

Διπλωματική εργασία

Τίτλος:

Πειραματική Διερεύνηση και Αξιολόγηση της Συμπεριφοράς Πλαισίων από Ο/Σ Ενισχυμένων με Συστήματα Ολισθαινόντων και Αρθρωμένων Χ-Συνδέσμων από Χάλυβα

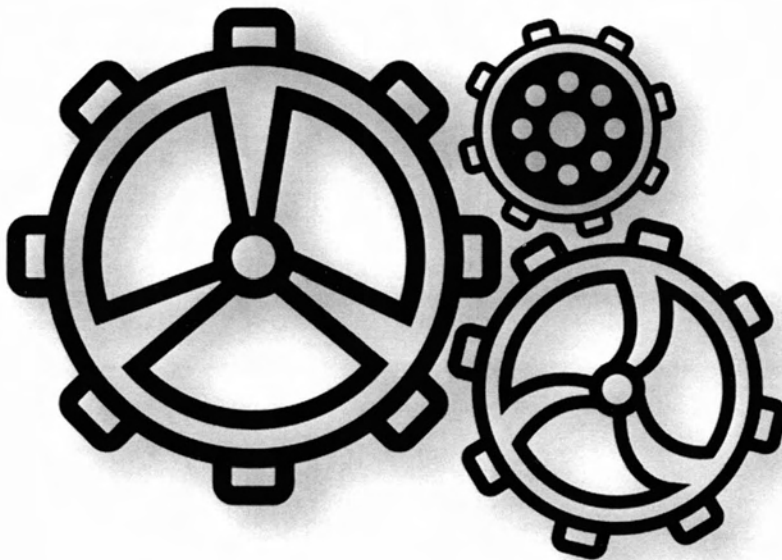
Title:

Experimental Investigation and Evaluation of the Response of R/C Frames Upgraded with Sliding and Pinned Steel X-Braces

Φοιτητής: Βούρας Γιώργος

Επιβλέπων: Σοφιανόπουλος Δημήτρης

A.M.: 0808069





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

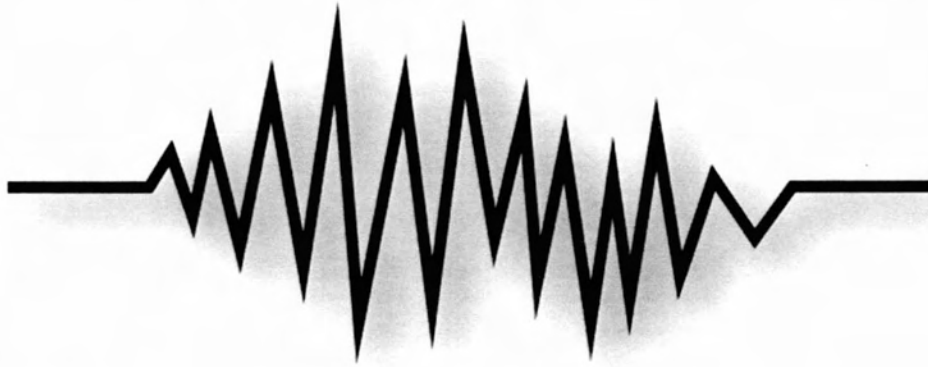
Αριθ. Εισ.: 14725/1
Ημερ. Εισ.: 11-10-2017
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΠΜ
2016
ΒΟΥ

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	6
1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	7
1.2.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	7
1.2.2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΩ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ	14
2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	28
2.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ.....	28
2.1.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΘΕΩΡΕΙΑΣ REMENNΙΚΟΝ	28
2.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΣΗΣ	34
2.3 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ.	35
2.4 ΑΠΛΟ ΠΛΑΙΣΙΟ(ΜΗ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΜΕΝΟ-ΓΥΜΝΟ).....	37
2.5 ΠΛΗΡΩΣ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	37
2.6 ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΕ ΠΥΛΩΤΗ	37
2.7 ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	37
2.8 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ.....	41
2.9 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ	43
2.10 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	44
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	47
3.1. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ - ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ	47
3.2 ΠΛΑΙΣΙΟ ΟΠΚΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	50
3.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΟΥ	52
3.4 1 ^ο ΣΥΣΤΗΜΑ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ (X-1, L20X3)	53
3.4.1 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ	53
3.4.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΟΡΓΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	57
3.4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	57
3.5 2 ^ο ΣΥΣΤΗΜΑ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ (X-4, L20X3)	66
3.5.1 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ	66

3.5.2	ΔΙΑΤΑΞΗ ΟΡΓΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	70
3.5.3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	70
4.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	86
4.1	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	86
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	94
6.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	100





ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Σοφιανόπουλο Δ. που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα μέσα από το οποίο μπόρεσα να διευρύνω τις θεωρητικές μου γνώσεις μου, αλλά ταυτόχρονα να αποκτήσω και μια πάρα πολύ χρήσιμη και σημαντική εμπειρία, αυτήν της διεξαγωγής μιας πειραματικής διαδικασίας. Η διαδικασία της ενασχόλησης με το εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος αποτελεί ένα πολύ σημαντικό βήμα το οποίο δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς την συμβολή, πρακτική αλλά και θεωρητική, των κ. Περδικάρη Φ. και Παπαθεοχάρη Χ.

Η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την συμβολή του δασκάλου μου κ. Τσόπελα Π. ο οποίος αρχικά με ενέπνευσε και με εμπιστεύτηκε να ασχοληθώ με ένα τόσο σύνθετο θέμα και στην συνέχεια μου παρείχε το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο, αλλά και τα εργαλεία για να το αντιμετωπίσω συμβάλλοντας τα μέγιστα με κάθε τρόπο και σε κάθε στάδιο της παρούσας εργασίας.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω την φίλη μου Βάγγυ, η οποία επιμελήθηκε την έκδοση του παρόντος τεύχους κάτι το οποίο θα ήταν αδύνατον χωρίς αυτήν, και τους φίλους μου Οδυσσέα, Νάντια, Πρόδρομο και Γιάννα οι οποίοι με φιλοξένησαν και με βοήθησαν κατά το μεγαλύτερο μέρος της εκπόνησης της παρούσας εργασίας το οποίο απαιτούσε την παρουσία μου στην Αθήνα.

Επίσης, οφείλω την ευγνωμοσύνη μου στην Ελένη, η οποία βρισκόταν δίπλα μου, άκουγε, ενθάρρυνε, βοηθούσε, ενέπνεε, υπέμεινε όχι μόνο κατά την εκπόνηση της διπλωματικής, αλλά συνολικά κατά τον τελευταίο χρόνο ολοκλήρωσης των σπουδών μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου Κλαίρη, Μιχάλη και Κυριάκο η συμβολή των οποίων στην ολοκλήρωση των σπουδών μου δεν θα μπορούσε να καλυφθεί ακόμα και αν ήταν αυτή το θέμα της παρούσας εργασίας.

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ελλάδα είναι μια χώρα η οποία βρίσκεται σε ζώνη ιδιαίτερα υψηλής επικινδυνότητας στα πλαίσια της Ευρώπης, και συνεπώς, κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή κτιρίων, πρέπει να δίνεται μεγάλη βαρύτητα στην απόκριση των κατασκευών κατά την διάρκεια σεισμικών καταπονήσεων, ώστε να εξασφαλίζεται ότι αυτές θα μπορέσουν με ασφάλεια να αναλάβουν τις σεισμικές δράσεις. Προς τούτο τα τελευταία χρόνια έχουν θεσμοθετηθεί μια πληθώρα νέων και αυστηρών κανονισμών (ΕΚΩΣ, ΕΑΚ, ΕΚ2, ΕΚ8), οι οποίοι δίνουν ιδιαίτερη βαρύτητα στην ασφαλή απόκριση των κατασκευών έναντι σεισμικών δράσεων.



Παρόλα αυτά τα περισσότερα κτίρια, ιδιαίτερα στα μεγάλα αστικά κέντρα, είναι σχεδιασμένα και κατασκευασμένα προ του 1985, και μάλιστα σύμφωνα με τον κανονισμό που ίσχυε τότε δηλαδή αυτόν του 1954, οι απαιτήσεις του οποίου ειδικά στο ζήτημα της αντισεισμικής προστασίας είναι εξαιρετικά ελλειπείς συγκριτικά με αυτές των σύγχρονων κανονισμών. Συνεπώς προκύπτει η ανάγκη της αποτίμησης της παρούσας κατάστασης των υφιστάμενων κατασκευών καθώς και της απόκρισης τους σε περίπτωση σεισμού, με σκοπό την ενίσχυση τους σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τα πρότυπα των σύγχρονων κανονισμών. Προκειμένου να καλυφθεί λοιπόν αυτή η ανάγκη συντάχθηκε ο Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ), ο οποίος είναι και ο πρώτος του είδους του, και αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στα χέρια των μηχανικών στην προσπάθειά τους για την αποτίμηση και ενίσχυση των υφιστάμενων κατασκευών έναντι σεισμικών διεγέρσεων.

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η πειραματική διερεύνηση της απόκρισης πλαισίων από οπλισμένο σκυρόδεμα ενισχυμένων με μη-έκκεντρους χαλύβδινους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται η επιρροή των χιαστί συνδέσμων δυσκαμψίας στην αντοχή, την δυσκαμψία και την πλαστιμότητα σε υφιστάμενα πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος, με σκοπό την εξάλειψη της τρωτότητας των κτιρίων επί pilotis κατασκευασμένων με βάση τους κανονισμούς του 1954.

Στο πρώτο μέρος γίνεται μια ανασκόπηση της παρούσας βιβλιογραφίας αναφορικά με την συμπεριφορά μεμονωμένων χαλύβδινων μελών υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση καθώς και της συμπεριφοράς πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων με χαλύβδινους συνδέσμους.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης με σκοπό τον προσδιορισμό του εύρους δυσκαμψίας και αντοχής που συνεισφέρει η παρουσία Χ-συνδέσμων από χάλυβα (χωρίς εκκεντρότητα) στη συνολική απόκριση πλαισίων από Ο/Σ με πυλωτή. Αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω του ειδικού λογισμικού RUAUMOKO.

Στο τρίτο μέρος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δύο διαφορετικών πειραματικών διατάξεων. Η πρώτη διάταξη αφορά την ενίσχυση πλαισίου Ο/Σ μέσω μη-έκκεντρων χαλύβδινων χιαστί συνδέσμων οι οποίοι δεν είναι πακτωμένοι στην βάση του πλαισίου ενώ στην δεύτερη διάταξη οι σύνδεσμοι αυτοί πακτώνονται στην βάση του πλαισίου όπως θα δούμε πιο αναλυτικά παρακάτω. Στο τέταρτο και τελευταίο μέρος γίνεται η αξιολόγηση και η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο διαφορετικών πειραματικών διατάξεων.

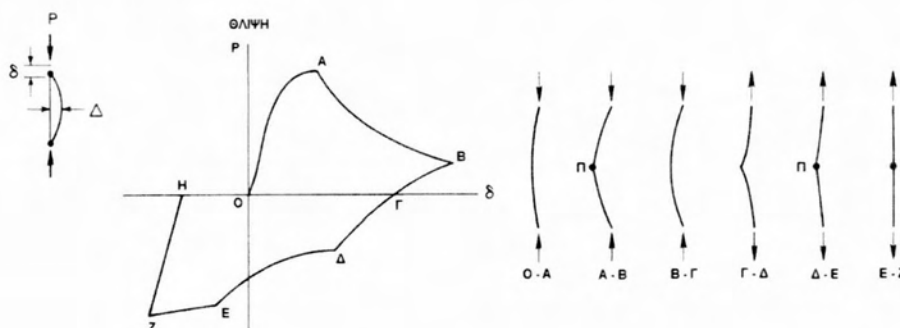
Η ιδέα της εργασίας αυτής προέκυψε ως συνέχεια ερευνητικού προγράμματος που έχει ανατεθεί από τον Ο.Α.Σ.Π. στο εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Έτσι λοιπόν το πρώτο και δεύτερο μέρος, καθώς και η πρώτη πειραματική διάταξη, βασίζονται αποκλειστικά στο έργο του **Σοφριανόπουλου (2012)**, ενώ η δεύτερη πειραματική διάταξη εκτελέστηκε σε δεύτερο χρόνο.

1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.2.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΧΑΛΥΒΑΙΝΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Η πρώτη συστηματική αναφορά της υφιστάμενης βιβλιογραφίας όσον αφορά την συμπεριφορά **χαλύβδινων** πλαισιακών κατασκευών με συνδέσμους (steel braced frame structures) υπό ανακυκλιζόμενη διέγερση οφείλεται στον **E.Popov (1976)** και τους συνεργάτες του. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας το ενδιαφέρον μας θα εστιαστεί κυρίως στο περιεχόμενο των όσων κατέγραψαν οι **Popov et al. (1976)** με θέμα την συμπεριφορά μεμονωμένων ευθύγραμμων λιγυρών μελών και στην συνέχεια σε κάποιες χαρακτηριστικές παρατηρήσεις τους περί της απόκρισης των ενισχυμένων πλαισίων, δοθείσας και της χρονολογίας δημοσίευσής τους (1976).

Πιο συγκεκριμένα, μέχρι τη χρονολογία αυτή, η κυκλική συμπεριφορά των μεμονωμένων ως άνω μελών είχε μελετηθεί τόσο αναλυτικά όσο και πειραματικά. Τα αποτελέσματα των μελετών αυτών κατέδειξαν επίμονα μια γενική σχέση δύναμης – παραμόρφωσης του τύπου που απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1:
Τυπική καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης λιγυράς ράβδου

Η απόκριση αυτή υποδεικνύει με έμφαση ότι η πλαστική στροφή είναι συγκεντρωμένη σε μια περιοχή γύρω από το μέσον του μέλους, που ορίζεται ως σημείο Π στο παραπάνω Σχήμα. Για σκοπούς θεωρητικής ανάλυσης αυτή η γενική απόκριση μπορεί να χωριστεί στις παρακάτω διακριτές ζώνες:

- **Ζώνη O-A:** Επιβολή μονοτονικής θλιπτικής παραμόρφωσης στο μέλος του οποίου η συμπεριφορά θα εξαρτηθεί από τις ατέλειες του και την λυγηρότητα του. Για μικρές τιμές του φορτίου και για ιδεατό ευθύγραμμο μέλος η αύξηση του δ είναι γραμμική, όμως λόγω των ατελειών θα υπάρχει πάντοτε μια μικρή αρχική καμπτική παραμόρφωση η οποία καθιστά την αύξηση του δ μη γραμμική και μάλιστα όσο το φορτίο πλησιάζει την τιμή του φορτίου του ελαστικού λυγισμού του Euler, η μη γραμμικότητα γίνεται όλο και πιο έντονη. Για αυτές τιμές του φορτίου και για ιδεατά ελαστικά μέλη, η μετατόπιση δ συνεχίζει να αυξάνει ενώ το θλιπτικό φορτίο παραμένει πρακτικά σταθερό, και μάλιστα για πολύ μεγάλο εύρος. Για όλκιμα όμως μέλη η αστάθεια λαμβάνει χώρα σε κάποιο σημείο, έστω σημείο A, η οποία οδηγεί σε ραγδαία αύξηση του δ και διαρροή του μέσου του μέλους λόγω μεγάλων καμπτικών παραμορφώσεων. Το σημείο απώλειας της ευστάθειας εξαρτάται από την γεωμετρία του μέλους και τις μηχανικές του ιδιότητες.
- **Ζώνη A-B:** Ανελαστική κάμψη του μέλους λόγω ροπών P- Δ , οι οποίες προκαλούνται από το θλιπτικό φορτίο P, το μέγεθος του οποίου μειώνεται μονοτονικά μιας και οι ροπές P- Δ δεν είναι δυνατόν να υπερβούν την πλαστική ροπή αντοχής. Στην φάση αυτή αναπτύσσονται πολύ μεγάλες πλευρικές μετατοπίσεις στο μέσον του μέλους καθώς και μεγάλη ανελαστική καμπυλότητα στην περιοχή αυτή.
- **Ζώνη B-Γ:** Ελαστική αποφόρτιση του μέλους, με κλίση πολύ μικρότερη αυτής της αρχικής ελαστικής καμπύλης φόρτισης, λόγω της μεγάλης μόνιμης πλευρικής εκτροπής του μέσου του μέλους, κάτι το οποίο οδηγεί σε καμπυλωμένη παρά ευθύγραμμη μορφή.
- **Ζώνη Γ-Δ:** Επιβολή εφελκυστικού φορτίου που προκαλεί ελαστική κάμψη και επιμήκυνση του μέλους. Η πλευρική εκτροπή Δ μειώνεται σημαντικά. Η μείωση αυτή είναι κατά βάση ελαστική και οφείλεται στην μείωση των ροπών P- Δ η οποία προκαλείται από την αφαίρεση του θλιπτικού φορτίου και από την αλλαγή προσήμου των ροπών λόγω της επιβολής εφελκυστικού φορτίου. Έτσι λοιπόν η ανελαστική ροπή επανευθυγραμμίζει μερικώς το μέλος ενώ αυτό επιμηκώνεται.
- **Ζώνη Δ E:** Αύξηση του φορτίου και επιμήκυνση του μέλους έως το σημείο E όπου πλέον το μέλος καθίσταται πλήρως ευθύγραμμο. Οι εσωτερικές πλαστικές ροπές σχεδόν μηδενίζονται όσο πλησιάζουμε το σημείο E, και αν στο σημείο αυτό αφαιρούσαμε το φορτίο το μέλος θα παρέμενε ουσιαστικά ευθύγραμμο με μήκος λίγο μεγαλύτερο από το αρχικό του.
- **Ζώνη E-Z:** Σχεδόν σταθερό φορτίο με αυξανόμενη επιμήκυνση δ (για ελαστικό-ιδεατά πλαστικό υλικό) ή αυξανόμενο εφελκυστικό φορτίο P με αυξανόμενη επιμήκυνση δ (για υλικό με κράτυνση). Οποιαδήποτε επιμήκυνση πέραν του σημείου E είναι πλήρως πλαστική μονοαξονική.
- **Ζώνη Z-H:** Εκ νέου αντιστροφή του φορτίου. Ελαστική αποφόρτιση, με κλίση ουσιαστικά ίδια με αυτήν της παρθενικής ελαστικής καμπύλης.

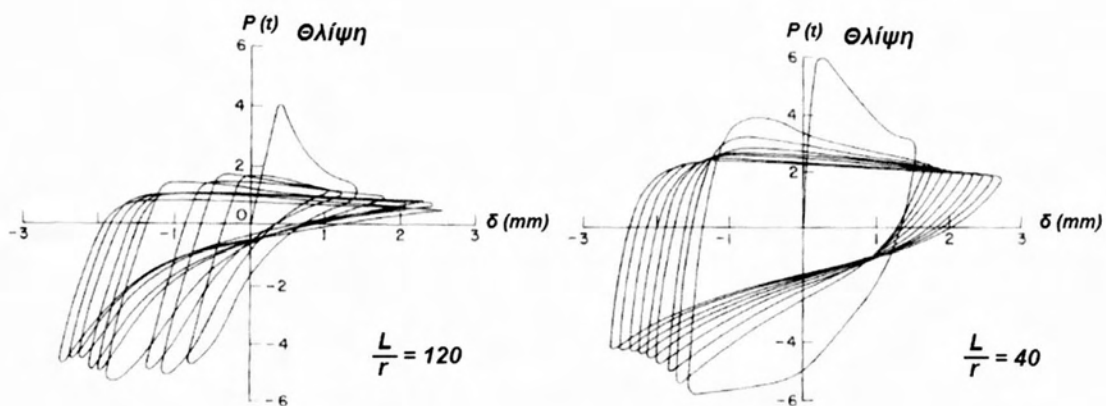
Το Σχήμα 1.1 αναπαριστά συνεπώς μια γενικευμένη μορφή ενός μεμονωμένου κύκλου φόρτισης επί ενός ενισχυτικού μέλους (brace). Οι επόμενοι κύκλοι θα διαθέτουν τα ίδια γενικά χαρακτηριστικά. Όμως, η αριθμητική σχέση μεταξύ του αξονικού φορτίου P και της αξονικής παραμόρφωσης δ μπορεί να υποστεί σημαντικές αλλαγές σε επόμενους κύκλους φόρτισης.

Η πρώτη των αλλαγών αυτών έγκειται στη μετατόπιση της αρχής έναρξης των επόμενων κύκλων σε μια νέα θέση στο επίπεδο $P - \delta$, η οποία οφείλεται σε μόνιμη μονοαξονική επιμήκυνση στο τέλος του προηγούμενου κύκλου.

Η δεύτερη αλλαγή έγκειται στο ότι οι μέγιστες απόλυτα τιμές (peak magnitudes) του αξονικού φορτίου P μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετικές για τις διάφορες ζώνες των επόμενων κύκλων. Ένας λόγος για αυτό είναι ότι η επιρροή του φαινομένου Bauschinger μειώνει τη φαινόμενη τάση διαρροής του υλικού σε επόμενους κύκλους.

Άλλος ένας λόγος είναι το γεγονός ότι το μέλος πρώτα καμπυλώθηκε πλαστικά και μετά έγινε πάλι ευθύγραμμο εκ νέου πλαστικά. Άρα, λόγω της ιστορίας παραμόρφωσης δεν αναμένεται το μέλος να είναι τόσο ευθύγραμμο όσο ήταν στο πρώτο κύκλο φόρτισης. Η ιστορία αυτή και το φαινόμενο Bauschinger μπορούν συνεπώς να μειώσουν κατά πολύ τα κρίσιμα φορτία λυγισμού και τη μεταλυγισμική συμπεριφορά του μέλους σε επόμενους κύκλους.

Τα αποτελέσματα πειραμάτων ανακυκλιζόμενης φόρτισης μεμονωμένων ενισχυτικών μελών, που παρατίθενται στην εργασία των **Popov et al. (1976)**, κατέδειξαν τα ίδια γενικά χαρακτηριστικά με αυτά που περιγράφηκαν ανωτέρω σε σχέση με το Σχήμα 1.1. Τυπικά τέτοια αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 1.2.



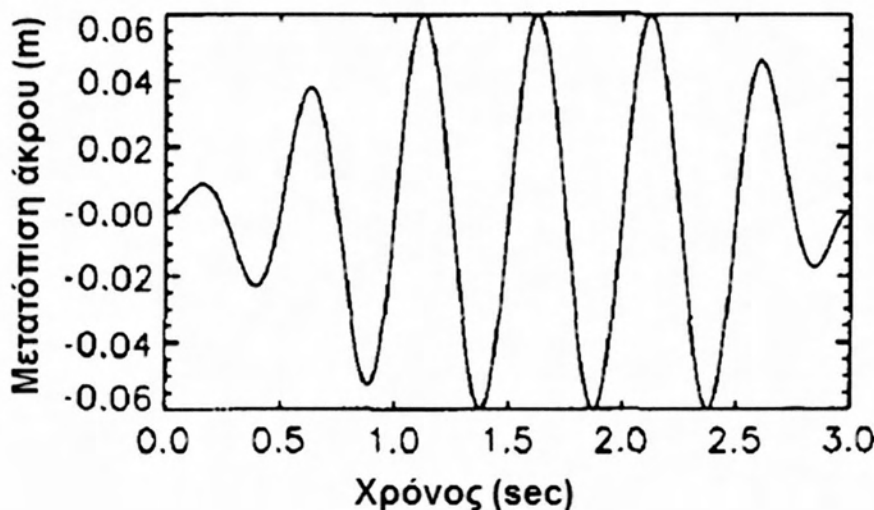
Σχήμα 1.2: Πειραματικοί βρόγχοι υστέρησης ράβδων με διαφορετικές λυγηρότητες

Από τα αποτελέσματα αυτά εξήχθησαν ορισμένα πολύ σημαντικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των ράβδων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, τα οποία θα ληφθούν υπόψη στην παρούσα εργασία, και έχουν ως εξής:

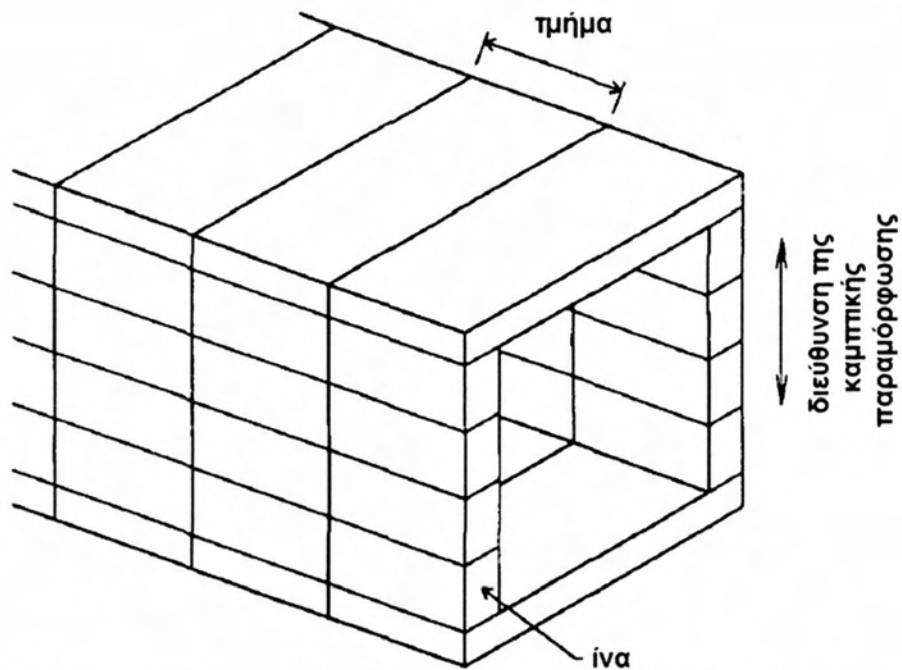
- Μπορούν να αποκτηθούν ευσταθείς βρόγχοι υστέρησης (καμπύλες P – δ) αν η λυγηρότητα του μέλους είναι μικρότερη περίπου από την τιμή 30. Τέτοιοι κύκλοι είναι αυτοί για τους οποίους η μέγιστη θλιπτική αντοχή του μέλους κατά τον πρώτο κύκλο παραμένει ίδια και για τους επόμενους.
- Η παραμένουσα καμπτική παραμόρφωση όντως συσσωρεύεται καθώς οι κύκλοι φόρτισης αυξάνουν, οπότε η μέγιστη θλιπτική αντοχή μειώνεται σταδιακά αν η λυγηρότητα του μέλους υπερβεί την τιμή 40.
- Υπάρχει ταχεία πτώση της μεταλυγισμικής αντοχής για μεμονωμένα μέλη με φορτία λυγισμού περίπου ίσα με το φορτίο ελαστικού λυγισμού του Euler.
- Η δυσκαμψία της ζώνης θλιπτικής αποφόρτισης (δηλαδή η κλίση της ζώνης Β – Γ του Σχήματος 1.1) αυξάνεται καθώς η λυγηρότητα μειώνεται, ενώ μειώνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος της αξονικής μετατόπισης δ.

Το 1998 οι **Gan** και **Hal (1998)** μελέτησαν τη μη γραμμική στατική και δυναμική απόκριση μεμονωμένων χαλύβδινων ράβδων ενίσχυσης (individual steel braces) υπό ανακυκλιζόμενη μετατόπιση των άκρων τους μέσω ενός μοντέλου δοκού – στύλου τύπου ίνας (fiber-type beam-column model), το οποίο χρησιμοποιεί έναν ρεαλιστικό νόμο τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων και περιλαμβάνει την επιρροή μεγάλων μετατοπίσεων, κράτυνσης, σταδιακής εξάπλωσης της διαρροής, και κατάλληλης αλληλεπίδρασης μεταξύ αξονικής και καμπτικής διαρροής.

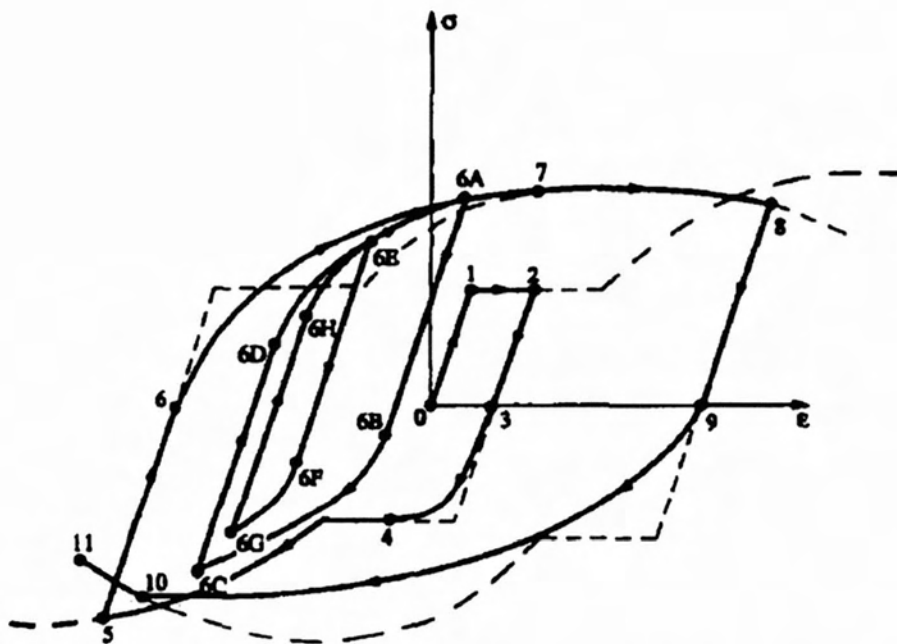
Η μελέτη αυτή θεώρησε μέλη με τετραγωνική κοίλη διατομή διαφόρων μεγεθών και συνθηκών στήριξης και εστιάστηκε στην επιρροή της εσωτερικής αδράνειας καθώς και στο μέγεθος και την κατανομή των παραμορφώσεων ίνας (fiber strain) στα μέλη. Η ακολουθία της ανακυκλιζόμενης αξονικής μετατόπισης που επιβλήθηκε στο ένα άκρο κάθε μέλους φαίνεται στο Σχήμα 1.3, η αναπαράσταση κατάτμησης και ινών του τετραγωνικού κοίλου μέλους για επίπεδη κάμψη στο Σχήμα 1.4 και η καμπύλη φόρτισης για το μοντέλο ίνας στο Σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.3:
Ακολουθία
ανακυκλιζόμενης
αξονικής
μετατόπισης του ενός
άκρου του μέλους



Σχήμα 1.4: Κατάτμηση και αναπαράσταση μέσω ινών του τετραγωνικού κοίλου μέλους για επίπεδη κάμψη



Σχήμα 1.5: Καμπύλη ανακυκλιζόμενης φόρτισης τάσης – παραμόρφωσης για το μοντέλο ίνας

Αφού τονιστεί ότι στην εν λόγω μελέτη δεν λήφθηκαν υπόψη παράγοντες όπως η παραμόρφωση της διατομής, ο τοπικός λυγισμός (που έχουν εργαστηριακά παρατηρηθεί) και ο δείκτης παραμόρφωσης, τα κυριότερα ευρήματα της ήταν:

- Η επιρροή της αδράνειας του μέλους μπορεί να διαδραματίσει σπουδαίο ρόλο στις μέγιστες τιμές των θλιπτικών δυνάμεων, των μέγιστων θλιπτικών τάσεων ίνας αλλά και στην απορρόφηση ενέργειας.
- Όσο πιο λυγηρό είναι το μέλος, τόσο μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων εμφανίζεται, ενώ η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση, που σχετίζεται με το φαινόμενο τοπικού λυγισμού είναι συχνά μεγαλύτερη σε μη λυγηρά μέλη.

Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στην εργασία από τους *Jin* και *El-Tawil (2003)*, που πραγματεύεται ένα ανελαστικό «κυκλικό» (cyclic) μοντέλο χαλύβδινων ενισχυτικών μελών (συνδέσμων), καθώς περιέχει πολύ σημαντικές πληροφορίες για τις παραμέτρους που επηρεάζουν τα μέλη αυτά αλλά και για τα μοντέλα ανελαστικού λυγισμού τους.

Εισαγωγικά, οι ανωτέρω ερευνητές τονίζουν ότι η «κυκλική» ανελαστική συμπεριφορά χαλύβδινων συνδέσμων (ενισχυτικών μελών) είναι περίπλοκη, λόγω της επιρροής των ακόλουθων φυσικών φαινομένων:

- εφελκυστικής διαρροής
- θλιπτικού λυγισμού
- μεταλυγισμικής μείωσης της θλιπτικής αντοχής
- μείωσης της αξονικής δυσκαμψίας λόγω ανακυκλιζόμενης φόρτισης
- θραύσης λόγω κόπωσης χαμηλών κύκλων σε περιοχές πλαστικών αρθρώσεων
- φαινομένου Bauschinger

Όλοι οι παραπάνω παράμετροι δυσχεραίνουν τη δημιουργία ικανών αναλυτικών μοντέλων για τη προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς των μελών αυτών. Παρόλα αυτά, κατά την άποψη των συγγραφέων, πρακτικά και αξιόπιστα αναλυτικά εργαλεία είναι θεμελιώδη για την μετάβαση από τους σεισμικούς κώδικες της τρέχουσας προσέγγισης σε προδιαγραφές αντισεισμικού σχεδιασμού με βάση την *επιτελεστικότητα*, οι οποίες απαιτούν ακριβείς προβλέψεις των ανελαστικών οριακών καταστάσεων μέχρι τη δομική κατάρρευση.

Σύμφωνα λοιπόν με τους *Jin* και *El-Tawil*, τα μοντέλα ανελαστικής ανάλυσης πλαισιωτών κατασκευών μπορούν γενικά αλλά σαφώς να ταξινομηθούν είτε ως μακρο-μοντέλα είτε ως μικρο - μοντέλα, ανάλογα με την ευκρίνεια (resolution) στη προσομοίωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς δοκών – στύλων.

Η έμφαση στο 1^ο είδος μοντέλων δίνεται στη συμπεριφορά γενικευμένων τάσεων – γενικευμένων παραμορφώσεων (π.χ. ροπής – καμπυλότητας) σε αντίθεση με το 2^ο μοντέλο, όπου η έμφαση δίνεται στη βηματική (σημείο – σημείο) απόκριση τάσης – παραμόρφωσης. Κατά συνέπεια, τα μακρο - μοντέλα είναι από υπολογιστικής πλευράς περισσότερο αποδοτικά από τα μικρο - μοντέλα και αποτελούν τη βάση των περισσότερων αναλύσεων μεγάλης κλίμακας δισδιάστατων και τρισδιάστατων πλαισίων.

Τα τυπικά μακρο - μοντέλα είναι είτε συγκεντρωμένου είτε κατανεμημένου τύπου. Τα στοιχεία που βασίζονται στο συγκεντρωμένο τύπο συσσωρεύουν όλη την ανελαστικότητα στα άκρα του μέλους, οπότε αντιμετωπίζουν την ανελαστική συμπεριφορά του υλικού μέσω

ενός προσεγγιστικού αλλά ταυτόχρονα και υπολογιστικά ικανού τρόπου. Αντίθετα, τα κατανεμημένα μοντέλα είναι περισσότερο ορθολογικά από τα μοντέλα συγκεντρωμένης πλαστικότητας, καθόσον η συμπεριφορά της διατομής παρακολουθείται κατά μήκος του μέλους, αντί μόνο στα άκρα αυτού. Όμως, είναι υπολογιστικά πολύ περισσότερο δαπανηρά.

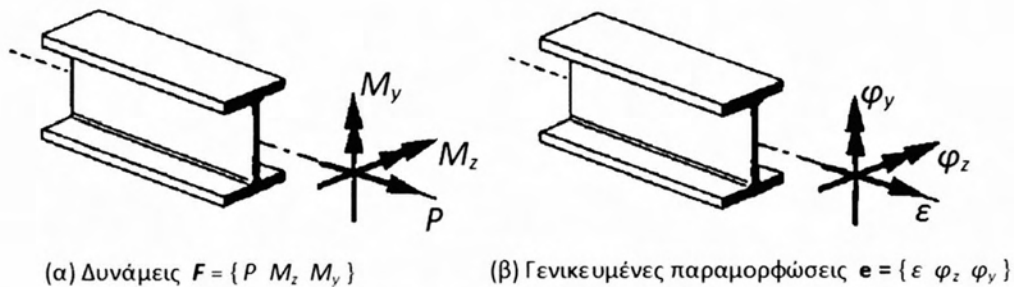
Συμπληρωματικά με τα παραπάνω, και σύμφωνα με τους *Ikeda* και *Mahin (1986)*, τα μοντέλα των μελών πλαισίων, τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς χαλύβδινων συνδέσμων (ενισχυτικών ράβδων) μπορεί εναλλακτικά να ταξινομηθούν ως:

- **Πεπερασμένων στοιχείων**: Πρόκειται για εξ ορισμού μικρο - μοντέλα τα οποία εκ κατασκευής είναι ενδελεχή και ορθολογικά αλλά ταυτόχρονα υπολογιστικά δαπανηρά.
- **Φαινομενολογικά Μοντέλα**: Πρόκειται για μακρο - μοντέλα, τα οποία βασίζονται σε απλουστευμένους υστερητικούς κανόνες, βασισμένους στην παρατηρηθείσα συμπεριφορά της αξονικής παραμόρφωσης σε σχέση με το αξονικό φορτίο ενός συνδέσμου. Γενικώς διαθέτουν έναν τοπικό βαθμό ελευθερίας, αυτόν της αξονικής παραμόρφωσης, και εκφράζουν τους υστερητικούς κύκλους φορτίου-παραμόρφωσης με ευθύγραμμα τμήματα. Για την χρήση τους απαιτείται ο καθορισμός πολυάριθμων εμπειρικών παραμέτρων εισόδου (input) για κάθε αναλυόμενο στοιχείο, τα οποία εξάγονται από πειράματα ή από αποτελέσματα περισσότερο εξευγενισμένων μοντέλων ανάλυσης. Έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για μη γραμμικές σεισμικές αναλύσεις.
- **Μοντέλα Φυσικής Θεωρίας**: Πρόκειται επίσης για μακρο - μοντέλα τα οποία όμως παράγονται με βάση κάποια φυσικά φαινόμενα τα οποία επηρεάζουν την ανελαστική συμπεριφορά των χαλύβδινων συνδέσμων, όπως είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ καμπτικών και αξονικών παραμορφώσεων. Οι παράμετροι εισόδου βασίζονται σε ιδιότητες του υλικού όπως είναι η τάση διαρροής και το μέτρο ελαστικότητας αλλά και σε γεωμετρικές ιδιότητες όπως η επιφάνεια και η ροπή αδρανείας της διατομής κλπ. Τα πιο απλά και ευρέως διαδεδομένα μοντέλα φυσικής θεωρίας αποτελούνται από ελαστικά αμφιαρθρωτά στοιχεία που συνδέονται μέσω μιας πλαστικής άρθρωσης στο μέσον τους, ενώ αν απαιτείται προσομοίωση αμφίπακτης στήριξης τότε και πάλι ένα ενεργό μήκος του αμφίπακτου μέλους λαμβάνεται ως αμφιαρθρωτό.

Αναφορικά με τα μοντέλα φυσικής θεωρίας η εργασία των *Jin* και *El-Tawil* επίσης αναφέρει ότι η πλειοψηφία τους πάσχει από έναν αριθμό σημαντικών περιορισμών, με τους πιο σπουδαίους να είναι:

1. Η διάδοση της πλαστικότητας κατά μήκος του μέλους δεν λαμβάνεται ρητά υπόψη αφού η ανελαστική συμπεριφορά θεωρείται συγκεντρωμένη στην εκτιμηθείσα περιοχή της πλαστικής άρθρωσης.
2. Η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική συμπεριφορά είναι απότομη χωρίς να λαμβάνεται υπόψη επίδραση του φαινομένου Bauschinger.
3. Η μείωση της αξονικής δυσκαμψίας με την πάροδο των κύκλων δεν προσομοιάζεται
4. Οι στήριξεις του μέλους θεωρούνται αρθρωτές.

Το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία αντιμετωπίζει με επιτυχία όλους τους παραπάνω περιορισμούς, είναι τύπου κατανεμημένου μακρο- μοντέλου και χρησιμοποιεί ένα προσομοίωμα πλαστικότητας συντοριακής επιφάνειας, το οποίο εφαρμόζεται στο επίπεδο διατομής και συσχετίζει τις επιβαλλόμενες δυνάμεις με τις γενικευμένες παραμορφώσεις της διατομής, δηλαδή παραμορφώσεις του κεντροβαρικού άξονα και καμπυλότητες, σύμφωνα με το Σχήμα 1.6



Σχήμα 1.6: Φορτία και γενικευμένες μετατοπίσεις

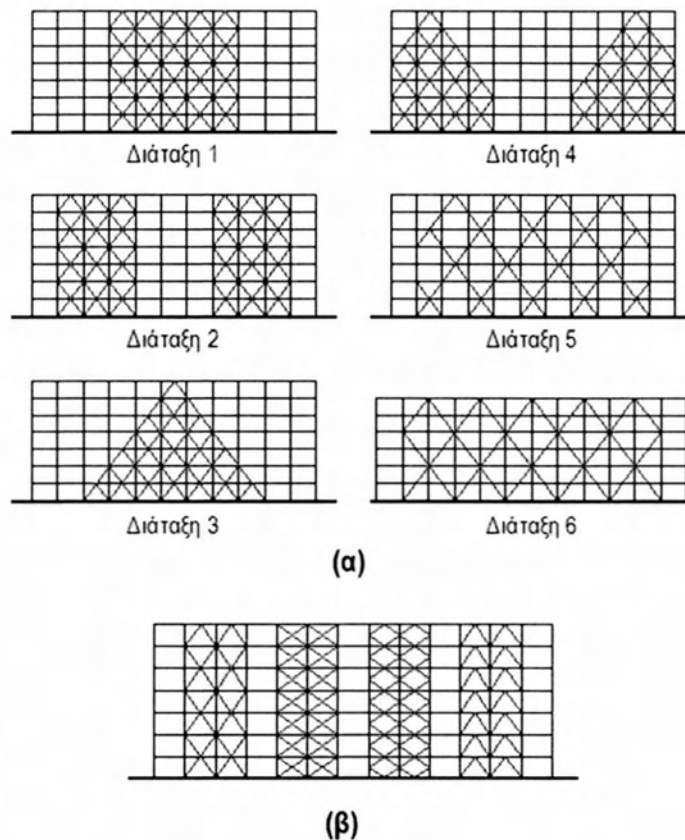
1.2.2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΩ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ

Η πρώτη εργασία που πραγματεύεται την ενίσχυση πλαισίων από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσω της χρήσης χαλύβδινων συνδέσμων χρονολογείται στο 1980 και ανήκει στον **Jain A.K. (1985)**. Σύμφωνα με την εργασία του τα πρώτα πειράματα σε μονώροφα πλαίσια από Ο/Σ με χαλύβδινους συνδέσμους πραγματοποιήθηκαν στην Ιαπωνία, στα οποία παρατηρήθηκε ότι η χρήση κατάλληλων συνδέσμων μπορεί να αυξήσει την αντοχή των πλαισίων μέχρι και τέσσερις φορές. Στην εργασία αυτή επίσης πραγματοποιήθηκαν ανελαστικές σεισμικές αναλύσεις ενός πλαισίου από Ο/Σ με δύο ανοίγματα και έξι ορόφους, είτε γυμνού είτε ενισχυμένου με χαλύβδινους συνδέσμους Χ ή Κ σε όλο το ύψος ενός ανοίγματος, με χρήση του προγράμματος DRAIN-2D. Τα σπουδαιότερα συμπεράσματα των αναλύσεων αυτών είναι:

- Η ανελαστική σεισμική απόκριση των ενισχυμένων πλαισίων ήταν γενικά ικανοποιητική.
- Παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση των αξονικών δυνάμεων των στύλων παρουσία των χαλύβδινων συνδέσμων
- Και τέλος τονίζει πως υπάρχει ανάγκη μελέτης της συμπεριφοράς υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση των συνδέσεων μεταξύ συνδέσμων και σκελετού από Ο/Σ.

Μια δεκαετία αργότερα οι **Badoux και Jirsa (1990)** εξέτασαν τη χρήση χαλύβδινων συνδέσμων για τη μετασκευή (retrofit) σεισμικά ανεπαρκών πλαισίων από οπλισμένο σκυρόδεμα, καθώς, όπως αναφέρουν οι ίδιοι, η χρήση διαγωνίων συνδέσμων αποτελεί μια εξαιρετική τεχνική για την ενίσχυση και αύξηση της δυσκαμψίας υφιστάμενων κατασκευών έναντι πλευρικών φορτίων.

Επίσης, στο Σχήμα 1.7 παρουσιάζονται οι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες συγκεντρωτικές πληροφορίες που παρατίθενται σε ότι αφορά τις πιθανές διατάξεις και σχήματα ενίσχυσης μέσω συνδέσμων. Από τις έξι πιθανές διατάξεις προτείνεται η υπ' αριθμόν 5, ενώ από τα σχήματα το 1^ο και το 2^ο.



Σχήμα 1.7: Διατάξεις (α) και σχήματα (β) ενίσχυσης με χαλύβδινους συνδέσμους

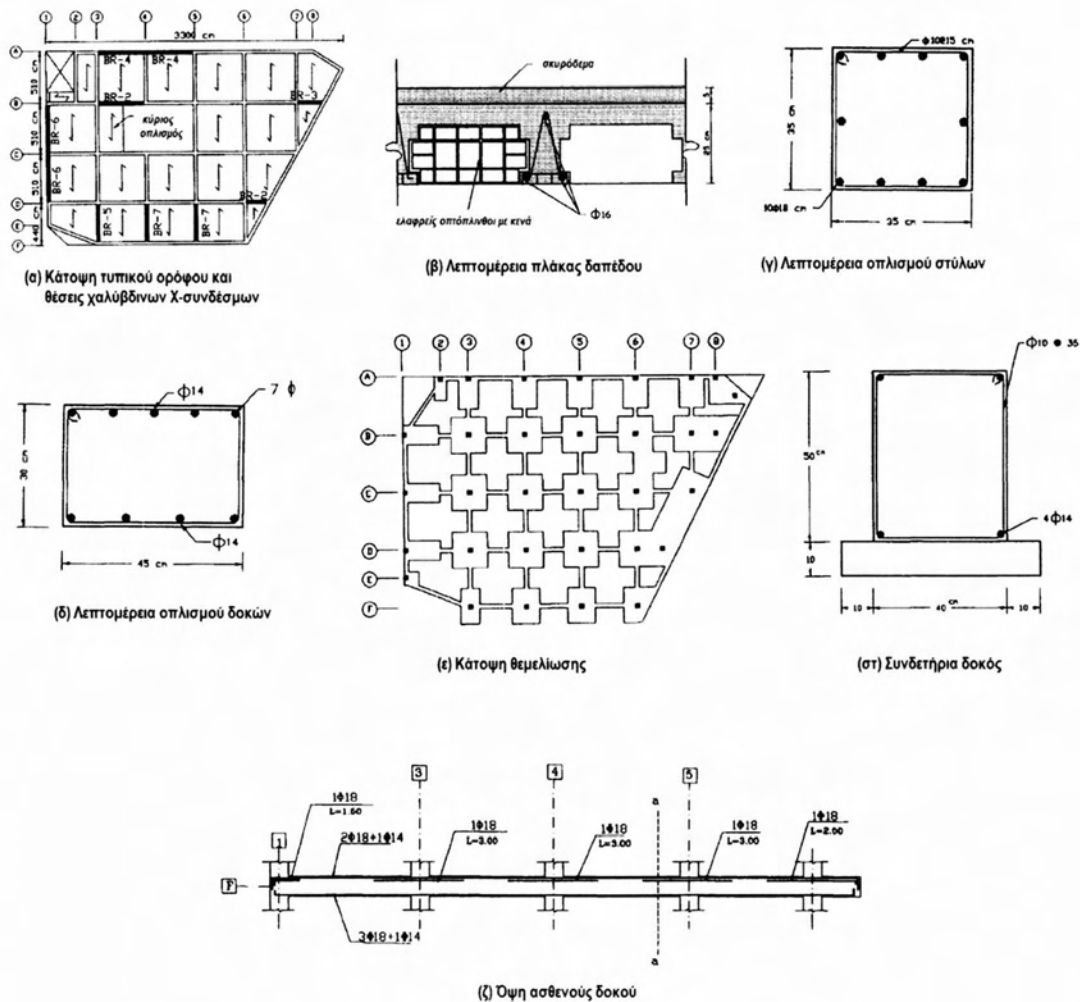
Επιπρόσθετα στην συγκεκριμένη εργασία των **Badoux** και **Jirsa** πριν από την αναλυτική μελέτη, προηγήθηκε και μια αντίστοιχη πειραματική, στην οποία ένα πλαίσιο από Ο/Σ με μεγάλο ύψους δοκούς και κοντούς στύλους ενισχύθηκε εξωτερικά των δοκών με χαλύβδινους συνδέσμους και υποβλήθηκε σε δοκιμές. Τα πειράματα αυτά κατέδειξαν σημαντική βελτίωση της αντοχής, της δυσκαμψίας αλλά και της πλαστιμότητας του πλαισίου.

Οι αναλυτικές μελέτες που επακολούθησαν, βασισμένες σε ένα απλουστευμένο προσομοίωμα, παρήγαγαν αποτελέσματα αρκετά κοντά σε αυτά των πειραματικών, ενώ το σπουδαιότερο συμπέρασμα στη δημοσίευση αυτή υπήρξε ότι η μετασκευή μέσω χαλύβδινων συνδέσμων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για πλαίσια από Ο/Σ με ισχυρές δοκούς – ασθενείς στύλους καθώς και ότι το βασικό πρόβλημα για την επίτευξη υστερητικής ολκιμότητας (πλαστιμότητας) είναι ο ανελαστικός λυγισμός των συνδέσμων.

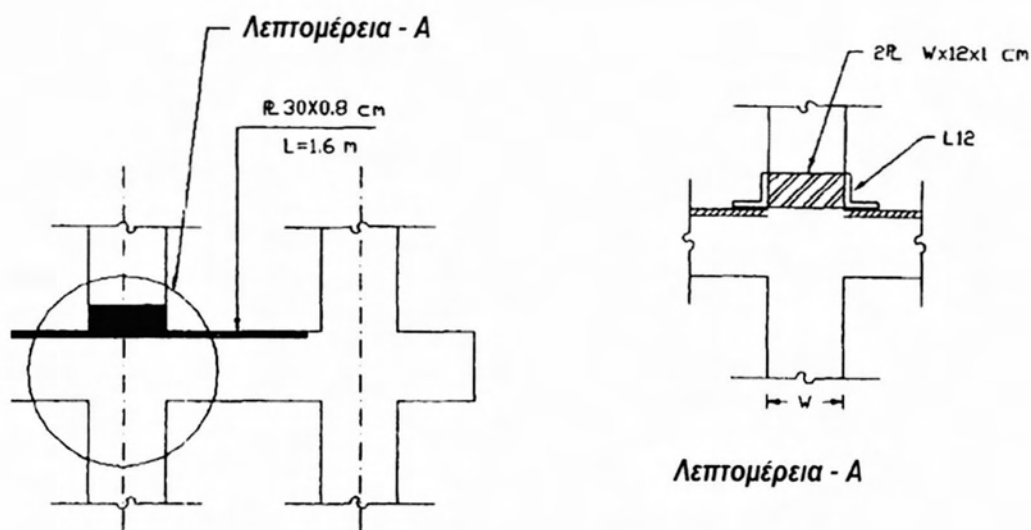
Από τις εργασίες που αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής, η 1^η κατά τεκμήριο δημοσίευση, η οποία παρουσιάζει το μεγαλύτερο πρακτικό κυρίως ενδιαφέρον, σε συνάφεια με το αντικείμενο της

παρούσας διπλωματικής εργασίας, όσον αφορά δηλαδή την χρήση μη έκκεντρων χαλύβδινων χιαστών συνδέσμων για τη σεισμική ενίσχυση κτιρίων με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα (χωρίς φυσικά να παραγνωριστούν τα ευρήματα των προηγούμενων) είναι αυτή του *Nateghi-A (1995)*.

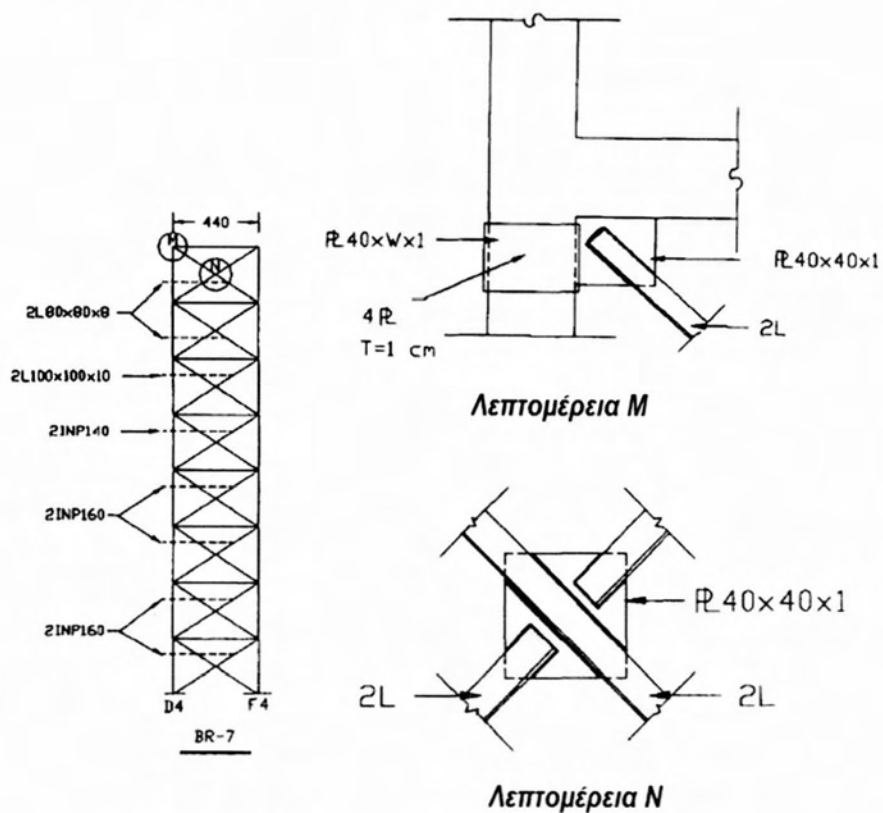
Αναφέρεται στη σεισμική ενίσχυση ενός οκταόροφου κτιρίου διαμερισμάτων στο IPAN – με Φ.Ο. από οπλισμένο σκυρόδεμα – πριν τη τοιχοπλήρωση, μέσω χαλύβδινων συνδέσμων. Παρόλο που πρόκειται για μελέτη εφαρμογής είναι ιδιαίτερα χρήσιμο να παρατεθούν οι σχετικές λεπτομέρειες κατασκευής πριν και μετά την ενίσχυση, οι οποίες φαίνονται στα Σχήματα 1.8 και 1.9.



Σχήμα 1.8: Λεπτομέρειες της υπό ενίσχυση κατασκευής



(α) Λεπτομέρεια ενίσχυσης ασθενών δοκών



(β) Χ - Σύνδεσμοι και λεπτομέρειες

Σχήμα 1.9: Σχηματική αναπαράσταση της ενίσχυσης πλαισίου από ΟΣ μέσω χάλυβδινων Χ-συνδέσμων

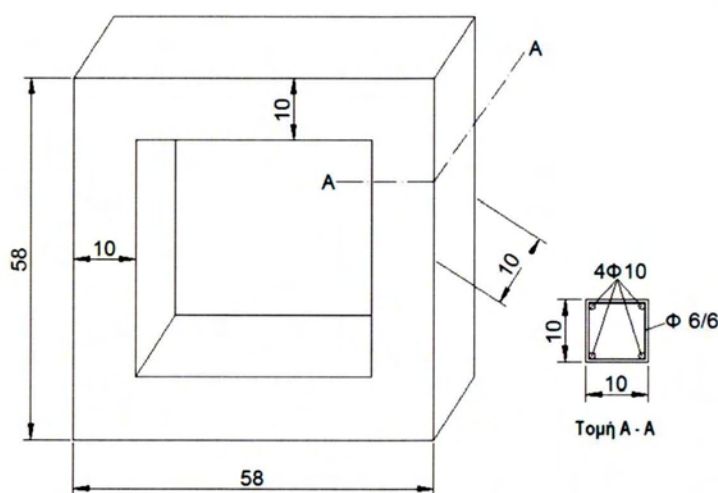
Η συγκεκριμένη δημοσίευση είναι η απαρχή ενός μεγάλου αριθμού εργασιών της από τώρα και στο εξής καλούμενης *Ιρανικής Σχολής*, η οποία όπως θα φανεί στη συνέχεια έχει διαδραματίσει πρωτεύοντα ρόλο σε ότι αφορά το ευρύτερο επιστημονικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Τονίζεται στο σημείο αυτό ότι το IPAN αποτελεί, όπως και η Ελλάδα μια ιδιαίτερα σεισμογενή περιοχή, με παρελθόν ιδιαίτερα καταστροφικών σχετικών συμβάντων, οπότε οι εμπειρίες των εντοπίων ερευνητών και οι προβληματισμοί τους μόνο ευεργετικοί μπορεί να είναι στη συνέχεια.

Στη συνέχεια η προαναφερθείσα Ιρανική Σχολή, και πιο συγκεκριμένα ο καθηγητής **M.R. Maheri** και οι συνεργάτες του δημοσίευσαν μια αξιόλογη σειρά εργασιών που αφορά τη χρήση χαλύβδινων συνδέσμων σε πλαίσια από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αυτές αποτελούν ουσιαστική συνεισφορά στο όλο θέμα, καθώς οι πειραματικές και θεωρητικές έρευνες που διεξήχθησαν παρήγαγαν σημαντικά νέα ευρήματα, που αφορούν τους τρόπους χρήσης των συνδέσμων, τον υπολογισμό του συντελεστή σεισμικής συμπεριφοράς, θέματα ολκιμότητας (πλαστιμότητας), υπεραντοχής και επιτελεστικότητας, σχεδιασμού των συνδέσεων, αλληλεπίδραση μεταξύ αντοχής συνδέσμων και αντοχής πλαισίου, σεισμική συμπεριφορά ειδικά πλαισίων από Ο/Σ με εσωτερικούς Χ-συνδέσμους από χάλυβα κ.α., ενώ προτάθηκε και ένα νέο μηχανικό σύστημα απαλλαγής από θλίψη σε τέτοιου είδους συνδέσμους. (**Ghaffarzadeh and Maheri (2006)**).

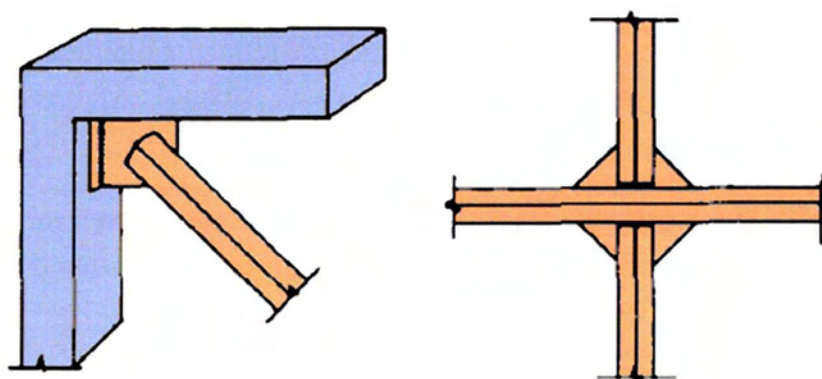
Αναλυτικότερα, στην εισαγωγή αρκετών από τις εργασίες αυτές περιγράφονται για πρώτη φορά με τόση σαφήνεια τα δύο βασικά συστήματα – μεθόδους εφαρμογής χαλύβδινων συνδέσμων, για τη σεισμική ενίσχυση – μετασκευή πλαισίων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Πρόκειται για τη μέθοδο εξωτερικής ενίσχυσης και τη μέθοδο εσωτερικής ενίσχυσης.

- **Μέθοδος Εξωτερικής Ενίσχυσης:** Τα κτίρια μετασκευάζονται μέσω τοποθέτησης ενός τοπικού ή καθολικού χαλύβδινου συστήματος στα εξωτερικά πλαίσια. Η μέθοδος αυτή ενέχει δύο βασικά μειονεκτήματα τα οποία είναι, κάποιες ανησυχίες αρχιτεκτονικής φύσης και κυρίως δυσκολίες μόρφωσης κατάλληλων συνδέσεων μεταξύ του χαλύβδινου συστήματος και του πλαισίου από Ο/Σ.
- **Μέθοδος Εσωτερικής Ενίσχυσης:** Τα κτίρια μετασκευάζονται ενσωματώνοντας ένα σύστημα ενίσχυσης από χάλυβα μέσα στα ανοίγματα των πλαισίων. Η ενσωμάτωση μπορεί να γίνει είτε έμμεσα είτε άμεσα. Στην έμμεση εσωτερική ενίσχυση, ένα ενισχυμένο με συνδέσμους χαλύβδινο πλαίσιο τοποθετείται εσωτερικά του πλαισίου από Ο/Σ, και έτσι η μεταφορά δυνάμεων μεταξύ του χαλύβδινου πλαισίου και του εξωτερικού πλαισίου από Ο/Σ επιτυγχάνεται έμμεσα, όμως η λύση αυτή είναι συνήθως δαπανηρή έως και αδύνατη λόγω των τεχνικών δυσκολιών προσαρμογής του ενός πλαισίου εντός του άλλου. Αντίθετα στην άμεση εσωτερική μέθοδο οι χαλύβδινι σύνδεσμοι εφαρμόζονται απευθείας στο εσωτερικό του περιβάλλοντος πλαισίου από οπλισμένο σκυρόδεμα, αποφεύγοντας έτσι προβλήματα εφαρμογής τους και το αυξημένο κόστος, και μάλιστα μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική με την προϋπόθεση βέβαια του σωστού σχεδιασμού.

Η πρώτη από τις προαναφερθείσες εργασίες των **Maheri και Sahebi (1997)** πραγματεύεται τα πειραματικά αποτελέσματα, που προέκυψαν από μια σχετικά απλοϊκή δοκιμή επί ενός μοντέλου τετραγωνικού πλαισίου από οπλισμένο σκυρόδεμα, αρχικά χωρίς την ενίσχυση αλλά και ενισχυμένο εσωτερικά με (α) μόνο διαγώνιο χαλύβδινο μέλος εφελκόμενο, (β) μόνο διαγώνιο χαλύβδινο μέλος θλιβόμενο και (γ) με χιαστούς συνδέσμους. Οι διαστάσεις και ο οπλισμός του πλαισίου απεικονίζονται στο Σχήμα 1.10, ενώ οι λεπτομέρειες σύνδεσης των χαλύβδινων μελών στις γωνίες του πλαισίου και μεταξύ τους στο Σχήμα 1.11.



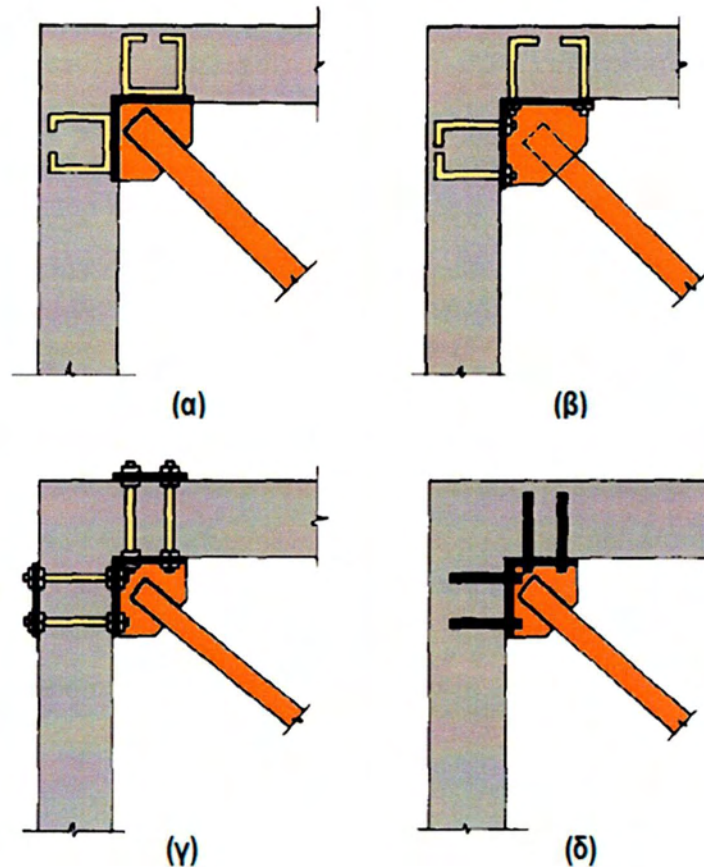
Σχήμα 1.10: Λεπτομέρεια του τυπικού μοντέλου των πειραμάτων των Maheri και Sahebi



Σχήμα 1.11: Λεπτομέρειες συνδέσεων

Τα χαλύβδινα μέλη ήταν διπλά ισοσκελή γωνιακά πλάτους σκέλους 25mm και συνολικής επιφάνειας διατομής 2.84cm^2 , ενώ πραγματοποιήθηκαν και πειράματα για δύο τύπους συνδέσεων του χαλύβδινου μέλους με τους κόμβους του πλαισίου μέσω κομβοελάσματος πάχους 1cm , και πιο συγκεκριμένα των τύπων (α) και (δ) του Σχήματος 1.12, όπου

παρατηρήθηκε λυγισμός των κομβοελασμάτων χωρίς όμως βλάβη των αγκυρώσεων, με τον τύπο (α) να αποδεικνύεται πιο ανθεκτικός.



Σχήμα 1.12: Λεπτομέρειες ορισμένων συνδέσεων μεταξύ πλαισίου από ΟΣ και συνδέσμων από χάλυβα: (α), (β) για υπό κατασκευή πλαίσια και (γ), (δ) για υφιστάμενα πλαίσια

Τα συμπεράσματα της πειραματικής αυτής μελέτης είναι περιληπτικά τα παρακάτω με περισσότερη βαρύτητα στα τελευταία τρία καθώς έχουν πιο άμεση σχέση με το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας:

- Η χρήση ενός μόνο χαλύβδινου διαγωνίου συνδέσμου (είτε εφελκόμενου είτε θλιβόμενου) έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη αύξηση της εντός επιπέδου διατμητικής αντοχής των πλαισίων.
- Σε πλαίσια ενισχυμένα με ένα μόνο σύνδεσμο, η απόκριση κυριαρχείται από το σκελετό από Ο/Σ, που αναλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της εντός επιπέδου καμπτικής καταπόνησης.
- Μπορεί να αποκτηθεί μια σημαντική αύξηση της αντοχής σε τέμνουσα πλαισίων από Ο/Σ με Χ-διαγώνιους χαλύβδινους συνδέσμους
- Η συμπεριφορά των πλαισίων με Χ-συνδέσμους καταδεικνύει την κυριαρχία του εφελκόμενου συνδέσμου, οποίος διαρρέει πρώτα και μετά λυγίζει ο θλιβόμενος.

- Η συμπεριφορά των συνδέσεων διαδραματίζει πρωτεύοντα ρόλο και πρέπει να λαμβάνεται εμφατικά υπόψη στη μελέτη και το σχεδιασμό

Οι επόμενες δύο δημοσιεύσεις **Maheri και Akbari (2003)**, **Maheri et al. (2003)**, αφορούσαν τον προσδιορισμό ορισμένων παραγόντων όπως σεισμικής συμπεριφοράς R , ολκιμότητας και υπεραντοχής για κτίρια από Ο/Σ ενισχυμένα με κεντρικούς εσωτερικούς χαλύβδινους συνδέσμους κύρια μορφής Χ αλλά και μορφής γόνατος, τόσο αναλυτικά όσο και πειραματικά οι οποίες περιλαμβάνουν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα για την παρούσα εργασία και για αυτό το λόγο συμπεριλαμβάνονται στο παρών κείμενο.

Επικεντρώνοντας τη προσοχή μας στο πρώτο είδος ενίσχυσης, ο παράγων R (που απαντάται σε όλους τους αντισεισμικούς κώδικες, με διαφορετικό τρόπο γραφής κατά περίπτωση) είναι ένας παράγων ο οποίος εισάγει την μείωση των σεισμικών φορτίων που οφείλεται στην πραγματική μετελαστική συμπεριφορά του συστήματος σε σχέση με εκείνα που προκύπτουν υπολογιστικά από ένα απεριόριστα ελαστικό σύστημα. Ουσιαστικά εκφράζει την δυνατότητα μιας κατασκευής να αποσβένει την εισαγόμενη ενέργεια κατά την σεισμική διέγερση μέσω της ανάπτυξης ενός αξιόπιστου ελαστοπλαστικού μηχανισμού.

Άρα, ο παράγων αυτός λαμβάνει υπόψη του την εγγενή πλαστιμότητα (ολκιμότητα) και υπεραντοχή μιας κατασκευής και τη διαφορά στις τιμές των τάσεων που θεωρούνται κατά το σχεδιασμό της, και γενικά δίνεται με τη μορφή της εξίσωσης $R = R_\mu \cdot R_s \cdot Y$ όπου R_μ ο συντελεστής που εκφράζει την μείωση της πλαστιμότητας, R_s ο παράγων υπεραντοχής και Y ο παράγων επιτρεπόμενων τάσεων.

Σύμφωνα δε με το Σχήμα 1.13, όπου η πραγματική συμπεριφορά φορτίου – μετατόπισης εξιδανικεύεται μέσω μιας διγραμμικής καμπύλης ελαστικής – πλήρως πλαστικής συμπεριφοράς, οι παράγοντες που προαναφέρθηκαν μπορούν να γραφούν υπό τη μορφή:

$$R_\mu = \frac{V_e}{V_y}, \quad R_s = \frac{V_y}{V_s} \quad \text{και} \quad Y = \frac{V_s}{V_w} \text{ και ο συντελεστής συμπεριφοράς ορίζεται τελικά ως:}$$

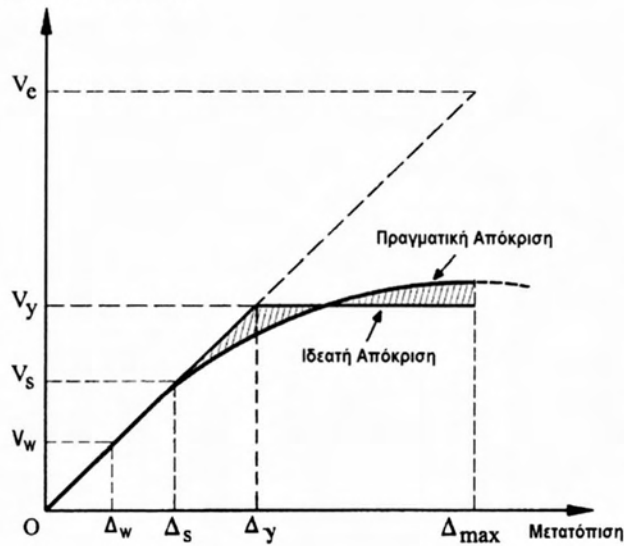
$$R(R_w) = \frac{V_e}{V_w} \text{ δηλαδή ως ο λόγος της αντοχής πλήρους ελαστικής απόκρισης προς την αντοχή}$$

σχεδιασμού με βάση τις επιτρεπόμενες τάσεις.

Στις εκφράσεις αυτές οι ποσότητες V_e , V_y , V_s και V_w εκφράζουν την αντοχή ελαστικής απόκρισης της κατασκευής, την ιδεατή αντοχή διαρροής, την 1^η χαρακτηριστική αντοχή διαρροής και την αντοχή σχεδιασμού με βάση τις επιτρεπόμενες τάσεις αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, η πλαστιμότητα μ της κατασκευής ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης πλευρικής μετατόπισης της κατασκευής Δ_{\max} προς τη μετατόπιση Δ_y που αντιστοιχεί στην ιδεατή

$$\text{αντοχή διαρροής, δηλαδή } \mu = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_y}.$$

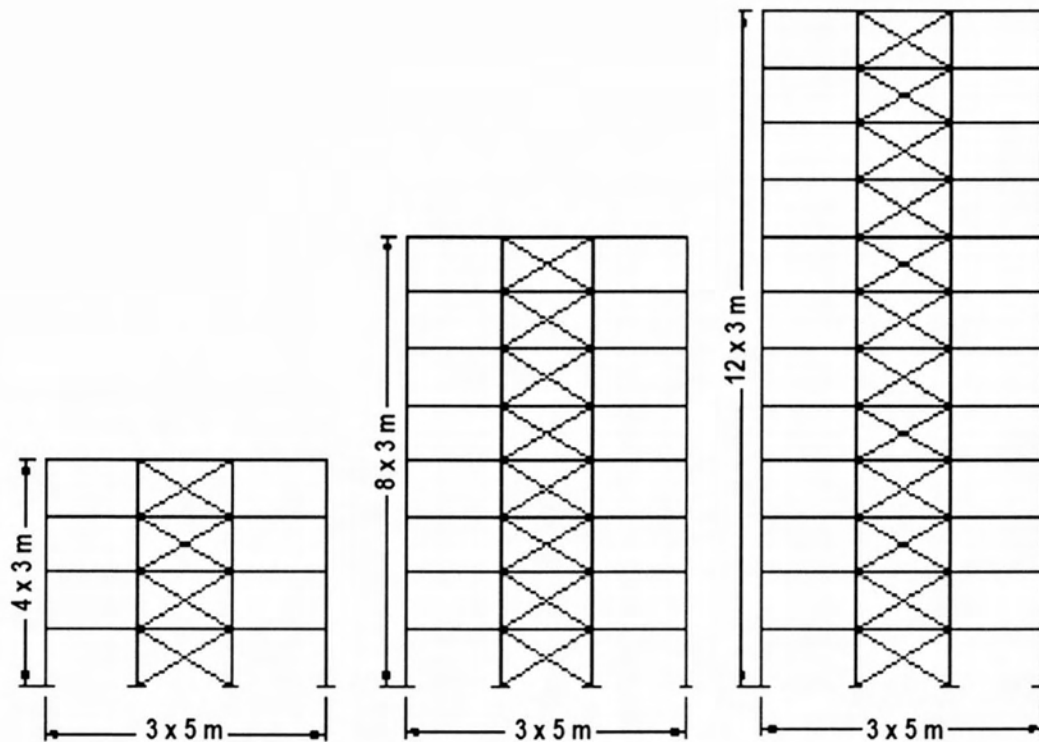
Δύναμη - Τέμνουσα Βάσης



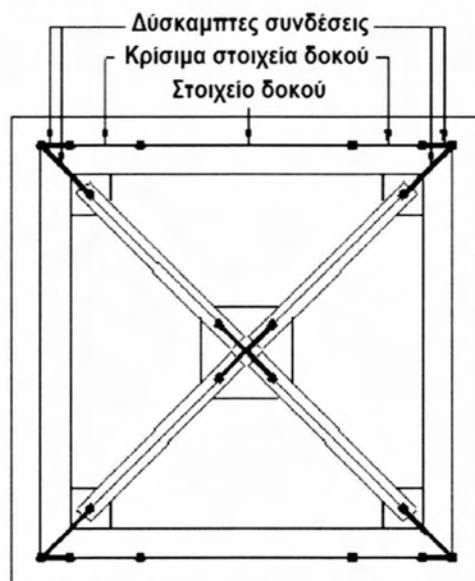
Σχήμα 1.13: Τυπική υπερωθητική καμπύλη απόκρισης για τον υπολογισμό του παράγοντα συμπεριφοράς R

Με βάση τους παραπάνω ορισμούς, μελετήθηκαν τρία είδη πλαισίων από τους **Maheri και Akbari (2003)**, τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 1.14, μέσω ανελαστικής υπερωθητικής ανάλυσης με το λογισμικό DRAIN – 2DX. Ουσιαστικά, η όλη ανάλυση

πραγματοποιήθηκε μέσω προσομοίωσης της βασικής κατασκευαστικής μονάδας είτε απλού είτε ενισχυμένου πλαισίου μέσω πεπερασμένων στοιχείων του ως άνω λογισμικού, σύμφωνα με το Σχήμα 1.15.



Σχήμα 1.14: Γεωμετρία των πλαισίων που μελετήθηκαν

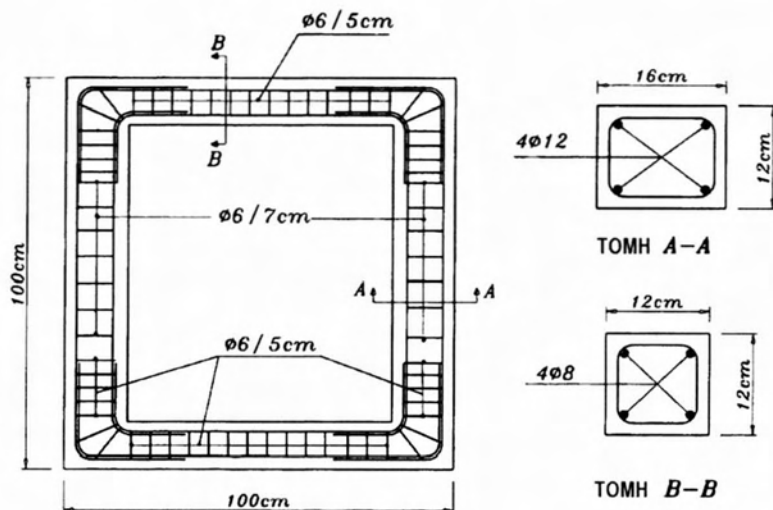


Σχήμα 1.15: Αναπαράσταση μέσω πεπερασμένων του συστήματος πλαίσιο Ο/Σ – χιαστί χάλυβιδινοί σύνδεσμοι

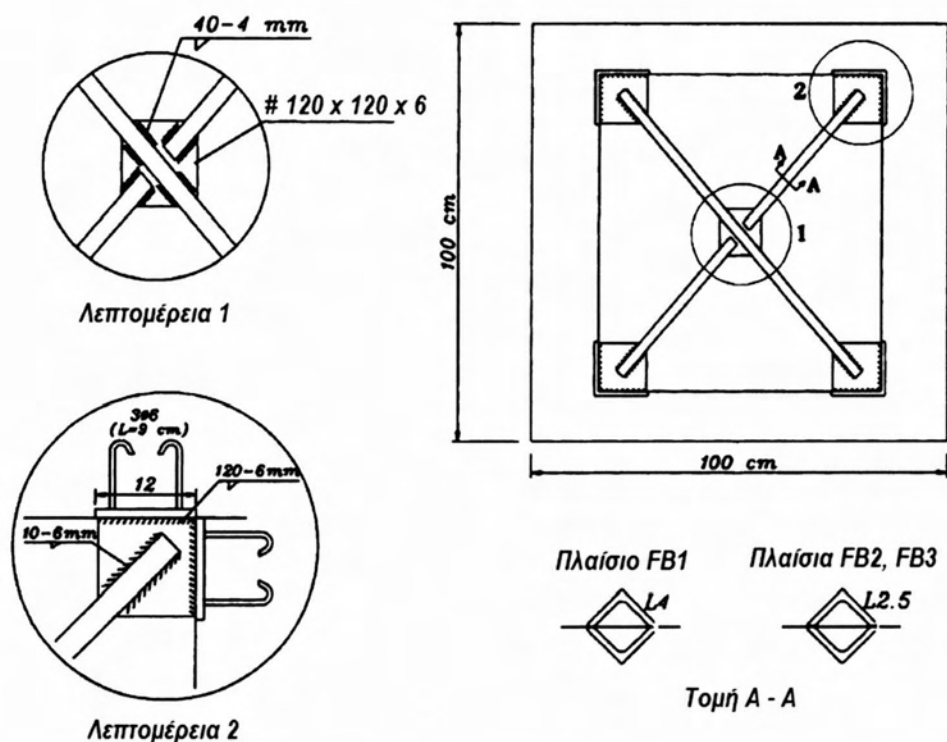
Τα σπουδαιότερα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αναλυτική μελέτη είναι τα παρακάτω:

- Εφόσον τα ενισχυμένα πλαίσια από Ο/Σ έχουν σχεδιαστεί για μια συγκεκριμένη τέμνουσα βάση, διαθέτουν πολύ μεγαλύτερη πλαστιμότητα από αυτή του μη ενισχυμένου πλαισίου.
- Σε ότι αφορά το συντελεστή R, προτείνεται όπως η τέμνουσα βάση με ομοιομορφία μεταξύ του σκελετού από Ο/Σ και του συστήματος Χ-συνδέσμων από χάλυβα.

Η παραπάνω διάταξη μελετήθηκε και πειραματικά από τους *Maheri et al. (2003)*, για ένα υπό κλίμακα 1/3 μοντέλο για οριζόντιο φορτίο πάνω αριστερά κορυφής ίσο με 33kN για το μη ενισχυμένο πλαίσιο και 79kN για το πλαίσιο με χάλυβιδινους Χ-συνδέσμους, σύμφωνα με τις λεπτομέρειες των Σχημάτων 1.16 και 1.17.



Σχήμα 1.16: Διαστάσεις και λεπτομέρειες οπλισμού του μοντέλου πλαισίου από Ο/Σ

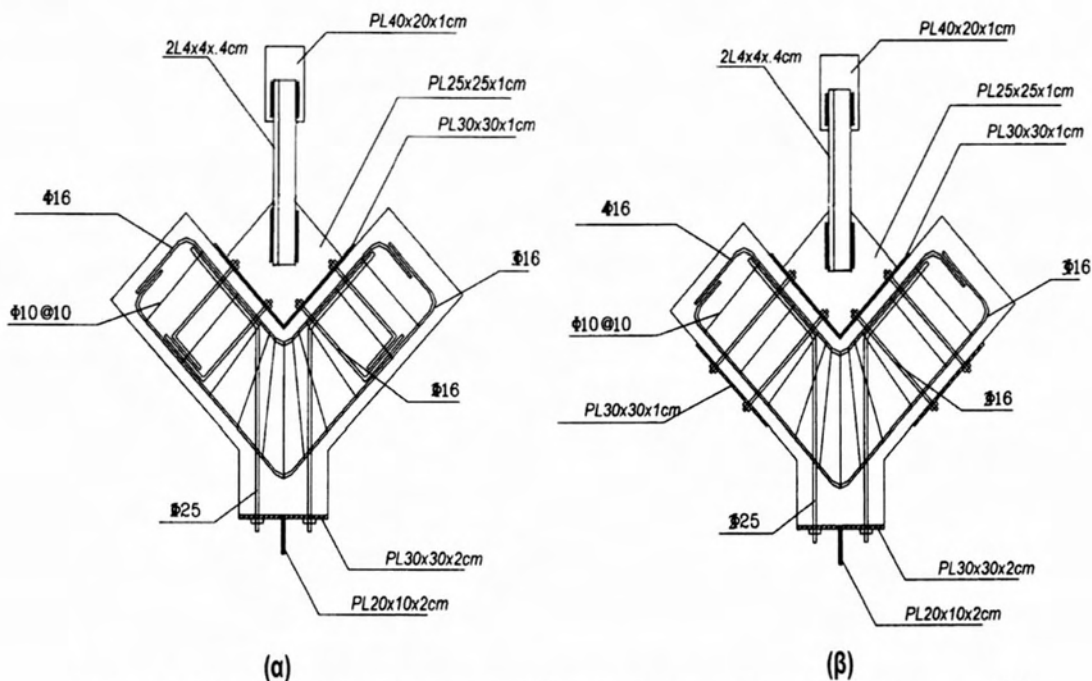


Σχήμα 1.17: Λεπτομέρεια των Χ-συνδέσμων και της σύνδεσης τους με το πλαίσιο από Ο/Σ.

Τα κυριότερα συμπεράσματα της πειραματικής μελέτης ήταν τα ακόλουθα:

- Η αντοχή ενός πλαισίου από ΟΣ μπορεί να αυξηθεί σημαντικά αν προστεθούν Χ-συνδέσμοι από χάλυβα, καθόσον η παρουσία τους – αλλά και η παρουσία των συνδέσεων μεταξύ τους – αυξάνει την αντοχή διαρροής του πλαισίου.
- Οι καθολικές μετατοπίσεις ενός τέτοιου πλαισίου μειώνονται σημαντικά παρουσία των Χ-συνδέσμων, η οποία ενισχύει σημαντικά και την πλευρική του δυσκαμψία.
- Η αστοχία των μελών ενίσχυσης θα πρέπει να προηγείται αυτής των συνδέσεων, για τις οποίες θα πρέπει να υπάρξει ενδελεχής έλεγχος και ανάλυση.

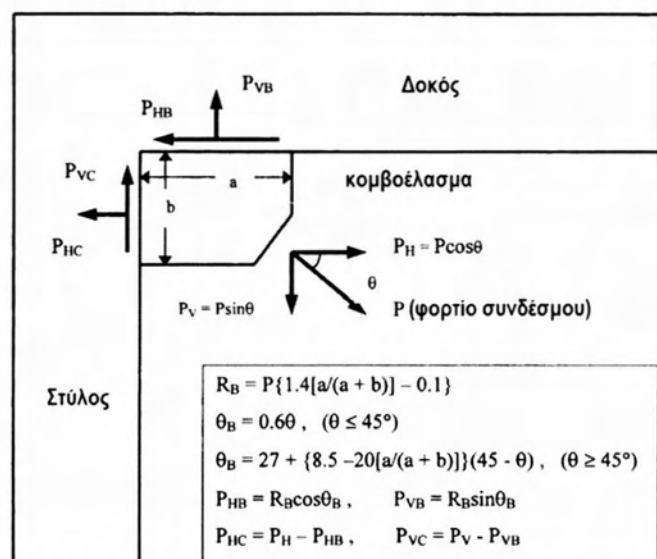
Ακολούθησε μια σημαντική πειραματική μελέτη που αφορούσε το σχεδιασμό συνδέσεων εσωτερικών κεντρικών Χ-συνδέσμων από χάλυβα με πλαίσια από Ο/Σ από τους **Maheri και Hadjipour (2003)**. Τα πειράματα έγιναν για να ελεγχθεί η εφαρμοσιμότητα υφιστάμενων κανόνων κατασκευών από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα, σε ότι αφορά τις συνδέσεις αυτές. Εξετάστηκαν τριών ειδών συνδέσεις, δύο από τις οποίες φαίνονται στο Σχήμα 1.18, εκ των οποίων ο τύπος (β) αφορά άμεσα την παρούσα διπλωματική εργασία, όπως θα φανεί καλύτερα στο τρίτο μέρος της πειραματικής διερεύνησης. Πρόκειται για συνδέσεις οι οποίες είναι εύκολα εφαρμόσιμες σε υφιστάμενες κατασκευές και οι οποίες υποβλήθηκαν σε δοκιμές άμεσου εφελκυσμού



Σχήμα 1.18: Λεπτομέρειες των συνδέσεων του πειράματος εφελκυσμού^[16]

Όπως φαίνεται στο ανωτέρω Σχήμα, το κομβοέλασμα σύνδεσης των διαγωνίων μελών είναι συγκολλημένο σε επίπεδες μεταλλικές πλάκες οι οποίες αγκυρώνονται στον κόμβο του σκυροδέματος. Ειδικότερα στον τύπο (β), διανοίγονται διαμπερείς οπές και οι πλάκες συνδέονται μέσω κοχλιών, που στερεώνονται στην πίσω παρειά με περικόχλια και χρήση επιπρόσθετων πλακών. Για λόγους συμμετρίας η διατομή των δύο πλευρών της γωνίας από σκυρόδεμα ήταν τετραγωνική 30 x 30 cm και οι συγκολλήσεις πάχους λαιμού 8mm.

Ο συγκεκριμένος τύπος σύνδεσης είναι κατ' αρχήν παρόμοιος με τις συνδέσεις Χ-συνδέσμων σε κόμβους πλαισίων από χάλυβα, με εξαίρεση την διαμόρφωση της σύνδεσης του κομβοελάσματος με το σκυρόδεμα, μέσω πλακών έδρασης και αγκυρίων, που όμως μοιάζει αρκετά με τον τρόπο διαμόρφωσης εδράσεων χαλύβδινων στύλων. Εξετάστηκε λοιπόν η δυνατότητα σχεδιασμού των συνδέσεων αυτών με βάση υφιστάμενους κανόνες σε Κώδικες χαλύβδινων κατασκευών και οπλισμένου σκυροδέματος, λόγω της ως άνω ομοιότητας. Επειδή κατά κοινή ομολογία οι συνδέσεις αυτές είναι περισσότερο ευάλωτες σε εφελκυσμό



παρά σε θλίψη, ο σχεδιασμός τους (για τις πειραματικές διατάξεις) έγινε με τρόπο ώστε κατά σειρά μεγέθους τα αγκύρια, οι πλάκες σύνδεσης, οι ραφές, το κομβοέλασμα και οι σύνδεσμοι να διαθέτουν την απαιτούμενη αντοχή, σύμφωνα με την ανάλυση δυνάμεων του Σχήματος 1.19.

Σχήμα 1.19: Δυνάμεις δρώσες στη σύνδεση.

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τις δοκιμές κατέδειξαν ότι οι συνδέσεις μπορούν όντως να σχεδιαστούν με βάση υφιστάμενους Κώδικες, καθώς και ότι η εκτός επιπέδου κάμψη των πλακών σύνδεσης δεν διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, οπότε τα βασικά μέρη μπορούν κάλλιστα να θεωρηθούν έτσι ώστε να δύναται να αναλάβουν εντός επιπέδου εφελκυστικές και τέμνουσες δυνάμεις, ενώ τονίστηκε ότι δεν συνεισφέρουν ιδιαίτερα σε αύξηση της πλαστιμότητας.

Μια συγκριτική μελέτη της αποτελεσματικότητας χρήσης είτε χαλύβδινων Χ-συνδέσμων (από κοίλες κυκλικές διατομές) είτε FRP για τη σεισμική ενίσχυση πλαισίων από Ο/Σ πραγματοποιήθηκε από τους **El-Amouri** και **Ghobarah (2005)**. Η όλη ανάλυση βασίστηκε σε μακρο- μοντέλα και δόθηκε έμφαση στην επιρροή της παραμόρφωσης των κόμβων στη καθολική δυναμική απόκριση. Το σπουδαίο συμπέρασμα ήταν ότι η χρήση Χ-συνδέσμων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην αύξηση της δυσκαμψίας του συστήματος, **με τον κίνδυνο όμως εμφάνισης μη όλκιμων μορφών αστοχίας όπως διατμητικής.**

Παρόμοια συμπεράσματα αντλήθηκαν και στην εργασία των **Gorji et al (2008)**, πάλι με βάση την επιτελεστικότητα, όπου τονίστηκε ότι η σεισμική ενίσχυση πλαισίων από Ο/Σ μέσω χαλύβδινων Χ-συνδέσμων μειονεκτεί λόγω ταχείας εμφάνισης λυγισμού, που αν για την αποφυγή του χρησιμοποιηθούν ισχυρότεροι σύνδεσμοι, τούτο μπορεί να οδηγήσει το μηχανισμό κατάρρευσης σε δοκούς και στύλους (λόγω αύξησης του αξονικού φορτίου).

Με βάση την βιβλιογραφική ανασκόπηση που προηγήθηκε μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω σημαντικά συμπεράσματα:

1. Στην ανάλυση και στα πειράματα θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η συμμετοχή και η σωστή προσομοίωση της τοιχοπλήρωσης των ανωτέρων ορόφων καθώς και η ακριβής κατά το δυνατόν προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς των μελών από Ο/Σ αλλά και χάλυβα.
2. Αφού καθοριστεί ο βασικός σκοπός της ενίσχυσης (αντοχή, δυσκαμψία, πλαστιμότητα), θα πρέπει στην συνέχεια να αξιολογηθούν να ιεραρχηθούν και να ταξινομηθούν, από πλευράς επιθυμητής αλληλουχίας, οι αναμενόμενες μορφές αστοχίας και οι θέσεις τους.
3. Μια σπουδαία παράμετρος που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό πλαισίων από οπλισμένο σκυρόδεμα ενισχυμένων με χαλύβδινους συνδέσμους δυσκαμψίας είναι το επίπεδο αλληλεπίδρασης μεταξύ της αντοχής του πλαισίου και του συστήματος δυσκαμψίας, η οποία εν πολλοίς οφείλεται στην **υπεραντοχή** των συνδέσεων.
4. Ο κατάλληλος σχεδιασμός άμεσων (απ' ευθείας) συνδέσεων των μελών των Χ-συνδέσμων με το πλαίσιο από σκυρόδεμα είναι σημαντικός για την επίτευξη της επιθυμητής αντοχής έναντι πλευρικών φορτίων. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να ελαχιστοποιείται η εκκεντρότητα της δύναμης που μεταφέρουν τα μέλη των συνδέσεων έτσι ώστε να μεταφέρεται στη γωνία του πλαισίου χωρίς κίνδυνο ζημιών στα μέλη από σκυρόδεμα.
5. Σπουδαίο ρόλο διαδραματίζει η σεισμική απόκριση των συνδέσεων μέσω κομβοελασμάτων.
6. Η επιρροή της δυσκαμψίας των στύλων από σκυρόδεμα είναι σημαντική για τη σεισμική απόκριση των ενισχυόμενων φανωμάτων.

7. Λαμβάνοντας υπόψη την εύκολη κατασκευή και το χαμηλό κόστος, η ενίσχυση με χαλύβδινους συνδέσμους δυσκαμψίας είναι ιδιαίτερα ελκυστική.
8. Είναι προτιμότερη η χρήση Χ-συνδέσμων παρά απλών διαγωνίων, καθόσον με τους πρώτους μειώνεται κατά πολύ η απαιτούμενη αντοχή σε τέμνουσα των πλαισίων από σκυρόδεμα.
9. Η συμμετοχή του κατά περίπτωση εφελκόμενου χαλύβδινου συνδέσμου παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην απόκριση της κατασκευής.
10. Έχουν προταθεί κατά καιρούς τρεις (3) βασικοί τύποι σύνδεσης των χαλύβδινων συνδέσμων με το περιβάλλον πλαίσιο: μηχανικοί σύνδεσμοι, κονίαμα και ειδικές κόλλες, με τη μηχανική σύνδεση να επιδεικνύει την βέλτιστη συμπεριφορά.
11. Θα πρέπει κατά την ανάλυση της ενίσχυσης να λαμβάνεται με ιδιαίτερη προσοχή υπόψη ο συντελεστής σεισμικής συμπεριφοράς R .
12. Με την απευθείας σύνδεση του συστήματος ενίσχυσης με το πλαίσιο από σκυρόδεμα ελαχιστοποιείται η δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ τους και τέλος
13. Πρέπει να λαμβάνονται εμφατικά υπόψη τόσο οι απαιτήσεις ολκιμότητας όσο και ο στόχος ελαχιστοποίησης της μέγιστης μεταξύ ορόφων σχετικής οριζόντιας μετατόπισης.

2

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στο σημείο αυτό θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παραμετρικής μελέτης που διεξήχθη από τον **Σοφριανόπουλο (2012)**, όσων αφορά την συνεισφορά των Χ-συνδέσμων από χάλυβα σε αντοχή και δυσκαμψία στην συνολική απόκριση πλαισίων από οπλισμένο σκυρόδεμα με πυλωτή. Διευκρινίζεται ότι τα συγκεκριμένα αποτελέσματα εξαρτώνται από την ακρίβεια και τη λεπτομέρεια του θεωρούμενου μοντέλου για κάθε ένα από τα εξεταζόμενα δομικά μέλη.

2.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ.

Η υστερητική συμπεριφορά ενός μεμονωμένου χαλύβδινου ενισχυτικού μέλους είναι ιδιαίτερα περίπλοκη, καθώς περιλαμβάνει μια σειρά σύνθετων φαινομένων όπως είναι ο λυγισμός του στοιχείου, η διαρροή του υλικού σε συγκεκριμένες θέσεις κατά μήκος του μέλους, οι επιρροές τοπικού λυγισμού και η μεταλυγισμική μείωση της θλιπτικής του αντοχής του που οφείλεται στο φαινόμενο Bauschinger και στην μείωση του εφαπτομενικού μέτρου.

Η περίπλοκη αυτή συμπεριφορά μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω της χρήσης δύο διαφορετικών μοντέλων, που αναλύθηκαν και διεξοδικότερα στο πρώτο μέρος, τα φαινομενολογικά και τα μοντέλα φυσικής θεωρίας. Τα μοντέλα φυσικής θεωρίας ενσωματώνουν απλουστευμένους θεωρητικούς κανόνες οι οποίοι επιτρέπουν τον υπολογισμό της μη γραμμικής υστερητικής συμπεριφοράς του ενισχυτικού μέλους. Σε αντίθεση με τα φαινομενολογικά οι παράμετροι εισόδου των μοντέλων φυσικής θεωρίας βασίζονται στα γεωμετρικά στοιχεία και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού των ενισχυτικών μελών.

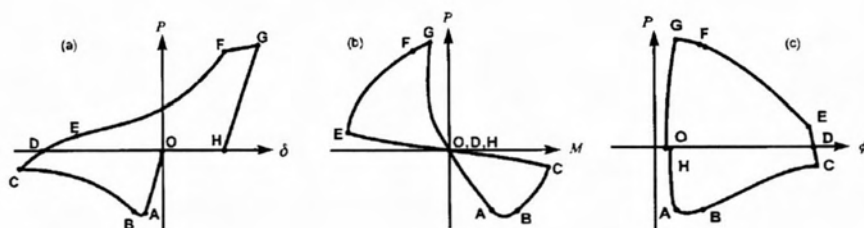
Στην συγκεκριμένη παραμετρική μελέτη υιοθετήθηκε το μοντέλο φυσικής θεωρίας που προτάθηκε από τους **Remennikov και Walpole (1997)**, το οποίο είναι διαθέσιμο στο λογισμικό RUAUMOKO το οποίο επιλέχθηκε από τους δύο ερευνητές ως εργαλείο για την συγκεκριμένη μελέτη τους.

2.1.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΦΥΣΙΚΗΣ ΘΕΩΡΕΙΑΣ REMENNIKOV

Η βασική πηγή διάχυσης ενέργειας απλών ενισχυτικών χαλύβδινων μελών προέρχεται από τον ανελαστικό λυγισμό τους, που έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων, περιοχών δηλαδή όπου εμφανίζονται ανελαστικές καμπυλότητες. Ο αριθμός των πλαστικών αρθρώσεων που αναμένεται να εμφανιστούν εξαρτάται από τις συνοριακές συνθήκες του μέλους. Συνήθως θεωρούνται δύο ιδεατές συνθήκες και στα δύο άκρα του μέλους, που είναι είτε η άρθρωση είτε η πάκτωση. Οι πραγματικές συνθήκες δέσμευσης των άκρων όμως ενός ενισχυτικού μέλους σε ένα αληθινό πλαίσιο εξαρτάται από μια ποικιλία

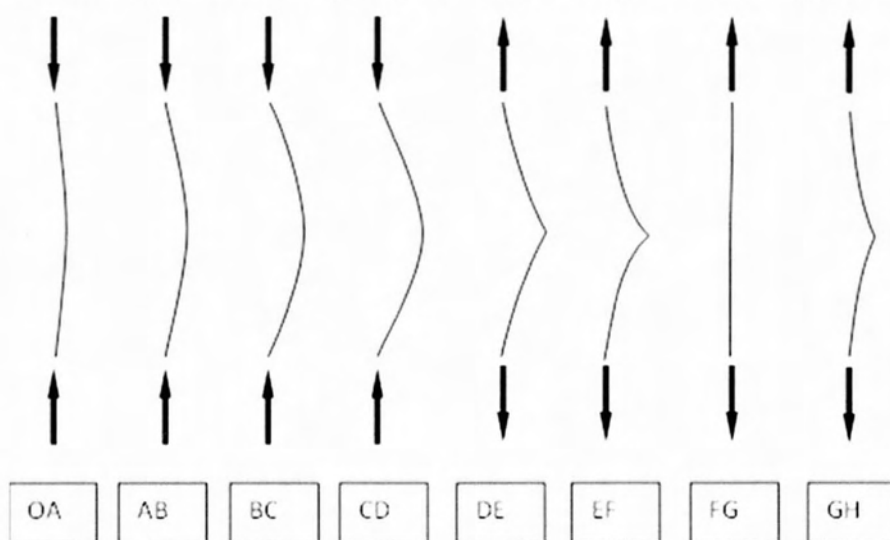
παραγόντων, όπως ο σχηματισμός του πλαισίου, οι συνθήκες φόρτισης, η λυγνρότητα του μέλους, η ευκαμψία των κόμβων και η ανελαστική συμπεριφορά των γειτονικών μελών. Σε ένα ιδεατό αμφιαρθρωτό μέλος σχηματίζεται μια πλαστική άρθρωση, ενώ στο αμφίπακτο τρεις πλαστικές αρθρώσεις.

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η γενική συμπεριφορά ενός χαλύβδινου συνδέσμου δυσκαμψίας. Πιο αναλυτικά στο Σχήμα 2.1(a) απεικονίζεται η καμπύλη αξονικού φορτίου-παραμόρφωσης ενώ στα σχήματα 2.1(b) και 2.1(c) η καμπύλη αξονικού φορτίου-ροπής πλαστικής άρθρωσης.



Σχήμα 2.1: Βρόγχοι υστέρησης της ανελαστικής συμπεριφοράς ενός ενισχυτικού μέλος σε έναν κύκλο φόρτισης

Με βάση των ορισμό των ζωνών από τους **Ikedo** και **Mahin (1984)**, ένας κύκλος φόρτισης διαιρείται σε τέσσερις γενικές κατηγορίες: ελαστικές ζώνες, πλαστικές ζώνες, ζώνη ελαστικού λυγισμού και ζώνη διαρροής. Οι όροι «ελαστικός» και «πλαστικός» αντιστοιχούν στην κατάσταση της πλαστικής άρθρωσης, ενώ ο όρος «διαρροή» σχετίζεται με την κατάσταση των τμημάτων της δοκού. Στη συνέχεια, η ελαστική ζώνη υποδιαιρείται στην ελαστική βράχυνση κατά την οποία τόσο το μήκος του μέλους όσο και το αξονικό φορτίο μειώνονται και την ελαστική επιμήκυνση κατά την οποία τόσο το μήκος του μέλους όσο και το αξονικό φορτίο αυξάνονται. Τελικά, η ελαστική βράχυνση, η ελαστική επιμήκυνση και οι πλαστικές ζώνες υποδιαιρούνται περαιτέρω σε ζώνες θλίψης και εφελκυσμού αντίστοιχα. Σαν αποτέλεσμα, οι οκτώ ζώνες που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2 και στον Πίνακα 2.1



ενσωματώνονται για να ορίσουν κατάλληλα τις καμπύλες του Σχήματος 2.1.

Σχήμα 2.2: Ορισμός των διαφορετικών ζωνών της ανελαστικής συμπεριφοράς ενός ενισχυτικού μέλος σε έναν κύκλο φόρτισης

Πίνακας 2.1: Ορισμός των διαφορετικών ζωνών της ανελαστικής συμπεριφοράς ενός ενισχυτικού μέλους σε έναν κύκλο φόρτισης

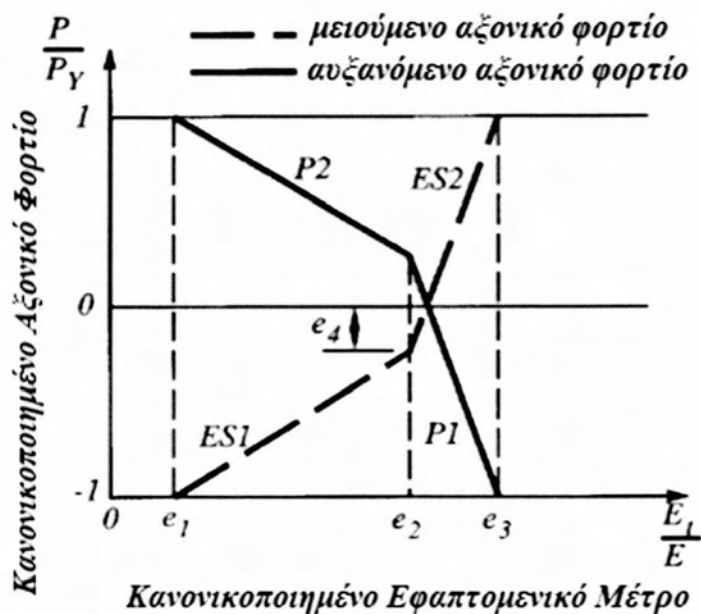
Τμήμα	Ζώνη	Τμήμα	Ζώνη
OA	Ελαστική βράχυνση σε θλίψη	DE	Ελαστική επιμήκυνση σε εφελκυσμό
AB	Ζώνη λυγισμού	EF	Πλαστική ζώνη σε εφελκυσμό
BC	Πλαστική ζώνη σε θλίψη	FG	Ζώνη διαρροής
CD	Ελαστική επιμήκυνση σε θλίψη	GH	Ζώνη ελαστικής βράχυνσης σε εφελκυσμό

Μια τέτοιου είδους λεπτομερής αναπαράσταση αντικατοπτρίζει καλύτερα τις διακρίσεις μεταξύ των ζωνών, και ιδιαίτερα την μη αναστρεψιμότητα τους, συμπεριλαμβανόμενων και των «ελαστικών» ζωνών. Η ιδιότητα αυτή των «ελαστικών» ζωνών προκύπτει κυρίως από την ασυνέχεια του εφαπτομενικού μέτρου κατά τη διάρκεια των αντιστροφών του ιστορικού φόρτισης.

Το ιστορικό μεταβολής του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας, που αντιστοιχεί στην «κυκλική» ανελαστική βράχυνση και επιμήκυνση ενός στύλου, είναι μεγάλης σημασίας για την ακριβή πρόβλεψη της ανελαστικής υστερητικής συμπεριφοράς ενός μεμονωμένου χαλύβδινου ενισχυτικού μέλους.

Έχει παρατηρηθεί σε πειραματικά αποτελέσματα στη βιβλιογραφία ότι τι εφαπτομενικό μέτρο μειώνεται σημαντικά κατά τη διάρκεια ανελαστικών αντιστροφών. Με βάση πειραματικά δεδομένα, δημιουργήθηκε ένα εμπειρικό μοντέλο για το κανονικοποιημένο εφαπτομενικό μέτρο $e = \frac{E_t}{E}$ ως συνάρτηση του κανονικοποιημένου αξονικού φορτίου

$$p = \frac{P}{P_y}, \text{ σύμφωνα με το Σχήμα 2.3.}$$

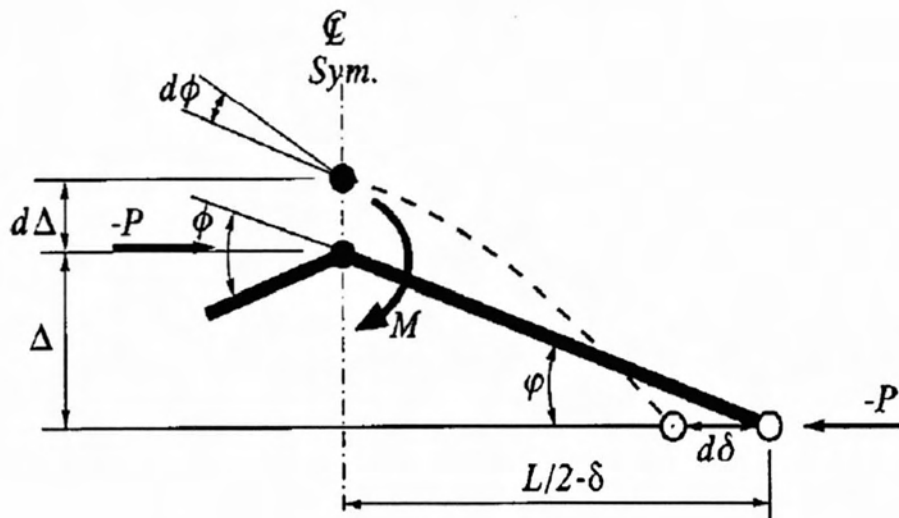


Σχήμα 2.3: Ιστορικό μεταβολής του εφαπτομενικού μέτρου στο μοντέλο Remennikov

Δύο ζεύγη γραμμικών ιδεατών καμπυλών χρησιμοποιούνται για τον ορισμό του τρόπου αύξησης και μείωσης. Οι τιμές των τεσσάρων παραμέτρων e_1, e_2, e_3 και e_4 πρέπει να επιλεγούν από υφιστάμενα πειραματικά δεδομένα για να ληφθεί υπόψη η εξέλιξη της μεταβολής του εφαπτομενικού μέτρου. Οι

Remennikov και Walpole (1997) ανέπτυξαν ένα επαυξητικό μοντέλο χαλύβδινου ενισχυτικού μέλους, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο υλικού τύπου έργου-κράτυνσης, σε αντίθεση με το ελαστικό – πλήρως πλαστικό μοντέλο υλικού που επέλεξαν οι **Ikeda και Mahin (1984)**. Επιπρόσθετα ο **Remennikov** προέβη σε περαιτέρω τροποποιήσεις του αρχικού μοντέλου για να συμπεριλάβει τον υποβιβασμό αυτών των καμπυλών σε σχέση με τους κύκλους φόρτισης σύμφωνα με τις πειραματικές παρατηρήσεις.

Το «φυσικό» μοντέλο ενός αμφιαρθρωτού ενισχυτικού μέλους με πλαστική άρθρωση στο μέσο του ανοίγματος απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4. Το μέλος φορτίζεται με αξονικό φορτίο P , που προκαλεί μια εσωτερική ροπή πλαστικής άρθρωσης M , την αξονική παραμόρφωση δ και την στροφή της πλαστικής άρθρωσης Φ . Η μόρφωση του μοντέλου υποθέτει ελαστική αξονική και καμπτική παραμόρφωση κατά μήκος του μέλους και πλαστική αξονική και καμπτική παραμόρφωση συγκεντρωμένες στην πλαστική άρθρωση.



Σχήμα 2.4: Παραμορφωμένο σχήμα αμφιαρθρωτού ενισχυτικού μέλους

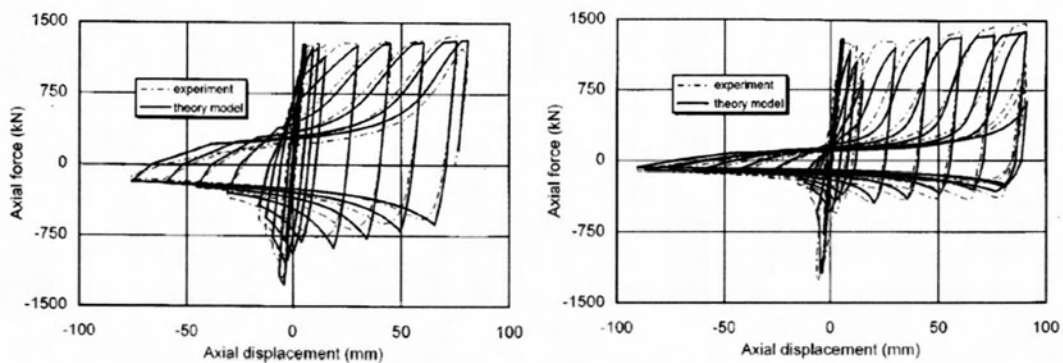
Το επαυξητικό μοντέλο φυσικής θεωρίας μπορεί να συνοψιστεί μέσω των ακόλουθων εξισώσεων:

$$dP = K_t \cdot d\delta$$

όπου

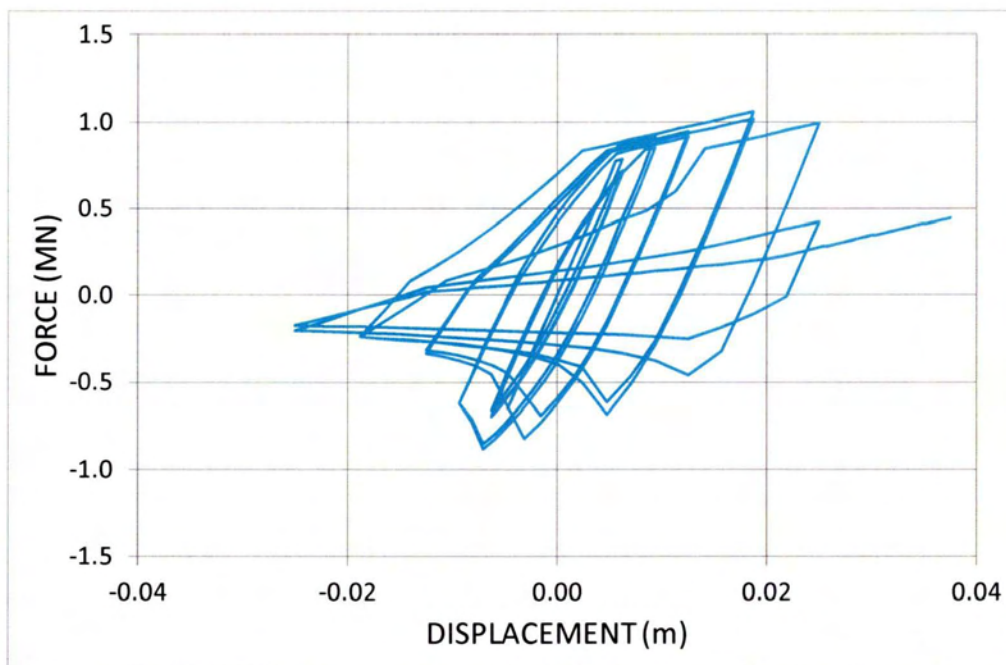
$$K_t = \frac{E_t \cdot A}{1 + \langle S \rangle \cdot (E_t \cdot A) \cdot L^2 \left\{ \frac{dh_1(v)}{dv} \frac{dv}{dP} \Phi_i^2 + 2 \cdot h_1(v) \cdot \Phi_i^2 \frac{d\Phi_p}{dP} d \right\} + (E_t \cdot A) \frac{f_{,P}}{f_{,M}} \frac{d\Phi_p}{dP}}$$

Ο συντελεστής εφαπτομενικού μέτρου K_t ορίζει τις ανελαστικές ιδιότητες του ενισχυτικού μέλους για μια επαυξητική λύση. Όλες οι μεταβλητές που υπεισέρχονται ορίζονται λεπτομερώς στη δημοσίευση των **Remennikov και Walpole (1997)**. Η ως άνω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί η επαυξητική αξονική δύναμη όταν η κατάσταση βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια διαρροής και η φόρτιση είναι ανελαστική. Οι επαυξητικές αξονικές δυνάμεις είτε εντός της επιφάνειας διαρροής είτε όταν γίνεται αποφόρτιση από αυτή μπορούν να βρεθούν στο πλήρες κείμενο της δημοσίευσης των **Remennikov και Walpole (1997)**. Στο Σχήμα 2.5 αναπαρίσταται η επικύρωση του μοντέλου Remennikov σε σχέση με πειραματικά αποτελέσματα.

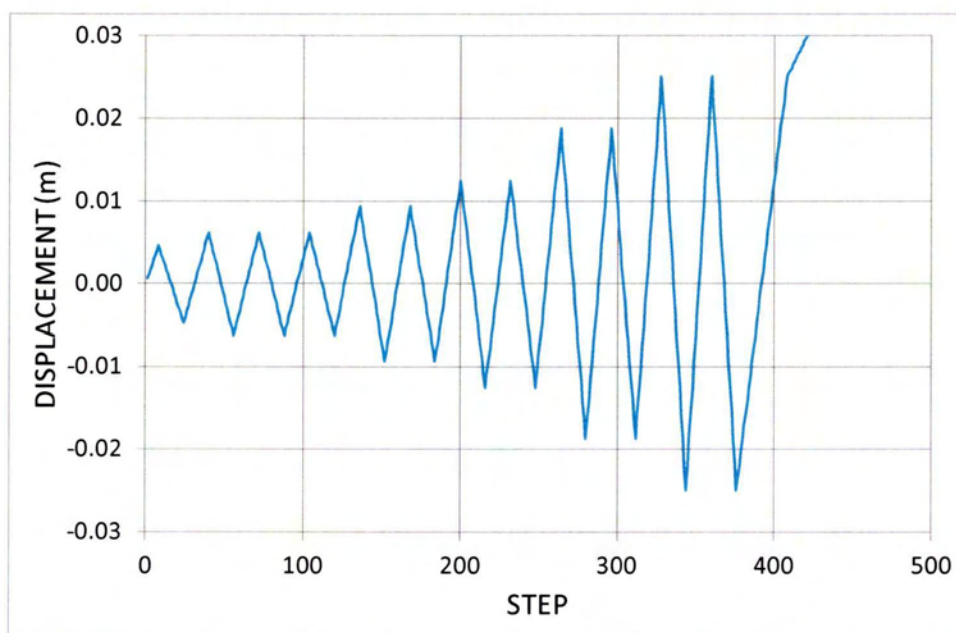


Σχήμα 2.5: Σύγκριση αναλυτικών και πειραματικών βρόγχων P-δ για αμφιαρθρωτό και αμφίπακτο χαλύβδινο ενισχυτικό μέλος.

Πραγματοποιήθηκε μια ενδελεχής παραμετρική έρευνα σε επίπεδο συστατικού (μεμονωμένου συνδέσμου), όπου αναγνωρίστηκαν οι παράμετροι που ελέγχουν τη συμπεριφορά ενός χαλύβδινου ενισχυτικού μέλους υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Μέσω της διαδικασίας αυτής κατέστη εφικτή η βαθμονόμηση των παραμέτρων του αντίστοιχου μοντέλου του λογισμικού RUAUMOKO από τον **Carr A. (2007)**. Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται η συμπεριφορά της παραμόρφωσης φορτίου ενός SHS ενισχυτικού μέλους μήκους 3.17m με μέτρο ελαστικότητας 200.1GPa και επιφάνεια διατομής 21.7cm² (τετραγωνική HSS 4×4×1/4in διατομή στις ΗΠΑ), υπό ιστορικό μετατόπισης (HYSTERES, ιστορικό ενσωματωμένο στο RUAUMOKO), αποτελούμενο από προοδευτικά αυξανόμενους κύκλους παραμόρφωσης, που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.7. Οι παράμετροι του μοντέλου **Remennikov** περιέχονται στον Πίνακα 2.2.



Σχήμα 2.6: Βρόγχος δύναμης – μετατόπισης για το μοντέλο Remennikon με παραμέτρους αυτές του Πίνακα 2.2



Σχήμα 2.7: IHIST=1 στο RUAUMOKO. Ιστορικό μετατόπισης του ενισχυτικού μέλους

Πίνακας 2.2: Παράμετροι του μοντέλου Remennikov στο RUAUMOKO

Παράμετροι εισόδου στο RUAUMOKO	Περιγραφή	Τιμές
I_{minor} (m ⁴)	Ροπή αδρανείας ασθενούς άξονα	3.24E-6
S_{minor} (m ³)	Πλαστική ροπή αντίστασης ασθενούς άξονα	7.67E-5
k	Ισοδύναμο μήκος λυγισμού	0.5
α	Συντελεστής κράτυνσης	1.0
β	Συντελεστής βήτα	1.2
θ_0	Αρχική απόκλιση από την ευθυγραμμία	0.0
e_1	Ενεργό επαπτομενικό μέτρο	0.35
e_2	Ενεργό επαπτομενικό μέτρο	0.9
e_3	Ενεργό επαπτομενικό μέτρο	1.1
e_4	Ενεργό επαπτομενικό μέτρο	0.0
n	Επιλογή κανόνα κράτυνσης	0
shape	Τύπος διατομής	3

2.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΣΗΣ

Οι τοιχοπληρώσεις (που στα συνήθη οικοδομικά έργα στην Ελλάδα είναι κατασκευασμένες από οπτόπλινθους με ενδιάμεσο κονίαμα) προσομοιάστηκαν στο RUAUMOKO με το στοιχείο τύπου ελατηρίου σε συνδυασμό με τον κανόνα υστέρησης τοίχου πλήρωσης διαγώνιου στοιχείου, *Chrisafulli F.J. (1997)*. Οι λεπτομερείς παράμετροι εισόδου και οι τιμές τους δίνονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3: Παράμετροι εισόδου του RUAUMOKO για το μοντέλο των τοίχων πλήρωσης για την παρακάτω παραμετρική μελέτη

Σχέση τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης		
Θλιπτική αντοχή (kPa)	FC	-2500
Εφελκυστική αντοχή (kPa)	FT	10
Παραμόρφωση στην FC	UC	-3.325x10 ⁻³
Οριακή παραμόρφωση	UUL	-6.650x10 ⁻³
Τελική παραμόρφωση	UCL	-1.000x10 ⁻³
Αρχικό μέτρο τοιχοπλήρωσης	EMO	1.875x10 ⁶
Συντελεστής δυσκαμψίας αποφόρτισης	GUN	1.40
Συντελεστής δυσκαμψίας επαναφόρτισης	ARE	0.40
Επιφάνεια διαγώνιου στοιχείου		
Αρχική επιφάνεια (m ²)	AREA1	0.03
Τελική επιφάνεια (m ²)	AREA2	0.03
Μετατόπιση σημείου 1	R1	-0.004
Μετατόπιση σημείου 2	R2	-0.016
Περιβάλλουσα κατιόντος κλάδου	IENV	Παραβολική

2.3 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ.

Πραγματοποιήθηκε παραμετρική μελέτη για τον υπολογισμό της επιρροής της σχετικής δυσκαμψίας και αντοχής της πυλωτής στους υπερκείμενους ορόφους. Η εν λόγω διαδικασία υπολογισμού μεταβλητών / παραμέτρων αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση καθόσον:

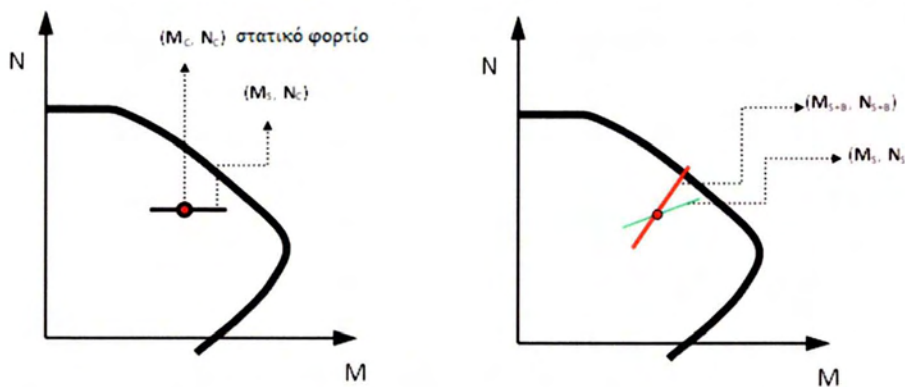
1. Η θεωρούμενη κατασκευή έχει σχεδιαστεί με βάση τον αντισεισμικό κανονισμό που ίσχυε πριν το 1985. Οι μελέτες της εποχής εκείνης θεωρούσαν πλαίσια χωρίς τοιχοπληρώσεις, δηλαδή η ανάλυση θεωρούσε την παρουσία των τοιχοποιιών ευεργετική (υπέρ της ασφαλείας) χωρίς έτσι να λαμβάνεται υπόψη κατά τη μελέτη του φέροντα οργανισμού. Η ανάλυση λοιπόν αυτή θεωρούσε, παρόλη τη μεγάλη δυσκαμψία και αντοχή των τοίχων, η έντονη ψαθυρή συμπεριφορά τους οδηγεί σε αστοχία σχετικά γρήγορα, οπότε δεν συμμετέχουν στη συνολική δυσκαμψία και αντοχή της όλης κατασκευής μετά τους πρώτους «σημαντικούς» κύκλους φόρτισης.
2. Όταν χρησιμοποιούνται οι όροι «ενίσχυση» ή «αφαίρεση της σεισμικής τρωτότητας της πυλωτής» μέσω συνδέσμων δυσκαμψίας (Χ ή διαγωνίων), μπορούν να δοθούν οι παρακάτω δύο ερμηνείες: (α) οι επί πλέον σύνδεσμοι έχουν τέτοιες ιδιότητες (δυσκαμψία και αντοχή) ώστε το τρέχον δομικό σύστημα (απλό πλαίσιο χωρίς τοίχους) να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των σημερινών αντισεισμικών κανονισμών, ή (β) οι ιδιότητες του Φ.Ο. στο επίπεδο της πυλωτής, μετά την πρόσθεση των συνδέσμων, καθίστανται τέτοιες που ουσιαστικά εξαλείφουν την ασυνέχεια του ισογείου σε σχέση με τους υπερκείμενους ορόφους χωρίς ενισχυτικές επεμβάσεις σε κανένα άλλο μέλος του φέροντος οργανισμού, για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των σημερινών αντισεισμικών κανονισμών.

Η πρώτη ερμηνεία, που αντιπροσωπεύεται καλλίτερα από τον όρο «ενίσχυση», σίγουρα θα επηρεάσει τον συνολικό σχεδιασμό της κατασκευής και φαίνεται αναπόφευκτη η ανάγκη αναβάθμισης άλλων δομικών μελών για να υπάρξει ικανοποίηση των απαιτήσεων των σημερινών αντισεισμικών κανονισμών, που προβλέπουν αυξημένη ικανότητα των δομικών μελών σε σχέση με παλαιότερους κανονισμούς. Μια τέτοια επιλογή θα οδηγούσε σε μεγαλύτερα κόστη, αυξημένο χρόνο επέμβασης στις καθημερινές λειτουργίες της κατασκευής, σε μεγαλύτερο χρόνο συνολικής αναβάθμισης κλπ.

Η δεύτερη ερμηνεία, για την οποία ο όρος «αφαίρεση της σεισμικής τρωτότητας της πυλωτής» μοιάζει πιο αντιπροσωπευτικός, φαίνεται περισσότερο ελκυστική, αφού για προφανώς μικρότερο κόστος (σε σχέση με την πλήρη ενίσχυση) μπορεί να οδηγήσει σε συμμόρφωση της κατασκευής με τους σημερινούς μοντέρνους κώδικες.

Στην παρούσα μελέτη υιοθετήθηκε η δεύτερη ερμηνεία και έτσι επικεντρώθηκε στην «αφαίρεση της σεισμικής τρωτότητας της πυλωτής» από υφιστάμενες κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος. Παρά ταύτα, θα πρέπει να δοθεί απάντηση στο ερώτημα «μπορεί να επιτευχθεί συνέχεια δυσκαμψίας και αντοχής μέσω συνδέσμων, χωρίς επίδραση σε άλλα δομικά μέλη;». Φαίνεται, και έχει ήδη τονιστεί σε μερικές μελέτες, **Kaushik et al. (2009)** ότι σε περίπτωση ενίσχυσης με συνδέσμους δυσκαμψίας η δράση δικτύωματος μπορεί να

επηρεάσει δυσμενώς τους στύλους που συνδέονται με τα ως άνω ενισχυτικά μέλη, καθόσον καλούνται να αναλάβουν μεγαλύτερα αξονικά φορτία (σε σχέση με αυτά που αναλαμβάνουν χωρίς την παρουσία των συνδέσμων), ακόμα και αν δεν επηρεάζεται κανένα άλλο δομικό στοιχείο. Ως εκ τούτου, η απότομη αύξηση των αξονικών φορτίων των στύλων (ειδικά επειδή αυτά βρίσκονται σε φάση με τις πλευρικές μετατοπίσεις) μπορεί να οδηγήσουν τις καμπύλες αλληλεπίδρασης N-M των υποστυλωμάτων πλησιέστερα σε περιοχές μη ασφαλείας (βλέπε

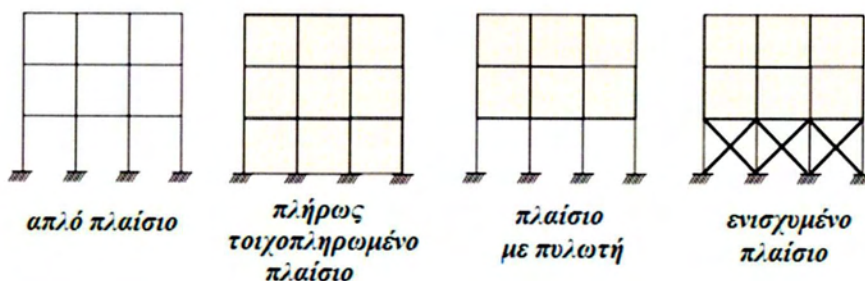


Σχήμα 2.8).

Σχήμα 2.8: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικού φορτίου – ροπής και αντίστοιχη απόκριση ενός στύλου υπό στατική και δυναμική / ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Στο παραπάνω Σχήμα απεικονίζεται ένα γενικό διάγραμμα αλληλεπίδρασης αξονικής δύναμης – καμπτικής ροπής ενός τυπικού υποστυλώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα – μέλος ενός «καμπτικού» πλαισίου. Το σημείο (M_C, N_C) στο διάγραμμα καταδεικνύει τη συνθήκη στατικού φορτίου λειτουργίας, κατά την οποία τόσο το αξονικό φορτίο όσο και η ροπή ενός στύλου είναι σχεδόν σταθερά. Υποθέτοντας σταθερό το αξονικό φορτίο του στύλου, η απόκριση του υπό ανακυκλιζόμενο (σεισμικό) φορτίο φαίνεται στο Σχήμα με τη γραμμή (M_S, N_C) . Λαμβάνοντας υπόψη την αλλαγή του αξονικού φορτίου των στύλων λόγω επιρροών ροπών ανατροπής, η απόκριση του στύλου αντιπροσωπεύεται από τη γραμμή (M_S, N_S) . Αν γίνει χρήση συνδέσμων, αλλάζει και η απόκριση του στύλου (αυξάνεται το αξονικό φορτίο του στύλου και η μετατόπιση οπότε μειώνεται η ροπή), όπως φαίνεται από τη γραμμή (M_{S+B}, N_{S+B}) . Αυτή είναι η κατάσταση που ένας στύλος μπορεί να οδηγηθεί σε αστοχία, αν η γραμμή (M_{S+B}, N_{S+B}) τμήσει την καμπύλη αλληλεπίδρασης N – M.

Για την υπο εξέταση παραμετρική μελέτη θεωρήθηκαν τέσσερις τύποι πλαισίων οι οποίοι φαίνονται στο Σχήμα 2.9. Ένα απλό πλαίσιο (χωρίς τοιχοπλήρωση), ένα πλήρως τοιχοπληρωμένο, ένα πλαίσιο με πυλωτή με τοιχοπληρωμένους τους υπερκείμενους ορόφους και το ενισχυμένο με Χ-συνδέσμους πλαίσιο.



Σχήμα 2.9: Τέσσερα είδη πλαισίων που αντιστοιχούν στο θεωρούμενο κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα της παρούσας παραμετρικής μελέτης

2.4 ΑΠΛΟ ΠΛΑΙΣΙΟ(ΜΗ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΜΕΝΟ-ΓΥΜΝΟ)

Το απλό πλαίσιο αντιπροσωπεύει την συνήθη πρακτική σχεδιασμού η οποία ισχύει ακόμα και στον υφιστάμενο αντισεισμικό κανονισμό, χωρίς δηλαδή να λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά της δυσκαμψίας και της αντοχής των τοίχων πλήρωσης στην ανάλυση. Οι παλαιότεροι αντισεισμικοί κανονισμοί αλλά και ο τρέχων δεν υποχρεώνουν τον μελετητή Μηχανικό να λάβει υπόψη του τους τοίχους πλήρωσης στη διαδικασία σχεδιασμού. Έτσι, τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα στην Ελλάδα, καθώς και σε άλλες χώρες παγκόσμια, έχουν σχεδιαστεί σαν απλά (μη τοιχοπληρωμένα) πλαίσια αλλά έχουν κατασκευαστεί είτε σαν πλήρως τοιχοπληρωμένα είτε με πυλωτή.

Γενικά ο σχεδιασμός απλών πλαισίων απαιτεί την συνέχεια δυσκαμψίας και αντοχής καθ' όλο το ύψος τους της κατασκευής. Η παρατηρηθείσα αλλά και υπολογισθείσα μη γραμμική συμπεριφορά τέτοιων πλαισίων υπό έντονα σεισμικές / δυναμικές διεγέρσεις κατανέμεται μάλλον ομοιόμορφα καθ' ύψος. Συνήθως η αστοχία συμβαίνει στους ασθενείς στύλους του πρώτου ορόφου (καμπτική αστοχία) ειδικά σε παλαιότερες (πριν το 1985) μελέτες, όπου η ιδέα ισχυρής δοκού – ασθενούς στύλου ήταν σταθερή πρακτική αλλά και πρόβλεψη κανονισμών.

2.5 ΠΛΗΡΩΣ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Σε αυτό τον τύπο πλαισίων υφίσταται τοιχοπλήρωση σε όλα τα φατνώματα καθ' ύψος, οπότε κατ' αναλογία διατηρείται η ομοιομορφία δυσκαμψίας και αντοχής σε όλο το ύψος της κατασκευής. Η παρουσία των τοιχοπληρώσεων αλλάζει σημαντικά τα δυναμικά χαρακτηριστικά της. Όμως, λόγω της ψαθυρής συμπεριφοράς τους, οι τοίχοι του 1^{ου} ορόφου αστοχούν σχετικά γρήγορα οπότε η πλευρική αντοχή του πλαισίου μειώνεται επίσης σημαντικά. Η παρουσία των τοίχων στον 1^ο όροφο εμποδίζει πάντως την πρόιμη αστοχία των στύλων του ορόφου αυτού.

2.6 ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΕ ΠΥΛΩΤΗ

Η διαμόρφωση αυτή αποτελείται από ανοιχτό 1^ο όροφο, με τα φατνώματα των υπερκείμενων ορόφων πλήρως τοιχοπληρωμένα. Υφίσταται μια απότομη διαφοροποίηση τόσο στη δυσκαμψία όσο και στην αντοχή μεταξύ του 1^{ου} ορόφου και των υπολοίπων. Οι πλευρικές μετατοπίσεις συσσωρεύονται κυρίως στους στύλους του 1^{ου} ορόφου (ισογείου κατά την Ελληνική ορολογία), λόγω της απουσίας τοιχοπλήρωσης, με αποτέλεσμα καμπτική και διατμητική αστοχία δοκών και στύλων στο επίπεδο της πυλωτής. **Βασικός αντικειμενικός στόχος της παρούσας μελέτης ήταν διερεύνηση της χρήσης Χ-συνδέσμων για την αφαίρεση αυτής της μάλλον συνήθους μορφής αστοχίας από τον εν λόγω τύπο πλαισίων.**

2.7 ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας στην πυλωτή μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αντικατάσταση των τοίχων του πλαισίου της προηγούμενης παραγράφου. Οι τοίχοι πλήρωσης υφίστανται στους παραπάνω ορόφους, δημιουργώντας έτσι ένα «σύνθετο» σύστημα, στο οποίο το

πλαίσιο από ΟΣ επικουρείται από πολύ δύσκαμπτους και ψαθυρούς τοίχους στους ανώτερους ορόφους και από τους «όλκιμους – πλάστιμους» χαλύβδινους συνδέσμους του κατώτερου ορόφου.

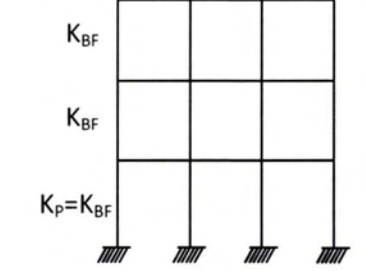
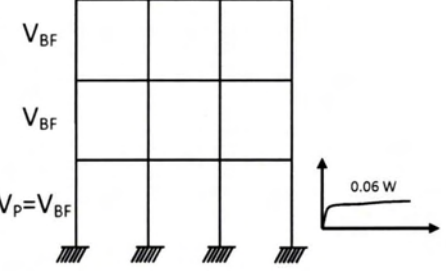
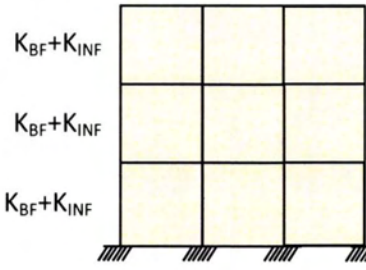
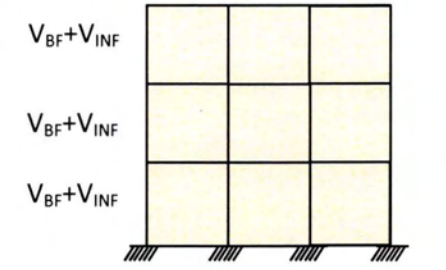
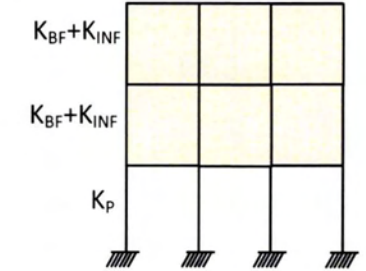
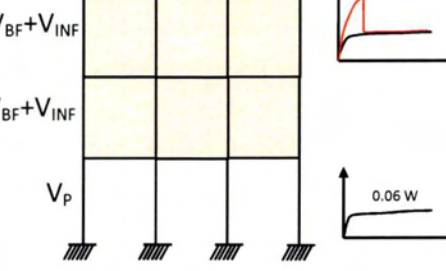
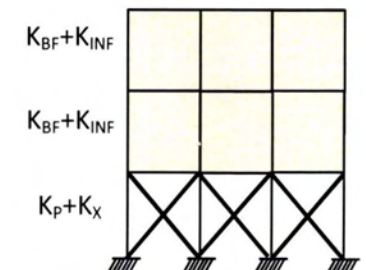
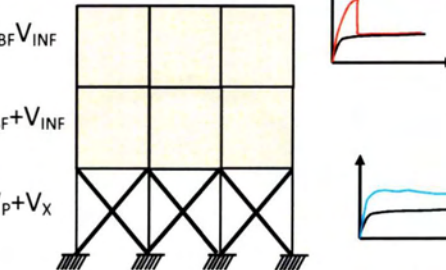
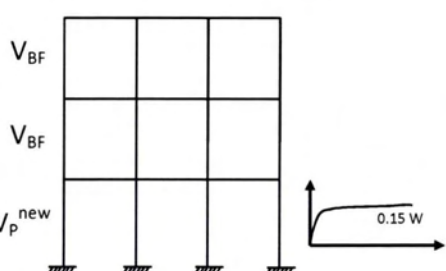
Η συνολική συμπεριφορά της κατασκευής, η κατανομή των πλαστικών αρθρώσεων καθώς και η γεωμετρία του ελαστοπλαστικού μηχανισμού αστοχίας, καθορίζονται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις σχέσεις δυσκαμψίας και αντοχής μεταξύ της πυλωτής και του αμέσως υπερκείμενου ορόφου του πλαισίου.

Σύνδεσμοι με μεγάλη δυσκαμψία και αντοχή σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιότητες των υπερκείμενων ορόφων αναμένεται να μεταφέρουν τις «απαιτήσεις» στους ορόφους αυτούς, εμπλέκοντας τους τοίχους αλλά και τα μέλη του πλαισίου στην ανελαστική απόκριση. Παρόλο που η δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στους στύλους της πυλωτής δεν αποφεύγεται, η αστοχία μεταφέρεται στις δοκούς και τους τοίχους των υπερκείμενων ορόφων. Έτσι, ***η ανακατανομή βαρέων βλαβών από τους κρίσιμους στύλους της πυλωτής στις δοκούς και τους τοίχους των ανωτέρω ορόφων (του ενισχυμένου πλαισίου) ΔΕΝ αποτελεί μη αποδεκτή στρατηγική μείωσης.***

Στον Πίνακα 2.4 περιέχονται οι διαφορετικοί τύποι πλαισίων καθώς και οι παράμετροι της αντοχής και της δυσκαμψίας τους για κάθε όροφο, ενώ στην συνέχεια περιγράφονται οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τις ιδιότητες των ορόφων για κάθε ένα θεωρούμενο πλαίσιο.



Πίνακας 2.4: Τύπος πλαισίου και παράμετροι ορόφων για δυσκαμψία και αντοχή

Τύπος Πλαισίου	ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ	ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΑΝΤΟΧΗΣ
<p>ΑΠΛΟ ΠΛΑΙΣΙΟ Μελέτη με παλαιό αντισεισμικό κανονισμό</p>		
<p>ΠΛΗΡΩΣ ΤΟΙΧΟΠΛΗΡΩΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ</p>		
<p>ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΕ ΠΥΛΩΤΗ</p>		
<p>ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ</p>		
<p>ΑΠΛΟ ΠΛΑΙΣΙΟ Μελέτη με ΙΣΧΥΟΝΤΑ αντισεισμικό κανονισμό</p>		

K_{BF}	:	Δυσκαμψία των ανώτερων ορόφων του απλού πλαισίου
K_P	:	Δυσκαμψία του ισογείου του απλού πλαισίου και του πλαισίου με πυλωτή ($K_P = K_{BF}$)
K_{IN}	:	Δυσκαμψία όλων των τοίχων σε έναν όροφο
K_X	:	Πλευρική δυσκαμψία όλων των Χ-συνδέσμων του ισογείου του ενισχυμένου πλαισίου
V_{BF}	:	Αντοχή των ανώτερων ορόφων του απλού πλαισίου
V_P	:	Αντοχή του ισογείου του απλού πλαισίου και του πλαισίου με πυλωτή ($V_P = V_{BF}$)
V_{IN}	:	Αντοχή όλων των τοίχων σε έναν όροφο
V_X	:	Πλευρική αντοχή όλων των Χ-συνδέσμων του ισογείου του ενισχυμένου πλαισίου

Οι ανωτέρω παράμετροι, με εξαίρεση των K_X και V_X , βαθμονομήθηκαν και υπολογίστηκαν μέσω αναλύσεων ανακυκλιζόμενης φόρτισης αυξανόμενου εύρους του απλού πλαισίου (K_{BF} και V_{BF}), του πλαισίου με πυλωτή (K_{IN} , V_{IN} και K_P , V_P) και του πλήρως τοιχοπληρωμένου πλαισίου (K_{IN} και V_{IN}).

Στην συνέχεια ακολουθεί ο υπολογισμός της πλευρικής δυσκαμψίας και αντοχής που απαιτείται να προσδώσουν οι σύνδεσμοι έτσι ώστε να απαλειφθούν οι σοβαρές κατακόρυφες ανωμαλίες-ασυνέχειες των πλαισίων με πυλωτή.

Καθόσον ο σκοπός της μελέτης ήταν η «αφαίρεση της σεισμικής τρωτότητας» με τοποθέτηση Χ-συνδέσμων στα φατνώματα της πυλωτής, είναι λογικό να μεταχειριστεί κανείς το πλήρως τοιχοπληρωμένο πλαίσιο ως σημείο αναφοράς/βάση. Υποθέτοντας και την πυλωτή τοιχοπληρωμένη, η πλευρική αντοχή και η δυσκαμψία των τοίχων αυτών μπορεί να υπολογιστεί κάνοντας χρήση της αξονικής αντοχής και της δυσκαμψίας των διαγώνιων στοιχείων (που προσομοιάζουν τις τοιχοπληρώσεις) με βάση τις εξισώσεις:

$$V_{INF} = \cos \theta \cdot (0.5 f_m) \cdot \sum_i^{nb} w_{si} \cdot t_i \quad K_{INF} = \cos^2 \theta \cdot E_m \cdot \sum_i^{nb} w_{si} \cdot t_i \quad (2.1)$$

όπου, nb είναι ο αριθμός των ανοιγμάτων σε έναν όροφο, f_m είναι η πρισματική αντοχή της τοιχοποιίας σε MPa, E_m είναι το μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας σε MPa ($E_m \sim 500 f_m$), w_{si} είναι το ενεργό πλάτος του διαγώνιου στοιχείου που προσομοιάζει την τοιχοποιία, t_i είναι το πάχος της τοιχοποιίας και θ είναι η γωνία του διαγώνιου στοιχείου ως προς την οριζόντια. Η σταθερά 0.5 που πολλαπλασιάζει την πρισματική αντοχή τίθεται για να ληφθεί υπόψη ότι η τοιχοποιία ρηγματώνεται και χάνει αντοχή για πολύ μικρές παραμορφώσεις, οπότε η τιμή $0.5 f_m$ είναι μια εκτίμηση της ενεργού ή αξιόπιστης αντοχής της τοιχοποιίας στον υπολογισμό της πλευρικής αντοχής μιας τοιχοπλήρωσης.

Συνεπώς, οι ποσότητες V_{IN} και K_{IN} θα είναι το έλλειμμα σε πλευρική αντοχή και δυσκαμψία του απλού πλαισίου σε σχέση με το πλήρως τοιχοπληρωμένο. Ορίζοντας το λόγο μεταξύ της αντοχής της πυλωτής και του αμέσως υπερκείμενου ορόφου (με την υπόθεση ότι όλοι οι παραπάνω όροφοι έχουν τις ίδιες με αυτό ιδιότητες) ως β και τον αντίστοιχο λόγο δυσκαμψιών ως α μπορούμε να γράψουμε:

$$\alpha = \frac{(K_A + K_P)_{1st/piloti}}{(K_{BF} + K_{INF})_{2nd}} \quad \beta = \frac{(V_A + V_P)_{1st/piloti}}{(V_{BF} + V_{INF})_{2nd}} \quad (2.2)$$

όπου K_A και V_A είναι το έλλειμμα σε δυσκαμψία και αντοχή του πλαισίου με πυλωτή, όπως ορίστηκε προηγούμενα. Αυτές οι τιμές θα αντικατασταθούν με K_X και V_X στην περίπτωση του ενισχυμένου πλαισίου. Τιμές των α και β ίσες με τη μονάδα καταδεικνύουν ομοιόμορφη κατανομή δυσκαμψίας και αντοχής μεταξύ των δύο πρώτων ορόφων δηλαδή ισογείου και 1^{ου} ορόφου για τα δεδομένα της Ελλάδας. Το κάτω φράγμα των α και β υπολογίζονται από τις εξισώσεις (2.2) για K_A και V_A ίσα με το μηδέν. Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων που υπεισέρχονται στις παραπάνω εξισώσεις μπορούν να ευρεθούν αριθμητικά (όπως στην παρούσα μελέτη) ή με απ' ευθείας υπολογισμούς, αν οι εξισώσεις αυτές χρησιμοποιηθούν κατά το σχεδιασμό. Θεωρώντας ότι τα K_A και V_A πρόκειται να υπολογιστούν μετά τον καθορισμό των α και β , οι εξισώσεις λαμβάνουν την μορφή:

$$K_A = \alpha(K_{BF} + K_{INF})_{2nd} - (K_P)_{1st/piloti}$$
$$V_A = \beta(V_{BF} + V_{INF})_{2nd} - (V_P)_{1st/piloti} \quad (2.3)$$

2.8 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ

Οι παραμετρικές αναλύσεις επικεντρώθηκαν σε δύο τυπικές κατασκευές από Ο/Σ με τρία ανοίγματα σε κάτοψη, μια τριώροφη και μια πενταόροφη, που είχαν μελετηθεί με βάση τον εν ισχύ Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό πριν το 1985. Ο ξυλότυπος και οι λεπτομέρειες οπλισμού στύλων ενός τυπικού ορόφου απεικονίζεται στο Σχήμα 2.10.

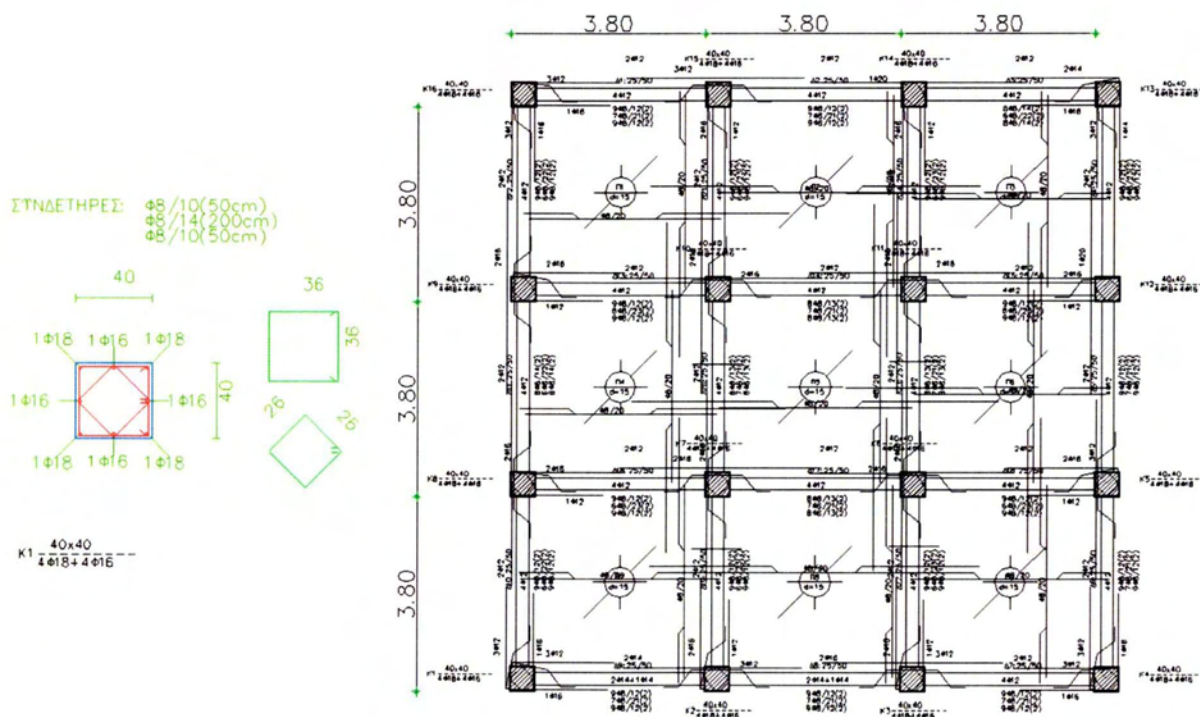
Σε ότι αφορά το κτίριο των τριών ορόφων, έλαβε χώρα χρήση και λεπτομερής προσομοίωση ενός δισδιάστατου πλαισίου από τον φέροντα οργανισμό του κτιρίου αυτού, στο λογισμικό RUAUMOKO. Οι σχετικές παράμετροι περιέχονται στους Πίνακες 2.5 και 2.6. Οι τιμές του τελευταίου για τις δυσκαμψίες και τις αντοχές υπολογίστηκαν αριθμητικά ως ανωτέρω.

Πίνακας 2.5: Τιμές των α και β της παραμετρικής μελέτης (3όροφος)

α	β
1.0	0.9
1.2	1.0
1.5	1.2
2.0	1.5
3.0	2.0
-	3.0

Πίνακας 2.6: Τιμές των παραμέτρων δυσκαμψίας και αντοχής της παραμετρικής μελέτης (τριώροφο)

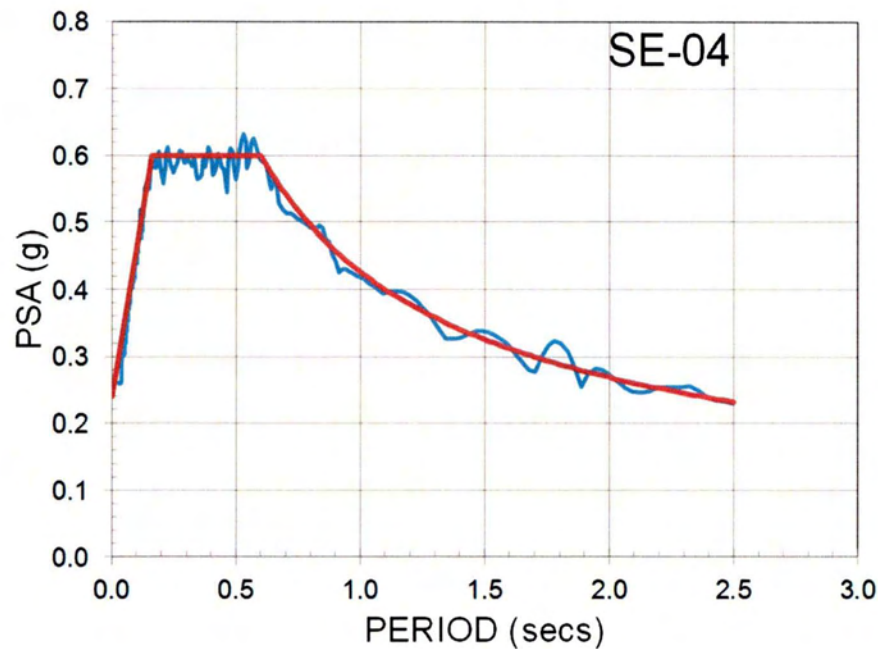
Παράμετρος	Τιμή
$(K_P = K_{BF})_{1st / piloti}$	66700 kN/m
$(K_{BF} + K_{IN})_{2nd}$	96000 kN/m
$V_P = V_{BF}$	210 kN
$(V_{BF} + V_{IN})_{2nd}$	240 kN



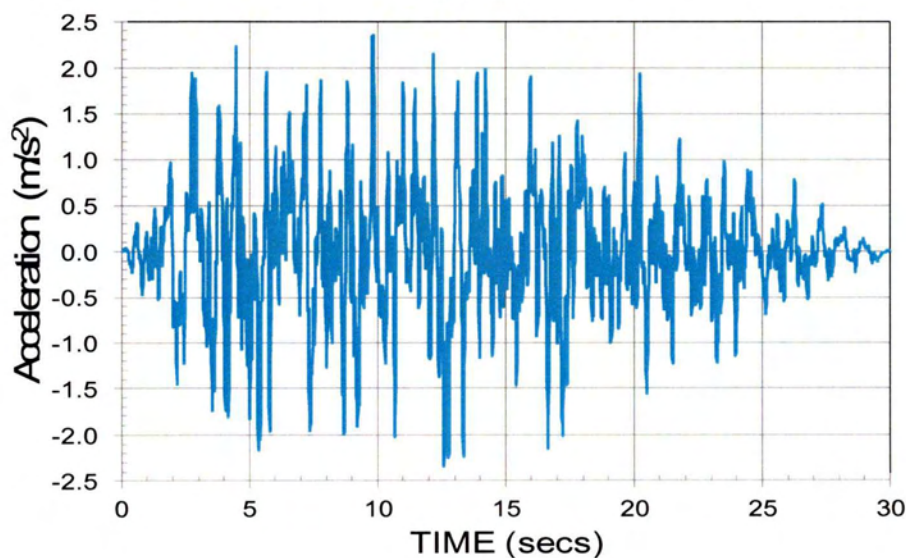
Σχήμα 2.10: Ξυλότυπος και λεπτομέρειες οπλισμού στύλων του τυπικού ορόφου

2.9 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ

Στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε ένας σημαντικός αριθμός σεισμικών διεγέρσεων, συμβατών με ένα συγκεκριμένο στοχευμένο φάσμα. Τελικά, το φάσμα σχεδιασμού που επιλέχτηκε αντιστοιχεί – σύμφωνα με τον ΕΑΚ – σε τύπο εδάφους Β και σεισμική ζώνη ΙΙ, τούτο δε απεικονίζεται στο Σχήμα 2.11. Κάνοντας χρήση του φάσματος αυτού, παράχθηκαν τεχνητά πέντε χρονοϊστορίες επιτάχυνσης μέσω του λογισμικού SIMQKE, *Gasparini και Vammarcke (1976)*. Μια από αυτές (η υπ' αριθμ. SE-04) παρατίθεται στο Σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.11: Φάσμα επιταχύνσεων για τύπο εδάφους Β και ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας ΙΙ κατά ΕΑΚ 2000



Σχήμα 2.12: Χρονοϊστορία επιταχύνσεων συμβατή με το φάσμα του Σχήματος 2.11 (SE-04)

2.10 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

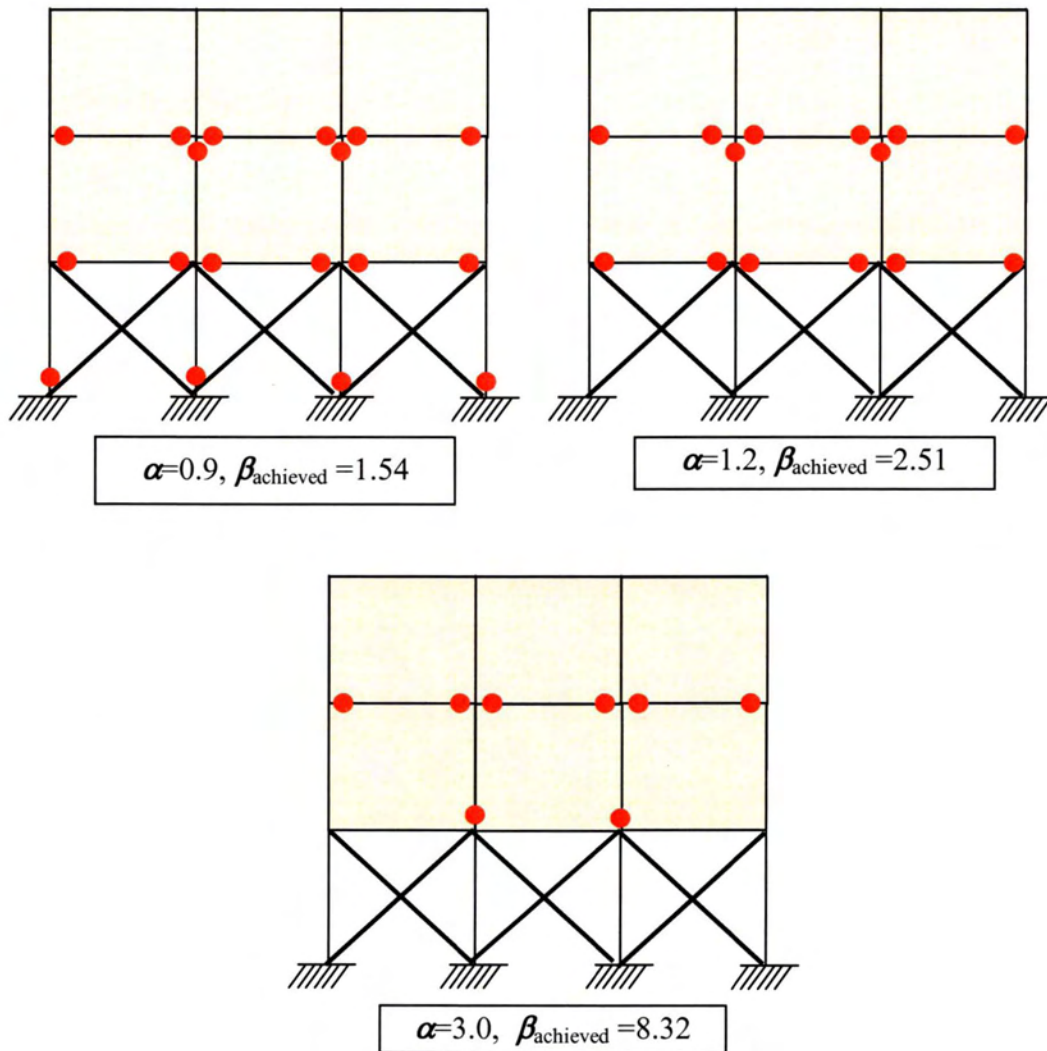
Παράτιθενται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων για το **τριώροφο πλαίσιο**. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας τις τιμές των παραμέτρων, που περιέχονται στους Πίνακες 2.5 και 2.6, ολοκληρώθηκαν δύο σύνολα παραμετρικών αναλύσεων. Το πρώτο εξ αυτών αφορούσε την παραμετρική έρευνα της δυσκαμψίας των Χ-συνδέσμων στο πλαίσιο με πλωτή, ενώ το δεύτερο την παραμετρική έρευνα της αντοχής των Χ-συνδέσμων. Για τις τιμές των α και β των Πινάκων 2.5 και 2.6 υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές των τιμών που επιτεύχθηκαν β_{achieved} και α_{achieved} για να εξασφαλιστεί ότι αυτές δεν βρίσκονται εκτός των ορίων των παραμέτρων αυτών, έτσι ώστε οι Χ-σύνδεσμοι που προκύπτουν να είναι πραγματοποιήσιμοι. Ο Πίνακας 2.7 απεικονίζει τις τιμές της δυσκαμψίας και της αντοχής των Χ-συνδέσμων που εφαρμόστηκαν στην πλωτή, για διάφορες τιμές των α και β .

Πίνακας 2.7: Τιμές δυσκαμψίας και αντοχής των Χ-συνδέσμων που χρησιμοποιήθηκαν στις παραμετρικές αναλύσεις του τριώροφου πλαισίου

β	V_x (kN)	K_x (kN/m)	α_{achieved}	N_y (kN)	α	K_x (kN/m)	V_x (kN)	β_{achieved}	N_y (kN)
1.0	30	3,714	0.73	12.7	0.9	19,700	159	1.54	67.6
1.2	78	9,657	0.80	33.1	1.0	29,300	236	1.86	100.5
1.5	150	18,572	0.89	63.7	1.2	48,500	391	2.51	166.3
2.0	270	33,430	1.04	114.7	1.5	77,300	624	3.48	265.1
3.0	510	63,146	1.35	216.6	2.0	125,300	1,011	5.09	429.7

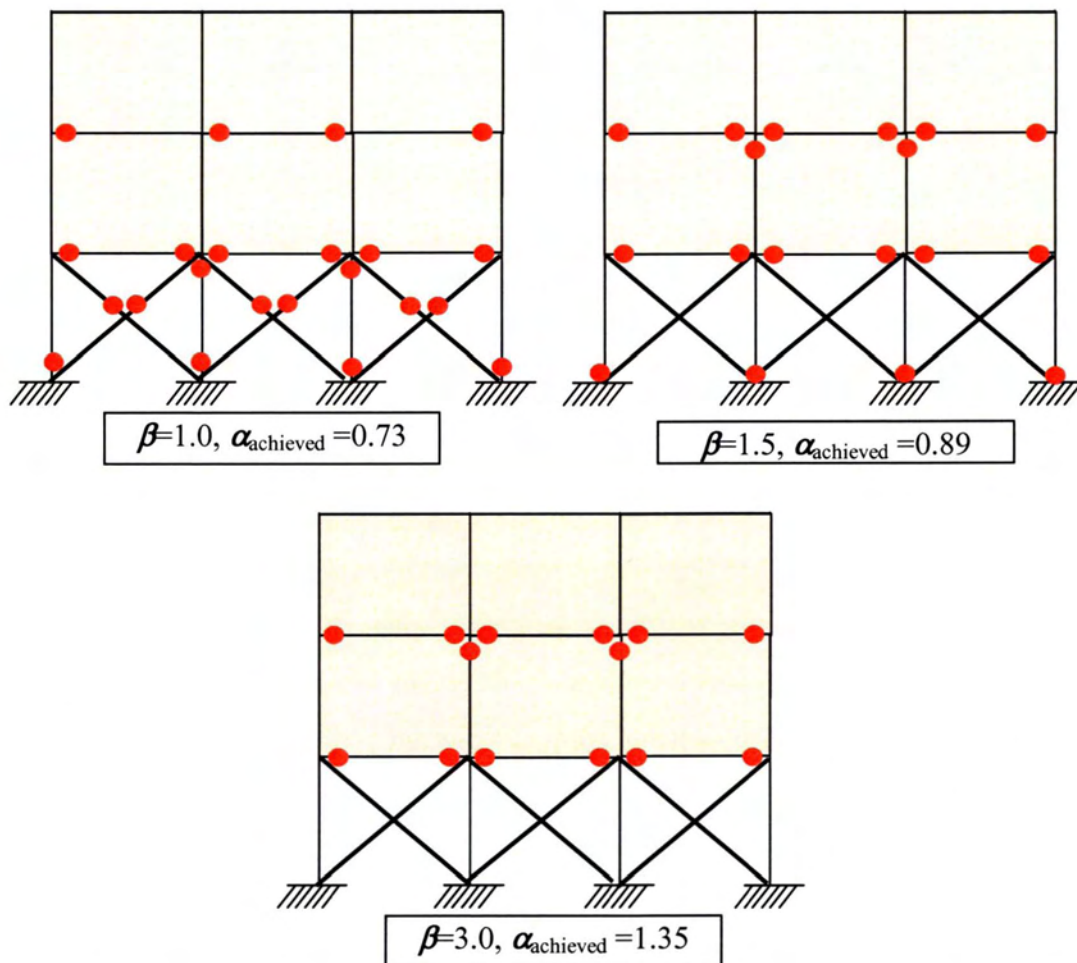
Τα περιεχόμενα του Σχήματος 2.13 συνοψίζουν σε γραφική μορφή την κατάσταση των δομικών μελών (εξαιρουμένων των τοιχοποιιών) για το ενισχυμένο πλαίσιο και για τρεις τιμές του α (0.9, 1.2 και 3). Η περίπτωση $\alpha = 1$ είναι αυτή για την οποία οι Χ-σύνδεσμοι έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να διαθέτουν την ίδια δυσκαμψία με τις τοιχοπληρώσεις του υπερκείμενου ορόφου, ενώ η περίπτωση $\alpha = 3$ σχετίζεται με τριπλάσια σχετική δυσκαμψία των Χ-συνδέσμων.

Πρέπει να τονιστεί ότι καθώς το α αυξάνεται από την τιμή 1 στην τιμή 3, οι αντίστοιχες τιμές για την αντοχή β_{achieved} αυξάνονται από 1.54 σε 8.32. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι καθώς η δυσκαμψία της πλωτής αυξάνεται, η δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων μετατοπίζεται στους υπερκείμενους ορόφους. Πέραν τούτων, το γεγονός μείωσης του αριθμού των πλαστικών αρθρώσεων προέρχεται από την αύξηση της αντοχής, $\beta_{\text{achieved}}=8.32$ για $\alpha=3.0$.



Σχήμα 2.13: Δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα γραμμικά δομικά μέλη στο τέλος της σεισμικής διέγερσης για τρεις τιμές της παραμέτρου α για το τριώροφο πλαίσιο

Το Σχήμα 2.14 παρουσιάζει την κατανομή των πλαστικών αρθρώσεων στο πλαίσιο για τρεις τιμές του β (1, 1.5 και 3). Η περίπτωση $\beta=1$ είναι αυτή που οι Χ-σύνδεσμοι έχουν σχεδιαστεί ώστε να έχουν την ίδια αντοχή με αυτή των τοιχοποιιών του ισογείου (1^{ου} κατ' ουσία) ορόφου, ενώ η περίπτωση $\beta=3$ αντιστοιχεί σε τριπλάσια αντοχή των Χ-συνδέσμων από αυτή των σχετικών τοίχων πλήρωσης. Παρατηρείται ότι όταν ο λόγος αντοχής β αυξάνεται από 1 σε 3 υφίσταται μια καθαρή μετακίνηση των πλαστικών αρθρώσεων από το επίπεδο της πυλωτής προς τους ανώτερους ορόφους, με ταυτόχρονη μείωση στο συνολικό αριθμό των πλαστικών αρθρώσεων. Φαίνεται επίσης ότι η αύξηση της δυσκαμψίας, που καταδεικνύεται από τις τιμές του α_{achieved} (που αυξάνεται από 0.53 σε 1.73), δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα, καθόσον μπορεί να θεωρηθεί ότι παραμένει σταθερή.



Σχήμα 2.14: Δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα γραμμικά δομικά μέλη στο τέλος της σεισμικής δόγερσης για τρεις τιμές της παραμέτρου β για το τριώροφο πλαίσιο

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, σε όλες τις παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα RUAUMOKO, όταν η τοιχοποιία αστοχεί τα σχετικά στοιχεία αφαιρούνται από τα επόμενα βήματα. Καθόσον οι τοιχοποιίες δεν αποτελούν στοιχεία που αναλαμβάνουν κατακόρυφα φορτία, η κατάσταση τους (άθικτα, έχοντας υποστεί διαρροή, έχοντας υποστεί αστοχία) στο τέλος των αναλύσεων δεν φαίνεται στα Σχήματα 2.13 και 2.14.

Με βάση τις ανωτέρω παραμετρικές αναλύσεις και τα σχετικά ευρήματα, προέκυψε καθαρά ότι για να επιτευχθεί ο θετικός στόχος *αφαίρεσης της σεισμικής τρωτότητας της πλωτής*, θα πρέπει η *δυσκαμψία* και η *αντοχή των Χ-συνδέσμων* να υπολογίζονται με βάση τις σχέσεις

$$1.5 < \beta < 2.5 \quad \text{ενώ} \quad \alpha \approx 1.0$$

3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ - ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ

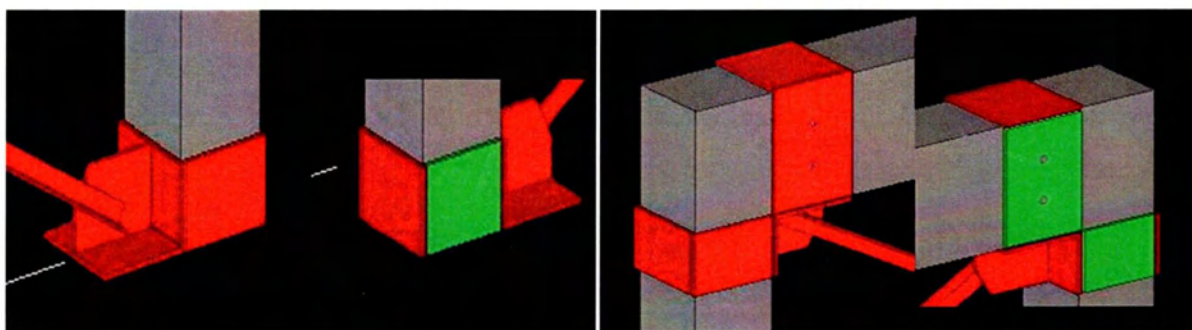
Οι ακόλουθες γενικές αρχές σχεδιασμού ακολουθήθηκαν στην παρούσα φάση για να πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των Χ-συνδέσμων στις πειραματικές διατάξεις:

- Η αντοχή του συστήματος των Χ-συνδέσμων να μην υπερβαίνει το πενταπλάσιο της καμπτικής αντοχής του απλού (γυμνού) πλαισίου από οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Η δυσκαμψία του συστήματος των Χ-συνδέσμων να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτή της τοιχοπλήρωσης, αν αυτή υπήρχε στο φάτνωμα του πλαισίου.
- Οι συνδέσεις των Χ-συνδέσμων μέσω κομβοελασμάτων τόσο στους κόμβους δοκών – στύλων του πλαισίου όσο και στις βάσεις των στύλων του να είναι εύκολα εφαρμόσιμες σε υφιστάμενα πλαίσια με πυλωτή.

Ιδιάζουσα σημασία για το σχεδιασμό είχε ο τρόπος υλοποίησης των συνδέσεων των Χ-συνδέσμων στις τέσσερις γωνίες του απλού πλαισίου μέσω κομβοελασμάτων. Στο πρώτο δοκίμιο (Χ-1) αποφασίστηκε τα κομβοελάσματα στις βάσεις των στύλων να μην συνδεθούν με την θεμελίωση κατά την οριζόντια διεύθυνση. Αυτό έγινε διότι σε υφιστάμενες κατασκευές κάτι τέτοιο μπορεί να είναι πολύ δύσκολο έως και ανέφικτο λόγω των δυσκολιών σύνδεσης των κομβοελασμάτων με τη θεμελίωση (μεμονωμένα πέδιλα, πεδιλοδοκοί ή κοιτόστρωση).

Πιο συγκεκριμένα, η σύνδεση με τη βάση του στύλου υλοποιήθηκε μέσω μεταλλικού κολάρου από συγκολλημένα γύρω-γύρω μεταλλικά ελάσματα. Το κολάρο αυτό δεν αγκυρώθηκε στο στύλο αλλά αφέθηκε ελεύθερη η προς τα πάνω ολίσθηση του κατά μήκος του στύλου. Αντίθετα η ολίσθηση του προς τα κάτω απεφεύχθη μέσω ενός ελάσματος βάσης συγκολλημένου στο κομβοέλασμα, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με το οριζόντιο επίπεδο στη βάση του στύλου (επιφάνεια έδρασης) όπως φαίνεται στις δύο τρισδιάστατες όψεις του Σχήματος 3.1.

Η σύνδεση των κομβοελασμάτων των Χ-συνδέσμων με τον κόμβο δοκού – στύλου υλοποιήθηκε μέσω ενός μεταλλικού κολάρου περί τον στύλο το οποίο, όμοια με αυτό στη βάση του στύλου, δεν αγκυρώνεται στη δοκό, και μέσω ενός άλλου κολάρου αγκυρωμένου αυτήν την φορά με τη δοκό, όπως φαίνεται στις δύο τρισδιάστατες όψεις του Σχήματος 3.1.



Σχήμα 3.1: Τρισδιάστατη απεικόνιση σύνδεσης Χ-συνδέσμων με την βάση των στύλων (αριστερά) και με τον κόμβο δοκού-στύλου του πλαισίου (δεξιά).

Είναι εμφανής η παρουσία στη σύνδεση αυτή τόσο ελάσματος στην άνω παρειά της δοκού όσο και δύο κοχλιών που διαπερνούν τη δοκό και συνδέουν τα δύο οριζόντια μεταλλικά ελάσματα του κολάρου με αυτήν. Το έλασμα αυτό χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα μόνο για λόγους κατασκευαστικής ευκολίας. Σε πραγματικές κατασκευές με piloti η παρουσία του είναι ανέφικτη λόγω παρουσίας πλάκας δαπέδου, οπότε η σύνδεση μπορεί να υλοποιηθεί μόνο μέσω των κοχλιών, και για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη. Η όλη σύνδεση σχεδιάστηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εμποδίζεται η ολίσθηση τόσο κατακόρυφα (για το κολάρο του στύλου) όσο και οριζόντια (για το κολάρο της δοκού) και συνεπώς το κομβοέλασμα σύνδεσης να μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά αμετάθετο.

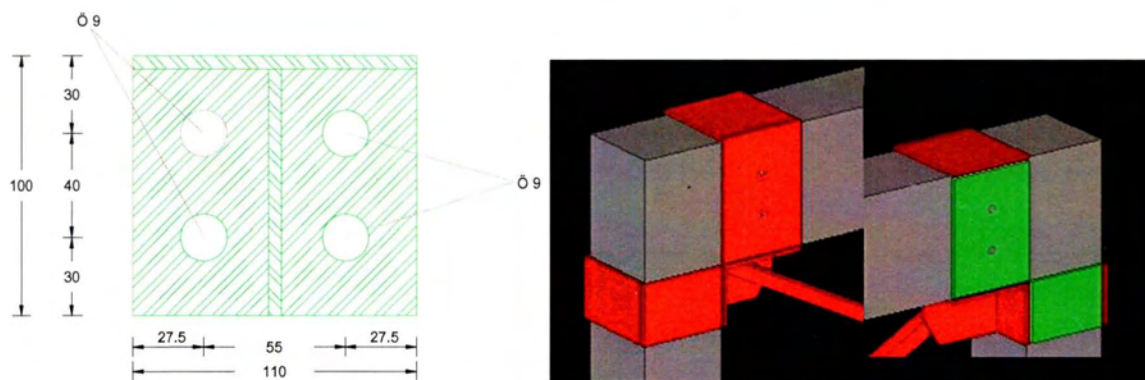
Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των συγκεκριμένων συνδέσεων των Χ-συνδέσμων με το πλαίσιο από Ο/Σ είναι το ότι σε πραγματικές υφιστάμενες κατασκευές τα κόλλαρα στη βάση και την κορυφή των στύλων μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν, αλλά και να αντικατασταθούν, καθόσον οι στύλοι στο επίπεδο της pilotis είναι περιμετρικά ελεύθεροι. Η όλη διάταξη συνδέσεων επιτρέπει περιορισμένη στροφή και άνω/κάτω κίνηση των κολάρων στις βάσεις των στύλων μόνο όταν οι διαγώνιοι σύνδεσμοι, που συνδέονται με τα κολάρα αυτά, εφελκύνονται. Αυτή λοιπόν η περιορισμένη ευκαμψία εκτιμάται ότι θα προσδώσει στο σύστημα επιπρόσθετη πλαστιμότητα.

Με βάση αυτές τις γενικές απαιτήσεις που περιγράφηκαν παραπάνω έγινε ο σχεδιασμός 2 συστημάτων Χ-συνδέσμων. Το πρώτο σύστημα (Χ-1) διέθετε διαγώνια μέλη διατομής απλού ισοσκελούς γωνιακού $L20 \times 3$, συγκολλητά με τέσσερα κομβοέλασματα στις γωνίες και με ένα κεντρικό κομβοέλασμα στο μέσο. Οι ραφές σχεδιάστηκαν με αντοχή μεγαλύτερη της εφελκυστικής αντοχής του κάθε διαγώνιου μέλους. Τα δε κομβοέλασματα πέρα από την παραπάνω απαίτηση σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τη γεωμετρία που υποδείχθηκε στις προαναφερθείσες εργασία των *Yoo et al.* Το σύστημα τελικά διέθετε 2.6 φορές μεγαλύτερη αντοχή και 3.6 φορές μεγαλύτερη δυσκαμψία από τις αντίστοιχες τιμές του απλού (γυμνού) πλαισίου, όπως αυτές μετρήθηκαν από τα πειραματικά αποτελέσματα.

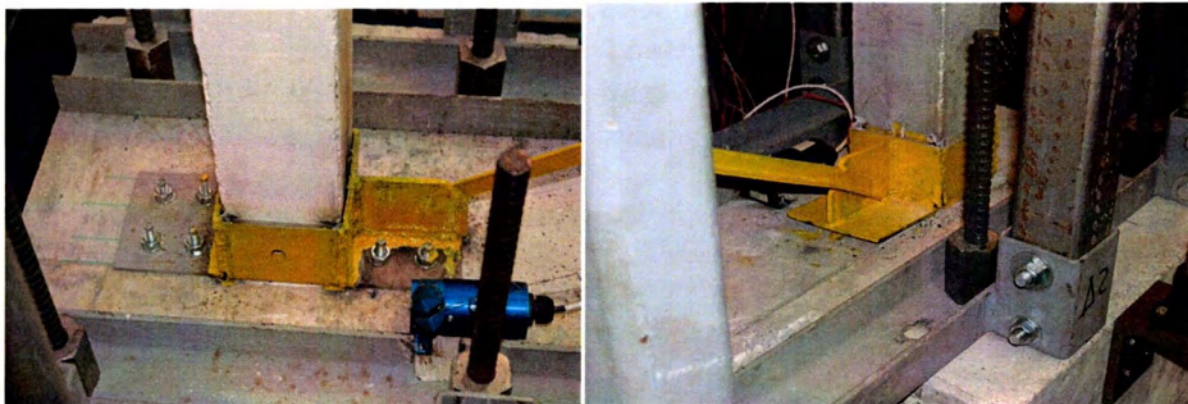
Στο δεύτερο σύστημα (Χ-4) κρίθηκε σκόπιμο, για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων να σχεδιαστεί ένα διαφορετικό δοκίμιο. Έτσι λοιπόν κατασκευάστηκε ένα σύστημα Χ-συνδέσμων ακριβώς ίδιο με το σύστημα που επιλέχθηκε για το δοκίμιο Χ-1, όσον αφορά τις

διαστάσεις και την διατομή των διαγωνίων συνδέσμων ($L20 \times 3$). Η σύνδεση, με τις βάσεις των στύλων και με τους κόμβους δοκών-στύλων, των συνδέσμων αυτών έγινε και πάλι μέσω μεταλλικών κολάρων και συγκολλημένου κομβοελάσματος, τα οποία είχαν την ίδια γεωμετρία με αυτά του συστήματος X-1, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.

Σε αντίθεση όμως με το πρώτο σύστημα αυτή την φορά τα μεταλλικά κολάρα στην βάση των στύλων είναι αγκυρωμένα κατά το οριζόντιο επίπεδο με την επιφάνεια έδρασης (θεμέλιο). Για να επιτευχθεί αυτό, στην βάση κάθε στύλου τοποθετήθηκαν δύο οριζόντια μεταλλικά ελάσματα τα οποία κατασκευάστηκαν με τέσσερις οπές το καθένα, και στην συνέχεια αγκυρώθηκαν στην επιφάνεια έδρασης μέσω μηχανικών αγκυρίων όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 και στις Εικόνες 3.1.(αγκυρωμένο) και 3.2 (ελεύθερο).



Σχήμα 3.2: Λεπτομέρεια ελάσματος βάσης (αριστερά), τρισδιάστατη όψη σύνδεσης κόμβου (δεξιά)



Εικόνα 3.1: Λεπτομέρεια σύνδεσης στην βάση του στύλου (αγκυρωμένο).

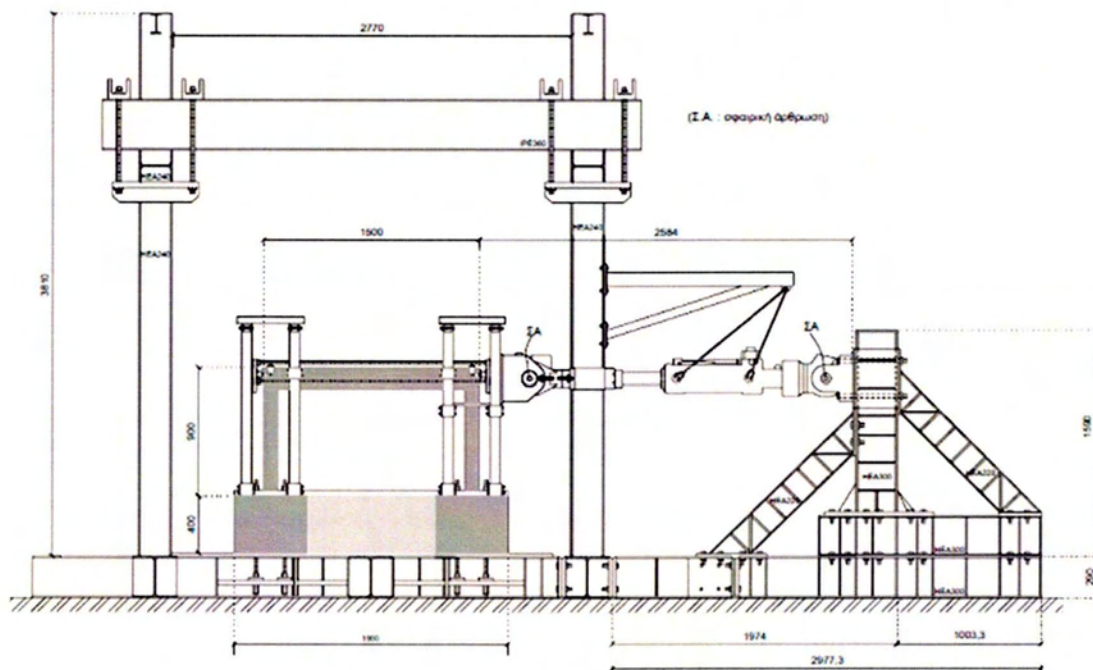
Εικόνα 3.2: Λεπτομέρεια σύνδεσης στην βάση του στύλου (ελεύθερο).

Η όλη σχεδίαση του συστήματος έγινε έτσι ώστε να περιορίζεται η πάνω/κάτω ολίσθηση των κολάρων στις βάσεις των στύλων, καθώς και η ούτως ή άλλως περιορισμένη δυνατότητα στροφών, όταν τα αντίστοιχα διαγώνια μέλη εφελκύνονται με αποτέλεσμα να μπορεί να θεωρηθεί αμετάθετο, σε αντίθεση με το πρώτο σύστημα (X-1) στο οποίο αυτές οι μετακινήσεις μπορούσαν να αναπτυχθούν. Με βάση λοιπόν αυτές τις αρχές σχεδιασμού το

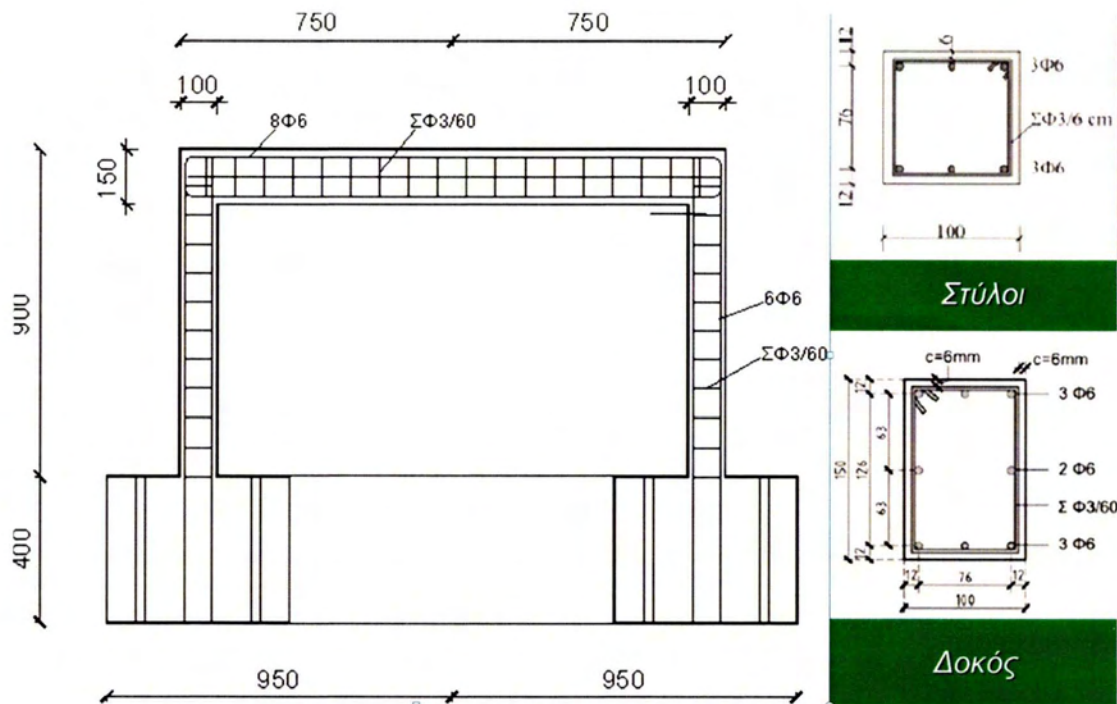
σύστημα X-4 αναμένεται να έχει αυξημένη δυσκαμψία σε σχέση με το σύστημα X-1. Από άποψη αντοχής εκτιμάται ότι θα έχουν την ίδια, με την διαφορά όμως ότι αυτή θα αναπτυχθεί σε μικρότερες μετακινήσεις του πλαισίου, καθώς πλέον τα διαγώνια στοιχεία που βρίσκονται σε εφελκυσμό, και είναι αυτά που έχουν την μεγαλύτερη συμβολή στην αντοχή, θα αναπτύξουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις (λόγω του περιορισμού των μετακινήσεων στην διαγώνιο). Επιπλέον αναμένεται ότι φαινόμενα λυγισμού στην θλιβόμενη διαγώνιο (εκτός η/και εντός επίπεδου) θα εκδηλωθούν στο X-4 για μικρότερες μετακινήσεις πλαισίου σε σχέση με το πλαίσιο X-1.

3.2 ΠΛΑΙΣΙΟ ΟΠΚΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

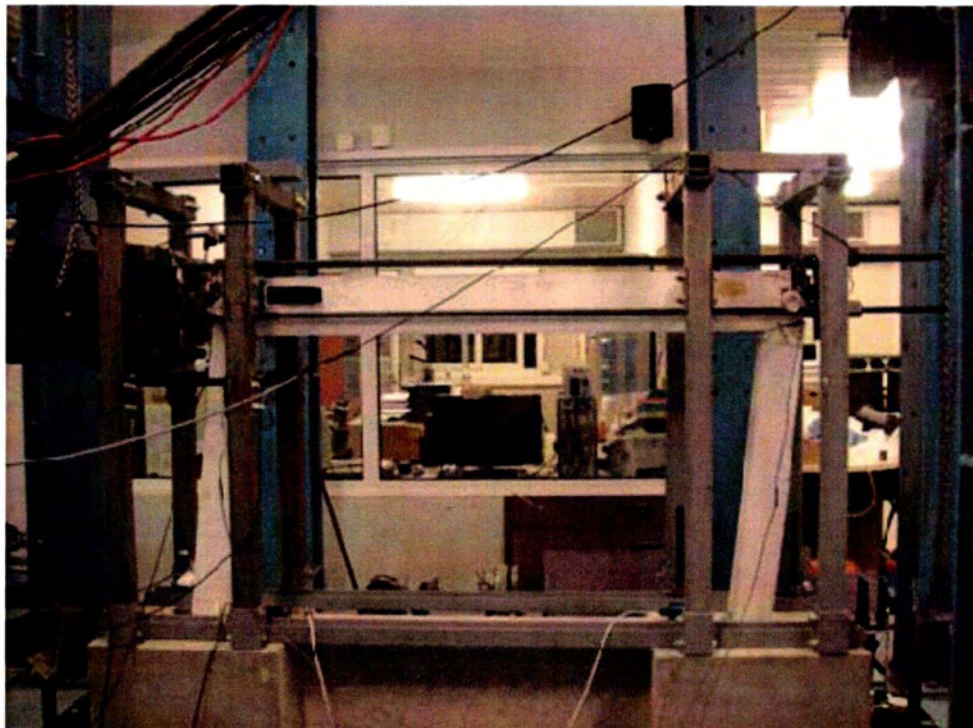
Ο λεπτομερής σχεδιασμός του απλού πλαισίου καθώς και η διαμόρφωση της σχετικής πειραματικής διάταξης μπορεί να βρεθεί στην έκθεση των *Περδικάρη κ.α. (2011)*, αλλά παρατίθεται και εδώ για λόγους εποπτείας, στα Σχήματα 3.3 και 3.4. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η καμπτική αστοχία των στύλων εμφανίστηκε σύμφωνα με την Εικόνα 3.3. Οι πρώτες ρηγματώσεις έλαβαν χώρα για πλευρικό φορτίο περίπου ίσο με 6 kN, ενώ το πλαίσιο εξάντλησε τη μέγιστη αντοχή του στα 14 kN, που εμφανίστηκε για μετατόπιση 24 mm κατά τον 1^ο κύκλο φόρτισης, όπως απεικονίζεται στην κόκκινη καμπύλη του Σχήματος 3.5.



Σχήμα 3.3: Γραφική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης



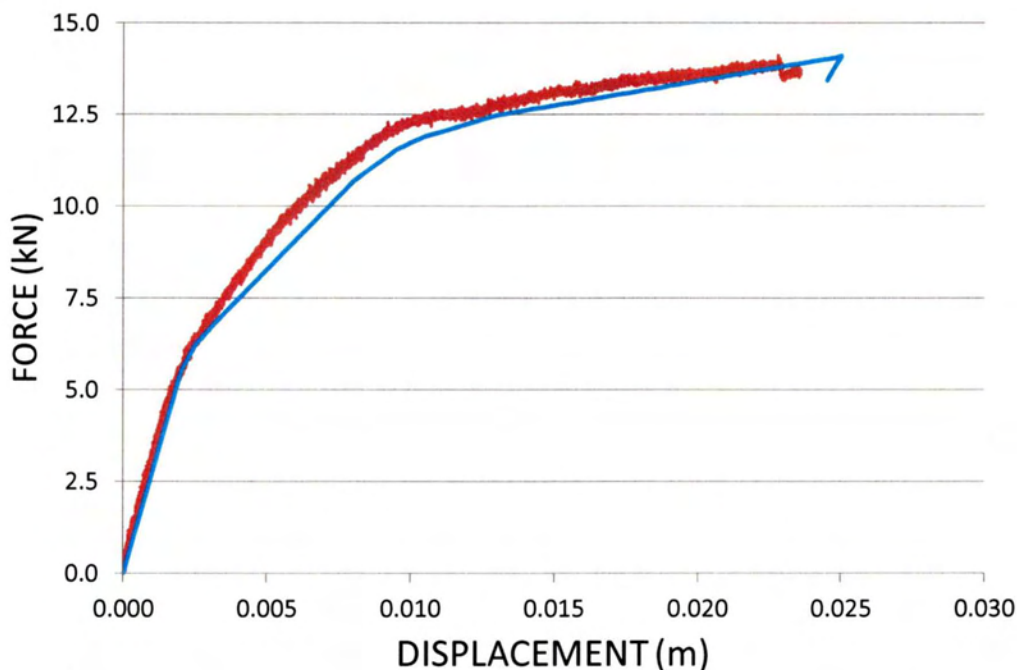
Σχήμα 3.4: Δοκίμιο απλού πλαισίου



Εικόνα 3.3: Τελική κατάσταση του δοκιμίου απλού πλαισίου υπό στατική μονοτονική πλευρική φόρτιση
Για την αναλυτική πρόβλεψη της καταγεγραμμένης πειραματικής απόκρισης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RUAUMOKO. Πιο συγκεκριμένα, υιοθετήθηκε ένα ιδιαίτερο στοιχείο δοκού-στύλου από Ο/Σ, το οποίο λαμβάνει υπόψη τη μη γραμμική συμπεριφορά υλικού στη προσομοίωση των μελών (δοκών και στύλων) του πλαισίου. Τα διαγράμματα

ροπών – καμπυλοτήτων και αλληλεπίδρασης αξονικού φορτίο – ροπής αποκτήθηκαν από το λογισμικό MyBiAxial *Charalampakis και Koumousis (2008)*. Το πρόγραμμα αυτό, μέσω μοντέλου ινών και καμπυλόγραμμων πολυγώνων, μπορεί να αναλύσει τυχαίας γεωμετρίας διατομές υπό συνδυασμένη δράση διαξονικής ροπής και αξονικής δύναμης. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν οι ιδιότητες των υλικών, οι οποίες αποκτήθηκαν πειραματικά από δοκιμές σύμφωνα με την έκθεση των Περδικάρη κ.α. τόσο για το σκυρόδεμα όσο και για τον οπλισμό του.

Στο Σχήμα 3.5 διακρίνεται η πλευρική αντοχή (τέμνουσα βάση) του πλαισίου ως συνάρτηση της πλευρικής μετατόπισης του πλαισίου τόσο για τα πειράματα όσο και για την ανάλυση μέσω του RUAUMOKO. Η αναλυτική λύση ακολουθεί την αντίστοιχη πειραματική, με μικρές αποκλίσεις στην ρηγματωθείσα περιοχή.



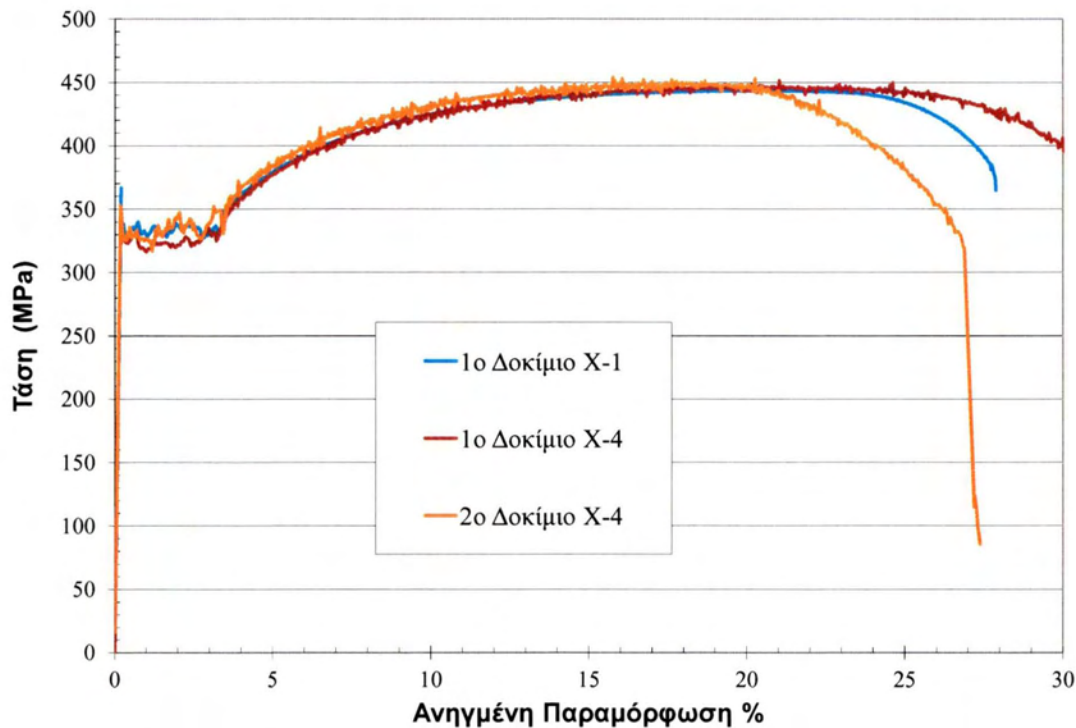
Σχήμα 3.5: Σύγκριση μεταξύ πειραματικής απόκρισης μοντέλου υπό κλίμακα για απλό πλαίσιο Ο/Σ και αναλυτικής πρόβλεψης για πλευρική μονοτονική φόρτιση

3.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΟΥ

Επίπεδα δοκίμια ορθογωνικής διατομής από όλα τα συστήματα Χ-συνδέσμων, ονομαστικής ποιότητας χάλυβα S235 κόπηκαν και διαμορφώθηκαν σε μηχανουργείο στη γεωμετρία που προβλέπεται από τον κανονισμό δοκιμής σε μονοαξονικό εφελκυσμό E 8M-01 ASTM. Οι σχετικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε μια ηλεκτρο-υδραυλική συσκευή INSTRON εφοδιασμένη με υδραυλικές αρπάγες. Το μήκος μέτρησης (gauge length) των μηχανικών μηκυνσιομέτρων ήταν 50mm και οι δοκιμές έλαβαν χώρα με ρυθμό φόρτισης 0.5mm / min .

Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η σχέση τάσης – τροπής (ανηγμένης παραμόρφωσης) του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δύο συστημάτων. Για το σύστημα X-1

βρέθηκε τάση διαρροής του χάλυβα $f_y = 325MPa$, παραμόρφωση διαρροής $\varepsilon_y = 0.178\%$ και τάση θραύσης $f_u = 437MPa$. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ευρεθείσα τάση διαρροής ήταν κατά 38% υψηλότερη της αντίστοιχης ονομαστικής ($235MPa$), που χρησιμοποιήθηκε στους προκαταρκτικούς υπολογισμούς σχεδιασμού. Τέλος για το σύστημα X-4 βρέθηκε τάση διαρροής $f_y = 322MPa$, $\varepsilon_y = 0.16\%$ και τάση θραύσης $f_u = 453MPa$. Και πάλι η πραγματική τάση διαρροής είναι κατά 37% μεγαλύτερη από την ονομαστική.



Σχήμα 3.6: Πειραματικές καμπύλες τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης για το χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε στα δύο συστήματα Χ-συνδέσμων

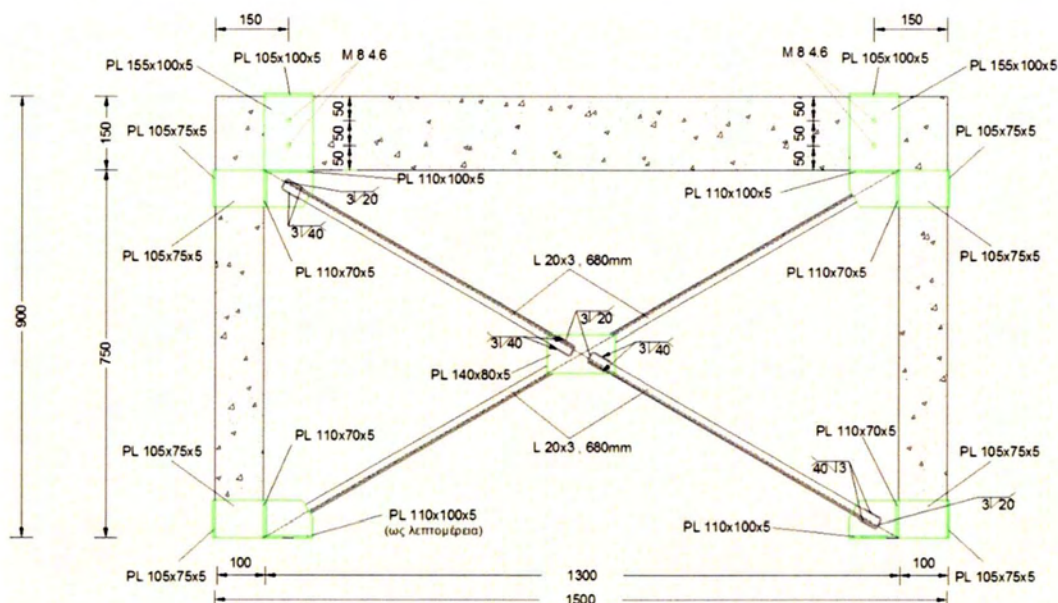
3.4 1^ο ΣΥΣΤΗΜΑ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ (X-1, L20X3)

3.4.1 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

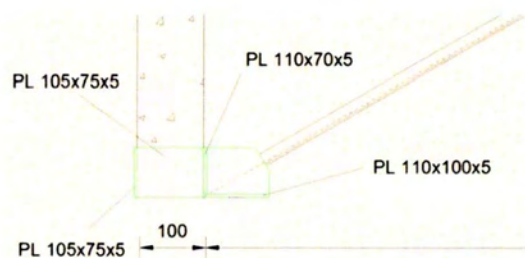
Για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό θεωρήθηκαν οι ονομαστικές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα S235, ήτοι τάση διαρροής $f_y = 235MPa$ και τάση θραύσης (οριακή αντοχή) $f_u = 360MPa$.

Το 1ο σύστημα Χ-συνδέσμων αποτελείτο από διαγώνια μέλη διατομής απλού ισοσκελούς γωνιακού L20x3, συγκολλημένου στις τέσσερις γωνίες (κόμβους δοκών-στύλων και βάσεις στύλων), αφήνοντας έτσι ένα ελεύθερο μήκος εκάστου μέλους περίπου ίσο με 68 cm (συμπεριλαμβανομένων και των μηκών των συγκολλήσεων – 56 cm περίπου χωρίς επαφή με κομβοελάσματα). Η όψη και οι σχετικές λεπτομέρειες της όλης διάταξης φαίνονται στα

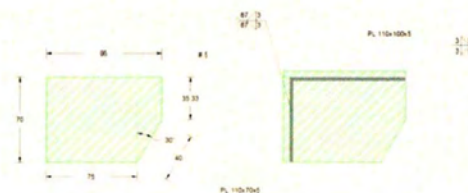
Σχήματα 3.7 και 3.8 αντίστοιχα. Πρέπει ιδιαίτερα να προσεχθεί ο τρόπος εναλλαγής των πλευρών των κομβοελασμάτων (γωνιών και κεντρικού) προς τις οποίες συνδέονται τα μέλη, με σκοπό την *ελαχιστοποίηση της πιθανότητας λυγισμού εκτός επιπέδου εκ κατασκευής*. Επίσης η διάταξη των συνδέσεων των μελών προβλέφθηκε κεντροβαρική με εναλλαγή της συμμετρίας σε κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα ως προς το μέσο του κεντρικού κομβοελάσματος.



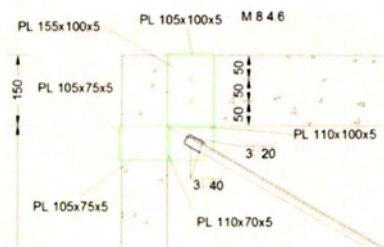
Σχήμα 3.7: Πρόσωση της 1ης πειραματικής διάταξης με Χ-συνδέσμους



(α) Λεπτομέρεια σύνδεσης στη βάση των στύλων



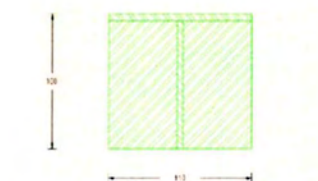
(ε) Λεπτομέρεια γεωμετρίας κομβοελάσματος και συσκαλλήσεων με περιμετρικά ελάσματα



(β) Λεπτομέρεια σύνδεσης στον κόμβο δοκού - στύλου



(γ) Λεπτομέρεια σύνδεσης κεντρικού κομβοελάσματος



(στ) Λεπτομέρεια γεωμετρίας ελάσματος βάσης

Σχήμα 3.8. Λεπτομέρειες της 1ης πειραματικής διάταξης με Χ-συνδέσμους

Τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά της διατομής L20x3 είναι: $A=1.12cm^2$ και $I_y = I_z = 0.39cm^4$. Η λυγηρότητα του μέλους βρέθηκε $\lambda=115$, η εφελκυστική αντοχή

$$N_{t,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{1.12 \cdot 23.5}{1} = 26.32kN \text{ και η αντοχή σε λυγισμό } N_{b,Rd} = 12.20kN \text{ για συντελεστή}$$

ατελειών $a = 0.34$. Οι αντοχές αυτές αντιστοιχούν στην ονομαστική τιμή της τάσης διαρροής του χάλυβα S235. Αν αντί αυτής χρησιμοποιηθεί η πειραματική τιμή της τάσης διαρροής του χάλυβα του δοκιμίου X-1 $f_y = 325MPa$, τότε οι αντίστοιχες τιμές των αντοχών προκύπτουν:

$N_{t,Rd} = 36.4kN$ και $N_{b,Rd} = 16.87kN$. Παρόλο που τα διαγώνια μέλη έχουν την ίδια θεωρητικά αντοχή σε λυγισμό εντός και εκτός επιπέδου, λόγω κατασκευαστικών λεπτομερειών η εντός επιπέδου αντοχή είναι μεγαλύτερη λόγω του μικρότερου ελεύθερου μήκος εκάστου μέλους. Έτσι η αναμενόμενη μορφή λυγισμού κατά τη δοκιμή ήταν η εκτός επιπέδου.

Επιπρόσθετα, η απόκριση του πλαισίου από οπλισμένο σκυρόδεμα με Χ-συνδέσμους της τρέχουσας 1^{ης} διάταξης αναμενόταν να ακολουθήσει τις επόμενες φάσεις:

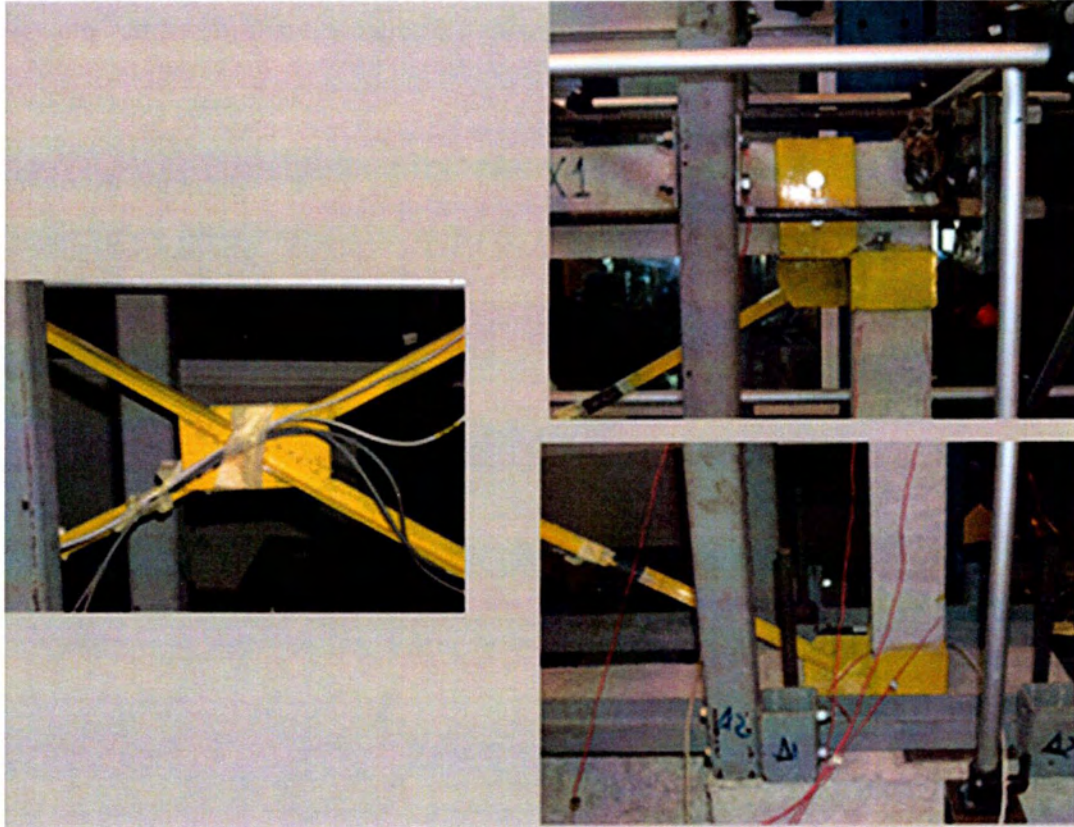
1^η Φάση: *Ελαστική Συμπεριφορά:* Αμφότερες οι διαγώνιοι (εφελκυστική και θλιβόμενη) βρίσκονται στην ελαστική περιοχή. Το πλαίσιο από Ο/Σ συνεισφέρει αντοχή στο σύστημα χωρίς να έχει φτάσει την οριακή του αντοχή (αυτή του απλού «γυμνού» πλαισίου). Η μέγιστη αναμενόμενη συνεισφορά των Χ-συνδέσμων στο συνολικό οριζόντιο φορτίο στον κόμβο του πλαισίου είναι $2 \times N_{b,Rd} \times \cos(30.5) = 2 \times 16.87 \times 0.86 = 29kN$.

2^η Φάση: *Ανελαστικός Λυγισμός:* Ένα από τα θλιβόμενα διαγώνια μέλη (στοιχεία) λυγίζει αφού έχει εξαντλήσει την ελαστική αντοχή του σε λυγισμό, ίση με $N_{b,Rd} = 16.87kN$. Η πτώση στο θλιπτικό φορτίο μετά το λυγισμό (περίπου 40% - 50%) αναλαμβάνεται από το πλαίσιο από Ο/Σ και την εφελκυστική διαγώνιο, της οποίας το φορτίο αυξάνεται μέχρι τη διαρροή της (36.4kN). Το πλαίσιο από Ο/Σ συνεισφέρει ακόμη αντοχή στο σύστημα μέχρι ποσοστού περίπου 80% της οριακής (χωρίς όμως να την εξαντλεί). Οι Χ-συνδέσμοι έχουν φθάσει τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα τους με ανελαστικό λυγισμό της μιας διαγωνίου και εφελκυστική διαρροή της άλλης, ήτοι $(N_{t,Rd} + 0.4 \times N_{b,Rd}) \times \cos(30.5) = (36.1 + 0.4 \times 16.87) \times 0.86 \approx 37kN$.

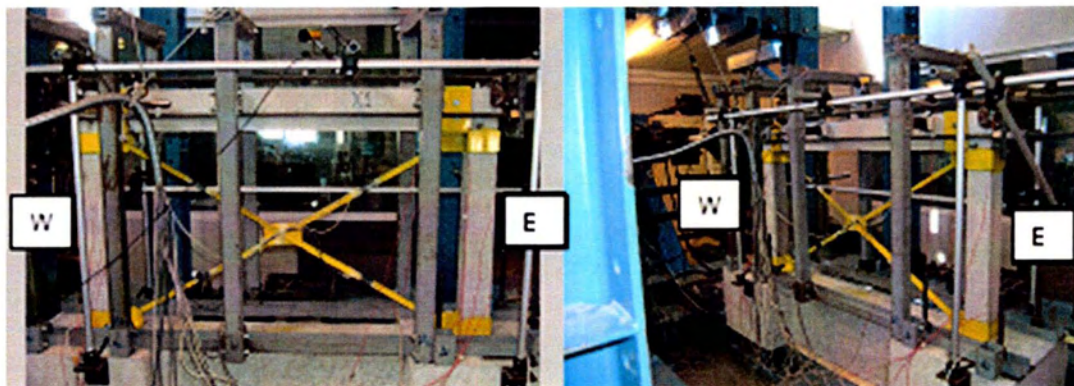
3^η Φάση: *Πλαστικές Αρθρώσεις στο Πλαίσιο από Ο/Σ:* Μετά τον ανελαστικό λυγισμό ενός διαγωνίου μέλους και την εφελκυστική διαρροή του απέναντι του, το περιβάλλον πλαίσιο από ΟΣ έχει εξαντλήσει την οριακή του αντοχή (μετρηθείσα πειραματικά 14kN, ως Σχήμα 3.5)

Με την αντιστροφή της φόρτισης το σύστημα αυτό ακολουθεί τις ίδιες φάσεις, πλην όμως η αντοχή που σε κάθε κύκλο συνεισφέρει το κάθε στοιχείο δεν είναι η ίδια με αυτή του 1^{ου} κύκλου φόρτισης. Οι τιμές που θα αποκτηθούν αναμένονται χαμηλότερες.

Το περιβάλλον πλαίσιο από Ο/Σ (ως Σχήμα 3.5) κατασκευάστηκε στο εργαστήριο, ενώ το σύστημα των Χ-συνδέσμων και τα ελάσματα διαμορφώθηκαν και επεξεργάστηκαν στο εργοστάσιο, κατόπιν δε μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο και τοποθετήθηκαν – προσαρμόστηκαν στο άνοιγμα του πλαισίου. Οι τελικές συγκολλήσεις των κολάρων στους στύλους και στη δοκό έγιναν στο εργαστήριο. Στις Εικόνες 3.4 και 3.5 φαίνονται οι συνδέσεις των Χ-συνδέσμων με την ανατολική (Ε) πλευρά του πλαισίου, το μεσαίο κομβοέλασμα καθώς και δύο πλήρεις εμπρόσθιες όψεις της όλης πειραματικής διάταξης.



Εικόνα 3.4: Λεπτομέρεια κεντρικού κομβοελάσματος (αριστερά), κόμβου (πάνω δεξιά) και βάσης (κάτω αριστερά).



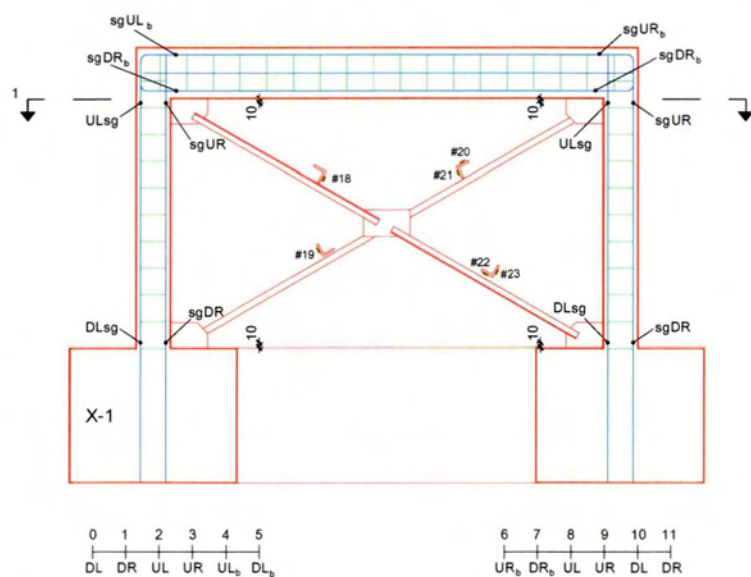
Σχήμα 3.5: Χαρακτηριστικές όψεις της πειραματικής διάταξης του 1^{ου} συστήματος χαλύβδινων Χ-συνδέσμων

3.4.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΟΡΓΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Για την καταγραφή των αποτελεσμάτων του πειράματος έγινε χρήση μιας πληθώρας μετρητικών οργάνων. Για την μέτρηση του φορτίου και της οριζόντιας μετακίνησης των κόμβων του πλαισίου τοποθετήθηκαν 2 LVDT's μέγιστης ικανότητας $\pm 22mm$, ένας στο μέσον του ανοίγματος της δοκού, και ένας στο δυτικό άκρο αυτής, καθώς και η δυναμοκουψέλη του ενεργοποιητή (actuator load-cell), ο αισθητήρας μετατόπισης (Temprosonic) του ενεργοποιητή, και ο έλεγχος του πειράματος έγινε μέσω αυτού. Ακόμη τοποθετήθηκαν και δύο αισθητήρια καλώδια (wire transducers) κατά μήκος των διαγωνίων.

Για την μέτρηση των ανηγμένων παραμορφώσεων των συνδέσμων χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 6 μηχανοσκόμια (strain gauges, #SG). Στις άνω και κάτω αριστερά διαγωνίους τοποθετήθηκε από ένα ενώ στις άνω και κάτω δεξιά διαγωνίους τοποθετήθηκαν από δύο.

Στο Σχήμα 3.9 απεικονίζεται η διάταξη των LVDT's και των μηχανοσκοπίων επί του δοκιμίου. Οι αριθμοί δίπλα από κάθε μηχανοσκόμιο καταδεικνύουν τον αριθμό καναλιού στο σύστημα απόκτησης δεδομένων (data acquisition system).

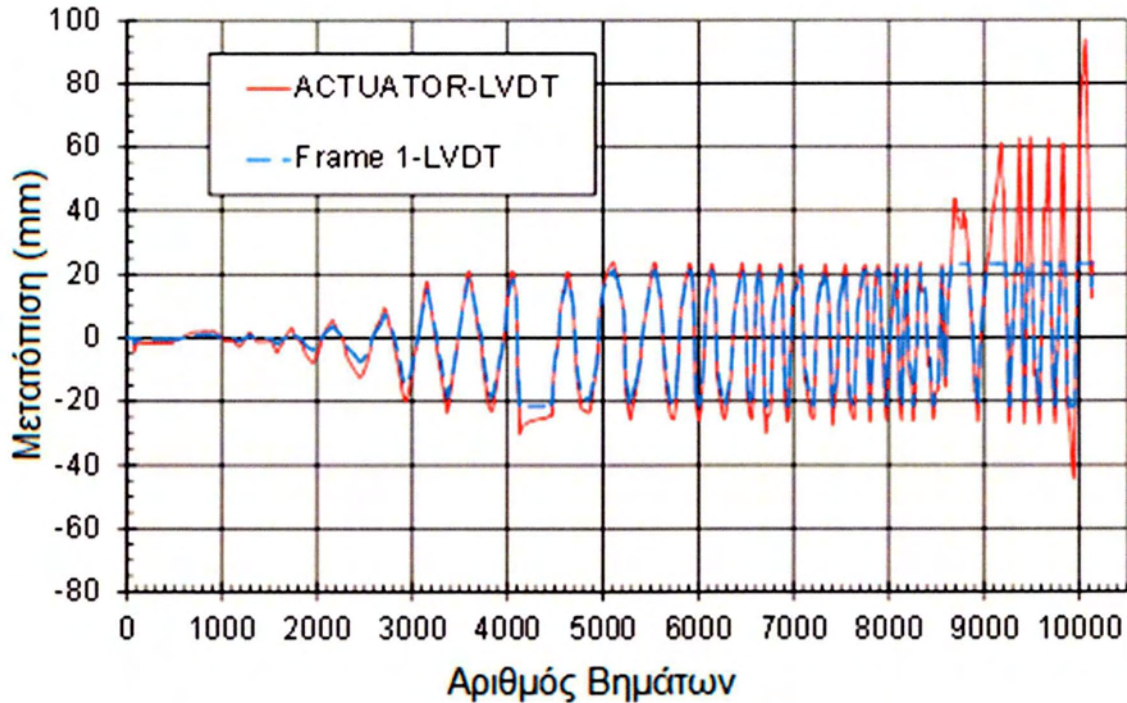


Σχήμα 3.9: Διάταξη των μηχανοσκοπίων (straingauges) στο 1^ο πείραμα με Χ-συνδέσμους

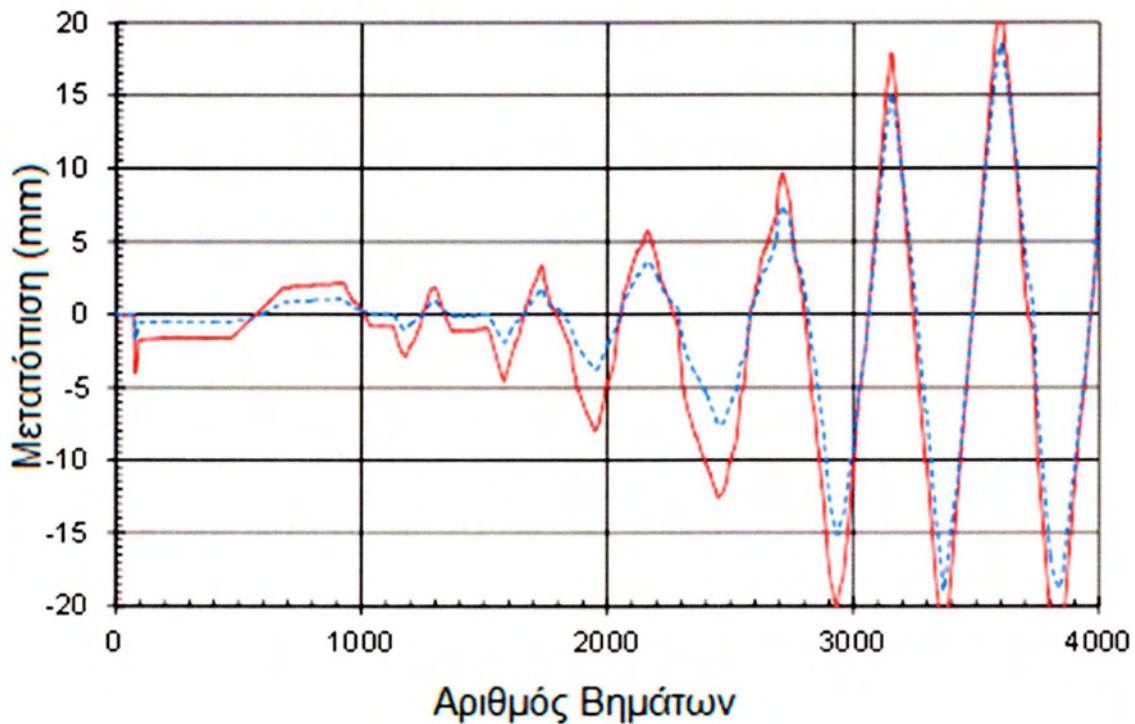
3.4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το πρωτόκολλο ανακυκλιζόμενης φόρτισης που εφαρμόστηκε στο τρέχον πείραμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10. Ο LVDT "Frame 1" (με δυνατότητα $\pm 22mm$) ήταν τοποθετημένος στο μέσο της δοκού και οι καταγραφές του ήταν ελεύθερες από κάποιες περιορισμένες ολισθήσεις / κενά μεταξύ της κεφαλής του ενεργοποιητή και του δοκιμίου. Οι καταγραφές αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων, εκτός των περιπτώσεων εκείνων κατά τις οποίες οι μετατοπίσεις που επιβλήθηκαν ήταν μεγαλύτερες από $22mm$. Σε αυτές τις περιπτώσεις η αλλοίωση των

καταγραφών του αισθητήρα μετατοπίσεων του ενεργοποιητή (actuator displacement transducer) λόγω ολισθήσεων/κενών δεν είναι σημαντική, οπότε οι καταγραφές του τελευταίου χρησιμοποιήθηκαν για την παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3.10: Πρωτόκολλο πλευρικής μετατόπισης που εφαρμόστηκε στο επίπεδο της δοκού

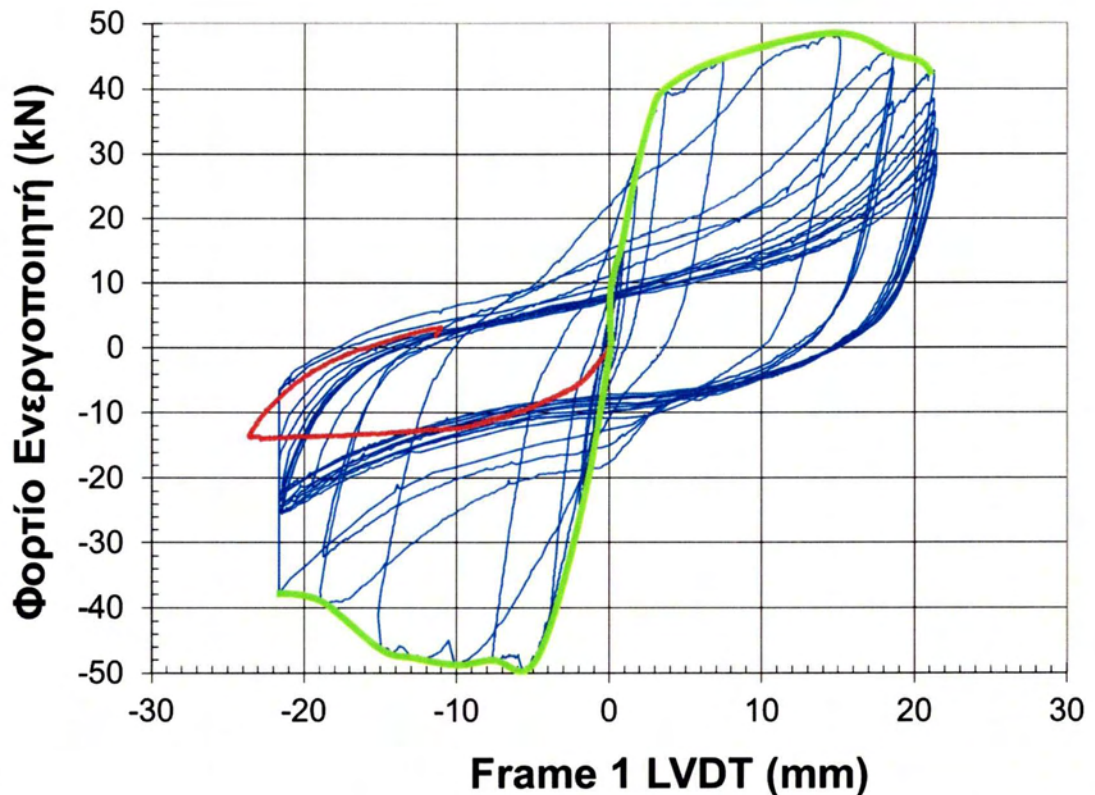


Σχήμα 3.11: Πρωτόκολλο πλευρικής μετατόπισης που εφαρμόστηκε στο επίπεδο της δοκού για τους 7 πρώτους κύκλους

Συνολικά επιβλήθηκαν 32 κύκλοι φόρτισης στο πλαίσιο από Ο/Σ πριν τον τερματισμό του πειράματος λόγω σοβαρών βλαβών τόσο σε αυτό όσο και στο σύστημα Χ-συνδέσμων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.6. Στο Σχήμα 3.12 δε απεικονίζεται η καμπύλη δύναμης (εκ της δυναμοκυψέλης του ενεργοποιητή) – μετατόπισης για τους πρώτους 19 κύκλους φόρτισης. Η κόκκινη γραμμή είναι η πειραματική απόκριση του απλού «γυμνού» πλαισίου για $\frac{1}{2}$ κύκλο φόρτισης, αποκτηθείσα από άλλο πείραμα με διαφορετικό δοκίμιο. Η πράσινη γραμμή αντιπροσωπεύει την περιβάλλουσα της απόκρισης του πλαισίου Ο/Σ με τους Χ-συνδέσμους. Η μέγιστη δύναμη που συνεισφέρεται στο σύστημα από τους συνδέσμους αυτούς είναι $36kN$ και από το πλαίσιο Ο/Σ $14kN$. Η τιμή της μέγιστης συνεισφοράς των συνδέσμων που βρέθηκε πειραματικά ($36kN$) είναι κοντά στην αντίστοιχη τιμή που υπολογίστηκε προηγούμενα κατά την φάση προκαταρκτικού σχεδιασμού (περίπου $37kN$).



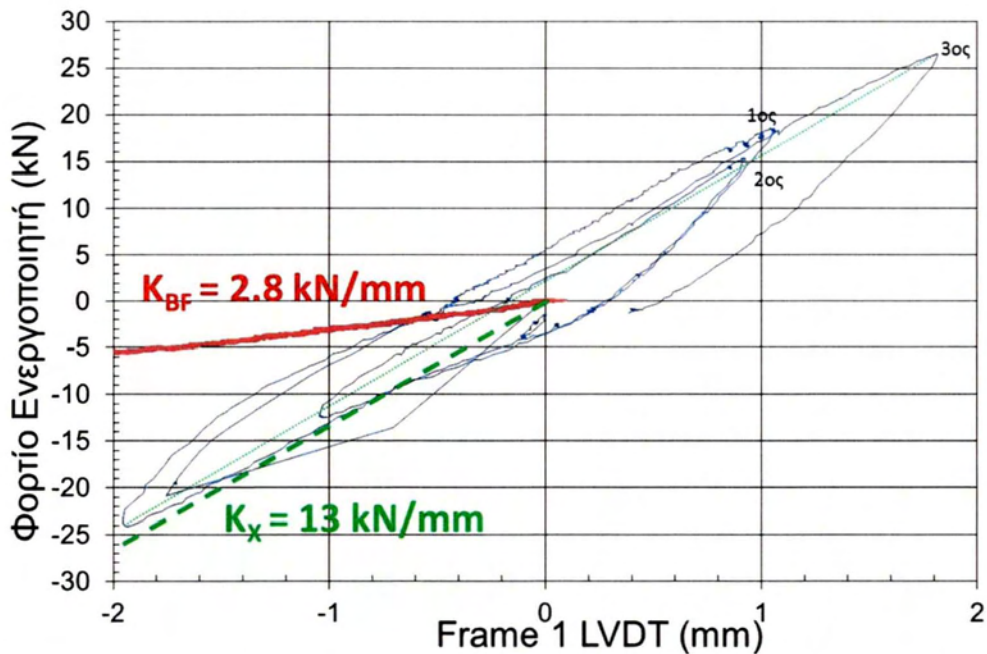
Εικόνα 3.6: Βλάβες στο πλαίσιο από Ο/Σ και τους Χ-συνδέσμους μετά το τέλος του 32^{ου} κύκλου φόρτισης.



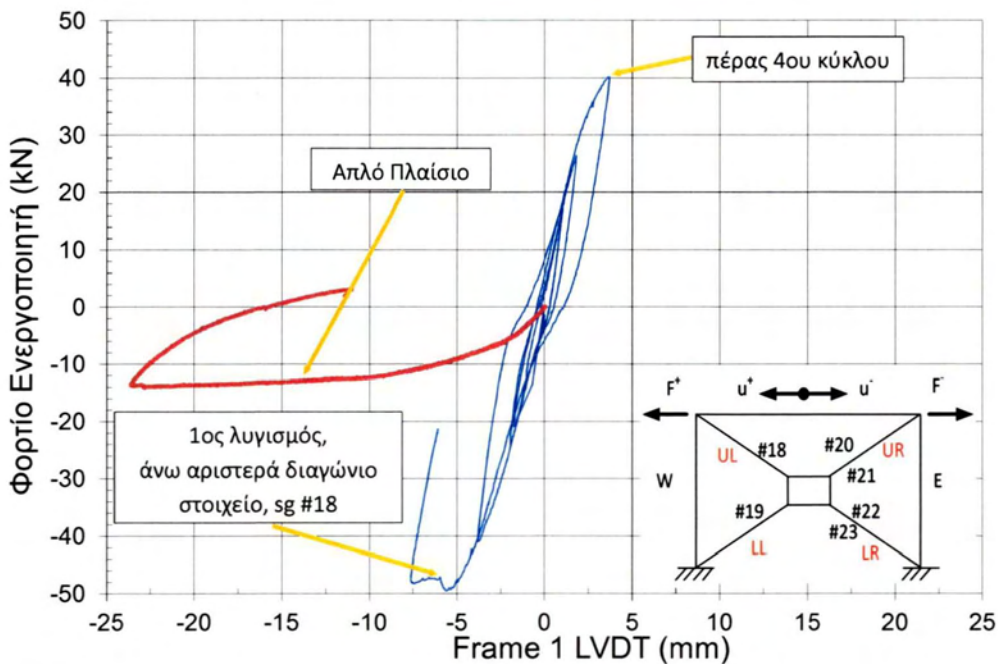
Σχήμα 3.12: Πειραματικές καμπύλες οριζόντιας μετατόπισης – πλευρικής (διατμητικής) δύναμης (α) του πλαισίου ΟΣ με το σύστημα Χ-συνδέσμων (μπλε γραμμή) και (β) του απλού πλαισίου χωρίς συνδέσμους. Η περιβάλλουσα της απόκρισης πλαισίου + Χ-σύνδεσμοι (αρχικοί 19 κύκλοι) φαίνεται με πράσινη γραμμή

Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζονται οι αρχικοί $3 \frac{1}{4}$ κύκλοι φόρτισης ($\pm 2mm$) του πλαισίου Ο/Σ με τους Χ-συνδέσμους (μπλε γραμμή) μαζί με την καμπύλη δύναμης – μετατόπισης του απλού πλαισίου (κόκκινη γραμμή). Στο εν λόγω σχήμα δίδεται επίσης μια εκτίμηση της αρχικής δυσκαμψίας των δύο συστημάτων. Αφαιρώντας αυτές τις τιμές λαμβάνεται η δυσκαμψία των Χ-συνδέσμων, και βρίσκεται ίση με $10.2kN/mm$. Το σύστημα πλαίσιο – σύνδεσμοι παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά για πλευρικές μετατοπίσεις έως $\pm 5mm$ όπως διακρίνεται στο Σχήμα 3.14.

Κατά τη διάρκεια των τριών πρώτων κύκλων ($\pm 2mm$ οριζόντιας μετατόπισης του πλαισίου) ουδεμία παραμόρφωση (εντός ή εκτός επιπέδου) των διαγωνίων μελών ήταν ορατή. Όμως, με τον 4^ο κύκλο ($\pm 4mm$) το άνω αριστερά (UL) χαλύβδινο διαγώνιο μέλος – σύνδεσμος φάνηκε να καμπυλώνεται ελαφρά εκτός επιπέδου (ελαστικός λυγισμός). Τούτο επιβεβαιώνεται από την ήπια συμπίεση/στένωση (pinching) της καμπύλης υστερητικής συμπεριφοράς (βλέπε Σχήμα 3.14) που υπάρχει στον βρόγχο εύρους από -4 έως $+6mm$ ($3 \frac{1}{2}$ - $4 \frac{1}{2}$ κύκλος). Παρόλη την ήπια μη γραμμικότητα, η απόκριση μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ελαστική.

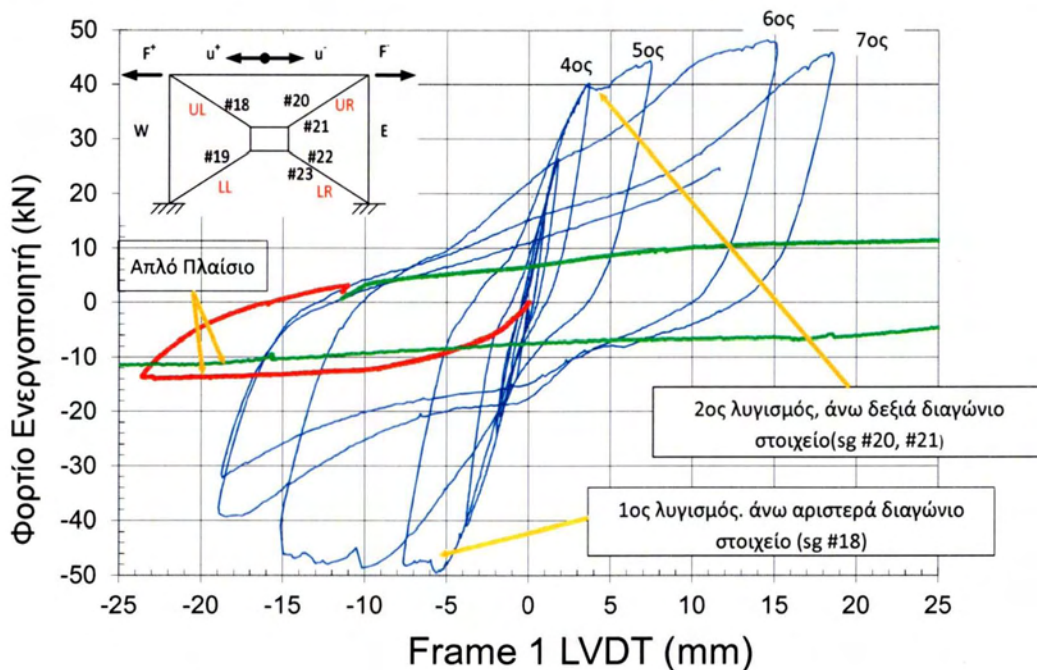


Σχήμα 3.13: Πειραματική καμπύλη πλευρικής (διατμητικής) δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης για (α) το σύστημα πλαίσιο + Χ-συνδέσμοι για τους πρώτους 3 ½ κύκλους και (β) του απλού πλαισίου (χωρίς Χ-συνδέσμοι, κόκκινη γραμμή)



Σχήμα 3.14: Πειραματική καμπύλη πλευρικής (διατμητικής) δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης του συστήματος πλαίσιο – Χ-συνδέσμοι (μπλε γραμμή) για τους 4 ½ αρχικούς κύκλους: 1^{ος} λυγισμός, άνω αριστερά σύνδεσμος

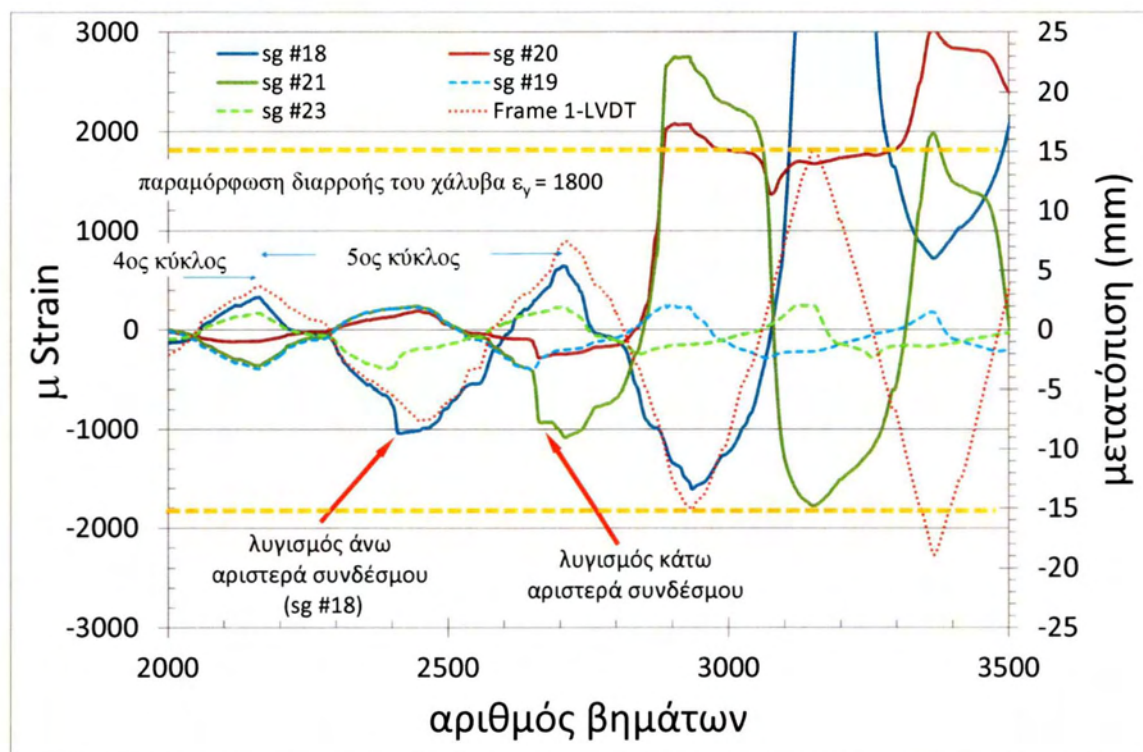
Όταν η πλευρική μετατόπιση έφθασε τα -6mm και το φορτίο τα -50kN (κατά τη διάρκεια του 5^{ου} κύκλου των $\pm 8\text{mm}$) το άνω αριστερά μέλος των Χ-συνδέσμων υπέστη σημαντικό βαθμού επιπρόσθετο λυγισμό (ανελαστικό λυγισμό), με τον σχηματισμό πλαστικής άρθρωσης στο μέσο του μέλους αυτού. Η πλευρική δύναμη (βλέπε Σχήματα 3.14 και 3.15) απότομα μειώθηκε περίπου κατά 2kN και παρέμεινε σχεδόν σταθερή ($\approx 48\text{kN}$) μέχρι το σημείο που έλαβε χώρα αντιστροφή της φόρτισης (-8mm). Το φαινόμενο αυτό καταδείχτηκε και από τις μετρήσεις των μηκυσιομέτρων πάνω στα μέλη των Χ-συνδέσμων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.16, όπου οι παραμορφώσεις στο sg#18 (άνω αριστερά διαγώνιο μέλος) αυξήθηκαν απότομα (δεν έφθασαν όμως τις τιμές των παραμορφώσεων διαρροής όπως αναμένεται κατά τη δημιουργία πλαστικής άρθρωσης, καθόσον το sg αυτό βρισκόταν 2 – 4 cm από τη περιοχή της πλαστικής άρθρωσης). Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε μια απότομη πτώση στις τιμές των παραμορφώσεων στο sg #23 (κάτω δεξιά διαγώνιο μέλος). Αυτή η ανακούφιση παραμορφώσεων στο συγκεκριμένο μέλος που δεν λύγισε αναμενόταν, υπήρξε δε μια επιπρόσθετη πληροφορία για το λυγισμό του άνω αριστερά διαγώνιου μέλους.



Σχήμα 3.15: Πειραματική καμπύλη πλευρικής (διατμητικής) δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης του συστήματος πλαίσιο + Χ-σύνδεσμοι για τους πρώτους 7 ¼ κύκλους φόρτισης: 2ος λυγισμός, άνω δεξιά διαγώνιο μέλος

Με την αντιστροφή της φόρτισης η απέναντι διαγώνιος ήταν υπό θλίψη και πριν την ολοκλήρωση του 5ου κύκλου, για μετατόπιση $+4\text{mm}$ και δύναμη $+40\text{kN}$ (ως Σχήμα 3.15) το άνω δεξιά διαγώνιο μέλος (sg #20 και sg #21) λύγισε ανελαστικά (νωρίτερα από ότι συνέβη στον προηγούμενο κύκλο) διατηρώντας το φορτίο στα $+40\text{kN}$ μέχρι μετατόπιση $+5\text{mm}$, όπου το φορτίο άρχισε να αυξάνεται για να φθάσει τα $+44\text{kN}$ στο τέλος του 5ου κύκλου ($+8\text{mm}$). Οι καταγραφές των sg #20 και #21 παρουσίασαν μια απότομη αύξηση ενώ αυτές του sg #19 μια απότομη πτώση (βλέπε Σχήμα 3.16) – συμπεριφορά παρόμοια με αυτή που

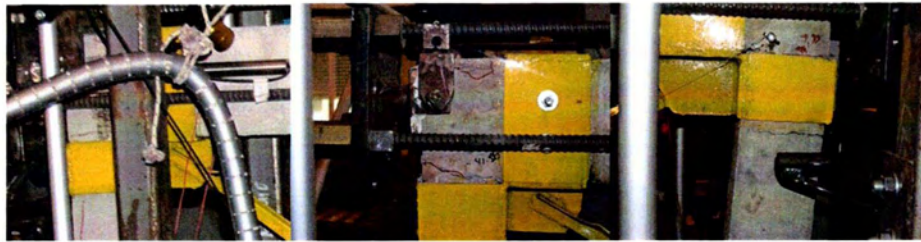
παρατηρήθηκε κατά τον λυγισμό του αριστερού άνω μέλους – γεγονός που επιβεβαίωσε τον λυγισμό του άνω δεξιά μέλους. Η προφανώς όλο και πιο έντονη στένωση (pinching) πέραν του βου κύκλου, όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.12 και 3.15, οφείλεται όχι μόνο στον ανελαστικό λυγισμό και τη συσσώρευση παραμενουσών μετατοπίσεων στους επόμενους θλιπτικούς κύκλους, αλλά και στο ότι όταν οι διαγώνιοι εφελκύνονται τα κολάρα στις βάσεις των στύλων είχαν μια τάση να στραφούν (που όπως προαναφέρθηκε ήταν επιτρεπτό κατασκευαστικά.)



Σχήμα 3.16: Πειραματικές καμπύλες καταγραφών ορισμένων sg – βήματος φόρτισης. Τα δεδομένα είναι μεταξύ των $3\frac{1}{2}$ και του $6\frac{3}{4}$ κύκλων και περιλαμβάνουν αμφότερα τα παρατηρηθέντα γεγονότα - φαινόμενα λυγισμού, ενώ φαίνεται και η παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα

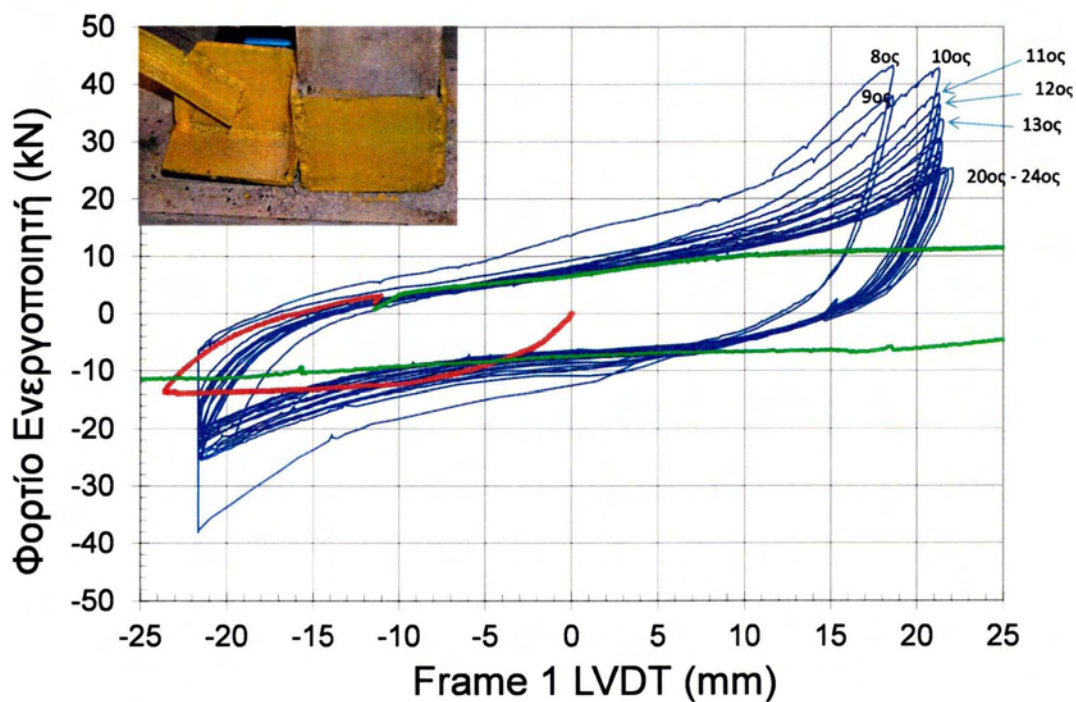
Στην επόμενη αντιστροφή της φόρτισης (6^{ος} κύκλος, $\pm 15mm$) το άνω αριστερά διαγώνιο μέλος, το οποίο είχε λυγίσει για πρώτη φορά κατά τη διάρκεια του πρώτου μισού του 5^{ου} κύκλου και κατόπιν σχεδόν ευθυγραμμίστηκε λόγω εφελκυσμού (στο 2^ο ήμισυ του 5^{ου} κύκλου), έχοντας πάντως μια μόνιμη εκτός επιπέδου παραμόρφωση, βρέθηκε εκ νέου σε θλίψη και λύγισε για άλλη μια φορά (έχοντας πάντως μειωμένη δυσκαμψία). Η δύναμη ήταν ίση με $-50kN$ για μετατόπιση περίπου $-10mm$, και η δύναμη αυτή διατηρήθηκε μέχρι την αντιστροφή του φορτίου στα $-15mm$ (Σχήμα 3.15). Αυτή τη φορά όμως, δεν παρατηρήθηκε καμιά απότομη αλλαγή στην καταγραφή παραμορφώσεων του sg #18 (πάνω αριστερά διαγώνιο μέλος). Αντίθετα, όταν οι πλευρικές μετατοπίσεις έφτασαν τα $-10mm$, οι καταγραφές παραμορφώσεων των sg #20 και #21 (άνω δεξιά μέλος), που βρίσκονται σε εφελκυσμό, φθάνουν την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα (1800 μ -strain), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.16. Περίπου στα $-11mm$ (βλέπε τη μικρή μείωση αντοχής στο Σχήμα 3.15)

εμφανίστηκαν οριζόντιες ρωγμές στην κορυφή αμφοτέρων των στύλων από Ο/Σ (στην επαφή με τη δοκό), ως Εικόνα 3.7.



Εικόνα 3.7: Εφελκυστικές ρωγμές (κόκκινα σημάδια) στη κορυφή των στύλων (στη τομή με τη δοκό) μεταξύ των κολάρων δοκού και στύλου, για παραμόρφωση -11 mm

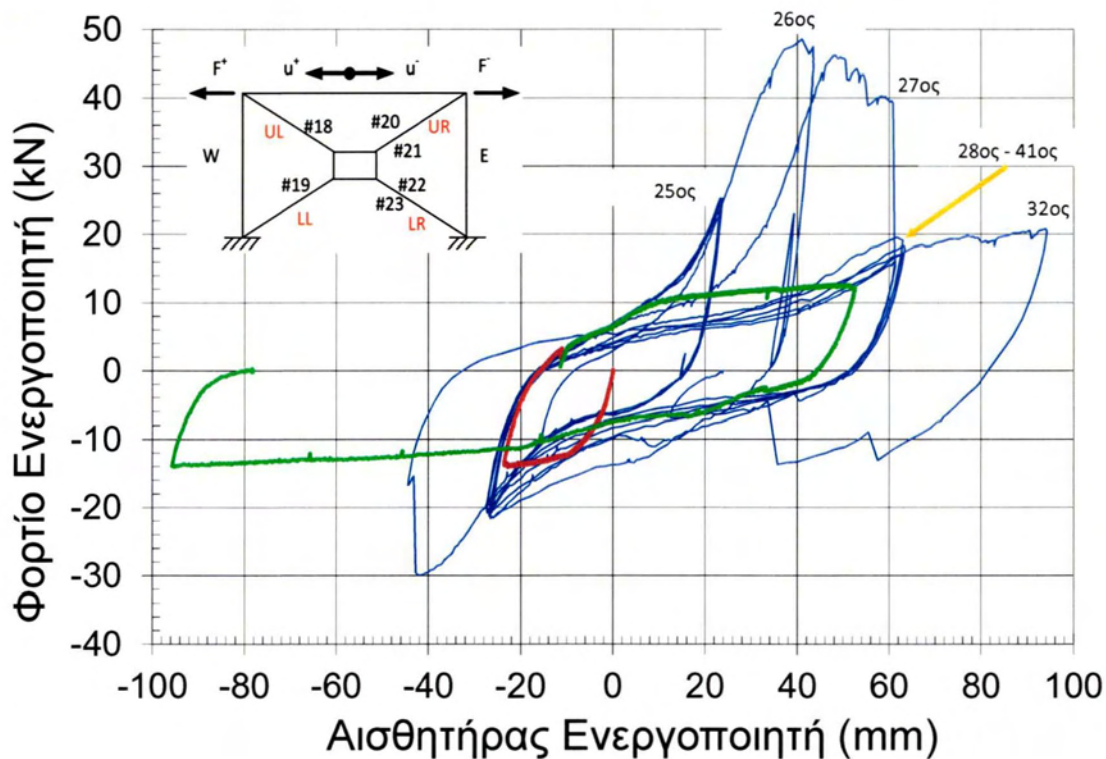
Στο τέλος του 6^{ου} κύκλου παρατηρήθηκε μια μικρή κατακόρυφη ρωγμή στις ραφές του κολάρου στη βάση του αριστερού στύλου. Η ρωγμή αυτή εξασθένησε την εφελκυστική δυσκαμψία της διαγωνίου (κάτω αριστερά προς πάνω δεξιά) με αποτέλεσμα την πτώση της αντοχής για πλευρική μετατόπιση ίση περίπου με 19 mm (7^{ος} κύκλος) σε $+40\text{ kN}$ (από τα $+50\text{ kN}$ του προηγούμενου κύκλου) και στον επόμενο δε κύκλο (8^ο -19 mm) σε $+32\text{ kN}$. Στις αντιστροφές της φόρτισης των επόμενων κύκλων (10^{ου} έως 24^{ου}), με εύρος $\pm 22\text{ mm}$, 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 $+22\text{ mm}$ η αντοχή τελικά έπεσε από τα $+42\text{ kN}$ στα $+24\text{ kN}$. Τούτο συνέβη λόγω συσσώρευσης βλαβών (ρωγμών στις ραφές) στο κάτω δεξιά κολάρο (βλ. Σχήμα 3.17)



Σχήμα 3.17: Πειραματική καμπύλη πλευρικής (διαμητικής) δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης του συστήματος πλαίσιο + Χ-σύνδεσμοι (μπλε γραμμή) από τον 8^ο μέχρι τον 24^ο κύκλο φόρτισης ($\pm 22\text{ mm}$). Το πάνω αριστερά και το πάνω δεξιά διαγώνιο μέλος έχουν υποστεί ανελαστικό λυγισμό

Συγκρίνοντας την απόκριση του συστήματος πλαίσιο – Χ-σύνδεσμοι με αυτή του απλού («γυμνού») πλαισίου φαίνεται πως οι Χ-σύνδεσμοι συνεισφέρουν κάποια αντοχή για μετατοπίσεις μεγαλύτερες από 15mm. Τα κολλάρα των συνδέσμων στις βάσεις υπέστησαν σοβαρές ζημιές και η συνεισφορά τους είναι μάλλον μικρή, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό αντοχής προέρχεται από το πλαίσιο Ο/Σ.

Παρόλη τη συσσώρευση βλαβών τόσο στους χαλύβδινους Χ-συνδέσμους όσο και στο πλαίσιο από Ο/Σ μετά από 25 κύκλους φόρτισης, το σύστημα συνολικά φάνηκε να διαθέτει απόθεμα αντοχής (βλέπε Σχήμα 3.18) στον 27^ο και 28^ο κύκλο, όπου επιβλήθηκαν πλευρικές μετατοπίσεις 40 και 60 mm αντίστοιχα. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρήθηκε επειδή η εφελκόμενη διαγώνιος μπορούσε ακόμα να φέρει φορτίο, γιατί το κάτω δεξιά κολλάρο δεν είχε πλήρως καταστραφεί (μέσω θραύσης των ραφών). Έτσι, η αντοχή του συστήματος προήλθε από εφελκυστική διαρροή μιας διαγωνίου και η υπόλοιπη αντοχή από το απλό πλαίσιο Ο/Σ, το οποίο ανέπτυξε πλαστικές αρθρώσεις λόγω κάμψης στα άκρα (άνω / κάτω) στύλων.



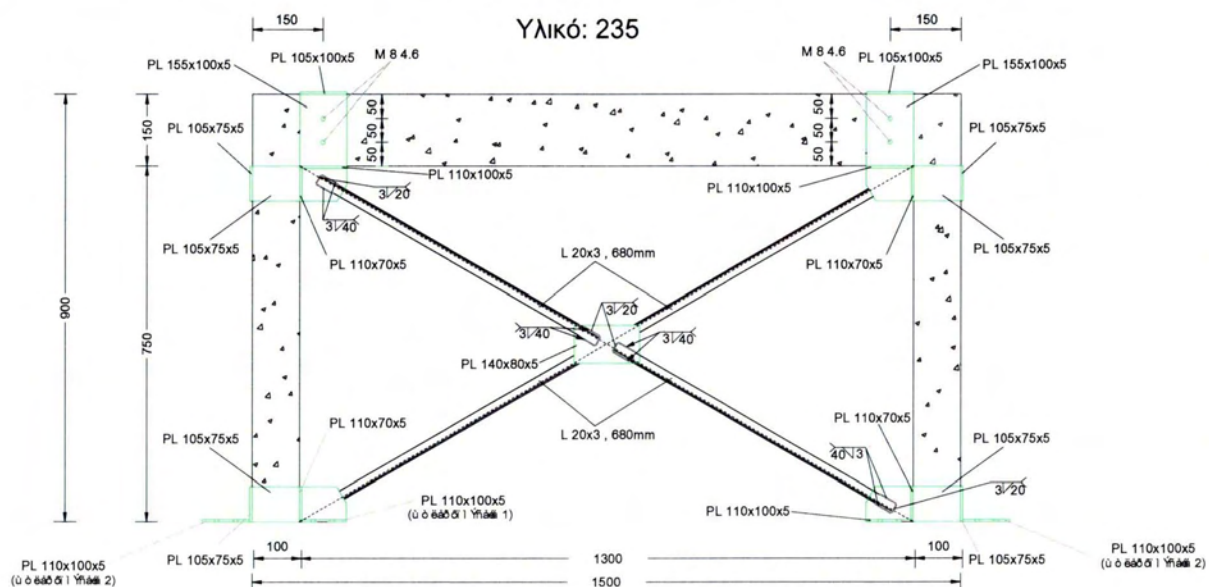
Σχήμα 3.18: Πειραματική καμπύλη πλευρικής (διατμητικής) δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης (καταγραφή του αισθητήρα μετατοπίσεων του ενεργοποιητή) του συστήματος πλαίσιο + Χ-σύνδεσμοι (μπλε γραμμή) από τον 25^ο μέχρι τον 32^ο κύκλο φόρτισης (μέγιστο εύρος +94mm).

3.5 2^ο ΣΥΣΤΗΜΑ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ (Χ-4, L20X3)

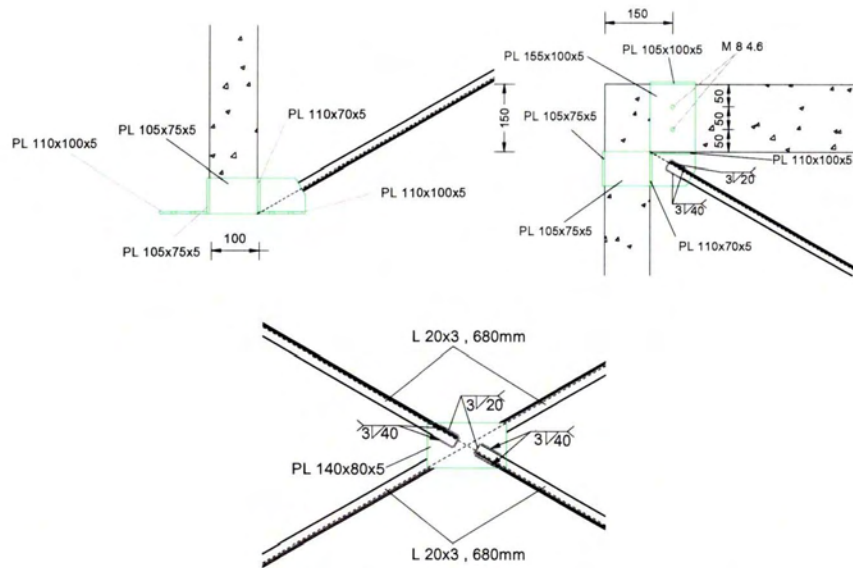
3.5.1 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό θεωρήθηκαν οι ονομαστικές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα S235, ήτοι τάση διαρροής $f_y = 235MPa$ και τάση θραύσης (οριακή αντοχή) $f_u = 360MPa$.

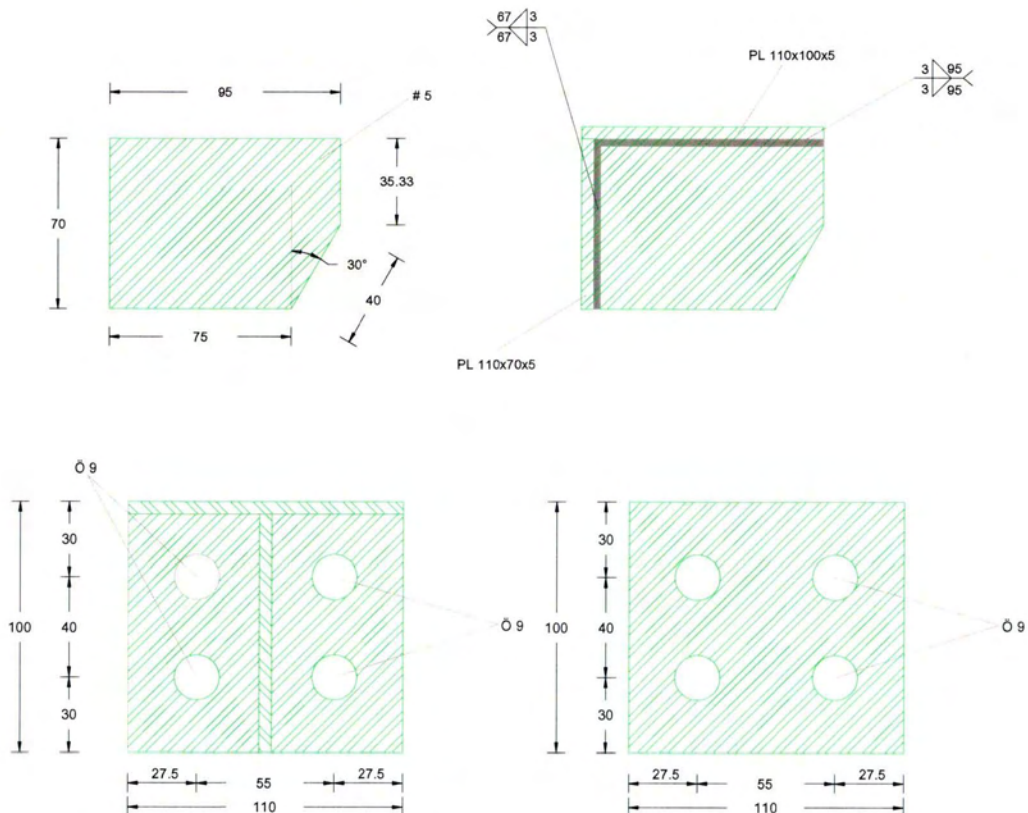
Το 2^ο σύστημα Χ-συνδέσμων αποτελείται από διαγώνια μέλη διατομής απλού ισοσκελούς γωνιακού L20x3, συγκολλημένου στις τέσσερις γωνίες (κόμβους δοκών-στύλων και βάσεις στύλων), αφήνοντας έτσι ένα ελεύθερο μήκος εκάστου μέλους περίπου ίσο με 68 cm συμπεριλαμβανομένων και των μηκών των συγκολλήσεων (56 cm περίπου χωρίς επαφή με κομβοελάσματα). Το πραγματικό μετρημένο μήκος εκτος συγκολλήσεων για τα στοιχεία των διαγωνίων είναι: UL=57.5 cm, UR= 56 cm , LL= 57.5 cm, και LR= 54.5 cm. Η όψη και οι σχετικές λεπτομέρειες της όλης διάταξης φαίνονται στα Σχήματα 3.19, 3.20 και 3.21 αντίστοιχα. Πρέπει ιδιαίτερα να προσεχθεί ο τρόπος εναλλαγής των πλευρών των κομβοελασμάτων (γωνιών και κεντρικού) προς τις οποίες συνδέονται τα μέλη, με σκοπό την **ελαχιστοποίηση της πιθανότητας λυγισμού εκτός επιπέδου εκ κατασκευής**. Επίσης η διάταξη των συνδέσεων των μελών προβλέφθηκε κεντροβαρική με εναλλαγή της συμμετρίας σε κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα ως προς το μέσο του κεντρικού κομβοελάσματος.



Σχήμα 3.19: Πρόσοψη της πειραματικής διάταξης Χ-4



Σχήμα 3.20: Λεπτομέρειες σύνδεσης με την βάση του στύλου (αριστερά) με τον κόμβο δοκών- στύλων (δεξιά) και με το κεντρικό κομβοέλασμα (κάτω).



Σχήμα 3.21: Λεπτομέρειες περιμετρικών ελασμάτων ελασμάτων (πάνω) και ελασμάτων βάσης (κάτω)

Τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά της διατομής $L20 \times 3$, είναι: $A = 1.12 \text{ cm}^2$ και $I_y = I_z = 0.39 \text{ cm}^4$. Η λυγηρότητα του μέλους βρέθηκε $\lambda = 115$, η εφελκυστική αντοχή

$$N_{t,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{1.12 \cdot 23.5}{1} = 26.32 \text{ kN} \text{ και η αντοχή σε λυγισμό } N_{b,Rd} = 12.20 \text{ kN} \text{ για συντελεστή}$$

ατελειών $\alpha = 0.34$. Οι αντοχές αυτές αντιστοιχούν στην ονομαστική τιμή της τάσης διαρροής του χάλυβα S235. Αν αντί αυτής χρησιμοποιηθεί η πειραματική τιμή της τάσης διαρροής του χάλυβα του δοκιμίου X-4 $f_y = 322 \text{ MPa}$, τότε οι αντίστοιχες τιμές των αντοχών προκύπτουν:

$N_{t,Rd} = 36.1 \text{ kN}$ και $N_{b,Rd} = 16.72 \text{ kN}$. Παρόλο που τα διαγώνια μέλη έχουν την ίδια θεωρητικά αντοχή σε λυγισμό εντός και εκτός επιπέδου, λόγω κατασκευαστικών λεπτομερειών η εντός επιπέδου αντοχή είναι μεγαλύτερη λόγω του μικρότερου ελεύθερου μήκους εκάστου μέλους. Έτσι η αναμενόμενη μορφή λυγισμού κατά τη δοκιμή ήταν η εκτός επιπέδου.

Επιπρόσθετα, η απόκριση του πλαισίου από οπλισμένο σκυρόδεμα με Χ-συνδέσμους της τρέχουσας διάταξης αναμενόταν να ακολουθήσει τις επόμενες φάσεις:

1^η Φάση: *Ελαστική Συμπεριφορά:* Αμφότερες οι διαγώνιοι (εφελκυστική και θλιβόμενη) βρίσκονται στην ελαστική περιοχή. Το πλαίσιο από ΟΣ συνεισφέρει αντοχή στο σύστημα χωρίς να έχει φτάσει την οριακή του αντοχή (αυτή του απλού «γυμνού» πλαισίου). Η μέγιστη αναμενόμενη συνεισφορά των Χ-συνδέσμων στο συνολικό οριζόντιο φορτίο στον κόμβο του πλαισίου είναι $2xN_{b,Rd} \times \cos(30.5) = 2x16.72x0.86 \approx 29 \text{ kN}$. Αυτή η φάση αναμένεται να ολοκληρωθεί σε μικρότερες μετακινήσεις, σε σχέση με τό προηγούμενο σύστημα X-1 λόγω του πλήρους περιορισμού των μετακινήσεων των κολάρων στις βάσεις των στύλων.

2^η Φάση: *Ανελαστικός Λυγισμός:* Ένα από τα θλιβόμενα διαγώνια μέλη (στοιχεία) εξαντλεί την ελαστική αντοχή του σε λυγισμό, ίση με 16.72 kN , και στην συνέχεια λυγίζει με ταυτόχρονη δημιουργία πλαστικής άρθρωσης. Από την στιγμή αυτή και μετά τα στοιχεία τα οποία έχουν λυγίσει δεν συνεισφέρουν αντοχή στο σύστημα παρά μόνον μετά την αντιστροφή της φόρτισης οπότε θα βρεθούν και πάλι σε εφελκυσμό. Η πτώση στο θλιπτικό φορτίο μετά το λυγισμό (περίπου 40% - 50%) αναλαμβάνεται από το πλαίσιο Ο/Σ και την εφελκυστική διαγώνιο, της οποίας το φορτίο αυξάνεται μέχρι τη διαρροή της (36.1 kN). Το πλαίσιο από Ο/Σ ακόμα συνεισφέρει αντοχή στο σύστημα μέχρι ποσοστού περίπου 80% της οριακής (χωρίς όμως να την εξαντλεί). Οι Χ-σύνδεσμοι έχουν φθάσει τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα τους με ανελαστικό λυγισμό της μιας διαγώνιου και εφελκυστική διαρροή της άλλης, ήτοι $(N_{t,Rd} + 0.4xN_{b,Rd}) \times \cos(30.5) = (36.1 + 0.4x16.72) \times 0.86 \approx 37 \text{ kN}$

Επισημαίνεται και πάλι ότι ο πρώτος λυγισμός της θλιβόμενης διαγώνιου αναμένεται να συμβεί στο ίδιο φορτίο αλλά σε μικρότερη οριζόντια μετακίνηση του πλαισίου, συγκριτικά με το προηγούμενο σύστημα X-1. Λόγω του περιορισμού της ολίσθησης των κολάρων στην βάση των στύλων, οι εφελκυστικές διαγώνιοι θα αναπτύξουν μεγαλύτερη μεταβολή του

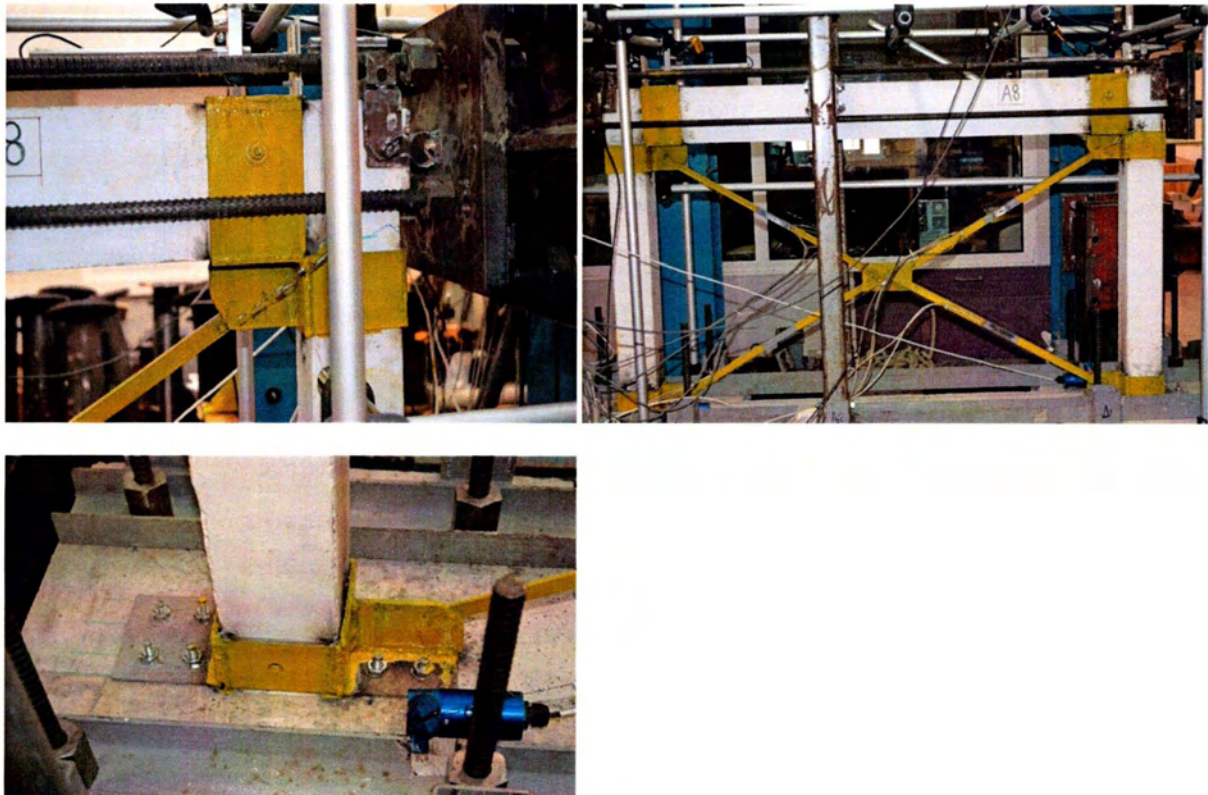
μήκους τους από ότι πριν (X-1). Έτσι λοιπόν με την αντιστροφή της φόρτισης και την επιβολή της θλιπτικής φόρτισης θα έχουν μεγαλύτερο αρχικό καθαρό μήκος, κάτι το οποίο επιδρά αρνητικά στην αντοχή τους σε λυγισμό.

3^η Φάση : Πλαστικές Αρθρώσεις στο Πλαίσιο από ΟΣ : Μετά τον ανελαστικό λυγισμό ενός διαγώνιου μέλους και την εφελκυστική διαρροή του απέναντι του, το περιβάλλον πλαίσιο από ΟΣ έχει εξαντλήσει την οριακή του αντοχή (μετρηθείσα πειραματικά 14 kN, ως Σχήμα 3.5)

Με την αντιστροφή της φόρτισης το σύστημα αυτό ακολουθεί τις ίδιες φάσεις, πλην όμως η αντοχή που σε κάθε κύκλο συνεισφέρει το κάθε στοιχείο δεν είναι η ίδια με αυτή του 1^{ου} κύκλου φόρτισης. Οι τιμές που θα αποκτηθούν αναμένονται χαμηλότερες.

Το περιβάλλον πλαίσιο από Ο/Σ (Σχήμα 3.4) κατασκευάστηκε στο εργαστήριο, ενώ το σύστημα των Χ-συνδέσμων και τα ελάσματα διαμορφώθηκαν και επεξεργάστηκαν στο εργοστάσιο. Στην συνέχεια μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο και τοποθετήθηκαν – προσαρμόστηκαν στο άνοιγμα του πλαισίου.

Οι τελικές συγκολλήσεις των κολάρων στις βάσεις των στύλων και στους κόμβους δοκών-στύλων έγιναν στο εργαστήριο. Στην Εικόνα 3.8 φαίνεται, μια συνολική εμπρόσθια όψη της πειραματικής διάταξης καθώς και οι συνδέσεις των Χ-συνδέσμων με τους κόμβους δοκών-στύλων και με την βάση του στύλου.



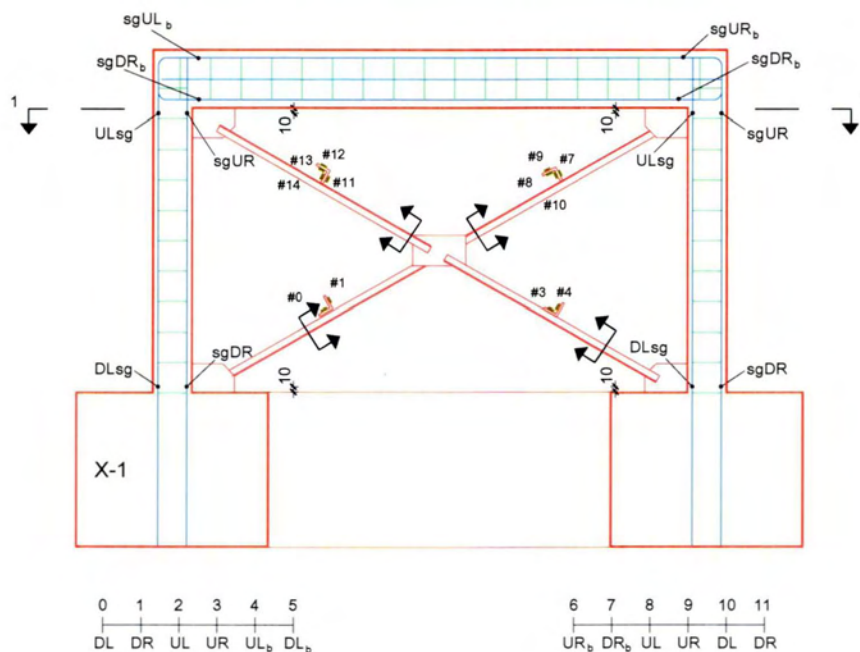
Εικόνα 3.8: Συνολική όψη πειραματικής διάταξης του πλαισίου X-4 (δεξιά), λεπτομέρεια κόμβου (αριστερά), λεπτομέρεια βάσης (κάτω).

3.5.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΟΡΓΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Για την καταγραφή των αποτελεσμάτων του πειράματος έγινε χρήση μιας πληθώρας μετρητικών οργάνων. Για την μέτρηση της οριζόντιας μετακίνησης των κόμβων του πλαισίου τοποθετήθηκαν σε κάθε κόμβο 2 LVDT's μέγιστης ικανότητας $\pm 25mm$ και $\pm 10mm$ αντίστοιχα. Για την μέτρηση του φορτίου χρησιμοποιήθηκε η δυναμοκυψέλη του ενεργοποιητή (actuator load cell). Επιπλέον, η οριζόντια μετακίνηση του πλαισίου καταγράφηκε από τον αισθητήρα μετατόπισης (Transposonic) του ενεργοποιητή, ενώ ο έλεγχος του πειράματος έγινε μέσω αυτού. Ακόμη τοποθετήθηκαν και δύο αισθητήρια καλώδια (wire transducers) κατά μήκος των διαγωνίων.

Για την μέτρηση των ανηγμένων παραμορφώσεων των συνδέσμων χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 12 μηχανοσιόμετρα (strain gauges, #SG). Η τοποθέτηση τους έγινε στο μέσον του ελευθέρου μήκους, εκτός συγκολλήσεων, της κάθε διαγωνίου διότι εκεί θεωρείται πιο πιθανή η εμφάνιση πλαστικής άρθρωσης. Στις άνω διαγώνιους τοποθετήθηκαν από τέσσερα ενώ στις κάτω από δύο.

Στο Σχήμα 3.22 απεικονίζεται η διάταξη των LVDT's και των μηχανοσιόμετρων επί του δοκιμίου. Οι αριθμοί δίπλα από κάθε μηχανοσιόμετρο καταδεικνύουν τον αριθμό καναλιού στο σύστημα απόκτησης δεδομένων (data acquisition).

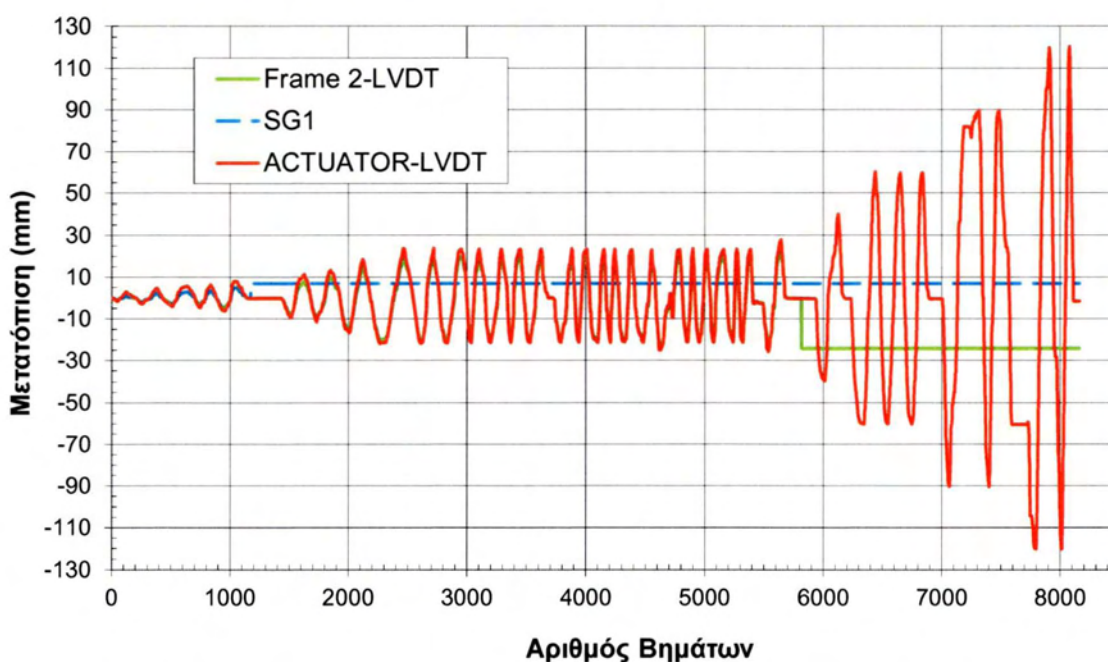


Σχήμα 3.22: Διάταξη των μηχανοσιόμετρων (strain gauges) στο 2^ο πείραμα με Χ-συνδέσμους

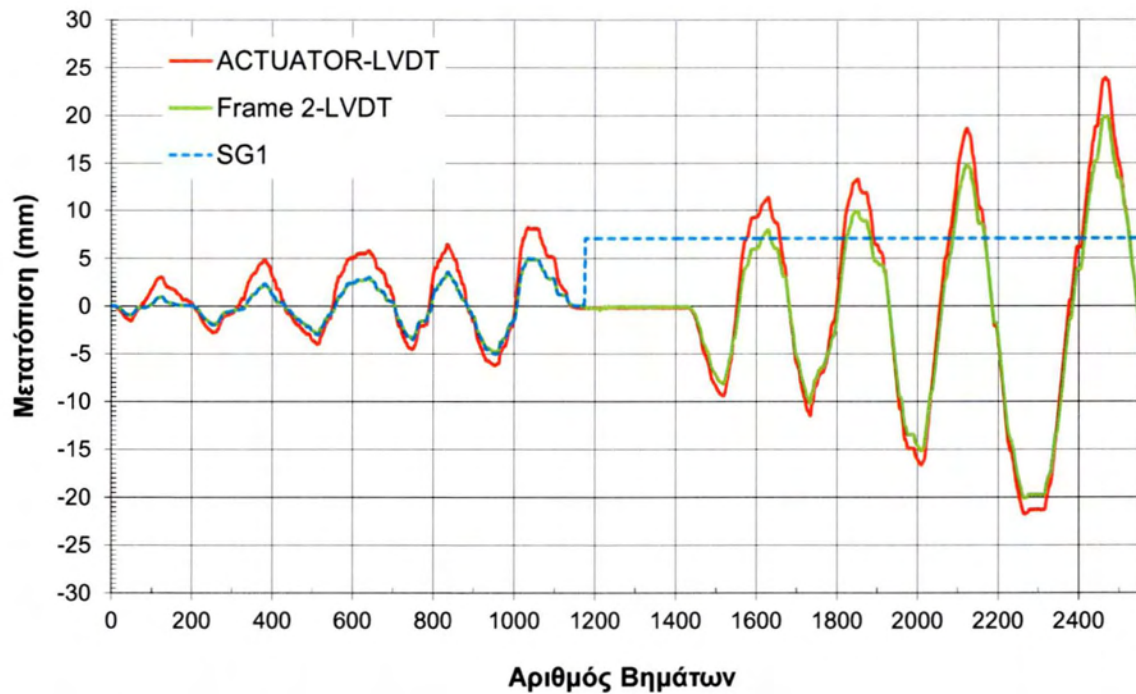
3.5.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το πρωτόκολλο ανακυκλιζόμενης φόρτισης που εφαρμόστηκε στο τρέχον πείραμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.23. Τα LVDT's "Frame 2", και SG1, με δυνατότητα $\pm 24mm$ και

$\pm 7mm$ ήταν τοποθετημένοι στο αριστερό άκρο της δοκού και οι καταγραφές τους ήταν ελεύθερες από κάποιες περιορισμένες ολισθήσεις/κενά μεταξύ της κεφαλής του ενεργοποιητή και του δοκιμίου και ήταν αυτοί βάσει των οποίων έγινε και ο έλεγχος της πειραματικής διαδικασίας. Έτσι λοιπόν οι καταγραφές του LVDT SG1 είναι αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων, έως και τον 5^ο κύκλο εύρους $\pm 5mm$ και στην συνέχεια χρησιμοποιούνται αυτές του Frame 2, εκτός των περιπτώσεων εκείνων κατά τις οποίες οι μετατοπίσεις που επιβλήθηκαν ήταν μεγαλύτερες από 24mm. Σε αυτές τις περιπτώσεις η αλλοίωση των καταγραφών του αισθητήρα μετατοπίσεων του ενεργοποιητή (actuator displacement transducer) λόγω ολισθήσεων/κενών δεν είναι σημαντική, συγκριτικά με την συνολική μετατόπιση που επιβάλλεται στο δοκίμιο, οπότε οι καταγραφές του τελευταίου χρησιμοποιήθηκαν για την παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3.23: Πρωτόκολλο πλευρικής μετατόπισης στο επίπεδο της δοκού.



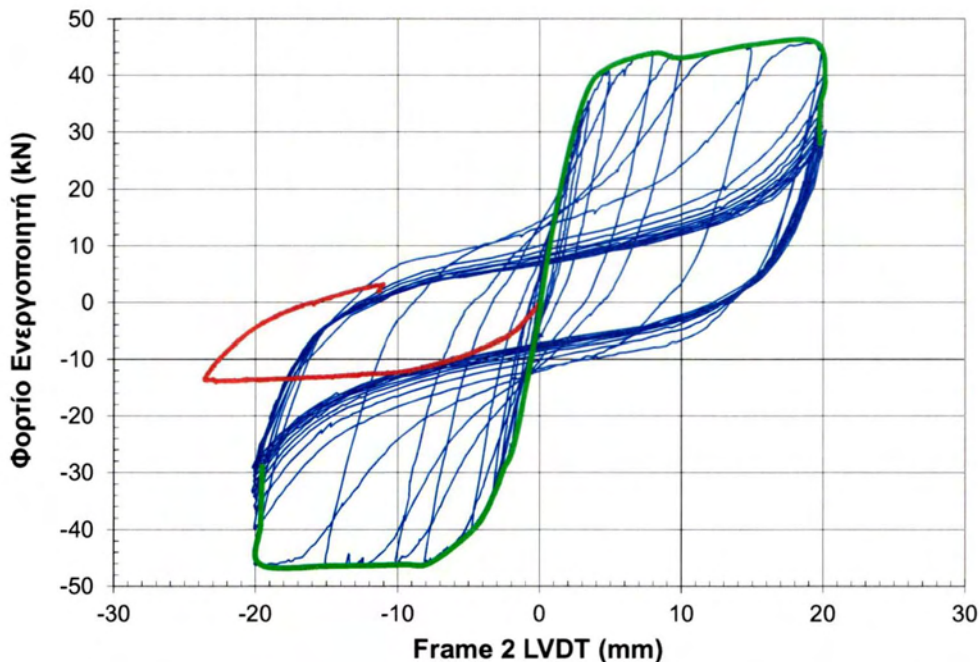
Σχήμα 3.24: Πρωτόκολλο πλευρικής μετατόπισης 9 πρώτοι κύκλοι.

Συνολικά επιβλήθηκαν 36 κύκλοι φόρτισης στο πλαίσιο από Ο/Σ πριν τον τερματισμό του πειράματος λόγω σοβαρών βλαβών τόσο σε αυτό όσο και στο σύστημα Χ-συνδέσμων, όπως φαίνεται στις Εικόνα 3.9.



Εικόνα 3.9: Κατάσταση πλαισίου στον τερματισμό του πειράματος.

Στο Σχήμα 3.25 δε απεικονίζεται η καμπύλη δύναμης (εκ της δυναμοκυψέλης του ενεργοποιητή) – μετατόπισης για τους πρώτους 19 κύκλους φόρτισης. Η κόκκινη γραμμή είναι η πειραματική απόκριση του απλού «γυμνού» πλαισίου για ½ κύκλο φόρτισης, αποκτηθείσα από άλλο πείραμα με διαφορετικό δοκίμιο. Η πράσινη γραμμή αντιπροσωπεύει την περιβάλλουσα της απόκρισης του πλαισίου Ο/Σ με τους Χ-συνδέσμους. Η μέγιστη δύναμη που συνεισφέρεται στο σύστημα από τους συνδέσμους αυτούς είναι 32 kN και από το πλαίσιο Ο/Σ 14 kN. Η τιμή της μέγιστης συνεισφοράς των συνδέσμων που βρέθηκε πειραματικά (32 kN) είναι κοντά στην αντίστοιχη τιμή που υπολογίστηκε προηγούμενα κατά την φάση προκαταρκτικού σχεδιασμού (μόνο εφελκιστική αντοχή διαγωνίου $N_{t,Rd} \cdot \cos(30.5) = 31kN$, και εφελκιστική αντοχή μιας διαγωνίου και 40% συνεισφορά της θλιβόμενης διαγωνίου $(N_{t,Rd} + 0.4xN_{b,Rd})x \cos(30.5) = (36.1 + 0.4x16.72)x0.86 \approx 37kN$).

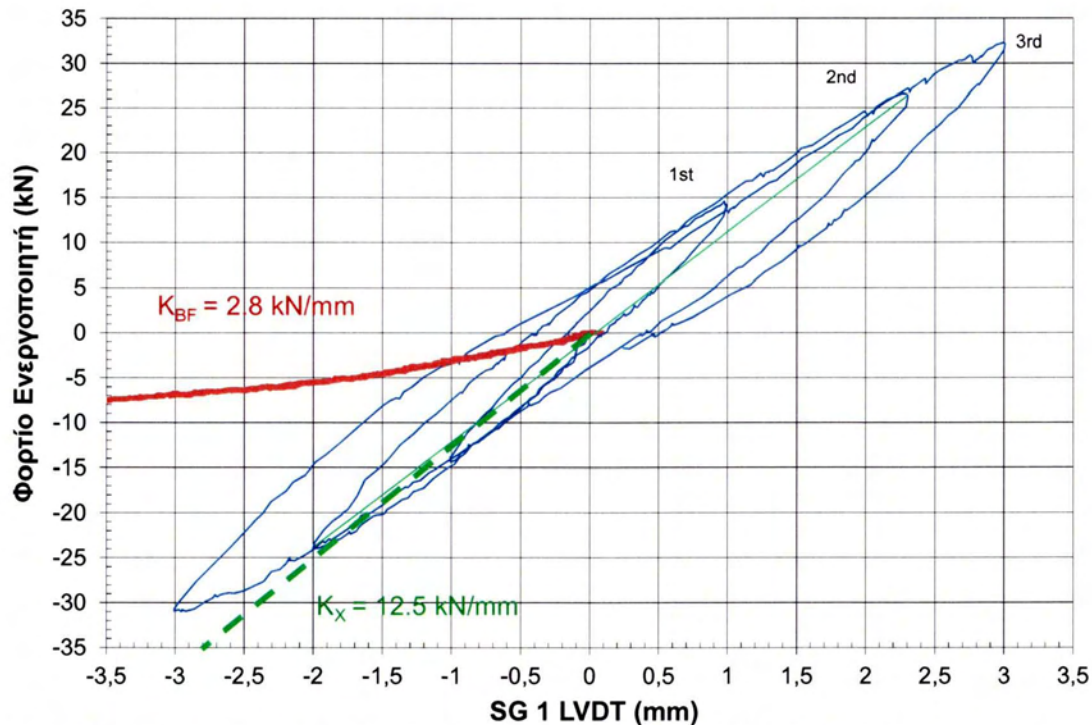


Σχήμα 3.25: Πειραματικές καμπύλες οριζόντιας μετατόπισης – πλευρικής (διατμητικής) δύναμης (α) του πλαισίου Ο/Σ με το σύστημα Χ-συνδέσμων (μπλε γραμμή) (Δοκίμιο Χ-4) και (β) του απλού πλαισίου χωρίς συνδέσμους. Η περιβάλλουσα της απόκρισης πλαισίου + Χ-σύνδεσμοι (αρχικοί 19 κύκλοι) φαίνεται με πράσινη γραμμή

Στο Σχήμα 3.26 παρουσιάζονται οι αρχικοί 3 κύκλοι φόρτισης ($\pm 1mm$, $\pm 2mm$, $\pm 3mm$) του πλαισίου Ο/Σ με τους Χ-συνδέσμους (μπλε γραμμή) μαζί με την καμπύλη δύναμης – μετατόπισης του απλού πλαισίου (κόκκινη γραμμή). Στο εν λόγω σχήμα δίδεται επίσης μια εκτίμηση της αρχικής δυσκαμψίας των δύο συστημάτων. Αφαιρώντας αυτές τις τιμές λαμβάνεται η δυσκαμψία των Χ-συνδέσμων, και βρίσκεται ίση με $9.7kN/mm$.

Κατά τη διάρκεια των τεσσάρων πρώτων κύκλων ($\pm 1mm$, $\pm 2mm$, $\pm 3mm$, $\pm 3.5mm$) οριζόντιας μετατόπισης του πλαισίου ουδεμία παραμόρφωση (εντός ή εκτός επιπέδου) των διαγωνίων

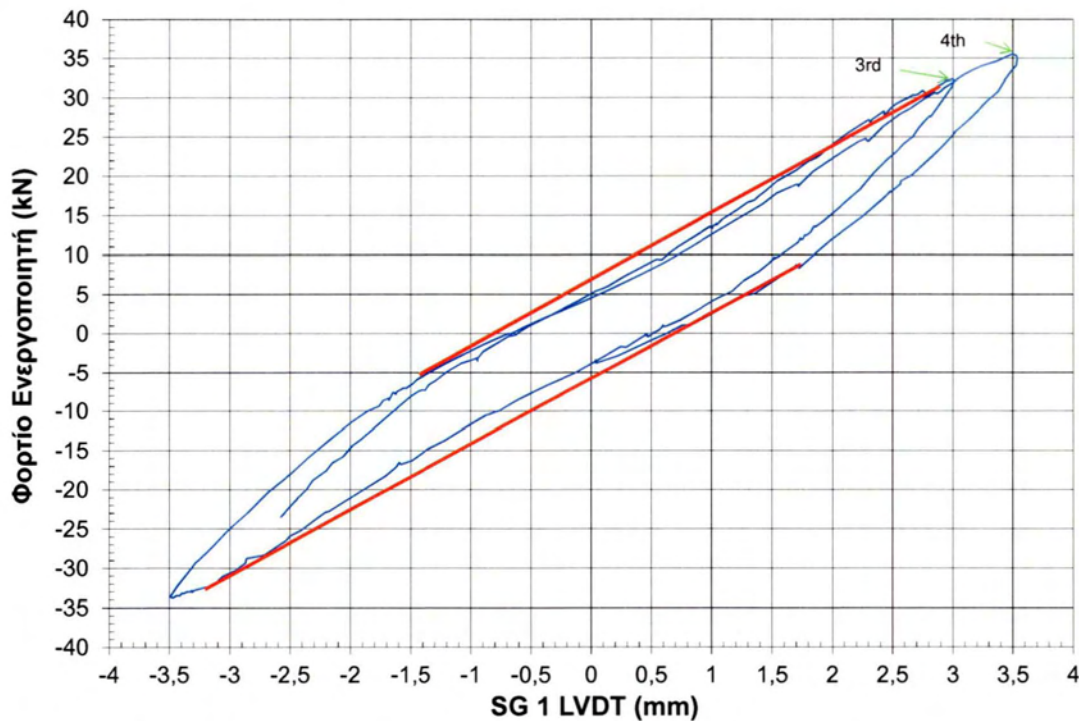
μελών ήταν ορατή. Το σύστημα πλαίσιο – σύνδεσμοι παρουσιάζει σχεδόν ελαστική συμπεριφορά για πλευρικές μετατοπίσεις έως $\pm 3.5\text{mm}$, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 3.26.



Σχήμα 3.26: Πειραματική καμπύλη πλευρικής (διαμητικής) δύναμης–οριζόντιας μετατόπισης του πλαισίου (μπλε γραμμή) για τους 3 πρώτους κύκλους, εκτίμηση δυσκαμψίας του συστήματος (πράσινη γραμμή), απλό πλαίσιο (κόκκινη γραμμή)

Κατά την παρατήρηση του πειράματος δεν διαπιστώθηκε κάποια βλάβη στο πλαίσιο από Ο/Σ, ούτε λυγισμός (εντός η εκτός επιπέδου) των διαγωνίων στοιχείων, όμως η καμπύλη δύναμης-μετατόπισης εμφανίζει μια ήπια μη γραμμικότητα στο δεύτερο μισό του 3^{ου} κύκλου εύρους $\pm 3\text{mm}$, καθώς και στον 4^ο κύκλο εύρους $\pm 3.5\text{mm}$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.27. Παρόλα αυτά όμως η απόκριση του συστήματος μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ελαστική.

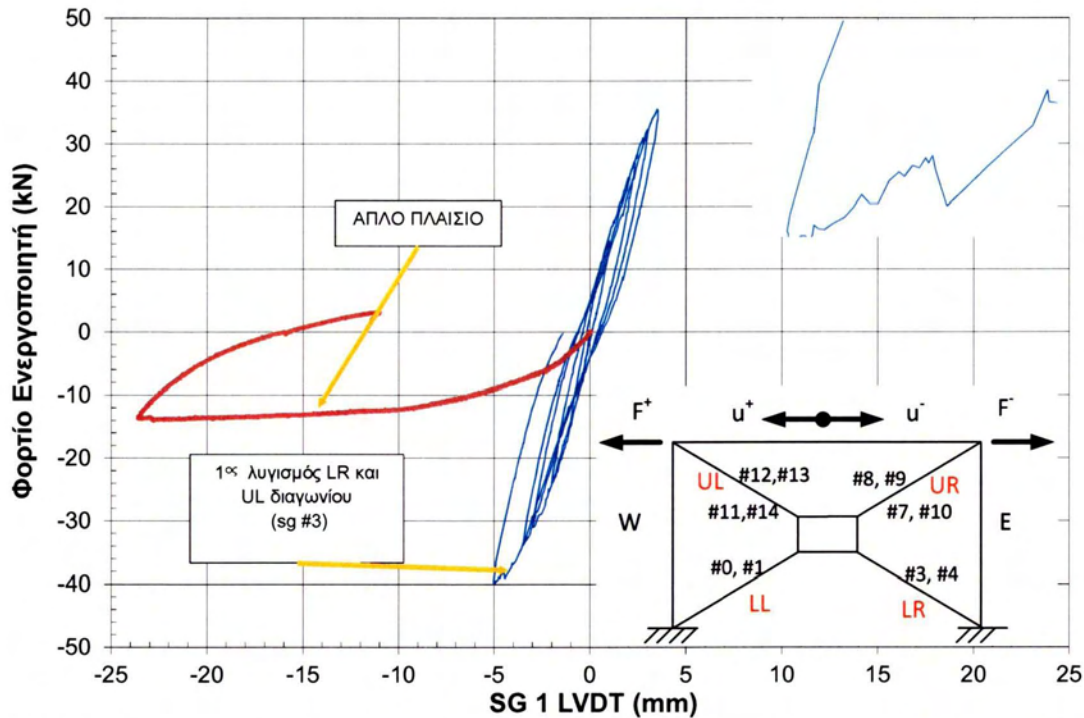
Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να οφείλεται είτε σε κάποιον λυγισμό των στοιχείων εντός επιπέδου, με πολύ μικρή όμως καμπυλότητα στον βαθμό που να μην είναι οπτικά εμφανής, είτε σε μικρορηγματώσεις του πλαισίου από Ο/Σ



Σχήμα 3.27: Πειραματική καμπύλη πλευρικής (διαμητικής) δύναμης–οριζόντιας μετατόπισης του πλαισίου στον τέταρτο κύκλο.

Όταν η πλευρική μετατόπιση έφθασε τα -4.4mm και το φορτίο τα -39kN στο πρώτο μισό του 5^{ου} κύκλου των $\pm 5\text{mm}$ το κάτω δεξιά (LR) και το άνω αριστερά (UL) μέλος των Χ-συνδέσμων παρατηρήθηκε οπτικά ότι υπέστησαν, σχεδόν ταυτόχρονα ελαστικό λυγισμό. Την στιγμή εκείνη η πλευρική δύναμη απότομα μειώθηκε περίπου κατά 1kN από -39kN σε -38kN και στην συνέχεια αυξήθηκε (λόγω της συμβολής των εφελκόμενων στοιχείων) έως τα -40kN όπου και λαμβάνει χώρα η αντιστροφή της φόρτισης σε μετατόπιση -5mm όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.28.

Πρέπει να τονιστεί ότι ο όρος ελαστικός λυγισμός προκύπτει με βάση τις οπτικές παρατηρήσεις κατά την διάρκεια του πειράματος. Παρόλα αυτά όμως η ελαστική γραμμή των στοιχείων που λύγισαν προσεγγίζει περισσότερο αυτήν του μονόπακτου στοιχείου, παρά αυτήν του αμφιαρθρωτού η οποία είναι και αυτή που έχει επιλεγεί κατά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό. Αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη πλευρική μετατόπιση εμφανίζεται κοντά στην σύνδεση των στοιχείων με το κεντρικό κομβόελασμα, πράγμα που επιβεβαιώνεται και από την παρατήρηση του πειράματος, και όχι στον μέσον αυτής όπως αναμένεται σε ένα αμφιαρθρωτο στοιχείο. Καθώς λοιπόν τα μηκυνσιόμετρα είχαν τοποθετηθεί στον μέσον του ανοίγματος κάθε στοιχείου δεν μπορούμε να αποκλείσουμε εντελώς το ενδεχόμενο εμφάνισης πλαστικής άρθρωσης στην θέση στην οποία αναπτύσσεται η μέγιστη πλευρική εκτροπή μιας και εκεί δεν έχουμε καταγραφές των ανηγμένων παραμορφώσεων.

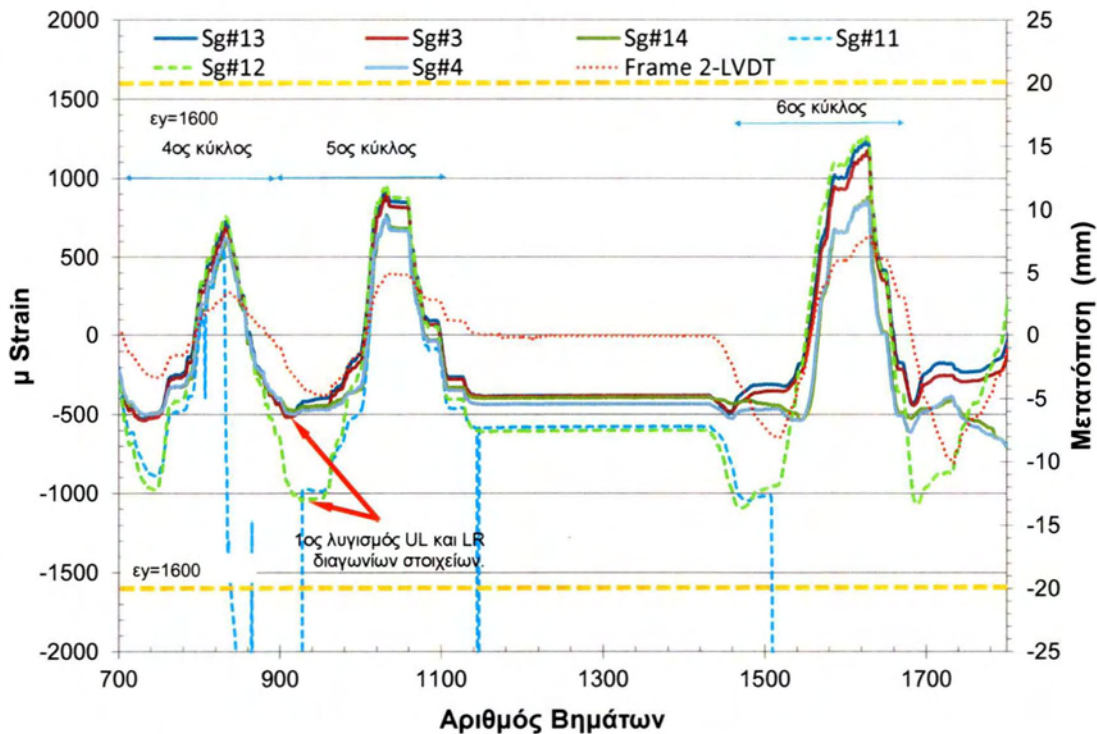


Σχήμα 3.28: Πειραματική καμπύλη πλευρικής (διατμητικής) δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης του πλαισίου έως και το πρώτο μισό του πέμπτου κύκλου, 1ος λυγισμός UL και LR στοιχείου.

Το παραπάνω φαινόμενο παρατηρήθηκε οπτικά κατά την διάρκεια του πειράματος. Επίσης καταδείχτηκε και από τις μετρήσεις των μηκυνσιομέτρων πάνω στα μέλη των Χ-συνδέσμων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.29, όπου οι παραμορφώσεις στα Sg#3,4 (LR) και στα Sg#11,12,13,14 (UL) εμφανίζουν μια απότομη αλλαγή κλίσης πριν την αντιστροφή της επιβαλλόμενης μετατόπισης.

Επίσης τούτο επιβεβαιώνεται και από τις καταγραφές των Sg των στοιχείων που βρίσκονται σε εφελκυσμό, LL και UR, τα οποία στην θέση που λαμβάνει χώρα ο λυγισμός παρουσιάζουν μια ανακούφιση πράγμα που αναμένεται λόγω και της πτώσης του φορτίου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.31.

Αναφέρουμε ξανά πως το γεγονός ότι οι παραμορφώσεις δεν ξεπερνούν αυτήν της παραμόρφωσης διαροής του χάλυβα οφείλεται είτε στο γεγονός πως ακόμα βρισκόμαστε στην ελαστική περιοχή, είτε, που είναι και πιθανότερο, πως η πλαστική άρθρωση εμφανίζεται μερικά εκατοστά μακριά από την θέση των μηκυνσιομέτρων.



Σχήμα 3.29: Πειραματικές καμπύλες καταγραφών ορισμένων sg – βήματος φόρτισης. Τα δεδομένα είναι μεταξύ του 4 και του 6 1/2 κύκλου και περιλαμβάνουν αμφότερα τα παρατηρηθέντα γεγονότα - φαινόμενα λυγισμού, ενώ φαίνεται και η παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα

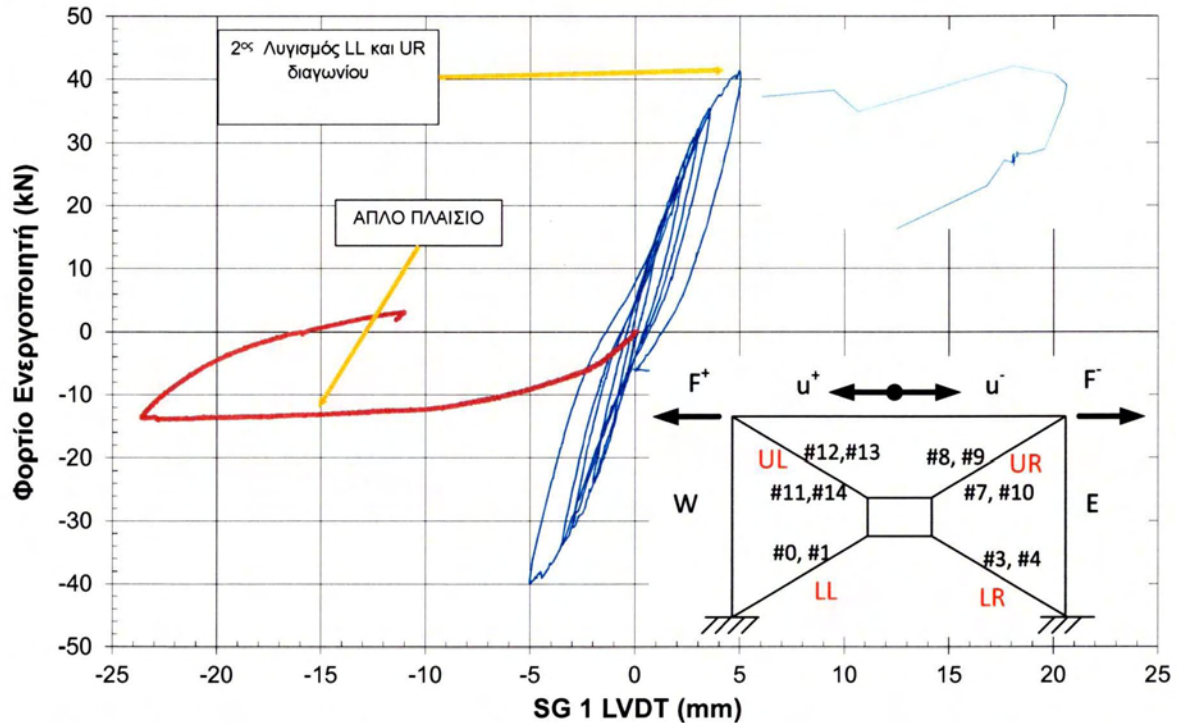
Με την αντιστροφή της φόρτισης η απέναντι διαγώνιος, UR και LL, ήταν υπό θλίψη και πριν την ολοκλήρωση του 5^{ου} κύκλου, για μετατόπιση $\approx +4.7mm$ και δύναμη $\approx +41kN$ (ως Σχήμα 3.30) τα μέλη λυγίζουν και αυτά ελαστικά σχεδόν ταυτόχρονα, και πάλι με μορφή που προσεγγίζει το μονόπακτο στοιχείο, και μάλιστα με το UR στοιχείο να αναπτύσσει εμφανώς μεγαλύτερη πλευρική μετατόπιση από το LL. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά από την απότομη πτώση του φορτίου από $\approx +41kN$ σε $\approx +40kN$ πριν την αντιστροφή της φόρτισης και την ολοκλήρωση του κύκλου.

Οι καταγραφές των Sg #7,8,9,10 του UR, παρουσίασαν μια απότομη αλλαγή κλίσης, καθώς επίσης και αυτές των Sg#0,1 του LL στοιχείου, βέβαια με πιο ήπια μορφή, και σε χαμηλότερη τιμή ανηγμένης παραμόρφωσης πράγμα που σημαίνει ότι μετά τον λυγισμό του UR μέλους το LL μέλος ανακουφίζεται. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την παρατήρηση του πειράματος κατά την οποία φάνηκε όχι μόνο σε αυτόν αλλά και σε μετέπειτα κύκλους πώς το συγκεκριμένο στοιχείο φτάνει σε πλαστική παραμόρφωση πολύ αργότερα από τα άλλα τρία. Στην συμπεριφορά του στοιχείου αυτού θα αναφερθούμε και στην συνέχεια καθώς παρουσιάζει ιδιαιτερότητα.

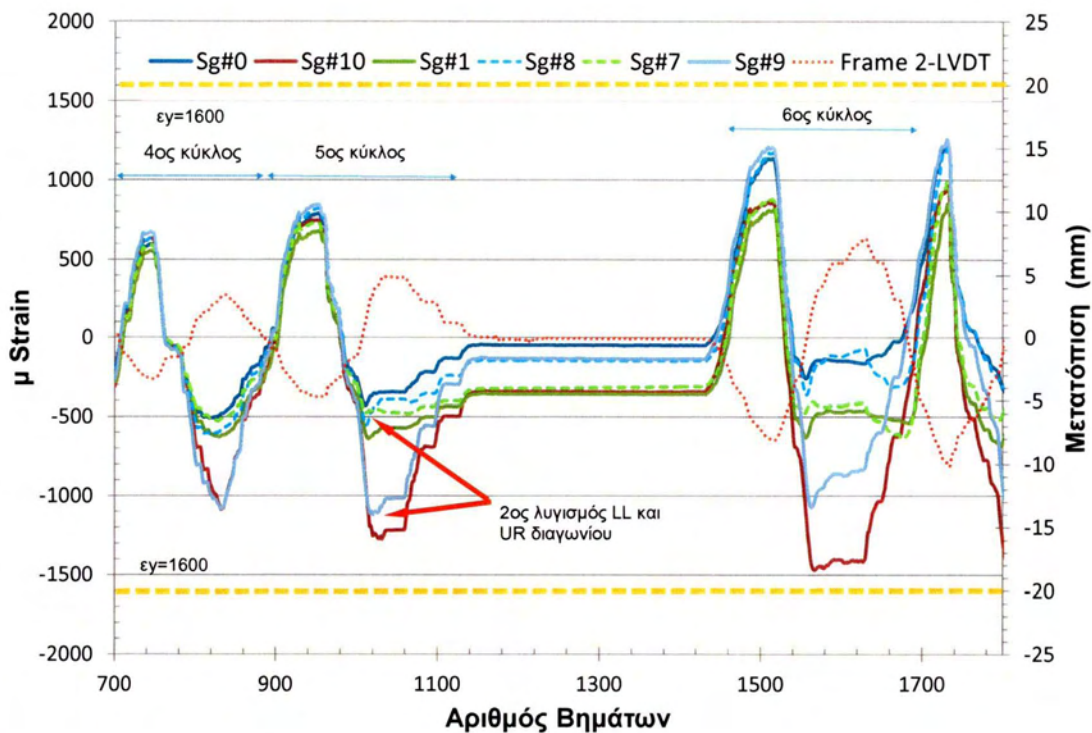
Επίσης οι καταγραφές των Sg's# 11, 12, 13, 14, 3, 4, των στοιχείων που βρίσκονταν σε εφελκυσμό, παρουσιάζουν μια απότομη πτώση (βλ. Σχήμα 3.29), γεγονός που οφείλεται στην ανακούφιση τους λόγω της πτώσης του φορτίου. Αυτή η συμπεριφορά είναι παρόμοια με

αυτή που παρατηρήθηκε κατά τον λυγισμό των UL και LR στοιχείων – γεγονός που επιβεβαίωσε τον λυγισμό του UR μέλους.

Τονίζουμε και πάλι πως ο χαρακτηρισμός του λυγισμού ως ελαστικού βασίζεται αποκλειστικά και μόνον στην οπτική παρατήρηση του πειράματος μιας και η θέση της μέγιστης πλευρικής παραμόρφωσης βρίσκεται κοντά στην σύνδεση με το κομβόελασμα και όχι στο μέσον του ελευθέρου μήκους των στοιχείων.



Σχήμα 3.30: Πειραματική καμπύλη πλευρικής (διαμητικής) δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης του συστήματος πλαίσιο + Χ-συνδέσμοι για τους πρώτους 5 κύκλους φόρτισης: 2ος λυγισμός, άνω δεξιά διαγώνιο μέλος



Σχήμα 3.31: Πειραματικές καμπύλες καταγραφών ορισμένων sg – βήματος φόρτισης. Τα δεδομένα είναι μεταξύ του 4 και του 6 κύκλου και περιλαμβάνουν αμφότερα τα παρατηρηθέντα γεγονότα - φαινόμενα λυγισμού, ενώ φαίνεται και η παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα.

Στο πρώτο μισό του επόμενου κύκλου, εύρους $\pm 8mm$, τα UL και LR στοιχεία τα οποία λυγισαν ελαστικά στο πρώτο μισό του προηγούμενου κύκλου και ευθυγραμμίστηκαν στο δεύτερο μισό του, βρίσκονται εκ νέου σε θλίψη και πριν την ολοκλήρωση του λυγίζουν ανελαστικά αυτήν την φορά και πάλι με την ίδια μορφή όπως και πριν.

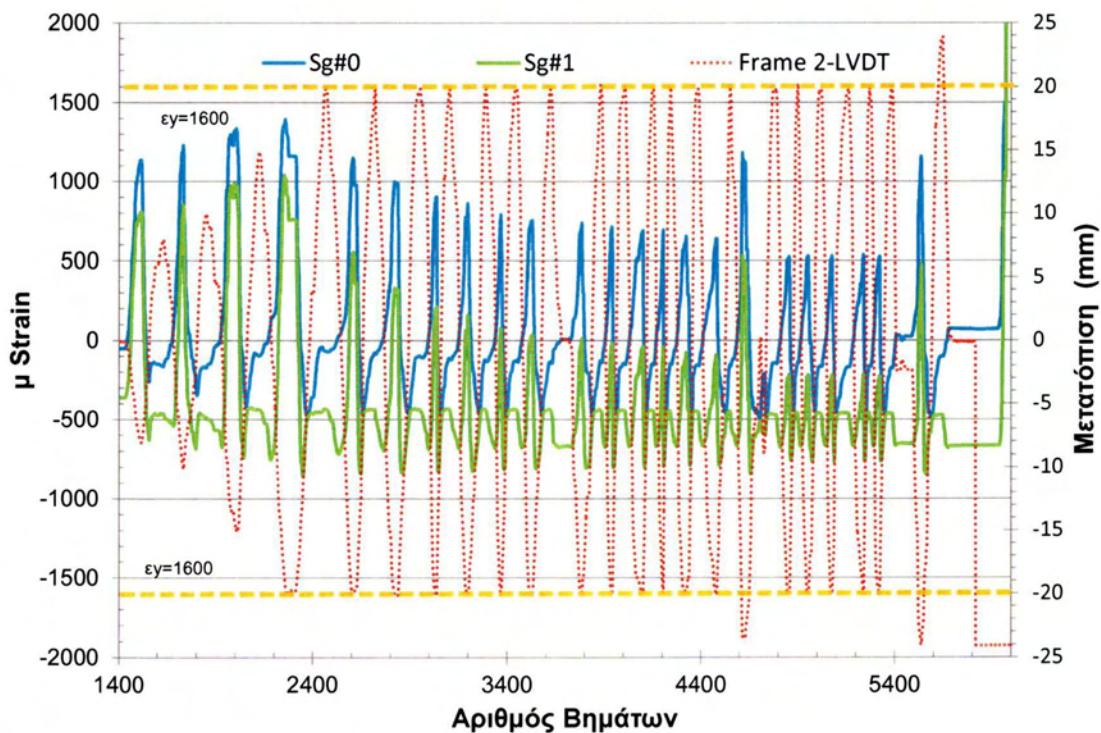
Τούτο καταδεικνύεται και από την συμπεριφορά των καταγραφών των Sg των δύο αυτών στοιχείων τα οποία εμφανίζουν την ίδια συμπεριφορά με τον προηγούμενο κύκλο, χωρίς όμως και πάλι να ξεπερνούν αυτήν της παραμόρφωσης διαρροής ($\epsilon_y=1600$ μ strains, βλ. Σχήμα 3.29). Αυτήν την φορά όμως η περιοχή που αναπτύσσεται η μέγιστη πλευρική μετατόπιση φαίνεται να μετατοπίζεται από την περιοχή γύρω από το κομβόελασμα προς το μέσον του στοιχείου (λόγω αλλαγής των συνοριακών συνθηκών από μερική πάκτωση σε άρθρωση), και στην θέση της να αναπτύσσεται πλέον εμφανώς πλαστική άρθρωση. Έτσι λοιπόν συμπεραίνουμε ότι πρόκειται πλέον για ανελαστικό λυγισμό σε θέση όμως που βρίσκεται ακόμα μακριά από τα μηκυνσιόμετρα και για αυτό τον λόγο οι καταγραφές των δείχνουν να μην ξεπερνούν αυτήν της παραμόρφωσης διαρροής.

Στο δεύτερο μισό του 6^{ου} κύκλου βρίσκονται πλέον σε θλίψη τα LL και UR στοιχεία. Πριν την ολοκλήρωση του κύκλου το UR στοιχείο λυγίζει και πάλι, αυτήν την φορά όμως ανελαστικά, αναπτύσσοντας επιπλέον πλαστική παραμόρφωση στην περιοχή κοντά στην σύνδεση με το κομβόελασμα, ενώ πλέον η μέγιστη πλευρική εκτροπή μετατοπίζεται προς το

μέσον του UR στοιχείου, προσεγγίζοντας έτσι περισσότερο την συμπεριφορά αμφιαρθρωτού στοιχείου, γεγονός που επιβεβαιώνει την δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στα άκρα του.

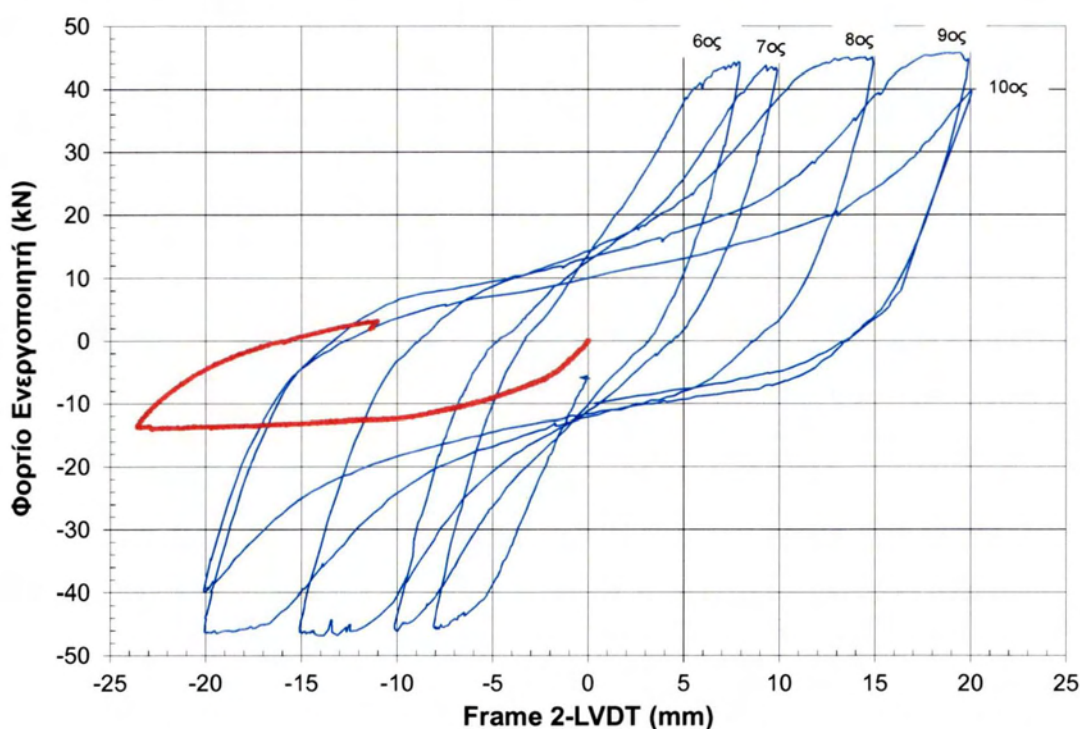
Αυτή η συμπεριφορά φάνηκε και από τις καταγραφές των Sg των στοιχείων αυτών, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.31 τα οποία εμφανίζουν την ίδια συμπεριφορά με τον λυγισμό του προηγούμενου κύκλου. Επιπρόσθετα παρατηρώντας τις καταγραφές των Sg#9,10 του άνω δεξιά στοιχείου βλέπουμε ότι πλησιάζουν κατά πολύ την τιμή της παραμόρφωσης διαρροής ($\epsilon=1500$ $\mu\text{strains}$) γεγονός που επιβεβαιώνει την δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στο άκρο του κομβοελασμάτος, και την μετατόπιση της θέσης μέγιστης πλευρικής εκτροπής προς το μέσον.

Όσον αφορά το LL στοιχείο φαίνεται πως λυγίζει και πάλι ελαστικά γεγονός που οφείλεται στην συσσώρευση των παραμορφώσεων και των βλαβών στο UR στοιχείο το οποίο αναπτύσσει εμφανώς μεγαλύτερες παραμορφώσεις, κάτι το οποίο ανακουφίζει το LL θλιβόμενο στοιχείο όπως δείχνεται και στο Σχήμα 3.32. Όπως βλέπουμε χαρακτηριστικά οι παραμορφώσεις του LL στοιχείου παρουσιάζουν ανακούφιση με την πάροδο των κύκλων τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη και μάλιστα διαρρέει σε εφελκυσμό σε πολύ μεγαλύτερη πλευρική μετατόπιση του πλαισίου από ότι τα άλλα στοιχεία, στον κύκλο εύρους $\pm 25\text{mm}$ πράγμα που επιβεβαιώνει ότι μέχρι την στιγμή εκείνη το UR συγκεντρώνει όλες τις παραμορφώσεις ενώ το LL παραμένει στην ελαστική περιοχή τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη.



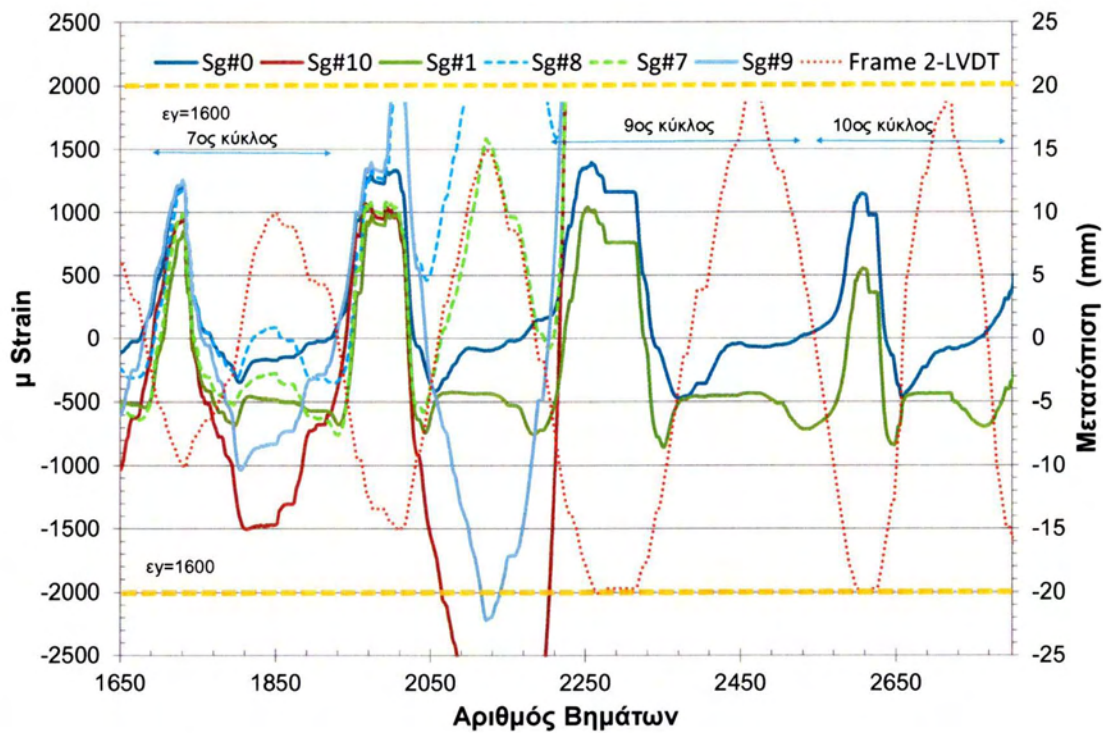
Σχήμα 3.32: Πειραματικές καμπύλες καταγραφών ορισμένων sg – βήματος φόρτισης. Τα δεδομένα είναι μεταξύ του 6 και του 28ου κύκλου.

Στον επόμενο κύκλο εύρους $\pm 10\text{mm}$ (7ος), κανένα σημαντικό φαινόμενο δεν παρατηρείται (ως Σχήμα 3.33). Τα στοιχεία που βρίσκονται σε θλίψη στο πρώτο μισό του, UL και LR, λυγίζουν και πάλι ανελαστικά προσεγγίζοντας πλέον εμφανώς το αμφιαρθρωτό μοντέλο, με έντονη μετατόπιση της θέσης μέγιστης πλευρικής εκτροπής προς το μέσον των στοιχείων (οπτική παρατήρηση). Αντίστοιχα και τα στοιχεία LL και UR στο δεύτερο μισό του κύκλου ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά με πριν, με ελαστικό λυγισμό του κάτω μισού της θλιβόμενης διαγωνίου (LL), και ανελαστικό λυγισμό του πάνω μισού της (UR), το οποίο, UR, είναι και αυτό που συγκεντρώνει όλες τις πλαστικές παραμορφώσεις. Επίσης και σε αυτό το στοιχείο (UR), η θέση της μέγιστης πλευρικής εκτροπής μετατοπίζεται εμφανώς προς το μέσον του στοιχείου.



Σχήμα 3.33: Πειραματική καμπύλη πλευρικής (διαμητικής) δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης του συστήματος πλαίσιο + Χ-σύνδεσμοι μεταξύ του 6^{ου} και 10^{ου} κύκλου.

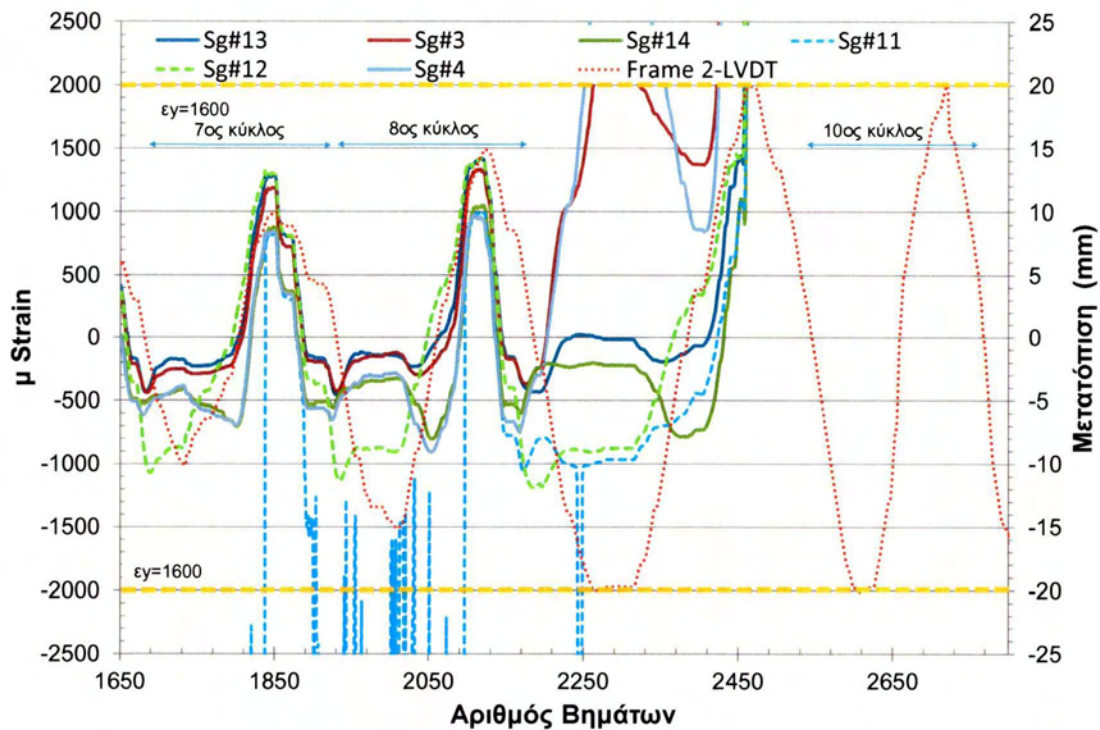
Αντίθετα στο πρώτο μισό του επόμενου κύκλου εύρους $\pm 15\text{mm}$ (8^{ος} κύκλος), το UR στοιχείο διαρρέει σε εφελκυσμό πράγμα που καταδεικνύεται τόσο από την απότομη αύξηση των Sg# 8 και 9 πέραν της τιμής διαρροής ($\epsilon_y=1600$ $\mu\text{strains}$), όπως βλέπουμε και στο Σχήμα 3.34 καθώς και από το διάγραμμα οριζόντιου φορτίου-μετακίνησης (Σχήμα 3.33) στο οποίο η τιμή της αντοχής παραμένει σταθερή στα -46kN και για μετακινήσεις από -13mm έως -15mm



Σχήμα 3.34: Πειραματικές καμπύλες καταγραφών των Sg – βήματος φόρτισης για τα LL και UR στοιχεία. Τα δεδομένα είναι μεταξύ του 7^{ου} και του 10^{ου} κύκλου.

Στο δεύτερο μισό του 9^{ου} κύκλου εύρους $\pm 20\text{mm}$ και για μετατοπίσεις μεγαλύτερες των $+18\text{mm}$ η τιμή του φορτίου παραμένει σταθερή στην τιμή των $+46\text{kN}$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.33. Αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός πως οι καταγραφές των Sg# 3, 4, 11, 12, 13, 14 των LR και UL στοιχείων, εμφανίζουν απότομη αύξηση και μάλιστα σε τιμή πολύ μεγαλύτερη της παραμόρφωσης διαρροής ($\epsilon_y=1600$ $\mu\text{strains}$), όπως βλέπουμε στο Σχήμα 3.35 μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα στοιχεία αυτά διαρρέουν σε εφελκυσμό.

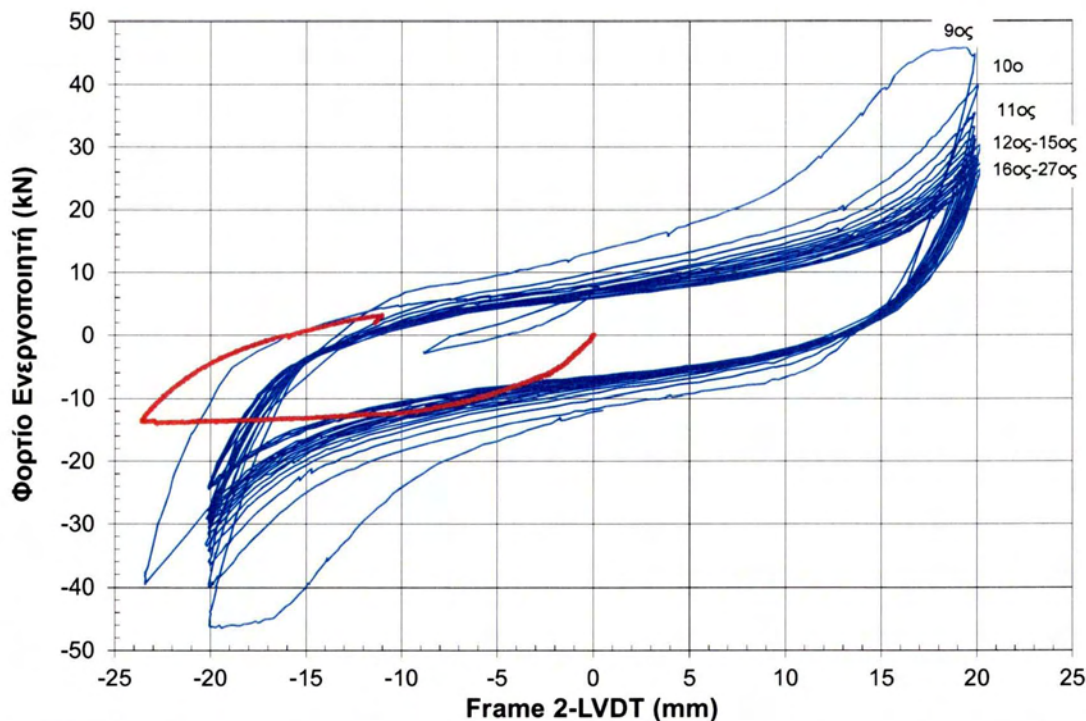
Η τιμή της μέγιστης αντοχής που βλέπουμε προς το παρόν να αναπτύσσει το σύστημα πλαίσιο - Χ σύνδεσμοι (ως Σχήμα 3.33) είναι τα $\approx 46\text{kN}$ και αντιστοιχεί στον 8^ο και 9^ο κύκλο εύρους $\pm 15\text{mm}$ και $\pm 20\text{mm}$ αντίστοιχα. Κατά την διάρκεια αυτών των κύκλων όλα τα στοιχεία, με εξαίρεση το LL, έχουν προσδώσει στο σύστημα την αντοχή τους με ανελαστικό λυγισμό των θλιβόμενων στοιχείων και εφελκυστική διαρροή των άλλων. Έτσι λοιπόν το πλαίσιο συνεισφέρει στο σύστημα αντοχή $\approx 13\text{kN}$ και οι Χ-σύνδεσμοι τα υπόλοιπα $\approx 33\text{kN}$ εκ των οποίων το μεγαλύτερο μέρος προέρχεται από την εφελκυστική διαρροή των στοιχείων ($\approx 31\text{kN}$) και ένα πολύ μικρό μέρος από τις θλιβόμενες διαγωνίους.



Σχήμα 3.35: Πειραματικές καμπύλες καταγραφών των Sg – βήματος φόρτισης για τα UL και LR στοιχεία. Τα δεδομένα είναι μεταξύ του 7ου και του 10ου κύκλου.

Στην συνέχεια από τον 9^ο έως και τον 27^ο κύκλο φόρτισης επιβάλλεται στο σύστημα πλαίσιο – Χ-σύνδεσμοι ανακυκλιζόμενη φόρτιση εύρους $\pm 20mm$. Τα στοιχεία από χάλυβα έχουν συνεισφέρει την μέγιστη αντοχή τους στο σύστημα και έτσι λοιπόν όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.36, η υστερητική συμπεριφορά του συστήματος προσεγγίζει αρκετά την απόκριση του απλού πλαισίου για μετατοπίσεις έως $\pm 15mm$. Κατά την διάρκεια αυτών των κύκλων γίνεται συσσώρευση βλαβών και παραμορφώσεων στα στοιχεία που λυγίζουν/διαρρέουν, καθώς και διεύρυνση του εύρους των ρωγμών, που έχουν εμφανιστεί ήδη από τον 5^ο κύκλο, στις βάσεις των στύλων και στους κόμβους δοκών - στύλων, στις άνω παρειές των κομβοελασμάτων σύνδεσης.

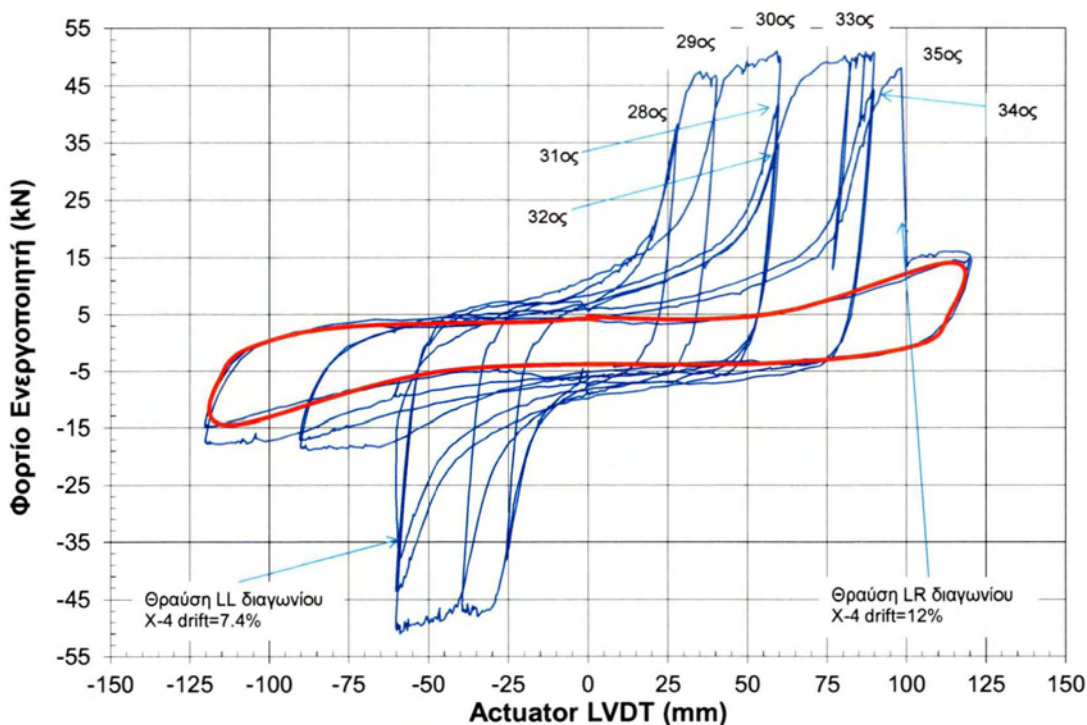
Συνεπώς με την πάροδο των κύκλων (εύρους $\pm 20mm$) έχουμε προφανή μείωση της δυσκαμψίας σε σχέση με τους αρχικούς ελαστικούς κύκλους προσεγγίζοντας όλο και περισσότερο αυτήν του απλού πλαισίου, και σταδιακή πτώση της αντοχής από $\approx 46kN$ στον 9^ο κύκλο σε $\approx 40kN$ στον 10^ο κύκλο και έπειτα σε $\approx 35kN$ στον 11^ο κύκλο, ενώ στην συνέχεια από τα $\approx 33kN$ στα $\approx 28kN$ από τον 12^ο στον 15^ο κύκλο, και τέλος σε $\approx 24kN$ στους επόμενους 11 κύκλους έως τον 27^ο (βλ. Σχήμα 3.36).



Σχήμα 3.36: Πειραματική καμπύλη πλευρικής (διατμητικής) δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης του συστήματος πλαίσιο + Χ-σύνδεσμοι μεταξύ του 9ου και 27ου κύκλου.

Στον 28^ο κύκλο εύρους $\pm 25\text{mm}$ το σύστημα φαίνεται να έχει απόθεμα αντοχής αφού, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 3.37, για την μέγιστη μετατόπιση του ενεργοποιητή φθάνει σε μεγαλύτερη αντοχή από αυτήν των προηγούμενων κύκλων δηλαδή στην τιμή των $\approx 38\text{kN}$. Το απόθεμα αντοχής αυτό προέρχεται αποκλειστικά και μόνον από τις εφελκόμενες διαγωνίους οι οποίες λόγω των μεγάλων επιβαλλόμενων μετατοπίσεων εκτιμάται πλέον ότι εισέρχονται στην περιοχή κράτυνσης (ως Σχήμα 3.6). Αξίζει επίσης να σημειώσουμε πως ειδικά στον κλάδο αποφόρτισης το σύστημα ακολουθεί σχεδόν ακριβώς την καμπύλη δύναμης του απλού πλαισίου. Επίσης πρέπει να τονίσουμε ότι από αυτόν τον κύκλο και έως τον τερματισμό του πειράματος **ο έλεγχος του αλλά και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται με βάση την μετατόπιση της κεφαλής του ενεργοποιητή και όχι πλέον το Frame 2-LVDT που ήταν τοποθετημένο στο δοκίμιο.**

Το ίδιο συμβαίνει και στους επόμενους 4 κύκλους εύρους $\pm 40\text{mm}$ και $\pm 60\text{mm}$ αντίστοιχα (29^ο, 30^ο, 31^ο, 32^ο, Σχήμα 3.37), κατά τους οποίους και πάλι μόνο τα στοιχεία που βρίσκονται σε εφελκυσμό συνεισφέρουν αντοχή στο σύστημα, καθώς βρίσκονται στην περιοχή κράτυνσης του υλικού και η οποία μάλιστα φθάνει την τιμή $\approx 47\text{kN}$ και $\approx 50\text{kN}$ για τις αντίστοιχες μέγιστες μετατοπίσεις ($\pm 40\text{mm}$ $\pm 60\text{mm}$), τιμή μεγαλύτερη αυτής που μετρήθηκε κατά την αρχική διαρροή των στοιχείων γεγονός που επιβεβαιώνει την κράτυνση του υλικού, και μετέπειτα σε $\approx 40\text{kN}$ και $\approx 33\text{kN}$ στους επόμενους δύο κύκλους των $\pm 60\text{mm}$.



Σχήμα 3.37: Πειραματική καμπύλη πλευρικής (διαμητρικής) δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης του συστήματος πλαίσιο + Χ-σύνδεσμοι μεταξύ του 27ου και 35ου κύκλου. Με κόκκινη γραμμή φαίνεται ο τελευταίος κύκλος που προσεγγίζει την συμπεριφορά του απλού πλαισίου.

Στην πρώτο μισό του 32^{ου} κύκλου εύρους $\pm 60\text{mm}$, για φορτίο $\approx 38\text{kN}$ και μετατόπιση -59mm το στοιχείο LL βρίσκεται και πάλι σε εφελκυσμό και αυτήν την φορά αστοχεί με θραύση στην παρειά της συγκόλλησης με το κομβοέλασμα της βάσης, κάτι το οποίο εξηγεί το γεγονός πως ο κλάδος της φόρτισης αρχίζει να προσεγγίζει όλο και περισσότερο την συμπεριφορά του απλού γυμνού πλαισίου και η αντοχή του συστήματος (σε οριζόντια μετατόπιση 100mm) την αντοχή του απλού πλαισίου όπως χαρακτηριστικά βλέπουμε στο σχήμα 3.37, ενώ στο δεύτερο μισό του τα στοιχεία UL και LR, μπορούν ακόμα να παραλάβουν εφελκυσμό και έτσι η αντοχή του φτάνει τα $\sim 35\text{kN}$.

Στους επόμενους κύκλους (33^{ος}, 34^{ος}) εύρους $\pm 90\text{mm}$, ο πρώτος κλάδος που αντιστοιχεί σε εφελκυσμό των LL και UR στοιχείων και πάλι προσεγγίζει όλο και περισσότερο την καμπύλη του απλού γυμνού πλαισίου. Αντίθετα στο δεύτερο μισό των κύκλων αυτών που τα στοιχεία UL και LR βρίσκονται σε εφελκυσμό και τα οποία δεν έχουν αστοχήσει ακόμα, το σύστημα φαίνεται να έχει ακόμα αποθέματα αντοχής φτάνοντας την τιμή των $\approx 51\text{kN}$ και $\approx 46\text{kN}$ αντίστοιχα για μετατόπιση $+90\text{mm}$.

Στο δεύτερο μισό όμως του 35^{ου} κύκλου των $\pm 120\text{mm}$, για μετακίνηση ίση με $+100\text{mm}$ και φορτίο $\approx 48\text{kN}$ το στοιχείο LR το οποίο βρίσκεται σε εφελκυσμό αστοχεί και αυτό με την ίδια μορφή αστοχίας όπως το LL στοιχείο, δηλαδή με κατακόρυφη θραύση στην παρειά σύνδεσης με το κομβοέλασμα. Έτσι λοιπόν ο τελευταίος κύκλος που φαίνεται με κόκκινη γραμμή είναι η καμπύλη δύναμης – μετατόπισης του απλού γυμνού πλαισίου με αντοχή αυτή που έχει παραμείνει έπειτα από τις πολύ μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις που έχει δηχθεί το πλαίσιο για οριζόντιες μετακινήσεις $\pm 120\text{mm}$ ή drift ratio = $120/825 = 15\%$.

4

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

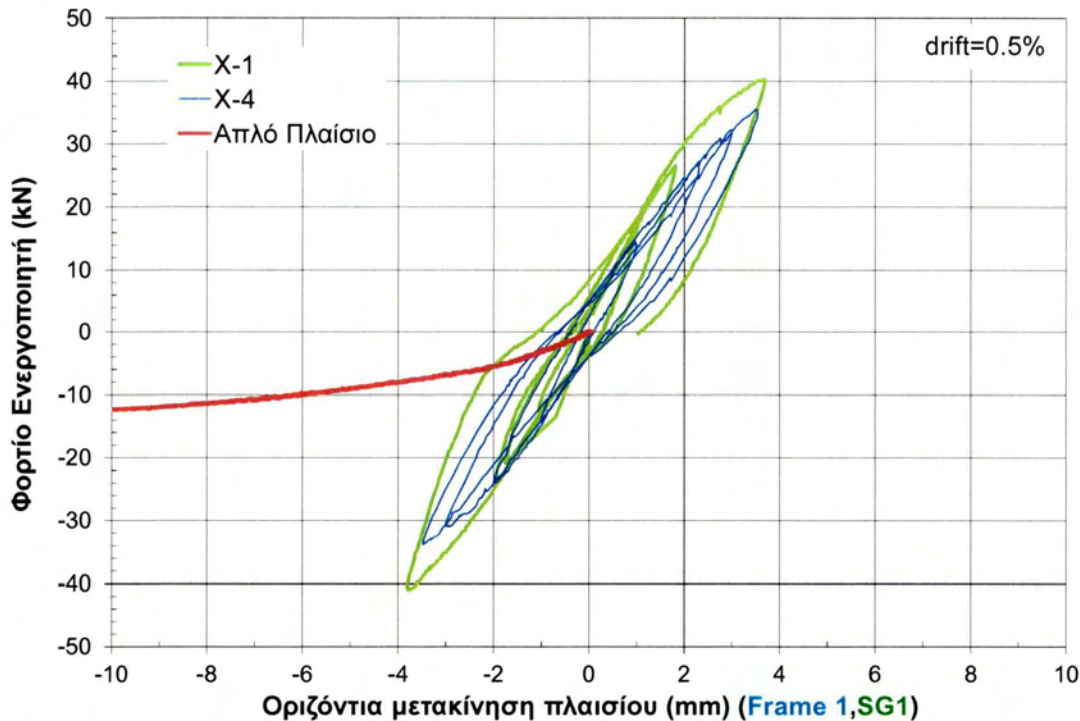
Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει λεπτομερής συγκριτική παράθεση των αποτελεσμάτων των δύο διαφορετικών πειραματικών διατάξεων X-1 και X-4, με σκοπό την διερεύνηση της αντοχής, δυσκαμψίας και πλαστιμότητας που συνεισφέρουν τα δύο διαφορετικά, ως προς τον τρόπο σύνδεσης τους με τα κομβοελάσματα στην βάση των στύλων, συστήματα Χ-συνδέσμων.

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές της αντοχής των δύο συστημάτων για τις αντίστοιχες μετακινήσεις. Τα δεδομένα αφορούν τους τέσσερις πρώτους κύκλους κατά τους οποίους η επιβαλλομένη οριζόντια μετακίνηση του πλαισίου έφθασε τα $\approx \pm 3.5\text{mm}$ ($\text{drift} = 0.5\%$). Όπως βλέπουμε στον παρακάτω πίνακα αλλά και στο Σχήμα 4.1, το σύστημα X-1 αναπτύσσει μεγαλύτερη αντοχή, σε σχέση με το σύστημα X-4. Πιο συγκεκριμένα στον 4^ο κύκλο εύρους $\approx \pm 3.5\text{mm}$ το σύστημα X-1 αναπτύσσει αντοχή -41kN για μετατόπιση $\approx -3.7\text{mm}$ και 40kN για μετατόπιση $\approx 3.6\text{mm}$ ενώ για το σύστημα X-4 οι αντίστοιχες τιμές είναι -33kN για μετατόπιση $\approx -3.4\text{mm}$ και 35kN για μετατόπιση $\approx 3.5\text{mm}$.

Πίνακας 4.1: Πειραματικά αποτελέσματα μετατόπισης – αντοχής των δύο συστημάτων για τους 4 πρώτους κύκλους.

Κύκλος	Εύρος(mm)		Μετατόπιση (mm)				Αντοχή (kN)			
	X1	X4	X1		X4		X1		X4	
1ος	1	1	-1,7	1	-1	1	-21	18	-14	14
2ος	1	2	-1	0,9	-2	2,3	-12	15	-24	27
3ος	2	3	-1,9	1,7	-3	3	-24	26	-31	32
4ος	6	3,5	-3,7	3,6	-3,4	3,5	-41	40	-33	35

Όπως βλέπουμε λοιπόν και στο Σχήμα 4.1 στο οποίο φαίνεται η υστερητική καμπύλη φόρτισης – οριζόντιας μετακίνησης των τεσσάρων πρώτων κύκλων για τα δύο συστήματα και για μετακινήσεις έως $\pm 3.5\text{mm}$ ($\text{drift} = 0.5\%$), αυτά παραμένουν ακόμα πρακτικά στην ελαστική περιοχή. Παρόλα αυτά όμως στον τελευταίο κύκλο το σύστημα X-1 εμφανίζει εμφανώς πιο έντονη στένωση/συμπύεση, και αναπτύσσει μεγαλύτερη αντοχή γεγονός που οφείλεται στον ελαστικό λυγισμό ενός από τα θλιβόμενα διαγώνια στοιχεία, σε σχέση με το σύστημα X-4 το οποίο εμφανίζει πολύ πιο ήπια στένωση, χαμηλότερες τιμές αντοχής και στο οποία δεν έχει παρατηρηθεί ακόμα λυγισμός κάποιου στοιχείου.



Σχήμα 4.1: Υστερητική καμπύλη φόρτισης - οριζόντιας μετακίνησης πλαισίου για τα δύο συστήματα X-1 και X-4 (τα δεδομένα είναι για τους 4 πρώτους κύκλους).

Στους επόμενους 5 κύκλους και για μετακίνηση έως $\approx \pm 20\text{mm}$ ($\text{drift} = 2.5\%$) τα δύο συστήματα φθάνουν την μέγιστη αντοχή τους και πάλι όμως με το σύστημα X-1 να αναπτύσσει αυτήν την τιμή σε μικρότερη μετακίνηση από το σύστημα X-4 όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.2 αλλά και στο Σχήμα 4.2.

Στο πρώτο μισό του 5^{ου} κύκλου, για μετακίνηση $\approx -5.5\text{mm}$ ($\text{drift} = 0.7\%$) και φορτίο -50kN το UL στοιχείο του συστήματος X-1 λυγίζει ανελαστικά έχοντας συνεισφέρει την μέγιστη αντοχή σε θλίψη, ενώ στο δεύτερο μισό του 5^{ου} κύκλου για μετακίνηση $\approx +4\text{mm}$ ($\text{drift} = 0.5\%$) και φορτίο 40kN το UR στοιχείο λυγίζει και αυτό ανελαστικά. Αντίθετα στο σύστημα X-4 για μετακίνηση $\approx \pm 5\text{mm}$ ($\text{drift} = 0.6\%$) και τα τέσσερα στοιχεία λυγίζουν, παραμένοντας όμως στην ελαστική περιοχή, και αναπτύσσει αντοχή $\approx \pm 40\text{kN}$ φθάνοντας έτσι χαμηλότερες τιμές αντοχής σε σχέση με το X-1.

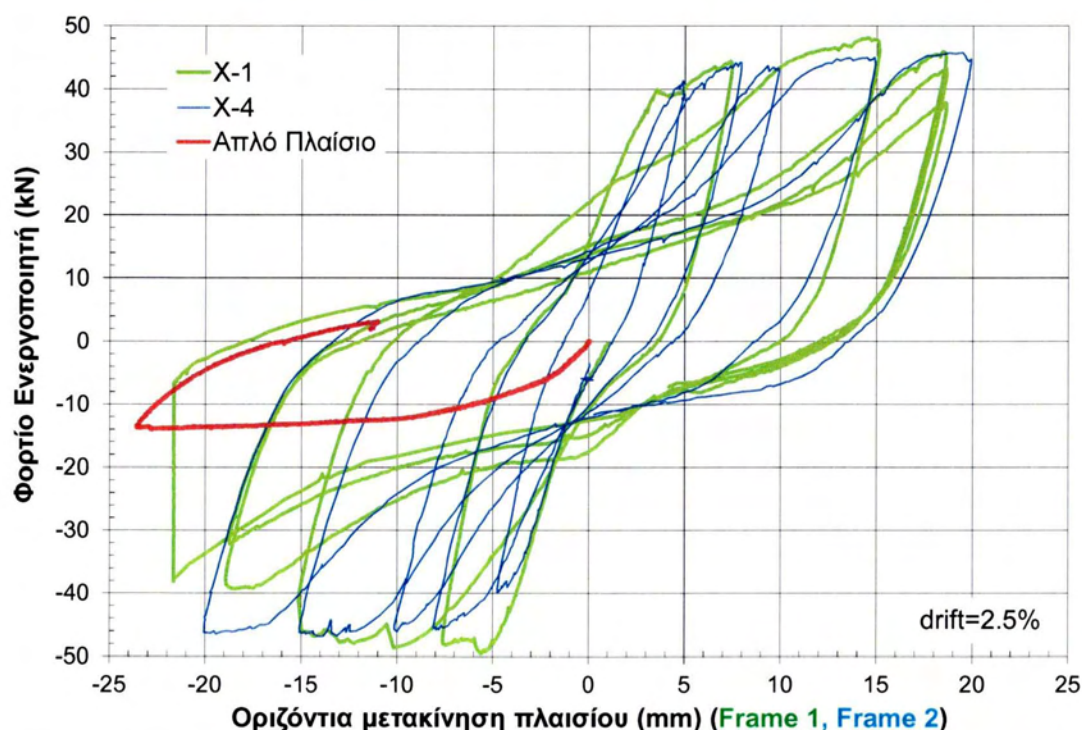
Στον 6^ο κύκλο και για μετακίνηση $\approx -10\text{mm}$ ($\text{drift} = 1.2\%$) το στοιχείο UR του X-1, διαρρέει σε εφελκυσμό ενώ εμφανίζονται ρωγμές στο σκυρόδεμα καθώς και μια κατακόρυφη ρωγή στις ραφές του κάτω αριστερά κολάρου, πράγμα που καθορίζει την συνολική συμπεριφορά του συστήματος, και σε αυτό θα αναφερθούμε διεξοδικότερα στην συνέχεια. Στην πραγματικότητα έχοντας παρατηρήσει την ρωγή στον 6^ο κύκλο το πρωτόκολλο επιβαλλόμενης οριζόντιας μετακίνησης του πλαισίου άλλαξε και οι επόμενοι 20 κύκλοι (έως τον 26^ο κύκλο) δεν ήταν συμμετρικοί, για τον ένα κλάδο δεν επιβάλλεται οριζόντια μετακίνηση μεγαλύτερη των 20mm ώστε να αποφευχθεί θραύση του κολάρου και να υπάρχει

η δυνατότητα να καταγραφεί, ακόμα και με ρηγματωμένο κολάρο, εάν θα επέλθει η θραύση του άμεσα και εάν υπάρχει δυνατότητα αξιόπιστης απόσβεσης ενέργειας για πόσους ακόμα κύκλους.

Βλέπουμε λοιπόν ότι σε μετακίνηση $\approx 10\text{mm}$ έχουν αναπτυχθεί όλα τα φαινόμενα τα οποία συνεισφέρουν αντοχή στο σύστημα δηλαδή λυγισμός των θλιβόμενων στοιχείων και εφελκυστική διαρροή των εφελκυόμενων και έτσι το σύστημα έχει αναπτύξει την μέγιστη αντοχή του, και στους επόμενους κύκλους εύρους $\approx \pm 20\text{mm}$ ($\text{drift} = 2.5\%$) αρχίζει η πτώση σε αντοχή και δυσκαμψία λόγω συσσώρευσης πλαστικών παραμορφώσεων, από $\approx 48\text{kN}$ κατά την εφελκυστική διαρροή του στοιχείου σε $\pm 38\text{kN}$ στο τέλος του 9^{ου} κύκλου όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2 αλλά και στον Πίνακα 4.2

Πίνακας 4.2 Πειραματικά αποτελέσματα μετατόπισης – αντοχής των δύο συστημάτων από τον 5ο έως τον 9ο κύκλο.

Κύκλος	Εύρος(mm)		Μετατόπιση (mm)				Αντοχή (kN)			
	X1	X4	X1		X4		X1		X4	
5ος	8	5	-7,6	7,4	-5	5	-48	44	-40	41
6ος	15	8	-15	15,5	-8,2	7,9	-46	48	-46	44
7ος	20	10	-20	18,5	-10,2	9,8	-38	46	-48	43
8ος	20	15	-18,6	18,5	-15	15	-32	43	-46	45
9ος	20	20	-21,8	18,5	-20	19,5	-38	38	-46	46



Σχήμα 4.2: Υστερητική καμπύλη φόρτισης - οριζόντιας μετακίνησης πλαισίου για τα δύο συστήματα X-1 και X-4 (τα δεδομένα είναι μεταξύ 5ου και 9ου κύκλου).

Αντίθετα τώρα στο σύστημα X-4 κατά την διάρκεια του 6^{ου} κύκλου των $\approx \pm 8mm$ ($drift = 1\%$) η αντοχή φθάνει πλέον την τιμή $-46kN$ για μετατόπιση $\approx -8.2mm$ και $44kN$ για μετατόπιση $\approx 7.9mm$, περίπου δηλαδή τις ίδιες τιμές με αυτές του συστήματος X-1, καθώς σε αυτόν τον κύκλο παρατηρείται ο ανελαστικός λυγισμός των 3 στοιχείων (UL, UR και LR) του συστήματος X-4. Επιπλέον η εφελκυστική διαρροή των στοιχείων του X-4 συμβαίνει σε μεγαλύτερες μετακινήσεις, συγκριτικά με το X-1, αφού το στοιχείο UR διαρέει σε μετακίνηση $-13mm$ ($drift = 1.6\%$) διατηρώντας σταθερό το φορτίο στα $-46kN$ ενώ τα UL και LR διαρρέουν για μετατοπίσεις μεγαλύτερες των $+18mm$ ($drift = 2.2\%$) κατά τις οποίες η τιμή του φορτίου παραμένει σταθερή στην τιμή των $+46kN$

Με βάση λοιπόν τα Σχήματα 4.1 και 4.2 και την ανάλυση των στοιχείων των Πινάκων 4.1 και 4.2 προκύπτουν 3 συμπεράσματα στα οποία αξίζει να αναφερθούμε αναλυτικά. Αρχικά λοιπόν βλέπουμε πως τα δύο συστήματα έχουν κατά προσέγγιση περίπου την ίδια αρχική δυσκαμψία ενώ κατά τον σχεδιασμό εκτιμήθηκε πως το σύστημα X-4 λόγω του πλήρους περιορισμού των μετακινήσεων στα κολάρα της βάσης θα έχει μεγαλύτερη δυσκαμψία από το σύστημα X-1, στο οποίο τα κολάρα στην βάση είναι ελεύθερα να ολισθαίνουν καθ' ύψος του στύλου αλλά και να αναπτύξουν περιορισμένες στροφές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως οι επιβαλλόμενες μετακινήσεις, στους αρχικούς κύκλους κατά τους οποίους έχουμε ελαστική συμπεριφορά, είναι ακόμα σχετικά μικρές ώστε να μπορέσει να εκδηλωθεί αυτή η διαφορετική συμπεριφορά.

Επίσης παρατηρούμε ότι τα δύο συστήματα αναπτύσσουν την ίδια περίπου αντοχή για μετακινήσεις έως $\pm 20mm$ ($drift = 2.5\%$) όπως και αναμενόταν με την διαφορά όμως ότι το σύστημα X-1 αναπτύσσει μεγαλύτερες τιμές αντοχής σε σχέση με το σύστημα X-4 αντίθετα με αυτό που αναμενόταν. Υπενθυμίζουμε ότι ο πλήρης περιορισμός των κολάρων της βάσης οδηγεί σε μεγαλύτερες εφελκυστικές παραμορφώσεις και έτσι σε μεγαλύτερο αρχικό μήκος του εκάστοτε στοιχείου που στην συνέχεια θα βρεθεί σε θλίψη γεγονός που εκτιμήθηκε ότι θα οδηγήσει τα στοιχεία σε λυγισμό για μικρότερες μετακινήσεις από ότι ο σύστημα X-1. Παρόλο που η εκτίμηση αυτή είναι θεωρητικά σωστή στην πραγματικότητα η σχετική ελευθερία μετακίνησης του κολάρου στην βάση των στύλων για το σύστημα X-1 ναι μεν μπορεί να έπαιξε ευεργετικό ρόλο στην θλίψη των στοιχείων, όμως ταυτόχρονα είχε αρνητική επίδραση στα στοιχεία που βρίσκονται σε εφελκυσμό.

Κατά τον εφελκυσμό λοιπόν των στοιχείων η οριζόντια πλάκα πάνω στην οποία είναι συγκολλημένο το κομβόελασμα κάμπτεται περί την κάτω παρειά του κολάρου επιβαρύνοντας έτσι τις ραφές του κολάρου σε τέτοιο μάλιστα βαθμό ώστε κατά την διάρκεια των πρώτων κύκλων οι μέγιστες παραμορφώσεις να συγκεντρώνεται εκεί οδηγώντας έτσι στην εμφάνιση κατακόρυφων ρωγμών στις ραφές των κολάρων (6^{ος} κύκλος φόρτισης), πράγμα που οδηγεί το σύστημα πιο γρήγορα σε μεγάλες τιμές αντοχής, χωρίς να επιτρέπει την διαρροή όλων των στοιχείων. Επίσης όπως θα δούμε και παρακάτω ο μηχανισμός αστοχίας που αναπτύσσεται στο σύστημα X-1 οφείλεται σε αυτές τις ρωγμές των κολάρων γεγονός που τελικά θα οδηγήσει σε μικρότερες τιμές πλαστιμότητας και αντίστοιχων αντοχών σε σχέση με το

σύστημα X-4. Σε αυτό το σύστημα τα κολάρα στην βάση παραμένουν ανέπαφα μέχρι και την ολοκλήρωση του πειράματος. Επιτρέπουν έτσι σε όλα τα διαγώνια στοιχεία να φθάσουν στην διαρροή και μάλιστα για τόσο μεγάλες μετατοπίσεις στις οποίες το υλικό μπαίνει στην περιοχή κράτυνσης συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της αντοχής και πέραν της αποκτηθείσας από τους πρώτους κύκλου όπως θα δούμε και στην συνέχεια.

Στην συνέχεια, και για τους επόμενους κύκλους ακολουθεί επαναλαμβανόμενη φόρτιση του πλαισίου με επιβαλλόμενη μετατόπιση $\pm 22mm$ ($drift = 2.7\%$) για το σύστημα X-1 και $\pm 20mm$ ($drift = 2.5\%$) για το σύστημα X-4. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει τα διαγώνια στοιχεία από χάλυβα και για τα δύο συστήματα έχουν προσδώσει την μέγιστη τιμή αντοχής που αντιστοιχεί σε λυγισμό της μίας διαγωνίου και εφελκυστική διαρροή της άλλης όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4.3 αλλά και στον Πίνακα 4.3.

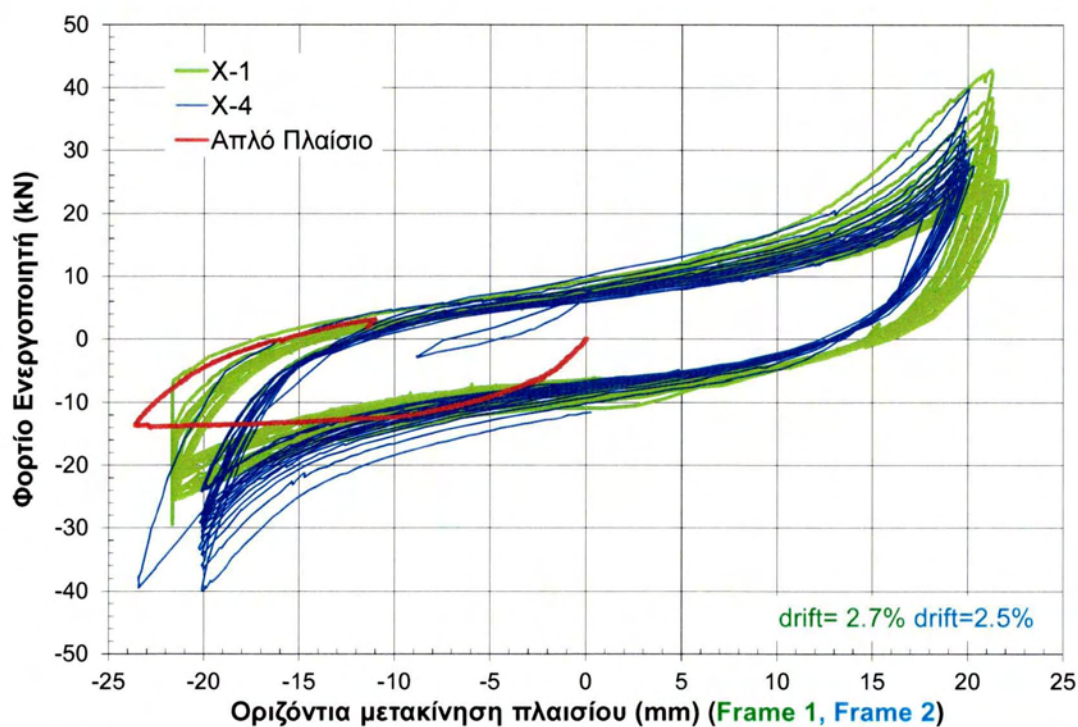
Έτσι λοιπόν στους κύκλους αυτούς βλέπουμε ξεκάθαρα τον εξαιρετικά δυσμενή ρόλο που παίζει η ρωγμή στο αριστερό κολάρο της βάσης του συστήματος X-1. Το σύστημα παρουσιάζει εμφανώς μειωμένη δυσκαμψία στον πρώτο κλάδο της φόρτισης κάθε κύκλου που αντιστοιχεί σε εφελκυσμό της διαγωνίου που συνδέεται με το εν λόγω κολάρο, τόσο σε σχέση με τον δεύτερο κλάδο στον οποίο εφελκύεται το δεξί κολάρο όσο και σε σύγκριση με το σύστημα X-4.

Το ίδιο συμβαίνει και με την αντοχή του συστήματος X-1 η οποία στον 9^ο κύκλο έχει φθάσει την τιμή των $\pm 38kN$ και στην συνέχεια παρουσιάζει απότομη πτώση στα $-24kN$ την οποία διατηρεί με μικρές διακυμάνσεις μέχρι και τον 19^ο κύκλο (για τον πρώτο κλάδο φόρτισης), όπου και αστοχεί πλέον το αριστερό κολάρο και η αντοχή πέφτει στα $-20kN$ στον 25^ο κύκλο. Αντίθετα στον δεύτερο κλάδο της φόρτισης (εφελκυσμός κάτω δεξιού κολάρου), λόγω της συμβολής της διαγωνίου που βρίσκεται σε εφελκυσμό η πτώση της αντοχής είναι σταδιακή από $\pm 38kN$ στον 9^ο κύκλο σε $24kN$ στον 25^ο κύκλο και οφείλεται στην εμφάνιση ρωγμών στις ραφές και του δεξιού κολάρου με περιορισμένο βέβαια εύρος σε σχέση με αυτήν του αριστερού κολάρου.

Αντίθετα το σύστημα X-4 παρουσιάζει πολύ πιο ομαλή συμπεριφορά και στους δύο κλάδους φόρτισης, λόγο του ότι τα κολάρα στις βάσεις των στύλων έχουν παραμείνει ανέπαφα και συνεπώς όλα τα διαγώνια στοιχεία συνεισφέρουν ακόμα όταν βρίσκονται σε εφελκυσμό. Έτσι λοιπόν παρουσιάζει σημαντικά πιο ήπια πτώση αντοχής σε σχέση με το σύστημα X-1 από τα $\pm 46kN$ στον 9^ο κύκλο σε $\pm 25kN$ στον 25^ο κύκλο γεγονός που οφείλεται στην συσσώρευση πλαστικών παραμορφώσεων στα διαγώνια στοιχεία από χάλυβα καθώς και στις ρωγμές στο σκυρόδεμα στις άνω παρειές των κομβοελασμάτων, οι οποίες εμφανίζονται στον 5^ο κύκλο και στην συνέχεια διευρύνονται.

Πίνακας 4.3: Πειραματικά αποτελέσματα μετατόπισης – αντοχής των δύο συστημάτων από τον 10^ο έως τον 25^ο κύκλο.

Κύκλος	Εύρος(mm)		Μετατόπιση (mm)				Αντοχή (kN)			
	X1	X4	X1		X4		X1		X4	
10ος	22	20	-19,5	21,3	-20	20	-21	43	-40	40
11ος	22	20	-21,5	21,3	-20	20	-25	39	-36	36
12ος	22	20	-21,5	21,3	-20	20	-25	36	-34	33
13ος	22	20	-21,7	21,3	-20,5	20	-25	35	-33	32
14ος	22	20	-21,5	21,5	-20	20	-24	34	-32	31
15ος	22	20	-21,5	21,3	-20	20	-24	31	-30	30
16ος	22	20	-21,7	21,3	-20	20	-24	30	-30	30
17ος	22	20	-21,7	21,3	-20	20	-23	28	-30	29
18ος	22	20	-21,5	21,3	-20	20	-22	27	-29	28
19ος	22	20	-21,7	21,3	-20	20	-24	26	-29	28
20ος	22	20	-21,5	21,3	-20	20	-21	25	-28	27
21ος	22	20	-21,7	21,3	-20	20	-22	25	-28	27
22ος	22	20	-21,7	22	-23,5	20	-21	25	-39	26
23ος	22	20	-21,7	21,5	-20	20,5	-20	25	-24	28
24ος	22	20	-21,7	22,1	-20	20	-20	25	-24	26
25ος	22	20	-21,5	21,5	-20	20	-20	24	-24	26



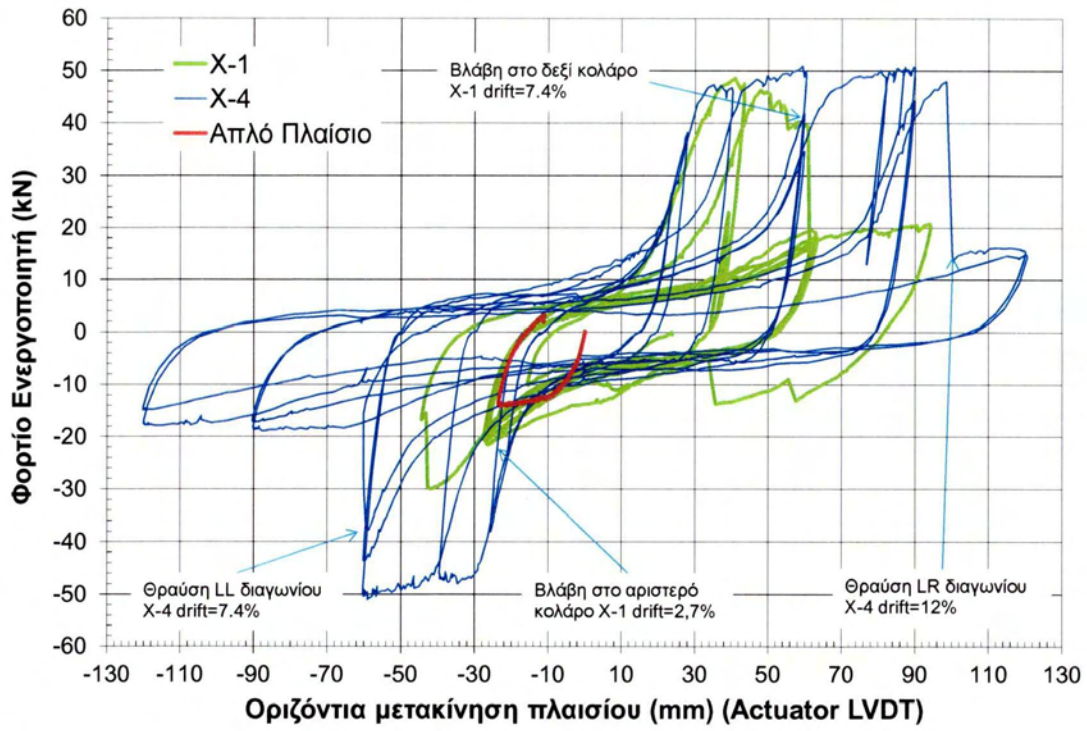
Σχήμα 4.3: Υστερητική καμπύλη φόρτισης - οριζόντιας μετακίνησης πλαισίου για τα δύο συστήματα X-1 και X-4 (τα δεδομένα είναι μεταξύ 10ου και 25ου κύκλου).

Ακολουθούν 7 κύκλοι μέχρι τον τερματισμό του πειράματος X-1 και 11 κύκλοι μέχρι τον τερματισμό του πειράματος X-4 όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4.4 και στον Πίνακα 4.4. Το σύστημα X-1 παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με πριν. Στον πρώτο κλάδο φόρτισης η αντοχή από τα $-10kN$ του 26^{ου} κύκλου των $-17mm$ ($drift = 2.1\%$) αυξάνεται σε $-22kN$ στον 27^ο κύκλο των $-27mm$ ($drift = 3.3\%$) και έπειτα μειώνεται και πάλι στα $-20kN$ στον 31^ο κύκλο και πάλι των $-27mm$ ενώ στον 32^ο και τελευταίο κύκλο φθάνει τα $-30kN$. Στον δεύτερο κλάδο φόρτισης, στον οποίον βρίσκεται σε εφελκυσμό το δεξί κολάρο και συνεπώς μπορούν ακόμα να συνεισφέρουν τα εφελκυσμένα στοιχεία, η αντοχή από τα $47kN$ του 26^{ου} κύκλου των $44mm$ ($drift = 5.4\%$) πέφτει σε $39kN$ στον επόμενο κύκλο των $61mm$ ($drift = 7.4\%$), στον οποίον πλέον αστοχεί και το δεξί κολάρο με θραύση της ραφής, και έτσι στην συνέχεια η αντοχή πέφτει περίπου στα $21 kN$ στον τελευταίο κύκλο των $95mm$ ($drift = 11.5\%$).

Αντίθετα το σύστημα X-4 παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά η οποία τονίζουμε και πάλι πως οφείλεται στο γεγονός ότι τα κολάρα έχουν παραμείνει ανέπαφα και έτσι όλα τα στοιχεία μπορούν να παραλάβουν εφελκυσμό στους αντίστοιχους κλάδους. Όπως βλέπουμε χαρακτηριστικά στο Σχήμα 4.4 και στον Πίνακα 4.4, η αντοχή του συστήματος αυξάνει από $\pm 25kN$ στον 26^ο κύκλο εύρους $\pm 20mm$ ($drift = 2.5\%$) σε $\pm 50kN$ στον 30^ο κύκλο των $\pm 60mm$ ($drift = 7.4\%$) γεγονός που επιβεβαιώνει πως οι παραμορφώσεις των στοιχείων είναι τέτοιες ώστε αυτά να μπαίνουν στην περιοχή κράτυνσης. Στον 32^ο κύκλο για φορτίο $-38kN$ και μετατόπιση $-60mm$ αστοχεί σε θραύση το LL στοιχείο και έτσι στον πρώτο κλάδο των επόμενων κύκλων η αντοχή πέφτει σταδιακά ως τα $-15kN$ και μετατόπιση $-120mm$ ($drift = 15\%$) ενώ στον δεύτερο κλάδο της φόρτισης η αντοχή αυξάνεται ακόμα ως τα $51kN$ στον 33^ο κύκλο όπου να αστοχήσει σε θραύση και το LR στοιχείο για φορτίο $48kN$ και μετατόπιση $-98mm$ ($drift = 12\%$) στον 45^ο κύκλο, ενώ ο τελευταίος κύκλος πριν την ολοκλήρωση του πειράματος προσεγγίζει την καμπύλη του απλού πλαισίου για τις αντίστοιχες μετατοπίσεις.

Πίνακας 4.3: Πειραματικά αποτελέσματα μετατόπισης – αντοχής των δύο συστημάτων από τον 25ο έως τον τερματισμό του πειράματος..

Κύκλος	Εύρος(mm)		Μετατόπιση (mm)				Αντοχή (kN)			
	X1	X4	X1		X4		X1		X4	
26ος	40	20	-17	43,5	-20	20	-10	47	-24	26
27ος	60	20	-27	61	-20	20	-22	39	-24	25
28ος	60	25	-27	63	-24	24	-21	19	-38	38
29ος	60	40	-28	63	-39,5	40	-21	18	-47	47
30ος	60	60	-28	63	-60	60	-20	17	-50	50
31ος	60	60	-27	61	-60	60	-20	16	-44	42
32ος	90	60	-43	95	-59	60	-30	21	-38	34
33ος	0	90	0	0	-90	90	0	0	-19	51
34ος	0	90	0	0	-90	90	0	0	-17	46
35ος	0	120	0	0	-120	120(98)	0	0	-17	15(48)
36ος	0	120	0	0	-120	120	0	0	-15	15

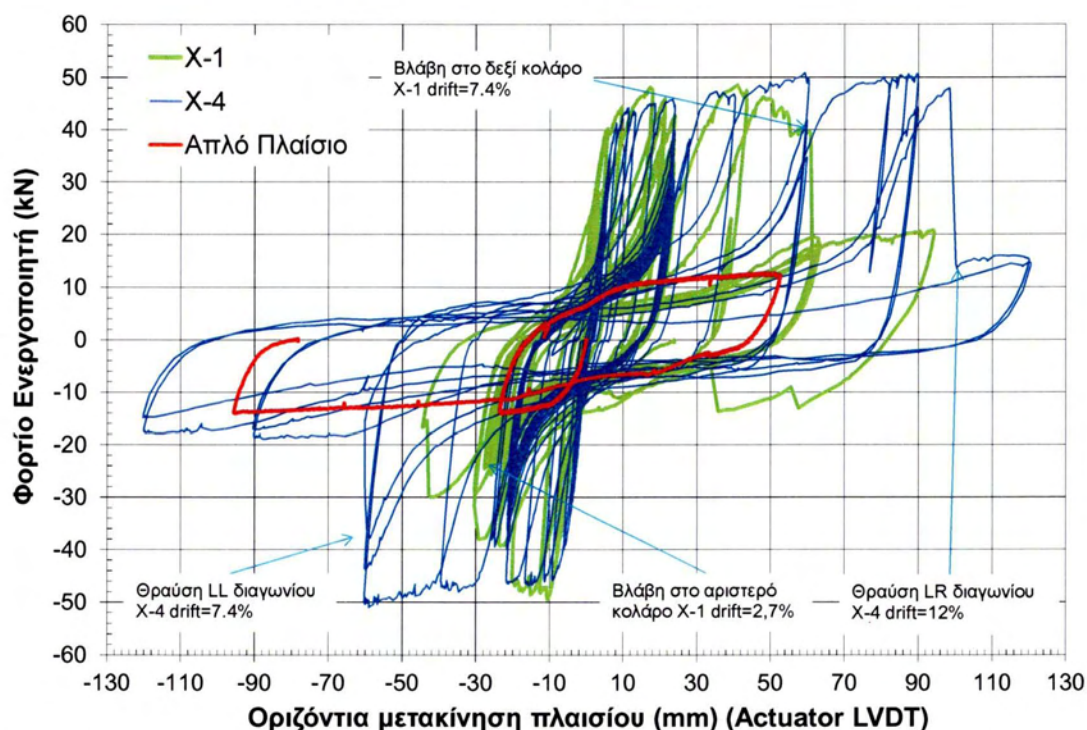


Σχήμα 4.4: Υστερητική καμπύλη φόρτισης - οριζόντιας μετακίνησης πλαισίου για τα δύο συστήματα X-1 και X-4 (τα δεδομένα είναι μεταξύ 25ου κύκλου και τερματισμού του πειράματος).

5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

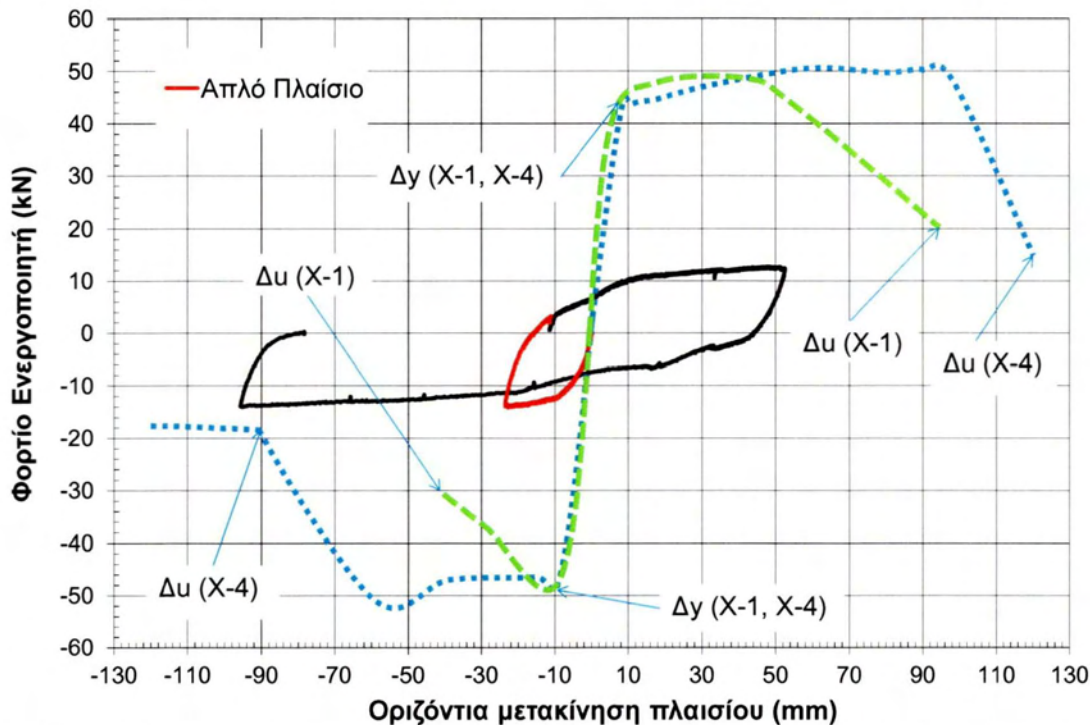
Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι πειραματικές υστερητικές καμπύλες των δύο δοκιμών – συστημάτων ενίσχυσης (X-1 και X-4) αλλά και αυτής του απλού (χωρίς Χ-συνδέσμους) πλαισίου από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η συνολική συμπεριφορά των συστημάτων εμφανίζεται γενικώς ικανοποιητική. Σε όλες τις περιπτώσεις τόσο η αντοχή και δυσκαμψία, όσο και η πλαστιμότητα βελτιώνονται, σημαντικά σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη του απλού γυμνού πλαισίου. Παρόλα αυτά η διενέργεια των δοκιμών που αναλύθηκαν διεξοδικά στην παρούσα εργασία αναδεικνύει τόσο την ιδιαίτερα σύνθετη συμπεριφορά των δύο συστημάτων, και συνεπώς την ανάγκη περαιτέρω μελέτης και διερεύνησης τους, αλλά τόσο και μια σειρά παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη κατά των σχεδιασμό μιας τέτοιου τύπου ενίσχυσης ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι της.



Σχήμα 4.5: Υστερητική καμπύλη φόρτισης - οριζόντιας μετακίνησης πλαισίου για τα δύο συστήματα X-1 και X-4.

Η ανελαστική απόκριση των διαγωνίων στοιχείων από χάλυβα (ανελαστικός λυγισμός και εφελκυστική διαρροή) οδηγεί και τα δύο συστήματα σε μεγάλη ικανότητα απορρόφησης και διάχυσης ενέργειας και μάλιστα, εφόσον δοθεί η απαραίτητη προσοχή κατά των σχεδιασμό, με αρκετά αξιόπιστο τρόπο. Λαμβάνοντας υπόψη πως η πειραματικά αποκτηθείσα μετατόπιση κατά την διαρροή του πλαισίου είναι περίπου 5 mm (βλ. Σχήμα 3.5) και η αντοχή του 14 kN, και τα δύο συστήματα ενίσχυσης με Χ-συνδέσμους οδηγούν σε πολύ μεγαλύτερη

αντοχή, μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και μάλιστα για μεγάλες μετατοπίσεις 20mm και 22mm για το X-1 και X-4 αντίστοιχα, δηλαδή για μεγάλες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας της τάξεως του 4 και επίσης για ένα σχετικά μεγάλο αριθμό κύκλων. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στο Σχήμα 4.6 όπου παρουσιάζεται η περιβάλλουσα καμπύλη των αντοχών για τα δύο συστήματα, μαζί με την καμπύλη δύναμης – μετατόπισης του απλού γυμνού πλαισίου, στο οποίο μάλιστα βλέπουμε πως μετά την αστοχία των Χ-συνδέσμων το σύστημα πλησιάζει, όλο και περισσότερο την αντοχή του απλού γυμνού πλαισίου. (14kN).

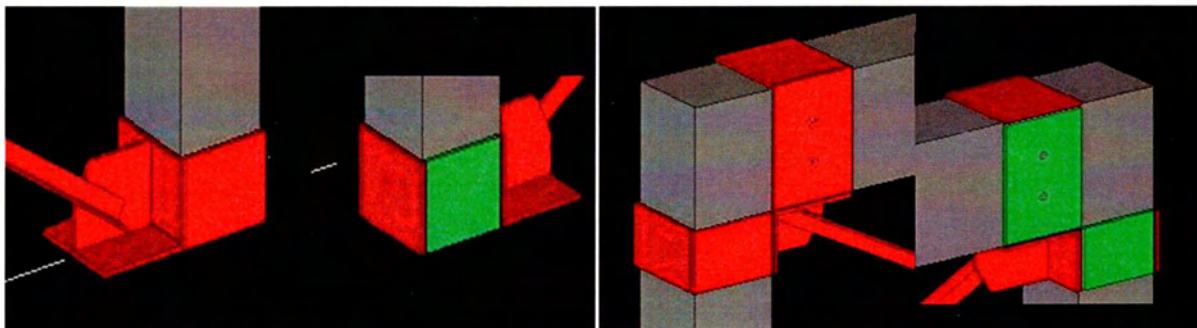


Σχήμα 4.6: Περιβάλλουσα καμπύλη των αντοχών για τα δύο συστήματα (διακεκομμένη γραμμή) και καμπύλη δύναμης – μετατόπισης του απλού πλαισίου. (συνπαγής γραμμή).

Όπως βλέπουμε λοιπόν τα δύο συστήματα παρουσιάζουν εμφανώς μεγαλύτερες τιμές αντοχής – πλαστιμότητας και δυσκαμψίας, σε σχέση με το απλό γυμνό πλαίσιο. Επίσης, συγκρινόμενα μεταξύ τους, τα συστήματα X-1 και X-4, προσεγγίζουν την ίδια τιμή αντοχής με μικρές διαφοροποιήσεις, και με το σύστημα X-1 να αναπτύσσει την μέγιστη αντοχή του σε μικρότερες μετακινήσεις από το σύστημα X-4. Αντίθετα, και όσον αφορά τις τιμές της πλαστιμότητας για τα δύο συστήματα X-1 και X-4, βλέπουμε χαρακτηριστικά πως υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων, αλλά και μεταξύ των δύο κλάδων φόρτισης του συστήματος X-1. Τούτο οφείλεται στον διαφορετικό μηχανισμό αστοχίας που αναπτύσσεται στα δύο συστήματα λόγω του διαφορετικού τρόπου σύνδεσης των κολάρων στην βάση των στύλων. Αυτή η διαφοροποίηση στον μηχανισμό αστοχίας κυριαρχεί στην συμπεριφορά των δύο συστημάτων για πλαστιμότητες μεγαλύτερες της διαρροής ($\Delta y = 10\text{mm}$) και για αυτό θα αναλυθεί διεξοδικά στην συνέχεια, αφού πρώτα υπενθυμίσουμε τον τρόπο σύνδεσης του συστήματος ενίσχυσης με του κόμβους του πλαισίου και τις βάσεις των στύλων.

Στο πρώτο σύστημα (X-1) τα κομβοελάσματα στις βάσεις των στύλων δεν συνδέθηκαν με την θεμελίωση κατά την οριζόντια διεύθυνση. Πιο συγκεκριμένα, η σύνδεση με τη βάση του στύλου υλοποιήθηκε μέσω μεταλλικού κολάρου από συγκολλημένα γύρω-γύρω μεταλλικά ελάσματα. Το κολάρο αυτό δεν αγκυρώθηκε στο στύλο αλλά αφέθηκε ελεύθερη η προς τα πάνω ολίσθηση του καθ' ύψος του στύλου, καθώς και κάποια περιορισμένη στροφή. Αντίθετα η ολίσθηση του προς τα κάτω απεφεύχθη μέσω ενός ελάσματος βάσης συγκολλημένου στο κομβοέλασμα, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με το οριζόντιο επίπεδο στη βάση του στύλου (επιφάνεια έδρασης) όπως φαίνεται στις δύο τρισδιάστατες όψεις του Σχήματος 4.7.

Αυτό έγινε διότι σε υφιστάμενες κατασκευές κάτι τέτοιο μπορεί να είναι πολύ δύσκολο έως και ανέφικτο λόγω των δυσκολιών σύνδεσης των κομβοελασμάτων με τη θεμελίωση (μεμονωμένα πέδιλα, πεδιλοδοκοί ή κοιτόστρωση).



Σχήμα 4.7: Τρισδιάστατη απεικόνιση σύνδεσης Χ-συνδέσμων με την βάση των στύλων (αριστερά) και με τον κόμβο δοκού-στύλου του πλαισίου (δεξιά).

Η σύνδεση των κομβοελασμάτων των Χ-συνδέσμων με τον κόμβο δοκού – στύλου υλοποιήθηκε μέσω ενός μεταλλικού κολάρου περί τον στύλο το οποίο, όμοια με αυτό στη βάση του στύλου, δεν αγκυρώνεται στη δοκό, και μέσω ενός άλλου κολάρου αγκυρωμένου αυτήν την φορά με τη δοκό, όπως φαίνεται στις δύο τρισδιάστατες όψεις του Σχήματος 4.7.

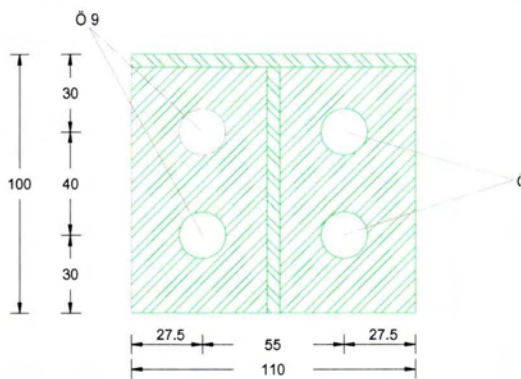
Είναι εμφανής η παρουσία στη σύνδεση αυτή τόσο ελάσματος στην άνω παρειά της δοκού όσο και δύο κοχλιών που διαπερνούν τη δοκό και συνδέουν τα δύο οριζόντια μεταλλικά ελάσματα του κολάρου με αυτήν. Το έλασμα αυτό χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα μόνο για λόγους κατασκευαστικής ευκολίας. Σε πραγματικές κατασκευές με pilotis η παρουσία του είναι ανέφικτη λόγω παρουσίας πλάκας δαπέδου, οπότε η σύνδεση μπορεί να υλοποιηθεί μόνο μέσω των κοχλιών, και για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη. Η όλη σύνδεση σχεδιάστηκε κατά τέτοιον τρόπο ώστε να εμποδίζεται η ολίσθηση τόσο κατακόρυφα (για το κολάρο του στύλου) όσο και οριζόντια (για το κολάρο της δοκού) και συνεπώς το κομβοέλασμα σύνδεσης να μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά αμετάθετο.

Η όλη διάταξη συνδέσεων επιτρέπει περιορισμένη στροφή και άνω/κάτω κίνηση των κολάρων στις βάσεις των στύλων μόνο όταν οι διαγώνιοι σύνδεσμοι, που συνδέονται με τα κολάρα αυτά, εφελκύνονται. Αυτή λοιπόν η περιορισμένη ευκαμψία εκτιμήθηκε ότι θα προσδώσει στο σύστημα επιπρόσθετη πλαστιμότητα για υψηλά επίπεδα αντοχής.

Αυτή η ελευθερία κίνησης των κολάρων στις βάσεις των στύλων τελικά είχε δυσμενείς επιπτώσεις, αφού οδήγησε σε αστοχία των κολάρων, όπως αναλυτικά σχολιάζεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, καθώς δεν εκτιμήθηκε σωστά η μεγάλη καταπόνηση των ραφών, όταν το αντίστοιχο κολάρο εφελκύεται, ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα (ενίσχυση της συγκόλλησης και αυξημένο πάχος των ελασμάτων των κολάρων). Έτσι λοιπόν το κάτω αριστερά κολάρο ρηγματώνεται και αστοχεί σε πολύ μικρότερες μετακινήσεις από ότι το κάτω δεξιά. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα το κάτω αριστερά κολάρο να χάσει γρήγορα την εφελκυστική του δυσκαμψία, χωρίς έτσι να επιτρέπει στις αντίστοιχες διαγώνιους που εφελκύνονται να συμβάλουν τα μέγιστα στην συνολική αντοχή του πλαισίου (μιας και το ρηγματωμένο κολάρο συγκέντρωνε στο σημείο αυτό μεγάλο μέρος των αξονικών παραμορφώσεων της συγκεκριμένης διαγώνιου «ανακουφίζοντας» έτσι τα διαγώνια στοιχεία.) Για αυτό τον λόγο στον πρώτο κλάδο φόρτισης (εφελκυσμός του κάτω αριστερά κολάρου) το πλαίσιο αναπτύσσει πλαστιμότητα περίπου 4 (στην πραγματικότητα έχοντας παρατηρήσει την ρωγμή στον 6^ο κύκλο το πρωτόκολλο επιβαλλόμενης οριζόντιας μετακίνησης του πλαισίου άλλαξε και οι επόμενοι 20 κύκλοι (έως τον 26^ο κύκλο) δεν ήταν συμμετρικοί, για τον ένα κλάδο δεν επιβάλλεται οριζόντια μετακίνηση μεγαλύτερη των 20mm ώστε να αποφευχθεί θραύση του κολάρου και να υπάρχει η δυνατότητα να καταγραφεί, ακόμα και με ρηγματωμένο κολάρο, εάν θα επέλθει η θραύση του άμεσα και εάν υπάρχει δυνατότητα αξιόπιστης απόσβεσης ενέργειας για πόσους ακόμα κύκλους.), ενώ στον δεύτερο κλάδο (εφελκυσμός του κάτω δεξιά κολάρου) η αντίστοιχη τιμή φθάνει το 9.5 ($\Delta u/\Delta y=95mm/10mm$), όπως χαρακτηριστικά βλέπουμε στο Σχήμα 4.6.

Συνεπώς στην περίπτωση ενίσχυσης υφιστάμενου πλαισίου με χρήση Χ-συνδέσμων οι οποίοι έχουν ελευθερία μετακίνησης στην βάση των στύλων πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή κατά τον σχεδιασμό των ραφών των ελασμάτων του κολάρου της βάσης ώστε να αποφευχθεί η πρόωγη ρηγμάτωση και αστοχία έτσι ώστε όλα τα εφελκυσόμενα διαγώνια στοιχεία από χάλυβα να μπορούν να προσφέρουν αντοχή και πλαστιμότητα στο σύστημα, οδηγώντας έτσι σε σημαντικά μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας.

Αντίθετα τώρα στο δεύτερο σύστημα (X-4) κρίθηκε σκόπιμο, για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων τα μεταλλικά κολάρα στην βάση των στύλων να είναι αγκυρωμένα κατά το οριζόντιο επίπεδο με την επιφάνεια έδρασης (θεμέλιο). Για να επιτευχθεί αυτό, στην βάση κάθε στύλου τοποθετήθηκαν δύο οριζόντια μεταλλικά ελάσματα τα οποία κατασκευάστηκαν με τέσσερις οπές το καθένα, και στην συνέχεια αγκυρώθηκαν στην επιφάνεια έδρασης μέσω μηχανικών αγκυρίων όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Ο τρόπος σύνδεσης των συνδέσμων με τους κόμβους του πλαισίου ακολουθεί και πάλι το Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.8: Λεπτομέρεια ελάσματος σύνδεσης του κολάρου με την θεμελίωση (αριστερά), συνολική όψη της σύνδεσης (δεξιά).

Η όλη σχεδίαση του συστήματος έγινε έτσι ώστε να περιορίζεται η πάνω/κάτω ολίσθηση των κολάρων στις βάσεις των στύλων, καθώς και η ούτως η άλλως περιορισμένη δυνατότητα στροφών, όταν τα αντίστοιχα διαγώνια μέλη εφελκύνονται με αποτέλεσμα να μπορεί να θεωρηθεί αμετάθετο, σε αντίθεση με το πρώτο σύστημα (X-1) στο οποίο αυτές οι μετακινήσεις μπορούσαν να αναπτυχτούν.

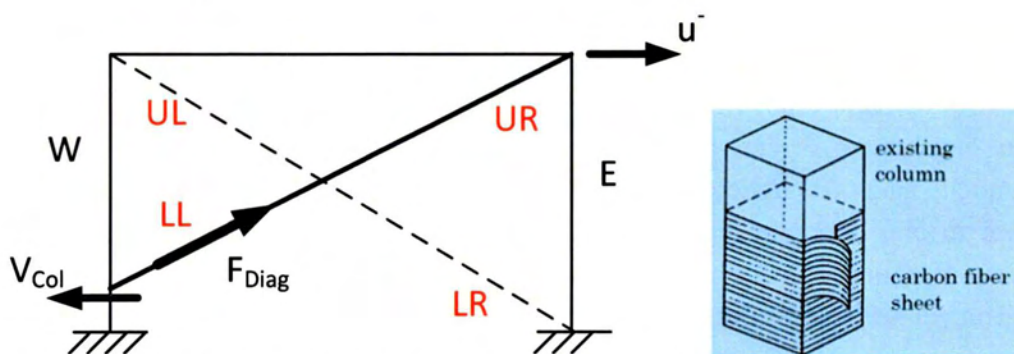
Με τον τρόπο αυτό αλλάζει συνολικά ο μηχανισμός αστοχίας αφού πλέον τα κολάρα στις βάσεις των στύλων δεν επιβαρύνονται τόσο όσο στο σύστημα X-1 με αποτέλεσμα να παραμείνουν ανέπαφα μέχρι τον τερματισμό του πειράματος. Με τον τρόπο αυτό και τα τέσσερα διαγώνια στοιχεία είναι σε θέση να παραλάβουν εφελκυσμό για πολύ μεγάλες μετακινήσεις, έως ότου αστοχήσουν σε θραύση στην παρειά σύνδεσης με το κομβόελασμα. Έτσι ενώ τα δυο συστήματα έχουν περίπου την ίδια παραμόρφωση διαρροής (10mm), και στους δύο κλάδους φόρτισης, το σύστημα X-4 είναι σε θέση να διατηρήσει την μέγιστη αντοχή του για πολύ μεγαλύτερες μετακινήσεις και μάλιστα ακόμα και να την ξεπεράσει λόγω κράτυνσης του υλικού (βλέπε Σχήμα 4.6). Συνεπώς το σύστημα X-4 παραμένει λειτουργικό για μεγαλύτερες επιβαλλόμενες τιμές πλαστιμότητας από ότι το σύστημα X-1, με τιμές που φθάνουν το 9 ($\Delta u/\Delta y=90\text{mm}/10\text{mm}$), και 11,5 ($\Delta u/\Delta y=115\text{mm}/10\text{mm}$), για τον πρώτο και δεύτερο κλάδο φόρτισης αντίστοιχα.

Συνεπώς, για την παρούσα πειραματική διερεύνηση, στην περίπτωση της ενίσχυσης υφιστάμενου πλαισίου με διαγώνια στοιχεία στα οποία δεν επιτρέπεται μετακίνηση της βάσης, οδηγούμαστε σε μια μικρή αύξηση της αντοχής (X-1= 47kN, X-4=51kN) και σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας (X-1=60mm, X-4=100mm). Επίσης και τα τέσσερα διαγώνια στοιχεία από χάλυβα είναι σε θέση να συνεισφέρουν την μέγιστη αντοχή τους (λυγισμός της μίας διαγωνίου και διαρροή της άλλης). Συνεπώς λαμβάνουν χώρα όλα τα ανελαστικά φαινόμενα σε όλα τα στοιχεία και έτσι έχουμε πολύ περισσότερη αλλά και πολύ πιο αξιόπιστη απορρόφηση και διάχυση ενέργειας, σε σύγκριση με το σύστημα X-1 στο οποίο όπως είπαμε δεν δόθηκε η απαραίτητη προσοχή στις ραφές του κολάρου.

Όσον αφορά τις συνδέσεις των Χ-συνδέσμων με τους κόμβους δοκών – στύλων του πλαισίου, που φαίνονται στο Σχήμα 4.9, φάνηκε πως είχαν θετική επίδραση στην

συμπεριφορά του πλαισίου από σκυρόδεμα. Και στα δύο συστήματα X-1 και X-4, παρόλο που εμφανίζεται ρηγμάτωση στις περιοχές στην παρειά των ελασμάτων του κολάρου του στύλου, δεν είναι ούτε ιδιαίτερα εκτεταμένη ούτε και πολύ μεγάλου εύρους ακόμα και για πολύ μεγάλες μετακινήσεις (σε σχέση με το απλό πλαίσιο). Επιπλέον η περιοχή του κόμβου του πλαισίου που δεν καλύπτεται από έλασμα φάνηκε να προστατεύεται και να ενισχύεται από την παρουσία των ελασμάτων σύνδεσης με τα διαγώνια στοιχεία.

Αντίθετα για το σύστημα X-1 ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις κολώνες και στις περιοχές του σκυροδέματος οι οποίες καλύπτονται από ελάσματα σύνδεσης, καθώς η ελευθερία κινήσεως του κολάρου μετατοπίζει το σημείο εφαρμογής της αξονικής δύναμης. Ενώ λοιπόν, κατά την θλίψη των στοιχείων το φορτίο μεταφέρεται απευθείας στον κόμβο (βάση σχεδιασμού), κατά τον εφελκυσμό το κολάρο μετατοπίζεται προς τα πάνω και έτσι η εφαρμογή του φορτίου δεν γίνεται πλέον στον κόμβο στύλου – θεμελίωσης, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 4.9 Αυτή η μετατόπιση του σημείου εφαρμογής οδηγεί στην εισαγωγή σημαντικών διατμητικών δυνάμεων και τάσεων, τόσο στην εσωτερική όσο και την εξωτερική πλευρά των στύλων, και μάλιστα στην παρειά στήριξης αυτών των στοιχείων, περιοχή δηλαδή κρίσιμη για το φαινόμενο της διάτμησης.



Σχήμα 4.9: Διατμητική δύναμη στο στύλο λόγω μετακίνησης του κολάρου (αριστερά), τρόπος ενίσχυσης (δεξιά).

Συνεπώς πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο κατά πόσο τα στοιχεία του πλαισίου (κολώνες) είναι σε θέση να παραλάβουν αυτές τις επιπλέον διατμητικές τάσεις που εισάγονται από τα ελάσματα σύνδεσης, ώστε να μην οδηγηθεί το σύστημα σε πρόωρη διατμητική αστοχία η οποία ούτως ή άλλως πρέπει να αποφεύγεται λόγω του ιδιαίτερα ψαθυρού της χαρακτήρα (σε αντίθετη περίπτωση να προταθεί κατάλληλη τοπική ενίσχυση όπως για παράδειγμα βλέπουμε στο Σχήμα 4.9).

6

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Badoux, M. and Jirsa, J.O. (1990). “Steel Bracing of RC Frames for Seismic Retrofitting.” *Journal of Structural Engineering (ASCE)* 116(1), 55 – 74.
- Carr, A. (2007) RUAUMOKO – Inelastic Dynamic Analysis Computer Program. University of Canterbury, New Zealand.
- 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
- Crisafulli, F. J. (1997) “Seismic behavior of reinforced concrete structures with masonry infills.” PhD Thesis, Department of Civil Engineering, university of Canterbury
- El-Amoury, T. and Ghobarah, A. (2005). “Retrofit of RC Frames Using FRP Jacketing or Steel Bracing.” *JSEE* 7(2), 83 – 94.
- Gan, W. and Hall, J.F. (1998). “Static and Dynamic Behavior of Steel Braces under Cyclic Loading.” *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)* 124(1), 87 – 93.
- Gasparini, D. A. and Vanmarcke, E. H. (1976) “Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra” MIT Department of Civil Engineering Research Report R76-4, Order Number 527
- Ghaffarzadeh, H. and Maheri, M.R. (2006). “Cyclic Tests on the Internally Braced RC Frames.” *JSEE* 8(3), 177 – 186.
- Gorji, M.S., Taribakhsh, M. and Gandomi, A. (2008). “Seismic Assessment and Strengthening of Intermediate Moment Resisting Concrete Frames.” *Interaction* 5(3), 43 – 58.
- Ikeda, K. and Mahin, S. A. (1986). “Cyclic response of steel braces.” *J. Struct. Eng.*, 112(2), 342 – 361
- Ikeda, K. and S. A. Mahin, (1984) “A refined physical theory model for predicting the seismic behavior of braced steel frames”, EERC Report No. 84/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, CA.
- Jain, A.K. (1985). “Seismic Response of RC Frames with Steel Braces.” *Journal of Structural Engineering (ASCE)* 111(10), 2138 – 2148.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000135191

