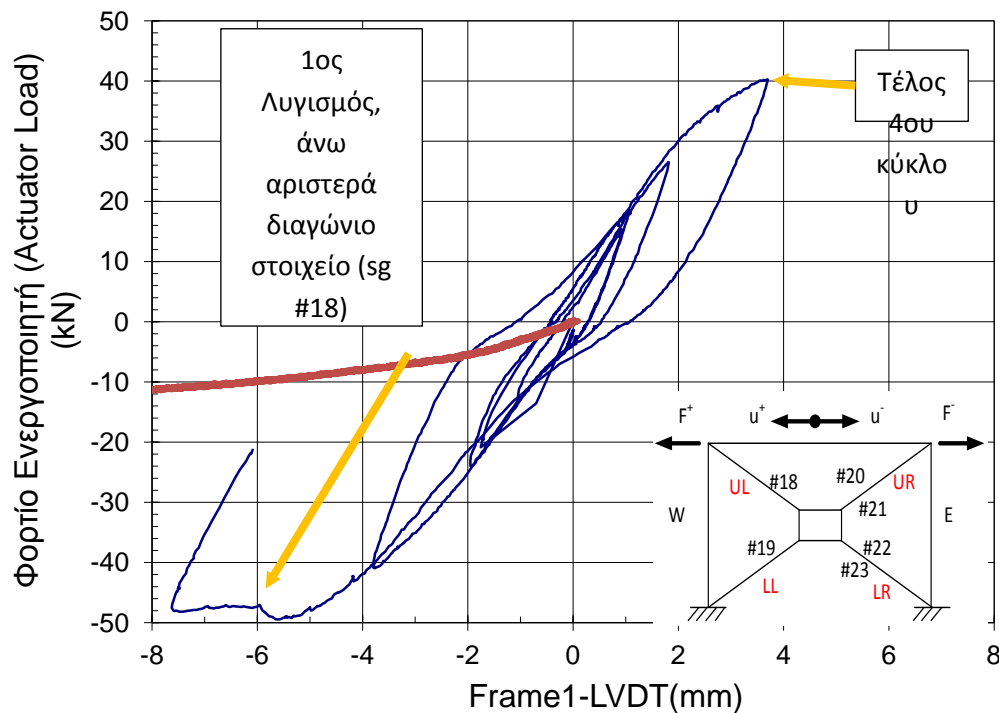
Σχήμα 3.5.1.8 : Διάταξη των μηχανομετρών (strain gauges) στο πείραμα με X -συνδέσμους $L20 \times 3$

Το πλαίσιο υποβλήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, καταγεγραμμένη από τα όργανα μέτρησης του πλαισίου, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5.1.9.



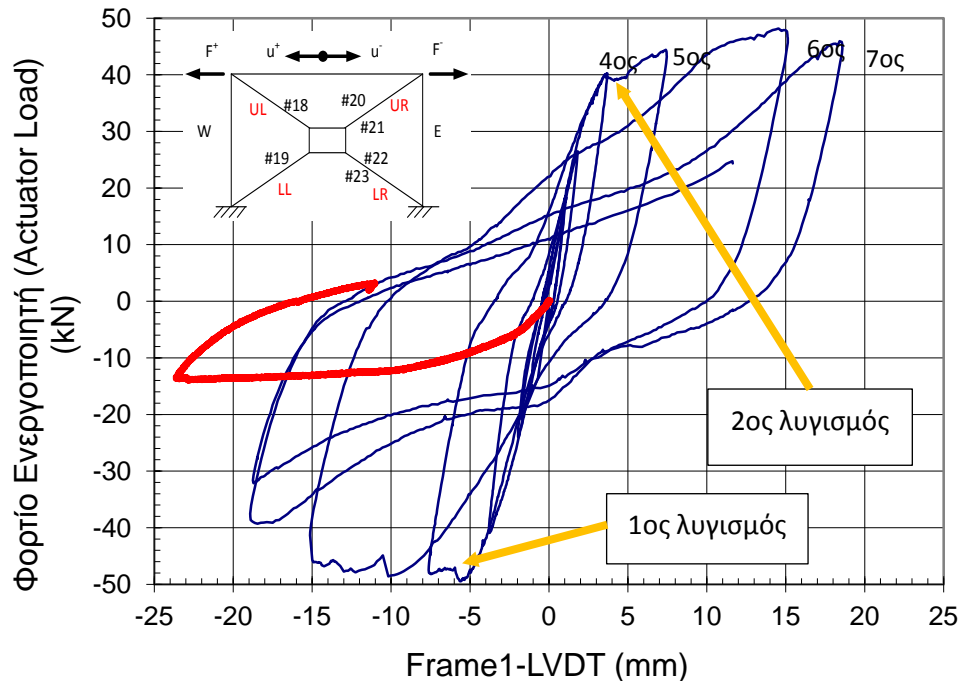
Σχήμα 3.5.1.9. : Πλευρική μετατόπιση που εφαρμόστηκε στο επίπεδο της δοκού

Στο σχήμα 3.5.1.10 παρουσιάζονται οι αρχικοί 4 ½ κύκλοι φόρτισης του πλαισίου ΟΣ με τους Χ-συνδέσμους (μπλε γραμμή) μαζί με την καμπύλη δύναμης – μετατόπισης του «γυμνού» πλαισίου (κόκκινη γραμμή). Κατά τη διάρκεια των τριών πρώτων κύκλων ($\pm 2\text{mm}$) ουδεμία παραμόρφωση (εντός ή εκτός επιπέδου) των διαγωνίων μελών ήταν ορατή. Όμως, με τον 4^ο κύκλο ($\pm 4\text{mm}$) το άνω αριστερά (UL) χαλύβδινο διαγώνιο μέλος – σύνδεσμος φάνηκε να καμπυλώνεται ελαφρά εκτός επιπέδου (ελαστικός λυγισμός), (Σοφιανόπουλος, 2012).



Σχήμα 3.5.1.10 : Πειραματική καμπύλη πλευρικής δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης του συστήματος πλαίσιο – Χ σύνδεσμοι (μπλε γραμμή) και «γυμνού» πλαισίου (κόκκινη γραμμή) για τους 4 ½ αρχικούς κύκλους φόρτισης: 1^{ος} λυγισμός άνω αριστερά συνδέσμου

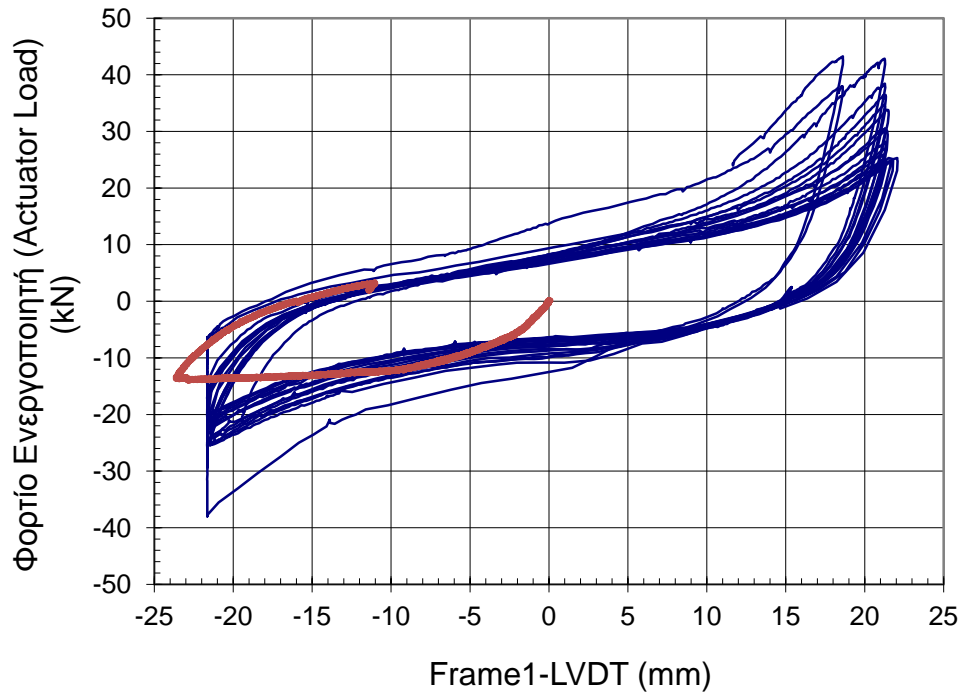
Όταν η πλευρική μετατόπιση έφτασε τα -6mm και το φορτίο τα -50 kN (κατά τη διάρκεια του 5^{ου} κύκλου των ±8 mm) το άνω αριστερά μέλος των Χ-συνδέσμων υπέστη σημαντικό βαθμού επιπρόσθετο λυγισμό (ανελαστικό λυγισμό), μαζί με το σχηματισμό πλαστικής άρθρωσης στο μέσο του μέλους αυτού (Σχήμα 3.5.1.11). Η πλευρική δύναμη μειώθηκε απότομα περίπου κατά 2 kN και παρέμεινε σχεδόν σταθερή (περίπου 48kN) μέχρι το σημείο που έγινε αντιστροφή της φόρτισης (-8mm) (Σοφιανόπουλος, 2012).



Σχήμα 3.5.1.11 : Πειραματική καμπύλη πλευρικής (διατμητικής) δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης του συστήματος πλαίσιο με Χ-συνδέσμους (μπλε γραμμή) και «γυμνού» πλαισίου (κόκκινη γραμμή) για τους πρώτους 7 ¾ κύκλους φόρτισης: 2^{ος} λυγισμός άνω δεξιού διαγώνιου μέλος

Στην επόμενη αντιστροφή της φόρτισης (6ος κύκλος, ± 15 mm) το άνω αριστερά διαγώνιο μέλος, το οποίο είχε λυγίσει για πρώτη φορά κατά τη διάρκεια του πρώτου μισού του 5ου κύκλου και κατόπιν σχεδόν ευθυγραμμίστηκε λόγω εφελκυσμού (στο 2ο ήμισυ του 5ου κύκλου), έχοντας πάντως μια μόνιμη εκτός επιπέδου παραμόρφωση, βρέθηκε πάλι υπό θλίψη και λύγισε για άλλη μια φορά. Η δύναμη ήταν ίση με -50 kN για μετατόπιση περίπου -10 mm, και η δύναμη αυτή διατηρήθηκε μέχρι την αντιστροφή του φορτίου στα -15 mm (Σχήμα 3.5.11).

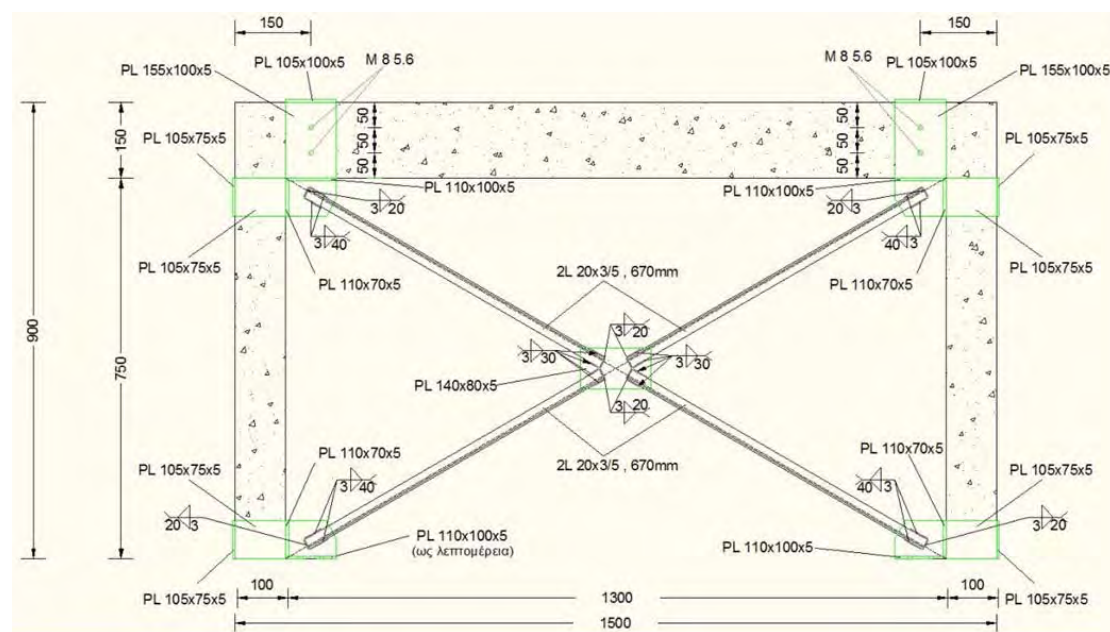
Η αντοχή έπεσε για πλευρική μετατόπιση ίση περίπου με -19 mm (7ος κύκλος) σε 40 kN (από τα 50 kN του προηγούμενου κύκλου) και στον επόμενο, τον 8^ο που αντιστοιχεί σε -19 mm, σε 32 kN. Στις αντιστροφές της φόρτισης των επόμενων κύκλων (10ου έως 24ου), με εύρος ± 22 mm, η πτώση αυτή συνεχίστηκε, και η αντοχή στα -22 mm παρέμεινε σχεδόν σταθερή γύρω στα 22 με 24 kN (υπέστη βλάβη το κάτω αριστερά κολάρο) και στα $+22$ mm η αντοχή τελικά έπεσε από τα 42 kN στα 24 kN. Η απόκριση από τον 8^ο μέχρι τον 24^ο κύκλο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5.1.12.



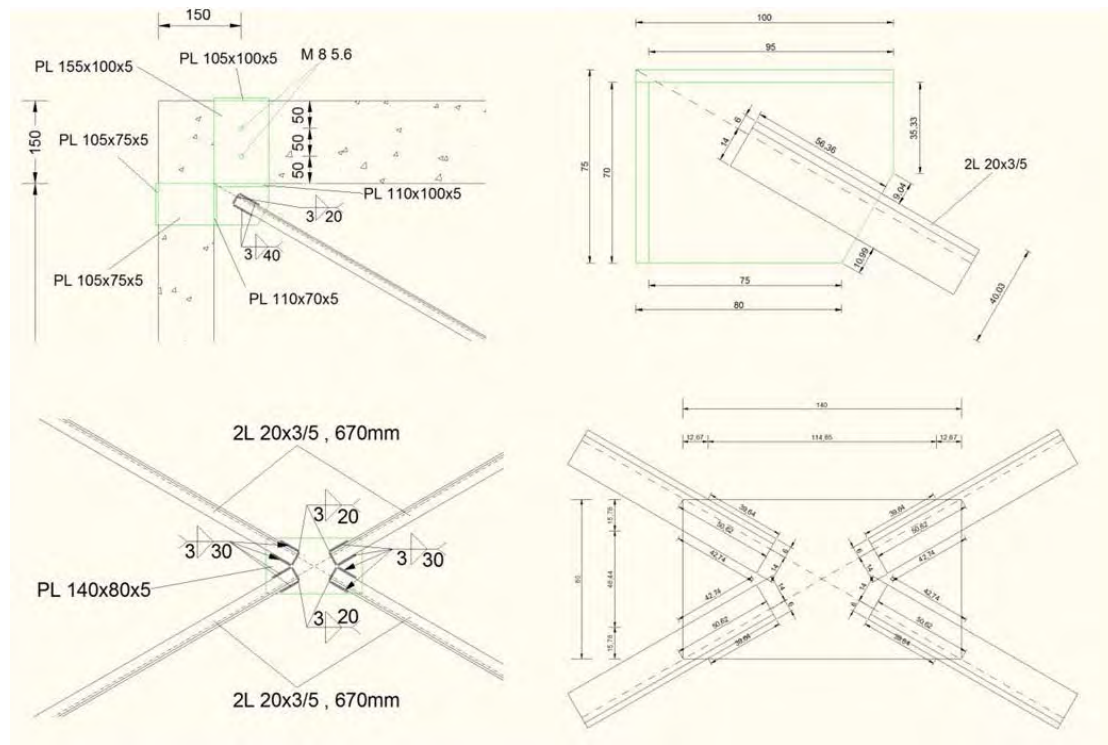
Σχήμα 3.5.1.12 : Πειραματική καμπύλη πλευρικής (διατμητικής) δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης του συστήματος πλαίσιο με Χ-συνδέσμους (μπλε γραμμή) και «γυμνού» πλαισίου (κόκκινη γραμμή) από τον 8^ο μέχρι τον 24^ο κύκλο φόρτισης (± 22 mm). Το πάνω αριστερά και το πάνω δεξιά διαγώνιο μέλος έχουν υποστεί ανελαστικό λυγισμό

3.5.2 Πειραματικά αποτελέσματα 2^{ου} συστήματος Χ-συνδέσμων (2L20x3/5)

Στο 2^ο σύστημα Χ-συνδέσμων, οι διαγώνιες ράβδοι ήταν διατομής 2L20x3 με απόσταση παράλληλων σκελών 5 mm, με συνδεσιμότητα της ίδιας μορφής με το 1ο σύστημα της παραγράφου 3.5.1. Στα Σχήματα 3.5.2.1 και 3.5.2.2 απεικονίζονται η πρόσοψη και οι λεπτομέρειες του όλου συστήματος αντίστοιχα. Διατηρήθηκε η ίδια φιλοσοφία σχεδιασμού όπως και το προηγούμενο σύστημα, με μικρές αλλαγές στις διαστάσεις των αναγκαίων ραφών και του κεντρικού κομβοελάσματος, λόγω της γεωμετρίας της διατομής των Χ- συνδέσμων. Το πλαίσιο από ΟΣ είχε τις ίδιες διαστάσεις όπως στην προηγούμενη πειραματική διάταξη (Σοφιανόπουλος, 2012).

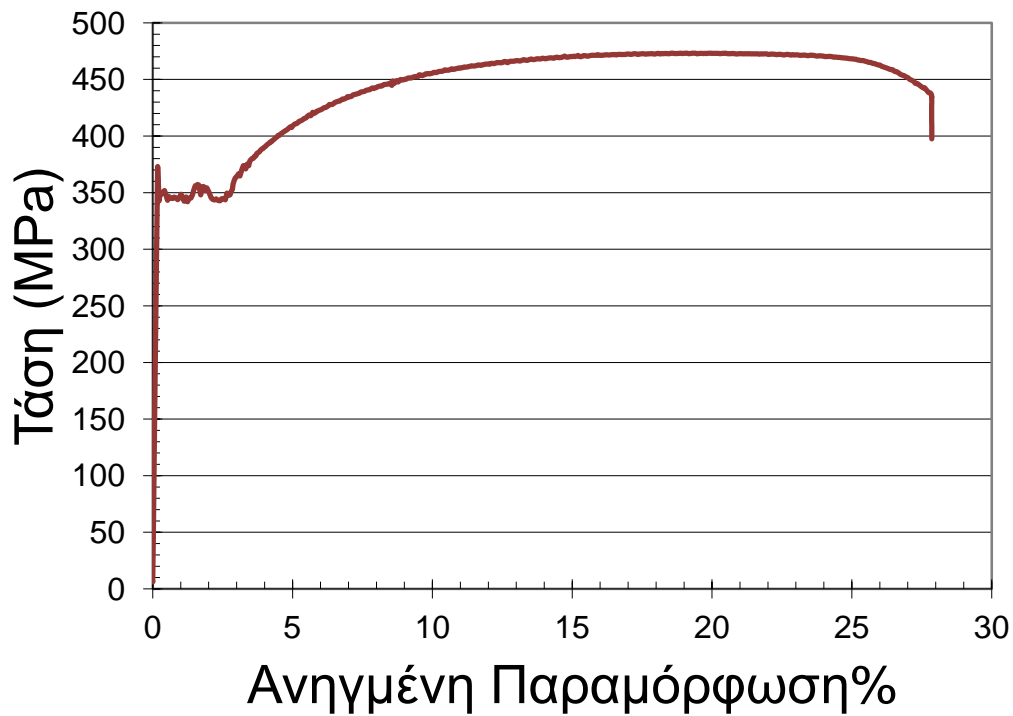


Σχήμα 3.5.2.1 : Πρόσοψη της πειραματικής διάταξης ενισχυμένου πλαισίου με Χ-συνδέσμους 2L20x3/5



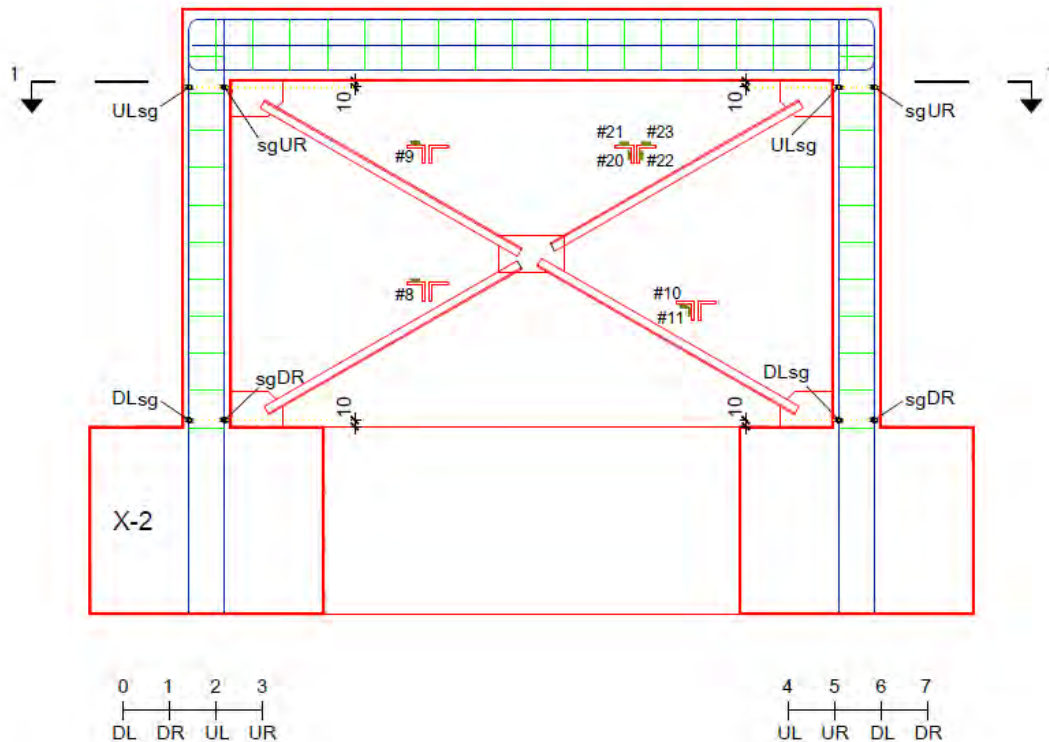
Σχήμα 3.5.2.2 : Λεπτομέρεια πειραματικής διάταξης ενισχυμένου πλαισίου με Χ-συνδέσμους 2L20x3/5

Όσον αφορά τη σχέση τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης του χάλυβα, η τάση διαρροής βρέθηκε ίσης με $f_y = 350 \text{ MPa}$, η παραμόρφωση διαρροής $\epsilon_y = 0.17 \%$ και τάση θραύσης $f_u = 478 \text{ MPa}$. Το διάγραμμα αναπαρίσταται στο Σχήμα 3.5.2.7. Τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά της διατομής 2L20x3/5 είναι: $A = 2.22 \text{ cm}^2$, $I_y = 0.806 \text{ cm}^4$, $I_z = 2.446 \text{ cm}^4$. Η εφελκυστική αντοχή βρέθηκε ίση με 52.2 kN. Η αντοχή αυτή αντιστοιχεί στην ονομαστική τιμή της τάσης διαρροής του χάλυβα S235. Αν αντί αυτής χρησιμοποιηθεί η πειραματική της τιμή ($f_y = 350 \text{ MPa}$), η αντίστοιχη τιμή της αντοχής βρέθηκε ίση με 77.7 kN.



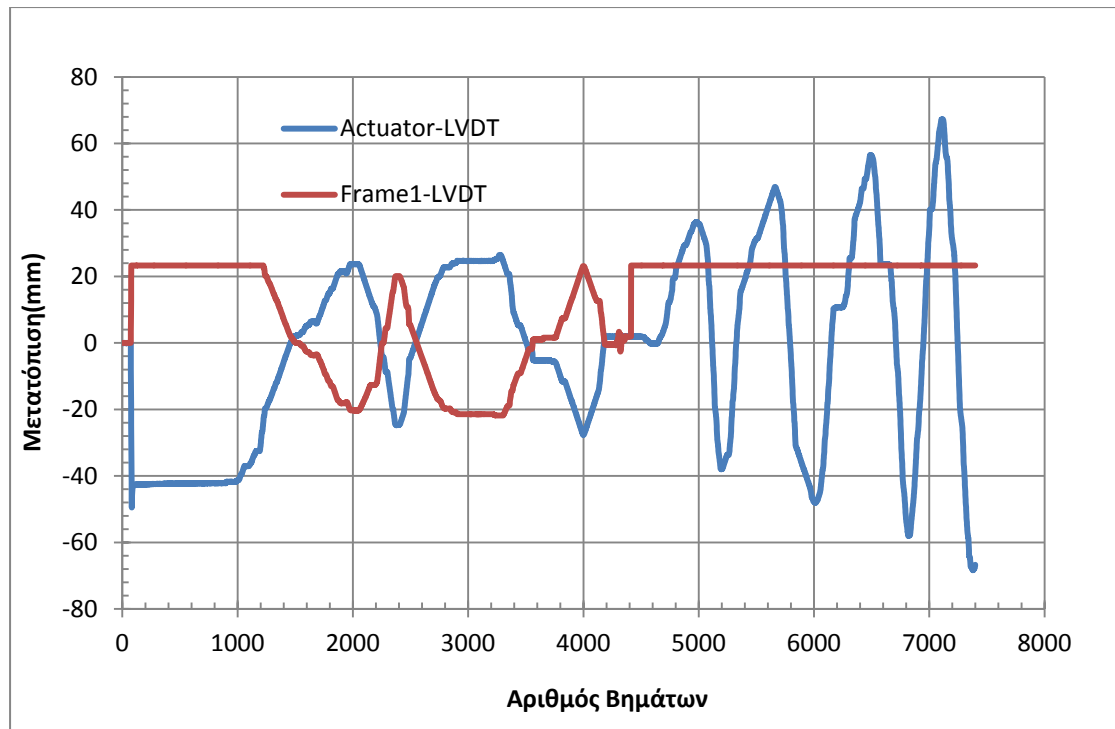
Σχήμα 3.5.2.3 : Σχέση τάσης – ανηγμένης παραμορφώσεως X – συνδέσμων 2L20x3/5

Στο Σχήμα 3.5.2.4 φαίνεται η διάταξη των μηκυνσιομέτρων του εν λόγω πειράματος. Ο αριθμός δίπλα σε κάθε μηκυνσιόμετρο καταδεικνύει τον αριθμό του καναλιού στο σύστημα απόκτησης δεδομένων. Επιπρόσθετα τοποθετήθηκαν δύο αισθητήρια καλώδια μετατόπισης κατά μήκος των διαγωνίων, δύο LVDT's (ένας στο μέσο του ανοίγματος της δοκού και ένας στο δυτικό άκρο της δοκού - ο προσανατολισμός είναι όπως στο Σχήμα 3.5.1.5 - αμφότερα με ικανότητα ± 24 mm), η δυναμοκυψέλη του ενεργοποιητή και ο Tempsonic του ενεργοποιητή (χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες μετατόπισης για τον έλεγχο του πειράματος) (Σοφιανόπουλος, 2012).



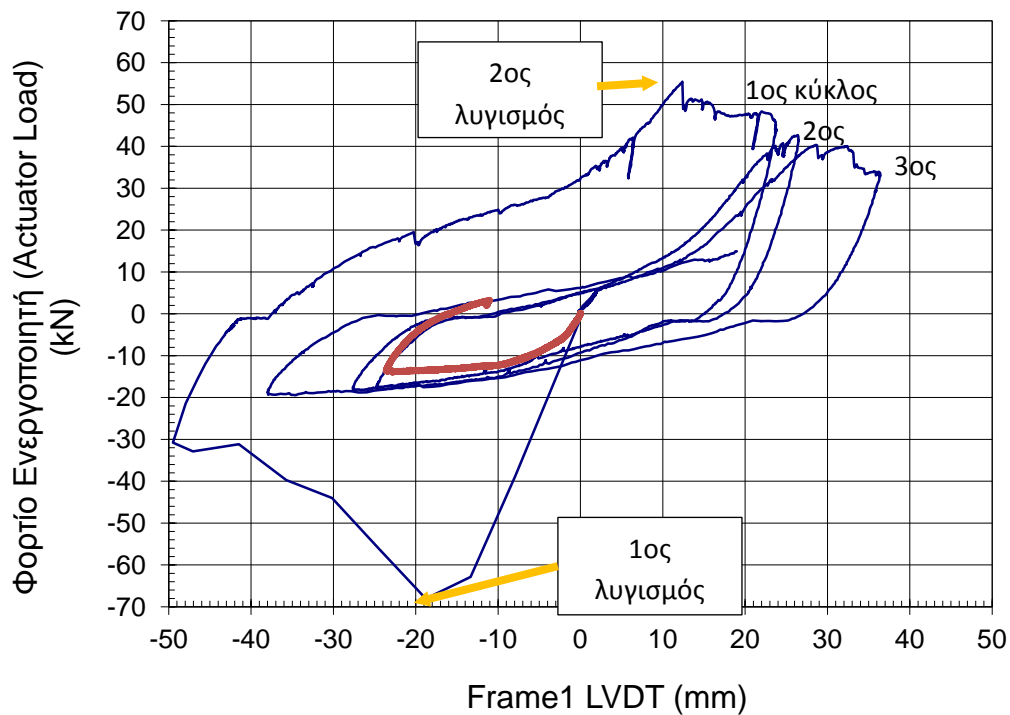
Σχήμα 3.5.2.4 : Διάταξη των μηχανομομέτρων (strain gauges) στο πείραμα με X-συνδέσμους L20x3

Το πλαίσιο υποβλήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, καταγεγραμμένη από τα όργανα μέτρησης του πλαισίου, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5.2.5. Με την έναρξη του πειράματος, λόγω κακής ευθυγράμμισης της πολικότητας του Frame50-1 transducer (καναλιού ελέγχου), επιβλήθηκε τυχηματικά σε πολύ λίγο χρόνο πλευρική μετατόπιση περίπου 50 mm (απότομα), οπότε μόνο 10 σημεία καταγράφηκαν από το σύστημα data acquisition. Τούτο είχε σαν αποτέλεσμα σε σοβαρές βλάβες του όλου συστήματος (1ος ανελαστικός λυγισμός της θλιβόμενης διαγωνίου, διαρροή της εφελκυσόμενης διαγωνίου και αστοχία του κάτω αριστερά κολάρου λόγω θραύσης των ραφών), βλέπε Σχήμα 3.5.2.6 (Σοφιανόπουλος, 2012).



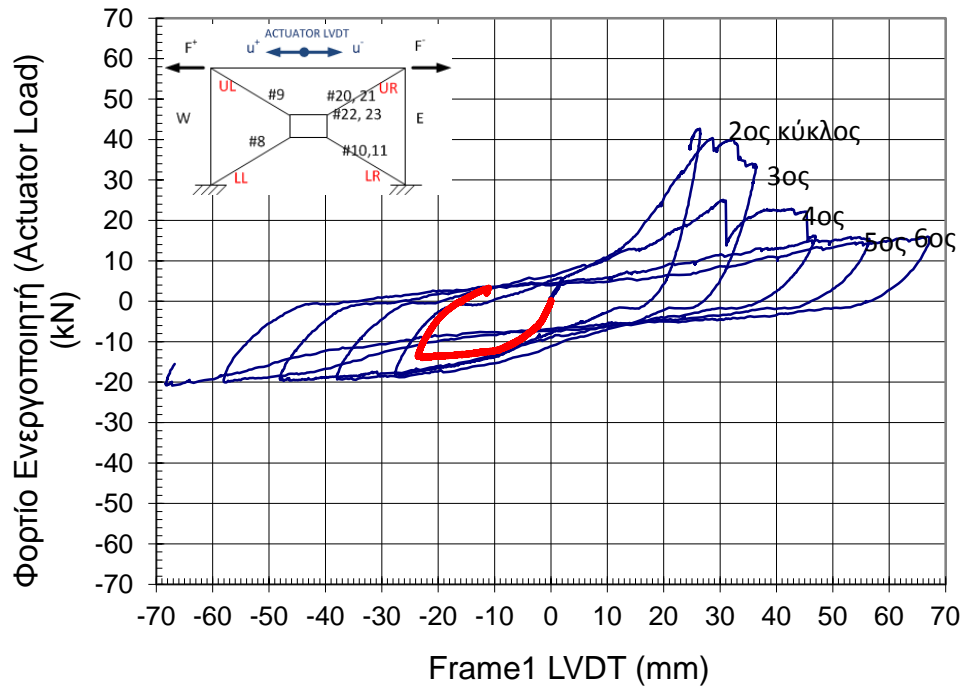
Σχήμα 3.5.2.5. : Πλευρική μετατόπιση που εφαρμόστηκε στο επίπεδο της δοκού(6 κύκλοι φόρτισης)

Στο Σχήμα 3.5.2.6 παρουσιάζονται οι καμπύλες δύναμης (δυναμοκυψέλης ενεργοποιητή) – μετατόπισης ενεργοποιητή για τους πρώτους τρεις (3) κύκλους φόρτισης. Δεν ήταν δυνατό να προσεγγιστεί αξιόπιστα η αρχική δυσκαμψία του συγκεκριμένου συστήματος Χ-συνδέσμων λόγω έλλειψης καταγραμμένων δεδομένων εξ' αιτίας της μεγάλης μεγέθους τυχαμτικής φόρτισης κατά το αρχικό ¼ κύκλου. (Σοφιανόπουλος, 2012).



Σχήμα 3.5.2.6 : Πειραματική καμπύλη πλευρικής δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης του συστήματος πλαίσιο – Χ σύνδεσμοι (μπλε γραμμή) και «γυμνού» πλαισίου (κόκκινη γραμμή) για τους 3 ¼ αρχικούς κύκλους φόρτισης

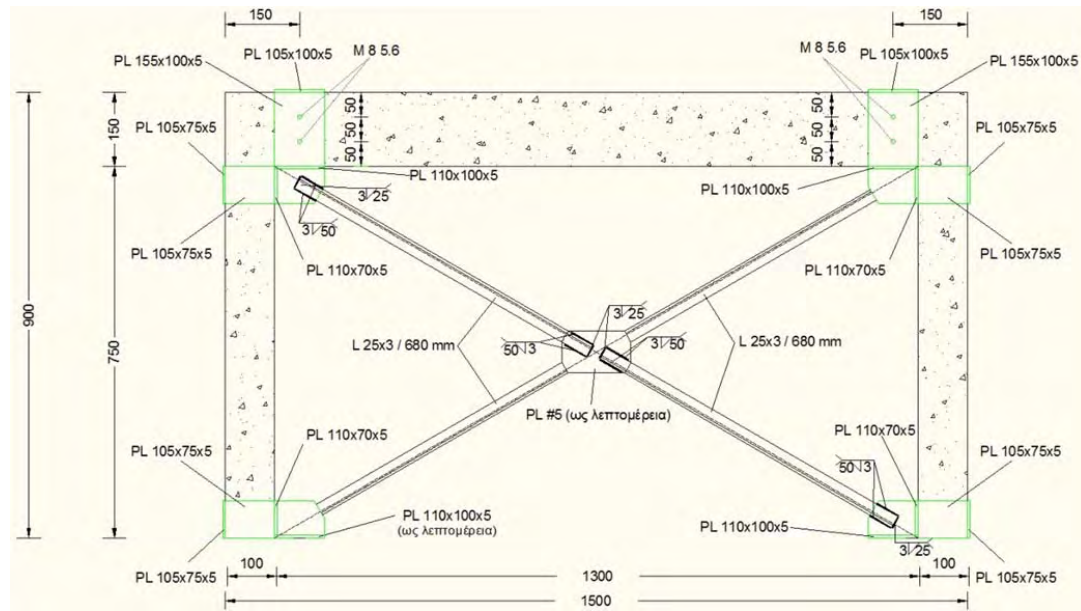
Στο Σχήμα 3.5.2.7 παρουσιάζονται οι καμπύλες δύναμης (δυναμοκυψέλης ενεργοποιητή) – μετατόπισης ενεργοποιητή μεταξύ του 2^{ου} και 6^{ου} κύκλου φόρτισης. Η κόκκινη γραμμή αναπαριστά την πειραματική απόκριση του απλού (χωρίς Χ-συνδέσμους) πλαισίου για μισό κύκλο φόρτισης (από διαφορετικό πείραμα με άλλο δοκίμιο). Η μέγιστη αντοχή που συνεισέφεραν οι Χ-σύνδεσμοι στο σύστημα ήταν 56 kN, μικρότερη από αυτή που υπολογίστηκε κατά το προκαταρκτικό σχεδιασμό (67.2 kN), ενώ η αντοχή του απλού πλαισίου ήταν 14 kN.



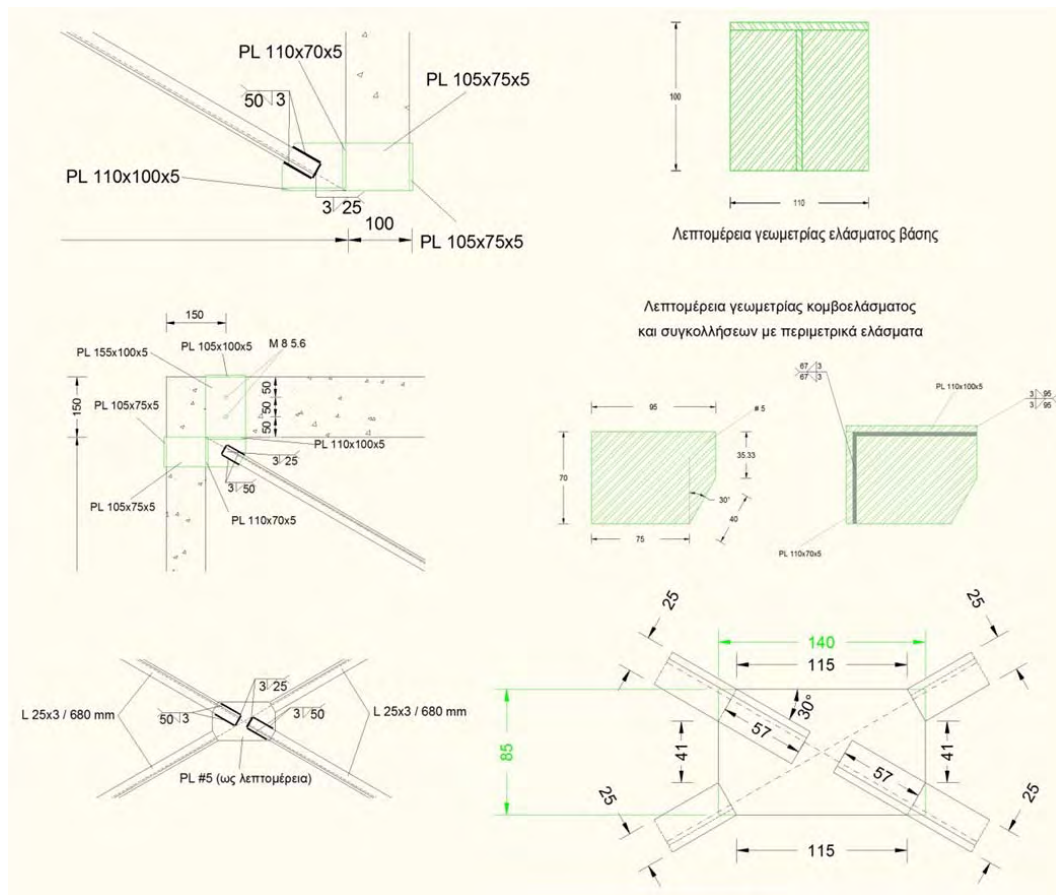
Σχήμα 3.5.2.7 : Πειραματική καμπύλη πλευρικής δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης του συστήματος πλαίσιο – Χ σύνδεσμοι (μπλε γραμμή) και «γυμνού» πλαισίου (κόκκινη γραμμή) μεταξύ του 2^{ου} και 6^{ου} κύκλου φόρτισης

3.5.3. Πειραματικά αποτελέσματα 3^{ου} συστήματος Χ-συνδέσμων (L25x3)

Στο 3^ο σύστημα Χ-συνδέσμων οι διαγώνιες ράβδοι ήταν διατομής L25x3. Στα Σχήματα 3.5.3.1 και 3.5.3.2 απεικονίζονται η πρόσοψη και οι λεπτομέρειες του όλου συστήματος αντίστοιχα.

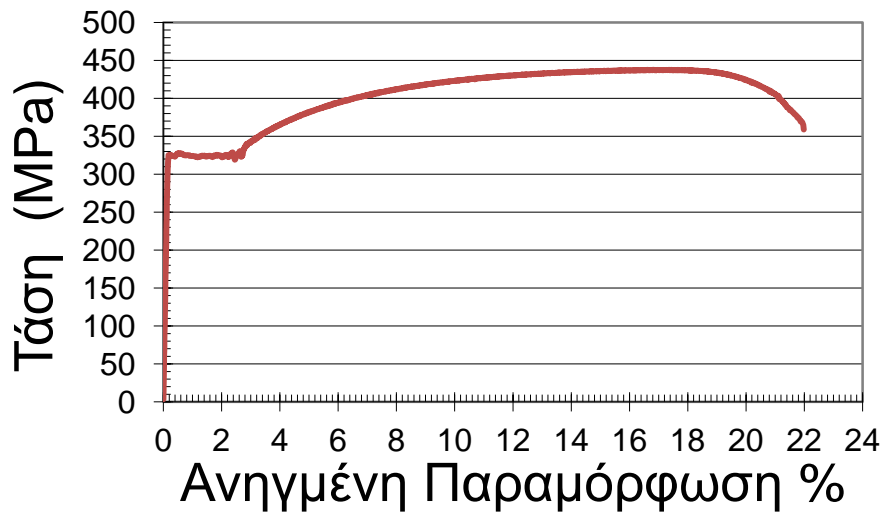


Σχήμα 3.5.3.1 : Πρόσοψη της πειραματικής διάταξης ενισχυμένου πλαισίου με Χ-συνδέσμους L25x3



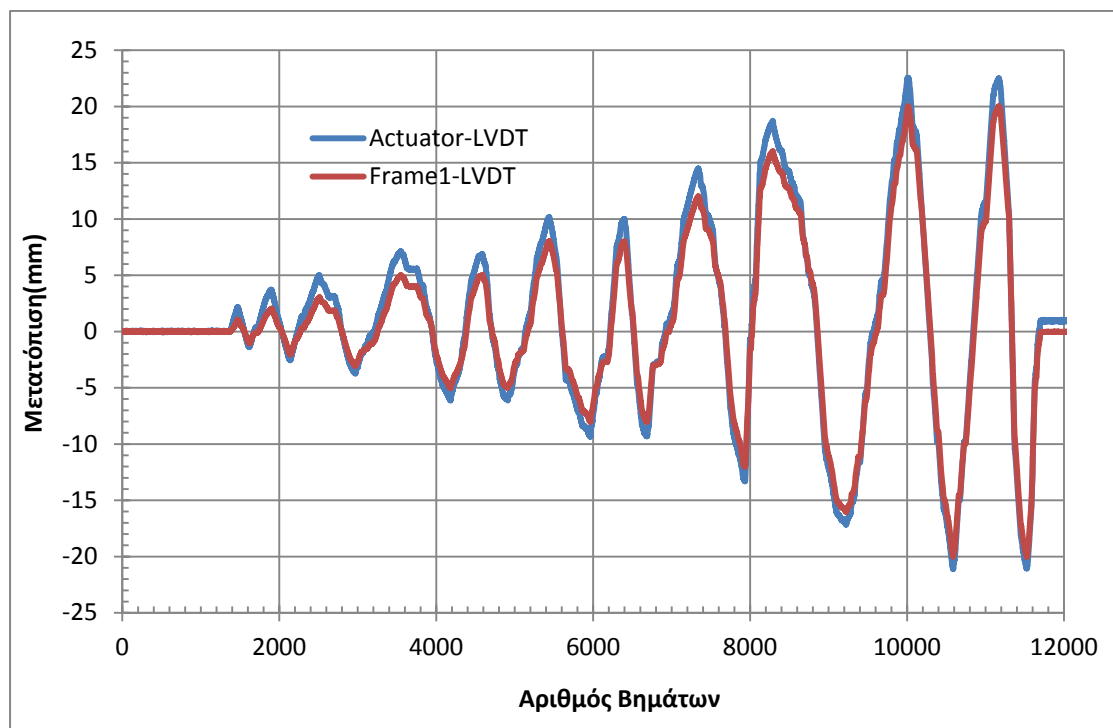
Σχήμα 3.5.3.2 : Λεπτομέρεια πειραματικής διάταξης ενισχυμένου πλαισίου με X-συνδέσμους L25x3

Όσον αφορά τη σχέση τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης του χάλυβα, η τάση διαρροής βρέθηκε ίσης με $f_y = 325 \text{ MPa}$, η παραμόρφωση διαρροής $\epsilon_y = 0.178 \%$ και τάση θραύσης $f_u = 437 \text{ MPa}$. Το διάγραμμα αναπαρίσταται στο Σχήμα 3.5.3.3. Τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά της διατομής L25x3 είναι: $A = 1.42 \text{ cm}^2$ και $I_y = I_z = 0.7968 \text{ cm}^4$. Η εφελκυστική αντοχή βρέθηκε ίση με 33.53kN. Η αντοχή αυτή αντιστοιχεί στην ονομαστική τιμή της τάσης διαρροής του χάλυβα S235. Αν αντί αυτής χρησιμοποιηθεί η πειραματική της τιμή ($f_y = 325 \text{ MPa}$), η αντίστοιχη τιμή της αντοχής βρέθηκε ίση με 46.15 kN.



Σχήμα 3.5.3.3 : Σχέση τάσης – ανηγμένης παραμορφώσεως χ – συνδέσμων L25x3

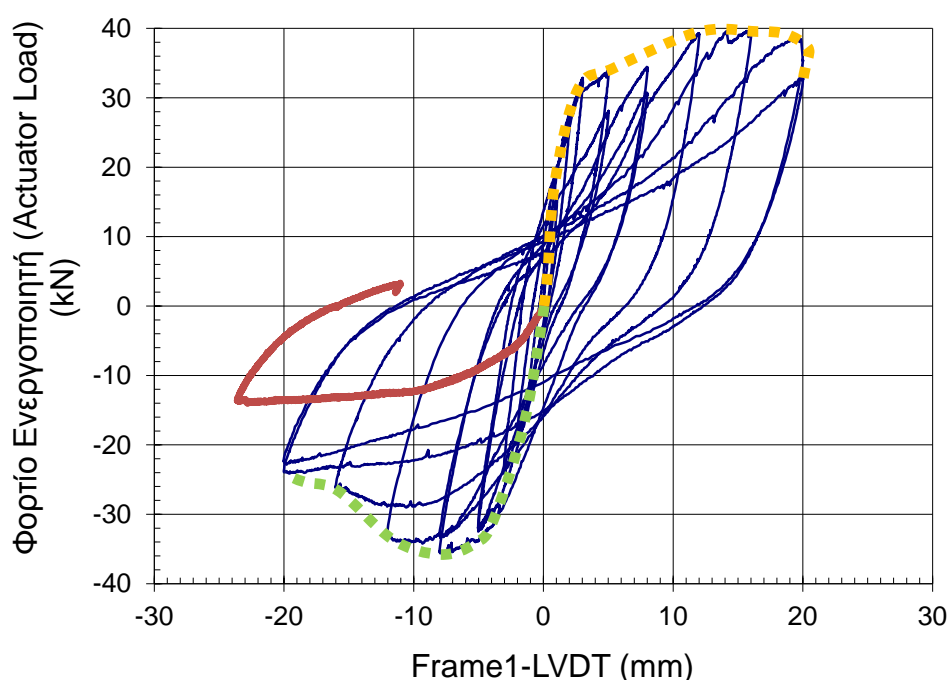
Η διάταξη των οργάνων μέτρησης είναι ίδια με την περίπτωση του 1^{ου} συστήματος χ -συνδέσμων, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 3.5.1. Η χρονοϊστορία ανακυκλιζόμενης φόρτισης απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5.3.4 για 11 κύκλους φόρτισης.



Σχήμα 3.5.3.4. : Πλευρική μετατόπιση που εφαρμόστηκε στο επίπεδο της δοκού (11 κύκλοι φόρτισης)

Στο σχήμα 3.5.3.5 παρουσιάζονται οι 11 κύκλοι φόρτισης του πλαισίου ΟΣ με τους χ -συνδέσμους (μπλε γραμμή) μαζί με την καμπύλη δύναμης – μετατόπισης του «γυμνού» πλαισίου (κόκκινη γραμμή). Οι πράσινες και πορτοκαλί γραμμές

αντιπροσωπεύουν την περιβάλλουσα για θετικές και αρνητικές μετατοπίσεις του συνολικού συστήματος πλαίσιο – Χ-σύνδεσμοι.



Σχήμα 3.5.3.5 : Πειραματική καμπύλη πλευρικής δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης του συστήματος πλαίσιο – Χ σύνδεσμοι (μπλε γραμμή) και «γυμνού» πλαισίου (κόκκινη γραμμή) για τους 11 κύκλους φόρτισης. Οι περιβάλλουσες (για τους 11 κύκλους φόρτισης) φαίνονται με πράσινη και πορτοκαλί γραμμή

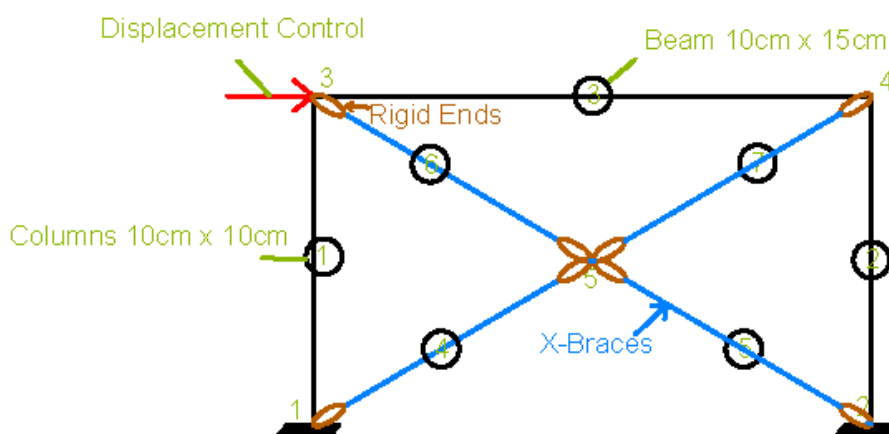
3.6 Μοντέλο πλαισίου ενισχυμένου με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους στο RUAUMOKO

Στην περίπτωση του πλαισίου ενισχυμένου με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους θα χρησιμοποιηθούν οι ίδιες ιδιότητες για τα αναλυτικά μοντέλα των υποστυλωμάτων και της δοκού του εξωτερικού πλαισίου, όπως ακριβώς περιγράφηκαν στην παράγραφο 3.2 για το «γυμνό» πλαίσιο. Επιπροσθέτως, θα δοθεί ιδιαίτερη μέριμνα για το εσωτερικό του πλαισίου, λόγω της ανάγκης προσομοίωσης των μεταλλικών συνδέσμων και των κομβοελασμάτων.

3.6.1 Προσομοίωση του συνολικού πλαισίου

Το πλαίσιο προσομοιώνεται όπως το «γυμνό πλαίσιο» με την διαφορά ότι, ενδότερα του πλαισίου τοποθετούνται οι τέσσερις μεταλλικοί σύνδεσμοι, οι οποίοι συναντώνται σε ένα πρόσθετο κεντρικό κόμβο. Για την προσομοίωση των ακραίων και του κεντρικού κομβοελάσματος τοποθετούνται σε κάθε άκρο κάθε μεταλλικού συνδέσμου

άκαμπτα άκρα (rigid ends). Πρέπει να σημειωθεί ότι στο πραγματικό πείραμα τα κομβοελάσματα στο κάτω μέρος των υποστυλωμάτων ήταν ελεύθερα να ολισθήσουν προς τα πάνω (είχαν τη δυνατότητα μετακίνησης κατά μήκος της κατακόρυφης διεύθυνσης των υποστυλωμάτων) αλλά όχι προς τα κάτω αφού εμποδίζονται από την βάση του υποστυλώματος. Αυτή η δυνατότητα δεν υπάρχει στο μοντέλο του RUAUMOKO, αλλά τα κομβοελάσματα (rigid links των μεταλλικών συνδέσμων) είναι στερεά συνδεδεμένα στους κόμβους χωρίς να επιτρέπεται σε κανένα από αυτά η ολισθήση στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η αδυναμία αυτή του μοντέλου να προσομοιώσει την πραγματική κατάσταση στο πείραμα περιορίζει την δυνατότητα της ανάλυσης στο να προσομοιώσει με ακρίβεια τα πειραματικά αποτελέσματα, και ειδικά πέραν του πρώτου κύκλου φόρτισης. Η διέγερση επιβάλλεται στον άνω αριστερά κόμβο, όπως και στην περίπτωση του «γυμνού» πλαισίου. Το μοντέλο του πλαισίου απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6.1.1.



Σχήμα 3.6.1.1. : Προσομοίωση πλαισίου ενισχυμένου με Χ-συνδέσμους

3.6.2 Ανάπτυξη αναλυτικού μοντέλου προσομοίωσης του 1ου συστήματος μεταλλικών συνδέσμων L20x3

Για την προσομοίωση των μεταλλικών συνδέσμων χρησιμοποιήθηκε στο RUAUMOKO το στοιχείο "One component (Giberson) beam member". Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε η απλή σύνδεση των μελών με τους κόμβους και ο νόμος υστέρησης με αριθμό #24, του Remennikov (Remennikov and Walpole, 1995).

Οι βασικές παράμετροι που απαιτούνται από το RUAUMOKO για τους μεταλλικούς συνδέσμους L20x3 παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.6.2.1 και 3.6.2.2. Σημειώνεται ότι δεν χρησιμοποιήθηκε η ονομαστική τάση διαρροής του χάλυβα (235 MPa), αλλά

αντί αυτής χρησιμοποιήθηκε η τιμή που μετρήθηκε από τα πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού, 325 MPa (βλ. παράγραφος 3.5.1).

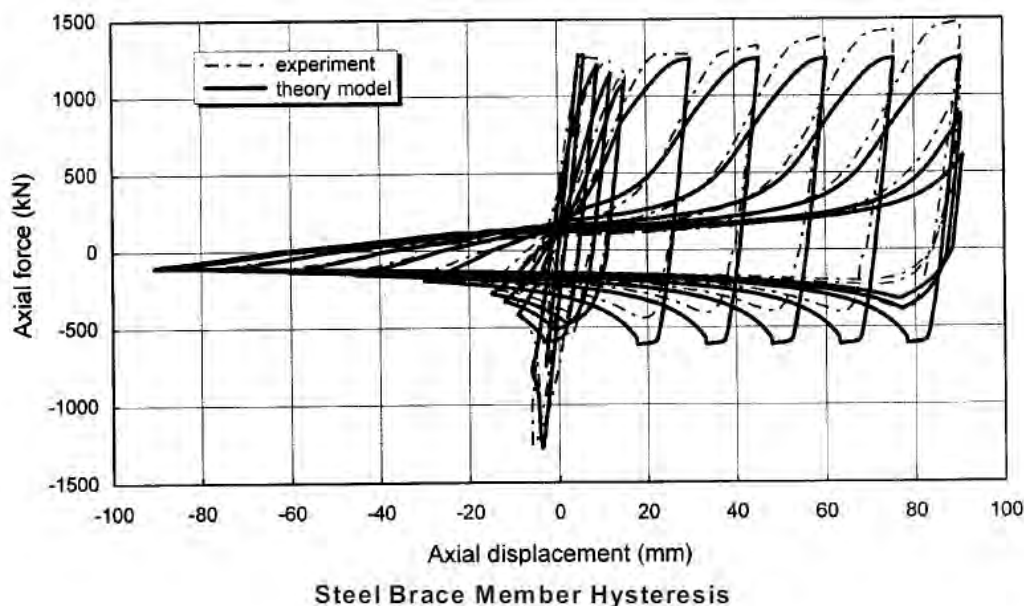
Πίνακας 3.6.2.1 : Ελαστικές ιδιότητες διατομών

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
E(kPa)	Elastic (Young's) Modulus of member material	210000000 (kPa)
G(kPa)	Shear Modulus of member material	80800000 (kPa)
A(m ²)	Cross-sectional AREA of the member section	1.11E-04 (m ²)
AS(m ²)	Effective SHEAR AREA of the member section (if AS=0.0 then shear deformations in the section are suppressed)	0
I(m ⁴)	MOMENT of INERTIA (2nd Moment of Area) of section	4.000E-09 (m ⁴)
WGT(N/mm)	Weight/(unit length) of the member	0
END1	Length of Rigid End-block at End 1 of member	0.208 (m)
END2	Length of Rigid End-block at End 2 of member	0.0806 (m)
FJ1	Joint flexibility at End 1 (radians/unit moment)	0
FJ2	Joint flexibility at End 2 (radians/unit moment)	0

Πίνακας 3.6.2.2 : Συνθήκες διαρροής συνδέσμων

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
PYT	Axial force for tensile yield	36.08 (kN)
PYC	Axial force for compression yield	-36.08 (kN)
MY1+	Positive yield moment (End 1)	0.091 (kNm)
MY1-	Negative yield moment	-0.091 (kNm)
MY2+	Positive yield moment (End 1)	0.091 (kNm)
MY2-	Negative yield moment	-0.091 (kNm)

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των μεταλλικών συνδέσμων χρησιμοποιήθηκε ο νόμος υστέρησης Remennikov (Remennikov and Walpole, 1995), νόμος υστέρησης με αριθμό #24 στο RUAUMOKO 2D. Στο Σχήμα 3.6.2.1 φαίνεται ο νόμος υστέρησης Remennikov. Οι παράμετροι που απαιτούνται στο RUAUMOKO για να χρησιμοποιηθεί αυτός ο νόμος υστέρησης παρουσιάζονται στον πίνακα 3.6.2.3. Οι παράμετροι αυτές βαθμονομήθηκαν ώστε να προσεγγιστούν κατά το μέγιστο δυνατό τα πειραματικά αποτελέσματα.



Σχήμα 3.6.2.1 : Νόμος υστέρησης Remennikov (Carr.A.J., 2005)

Πίνακας 3.6.2.3 : Παράμετροι νόμου υστέρησης Remennikov

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
Iminor	Second Moment of Area about Minor axis	4.000E-09 (m ⁴)
Sminor	Plastic Section Modulus about Minor axis	2.800E-07 (m ³)
k	Effective Length Parameter (L = kL)	0.75
ALFA	Strain Hardening Alpha	1.0
BETA	Beta factor ($\beta > 1.0$) recommended range 1.2 to 1.4	1.2
THETA0	Initial out-of-straightness (length units)	0.0
E1	Effective modulus e1 (>0.0)	0.45
E2	Effective modulus e2 (>0.0)	0.90
E3	Effective modulus e3 (>0.0)	1.10
E4	Effective modulus e4	0.0
N	= 0; ALFA above used for strain hardening effects. I = 1; Built-in strain hardening rule and ALFA is reset to 1.0	0
SHAPE	= 1; Flanged section such as an I section. I = 2; Circular hollow section = 3; RHS or SHS section	1

3.6.3 Ανάπτυξη αναλυτικού μοντέλου προσομοίωσης του 2ου συστήματος μεταλλικών συνδέσμων 2L20x3/5

Για την προσομοίωση των μεταλλικών συνδέσμων χρησιμοποιήθηκε το ίδιο στοιχείο του RUAUMOKO όπως στην παράγραφο 3.6.2 "One component (Giberson) beam member". Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε η απλή σύνδεση των μελών με τους κόμβους

και ο νόμος υστέρησης με αριθμό #24, του Remennikov (Remennikov and Walpole, 1995).

Οι βασικές παράμετροι που απαιτούνται από το RUAUMOKO για τους μεταλλικούς συνδέσμους 2L20x3/5 παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.6.3.1 και 3.6.3.2. Σημειώνεται ότι δεν χρησιμοποιήθηκε η ονομαστική τάση διαρροής του χάλυβα(235 MPa), αλλά αντί αυτής χρησιμοποιήθηκε η τιμή που μετρήθηκε από τα πειράματα (350MPa, βλ. παράγραφος 3.5.2)

Πίνακας 3.6.3.1 : Ελαστικές ιδιότητες διατομών

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
E(kPa)	Elastic (Young's) Modulus of member material	210000000 (kPa)
G(kPa)	Shear Modulus of member material	80800000 (kPa)
A(m ²)	Cross-sectional AREA of the member section	2.22E-04 (m ²)
AS(m ²)	Effective SHEAR AREA of the member section (if AS=0.0 then shear deformations in the section are suppressed)	0
I(m ⁴)	MOMENT of INERTIA (2nd Moment of Area) of section	8.06E-09 (m ⁴)
WGT(N/mm)	Weight/(unit length) of the member	0
END1	Length of Rigid End-block at End 1 of member	0.208 (m)
END2	Length of Rigid End-block at End 2 of member	0.0806 (m)
FJ1	Joint flexibility at End 1 (radians/unit moment)	0
FJ2	Joint flexibility at End 2 (radians/unit moment)	0

Πίνακας 3.6.3.2 : Συνθήκες διαρροής συνδέσμων

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
PYT	Axial force for tensile yield	77.7 (kN)
PYC	Axial force for compression yield	-77.7 (kN)
MY1+	Positive yield moment (End 1)	0.1352 (kNm)
MY1-	Negative yield moment	-0.1352 (kNm)
MY2+	Positive yield moment (End 1)	0.1352 (kNm)
MY2-	Negative yield moment	-0.1352 (kNm)

Οι παράμετροι που απαιτούνται στο RUAUMOKO για να χρησιμοποιηθεί ο νόμος υστέρησης Remennikov παρουσιάζονται στον πίνακα 3.6.3.3.

Πίνακας 3.6.3.3 : Παράμετροι νόμου υστέρησης Remennikov

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
Iminor	Second Moment of Area about Minor axis	8.06E-09 (m ⁴)
Sminor	Plastic Section Modulus about Minor axis	11.61E-07 (m ³)
k	Effective Length Parameter (L = kL)	0.75
ALFA	Strain Hardening Alpha	1.0
BETA	Beta factor ($\beta > 1.0$) recommended range 1.2 to 1.4	1.2
THETA0	Initial out-of-straightness (length units)	0.0
E1	Effective modulus e1 (>0.0)	0.45
E2	Effective modulus e2 (>0.0)	0.90
E3	Effective modulus e3 (>0.0)	1.10
E4	Effective modulus e4	0.0
N	= 0; ALFA above used for strain hardening effects. = 1; Built-in strain hardening rule and ALFA is reset to 1.0	0
SHAPE	= 1; Flanged section such as an I section. = 2; Circular hollow section = 3; RHS or SHS section	1

3.6.4 Ανάπτυξη αναλυτικού μοντέλου προσομοίωσης του 3ου συστήματος μεταλλικών συνδέσμων L25x3

Για την προσομοίωση των μεταλλικών συνδέσμων χρησιμοποιήθηκε το ίδιο στοιχείο του RUAUMOKO και ο ίδιος νόμος υστέρησης, όπως στην παράγραφο 3.6.2. Οι βασικές παράμετροι που απαιτούνται από το RUAUMOKO για τους μεταλλικούς συνδέσμους L25x3 παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.6.4.1 και 3.6.4.2. Σημειώνεται ότι δεν χρησιμοποιήθηκε η ονομαστική τάση διαρροής του χάλυβα (235 MPa), αλλά αντί αυτής χρησιμοποιήθηκε η τιμή που μετρήθηκε από τα πειράματα (325MPa, βλ. παράγραφος 3.5.3)

Πίνακας 3.6.4.1 : Ελαστικές ιδιότητες διατομών

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
E(kPa)	Elastic (Young's) Modulus of member material	210000000 (kPa)
G(kPa)	Shear Modulus of member material	80800000 (kPa)
A(m ²)	Cross-sectional AREA of the member section	1.42E-04 (m ²)
AS(m ²)	Effective SHEAR AREA of the member section (if AS=0.0 then shear deformations in the section are suppressed)	0
I(m ⁴)	MOMENT of INERTIA (2nd Moment of Area) of section	7.961E-09 (m ⁴)
WGT(N/mm)	Weight/(unit length) of the member	0
END1	Length of Rigid End-block at End 1 of member	0.208 (m)
END2	Length of Rigid End-block at End 2 of member	0.0806 (m)
FJ1	Joint flexibility at End 1 (radians/unit moment)	0
FJ2	Joint flexibility at End 2 (radians/unit moment)	0

Πίνακας 3.6.4.2 : Συνθήκες διαρροής συνδέσμων

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
PYT	Axial force for tensile yield	46.15 (kN)
PYC	Axial force for compression yield	-46.15 (kN)
MY1+	Positive yield moment (End 1)	0.1469 (kNm)
MY1-	Negative yield moment	-0.1469 (kNm)
MY2+	Positive yield moment (End 1)	0.1469 (kNm)
MY2-	Negative yield moment	-0.1469 (kNm)

Οι παράμετροι που απαιτούνται στο RUAUMOKO για να χρησιμοποιηθεί ο νόμος υστέρησης Remennikov παρουσιάζονται στον πίνακα 3.6.4.3.

Πίνακας 3.6.4.3 : Παράμετροι νόμου υστέρησης Remennikov

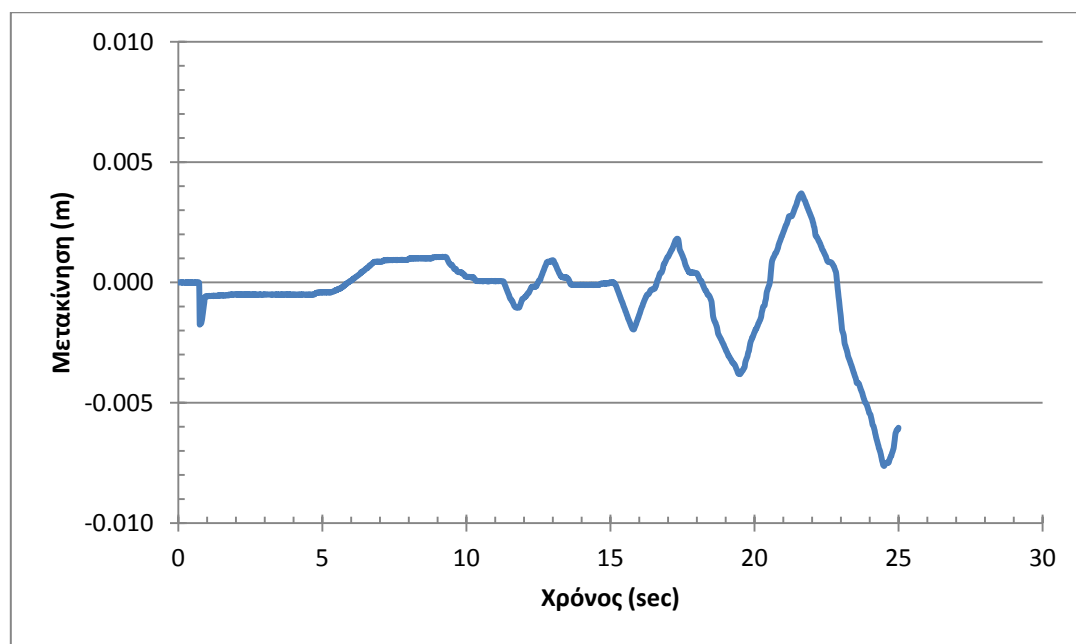
Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
Iminor	Second Moment of Area about Minor axis	7.961E-09 (m ⁴)
Sminor	Plastic Section Modulus about Minor axis	4.52E-07 (m ³)
k	Effective Length Parameter (L = kL)	0.75
ALFA	Strain Hardening Alpha	1.0
BETA	Beta factor ($\beta > 1.0$) recommended range 1.2 to 1.4	1.2

THETA0	Initial out-of-straightness (length units)	0.0
E1	Effective modulus e1 (>0.0)	0.45
E2	Effective modulus e2 (>0.0)	0.90
E3	Effective modulus e3 (>0.0)	1.10
E4	Effective modulus e4	0.0
N	= 0; ALFA above used for strain hardening effects. I = 1; Built-in strain hardening rule and ALFA is reset to 1.0	0
SHAPE	= 1; Flanged section such as an I section. I = 2; Circular hollow section = 3; RHS or SHS section	1

3.7 Σύγκριση πειραματικής και αναλυτικής συμπεριφοράς πλαισίου ενισχυμένου με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους κάτω από ανακυκλική στατική φόρτιση

3.7.1 1^ο Σύστημα Χ-συνδέσμων (L20x3)

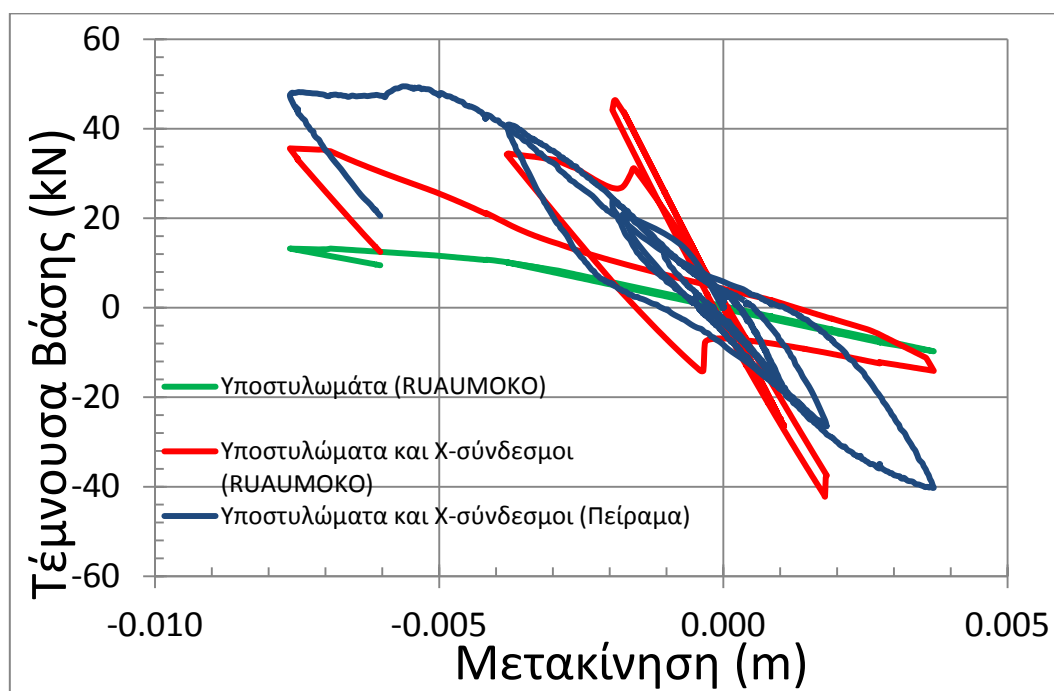
Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για ελεγχόμενη επιβαλλόμενη μετακίνηση στον κόμβο «3» του πλαισίου, για τους πρώτους 5 κύκλους φόρτισης του πειράματος. Η επιβαλλόμενη μετακίνηση απεικονίζεται στο Σχήμα 3.7.1.1.



Σχήμα 3.7.1.1 : Επιβαλλόμενη μετακίνηση στον κόμβο 3 του πλαισίου για τους αρχικούς 5 κύκλους φόρτισης

Η σύγκριση του αναλυτικού μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα έγινε με βάση την συνολική πλευρική (διατμητική) δύναμη του πλαισίου, η οποία αντιστοιχεί στην επαλληλία της διατμητικής δύναμης των δύο υποστυλωμάτων και της διατμητικής

δύναμης (οριζόντια προβολή) των δύο άνω ή κάτω Χ-συνδέσμων αντίστοιχα. Στην προκειμένη περίπτωση, υπολογίστηκε το άθροισμα της διατμητικής δύναμης των δύο άνω άκρων των υποστυλωμάτων μαζί με τη διατμητική δύναμη των Χ-συνδέσμων «member #6» και «#7», σύμφωνα με το Σχήμα 3.6.1.1. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.7.1.2.

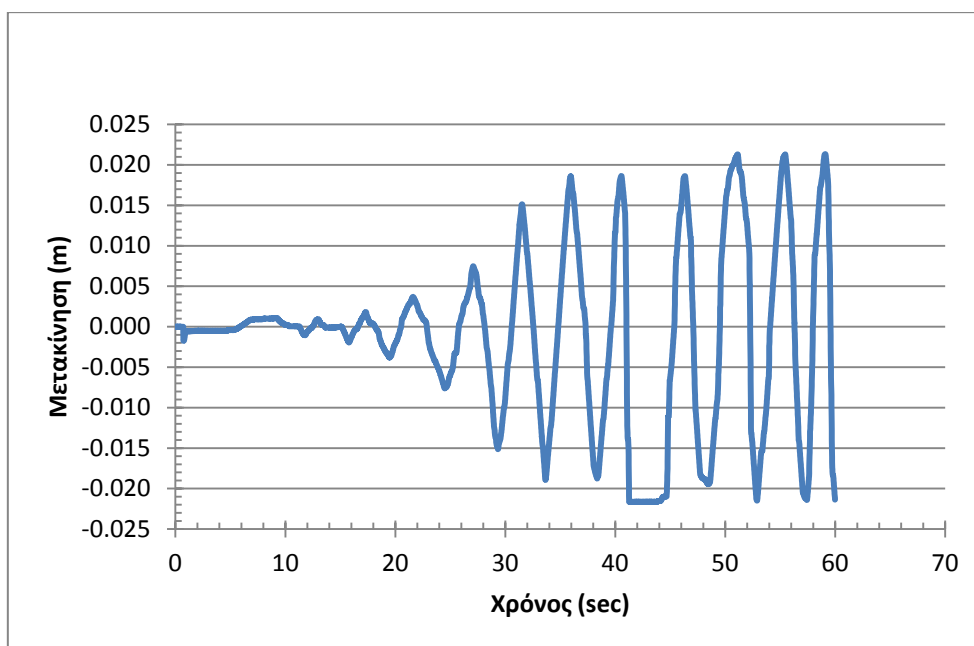


Σχήμα 3.7.1.2 : Συγκριτικά αποτελέσματα πειραματικών αποτελεσμάτων και του αναλυτικού μοντέλου RUAUMOKO των πρώτων 5 κύκλων φόρτισης για πλαίσιο ενισχυμένο με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους L20x3

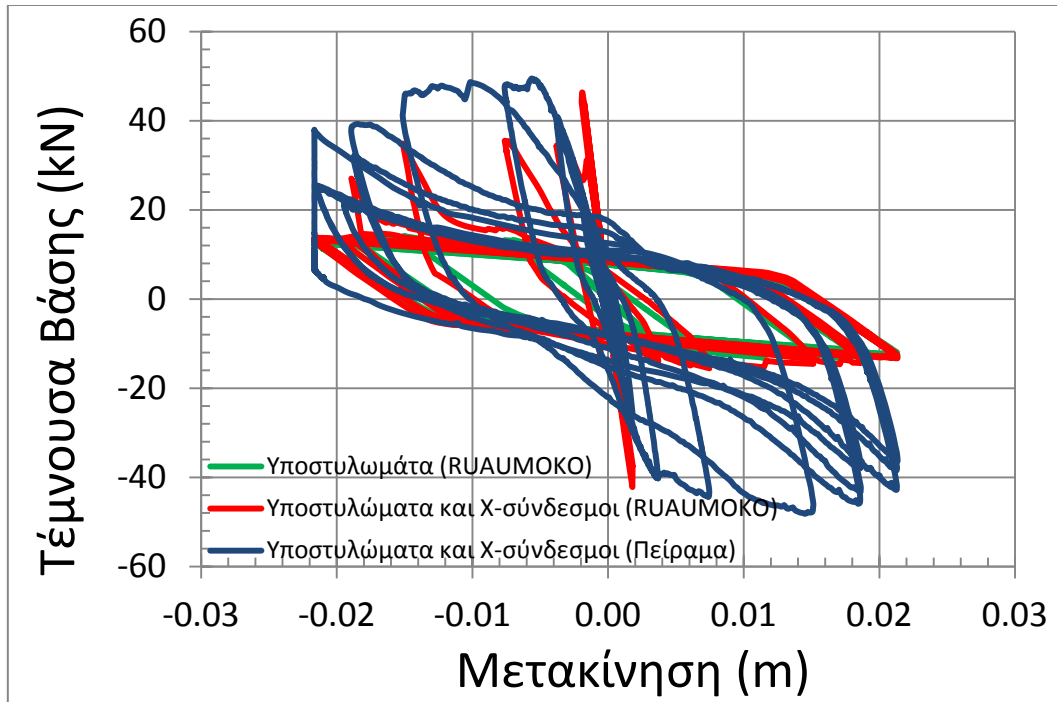
Η απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων του αναλυτικού μοντέλου δικαιολογείται ως εξής: Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 3.6.1, στο πραγματικό πείραμα τα κομβοελάσματα στα οποία κατέληγαν οι Χ-σύνδεσμοι στις βάσεις των υποστυλωμάτων δεν ήταν πακτωμένα στη θεμελίωση και επιπροσθέτως είχαν ελεύθερη την κατακόρυφη μετακίνηση κατά μήκος των υποστυλωμάτων που «αγκάλιαζαν». Όταν οι συγκολλημένοι με το μεταλλικό κολάρο σύνδεσμοι ήταν σε εφελκυσμό, υπήρχε η ελευθερία ολίσθησης του κολάρου κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση με τριβή μεταξύ της διεπιφάνειας κολάρου – υποστυλώματος. Αντιθέτως όταν οι μεταλλικοί σύνδεσμοι ήταν υπό θλίψη, δεν υπήρχε κατακόρυφη μετακίνηση του μεταλλικού κολάρου. Δηλαδή υπήρχε η λειτουργία κυλιόμενης πάκτωσης ως προς μια κατεύθυνση. Στο αναλυτικό μοντέλο, λόγω της δυσκολίας προσομοίωσης της πολύπλοκης διάταξης του πειράματος, τα κομβοελάσματα προσομοιώθηκαν ως άκαμπτα άκρα (rigid ends) των

X-συνδέσμων για τις συνδέσεις στους άνω και κάτω κόμβους. Τέτοιου είδους προσομοίωση θεωρεί πακτωμένους τους X-συνδέσμους στις βάσεις των υποστρωμάτων, απαγορεύοντας την ολίσθηση τους μαζί με το μεταλλικό κολάρο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση όταν οι σύνδεσμοι βρίσκονται σε εφελκυσμό. Ως αποτέλεσμα υπάρχουν διαφορές σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα και στην συνολική δυσκαμψία και στην συνολική αντοχή του συστήματος υποστρωμάτων X-συνδέσμων. Παρατηρείται η αρχική δυσκαμψία (1^{ος} κύκλος ± 2 mm, σχεδόν ελαστική συμπεριφορά) να είναι μεγαλύτερη από τα πειραματικά αποτελέσματα λόγω της ανικανότητας κατακόρυφης ολίσθησης των κάτω κομβοελασμάτων στο μοντέλο. Κατά τον 5^ο κύκλο φόρτισης η αντοχή στο μοντέλο (35 kN) είναι πολύ μικρότερη των πειραματικών αποτελεσμάτων (48 kN), αυτό εξηγείται γιατί στο μοντέλο έχει εμφανιστεί λυγισμός ήδη από τον 3^ο κύκλο στους συνδέσμους με αποτέλεσμα την γρήγορη μείωση της αντοχής, ενώ στο πείραμα, λόγω της ολίσθησης, ο λυγισμός στους συνδέσμους είναι πιο ήπιος και καθυστερεί να εμφανιστεί (5^{ος} κύκλος) με αποτέλεσμα την διατήρηση της αντοχής σε ψηλότερα επίπεδα από ότι το μοντέλο.

Το Σχήμα 3.7.1.4. παρουσιάζει την σύγκριση του αναλυτικού μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα για τους πρώτους 13 κύκλους φόρτισης (Σχήμα 3.7.1.3.) Το μοντέλο, δεδομένης της αδυναμίας προσομοίωσης των φαινομένων όπως αυτά που παρατηρήθηκαν στο πείραμα, δείχνει μια ικανοποιητική επίδοση στην πρόβλεψη της μέγιστης αντοχής του συστήματος ακόμα και της αντοχής στους κύκλους 6 έως 9.



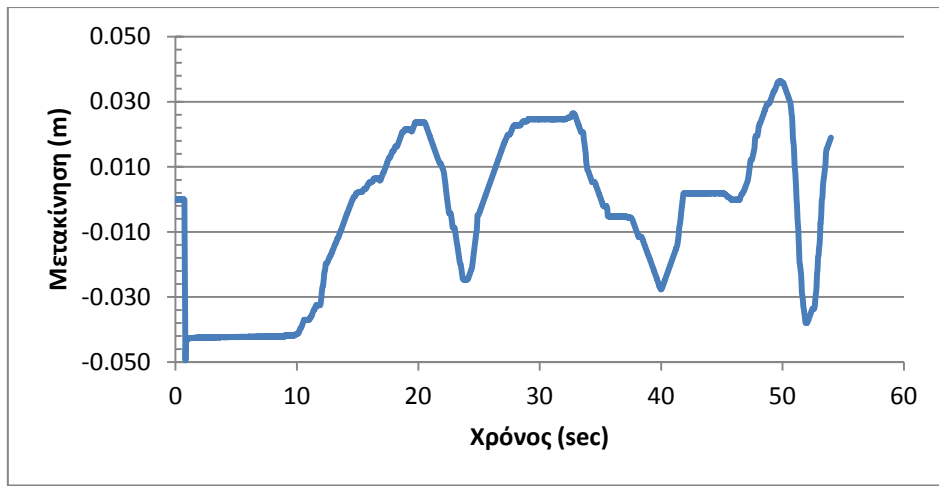
Σχήμα 3.7.1.3 : Επιβαλλόμενη μετακίνηση στον κόμβο 3 του πλαισίου για τους 13 αρχικούς κύκλους φόρτισης



Σχήμα 3.7.1.4 : Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και του αναλυτικού μοντέλου RUAUMOKO για τους 13 πρώτους κύκλους φόρτισης για πλαίσιο ενισχυμένο με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους L20x3

3.7.2 2^ο Σύστημα Χ-συνδέσμων (2L20x3/5)

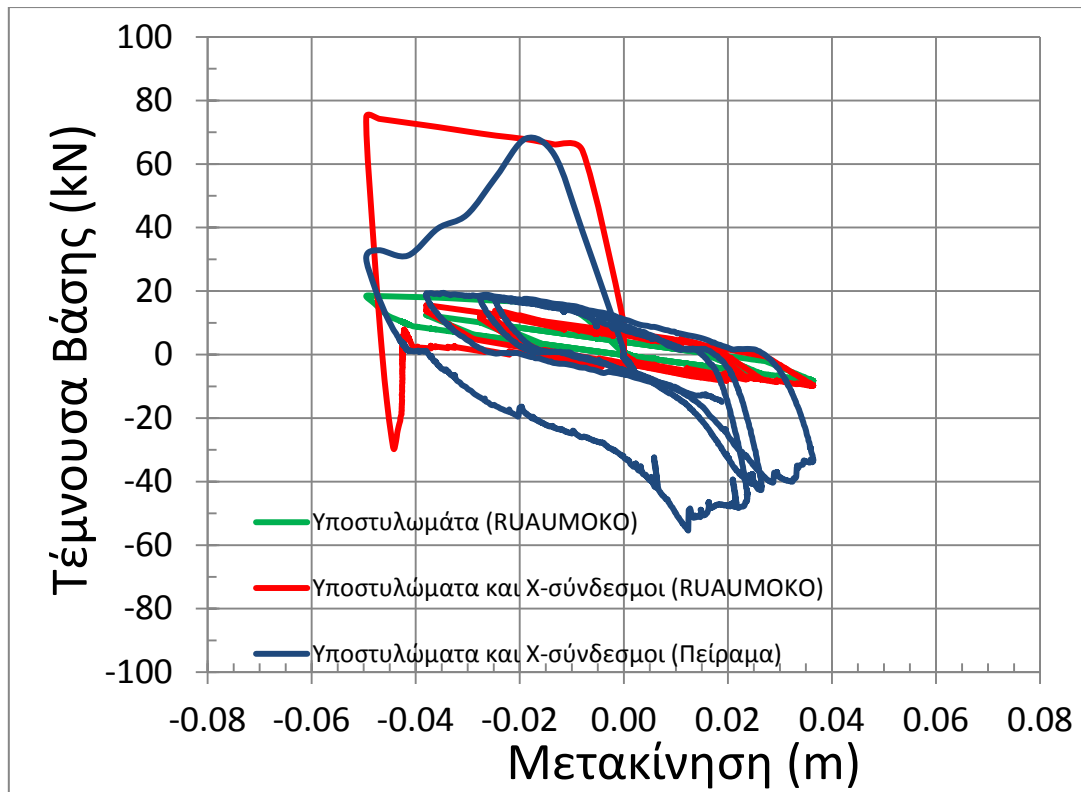
Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για ελεγχόμενη επιβαλλόμενη μετακίνηση στον κόμβο «3» του πλαισίου, για τους πρώτους 3 ¼ κύκλους φόρτισης του πειράματος. Σκοπός είναι να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του αναλυτικού μοντέλου στο αρχικό τυχηματικό άλμα της μετακίνησης του ¼ κύκλου φόρτισης, αλλά και η απόκριση του μοντέλου ως προς τη δύναμη και τη δυσκαμψία για τους τρεις πρώτους κύκλους, σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Το διάγραμμα της επιβαλλόμενης μετακίνησης απεικονίζεται στο Σχήμα 3.7.2.1.



Σχήμα 3.7.2.1 : Επιβαλλόμενη μετακίνηση στον κόμβο 3 του πλαισίου για τους αρχικούς 3 ¼ κύκλους φόρτισης

Η σύγκριση του αναλυτικού μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα έγινε με βάση την συνολική πλευρική (διατμητική) δύναμη του πλαισίου. Στο Σχήμα 3.7.2.2 παρουσιάζεται συγκριτικά η διατμητική δύναμη των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με αυτή του αναλυτικού μοντέλου ολόκληρου του πλαισίου, αλλά και των υποστυλωμάτων ξεχωριστά.

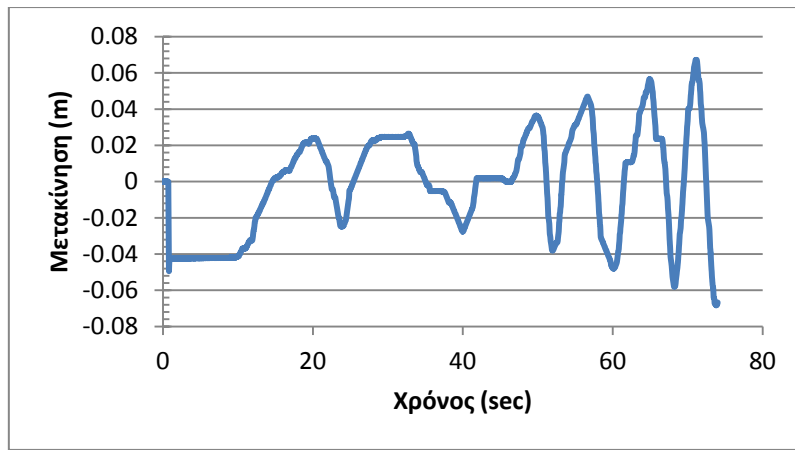
Ως αποτέλεσμα της αρχικής αιφνίδιας μετακίνησης (άλμα) μειώνεται δραματικά η συνεισφορά των Χ-συνδέσμων στην αντοχή του πλαισίου για τους επόμενους κύκλους. Δεδομένου του γεγονότος ότι στο αναλυτικό μοντέλο υπάρχει δέσμευση της μετακίνησης των Χ-συνδέσμων στη βάση, η συνεισφορά τους στην συνολική αντοχή του πλαισίου μειώνεται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από το πραγματικό πείραμα. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.7.1, αυτό συμβαίνει λόγω της διαφοράς της συνδεσιμότητας των κατώτερων κομβοελασμάτων στο πείραμα και της απλοποιητικής παραδοχής στην προσομοίωση του μοντέλου. Στο πείραμα υπήρχε η δυνατότητα ολίσθησης των κατώτερων κομβοελασμάτων κατά μήκος της κατακόρυφης διεύθυνσης των υποστυλωμάτων όταν οι Χ-σύνδεσμοι βρισκόταν υπό εφελκυσμό, ενώ στο αναλυτικό μοντέλο η προσομοίωση έγινε απλοποιητικά θεωρώντας πακτωμένες συνδέσεις μεταξύ κατώτερων κομβοελασμάτων και μεταλλικών συνδέσμων.



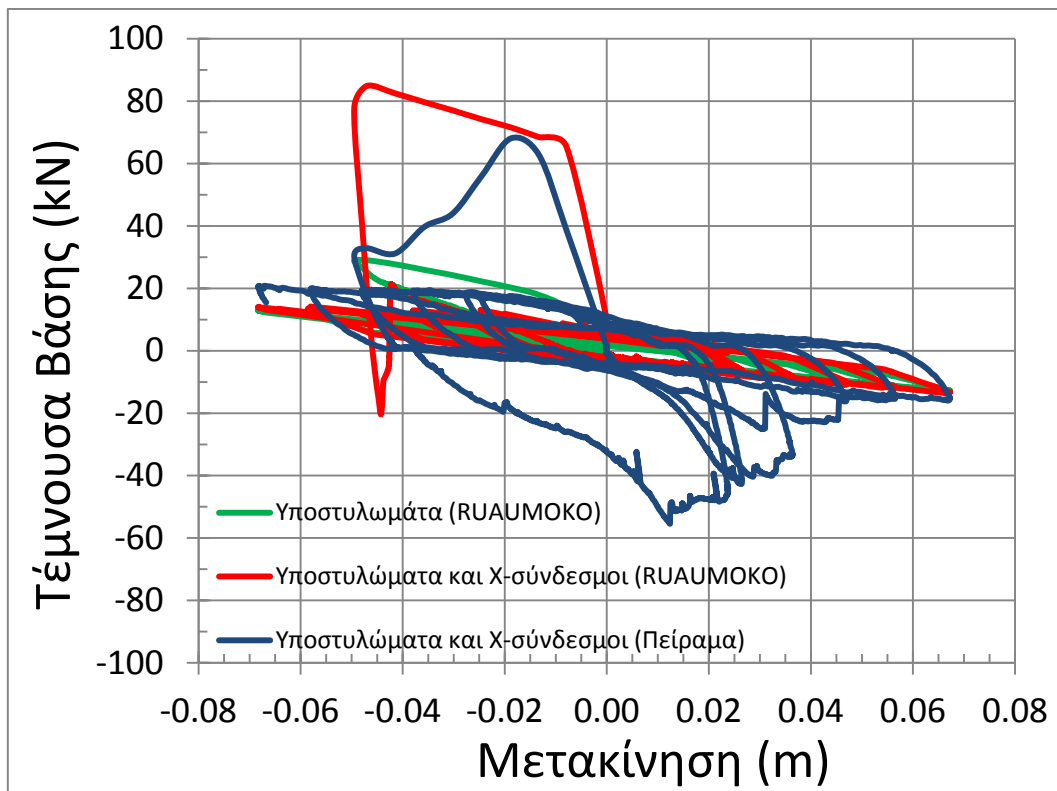
Σχήμα 3.7.2.2 : Συγκριτικά αποτελέσματα πειραματικών αποτελεσμάτων και του αναλυτικού μοντέλου RUAUMOKO των πρώτων 3 ¼ κύκλων φόρτισης για πλαίσιο ενισχυμένο με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους 2L20x3/5

Στο πλαίσιο τέλος επιβλήθηκε η μετακίνηση για τους 6 κύκλους φόρτισης, του Σχήματος 3.7.2.3. Τα αποτελέσματα του αναλυτικού μοντέλου συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα για τους 6 κύκλους φόρτισης στο Σχήμα 3.7.2.4.

Το αναλυτικό μοντέλο προβλέπει με ικανοποιητική ακρίβεια την αντοχή του συστήματος κατά τον πρώτο κύκλο όπως επίσης και για τους κύκλους 6 και 7, όπου η αντοχή του συστήματος έχει φθάσει την αντοχή του γυμνού πλαισίου, μετά την ολοκληρωτική αστοχία των Χ συνδέσμων.



Σχήμα 3.7.2.3 : Επιβαλλόμενη μετακίνηση στον κόμβο 3 του πλαισίου για τους 6 κύκλους φόρτισης



Σχήμα 3.7.2.4 : Συγκριτικά αποτελέσματα πειραματικών αποτελεσμάτων και του αναλυτικού μοντέλου RUAUMOKO των 6 αρχικών κύκλων φόρτισης για πλαίσιο ενισχυμένο με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους 2L20x3/5

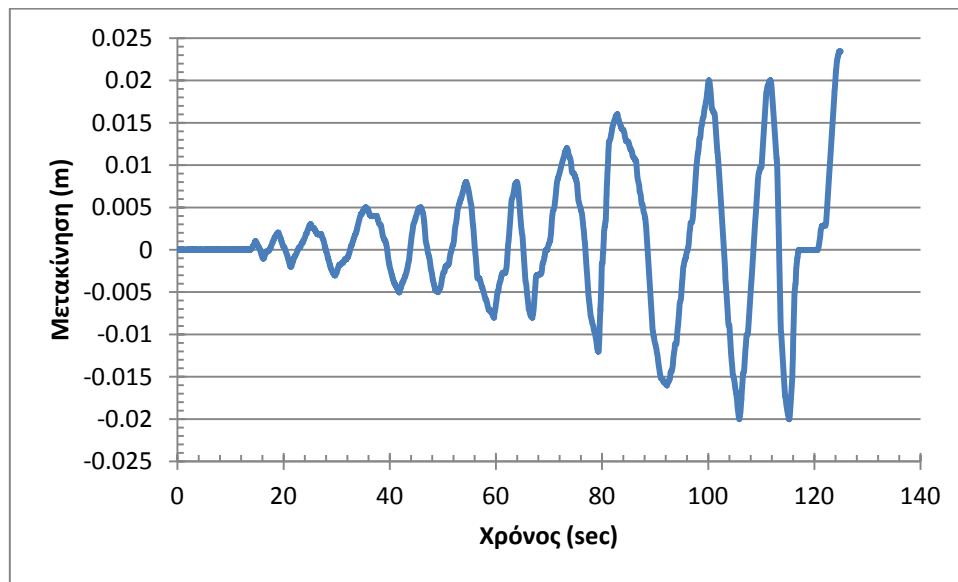
3.7.3 3^ο Σύστημα Χ-συνδέσμων (L25x3)

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για ελεγχόμενη επιβαλλόμενη μετακίνηση στον κόμβο «3» του πλαισίου, για τους 11 κύκλους φόρτισης του πειράματος. Το διάγραμμα της επιβαλλόμενης μετακίνησης απεικονίζεται στο Σχήμα 3.7.3.1.

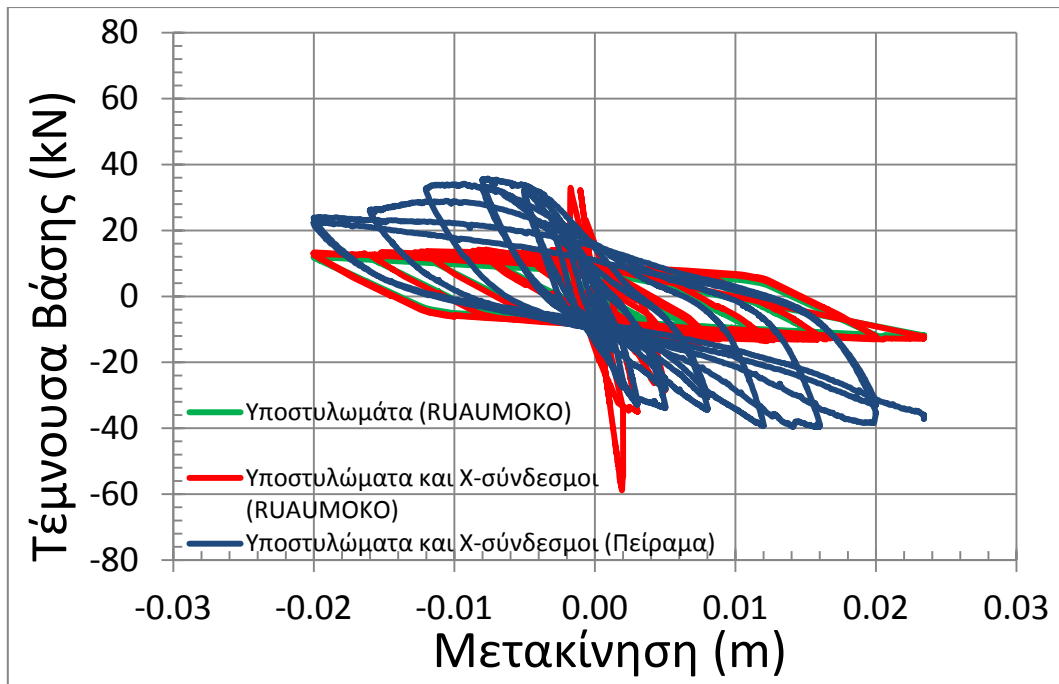
Η σύγκριση του αναλυτικού μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα έγινε με βάση την συνολική πλευρική (διατμητική) δύναμη του πλαισίου. Στο Σχήμα 3.7.3.2 παρουσιάζεται συγκριτικά η διατμητική δύναμη των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με αυτή του αναλυτικού μοντέλου ολόκληρου του πλαισίου, αλλά και των υποστυλωμάτων ξεχωριστά.

Παρατηρείται ανάλογη συμπεριφορά με τα άλλα δύο συστήματα Χ-συνδέσμων των παραγράφων 3.7.1 και 3.7.2, όπου και εξηγείται η αιτία απόκλισης των πειραματικών αποτελεσμάτων από τα αποτελέσματα του αναλυτικού μοντέλου.

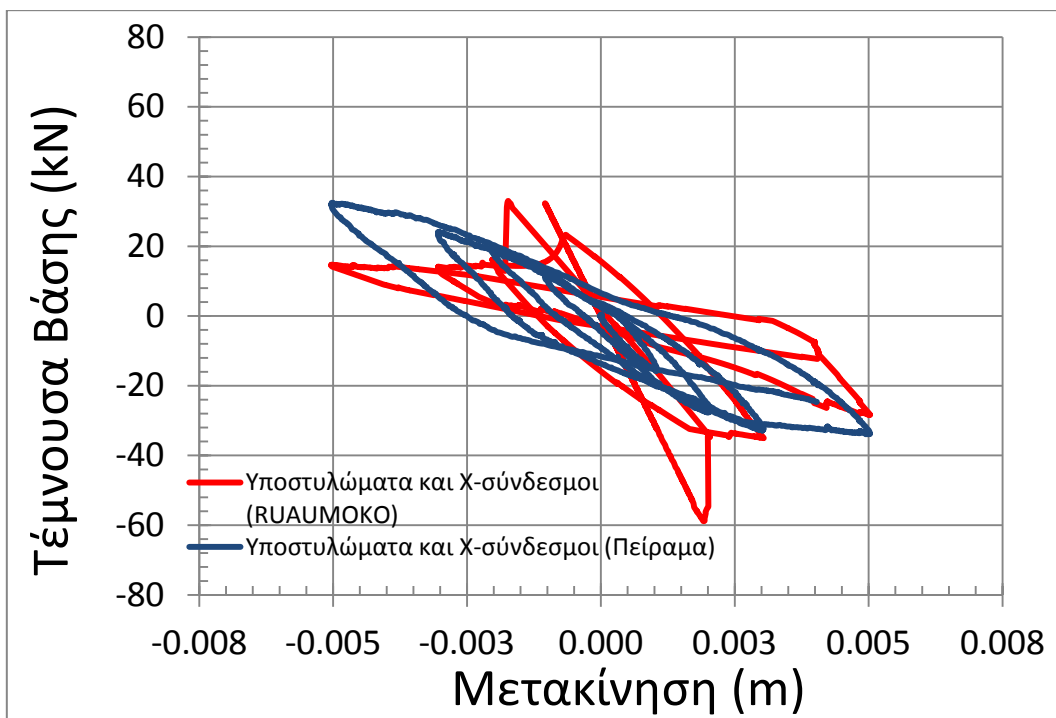
Τέλος, απεικονίζεται μια λεπτομερέστερη εικόνα της απόκρισης του αναλυτικού μοντέλου, στο Σχήμα 3.7.3.2 φαίνονται τα συγκριτικά αποτελέσματα για τους 5 αρχικούς κύκλους της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, προσπαθώντας να προσεγγιστούν τα πειραματικά αποτελέσματα από το αναλυτικό μοντέλο.



Σχήμα 3.7.3.1 : Επιβαλλόμενη μετακίνηση στον κόμβο 3 του πλαισίου για τους 11 κύκλους φόρτισης



Σχήμα 3.7.3.2 : Συγκριτικά αποτελέσματα πειραματικών αποτελεσμάτων και του αναλυτικού μοντέλου RUAUMOKO των 11 κύκλων φόρτισης για πλαίσιο ενισχυμένο με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους L25x3



Σχήμα 3.7.3.2 : Συγκριτικά αποτελέσματα πειραματικών αποτελεσμάτων και του αναλυτικού μοντέλου RUAUMOKO των αρχικών (περίπου 5) κύκλων φόρτισης για πλαίσιο ενισχυμένο με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους L25x3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Ένα μεγάλο μέρος των κατασκευών στην Ελλάδα αποτελούν τα κτίρια που σχεδιάστηκαν πριν το 1985, με πυλωτή στο ισόγειο. Λόγω της μειωμένης δυσκαμψίας και αντοχής που παρουσιάζει ο όροφος στην πυλωτή, είναι απαραίτητη η ενίσχυσή του μέσω «εκ των υστέρων» επεμβάσεων (retrofit solutions) στο υφιστάμενο κτίριο. Η διερεύνηση της αποδοτικότητας εναλλακτικών μεθόδων (ενίσχυση με χιαστί μεταλλικούς συνδέσμους) έναντι των πιο κλασικών μεθόδων (ενίσχυση με περιμετρικά τοιχώματα) απαιτεί μια σειρά παραμετρικών αναλύσεων για διάφορες ιδιότητες των μεταλλικών συνδέσμων σε κτίρια διαφορετικού αριθμού ορόφων. Προχωρημένα μοντέλα των μελών του κτιρίου (τοιχοπληρώσεων, υποστυλωμάτων και διαγωνίων ή χιαστί μεταλλικών συνδέσμων), που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια τέτοιου είδους ανάλυση, βαθμονομήθηκαν και ελέγχθηκαν κάτω από συγκεκριμένες διεγέρσεις για να γίνει αποτίμηση της συμπεριφοράς τους.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα για την προσομοίωση της τοιχοποιίας. Το πρώτο μοντέλο «Double Strut» αποτελούνταν από δύο διαγώνια μέλη-στοιχεία ελατηρίου (RUAUMOKO Spring elements), τοποθετημένα σε χιαστί διάταξη. Το δεύτερο μοντέλο αποτελούνταν από 1 στοιχείο πάνελ (RUAUMOKO Panel Element), το οποίο περιείχε 4 διαγώνια χιαστί μέλη-συνδέσμους (Masonry Strut Elements), τοποθετημένα ανά δύο σε χιαστί διάταξη και επιπλέον ένα 5^ο μέλος διατμητικού ελατηρίου (Shear Spring element), το οποίο προσομοιώνει την διατμητική συμπεριφορά (συνοχή) μεταξύ των οπτόπλινθων της τοιχοπλήρωσης. Τα αποτελέσματα και των δύο μοντέλων ήταν ικανοποιητικά. Και τα δύο προσέγγισαν τον τρόπο λειτουργίας της τοιχοπλήρωσης ενός πλαισίου, δηλαδή την δυνατότητα συνεισφοράς στην αντοχή του πλαισίου σε θλίψη μέχρι ένα μέγιστο σημείο, πέρα του οποίου η αντοχή τους μειώνεται απότομα λόγω ζημιών, προκληθέντων από την έντονα ψαθυρή συμπεριφορά των τοιχοπληρώσεων. Είναι επίσης εμφανές ότι τα αποτελέσματα της συμπεριφοράς και των δύο μοντέλων σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση είναι άμεσα συγκρίσιμα, όσον αφορά τη μέγιστη αντοχή της τοιχοπλήρωσης. Υπάρχει βέβαια η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει ποιο από τα δύο θα χρησιμοποιήσει, εφόσον τα αποτελέσματα που δίνουν είναι παρόμοια. Το μοντέλο “Double strut” είναι πιο εύκολο στη χρήση, διότι απαιτεί μόνο ένα κόμβο αρχής και τέλους για το κάθε στοιχείο που περιλαμβάνει, ενώ το μοντέλο “Panel element” απαιτεί την εισαγωγή των εξωτερικών και εσωτερικών κόμβων κατά αύξουσα σειρά με αντιωρολογιακή

φορά για να λειτουργήσει σωστά, διαδικασία επίπονη σε μεγάλης κλίμακας προβλήματα. Το μοντέλο "Panel element" όμως, έχει τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων για το κάθε μέλος-σύνδεσμο (masonry strut) ξεχωριστά, καθώς επίσης και αποκλειστικά τη διατμητική δύναμη της τοιχοπλήρωσης, για εξαγωγή αποτελεσμάτων του διατμητικού ελατηρίου (Shear Spring) που περιλαμβάνει. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι και τα δύο μοντέλα ακολουθούν το νόμο υστέρησης Crisafulli (Crisafulli, 1997) για την συμπεριφορά της τοιχοποιίας .

Για το μοντέλο προσομοίωσης των υποστυλωμάτων χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία δοκού-στύλου (RUAUMOKO beam column elements). Χρησιμοποιήθηκε ο τριγραμμικός νόμος υστέρησης FUKADA, προσδίδοντας την ικανότητα απομείωσης της δυσκαμψίας και της αντοχής του μοντέλου. Με κατάλληλη βαθμονόμηση των παραμέτρων του νόμου υστέρησης, το μοντέλο προσέγγισε πολύ ικανοποιητικά τα πειραματικά αποτελέσματα όχι μόνο για το 1^ο ημικύκλο φόρτισης-αποφόρτισης, αλλά και την πειραματική καμπύλη επαναφοράς της φόρτισης του δοκιμίου. Σε πολλούς κύκλους φόρτισης το μοντέλο φάνηκε να δείχνει μια σταθερή απομείωση της αντοχής των υποστυλωμάτων, κάτι το οποίο ήταν επιθυμητό για τη συμπεριφορά των υποστυλωμάτων ενός παλαιού κτιρίου.

Τέλος, για την προσομοίωση Χ-συνδέσμων χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο "RUAUMOKO One component (Giberson) beam member", εφοδιασμένο με το νόμο υστέρησης Remennikov. Τα μοντέλα βαθμονομήθηκαν με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για πλαίσιο ενισχυμένο με μεταλλικούς Χ-συνδέσμους. Παρατηρήθηκαν διαφορές σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα και στην συνολική δυσκαμψία και στην συνολική αντοχή του συστήματος υποστυλωμάτων Χ-συνδέσμων. Αυτό οφείλεται στην αδυναμία του μοντέλου να προσομοιώσει την πραγματική κατάσταση στο πείραμα, δηλαδή τη δυνατότητα των κομβοελασμάτων στο κάτω μέρος των υποστυλωμάτων να ολισθήσουν προς τα πάνω κατά μήκος της κατακόρυφης διεύθυνσης των υποστυλωμάτων ,όταν οι σύνδεσμοι βρισκόταν υπό εφελκυσμό, αλλά να απαγορεύεται η κίνηση των κομβοελασμάτων προς τα κάτω, όταν οι σύνδεσμοι ήταν υπό θλίψη. Για την προσομοίωση των ακραίων και του κεντρικού κομβοελάσματος τοποθετούνται σε κάθε άκρο κάθε μεταλλικού συνδέσμου άκαμπτα άκρα (rigid ends). Ως αποτέλεσμα η αρχική δυσκαμψία του αναλυτικού μοντέλου ήταν πολύ μεγαλύτερη αυτής των πειραματικών αποτελεσμάτων, λόγω της «πάκτωσης» των Χ-συνδέσμων στη Βάση ενώ αντιθέτως η αρχική αντοχή του

μοντέλου RUAUMOKO πλησίασε πολύ αυτήν των πειραματικών αποτελεσμάτων. Σε περισσότερους κύκλους φόρτισης, λόγω του πρόωρου λυγισμού που συμβαίνει στους «πακτωμένους» μεταλλικούς συνδέσμους του μοντέλου, η συνεισφορά των Χ-συνδέσμων στην αντοχή ενός «γυμνού πλαισίου» φάνηκε να απομειώνεται πολύ γρηγορότερα. Γενικά, δεδομένης της αδυναμίας προσομοίωσης των φαινομένων όπως αυτά που παρατηρήθηκαν στο πείραμα, το μοντέλο δείχνει μια ικανοποιητική επίδοση στην πρόβλεψη της μέγιστης αντοχής του συστήματος ακόμα και της αντοχής σε περισσότερους κύκλους φόρτισης, όπου η αντοχή του συστήματος έχει φθάσει την αντοχή του γυμνού πλαισίου μετά την ολοκληρωτική αστοχία των Χ-συνδέσμων.

Συμπερασματικά τα μοντέλα τα οποία βαθμονομήθηκαν κρίνονται κατάλληλα για την χρήση τους στο επόμενο στάδιο αυτής της εργασίας που είναι η παραμετρική ανάλυση της συμπεριφοράς πολυωρόφων κτιρίων με πυλωτή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Λάτσος, Λ., Τουσμάνης, Α., (2012) «Συγκριτική μελέτη μεθόδων ενίσχυσης σε πλαίσια Ο/Σ με και χωρίς pilotis μέσω ανελαστικών στατικών αναλύσεων», Πάτρα.
- Carr A.J., (2005). RUAUMOKO-2D. Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand.
- Αναγνωστόπουλος Κωνσταντίνος (2009), «Αποτίμηση σεισμικής συμπεριφοράς σε κτίριο με pilotis και ενίσχυση αυτής με περιμετρικά τοιχώματα», 15^ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα.
- Σοφιανόπουλος, Σ. Δ. (2012) «Θεωρητική – Παραμετρική Διερεύνηση και Βελτιστοποίηση της Σεισμικής Ενίσχυσης Συμβατικών Κτιριακών Κατασκευών με Φέροντα Οργανισμό από Οπλισμένο Σκυρόδεμα με Πυλωτή μέσω μη έκκεντρων Χαλύβδινων Χιαστών Συνδέσμων Δυσκαμψίας», Τελική Έκθεση Προόδου, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- Crisafulli, F.J. (1997) «Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Structures with Masonry Infills», Ph.D, Thesis, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand.
- Ρεπάης, Κ. (2007)«Αποτίμηση της Σεισμικής Συμπεριφοράς Υφιστάμενων Κτιρίων από Ω.Σ.», Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- ΚΑΝΕΠΕ. «Κανονισμός Επεμβάσεων», Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ), Σχέδιο Κειμένου – 2, Νοέμβριος 2005.
- Smyrou, E., (2006) «Implementation and Verification of a Masonry Panel Model for Nonlinear Dynamic Analysis of Infilled RC Frames», M.Sc., Rose School, European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk.
- Smyrou, E., Blandon, C., Antoniou, S., Pinho, R., Crisafulli, F., (2011), «Implementation and Verification of a Masonry Panel Model for Nonlinear Dynamic Analysis of Infilled RC Frames», Original Research Paper.
- Περδικάρης, Φ., (2011) «Διερεύνηση της Συμπεριφοράς Πλαισίων Ο.Σ.Ενισχυμένων με Εμφαντούμενα Τοιχώματα Ο.Σ.» 2η Έκθεση προόδου, Βόλος.

- Charalampakis, A. E., Koumousis, V. K.,(2008) «Ultimate strength analysis of composite sections under biaxial bending and axial load», Advances in Engineering Software, doi:10.1016/j.advengsoft.2008.01.007
- Fukada, Y., (1969) "Study on the Restoring Force Characteristics of Reinforced Concrete Buildings". (In Japanese).Proc. Kanto District Symposium, Architectural Institute of Japan, Tokyo, Japan, No. 40.
- Baros D. K., Dritsos, S. E., (2008), "A Simplified Procedure to Select a Suitable Retrofit Strategy for Existing RC Buildings Using Pushover Analysis", Journal of Earthquake Engineering.
- Remennikov, A. and Walpole, W.R. (1995) «Incremental Model for Predicting the Inelastic Hysteretic Behaviour of Steel Bracing Members». Research Report 95-6, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand,p 114.