

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών. Τα αποτελέσματα αυτά αναφέρονται στις ενδείξεις του μηκυνσιομέτρου 8, το οποίο κατέγραφε την οριζόντια μετατόπιση του ζυγώματος του δοκιμίου.

Είναι προφανές ότι σε ένα τόσο πολύπλοκο σύστημα με τόσο πολλά σημεία σύνδεσης μεταξύ μεταλλικών στοιχείων και σκυροδέματος δημιουργούνται έστω και μικρές διαφορές μεταξύ της εφαρμοζόμενης μετατόπισης στο έμβολο και της απόκρισης του ζυγώματος ή της κεφαλής του μεταλλικού συνδέσμου. Η μετατόπιση συνεπώς του άνω τμήματος του κατακόρυφου μεταλλικού συνδέσμου δεν συμπίπτει απόλυτα με τη μετατόπιση του ζυγώματος, ειδικά σε προχωρημένα επίπεδα μετατόπισης. Αυτό οφείλεται στις μικροαπώλειες του συστήματος (τζόγοι) λόγω της αναπόφευκτης αδυναμίας να επιτευχθεί μονολιθική σύνδεση μεταξύ μεταλλικών στοιχείων και σκυροδέματος. Στους τζόγους αυτούς συμπεριλαμβάνονται και οι ρηγματώσεις σε προχωρημένες μετατοπίσεις οι οποίες εκδηλώνονται με τη χαλάρωση ειδικά στο σημείο σύνδεσης της δοκού με τον κατακόρυφο σύνδεσμο.

Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση οκτώ ηλεκτρονικών μηκυνσιομέτρων επέτρεψε την καταγραφή μετακινήσεων σε πολλά σημεία με σκοπό να καταγραφούν όλες οι προαναφερθείσες μικροαπώλειες. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο όλες οι μετακινήσεις που αναφέρονται στα διαγράμματα είναι αυτές του ζυγώματος του δοκιμίου οι οποίες θεωρούνται ως οι πλέον χαρακτηριστικές του σύνθετου συστήματος του ενισχυμένου φορέα. Στις μετακινήσεις αυτές συμπεριλαμβάνονται οι τζόγοι και οι ολισθήσεις. Τα αποτελέσματα των καταγραφών όλων των ηλεκτρονικών μηκυνσιομέτρων παρουσιάζονται στο Παράρτημα της παρούσας Έκθεσης.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα εξής διαγράμματα:

- Φορτίου - Μετατόπισης ζυγώματος δοκιμίου.

Εκφράζεται με τους υστερητικούς βρόχους κατά την ανακύκλιση του ζυγώματος του δοκιμίου. Η αδυναμία της ακριβούς υλοποίησης της δοθείσας μετατόπισης οφείλεται, όπως προαναφέρθηκε, στις μικροαπώλειες του συστήματος λόγω τζόγων. Έτσι, ενώ η μετακίνηση του εμβόλου ήταν απολύτως ακριβής, η αντίστοιχη μετακίνηση της κεφαλής του δοκιμίου παρουσίαζε μικρή απόκλιση, όχι όμως σημαντική ώστε να αλλοιώσει τα αποτελέσματα.

- Περιβάλλουσα Φορτίου - Μετατόπιση ζυγώματος.

Αποτελεί καμπύλη σε ένα τεταρτημόριο, η οποία εκφράζεται με τη μέση τιμή των απόλυτων μεγίστων τιμών του φορτίου στο συγκεκριμένο κύκλο φόρτισης ως τεταγμένη και τη μέση τιμή των μετατοπίσεων στα συγκεκριμένα σημεία ως τετμημένη (Σχ. 4.1).

- Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση ζυγώματος.

Εκφράζει την ενέργεια που απορροφήθηκε ανά κύκλο φόρτισης και όχι αθροιστικά και εκφράζεται με το εμβαδό που περικλείουν οι υστερητικοί βρόχοι (Σχ. 4.2).

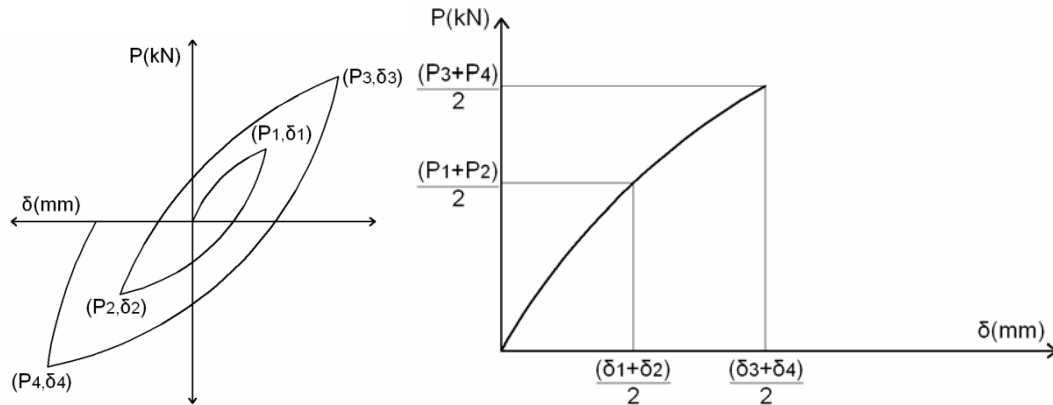
- Ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση ζυγώματος.

Ως συνέχεια του ανωτέρω διαγράμματος, η ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια εκφράζεται με το πηλίκο της απορροφώμενης ενέργειας σε ένα κύκλο φόρτισης προς τη συνολική μετατόπιση του συγκεκριμένου κύκλου (Σχ. 4.3).

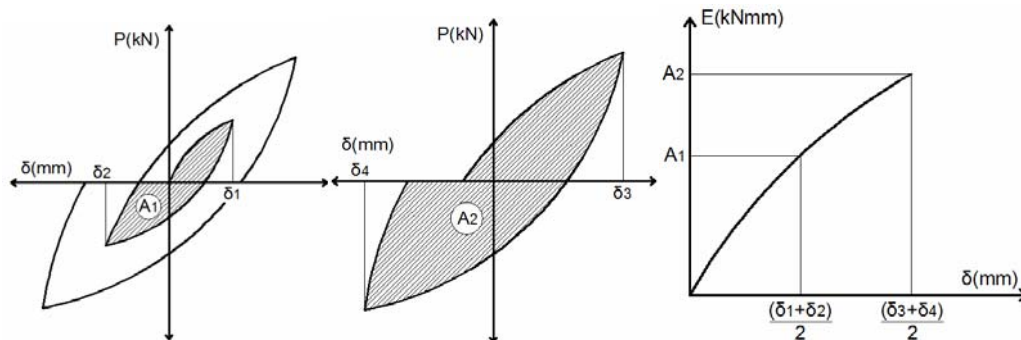
▪ Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση ζυγώματος.

Η ικανότητα του συστήματος να απορροφά ενέργεια αποτιμάται με τη βοήθεια του συντελεστή ισοδύναμης ιξώδους απόσβεσης. Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί αυτής της έννοιας στη διεθνή βιβλιογραφία. Ο συνηθέστερος την ορίζει ως ποσοστό και είναι: $\zeta = \frac{1}{2\pi} * \frac{A}{A+B}$

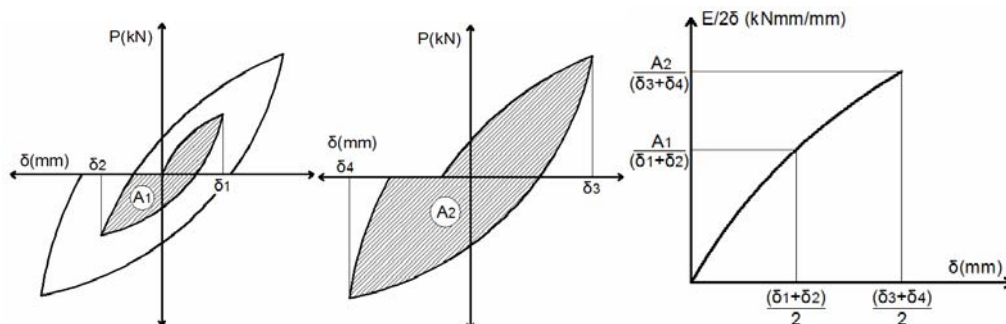
Το εμβαδόν Α εκφράζει την ενέργεια που απορροφά το σύστημα ενώ το άθροισμα Α+Β την κινητική ενέργεια (Σχ. 4.4).



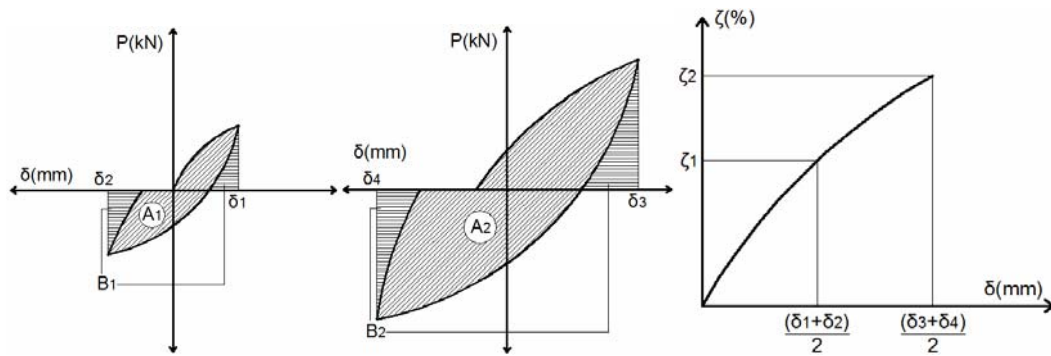
Σχ. 4.1 Βρόχοι υστέρησης και περιβάλλουσα Φορτίου - Μετατόπισης.



Σχ. 4.2 Βρόχοι υστέρησης και απορροφώμενη ενέργεια.



Σχ. 4.3 Βρόχοι υστέρησης και ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια.



Σχ. 4.4 Βρόχοι υστέρησης και ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση.

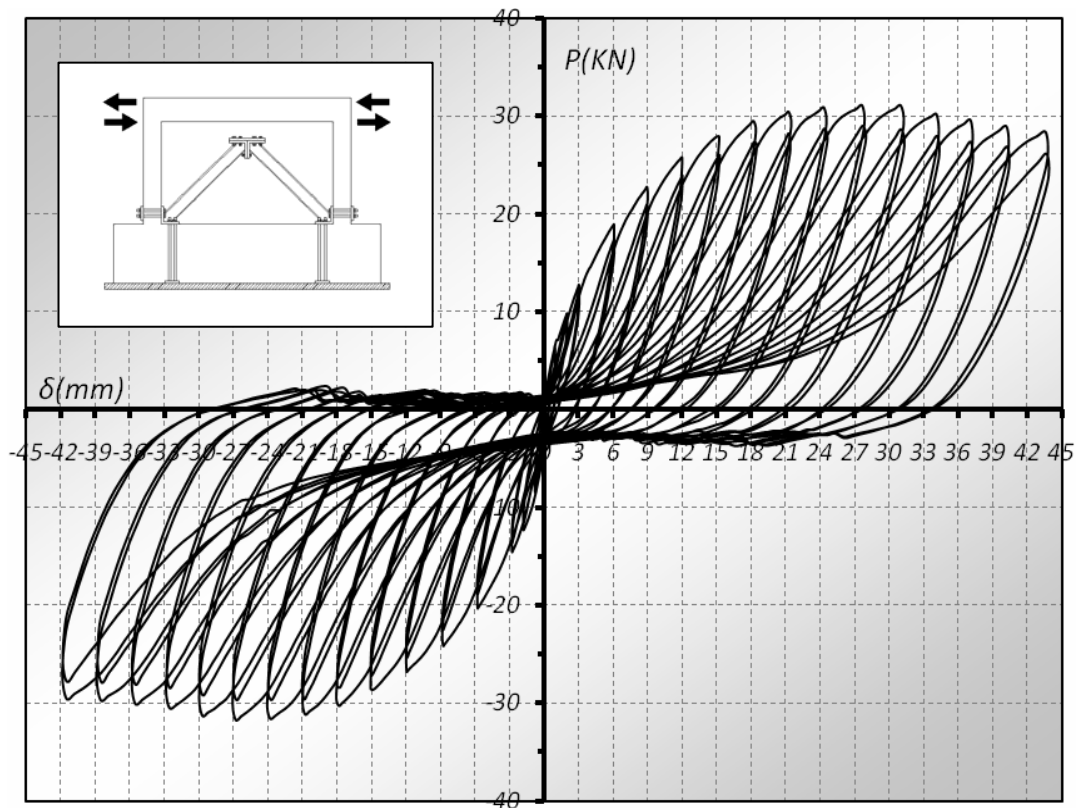
4.1 Δοκίμιο F1

Αποτελεί γυμνό πλαίσιο με τη μεταλλική διάταξη Λ (Φωτ. 4.1). Όπως διακρίνεται και από τη συγκεκριμένη φωτογραφία, στο εν λόγω δοκίμιο έχει τοποθετηθεί η μεταλλική διάταξη Λ, χωρίς όμως να συνδεθεί με το μέσο του ζυγώματος μέσω του κατακόρυφου μεταλλικού συνδέσμου. Ο λόγος επιλογής ενός τέτοιου δοκιμίου ήταν η δυνατότητα άμεσης σύγκρισης με τα ενισχυμένα δοκίμια προκειμένου να προσδιοριστεί το ακριβές ποσοστό συμμετοχής του κατακόρυφου στοιχείου σύνδεσης στην ενίσχυση του πλαισίου.

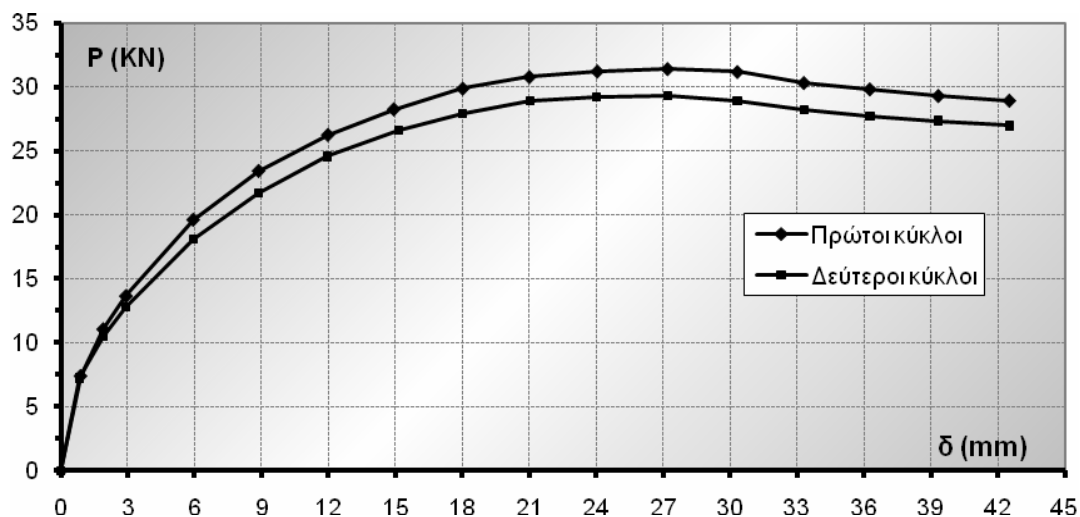


Φωτ. 4.1 Δοκίμιο F1 Πλαίσιο το οποίο φέρει τη μεταλλική διάταξη Λ απουσία όμως του κατακόρυφου μεταλλικού συνδέσμου με τη δοκό.

Στα σχήματα 4.5, 4.6 και 4.7 παρουσιάζονται οι υστερητικοί βρόχοι, η περιβάλλουσα του φορτίου τους και η απορροφώμενη ενέργεια αντίστοιχα κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής.



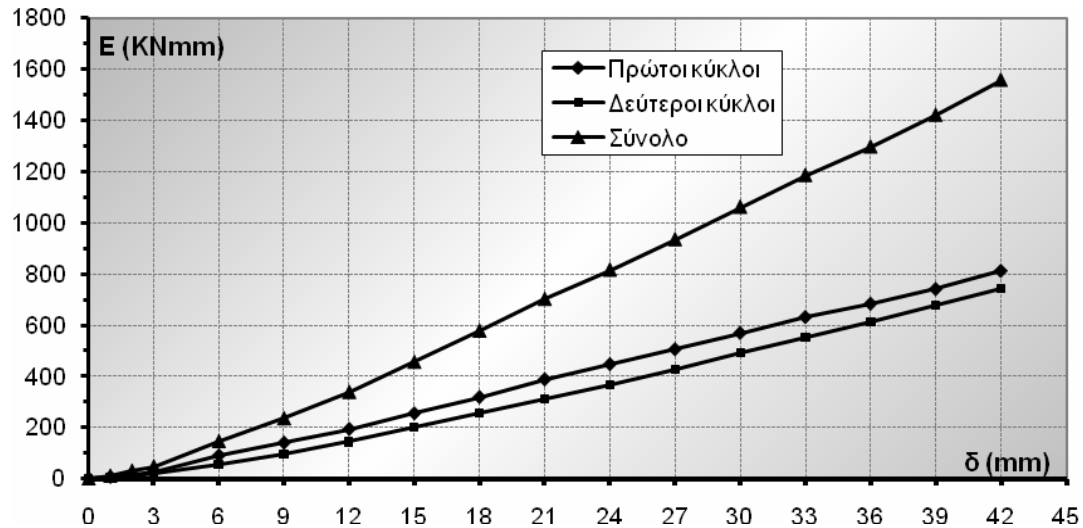
Σχ. 4.5 Φορτίο - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F1).



Σχ. 4.6 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F1).

Πολύ νωρίς έκαναν την εμφάνισή τους οι πρώτες ρηγματώσεις στον πόδα και την κεφαλή των στύλων οι οποίες εξελίχθηκαν σε πλαστικές αρθρώσεις (Φωτ. 4.2, 4.3 και 4.4). Στη βάση οι πλαστικές αρθρώσεις εμφανίστηκαν στο σημείο ακριβώς επάνω από το μεταλλικό

σύνδεσμο. Οι πλαστικές αρθρώσεις στην κεφαλή και τον πόδα των στύλων οδήγησαν σε μηχανισμό κατάρρευσης ορόφου. Η απουσία επαρκούς περίσφιξης στις κρίσιμες περιοχές των κόμβων δεν εμπόδισε τη σταδιακή αύξηση της φέρουσας ικανότητας μέχρι και μετατόπιση 24mm, ενώ και στη συνέχεια ακολούθησε ήπια πτώση της μέχρι και τη μέγιστη μετατόπιση των 42mm.



Σχ. 4.7 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F1).



Φωτ. 4.2 Δοκίμιο F1 στη μέγιστη μετατόπιση.



Φωτ. 4.3 Πλαστική άρθρωση στον πόδα του στύλου, πάνω από τη μεταλλική διάταξη.

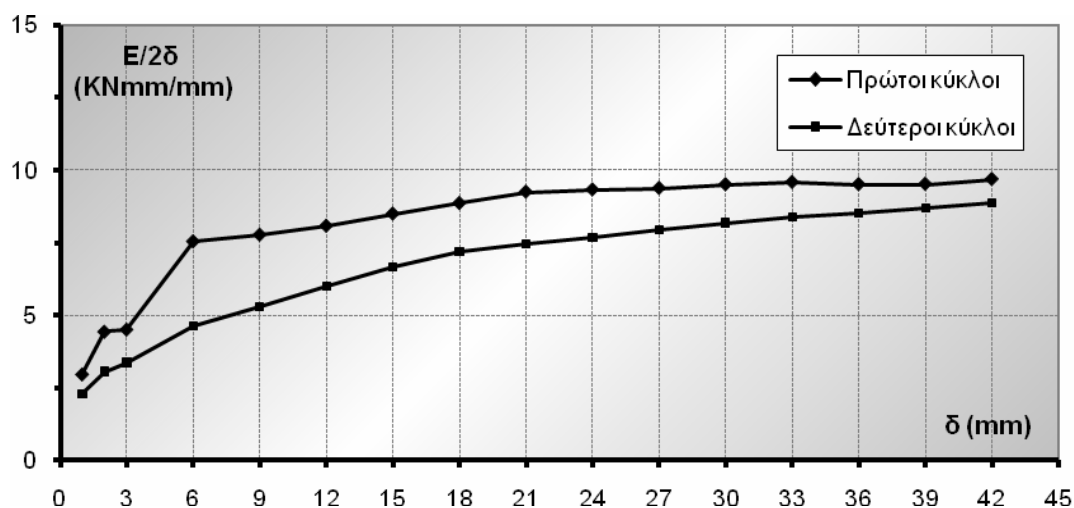


Φωτ. 4.4 Πλαστική άρθρωση στην κεφαλή του στύλου.

Το δοκίμιο χαρακτηρίζεται και πάλι από στένωση των βρόχων. Παρόλα αυτά η ήπια, και όχι απότομη, πτώση της φέρουσας ικανότητας είχε ως αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση της απορρόφησης ενέργειας (Σχ. 4.7).

Ο κυρίαρχος καμπτικός χαρακτήρας αστοχίας του δοκιμίου είναι εμφανής, με δημιουργία μηχανισμού αποτελούμενου από τέσσερις πλαστικές αρθρώσεις στη βάση και την κεφαλή των δυο στύλων.

Στη μέγιστη μετατόπιση του δοκιμίου (Φωτ. 4.2) οι πλαστικές αρθρώσεις στη βάση των στύλων δημιουργήθηκαν πάνω από τη μεταλλική συνδεσμολογία. Η ισχυρή περίσφιξη στους κάτω κόμβους του δοκιμίου απέτρεψαν τη μετακίνηση της μεταλλικής διάταξης Λ περιορίζοντας τη μετακίνηση στην κεφαλή. Η δοκός παρέμεινε ανέπαφη, χωρίς βλάβες.

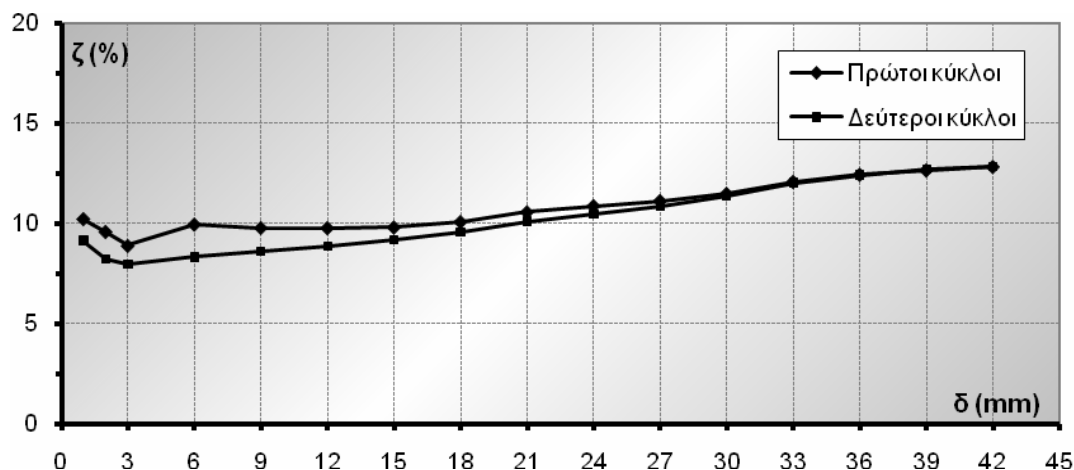


Σχ. 4.8 Ανεγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F1).

Στο σχήμα 4.8 η ανεγμένη απορροφώμενη ενέργεια για τους πρώτους κύκλους φόρτισης παρουσίασε απότομη αύξηση μέχρι τη μετατόπιση των 6mm. Από τα 6mm μέχρι τα 21mm η αύξηση ήταν πιο ήπια ενώ στη συνέχεια τείνει να σταθεροποιηθεί μέχρι τη μέγιστη μετατόπιση των 42mm. Αντίστοιχη αύξηση εμφάνισαν και οι δεύτεροι κύκλοι φόρτισης χωρίς

ιδιαίτερες διακυμάνσεις αλλά με σαφώς χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τους πρώτους κύκλους.

Η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση (σχ. 4.9) παρουσίασε και για τους δύο κύκλους φόρτισης μια μικρή πτώση στα τρία πρώτα βήματα φόρτισης, ενώ στη συνέχεια με μια ήπια αύξηση αποκτά και πάλι τη μέγιστη τιμή περίπου 13%. Από τα 30mm και μετά υπάρχει απόλυτη ταύτιση πρώτων και δευτέρων κύκλων.



Σχ. 4.9 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F1).

4.2 Δοκίμιο F1,N

Πρόκειται για πλαίσιο ίδιο με το F1 με την προσθήκη αξονικού φορτίου στους στύλους.

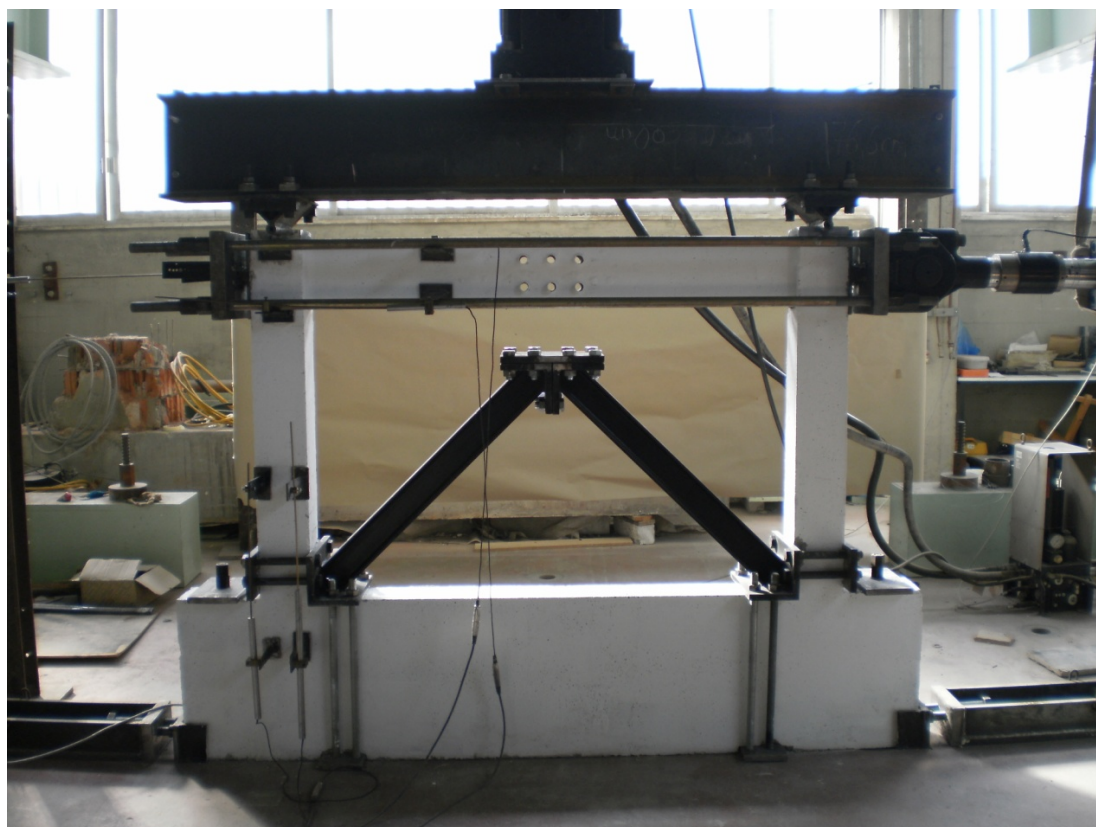
Μέσω μιας δύσκαμπτης μεταλλικής δοκού επιβλήθηκε αξονικό φορτίο στους στύλους και στη συνέχεια ξεκίνησε η οριζόντια ανακυκλιζόμενη φόρτιση του δοκιμίου (Φωτ. 4.5).

Από τους πρώτους κιόλας κύκλους φόρτισης το δοκίμιο παρουσίασε μια πιο δύσκαμπτη συμπεριφορά σε σχέση με το αντίστοιχο χωρίς το αξονικό φορτίο στους στύλους (F1). Σαφώς πιο πλούσιοι είναι οι βρόχοι υστέρησης, ακόμη και σε προχωρημένες μετατοπίσεις (Σχ. 4.10 και 4.11).

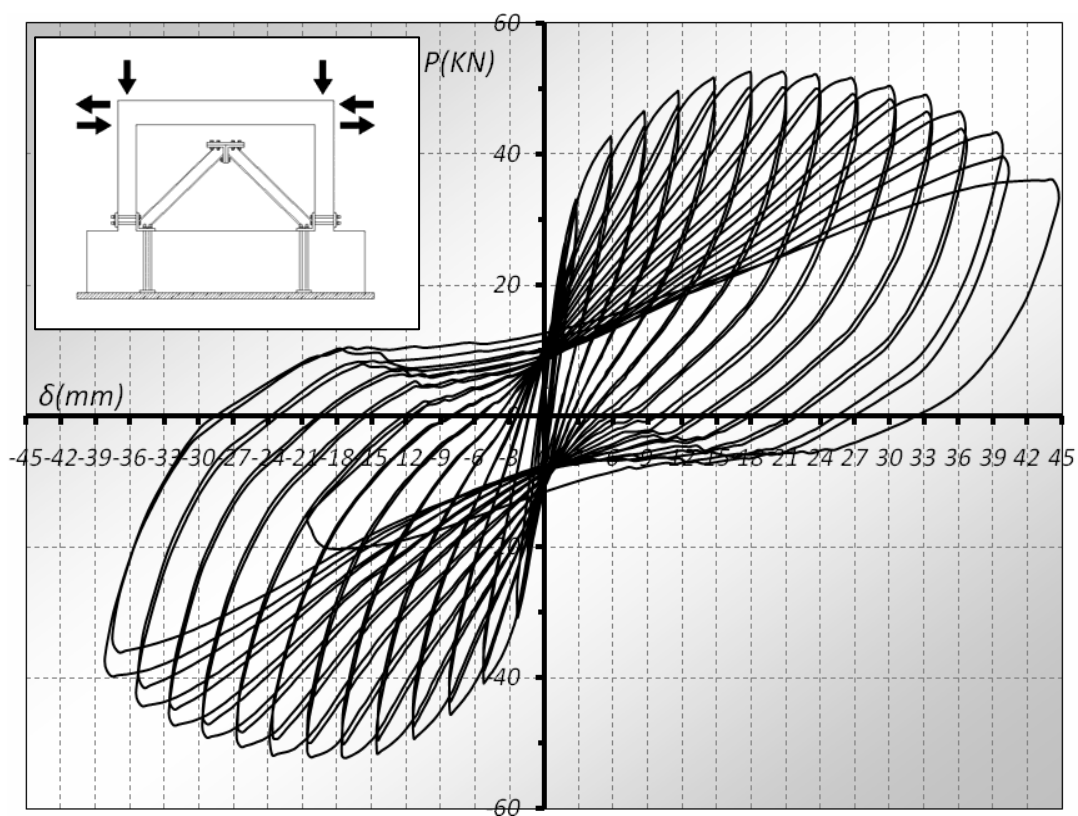
Λόγω της ύπαρξης αξονικού φορτίου, το οποίο προσέδωσε πρόσθετη αντοχή στους στύλους, εμφανίστηκαν αρχικά ρηγματώσεις τόσο στη δοκό (σε αντίθεση με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς αξονικό φορτίο) όσο και στους στύλους. Η επίδραση του αξονικού φορτίου αύξησε τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα του πλαισίου. Ήδη από την πρώτη μετατόπιση των 6mm η αντοχή ήταν περίπου διπλάσια.

Κατά την εξέλιξη πάντως του πειράματος οι ρηγματώσεις των δοκών δεν εξελίχτηκαν, ίσως λόγω του περιορισμού της στροφής εξαιτίας της διάταξης επιβολής του οριζόντιου φορτίου, με αποτέλεσμα να σχηματισθούν πλαστικές αρθρώσεις στους πόδες και στις κεφαλές των στύλων (Φωτ. 4.6 και 4.7).

Η ευμενής επίδραση του αξονικού φορτίου, η οποία επισημαίνεται και από τη διεθνή βιβλιογραφία, είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση κατά 67% περίπου της φέρουσας ικανότητας και κατά 150% της απορροφώμενης ενέργειας (Σχ. 4.11 και 4.12).



Φωτ. 4.5 Δοκίμιο F1,N.



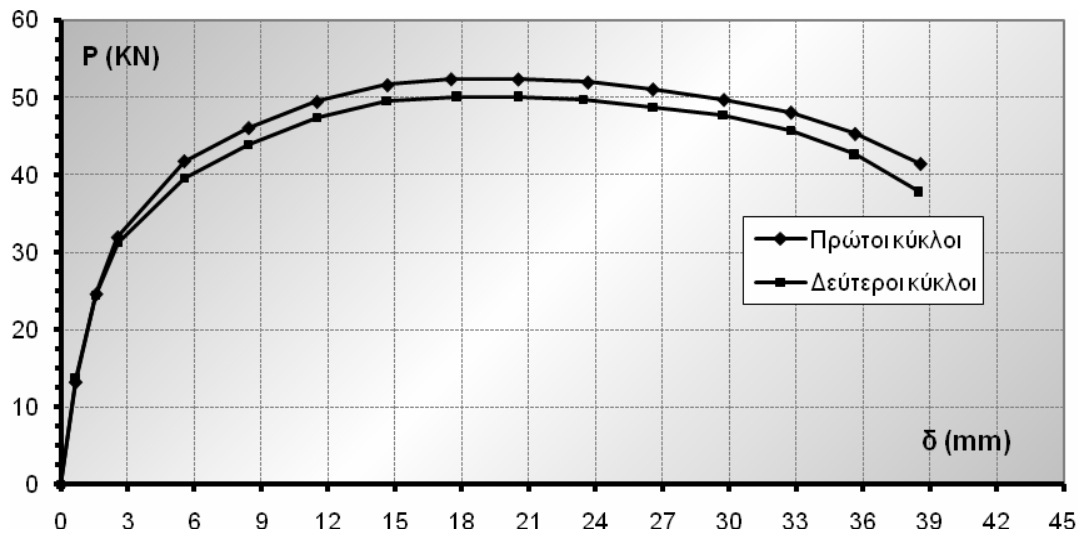
Σχ. 4.10 Φορτίο - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F1,N).



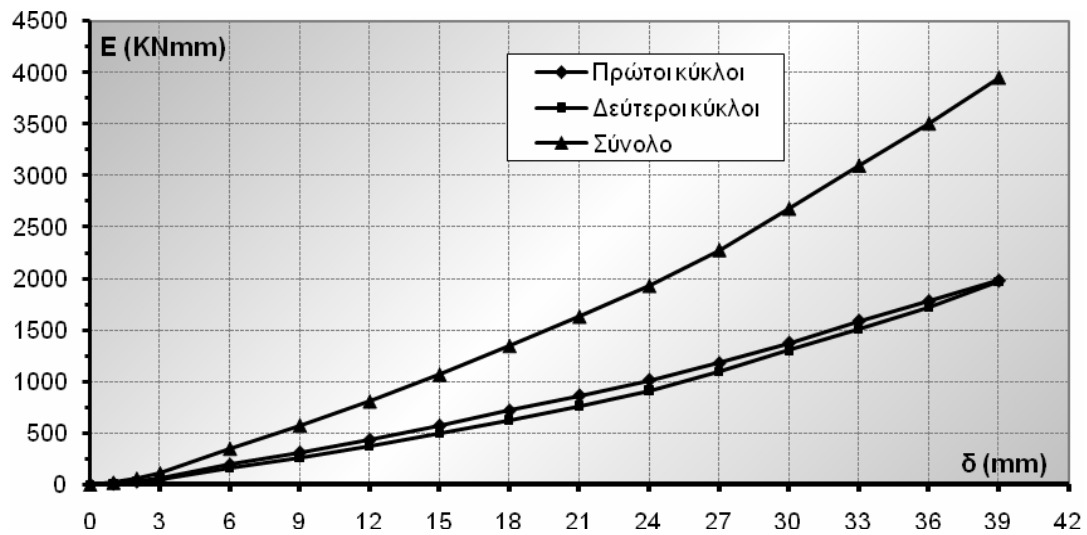
Φωτ. 4.6 Δοκίμιο F1,N στη μέγιστη μετατόπιση.



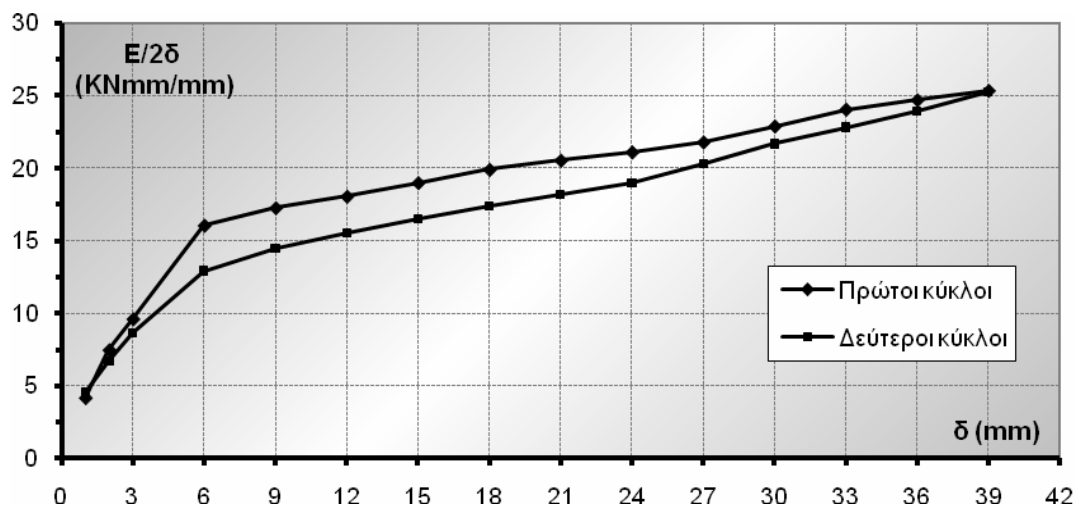
Φωτ. 4.7 Πλαστική άρθρωση στην κεφαλή του στύλου.



Σχ. 4.11 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F1,N).



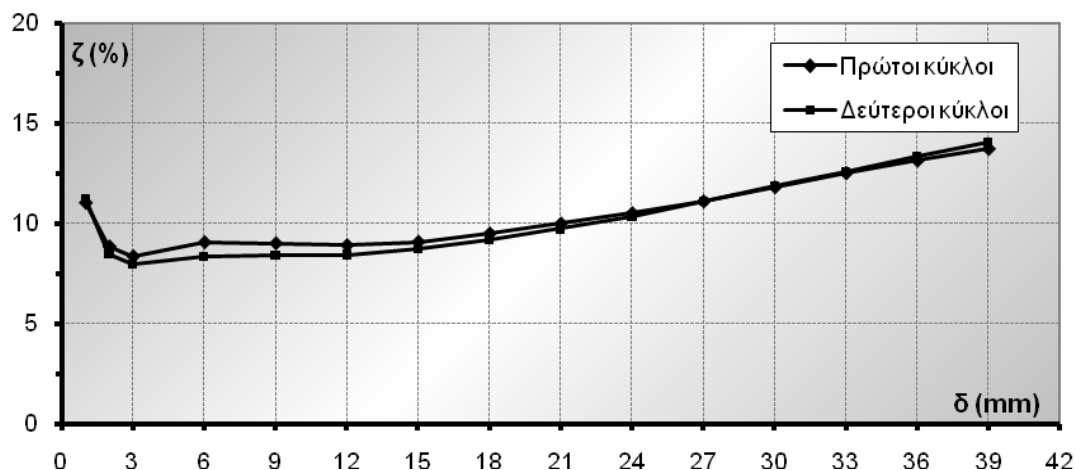
Σχ. 4.12 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F1,N).



Σχ. 4.13 Ανηγγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F1,N).

Η ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια (Σχ. 4.13) παρουσίασε απότομη αύξηση μέχρι και τη μετατόπιση των 6mm και πιο ήπια στη συνέχεια μέχρι το τέλος της πειραματικής δοκιμής. Η αύξηση ήταν ανάλογη και για τους δύο κύκλους φόρτισης με τους δεύτερους να υστερούν όπως είναι αναμενόμενο όσον αφορά τις τιμές αυτής. Η επίδραση του αξονικού φορτίου δείχνει αύξηση 100% και στην ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια.

Η ιξώδης απόσβεση (Σχ. 4.14) παρουσίασε πτώση στα τρία πρώτα επίπεδα μετακίνησης ενώ στη συνέχεια ακολούθησε μια ομαλή αύξηση μέχρι τη μέγιστη τιμή 14% στη μέγιστη μετατόπιση. Η απόσβεση των πρώτων και δεύτερων κύκλων πρακτικώς ταυτίζονται.



Σχ. 4.14 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F1,N).

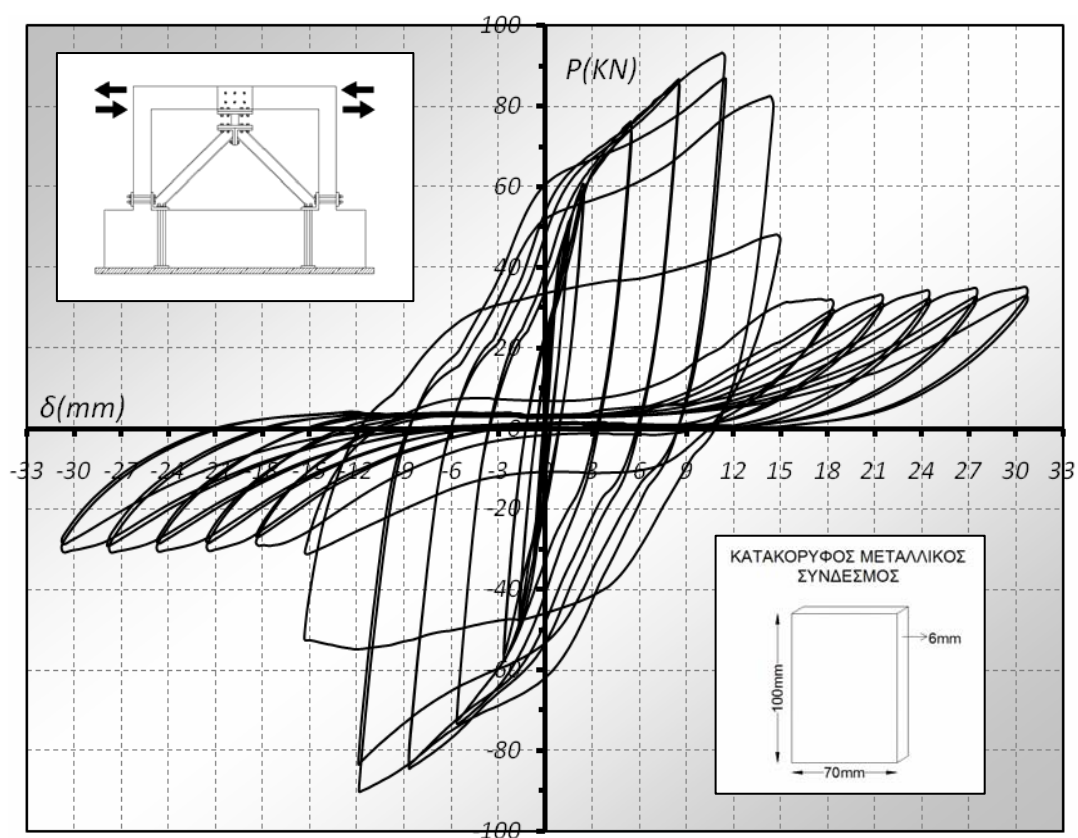
4.3 Δοκίμιο F2

Το πρώτο ενισχυμένο πλαίσιο (Φωτ. 4.8), με την άμεση ενεργοποίηση του μεταλλικού συνδέσμου, παρουσίασε πολύ μεγαλύτερη δυσκαμψία και αντοχή στις μικρές μετακινήσεις, με σημαντική μάλιστα κράτυνση (Σχ. 4.15 και 4.16). Μέχρι γωνιακή μετακίνηση της τάξεως του 12‰ ο σύνδεσμος ήταν απολύτως ενεργός, παρά το γεγονός ότι είχαν ήδη αρχίσει να εκδηλώνονται σημάδια αστοχίας, οι δε βρόχοι υστέρησης εξαιρετικά πλούσιοι. Η φέρουσα ικανότητα σχεδόν τριπλασιάστηκε σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς F1, ενώ δεν εμφανίστηκαν ίχνη στένωσης κατά την ανακύκλιση. Από τα πειραματικά στοιχεία είναι φανερό ότι η συμπεριφορά του συνδέσμου καθορίζει τη συμπεριφορά του δοκιμίου.

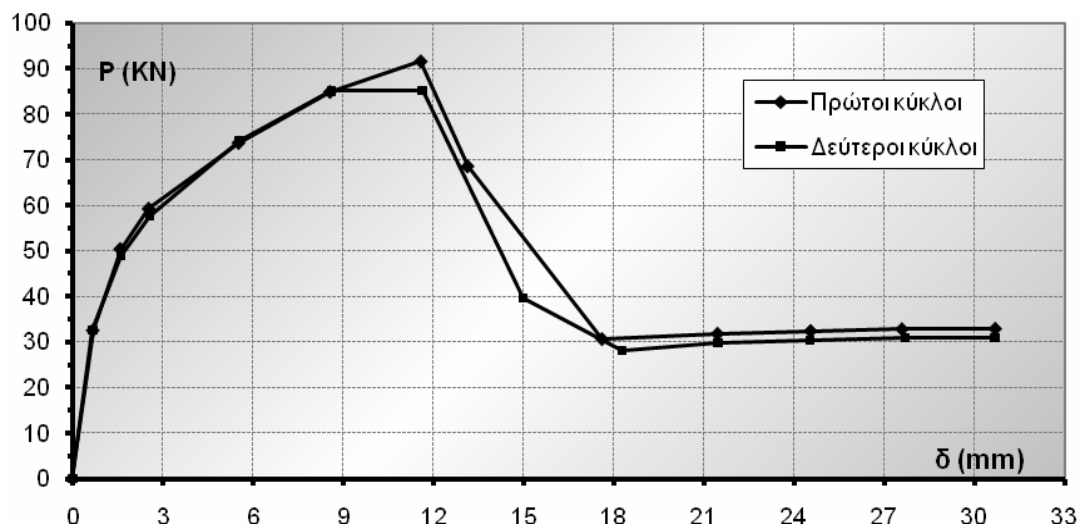
Στο πλαίσιο του σκυροδέματος είχε αρχίσει παράλληλα ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στις ίδιες θέσεις με αυτές του γυμνού πλαισίου (Φωτ. 4.12). Αμέσως μετά τη μετακίνηση του 12‰, ο σύνδεσμος αστόχησε ψαθυρά με οριζόντιο περίπου αποχωρισμό, συνοδευόμενο από έντονη στρέβλωση (Φωτ. 4.9 και 4.11), άμεσο επακόλουθο της παραμόρφωσης καθεμιάς παρειάς του συνδέσμου κατά την ανακύκλιση καθώς ο εναλλασσόμενος εφελκυσμός και σύνθλιψη είχε ως αποτέλεσμα την αυξομείωση του μήκους των ακραίων κατακόρυφων ινών του συνδέσμου. Η έντονη ανακυκλιζόμενη καταπόνηση του συνδέσμου συνετέλεσε στην αστοχία του η οποία εκδηλώθηκε με λυγισμό και στρέβλωση (Φωτ. 4.9) και στη συνέχεια με οριζόντια απόσχιση (Φωτ. 4.13). Μετά την απόσχιση του συνδέσμου, το πλαίσιο του σκυροδέματος συνέχισε να συμπεριφέρεται όπως το αντίστοιχο γυμνό (Φωτ. 4.14), επιδεικνύοντας σχετικώς πλάστιμη συμπεριφορά, με χαμηλή φέρουσα ικανότητα, συγκρίσιμη πάντως με αυτήν του γυμνού πλαισίου στο ίδιο επίπεδο μετακίνησης.



Φωτ. 4.8 Δοκίμιο F2.



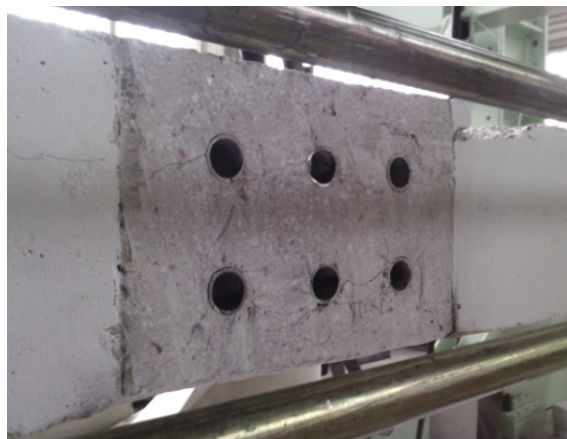
Σχ. 4.15 Φορτίο - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F2).



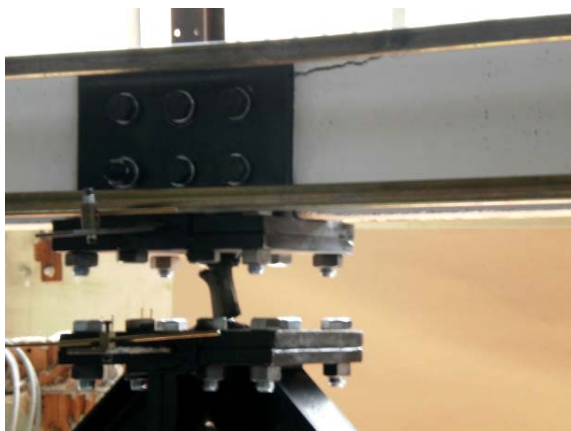
Σχ. 4.16 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F2).



Φωτ. 4.9 Στρέβλωση κατακόρυφου συνδέσμου.



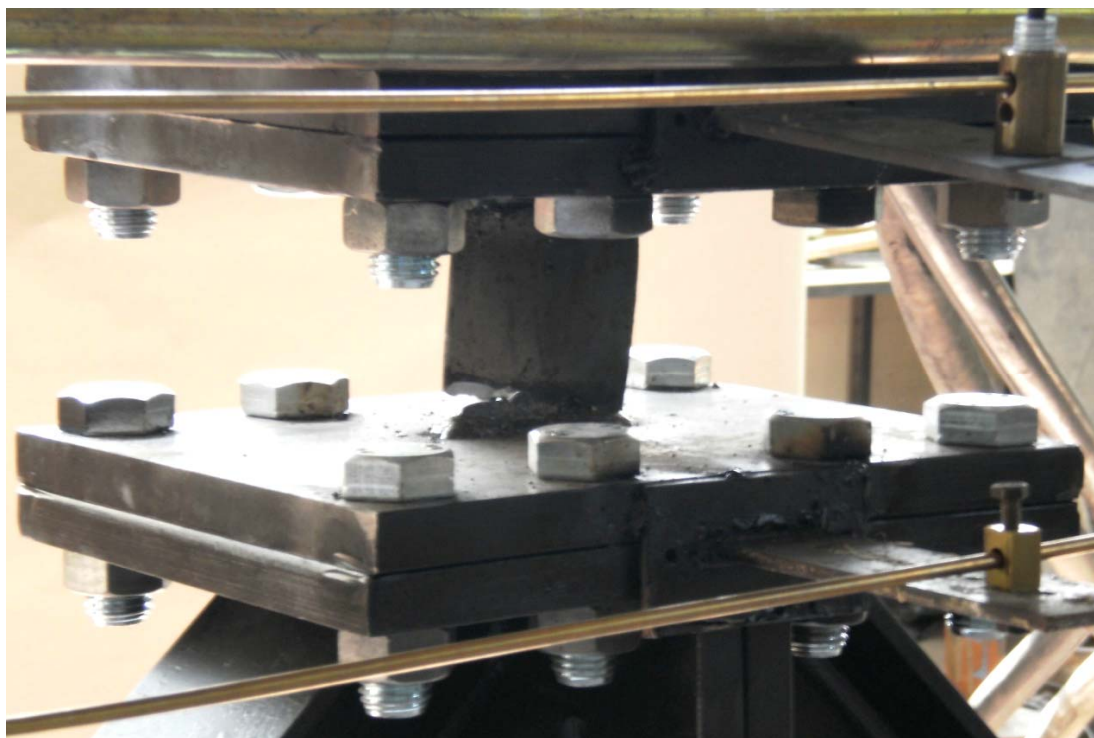
Φωτ. 4.10 Ήπια ρηγμάτωση στο μέσον της δοκού.



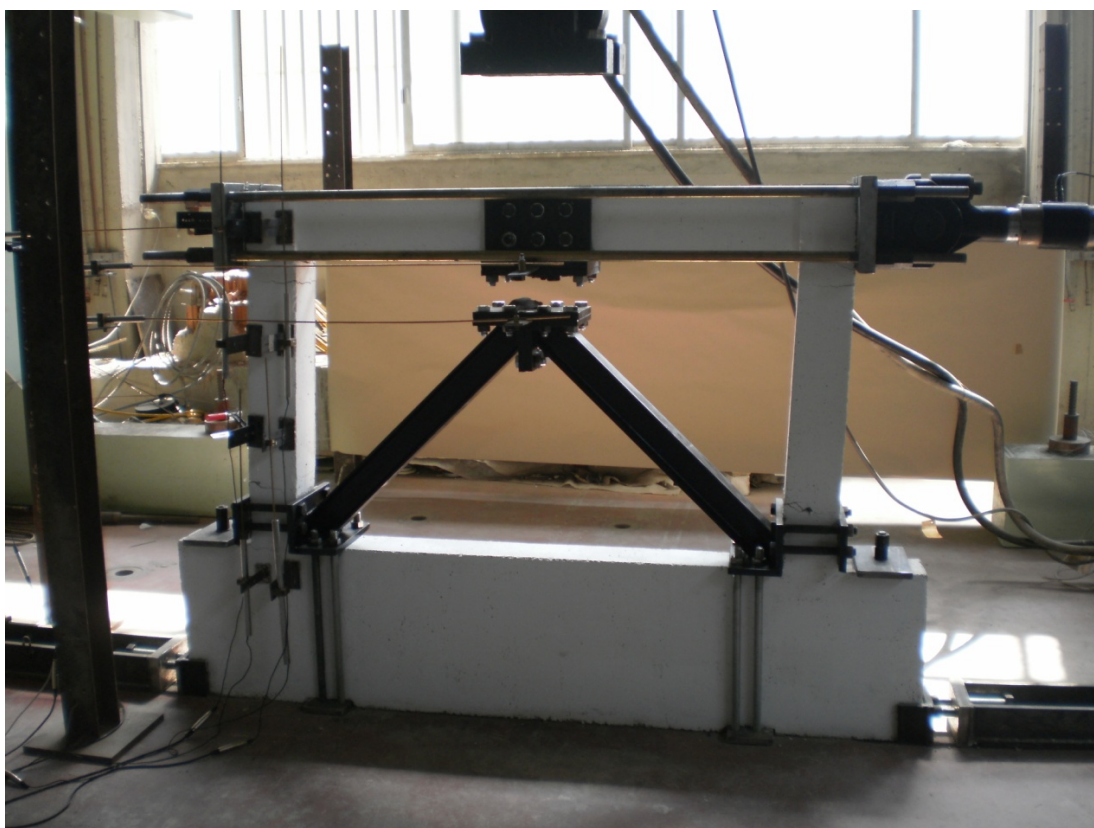
Φωτ. 4.11 Αστοχία κατακόρυφου συνδέσμου και ρηγμάτωση δοκού.



Φωτ. 4.12 Ρηγμάτωση στύλου.



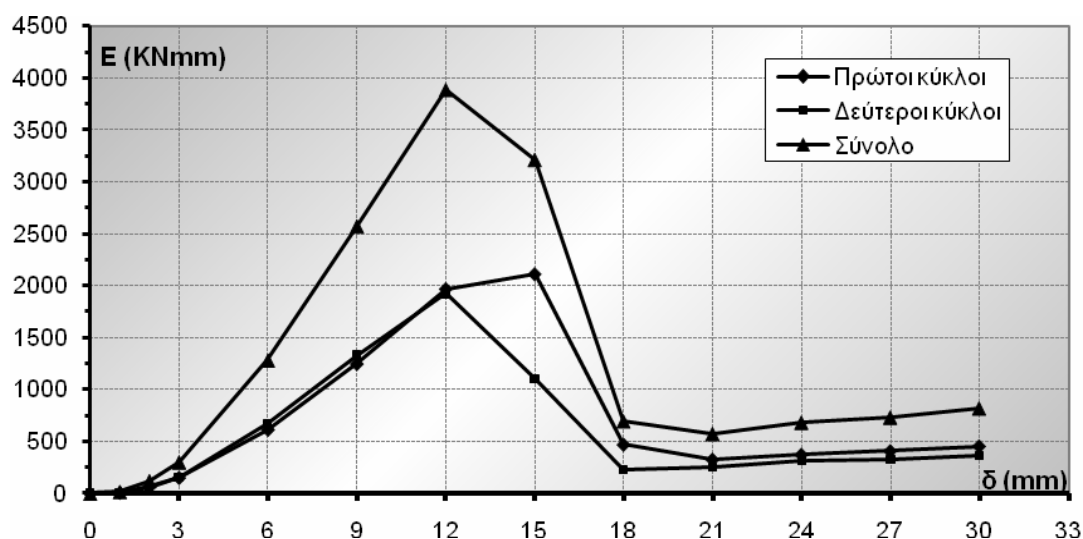
Φωτ. 4.13 Οριζόντια απόσχιση μεταλλικού συνδέσμου.



Φωτ. 4.14 Δοκίμιο F2 στη μέγιστη μετατόπισή του
(ο κατακόρυφος σύνδεσμος έχει ήδη αστοχήσει).

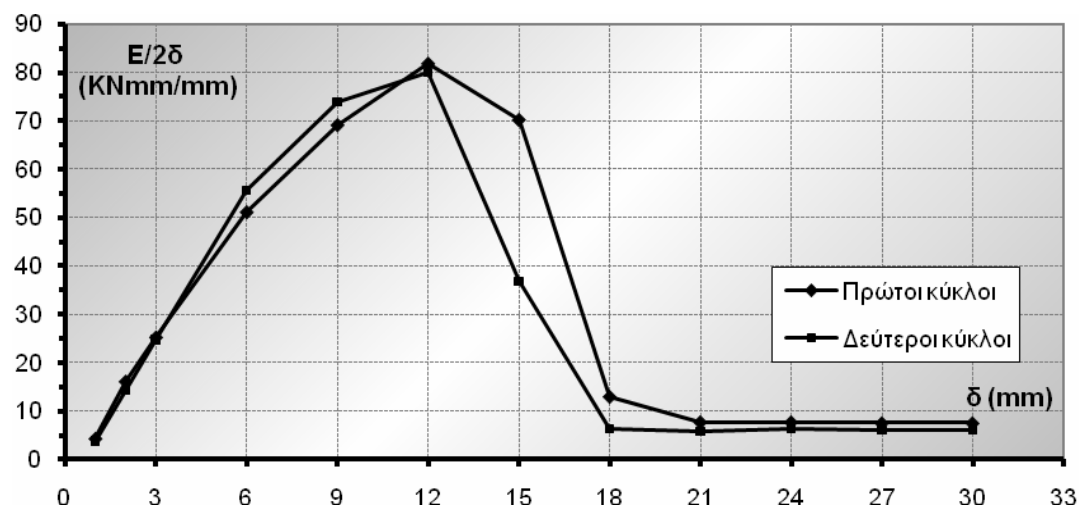
Επισημαίνεται ότι στο μέσον του ανοίγματος, στην περιοχή σύνδεσης του πλαισίου με τον κατακόρυφο σύνδεσμο, εμφανίσθηκαν ήπιες ρηγματώσεις, όχι πάντως κρίσιμες ώστε να διαφοροποιήσουν τη μορφή αστοχίας (Φωτ. 4.10 και 4.11).

Εντυπωσιακά ήταν επίσης και τα αποτελέσματα ως προς την απορροφώμενη ενέργεια (Σχ. 4.17), καθώς σε παραμόρφωση 12‰ υπερδεκαπλασιάστηκε σε σχέση με το πλαίσιο F1 μέχρι την αποκόλληση του κατακόρυφου συνδέσμου. Οι δύο κύκλοι παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά μέχρι την πλήρη αστοχία του συνδέσμου όσον αφορά την ενέργεια που απορροφήθηκε. Η διαφορά μεταξύ πρώτου και δεύτερου κύκλου στη μετατόπιση των 15mm οφείλεται στο γεγονός ότι η απόσχιση ουσιαστικά ολοκληρώθηκε στο δεύτερο και όχι στον πρώτο κύκλο φόρτισης. Μετά την πλήρη αστοχία, η ενέργεια ταυτίζεται με το δοκίμιο F1.



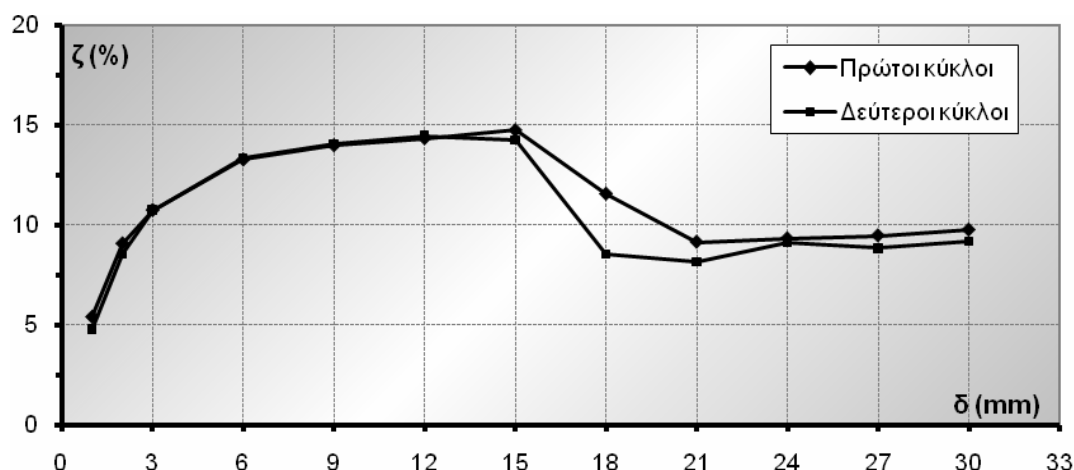
Σχ. 4.17 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F2).

Η ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια (Σχ. 4.18), όπως ήταν αναμενόμενο, αυξάνεται μέχρι την παραμόρφωση των 12mm όπου επήλθε η αστοχία του συνδέσμου. Είναι εμφανής η αντιστοιχία μεταξύ ανηγμένης και μη απορροφώμενης ενέργειας. Μετά την αστοχία του συνδέσμου, η τιμή της ανηγμένης ενέργειας ταυτίζεται με την αντίστοιχη του δοκιμίου F1.



Σχ. 4.18 Ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F2).

Η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση (Σχ. 4.19) παρουσίασε αύξηση η οποία διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα ακόμη και σε ένα επίπεδο μετά την έναρξη αστοχίας του συνδέσμου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη σταδιακή απόσχιση του συνδέσμου. Η μέγιστη τιμή του συντελεστή $\zeta \approx 15\%$ εμφανίστηκε στη μετατόπιση των 15mm. Ως αποτέλεσμα των πολύ πλούσιων βρόχων, η τιμή αυτή πλησιάζει την ιδανική πλαστική συμπεριφορά, η οποία αντιστοιχεί σε τιμή του $\zeta = 1/2\pi = 15,92\%$. Μετά τη μέγιστη τιμή, η τιμή της απόσβεσης πέφτει σε τιμές της τάξεως του 9%, ελαφρά μικρότερες από τις αντίστοιχες του πλαισίου F1.



Σχ. 4.19 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F2).

4.4 Δοκίμιο F2,N

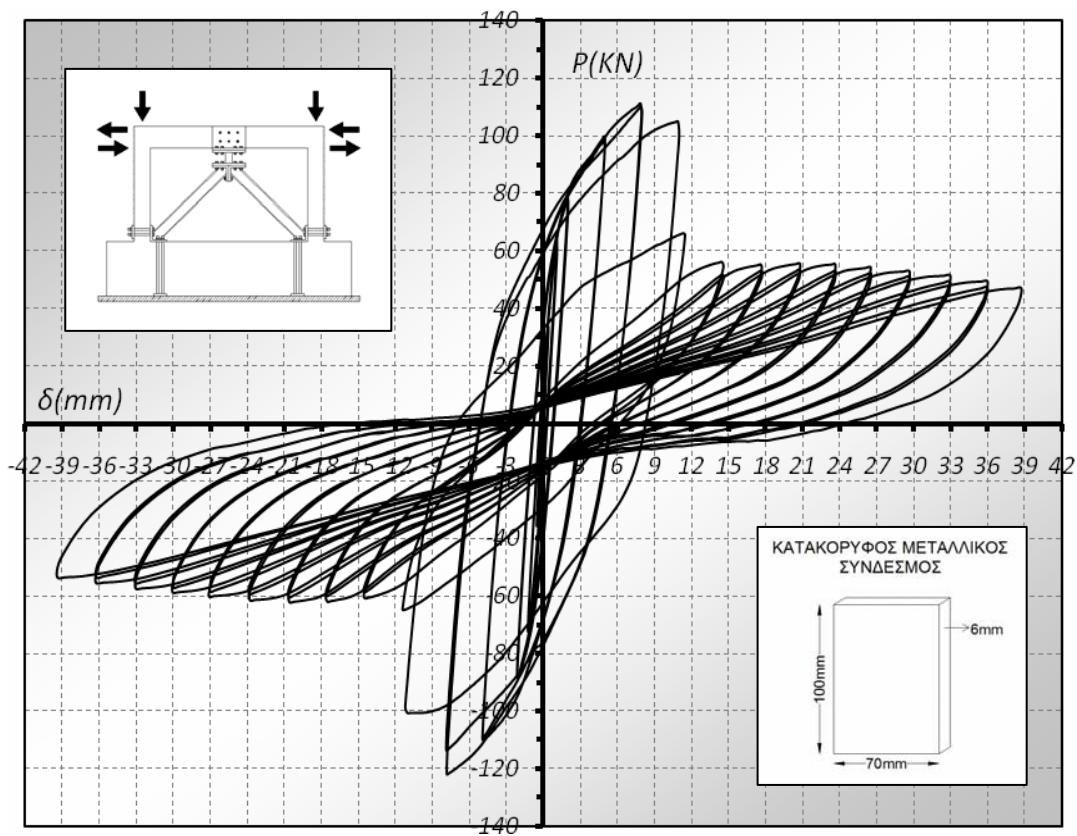
Με την επιβολή του αξονικού φορτίου στους στύλους (Φωτ. 4.15), παρατηρήθηκε και πάλι σημαντική αύξηση της δυσκαμψίας. Η πειραματική δοκιμή εξελίχθηκε με περιορισμένο εύρος ρηγματώσεων στους στύλους. Οι πλαστικές αρθρώσεις των στύλων παρουσίασαν ήπια μορφή σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς το αξονικό φορτίο. Το γεγονός αυτό πιστοποιείται και από τις μετρήσεις των οργάνων οι οποίες κατέγραφαν τη διακύμανση του εύρους των ρηγμάτων στο στύλο, το οποίο ήταν αισθητά περιορισμένο σε σχέση με το δοκίμιο χωρίς το αξονικό φορτίο ειδικά στους πρώτους κύκλους φόρτισης.

Η παραμόρφωση του κατακόρυφου μεταλλικού συνδέσμου παρουσίασε την ίδια συμπεριφορά με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς αξονικό φορτίο, με εμφανή τα σημάδια στρέβλωσης από τα πρώτα κιόλας βήματα μετατοπίσεων. Και πάλι ο σύνδεσμος αστόχησε ψαθυρά με οριζόντιο αποχωρισμό (Φωτ. 4.16). Όμοια με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς αξονικό φορτίο στους στύλους (F2), η οριζόντια απόσχιση ξεκίνησε σε μετατόπιση περίπου 12mm από τη θέση ισορροπίας, προσδίδοντας γωνιακή παραμόρφωση περίπου 12‰. Η απόσχιση του συνδέσμου και πάλι ξεκίνησε από το κάτω τμήμα του, χωρίς όμως να αστοχήσουν οι συγκολλήσεις, και ολοκληρώθηκε με την απόσχιση και του άνω τμήματός του.

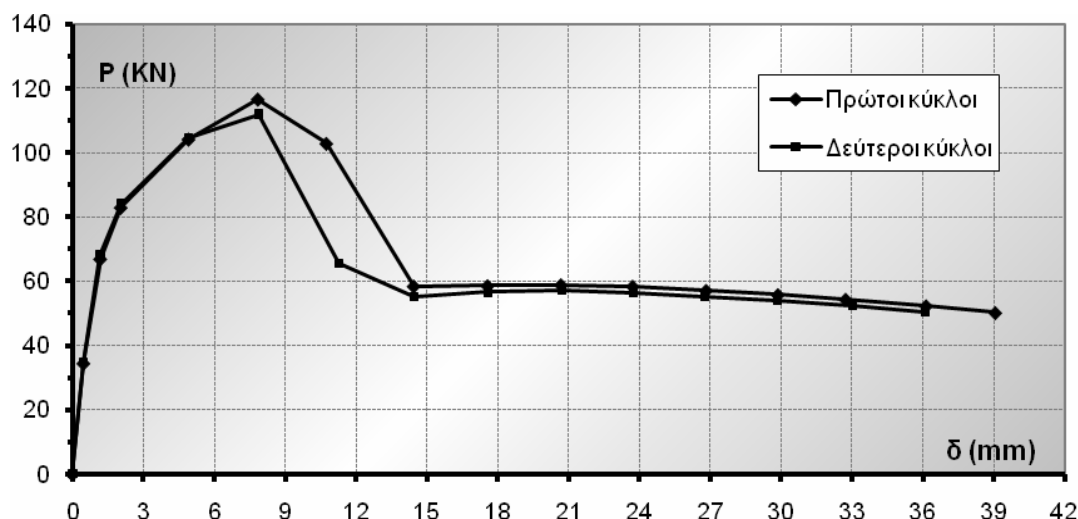
Από τους πρώτους κύκλους φόρτισης το δοκίμιο παρουσίασε αυξημένη φέρουσα ικανότητα και πλουσιότερους βρόχους σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς αξονικό φορτίο (F2). Στη μετατόπιση των 12mm, πριν την απόσχιση του κατακόρυφου συνδέσμου, παρατηρήθηκε αύξηση της φέρουσας ικανότητας κατά 13% περίπου σε σχέση με το F2. Ακόμη και μετά την απόσχιση του συνδέσμου η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου με αξονικό φορτίο στους στύλους διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα (Σχ. 4.20, 4.21). Παρατηρήθηκε και πάλι καμπτική αστοχία στύλων με πλαστικές αρθρώσεις άνω και κάτω (Φωτ. 4.17 και 4.18).



Φωτ. 4.15 Δοκίμιο F2,N.

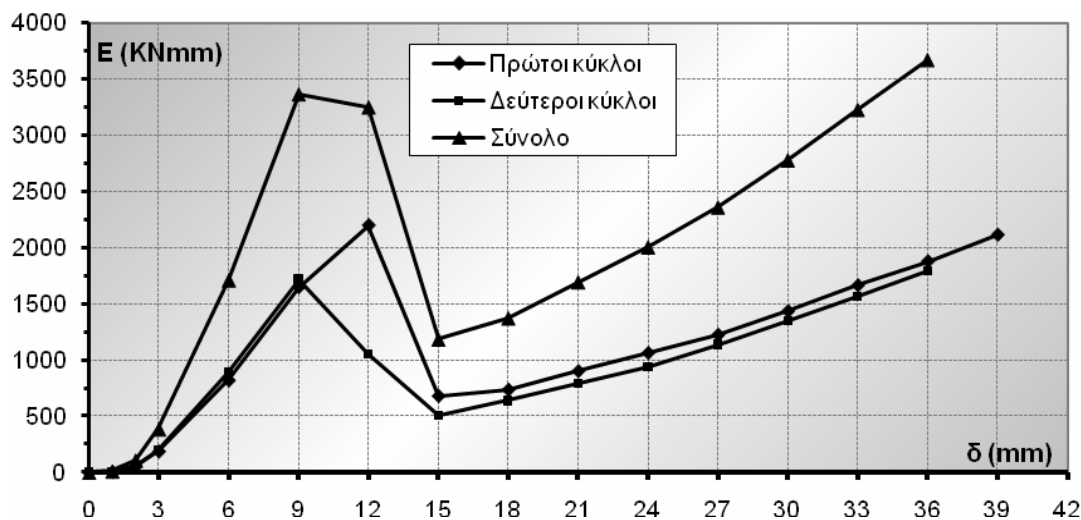


Σχ. 4.20 Φορτίο - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F2,N).



Σχ. 4.21 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F2,N).

Η απορροφώμενη ενέργεια κυμάνθηκε σε υψηλά επίπεδα, με αύξηση περίπου 12,5% σε σχέση με το δοκίμιο χωρίς αξονικό στην κρίσιμη μετατόπιση των 12mm. Η ολοκληρωτική αστοχία του συνδέσμου συνοδεύτηκε από απότομη πτώση της απορροφώμενης ενέργειας. Η διατήρηση παρόλα αυτά ικανοποιητικής φέρουσας ικανότητας ακόμη και σε μεγάλες μετατοπίσεις επέφερε εκ νέου αύξηση της ενέργειας που απορροφήθηκε (Σχ. 4.22).

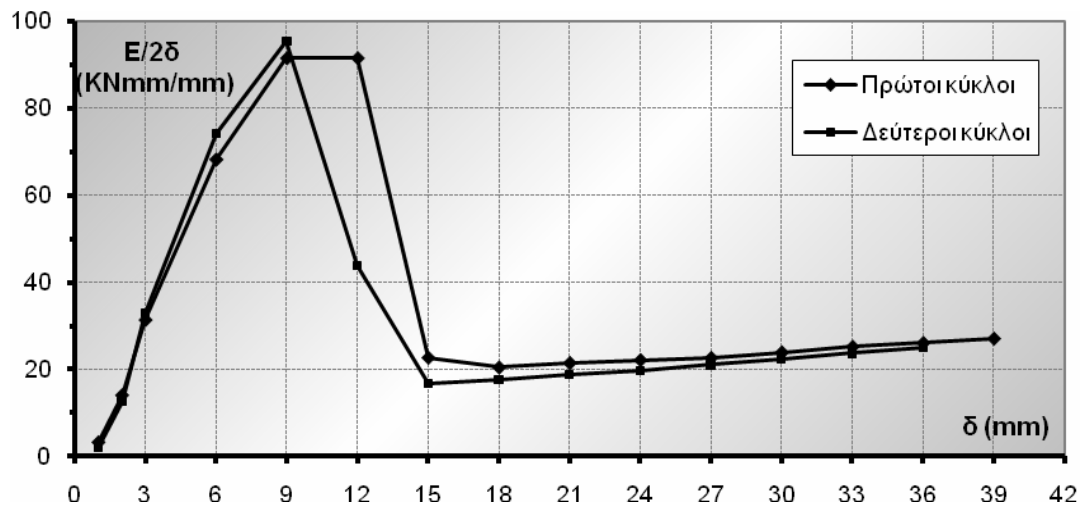


Σχ. 4.22 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F2,N).

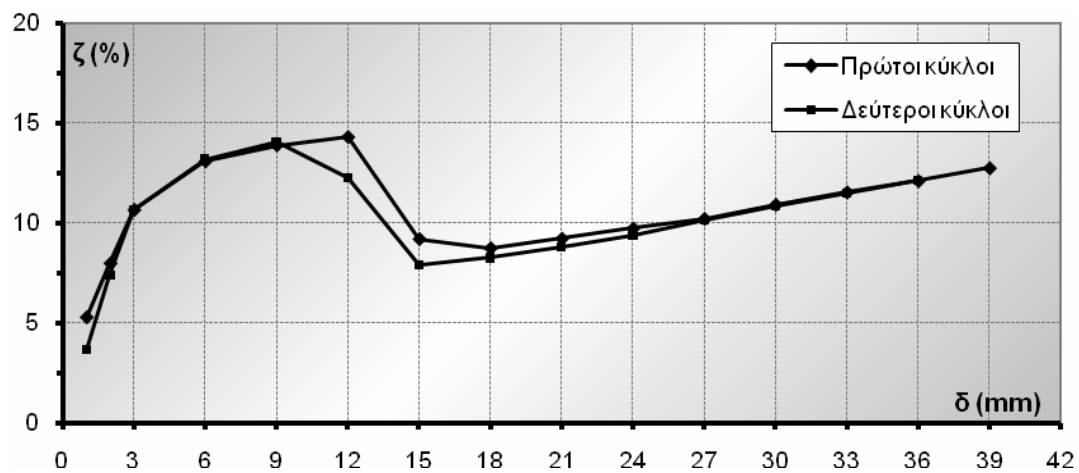
Η ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια (Σχ. 4.23) παρουσίασε την αναμενόμενη αύξηση μέχρι τη μετατόπιση των 12mm. Ακολούθησε απότομη πτώση μετά την αστοχία του συνδέσμου και εκ νέου ήπια αύξηση. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απότομη αύξηση της απορροφώμενης ενέργειας μετά την αστοχία του συνδέσμου (Σχ. 4.22), παύει να παρατηρείται όταν γίνεται αναγωγή της συγκεκριμένης ποσότητας ενέργειας στο αντίστοιχο επίπεδο μετακίνησης (Σχ. 4.23).

Η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση (Σχ. 4.24) παρουσίασε αύξηση μέχρι την αστοχία του κατακόρυφου συνδέσμου. Ακολούθησε και πάλι απότομη πτώση και ακολούθως ήπια

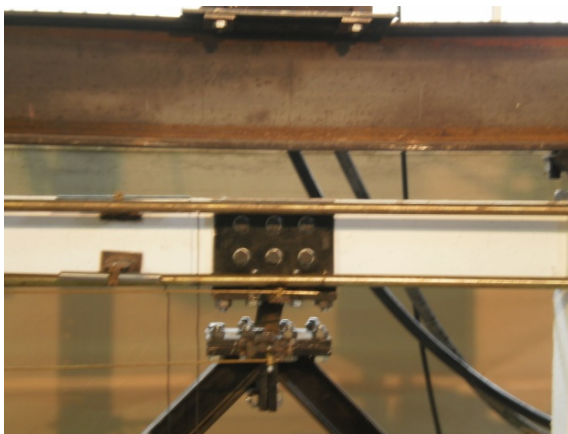
αύξηση η οποία πιστοποιεί την αύξηση της απορροφώμενης ενέργειας μετά την απόσχιση του συνδέσμου (Σχ. 4.22).



Σχ. 4.23 Ανηγγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F2,N).



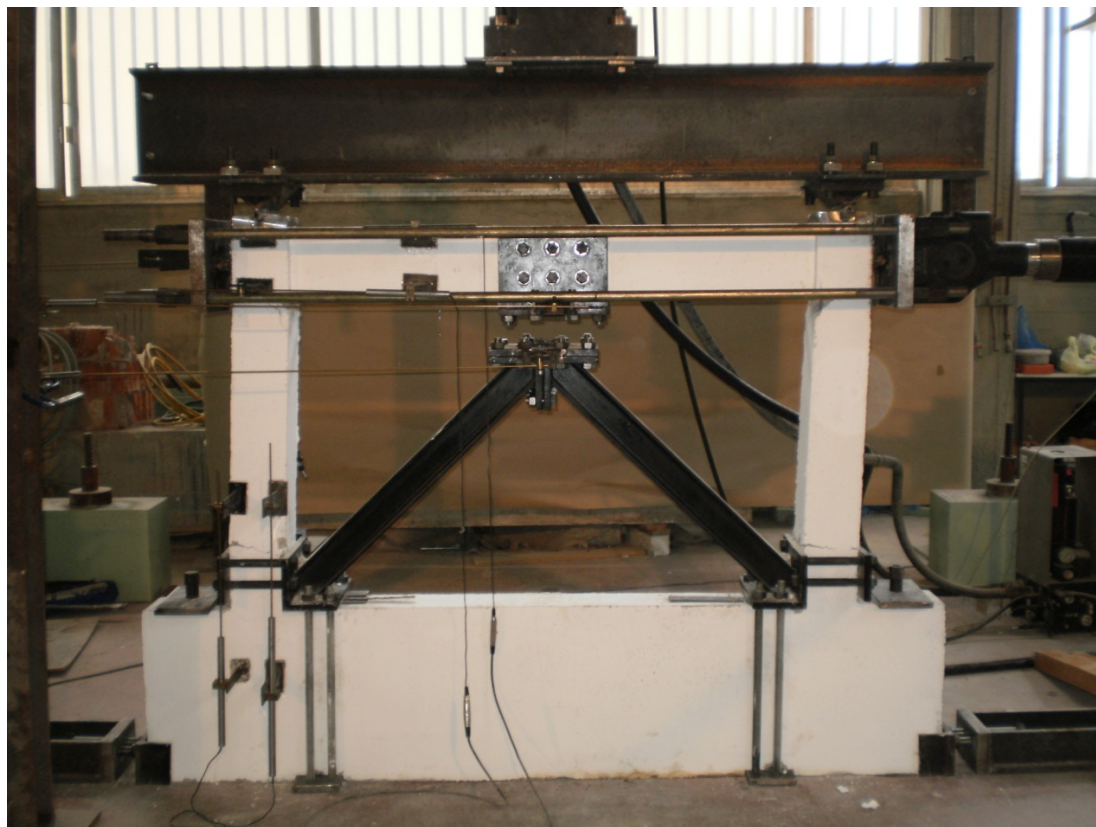
Σχ. 4.24 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F2,N).



Φωτ. 4.16 Αστοχία συνδέσμου.



Φωτ. 4.17 Πλαστική άρθρωση στύλου.



Φωτ. 4.18 Δοκίμιο F2,N στη μέγιστη μετατόπιση.

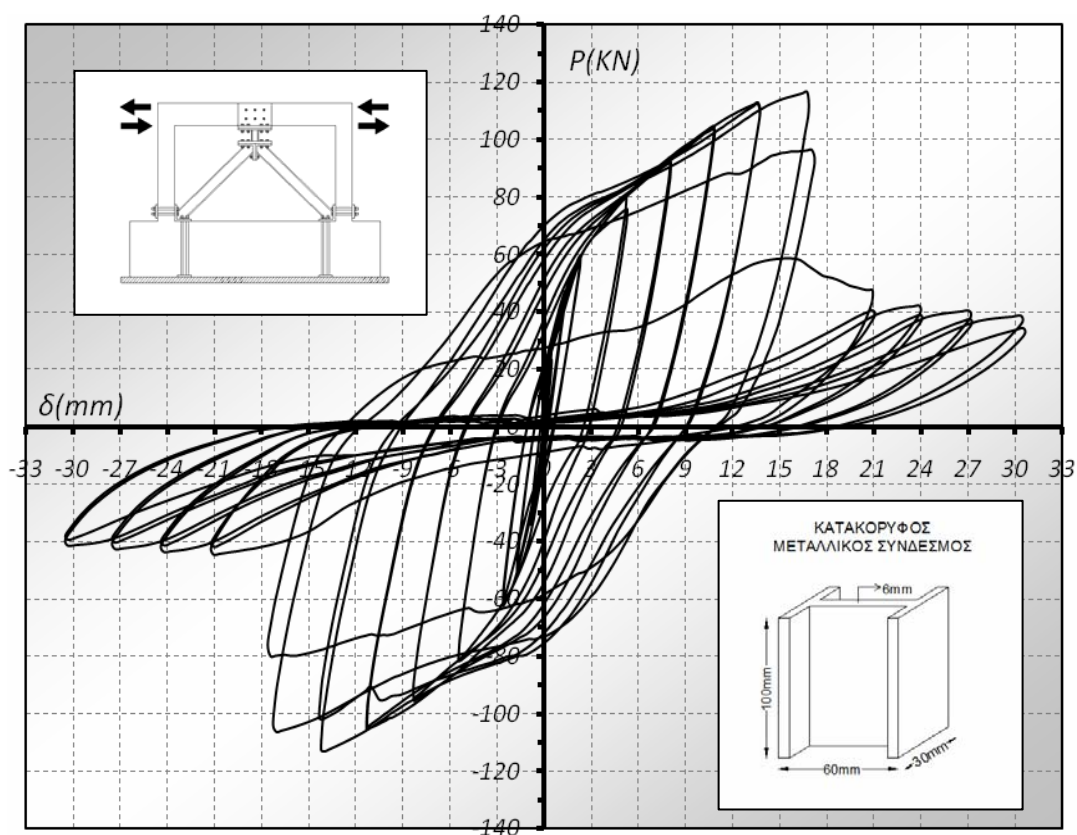
4.5 Δοκίμιο F3

Όπως φαίνεται από τους βρόχους υστέρησης, ο κατακόρυφος μεταλλικός σύνδεσμος διατομής I, σε συνδυασμό με το μικρό ύψος του (Φωτ. 4.19 και 4.20) καθιστούν το κατακόρυφο στοιχείο πιο ανθεκτικό και πιο δύσκαμπτο σε σχέση με το δοκίμιο F2. Σε όλη τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης ο μεταλλικός κορμός προσέδωσε αυξημένη δυσκαμψία, όχι μόνον στους πρώτους κύκλους. Τα πέλματα της διατομής εμπόδισαν τη στρέβλωση του κορμού κατά την ανακύκλιση, φαινόμενο το οποίο παρατηρήθηκε στο δοκίμιο F2 που δεν διέθετε πέλματα. Στη μετατόπιση των 12mm, στην οποία παρατηρήθηκε αστοχία του συνδέσμου του δοκιμίου F2, η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου F3 ήταν ήδη αυξημένη κατά 10% με τάσεις ανόδου (Σχ. 4.25 και 4.26). Η εξέλιξη πάντως της δοκιμής απέδωσε υψηλά ποσά απορροφώμενης ενέργειας τα οποία εξισώθηκαν με του δοκιμίου F2 μετά την αστοχία του συνδέσμου. Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα που ανέπτυξε το συγκεκριμένο δοκίμιο (F3) πριν την αστοχία του συνδέσμου ήταν περίπου τρεισήμισι φορές μεγαλύτερη από του αντίστοιχου γυμνού δοκιμίου (F1) χωρίς να εμφανιστούν ίχνη στένωσης.

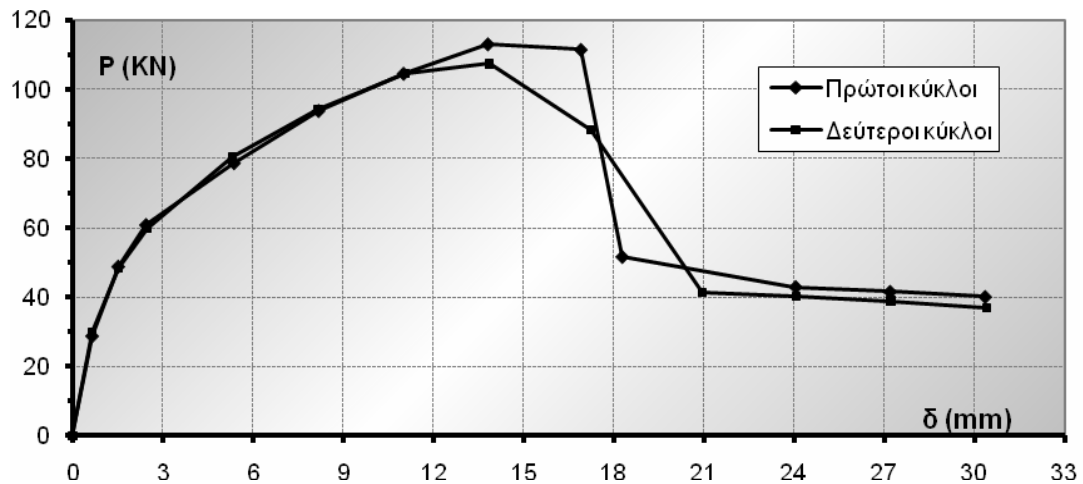
Η αποκόλληση του κατακόρυφου μεταλλικού συνδέσμου (Φωτ. 4.21) ξεκίνησε αρκετά αργότερα σε σχέση με το δοκίμιο F2, σε γωνιακή παραμόρφωση 18‰ αυξάνοντας κατά συνέπεια τη διαθέσιμη πλαστιμότητα (Σχ. 4.25 και 4.26). Όπως και στην περίπτωση της μεταλλικής λάμας (δοκίμιο F2), η αποκόλληση εξελίχθηκε με οριζόντια απόσχιση του συνδέσμου τόσο στην κεφαλή όσο και στον πόδα της. Την πλήρη απόσχιση του συνδέσμου ακολούθησε απότομη πτώση της φέρουσας ικανότητας με τη συμπεριφορά του δοκιμίου να εμφανίζει τάσεις ταύτισης με το γυμνό πλαίσιο F1.



Φωτ. 4.19 Δοκίμιο F3.



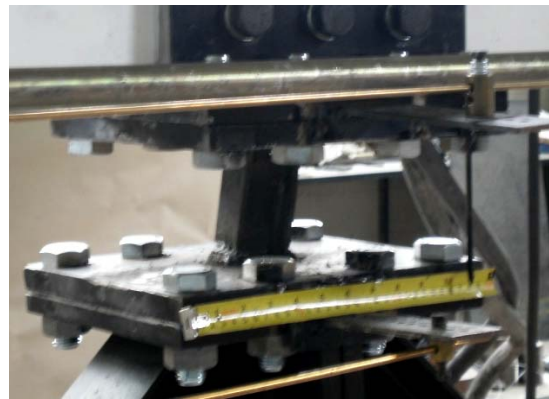
Σχ. 4.30 Φορτίο - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F3)



Σχ. 4.26 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F3).



Φωτ. 4.20 Κατακόρυφος σύνδεσμος διατομής I.



Φωτ. 4.21 Έναρξη αστοχίας διατομής χωρίς ενδείξεις στρέβλωσης.

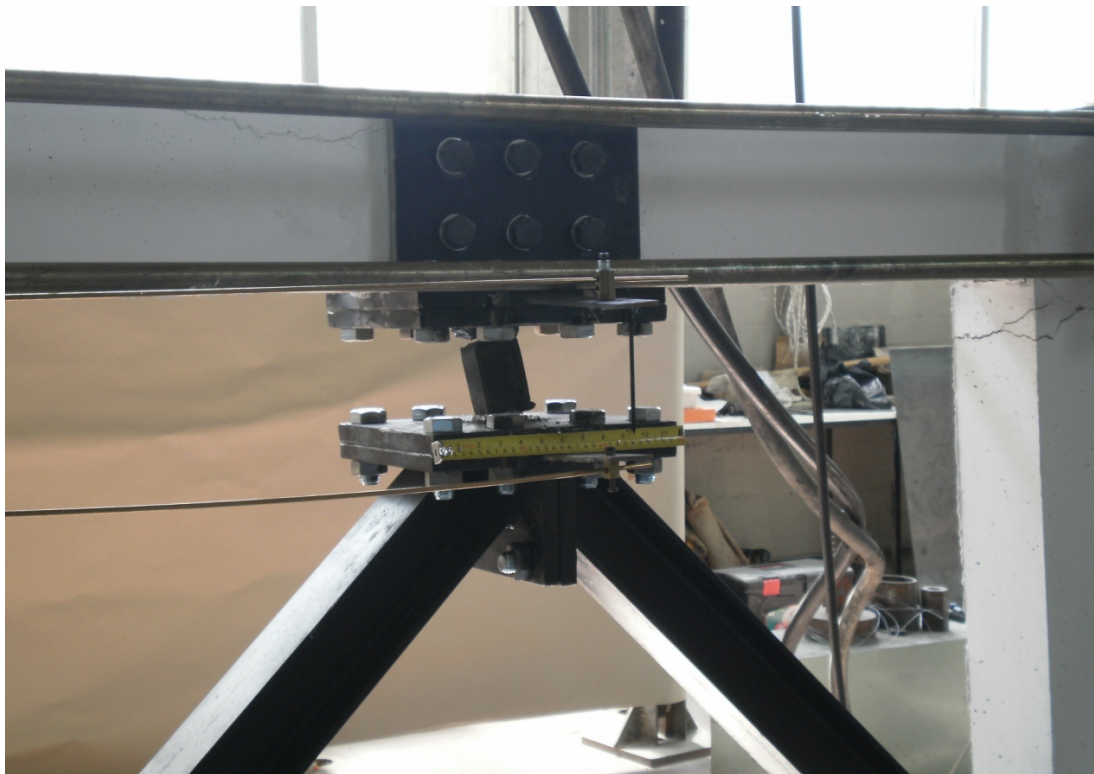


Φωτ. 4.22 Ρηγμάτωση πόδα στύλου.

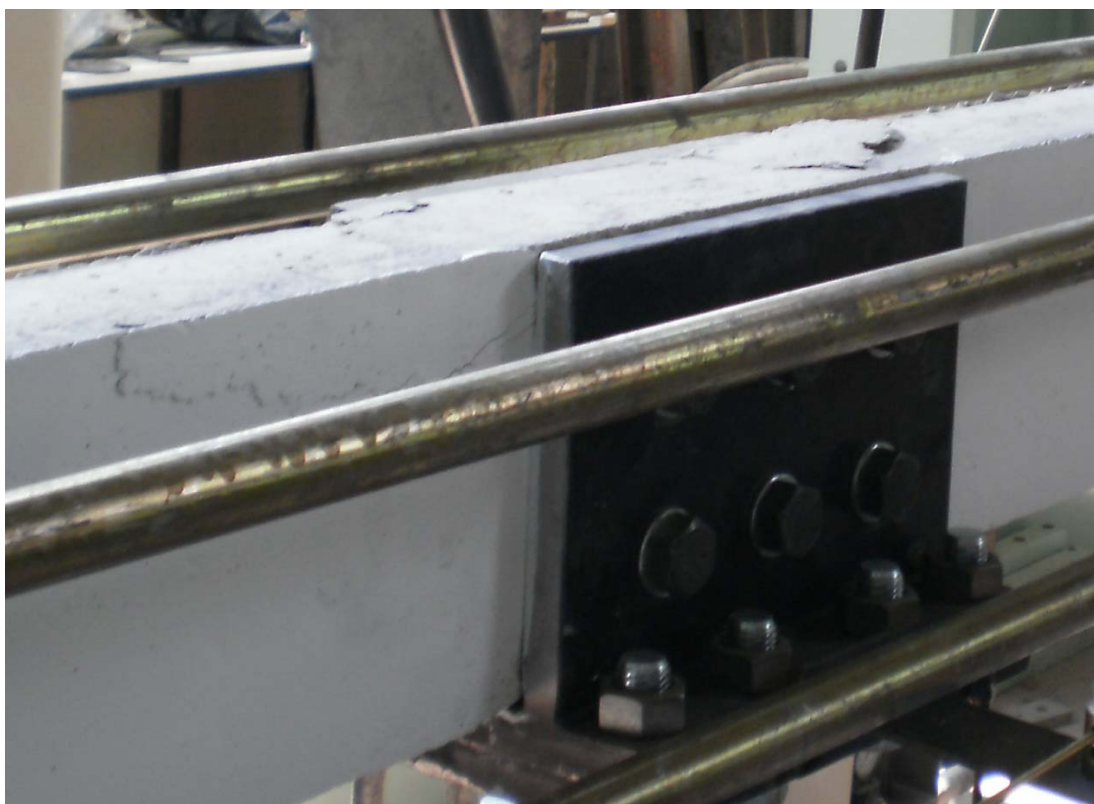


Φωτ. 4.23 Ρηγμάτωση κεφαλής στύλου.

Για μία ακόμη φορά εμφανίστηκαν ρηγματώσεις στην κεφαλή και τη βάση των στύλων (Φωτ. 4.22 και 4.23). Η αποκόλληση του συνδέσμου οφείλεται σε καθαρή αστοχία της διατομής και όχι των συγκολλήσεων του κορμού με τις μεταλλικές πλάκες (Φωτ. 4.21 και 4.24). Μετά την οριστική αποκόλληση, ο σύνδεσμος αποδεσμεύτηκε πλήρως χωρίς να αναπτύσσονται τριβές κατά μήκος της επιφάνειας αποκόλλησής του.



Φωτ. 4.24 Αστοχία κατακόρυφου συνδέσμου με ταυτόχρονη ρηγμάτωση στύλου και δοκού.

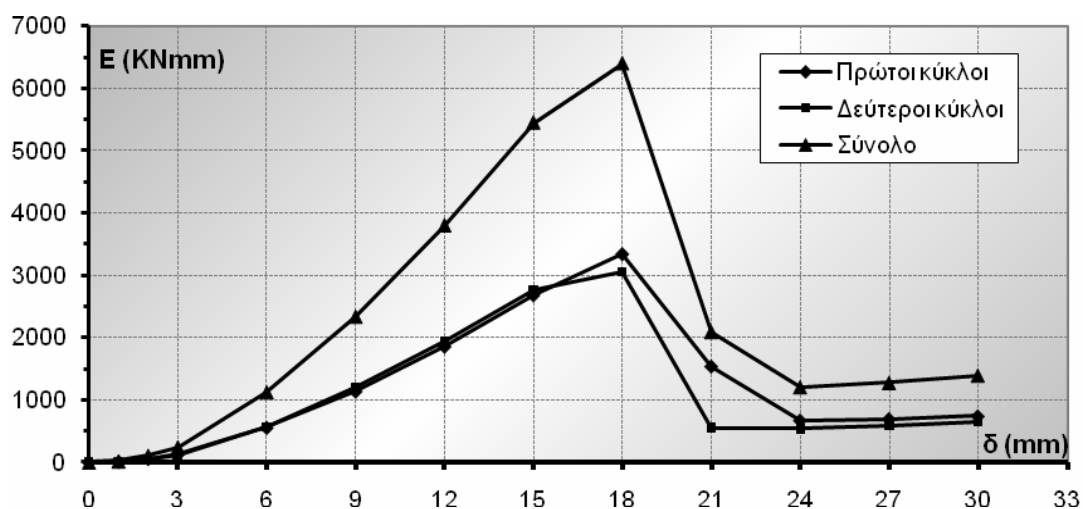


Φωτ. 4.25 Ρηγμάτωση δοκού και αποφλοίωση επικάλυψης.

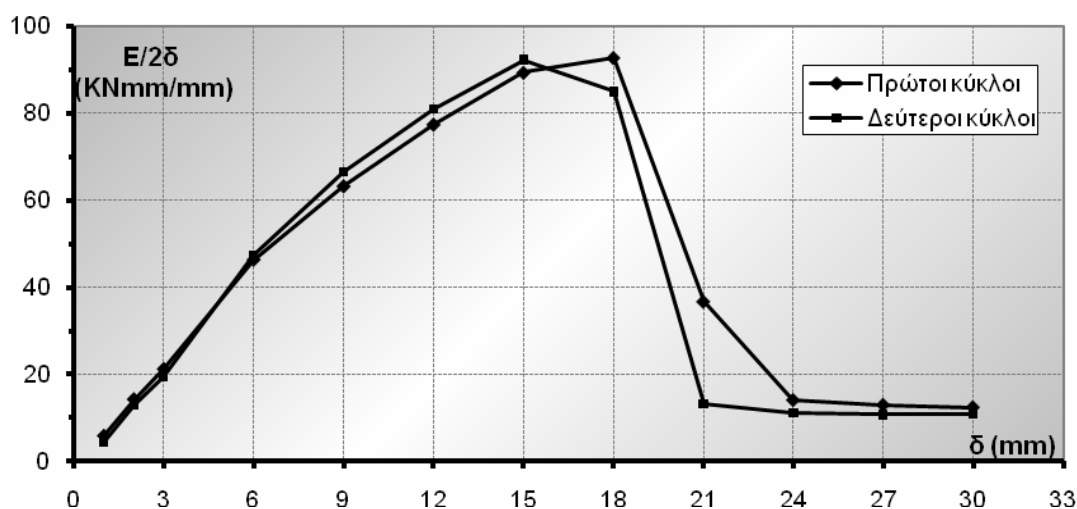
Η αυξημένη αντοχή του συνδέσμου, όπως ήταν αναμενόμενο, είχε ως άμεσο αποτέλεσμα τη μεταφορά τοπικά μεγαλύτερης έντασης στο πλαίσιο σκυροδέματος σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο F2. Κατά συνέπεια το παρόν δοκίμιο F3 εμφάνισε εντονότερες ρηγματώσεις στο μέσον της δοκού με αποφλοίωση της επικάλυψης (Φωτ. 4.25), και πάλι όμως όχι κρίσιμες ώστε να διαφοροποιηθεί η μορφή αστοχίας. Η ήπια μεταφορά της έντασης από τον κατακόρυφο μεταλλικό σύνδεσμο μέσω του μεταλλικού στοιχείου Π στις έξι ντίζες σύνδεσής του με τη δοκό συνετέλεσε στον περιορισμό της ρηγμάτωσης της περιοχής.

Η απορροφώμενη ενέργεια και η ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια εξελίχθηκαν ομαλά παρουσιάζοντας αύξηση μέχρι τη μέγιστη τιμή της στη χρονική στιγμή πριν την αστοχία του συνδέσμου (Σχ. 4.27 και 4.28). Ακολούθησε απότομη πτώση και σταθεροποίηση σε τιμές όμοιες με αυτές του δοκιμίου F2 μετά την αστοχία του κατακόρυφου συνδέσμου.

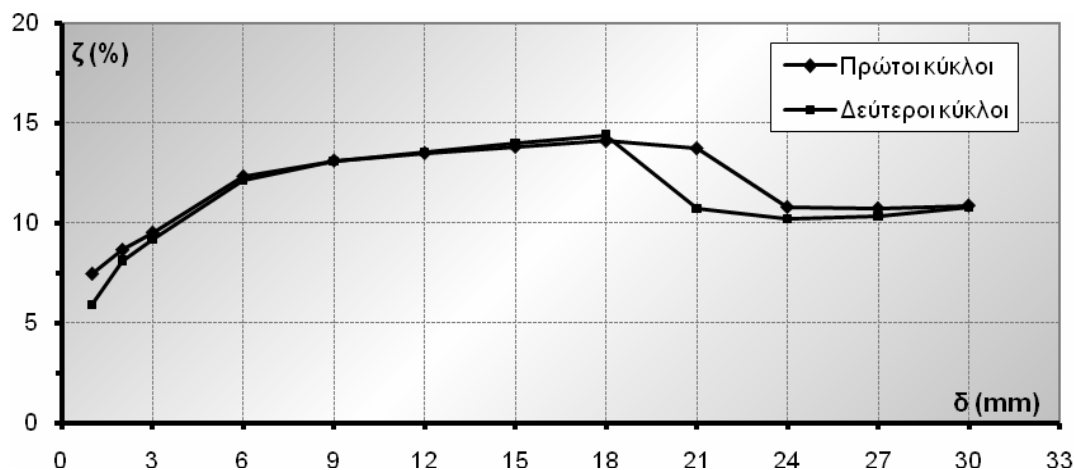
Η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση (Σχ. 4.29) με αύξουσα κλίση τείνει να σταθεροποιηθεί στο 14%. Η αστοχία όμως του κατακόρυφου συνδέσμου την υποβιβάζει σε τιμές οι οποίες ταυτίζονται με τις αντίστοιχες του δοκιμίου F2.



Σχ. 4.27 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F3).



Σχ. 4.28 Ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F3).



Σχ. 4.29 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F3).

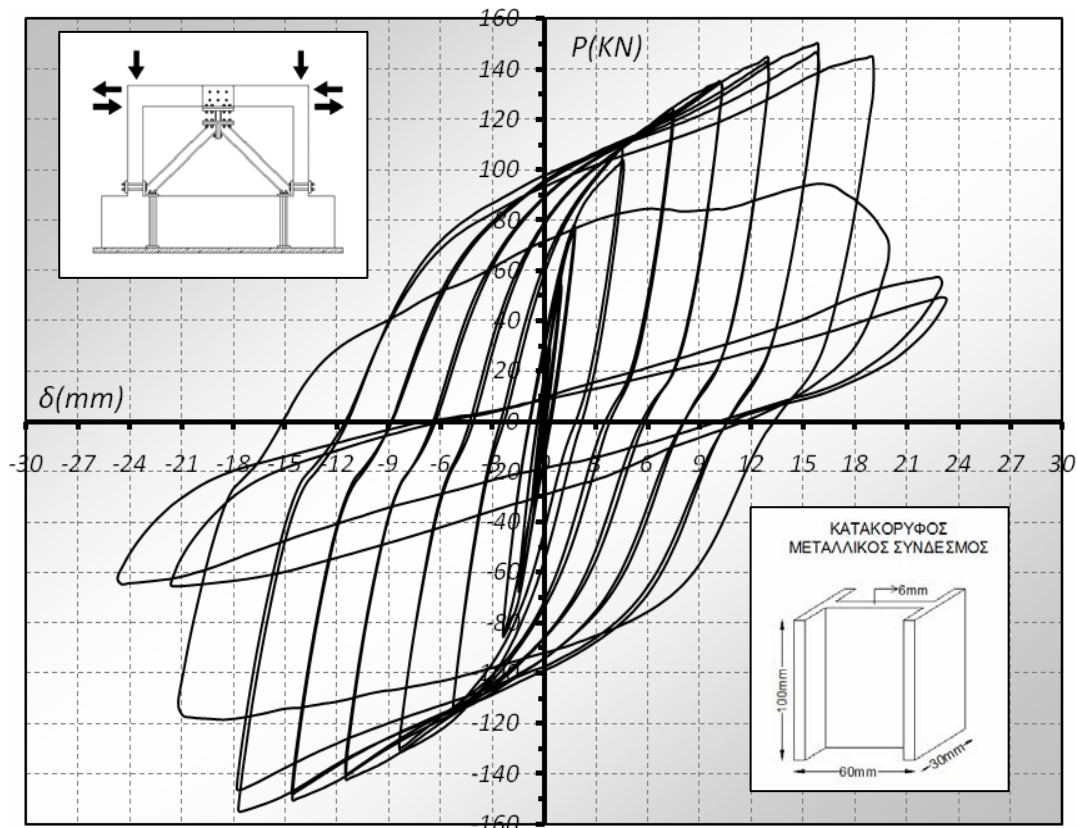
4.6 Δοκίμιο F3,N

Η προσθήκη αξονικού φορτίου στους στύλους του πλαισίου είχε για μια ακόμη φορά τα προβλεπόμενα αποτελέσματα όσον αφορά κυρίως τη δυσκαμψία. Στη φωτογραφία 4.26 φαίνεται η αρχική κατάσταση του δοκιμίου. Ήδη σε μετατόπιση μόλις 3mm παρατηρήθηκε αύξηση της φέρουσας ικανότητας 35% σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς αξονικό φορτίο στους στύλους (F3), ενώ η μέγιστη αντοχή παρουσίασε αύξηση περίπου 36% η οποία αναπτύχθηκε στο ίδιο επίπεδο μετακίνησης με το αντίστοιχο δοκίμιο F3 (Σχ. 4.30 και 4.31).

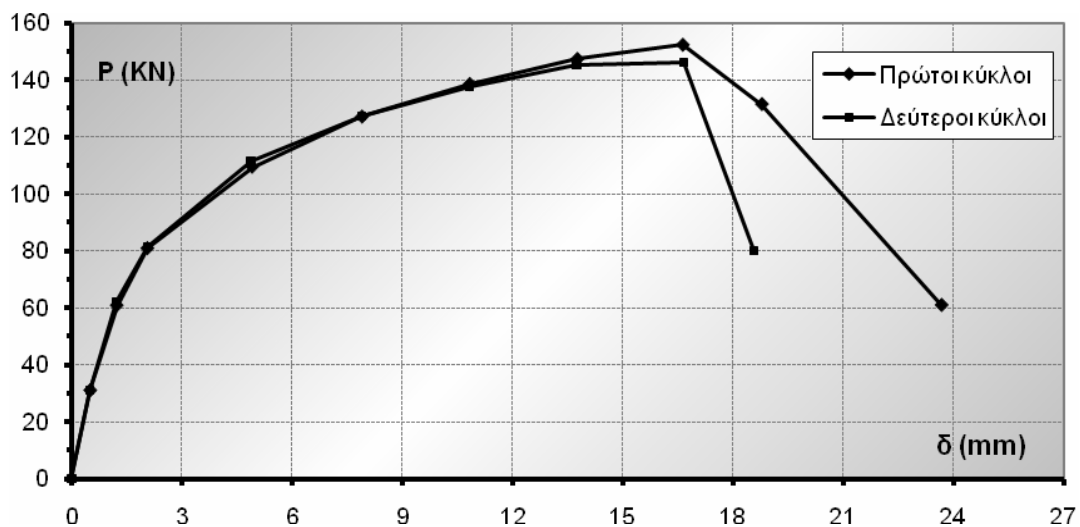


Φωτ. 4.26 Δοκίμιο F3,N.

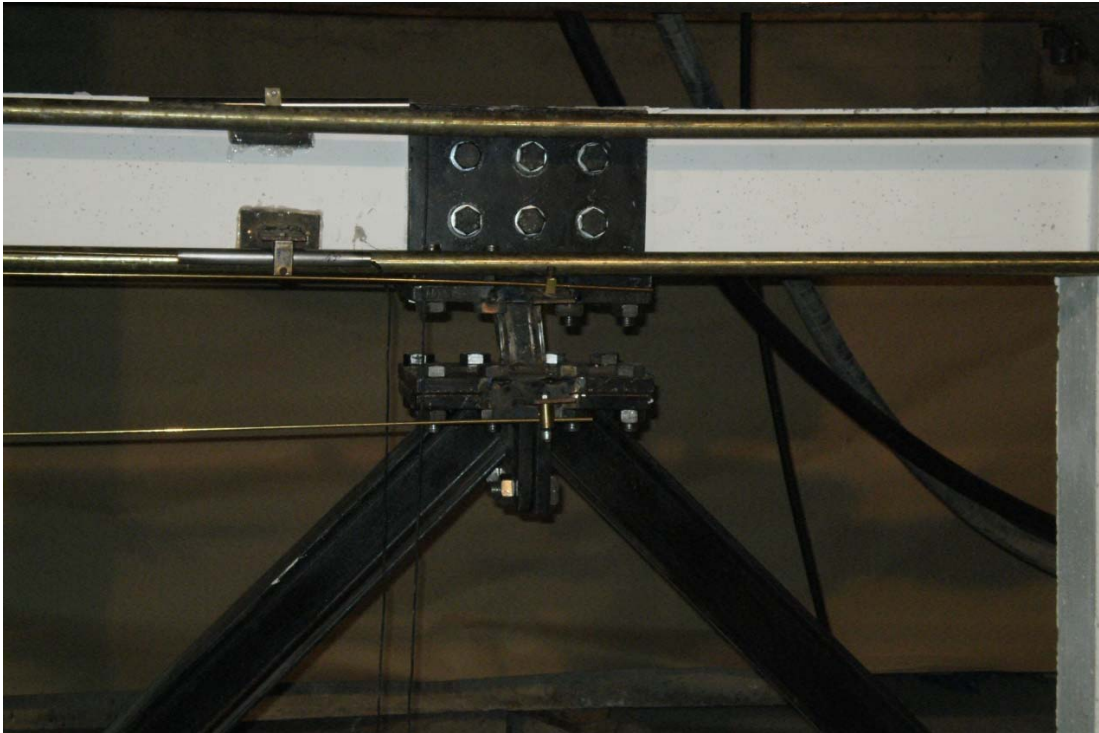
Η απόσχιση του κατακόρυφου μεταλλικού συνδέσμου ξεκίνησε στα 21mm, αποδίδοντας γωνιακή παραμόρφωση περίπου 21‰ (Σχ. 4.30 και 4.31). Στον πρώτο κύκλο φόρτισης σε μετατόπιση 21mm ήδη υπήρχε ελαφρά πτώση της αντοχής κατά τη μία διεύθυνση φόρτισης. Στην άλλη διεύθυνση φόρτισης παρατηρήθηκε αισθητή πτώση της αντοχής περίπου 30%, και ακολούθησε η απόσχιση του συνδέσμου. Μετά την απόσχιση του κατακόρυφου συνδέσμου η συμπεριφορά του δοκιμίου εξελίχθηκε ομαλά παρουσιάζοντας την αναμενόμενη φέρουσα ικανότητα.



Σχ. 4.30 Φορτίο - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F3,N).



Σχ. 4.31 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F3,N).



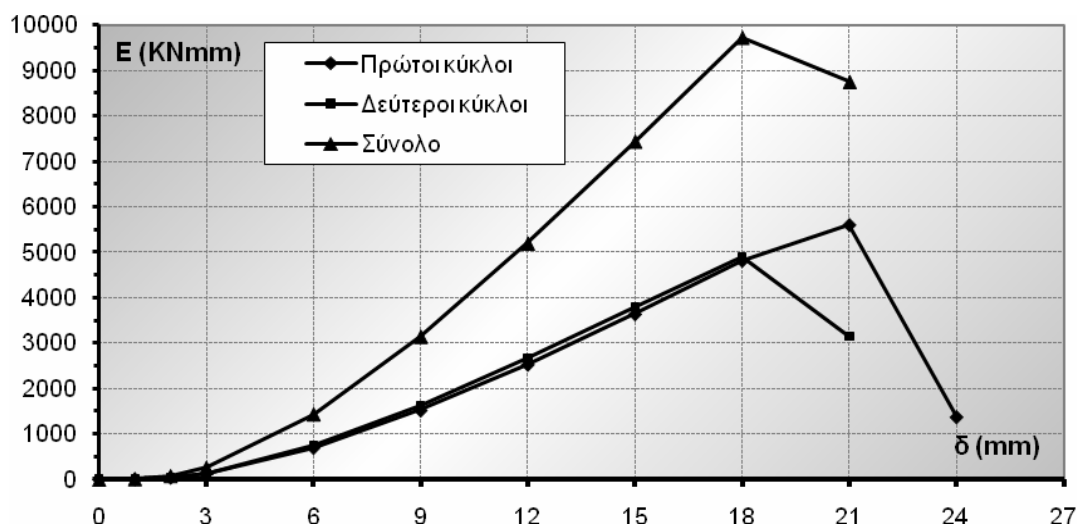
Φωτ. 4.27 Παραμόρφωση πριν την αστοχία του συνδέσμου.



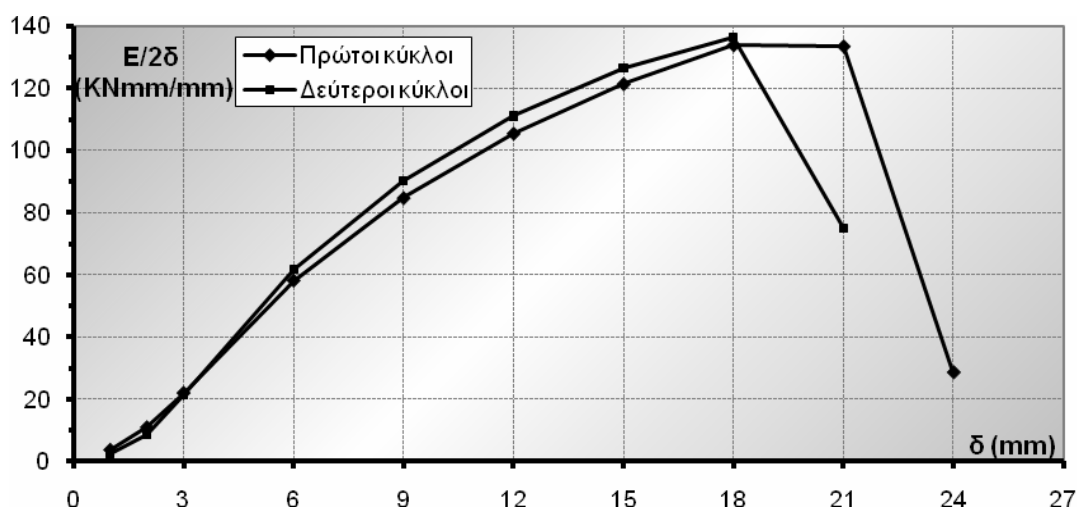
Φωτ. 4.28 Αστοχία κατακόρυφου συνδέσμου.

Στη φωτογραφία 4.27 απεικονίζεται η παραμόρφωση του δοκιμίου λίγο πριν την έναρξη αστοχίας του συνδέσμου. Το δοκίμιο σε αυτό το στάδιο παρουσίασε γενικά περιορισμένο βαθμό ρηγμάτωσης με τα κύρια ρήγματα να αναπτύσσονται στη βάση και την κεφαλή των στύλων κατά κύριο λόγο, στις παρειές της δοκού κοντά στους κόμβους, καθώς επίσης και στο μέσο του ζυγώματος εκατέρωθεν του μεταλλικού στοιχείου Π, λόγω της μεταφερόμενης έντασης διαμέσου του κατακόρυφου συνδέσμου. Η διαδικασία απόσχισης εξελίχθηκε προβλεπόμενα, ξεκινώντας από το κάτω τμήμα της διατομής, χωρίς ενδείξεις στρέβλωσης λόγω των πελμάτων της διατομής, μέχρι την ολοκληρωτική αποκόλληση του συνδέσμου από τις πλάκες. Η ισχυρή συγκόλληση συνέβαλε στην καθαρή αστοχία τις διατομής και όχι στα σημεία συγκόλλησης (Φωτ. 4.28).

Από το διάγραμμα της απορροφώμενης ενέργειας (Σχ. 4.32) φαίνεται η ευεργετική επίδραση του αξονικού φορτίου στους στύλους δεδομένου ότι αύξησε κατά 40% την ποσότητα ενέργειας την οποία απορρόφησε ο κατακόρυφος σύνδεσμος κατά την επιβολή της φόρτισης στη μετατόπιση των 18mm.



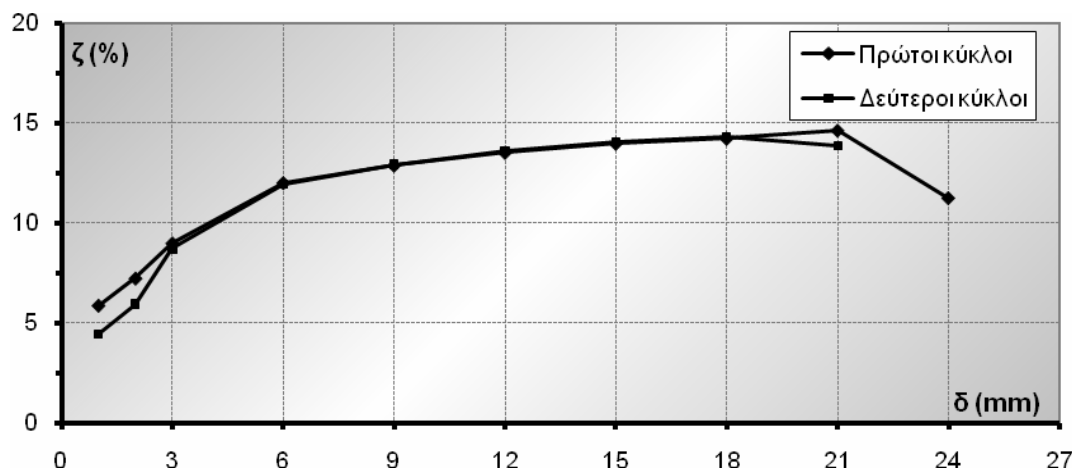
Σχ. 4.32 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F3,N).



Σχ. 4.33 Ανηγγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F3,N).

Είναι εμφανής για μια ακόμη φορά η αναλογία των γραφημάτων της απορροφώμενης ενέργειας (Σχ. 4.32 και 4.33). Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανηγμένη ποσότητα στη μετατόπιση των 18mm παρουσίασε αύξηση 45% σε σχέση με το δοκίμιο χωρίς το αξονικό φορτίο.

Η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση (Σχ. 4.34) παρουσίασε απότομη αύξηση στα τρία πρώτα επίπεδα μετακίνησης. Ακολούθησε αυξητική πορεία με τάσεις σταθεροποίησης στην τιμή 15%, πολύ κοντά στην ιδανική πλαστική συμπεριφορά ($\zeta=15,92\%$). Η στένωση των βρόχων μετά την αστοχία του συνδέσμου είχε ως αποτέλεσμα την πτώση του συντελεστή ζ .



Σχ. 4.34 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F3,N).

4.7 Δοκίμιο F4

Το συγκεκριμένο δοκίμιο διαθέτει κατακόρυφο σύνδεσμο διατομής I, με στατικό ύψος ελαφρώς μεγαλύτερο, 80 έναντι 60mm, ως προς το σύνδεσμο του F3, η κύρια όμως διαφοροποίηση έγκειται στο διπλάσιο μήκος του συνδέσμου του F4 το οποίο επιλέχθηκε διπλάσιο, 200 έναντι 100mm (Φωτ. 4.29 και 4.30).



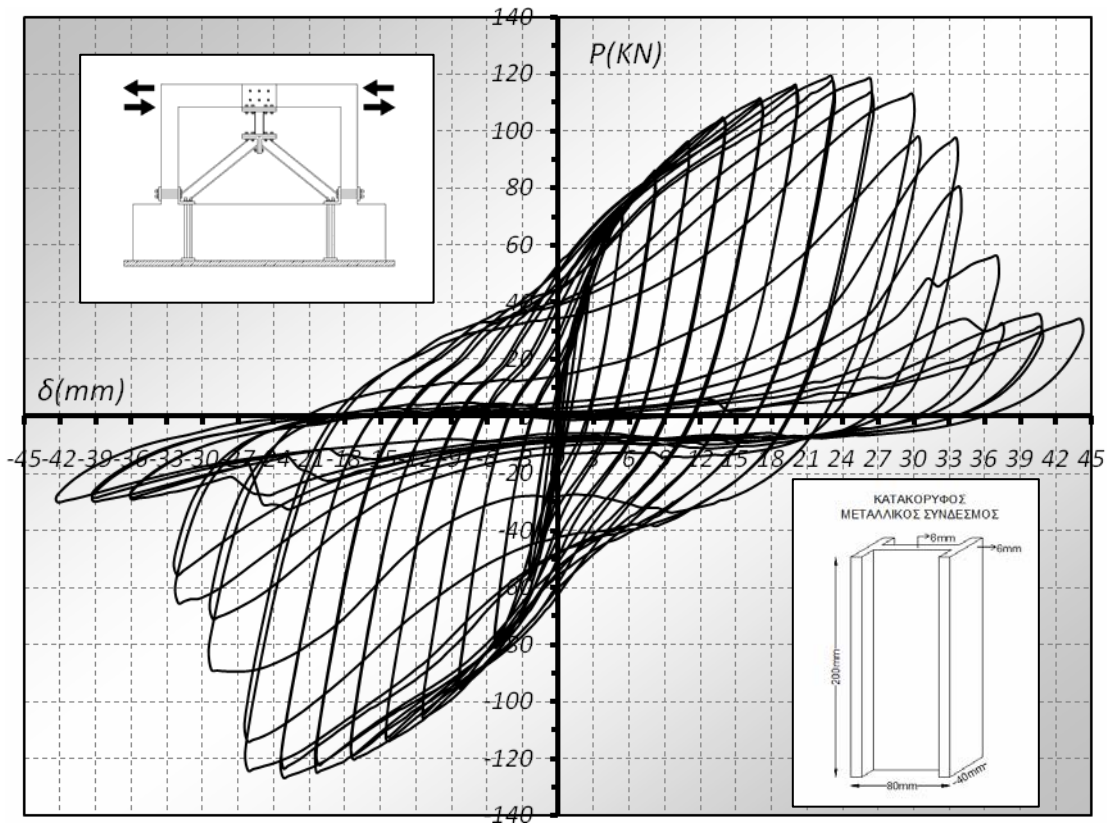
Φωτ. 4.29 Δοκίμιο F4.



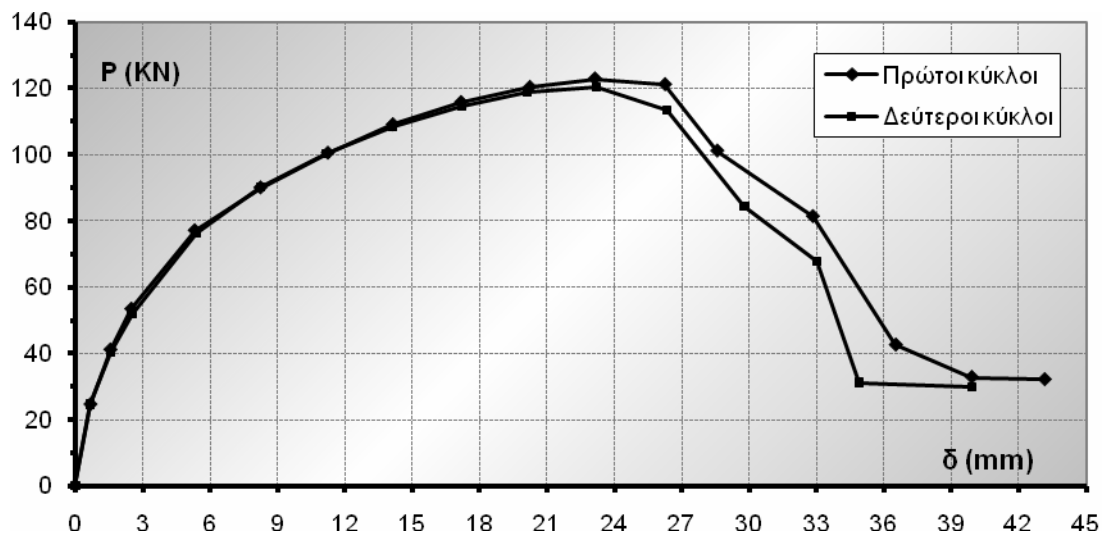
Φωτ. 4.30 Κατακόρυφος σύνδεσμος (20εκ.).

Από άποψη φέρουσας ικανότητας οι δύο σύνδεσμοι εκτιμήθηκε ότι είναι περίπου ισοδύναμοι εάν είναι αμφίπακτοι. Πράγματι στα τρία πρώτα επίπεδα μετακίνησης η φέρουσα ικανότητα ήταν περίπου ίδια με τα δοκίμια F2 και F3. Στα 12mm και στα 18mm στα οποία

εμφανίστηκε η μέγιστη αντοχή αντίστοιχα για τα F2 και F3 η φέρουσα ικανότητα του παρόντος δοκιμίου συνέχισε να ανεβαίνει μέχρι τη μέγιστη τιμή 120kN περίπου (Σχ. 4.35 και 4.36). Ήδη από τη μετατόπιση των 15mm είχε αποκτήσει τη μέγιστη αντοχή του F3 110kN, με τάσεις ανόδου, για να αποκτήσει τη μέγιστη τιμή σε μετατόπιση 24mm. Η διατήρηση υψηλής αντοχής για υψηλά επίπεδα μετακίνησης στοιχειοθετεί μια εξαιρετικά πλαστική συμπεριφορά.



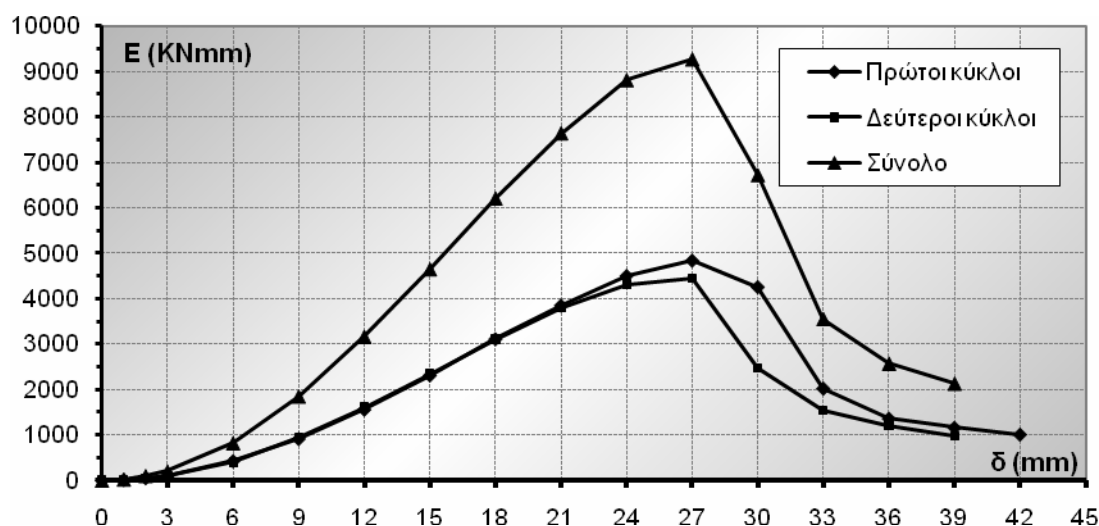
Σχ. 4.35 Φορτίο - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F4).



Σχ. 4.36 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F4).

Η αστοχία του κατάκορφου συνδέσμου ξεκίνησε μετά τα 27mm και εξελίχθηκε σταδιακά. Η πλήρης απόσχιση του κορμού ολοκληρώθηκε σε μετατόπιση 36mm, ενώ στη συνέχεια το δοκίμιο ακολούθησε την τυπική συμπεριφορά γυμνού πλαισίου. Το αυξημένο εύρος μετατοπίσεων κατά τη διάρκεια της πλήρους αποκόλλησης του κορμού, οφείλεται στη δυνατότητα στροφής στα άκρα του συνδέσμου, γεγονός που οφείλεται στα χαρακτηριστικά καμπτικού τύπου αστοχίας του συνδέσμου λόγω ειδικής γεωμετρίας όψης (υψηλός λόγος ύψους συνδέσμου προς στατικό ύψος).

Εξαιρετική ήταν η συμπεριφορά του δοκιμίου και όσον αφορά την απορρόφηση ενέργειας (Σχ. 4.37). Η υψηλή φέρουσα ικανότητα αλλά και η διατήρησή της σε υψηλά επίπεδα μετατοπίσεων συνετέλεσε στη ραγδαία αύξηση της ενέργειας μέχρι τη μέγιστη τιμή η οποία εμφανίστηκε σε μετατόπιση 27mm, λίγο πριν την αστοχία του συνδέσμου. Στα πρώτα επίπεδα μετατόπισης πάντως η ποσότητα ενέργειας που απορροφήθηκε συμπίπτει με αυτή των δοκιμών F2 και F3.



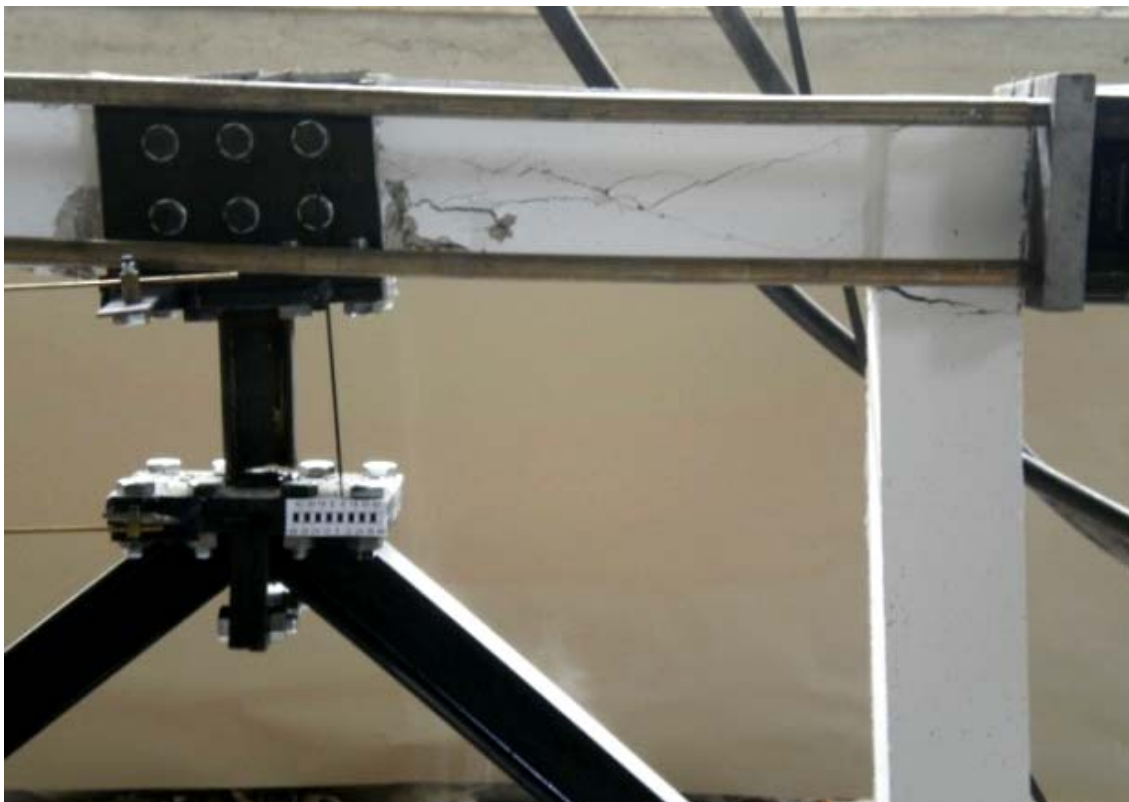
Σχ. 4.37 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F4).

Η επιθυμητή όμως αυτή συμπεριφορά του δοκιμίου στο σύνολό της με την αυξημένη αντοχή και πλαστιμότητα, είχε και τις αρνητικές πλευρές της καθώς οι σχετικά μεγάλες στροφές που επιβλήθηκαν στο μέσον της δοκού δημιούργησαν έντονες βλάβες και στα δύο πέλματά της, σε μια περιοχή μάλιστα που εκ του σχεδιασμού της δεν ήταν έτοιμη να τις δεχθεί (Φωτ. 4.31 έως 4.34). Το μεγάλο μήκος του κατακόρφου συνδέσμου επέτρεψε μεγάλες μετατοπίσεις με το σύνδεσμο ενεργό, συνοδευόμενες από εξαιρετικά υψηλή αντοχή. Το γεγονός αυτό επιβάρυνε τη δοκό, μιας και η ένταση της ανακύκλισης μεταφερόταν στο κέντρο της διαμέσου του συνδέσμου. Τα πρώτα σημάδια αυτής της επιβάρυνσης εκδηλώθηκαν με την αποκόλληση της επικάλυψης στο άνω πέλμα του μέσου της δοκού (Φωτ. 4.31). Κατά συνέπεια ο κατακόρφος σύνδεσμος ουσιαστικά λειτουργούσε ως ένα στοιχείο επιβολής ροπής κάμψης στο μέσον της δοκού, η ένταση του οποίου αυξανόταν με την αύξηση του επιπέδου μετατόπισης.

Επί πλέον, λόγω του υποδιπλασιασμού του ανοίγματος της δοκού, υπάρχουν ενδείξεις λειτουργίας κοντού στοιχείου, με τη χαρακτηριστική δισδιαγώνια μορφή ρηγμάτωσης (Φωτ. 4.32).



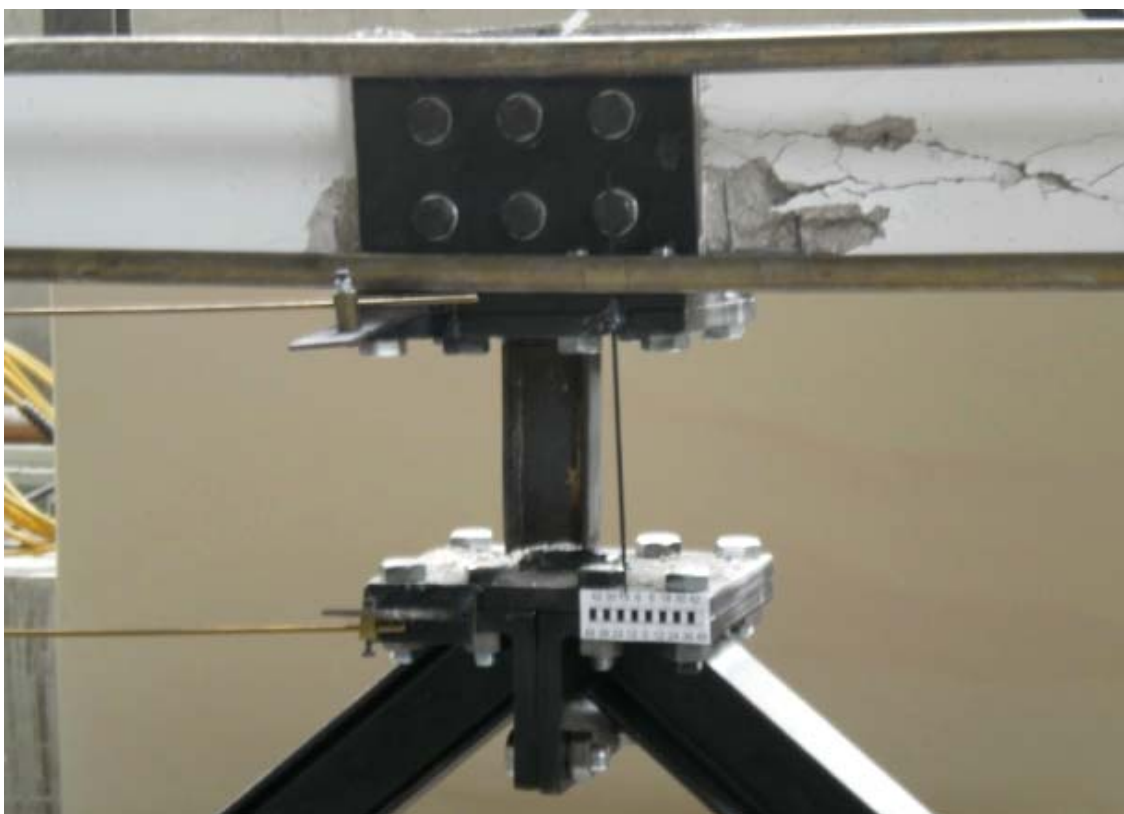
Φωτ. 4.31 Αποφλοίωση άνω επικάλυψης δοκού σε πρώιμο στάδιο.



Φωτ. 4.32 Αστοχία κάτω πέλματος δοκού και διατμητική δισδιαγώνια ρηγμάτωση.



Φωτ. 4.33 Εκτεταμένη βλάβη δοκού. Διακρίνεται η στροφή του μέσου της δοκού.

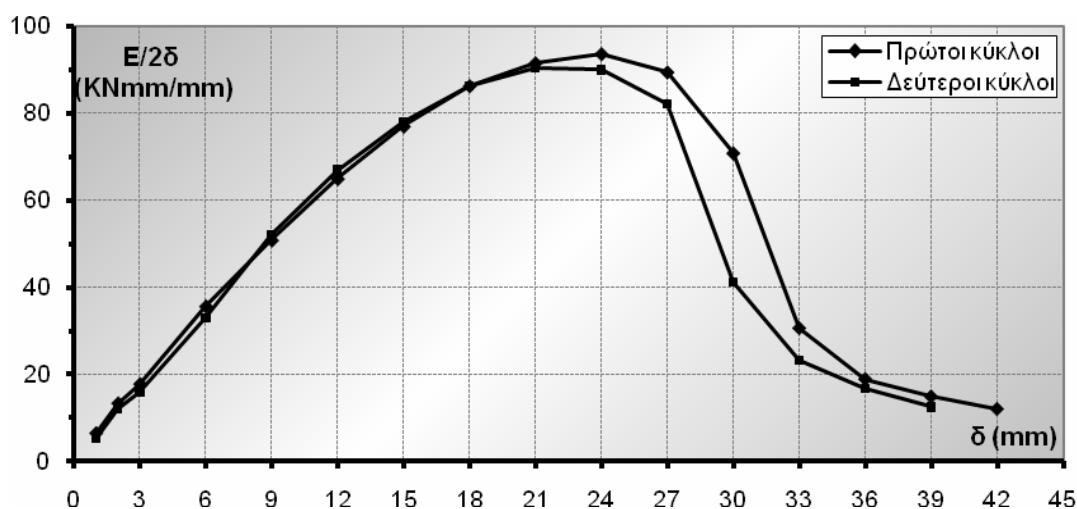


Φωτ. 4.34 Αστοχία κατακόρυφου συνδέσμου προχωρημένη μορφή ρηγμάτωσης της δοκού.

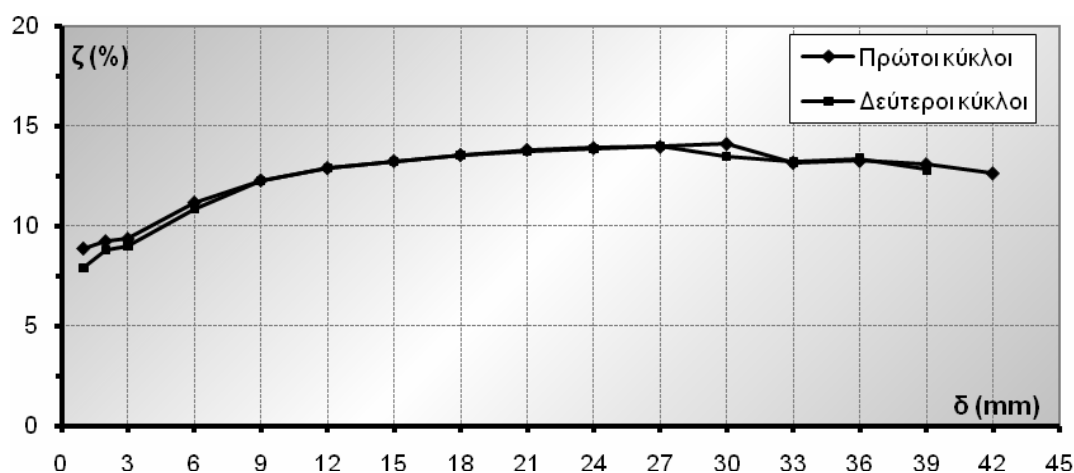
Κατά τα λοιπά, στο πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος, όπως σε όλα τα δοκίμια, σχηματίσθηκαν οι τυπικές πλαστικές αρθρώσεις στις κεφαλές και τους πόδες των στύλων. Η κατάληξη της πειραματικής δοκιμής αμφιταλαντεύτηκε μεταξύ πλήρους αστοχίας της δοκού ή του κατακόρυφου συνδέσμου. Τελικά, όπως προαναφέρθηκε, ο σύνδεσμος αστόχησε με οριζόντια απόσχιση της βάσης του, πάνω όμως από τη συγκόλληση με την πλάκα (Φωτ. 4.34).

Η ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια (Σχ. 4.38) παρουσίασε σταδιακή αύξηση μέχρι την αστοχία του κατακόρυφου συνδέσμου. Στα σημεία αστοχίας των συνδέσμων των δοκιμών F2 και F3 οι τιμές της ανηγμένης ενέργειας ταυτίζονται με αυτές του F4. Μετά την αστοχία του συνδέσμου οι τιμές της συμπίπτουν με αυτές του γυμνού δοκιμίου F1.

Η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση (Σχ. 4.39) χαρακτηρίζεται από ήπια αύξηση μέχρι τη μετατόπιση των 18mm, κατόπιν η τιμή σταθεροποιείται για τέσσερα επίπεδα μετακίνησης. Μετά την αστοχία του συνδέσμου διατηρήθηκαν υψηλά επίπεδα τιμών σε σχέση με τα δοκίμια F2 και F3.



Σχ. 4.38 Ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F4).



Σχ. 4.39 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F4).

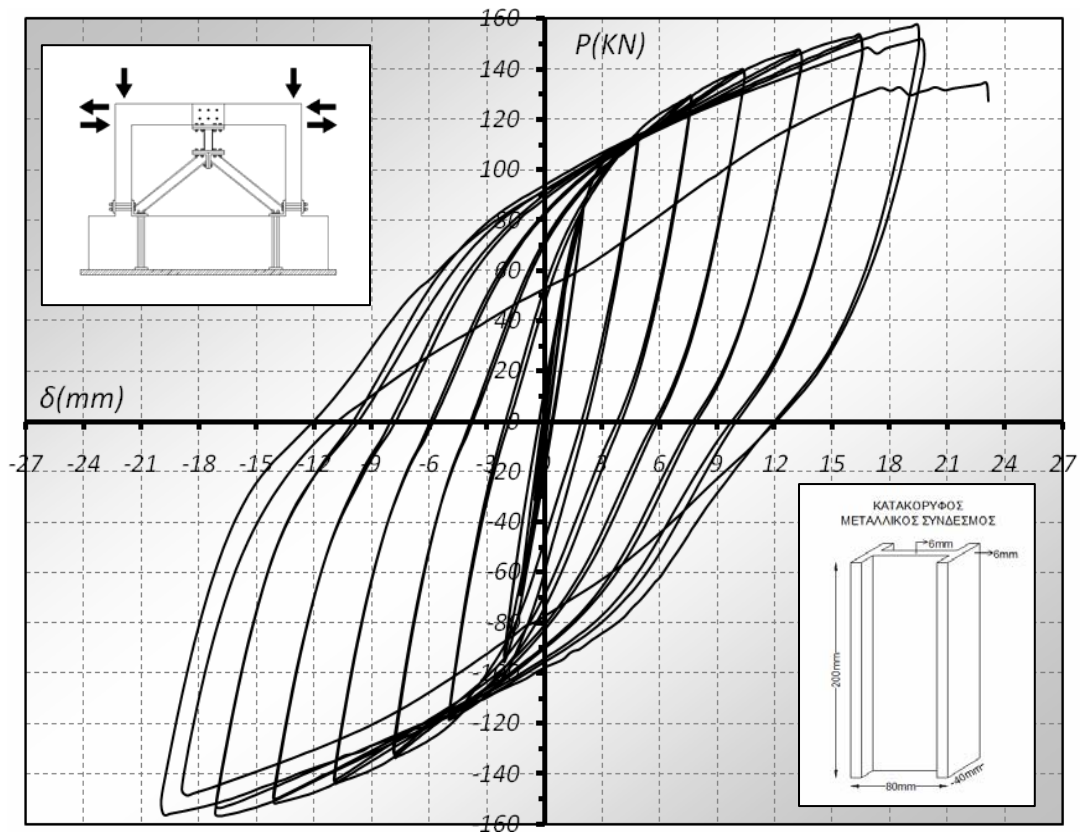
4.8 Δοκίμιο F4,N

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η συνέχεια του δοκιμίου F4 (κατακόρυφος σύνδεσμος μήκους 200mm) με την επιβολή αξονικού φορτίου στους στύλους (Φωτ. 4.35).

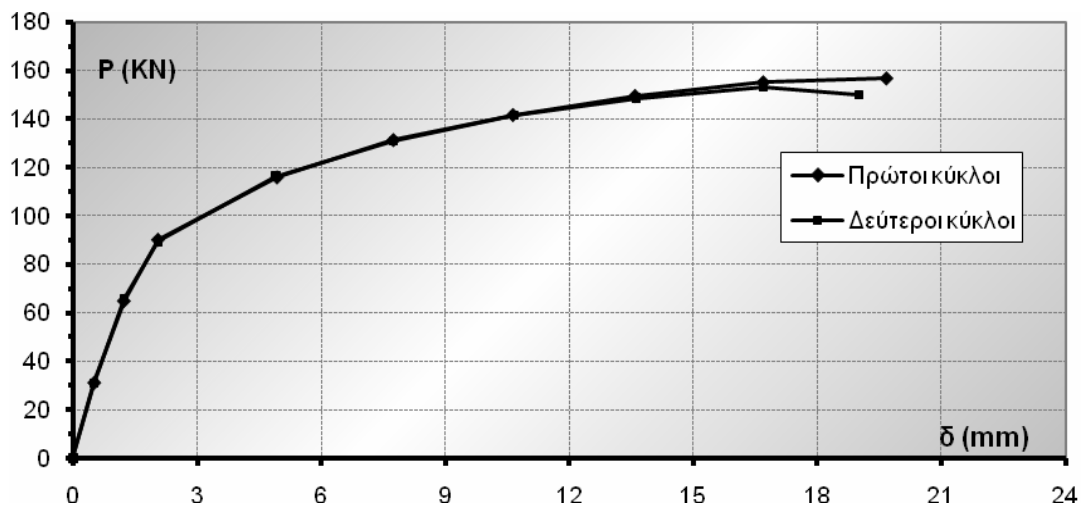


Φωτ. 4.35 Δοκίμιο F4,N.

Ήδη από τους πρώτους κύκλους φόρτισης το δοκίμιο παρουσίασε αυξημένη δυσκαμψία σε σχέση με το αντίστοιχο χωρίς αξονικό φορτίο (F4) με τη φέρουσα ικανότητα να υπερτερεί σε ποσοστά 20%, 63% και 65% αντίστοιχα για τα τρία πρώτα επίπεδα μετατόπισης (Σχ. 4.40 και 4.41). Η υψηλή φέρουσα ικανότητα διατηρήθηκε μέχρι το τέλος της δοκιμής επιδεικνύοντας πλάστιμη συμπεριφορά. Σε μετατόπιση μόλις 3mm το φορτίο ήταν ήδη 90kN. Λόγω της εξαιρετικά αυξημένης δυσκαμψίας, το δοκίμιο από τους πρώτους κύκλους φόρτισης άρχισε να ρηγματώνεται έντονα κυρίως στο μέσο της δοκού εκατέρωθεν του μεταλλικού στοιχείου που συνδέει τον κατακόρυφο σύνδεσμο με το ζύγωμα (Φωτ. 4.36). Η ύπαρξη αξονικού φορτίου περιόρισε τις ρηγματώσεις στους στύλους σε σύγκριση με το δοκίμιο F4. Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα αναπτύχθηκε στα 21mm περίπου με τάσεις σταθεροποίησης σε εκείνο το σημείο. Η έντονη ρηγματώση της δοκού (Φωτ. 4.37, 4.38) είχε ως αποτέλεσμα την πρόωρη αστοχία της με αποτέλεσμα για λόγους ασφαλείας να διακοπεί η πειραματική δοκιμή σε μετατόπιση 21mm χωρίς να αστοχήσει ο κατακόρυφος σύνδεσμος. Ήδη από την πειραματική δοκιμή του αντίστοιχου δοκιμίου χωρίς αξονικό φορτίο (F4), όπου παρά την αστοχία του συνδέσμου δημιουργήθηκαν εκτεταμένες βλάβες στο μέσον της δοκού, υπήρχε η ένδειξη ότι η προσθήκη αξονικού φορτίου θα προκαλούσε ενδεχομένως πρόωρη αστοχία της δοκού και όχι του συνδέσμου, δεδομένης της αύξησης της φέρουσας ικανότητας που θα επέβαλε η παρουσία αξονικής δύναμης στους στύλους.

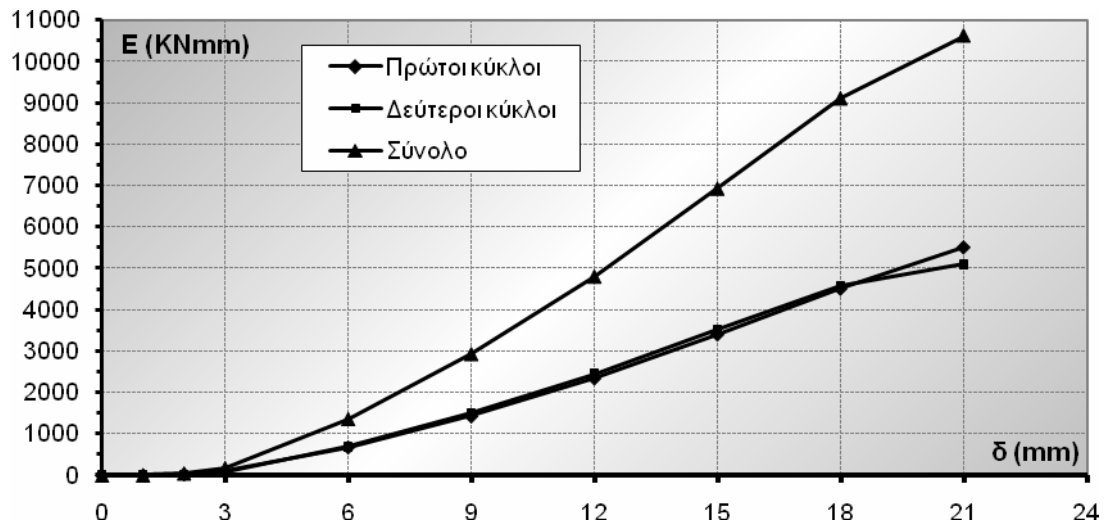


Σχ. 4.40 Φορτίο - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F4,N).



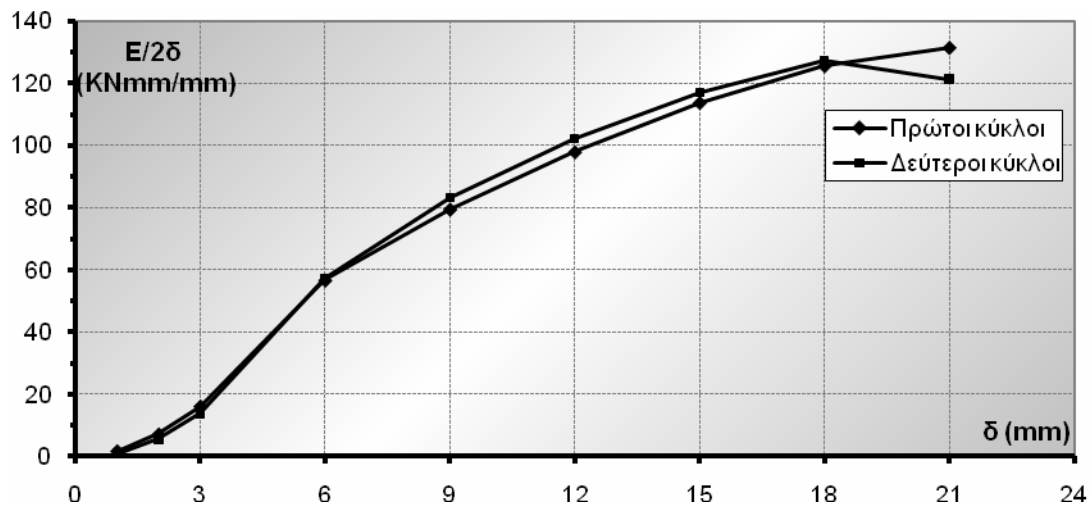
Σχ. 4.41 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F4,N).

Η υψηλή δυσκαμψία και οι πλούσιοι βρόχοι επιβεβαιώνονται και από την απορροφώμενη ενέργεια του συστήματος (Σχ. 4.42) μιας και μόλις στα 21mm το αξονικό φορτίο επέφερε αύξηση 45% περίπου σε σχέση με το δοκίμιο χωρίς αξονικό. Οι έντονες βλάβες πάντως της δοκού ενδεχομένως θα οδηγούσαν σε ψαθυρή αστοχία του φορέα με απότομη πτώση της αντοχής και κατ' επέκταση της απορροφώμενης ενέργειας.



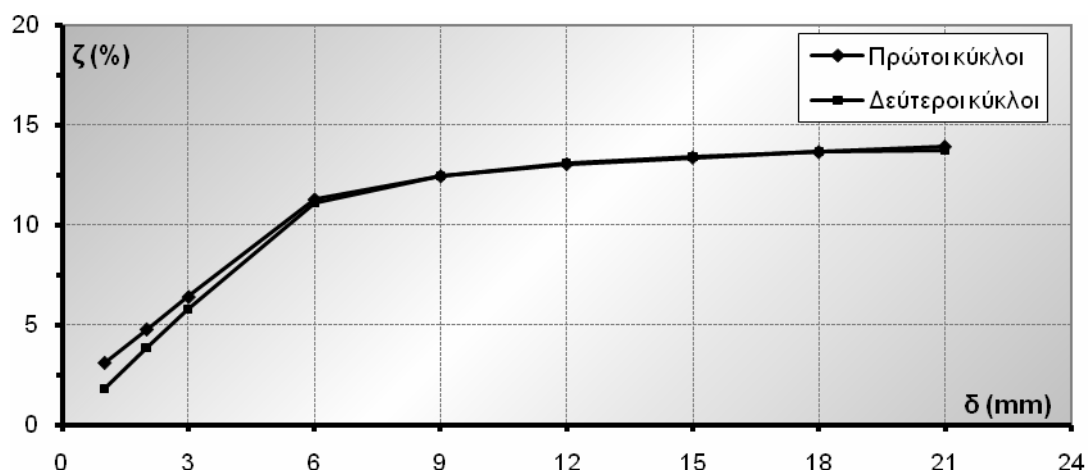
Σχ. 4.42 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F4,N).

Εμφανής είναι η αναλογία μεταξύ των δύο διαγραμμάτων απορροφώμενης ενέργειας, παρουσιάζοντας αύξηση μέχρι τη μέγιστη αντοχή του δοκιμίου (Σχ. 4.43). Αξίζει να σημειωθεί ότι στη μέγιστη επιτευχθείσα μετατόπιση (21mm) η ανηγμένη ενέργεια παρουσίασε αύξηση 44% σε σχέση με το δοκίμιο χωρίς το αξονικό φορτίο.

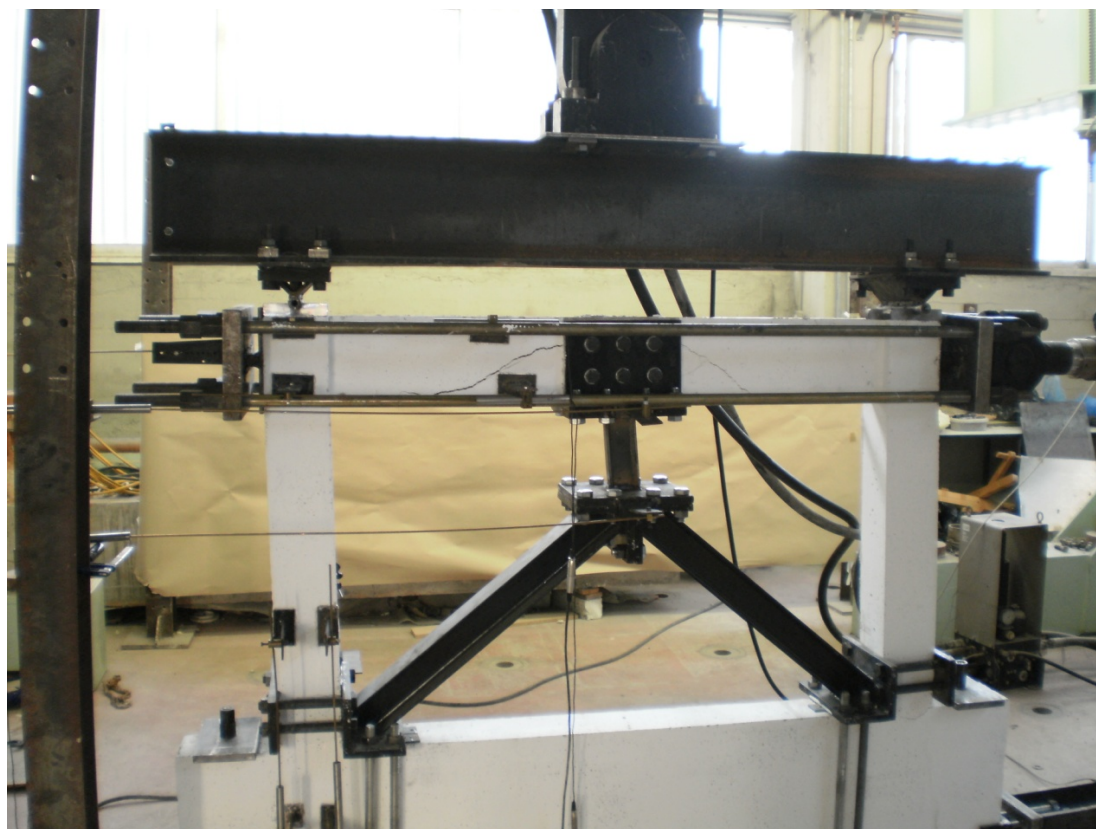


Σχ. 4.43 Ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F4,N).

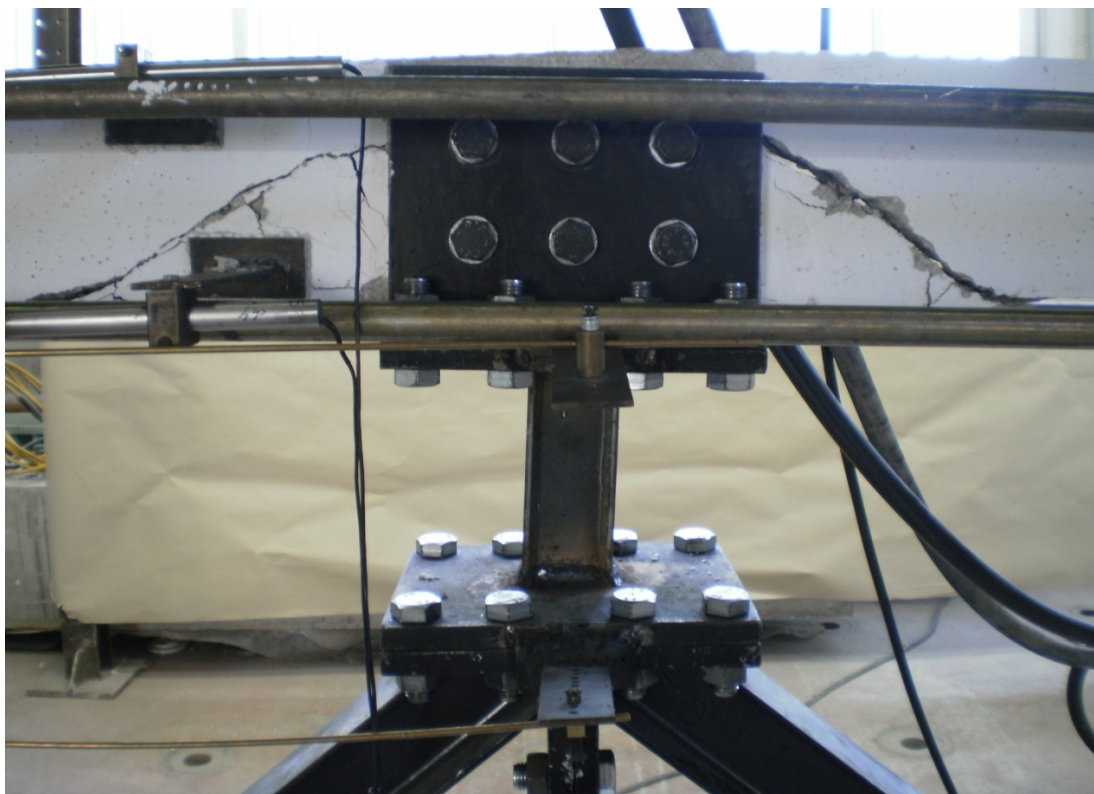
Η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση παρουσίασε σχετικά απότομη αύξηση στα τέσσερα πρώτα επίπεδα μετατόπισης, ενώ στη συνέχεια σταθεροποιείται, με τη μέγιστη τιμή ($\zeta \approx 13\%$) να εμφανίζεται στη μέγιστη μετατόπιση (Σχ. 4.44).



Σχ. 4.44 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F4,N).



Φωτ. 4.36 Διαγώνια ρήγματα στη δοκό εκατέρωθεν του μεταλλικού στοιχείου.



Φωτ. 4.37 Διαγώνια ρήγματα στη δοκό εκατέρωθεν του μεταλλικού στοιχείου. Ο κατακόρυφος σύνδεσμος είναι ακόμη ανέπαφος.



Φωτ. 4.38 Διαμπερές διαγώνιο ρήγμα το οποίο προκλήθηκε από τη μεταφορά της έντασης στο μέσον της δοκού λόγω στροφής του μεταλλικού στοιχείου Π.

4.9 Δοκίμιο F5

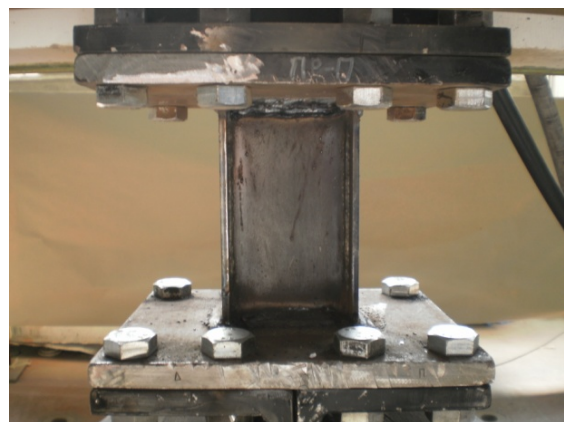
Όπως προαναφέρθηκε, στο δοκίμιο αυτό σκοπίμως επιλέχθηκε μια ισχυρή διατομή συνδέσμου, ύψους πάντως και πάλι 200mm (Φωτ. 4.39, 4.40 και 4.41) με στόχο τη διερεύνηση των ορίων αντοχής του πλαισίου Ο.Σ. προκειμένου να εφαρμοστεί μια τόσο ισχυρή μορφή ενίσχυσης. Πρόκειται και πάλι για μεταλλικό σύνδεσμο διατομής I διαστάσεων (120X60)mm. Πράγματι, σε όλους τους κύκλους φόρτισης το δοκίμιο παρουσίασε σημαντικά αυξημένη δυσκαμψία και αντοχή, με πλάστιμη μάλιστα συμπεριφορά.



Φωτ. 4.39 Δοκίμιο F5 - Διακρίνεται ο ισχυρός και μεγάλου ύψους σύνδεσμος.

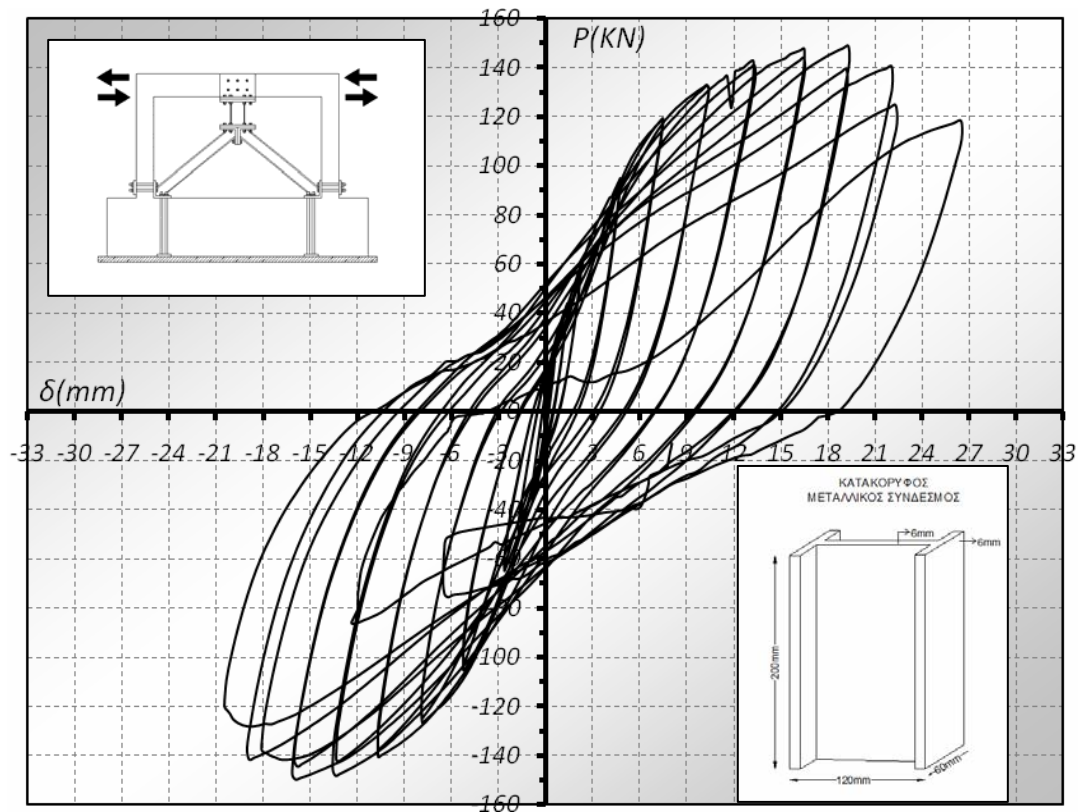


Φωτ. 4.40 Ισχυρός κατακόρυφος σύνδεσμος πριν από τη συγκόλληση στις πλάκες.

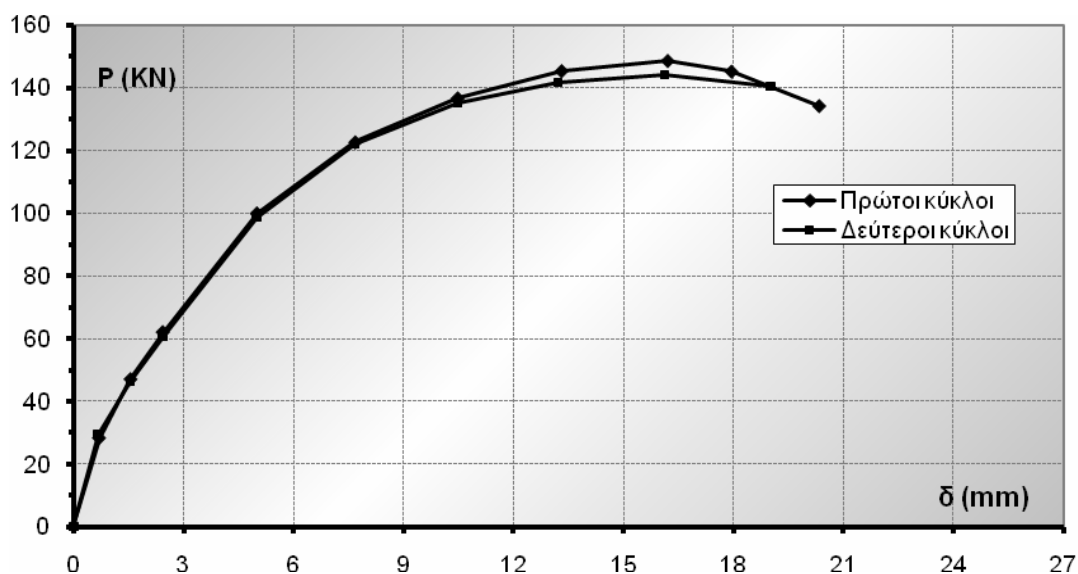


Φωτ. 4.41 Λεπτομέρεια του ισχυρού κατακόρυφου συνδέσμου ύψους 200mm.

Η αντοχή του δοκιμίου πενταπλασιάστηκε σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς F1. Στα τρία πρώτα επίπεδα μετακίνησης το δοκίμιο παρουσίασε μια αύξηση αντοχής κατά 20%, 25% και 9% αντίστοιχα, σε σχέση με το δοκίμιο F4, ενώ παρουσίασε, σε μετατόπιση 21mm, φέρουσα ικανότητα 150kN, αυξημένη κατά 25% σε σχέση με το πιο ισχυρό μέχρι τώρα δοκίμιο χωρίς αξονικό φορτίο (F4) (Σχ. 4.45 και 4.46).



Σχ. 4.45 Φορτίο - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F5).

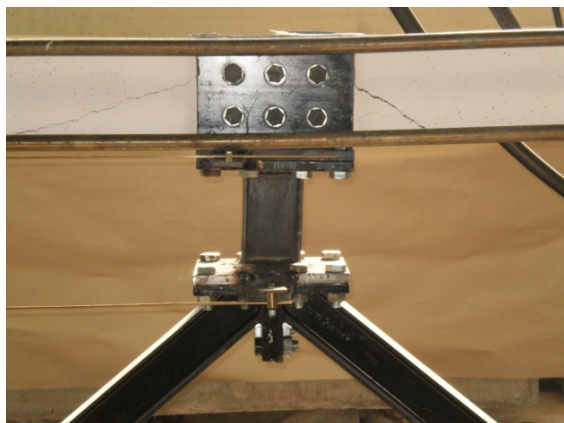


Σχ. 4.46 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F5).

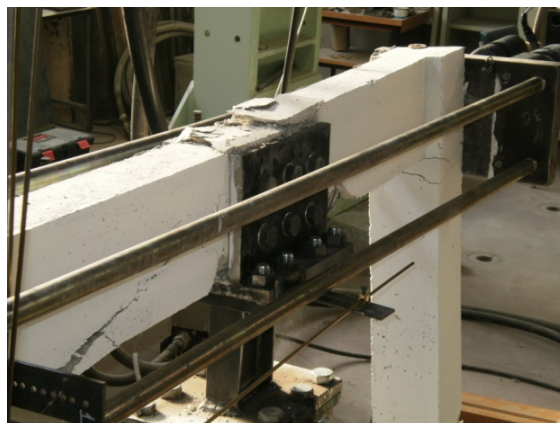
Από τους πρώτους κύκλους φόρτισης εμφανίστηκαν έντονες ρηγματώσεις τόσο στην κεφαλή και τη βάση των στύλων, γεγονός αναμενόμενο, όσο και στο μέσο της δοκού (Φωτ. 4.42). Οι παραμορφώσεις του κατακόρυφου μεταλλικού συνδέσμου φαίνεται ότι παρέμειναν πολύ μικρές σε σύγκριση με τις πρώιμες έντονες βλάβες του πλαισίου.

Στο σημείο αυτό αξίζει να διευκρινισθεί ότι τα ασυνήθιστα υψηλά φορτία σε συνδυασμό με την έντονη βλάβη της δοκού και το σχηματισμό διαμπερών ρηγμάτων είχε ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη απόκλιση της στοχευόμενης από την επιτυγχανόμενη μετατόπιση έναντι των προηγούμενων δοκιμών. Πράγματι, εμφανίστηκαν μικροδιαφορές μεταξύ της ορισθείσας μετατόπισης μέσω του συστήματος και της πραγματοποιούμενης, λόγω της έντονης ρηγματώσης της δοκού. Το φαινόμενο αυτό ήταν πιο έντονο σε προχωρημένα επίπεδα μετακίνησης.

Δεν παρουσιάστηκε απόσχιση του κατακόρυφου συνδέσμου ενώ η πειραματική δοκιμή σταμάτησε λόγω της έντονης βλάβης στους στύλους του πλαισίου, κυρίως όμως λόγω της ολοκληρωτικής αστοχίας της δοκού στο μέσον της με λυγισμό των διαμήκων οπλισμών και θραύση συνδετήρων (Φωτ. 4.42 έως 4.45).



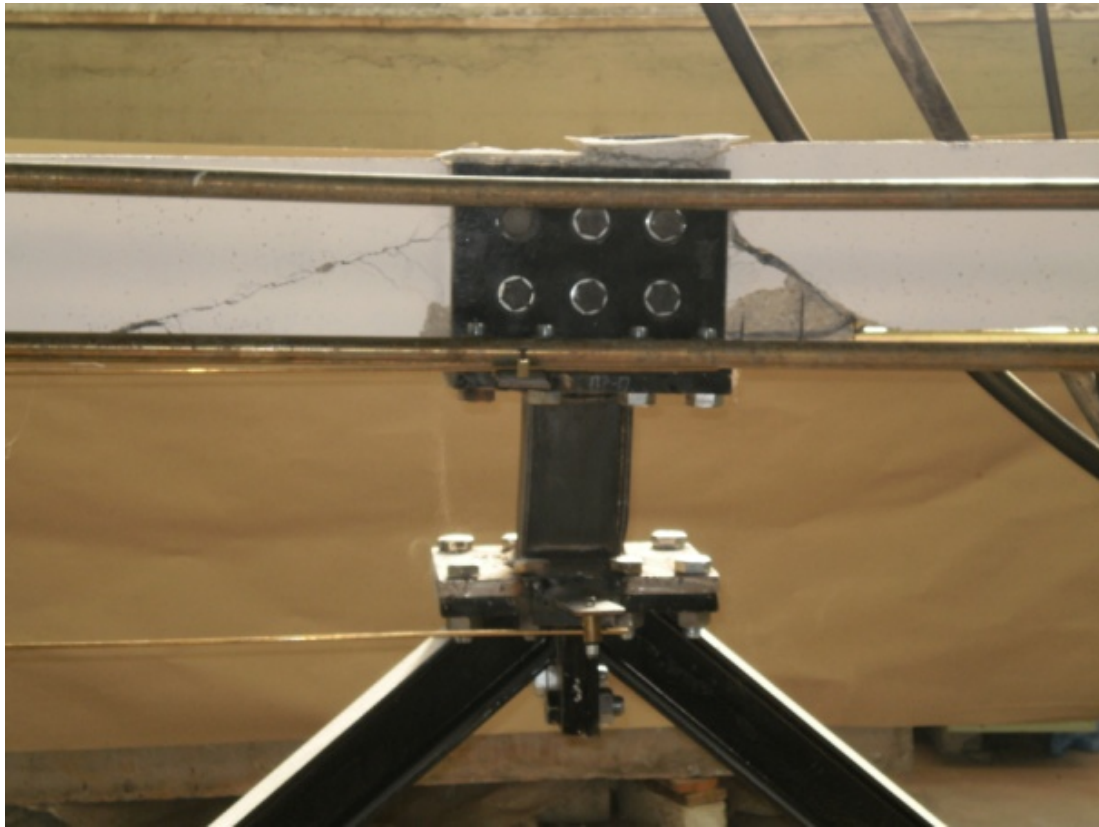
Φωτ. 4.42 Ρηγμάτωση δοκού. Ανέπαφος πρακτικά ο σύνδεσμος.



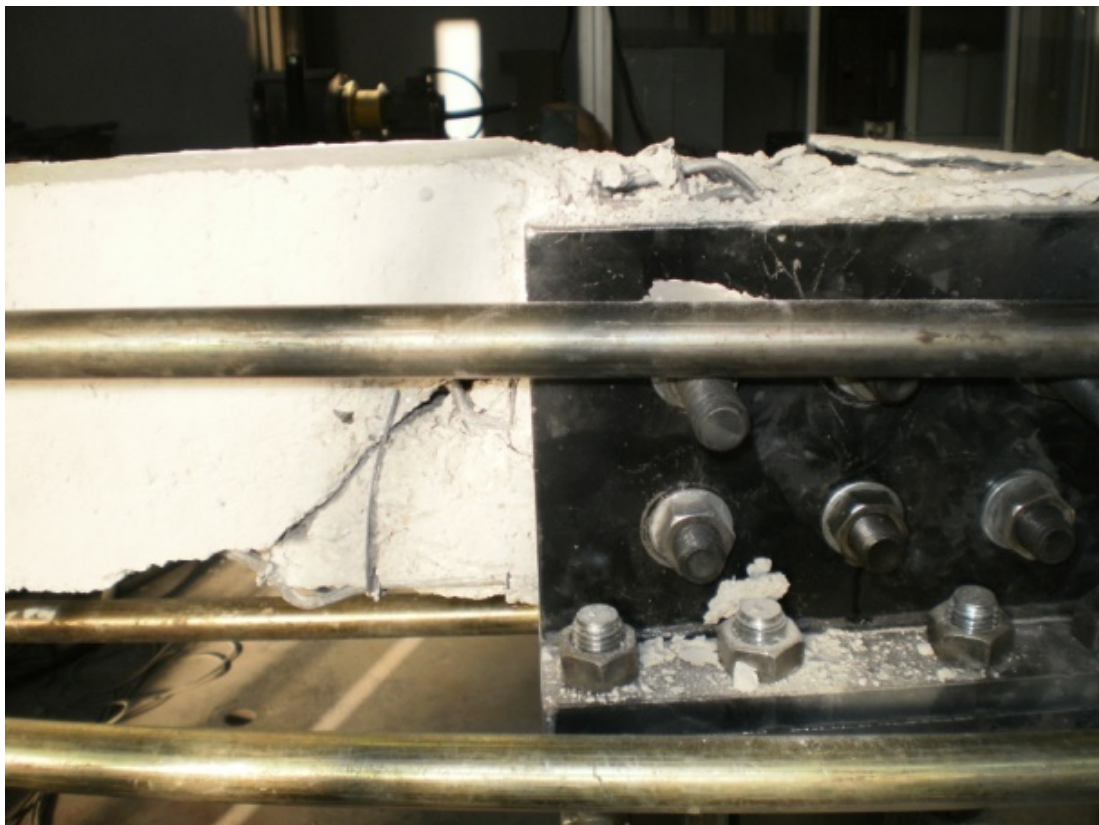
Φωτ. 4.43 Πλήρης αστοχία δοκού. Ρηγμάτωση στύλου.

Ο πρακτικά απαραμόρφωτος κατακόρυφος μεταλλικός σύνδεσμος μεταφέρει όλη την ένταση στο μέσον της δοκού, όπου την αναγκάζει να στραφεί μέσω του μεταλλικού στοιχείου Π. Η πλήρης αποδιοργάνωση του σκυροδέματος στο μέσον της δοκού είχε ως συνέπεια τη χαλάρωση της σύνδεσής της με τον κατακόρυφο σύνδεσμο με αποτέλεσμα η κεφαλή του μεταλλικού κατακόρυφου συνδέσμου να λειτουργεί ως άρθρωση λόγω δυνατότητας στροφής ενώ ο πόδας προς τις διαγώνιες ράβδους δικτύωσης διατήρησε τις αρχικές συνθήκες πάκτωσης.

Η έντονη κάμψη της δοκού με αποφλοίωση τμημάτων σκυροδέματος, είχε ως αποτέλεσμα την απόκλιση του δοκιμίου εκτός επιπέδου (Φωτ. 4.43), φαινόμενο που παρουσίασε έξαρση σε προχωρημένες μετατοπίσεις και συνετέλεσε στην αστάθεια του πειράματος και στη σχετικά πρώιμη διακοπή του.



Φωτ. 4.44 Διαμπερή διαγώνια ρήγματα στο μέσον της δοκού.

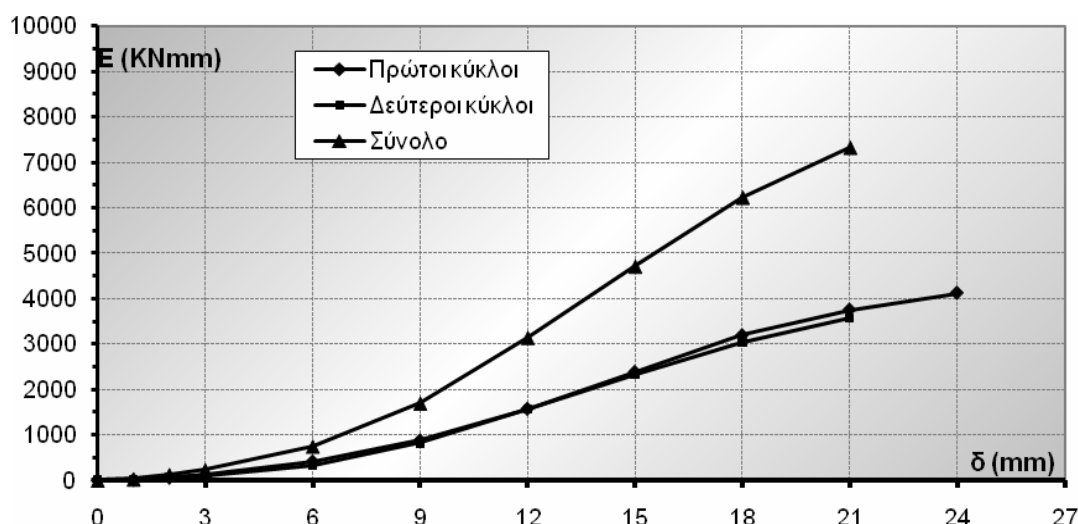


Φωτ. 4.45 Λυγισμός διαμηκών ράβδων άνω και κάτω πέλματος της δοκού.

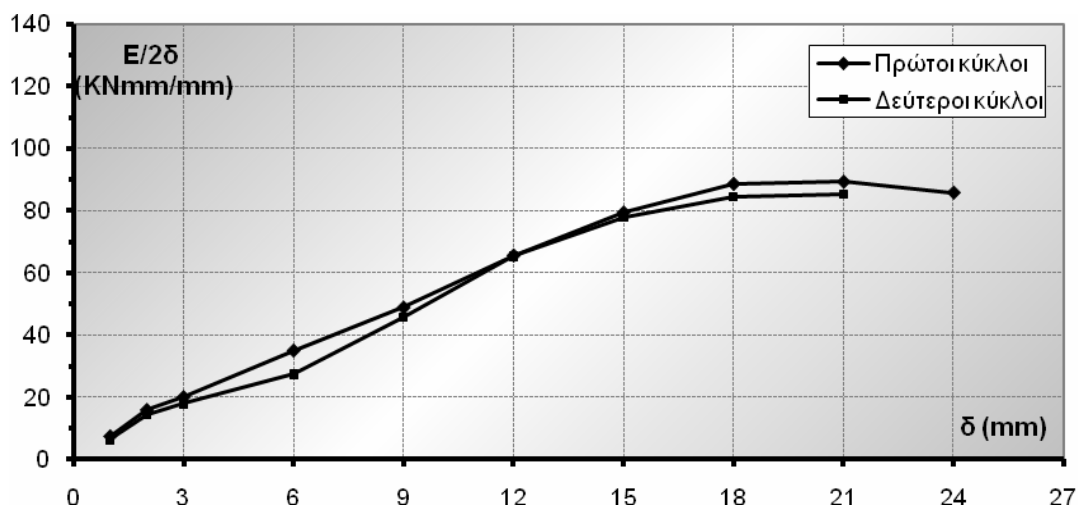
Η απορροφώμενη ενέργεια (Σχ. 4.47) παρουσίασε συνεχόμενη αύξηση μέχρι την τελική αστοχία της δοκού. Η εξέλιξή της σε σχέση με το δοκίμιο F4 ήταν παρόμοια μέχρι τη μετατόπιση των 18mm. Από τη μετατόπιση αυτή και μέχρι το τέλος της πειραματικής δοκιμής παρουσίασε ελαφρά πτώση, γεγονός το οποίο ερμηνεύεται από την εκτεταμένη ρηγμάτωση από το συγκεκριμένο επίπεδο μετατόπισης, το οποίο συνεπάγεται ήπια στένωση των βρόχων.

Η ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια (Σχ. 4.48) παρουσίασε αύξοντα κλάδο μέχρι τη μετατόπιση των 18mm, όπου και επιδεινώθηκε η κατάσταση στο μέσο της δοκού. Στη συνέχεια στο επόμενο βήμα ακολούθησε ευθύγραμμο κλάδο στη μέγιστη τιμή της, για να ακολουθήσει η αναμενόμενη πτώση κατά την αστοχία της δοκού στο μέσον της.

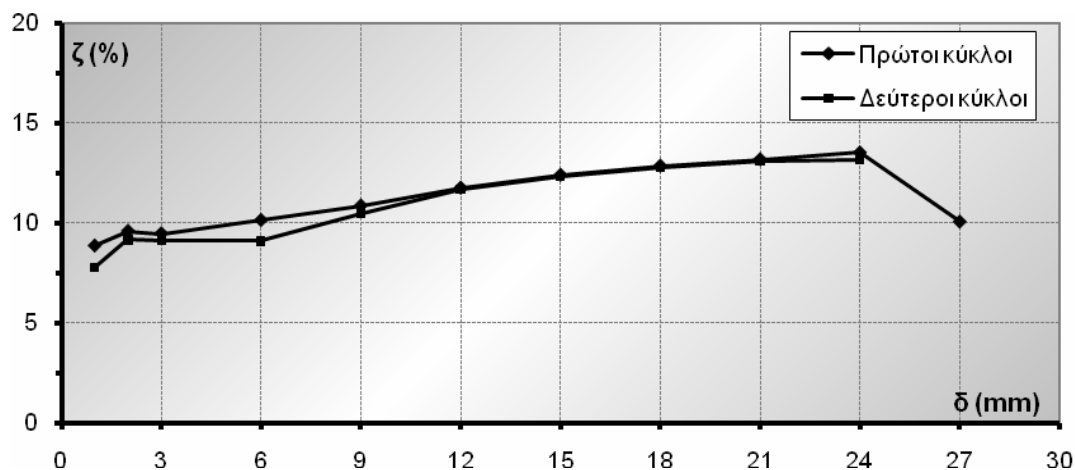
Η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση (Σχ. 4.49) παρουσίασε συνεχόμενη ήπια αύξηση μέχρι το τέλος της πειραματικής δοκιμής χωρίς ιδιαίτερες διακυμάνσεις. Η μέγιστη τιμή της παρατηρήθηκε στα 24mm λίγο πριν την αστοχία του δοκιμίου ($\zeta \approx 13\%$). Μετά την αστοχία παρουσίασε την αναμενόμενη πτώση.



Σχ. 4.47 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F5).



Σχ. 4.48 Ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F5).



Σχ. 4.49 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F5).

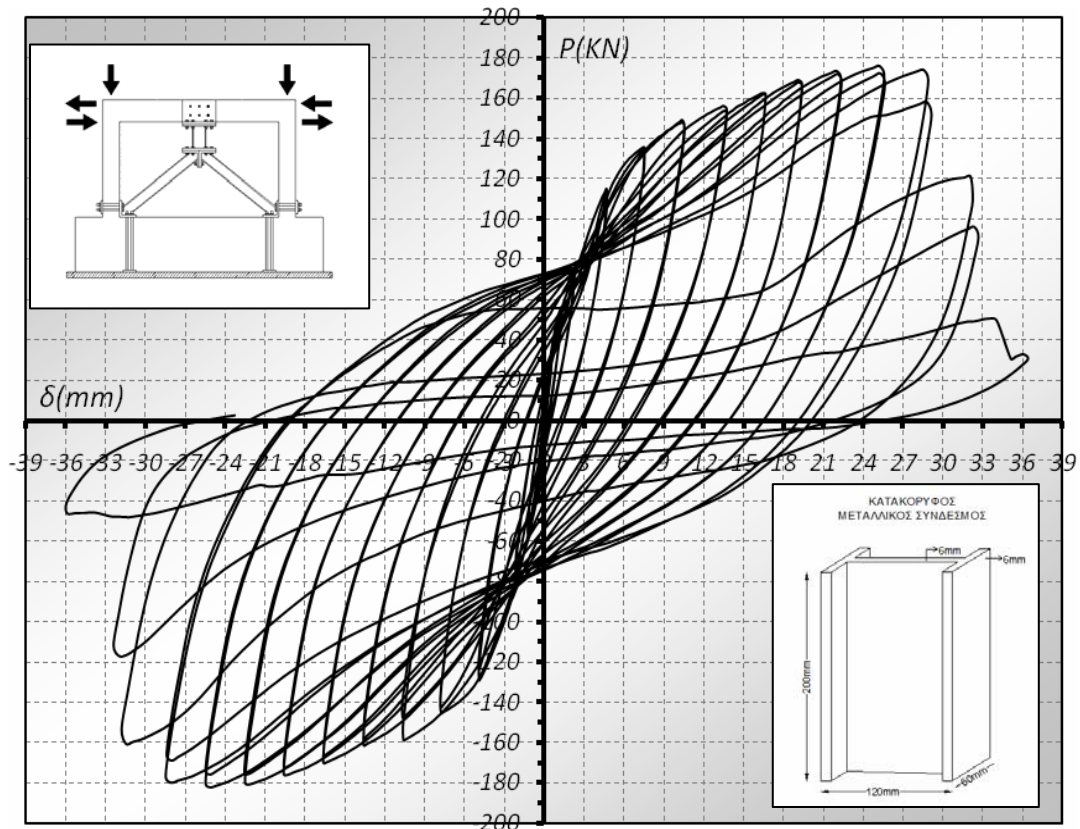
4.10 Δοκίμιο F5,N

Αποτελεί το δοκίμιο F5 με την προσθήκη αξονικού φορτίου στους στύλους (Φωτ. 4.46). Η επιβολή αξονικού φορτίου αύξησε κατά 21% τη φέρουσα ικανότητα στο τρίτο μόλις επίπεδο μετακίνησης σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς το αξονικό φορτίο (Σχ. 4.50 και 4.51).

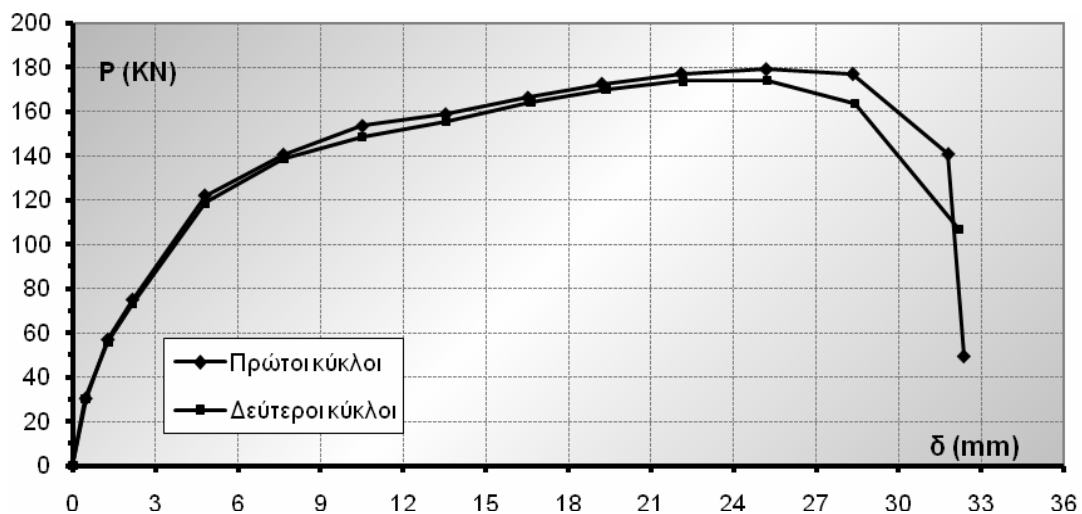


Φωτ. 4.46 Δοκίμιο F5,N.

Ήδη από τα 6mm η αντοχή έφτασε τα 130kN επιδεικνύοντας την υψηλότερη δυσκαμψία και αντοχή από οποιοδήποτε άλλο δοκίμιο. Το δοκίμιο αυτό απέδωσε μια εξαιρετικά πλάσιμη συμπεριφορά, διατηρώντας την αντοχή πάνω από τα 100kN για δέκα επίπεδα μετακίνησης (Σχ. 4.51). Η μέγιστη αντοχή έφτασε τα 180kN, υψηλότερη από οποιοδήποτε άλλο δοκίμιο, σε μετατόπιση 30mm. Υπενθυμίζεται ότι η μέγιστη αντοχή του αντίστοιχου γυμνού πλαισίου έφτασε τα 50kN.



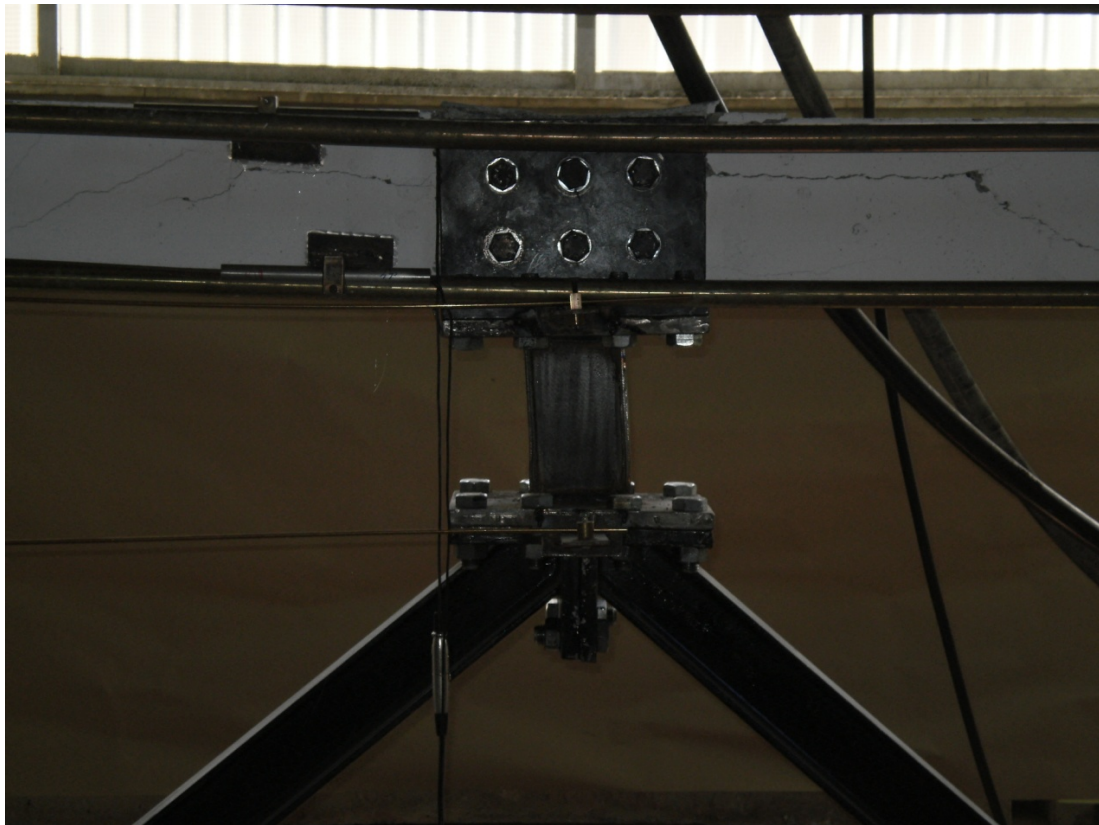
Σχ. 4.50 Φορτίο - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F5,N).



Σχ. 4.51 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F5,N).

Για μια ακόμη φορά η άμεση ενεργοποίηση του κατακόρυφου συνδέσμου, σε συνδυασμό με την αυξημένη δυσκαμψία του που οφείλεται στη γεωμετρία του, είχε ως αποτέλεσμα τη ρηγμάτωση στο άνω και κάτω τμήμα του στύλου σε μικρό βαθμό, και πολύ περισσότερο στην περιοχή της σύνδεσης του κατακόρυφου συνδέσμου με τη δοκό (μεταλλικό στοιχείο Π), ακόμη και από τους πρώτους κύκλους φόρτισης (Φωτ. 4.47). Οι εφελκυστικές τάσεις οι οποίες προκλήθηκαν από τους έξι κοχλίες στο μέσο του ζυγώματος ήταν η αιτία για το σχηματισμό ευθύγραμμων ρηγμάτων κατά μήκος της δοκού (Φωτ. 4.47 και 4.48). Όπως και σε άλλες πειραματικές δοκιμές, αποκολλήθηκε πλήρως η επικάλυψη του άνω πέλματος στο μέσον της δοκού.

Παρά τις έντονες βλάβες της δοκού, σε αντίθεση με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς αξονικό φορτίο (F5), στη δοκό δεν προκλήθηκαν διαμπερή ρήγματα γεγονός το οποίο βοήθησε στην αποτροπή της εκτός επιπέδου μετακίνησης του πλαισίου. Το γεγονός αυτό επέτρεψε να συνεχισθεί η πειραματική δοκιμή σε μετατόπιση μεγαλύτερη από το αντίστοιχο F5, με τελικό αποτέλεσμα την οριζόντια απόσχιση του κατακόρυφου συνδέσμου (Φωτ. 4.48) σε μετατόπιση περίπου 30mm.

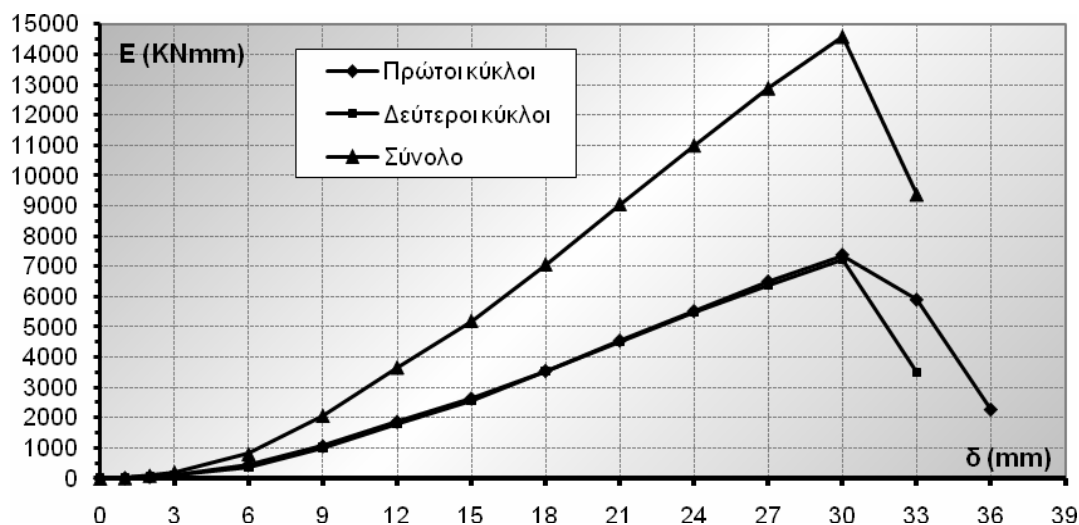


Φωτ. 4.47 Ρηγμάτωση δοκού με την άμεση ενεργοποίηση του δύσκαμπτου κατακόρυφου συνδέσμου.

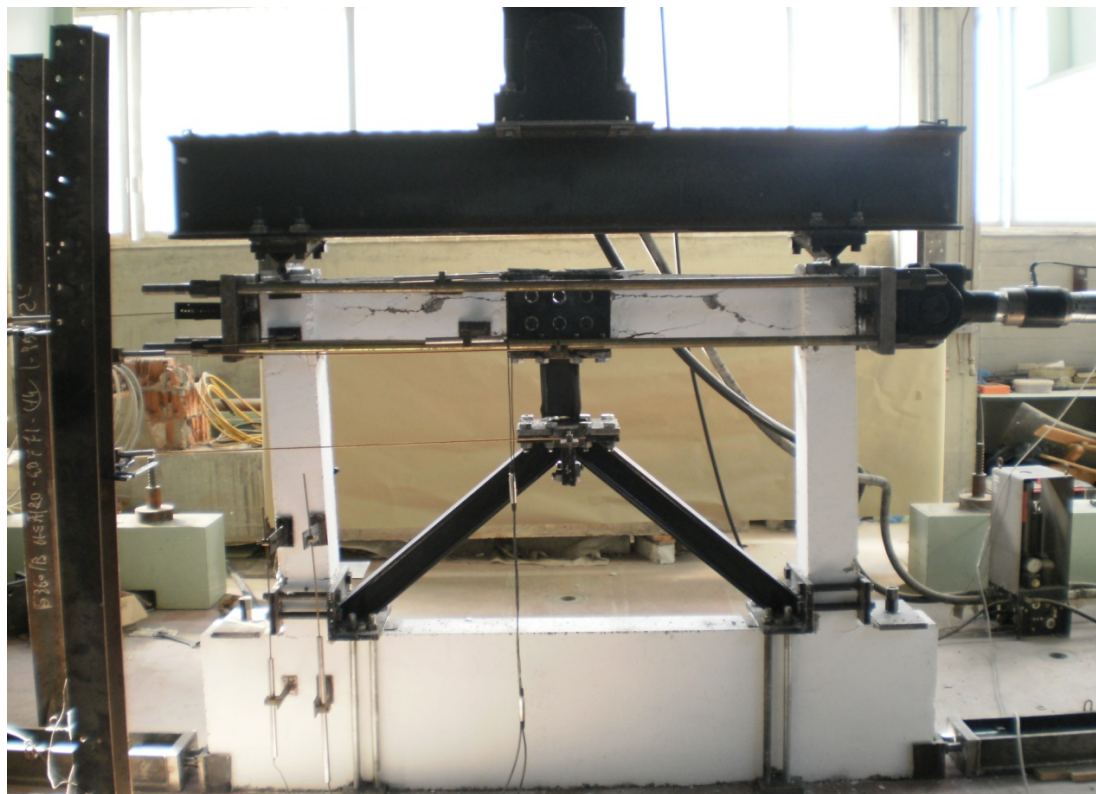


Φωτ. 4.48 Έντονη ρηγματώση της δοκού με ταυτόχρονη απόσχιση του κατακόρυφου συνδέσμου.

Ιδιαίτερα υψηλή ήταν και η ποσότητα απορροφώμενης ενέργειας (Σχ. 4.52). Πράγματι σε μετατόπιση 24mm παρατηρήθηκε αύξηση της απορροφώμενης ενέργειας 38 % σε σχέση με το δοκίμιο χωρίς αξονικό φορτίο. Η μέγιστη τιμή αναπτύχθηκε λίγο πριν την αστοχία του συνδέσμου, σε μετατόπιση 30mm από τη θέση ισορροπίας με τιμή 7500kNmm, υψηλότερο από οποιαδήποτε άλλο δοκίμιο. Μετά την αστοχία του συνδέσμου (Φωτ. 4.49) παρατηρήθηκε απότομη πτώση. Η απορροφώμενη ενέργεια μέχρι και την αστοχία του κατακόρυφου συνδέσμου ταυτίζεται για τους δυο κύκλους φόρτισης.

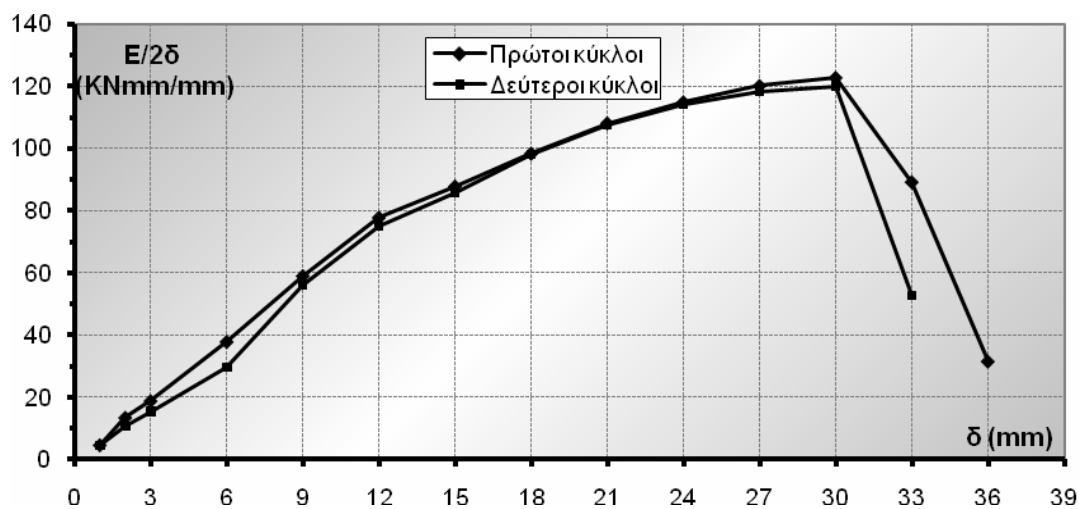


Σχ. 4.52 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F5,N).



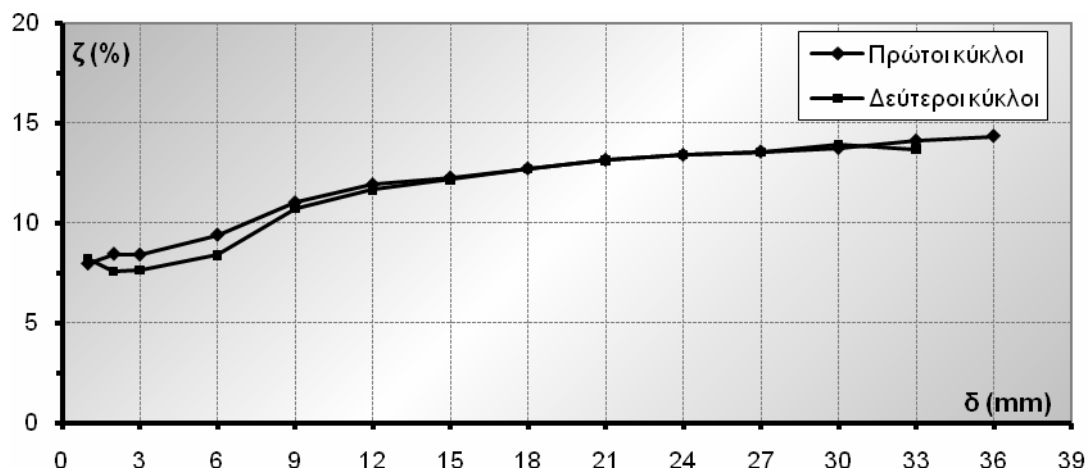
Φωτ. 4.49 Τελική μορφή δοκιμίου.

Σημαντική αύξηση παρατηρήθηκε και στην ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια (Σχ. 4.53) μέχρι και την αστοχία του κατακόρυφου συνδέσμου. Σε μετατόπιση 21mm παρουσίασε 22% αύξηση σε σχέση με το αντίστοιχο χωρίς αξονικό δοκίμιο (F5), ενώ η μέγιστη τιμή της αναπτύχθηκε πριν την αστοχία του συνδέσμου. Όπως και στην απορροφώμενη ενέργεια έτσι και εδώ οι τιμές ταυτίζονται για τους δυο κύκλους φόρτισης μέχρι την αστοχία του συνδέσμου.



Σχ. 4.53 Ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F5,N).

Η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση (Σχ. 4.54) παρουσίασε ήπιο αύξοντα κλάδο με τάσεις σταθεροποίησης στα τελευταία επίπεδα μετατόπισης στην τιμή $\zeta \approx 14\%$. Οι τιμές για τους δύο κύκλους φόρτισης από τη μετατόπιση 9mm και μέχρι το τέλος ταυτίζονται.



Σχ. 4.54 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο F5,N).

4.11 Δοκίμιο P1

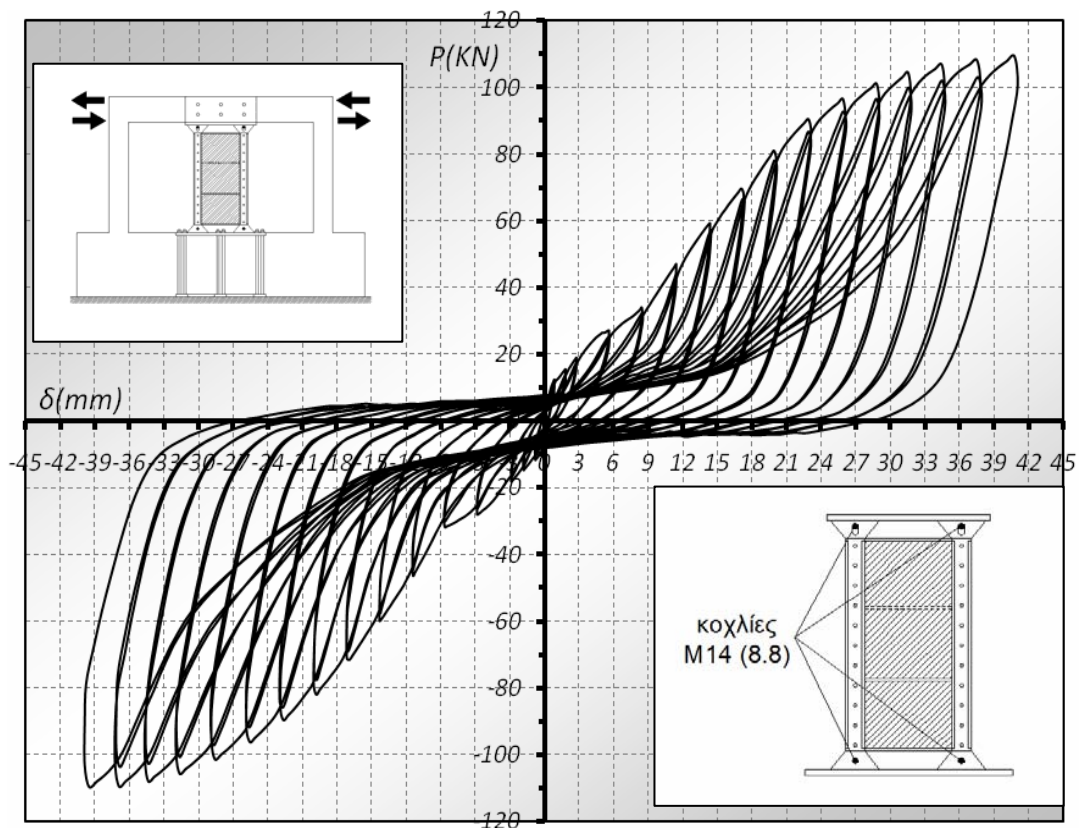
Στη φωτογραφία 4.50 απεικονίζεται το δοκίμιο στη θέση ισορροπίας και η διάταξη επιβολής της φόρτισης.



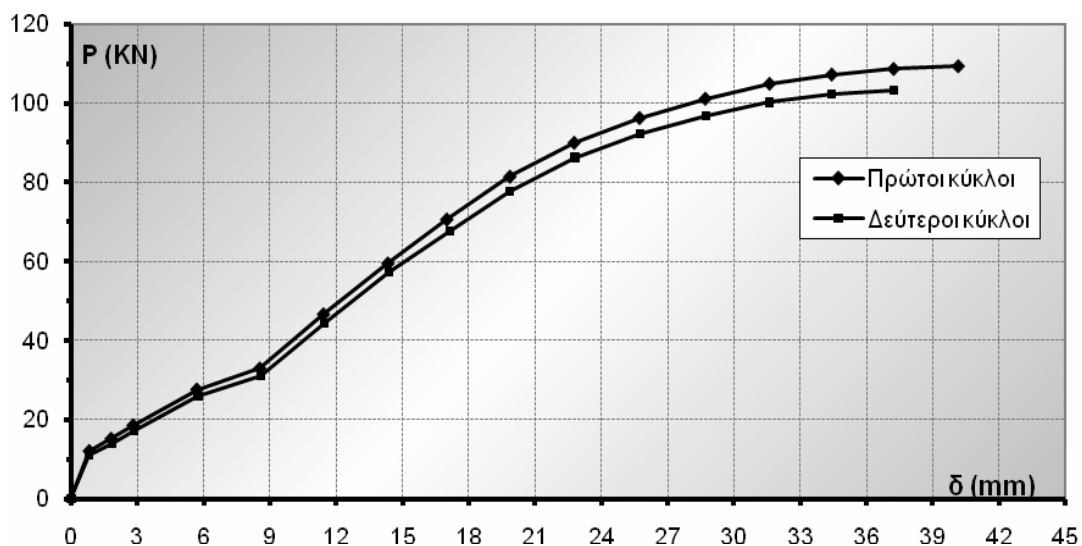
Φωτ. 4.50 Δοκίμιο P1.

Κύριο χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς του συγκεκριμένου δοκιμίου αποτελεί η σχετικά ικανοποιητική φέρουσα ικανότητα ακόμη και από τους πρώτους κύκλους φόρτισης, με στενούς όμως βρόχους και έντονα φαινόμενα ολίσθησης, ειδικά σε προχωρημένα επίπεδα μετακίνησης (Σχ. 4.55 και 4.56). Μέχρι τη μετατόπιση των 9mm παρατηρείται μια ομαλή

αύξηση της αντοχής με τάση σταθεροποίησης. Από τα 9mm και μετά αυξάνεται η κλίση της καμπύλης με τάση σταθεροποίησης στα 110kN κατά τους τελευταίους κύκλους φόρτισης.



Σχ. 4.55 Φορτίο - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο P1).



Σχ. 4.56 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο P1).

Όσον αφορά τη μορφή αστοχίας του πλαισίου, με την έναρξη της πειραματικής δοκιμής δημιουργήθηκαν ρήγματα εκατέρωθεν του μεταλλικού στοιχείου Π (Φωτ. 4.51). Επίσης με την ολοκλήρωση της δοκιμής παρατηρήθηκε πλήρης αποδιοργάνωση της επικάλυψης στην περιοχή σύνδεσης του μεταλλικού στοιχείου στο άνω πέλμα του μέσου της δοκού (Φωτ.

4.52). Οι στύλοι αντίστοιχα εμφάνισαν τις αναμενόμενες πλαστικές αρθρώσεις στην κεφαλή και τον πόδα.



Φωτ. 4.51 Έναρξη ρηγμάτωσης εκατέρωθεν της μεταλλικής διάταξης σύνδεσης.

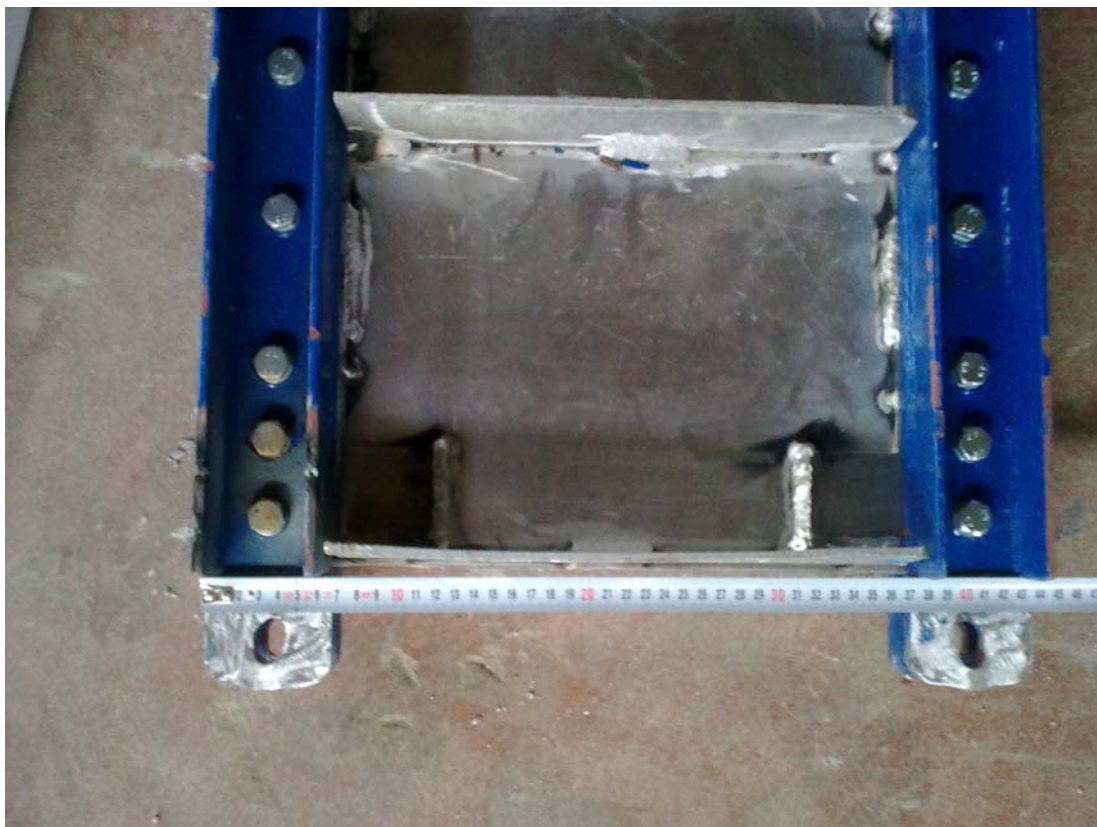


Φωτ. 4.52 Αποδιοργάνωση επικάλυψης δοκού.

Το πέτασμα αλουμινίου δεν παρουσίασε ενδείξεις διατμητικής παραμόρφωσης ώστε να αποσβέσει ενέργεια. Αντίθετα, σε όλη τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής παρέμεινε απαραμόρφωτο διατηρώντας ορθογωνικό σχήμα παρά τις προχωρημένες μετατοπίσεις. Το δύσκαμπτο επομένως αυτό στοιχείο συνέβαλε μεν στην αύξηση της αντοχής, η αδυναμία όμως παραμόρφωσής του δεν απέδωσε πλούσιους βρόχους. Το πέτασμα αλουμινίου σε προχωρημένα επίπεδα μετακίνησης ουσιαστικά περιστρεφόταν κατά τη φορά της φόρτισης χωρίς όμως να παραμορφώνεται. Οι παραμορφώσεις συγκεντρώθηκαν στη σύνδεση του πετάσματος με τη βάση του δοκιμίου. Τούτο τεκμηριώνεται από την εικόνα διατμητικής αστοχίας των δύο κοχλιών της σύνδεσης του πετάσματος με τη μεταλλική πλάκα της βάσης του δοκιμίου, αλλά και τη σύνθλιψη άντυγας των οπών σύνδεσης των μεταλλικών στοιχείων U με τη βάση του δοκιμίου (Φωτ. 4.53 και 4.54).

Όπως προαναφέρθηκε, η αδυναμία διατμητικής παραμόρφωσης του πετάσματος συνετέλεσε στη στένωση των κύκλων φόρτισης με άμεσο επακόλουθο την απορρόφηση μικρής σχετικά ποσότητας ενέργειας (Σχ. 4.57). Πάντως διατηρείται μια αύξουσα πορεία της απορροφώμενης ενέργειας (Σχ. 4.57 και 4.58).

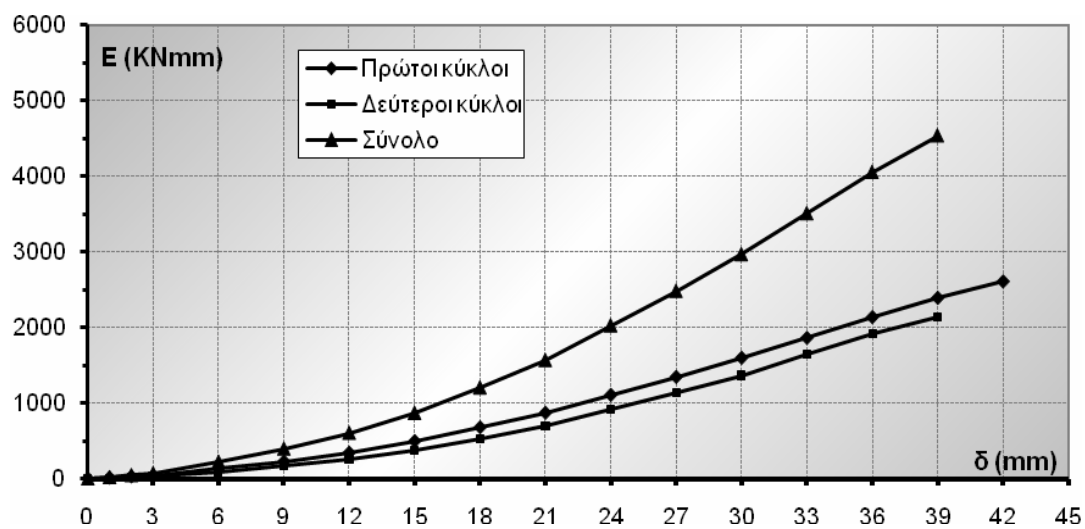
Η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση (Σχ. 4.59), παρά την τάση αύξησης με τη μετακίνηση, παρουσιάζει χαμηλές τιμές, αντίστοιχες με το δοκίμιο χωρίς την ενίσχυση (F1). Τέλος παρατηρείται πρακτικώς ταύτιση τιμών μεταξύ πρώτων και δεύτερων κύκλων φόρτισης.



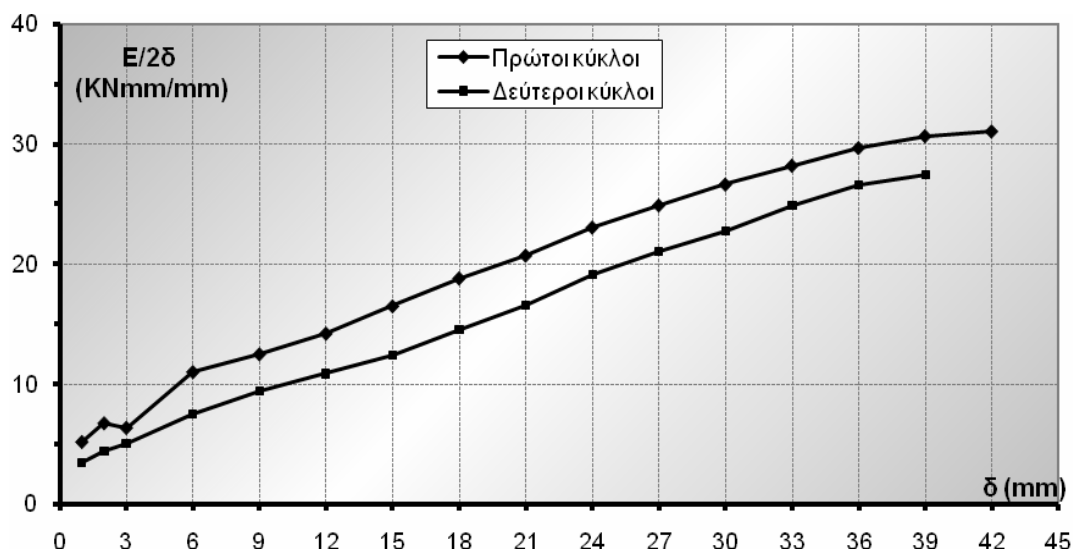
Φωτ. 4.53 Σύνθλιψη άντυγας οπών κάτω σύνδεσης.



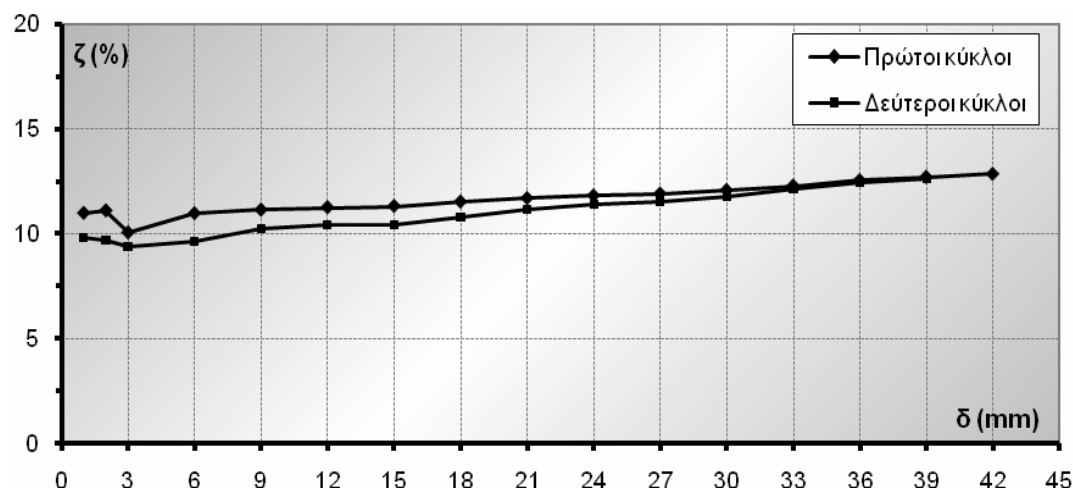
Φωτ. 4.54 Λεπτομέρεια σύνθλιψης άντυνας οπών και διατμητική παραμόρφωση κοχλιών.



Σχ. 4.57 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο P1).



Σχ. 4.58 Ανηγγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο P1).



Σχ. 4.59 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο P1).

4.12 Δοκίμιο P2

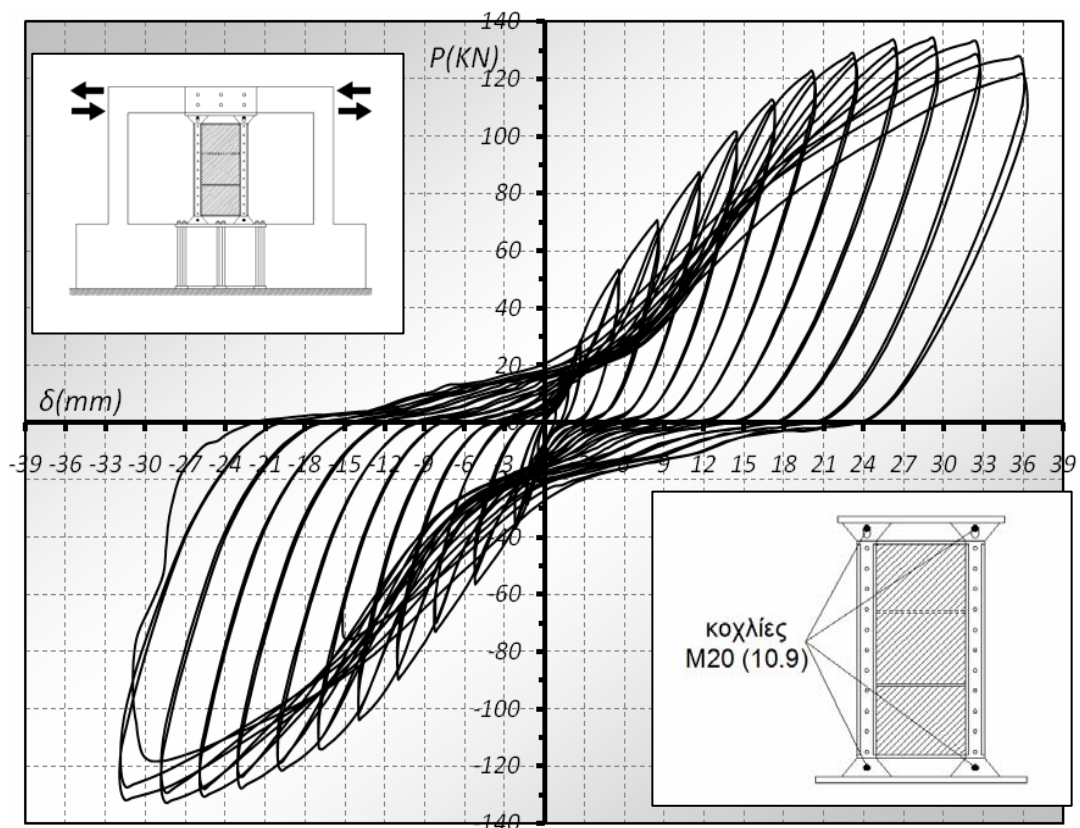
Το δοκίμιο αυτό, αποτελεί ουσιαστικά βελτίωση του δοκιμίου P1 στο οποίο, όπως προαναφέρθηκε, παρατηρήθηκαν μη αναμενόμενες αστοχίες στη σύνδεση του πετάσματος με τη μεταλλική πλάκα της βάσης του δοκιμίου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν ισχυρότεροι κοχλίες αλλά και ανθεκτικότερα μεταλλικά στοιχεία U για την αποτροπή απροσδόκητων μορφών αστοχιών (Φωτ. 4.55).

Παρατηρήθηκε σαφώς καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με το δοκίμιο P1 αποδίδοντας υψηλές τιμές αντοχής ακόμη και από τους πρώτους κύκλους φόρτισης (Σχ. 4.60 και 4.61). Σε μετακίνηση μόλις 3mm η αντοχή αυξήθηκε κατά 65% σε σχέση με το P1. Η μέγιστη αντοχή (133KN) αναπτύχθηκε σε μετατόπιση 30mm, έναντι αντίστοιχης αντοχής 100KN του δοκιμίου P1 στην ίδια μετατόπιση. Η βελτίωση της συμπεριφοράς του δοκιμίου P2, σε σχέση με το όμοιό του P1, οφείλεται στη διατμητική παραμόρφωση του πετάσματος. Πράγματι, οι ισχυρές

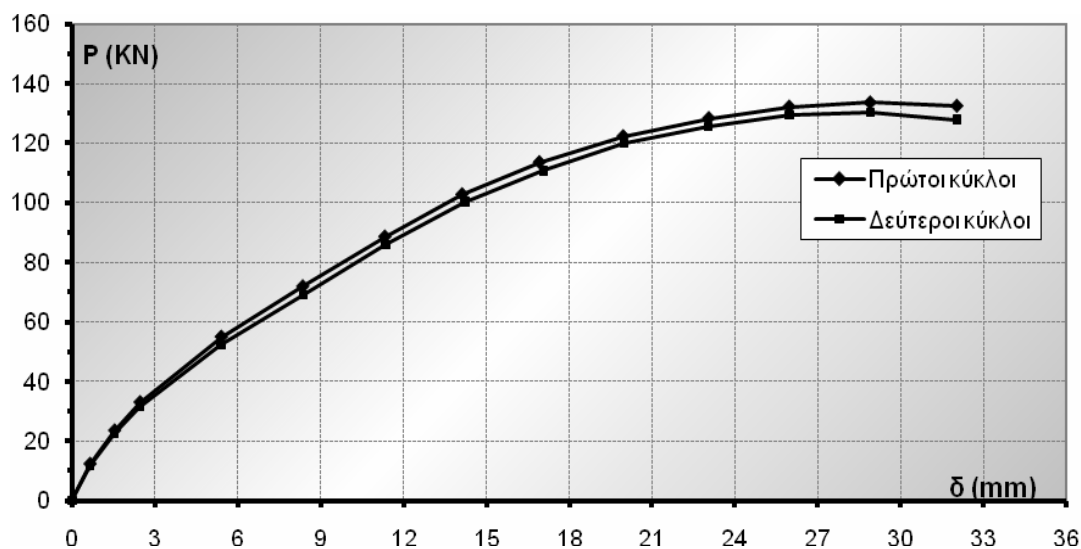
πλέον συνδέσεις συνέβαλαν στην παραμόρφωση του πετάσματος χωρίς να εφελκύνονται και να θλίβονται τα μεταλλικά στοιχεία U (Φωτ. 4.56).



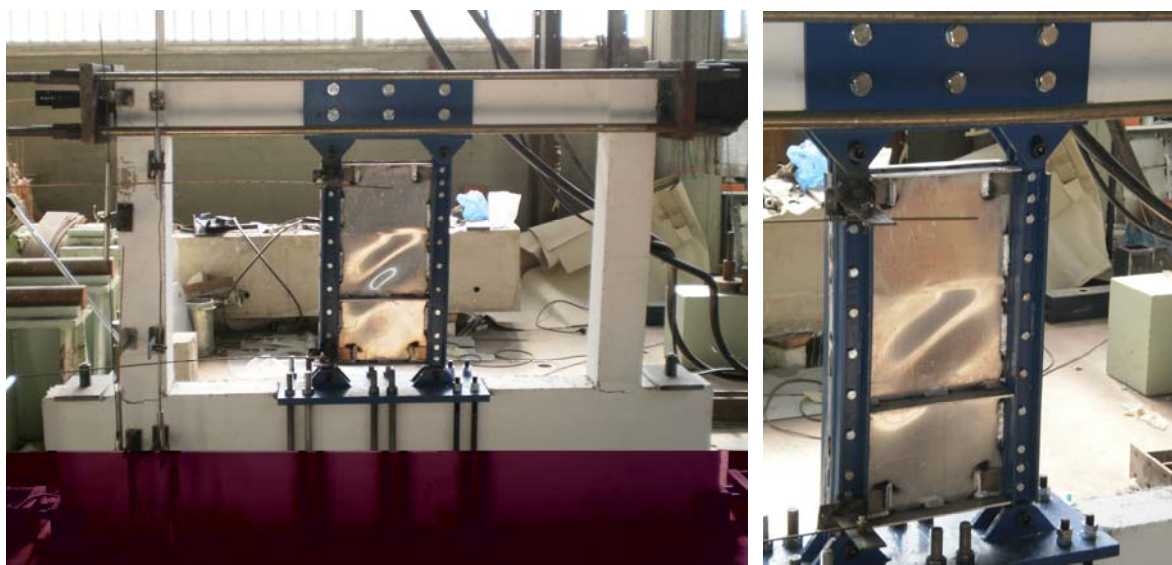
Φωτ. 4.55 Δοκίμιο P2.



Σχ. 4.60 Φορτίο - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο P2).



Σχ. 4.61 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο P2).



Φωτ. 4.56 Διαμητική παραμόρφωση πετάσματος αλουμινίου.

Παρατηρήθηκε σαφώς καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με το δοκίμιο P1 αποδίδοντας υψηλές τιμές αντοχής ακόμη και από τους πρώτους κύκλους φόρτισης (Σχ. 4.60 και 4.61). Σε μετακίνηση μόλις 3mm η αντοχή αυξήθηκε κατά 65% σε σχέση με το P1. Η μέγιστη αντοχή (133KN) αναπτύχθηκε σε μετατόπιση 30mm έναντι αντίστοιχης αντοχής 100KN του δοκιμίου P1 στην ίδια μετατόπιση. Η βελτίωση της συμπεριφοράς του δοκιμίου P2, σε σχέση με το όμοιό του P1, οφείλεται στη διαμητική παραμόρφωση του πετάσματος. Πράγματι, οι ισχυρές πλέον συνδέσεις συνέβαλαν στην παραμόρφωση του πετάσματος χωρίς να εφελκύνονται και να θλίβονται τα μεταλλικά στοιχεία U (Φωτ. 4.56).

Ο βελτιωμένος σχεδιασμός απέδωσε την προβλεπόμενη λειτουργία του πετάσματος. Έτσι, τα μεταλλικά στοιχεία σχήματος U εκατέρωθεν του πετάσματος δημιούργησαν συνθήκες πάκτωσης όσον αφορά τη συγκράτηση του πετάσματος αποτρέποντας την

ολίσθηση. Επιπλέον, το σύστημα κύλισης με τις οβάλ οπές στην άνω σύνδεση του πετάσματος με το μεταλλικό στοιχείο Π της δοκού, επέτρεψε την κατακόρυφη μετακίνηση των μεταλλικών στοιχείων U κατά την ανακύκλιση, αποτρέποντας φαινόμενα εφελκυσμού και θλίψης τα οποία θα συσκότιζαν την πραγματική συνεισφορά του πετάσματος στην ενίσχυση του πλαισίου. Τέλος, οι ισχυροί πλέον κοχλίες στη σύνδεση του πετάσματος άνω και κάτω απέτρεψαν τη διατμητική τους παραμόρφωση και την αστοχία λόγω λυγισμού, αλλά και τη σύνθλιψη άντυγας που παρατηρήθηκε στο δοκίμιο P1.

Η πειραματική δοκιμή διακόπηκε για λόγους ασφαλείας, αφού βέβαια το δοκίμιο είχε αναπτύξει τη μέγιστη αντοχή του, λόγω αστοχίας της δοκού και αρχόμενης μετατόπισης του πλαισίου εκτός επιπέδου. Οι στύλοι εμφάνισαν την τυπική καμπτική αστοχία στην κεφαλή και τον πόδα ενώ η δοκός εμφάνισε τυπική απόσχιση (Φωτ. 4.57).



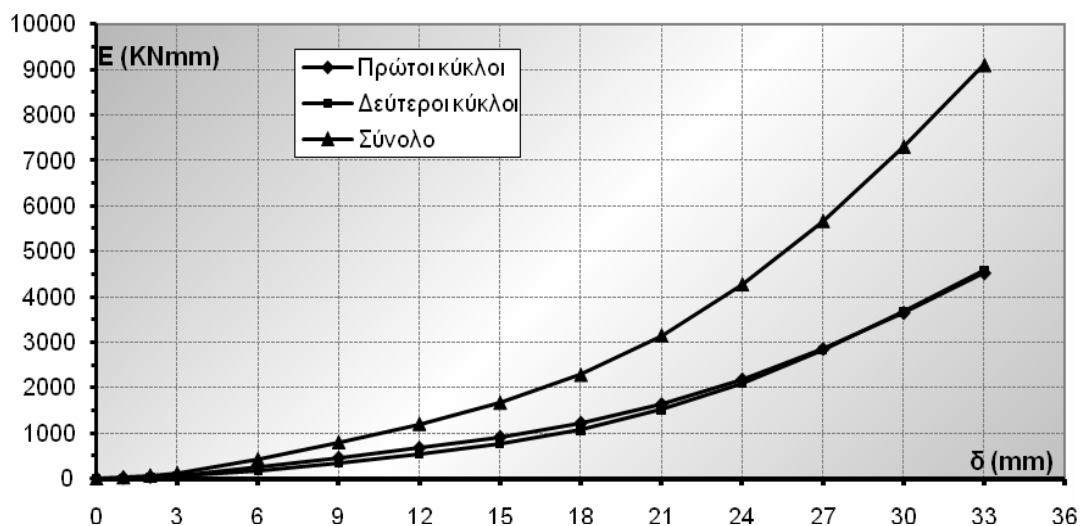
Φωτ. 4.57 Αστοχία δοκού, στύλων και παραμόρφωση πετάσματος.

Η λειτουργία συνεπώς του πετάσματος απέδωσε υψηλές τιμές δυσκαμψίας και αντοχής. Παρόλα αυτά το ασθενές πλαίσιο Ο.Σ., ιδιαίτερα στο μέσον της δοκού, δεν ήταν σε θέση να διατηρηθεί ακέραιο για μεγάλο χρονικό διάστημα και αστόχησε ψαθυρά υπό την ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

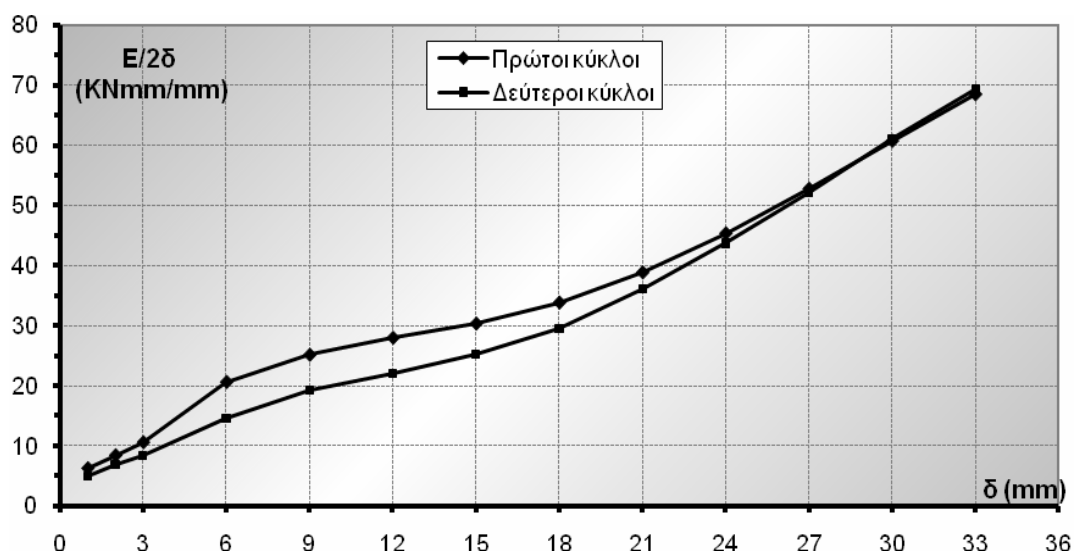
Η διατμητική παραμόρφωση του πετάσματος αλουμινίου απέδωσε πλουσιότερους βρόχους σε σχέση με το δοκίμιο P1 με άμεσο επακόλουθο την αύξηση της απορροφώμενης ενέργειας (Σχ. 4.62). Εντυπωσιακά είναι τα αποτελέσματα της διαφοράς μεταξύ των δύο αυτών δοκιμών μιας και στο δοκίμιο P2 στη μέγιστη μετατόπιση (33mm) η απορροφώμενη ενέργεια ήταν 9000KNmm ενώ στην ίδια μετατόπιση του P1 ήταν 3500KNmm. Η διαφορά αυτή οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στην ενεργοποίηση του πετάσματος. Επιπλέον, στο δοκίμιο P2 δεν υπήρξε απόκλιση μεταξύ πρώτων και δεύτερων κύκλων φόρτισης (Σχ. 4.62).

Ανάλογη ήταν και η μεταβολή της ανηγμένης απορροφώμενης ενέργειας (Σχ. 4.63). Και πάλι παρατηρείται σχετική ταύτιση μεταξύ πρώτων και δεύτερων κύκλων φόρτισης.

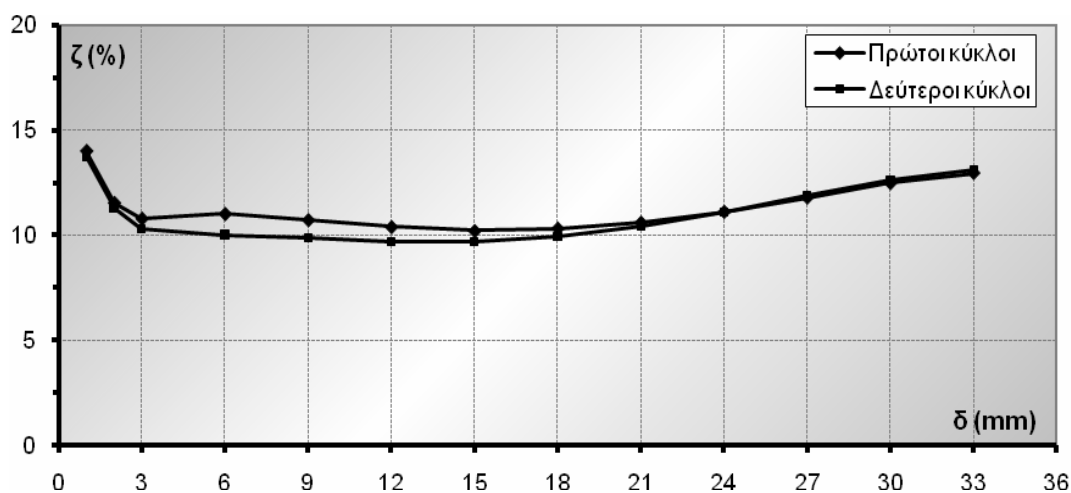
Η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση σε ένα μεγάλο εύρος μετακινήσεων (3-21)mm διατήρησε χαμηλές τιμές ~10% ενώ στη συνέχεια ακολούθησε ελαφρά άνοδος με την τιμή να τείνει να σταθεροποιηθεί στην τιμή 13% (Σχ. 4.64). Σε γενικές γραμμές ακολούθησε την εξέλιξη του δοκιμίου P1.



Σχ. 4.62 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο P2).



Σχ. 4.63 Ανηγγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο P2).



Σχ. 4.64 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής (Δοκίμιο P2).

4.13 Σύνοψη στοιχείων

Τα κυριότερα πειραματικά στοιχεία συνοψίζονται στους πίνακες 4.1 και 4.2. Οι τιμές $\delta=9\text{mm}$ και $\delta=18\text{mm}$, που αντιστοιχούν περίπου σε σχετικές μετακινήσεις ορόφων 10‰ και 20‰, επελέγησαν ως χαρακτηριστικές καθώς στην τιμή 10‰ οι βλάβες είναι συνήθως έντονες αλλά ευσταθείς και υπό εξέλιξη ενώ η τιμή 20‰ μπορεί να θεωρηθεί ως όριο αποδεκτής σχετικής μετακίνησης πέραν της οποίας παρατηρούνται προβλήματα αστάθειας του φορέα. Δίνονται επίσης και οι τιμές υπό τις μέγιστες μετακινήσεις που επιτεύχθηκαν πειραματικά.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται πιο συστηματικά οι συγκρίσεις μεταξύ δοκιμών και ομάδων δοκιμών, με βάση συγκεκριμένα κριτήρια και με τα αποτελέσματα των πινάκων 4.1 και 4.2.

A/A	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΕΝΙΣΧΥΣΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ	ΑΞΟΝΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΤΥΛΟΥ (KN)	ΑΣΤΟΧΙΑ	Pmax (KN)		δ(Pmax) (mm)		M.O. Pmax (KN)	M.O. δ(Pmax) (mm)	δmax (mm)		P(δmax) (KN)		M.O. δmax (mm)	M.O. P(δmax) (KN)
1	F1	ΟΧΙ	Γυμνό με τη μεταλλική διάταξη Λ	0	ΤΥΠΙΚΗ ΣΤΥΛΩΝ	31.05	-31.76	31.00	-26.75	31.41	28.88	43.83	-41.82	23.87	-27.13	42.83	25.50
2	F1,N	ΟΧΙ	Γυμνό με τη μεταλλική διάταξη Λ	80	ΤΥΠΙΚΗ ΣΤΥΛΩΝ	47.65	-57.30	20.74	-17.34	52.48	19.04	44.75	-38.21	28.29	-42.48	41.48	35.39
3	F2	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με λεπίδα 6X70mm, ύψους 100mm	0	ΚΟΡΜΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ	93.40	-89.99	11.31	-11.86	91.70	11.59	30.70	-30.80	31.45	-27.25	30.75	29.35
4	F2,N	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με λεπίδα 6X70mm, ύψους 100mm	80	ΚΟΡΜΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ	111.37	-122.00	7.89	-7.80	116.69	7.85	38.76	-39.38	47.07	-53.44	39.07	50.26
5	F3	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με I (60X30)mm, πάχους κορμού και πελμάτων 6mm, ύψους 100mm	0	ΚΟΡΜΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ	116.61	-113.12	16.78	-13.98	114.87	15.38	30.63	-30.47	32.41	-39.16	30.55	35.79
6	F3,N	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με I (60X30)mm, πάχους κορμού και πελμάτων 6mm, ύψους 100mm	80	ΚΟΡΜΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ	149.91	-154.69	15.84	-17.44	152.30	16.64	23.28	-24.71	48.15	-61.85	24.00	55.00
7	F4	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με I (80X40)mm, πάχους κορμού και πελμάτων 6mm, ύψους 200mm	0	ΚΟΡΜΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ	119.29	-126.40	23.06	-23.19	122.85	23.13	44.26	-42.32	29.20	-27.90	43.29	28.55
8	F4,N	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με I (80X40)mm, πάχους κορμού και πελμάτων 6mm, ύψους 200mm	80	ΜΕΣΟΝ ΔΟΚΟΥ	157.57	-156.76	19.50	-16.91	157.17	18.21	23.16	-19.97	127.49	-150.48	21.57	138.99
9	F5	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με I (120X60)mm, πάχους κορμού και πελμάτων 6mm, ύψους 200mm	0	ΜΕΣΟΝ ΔΟΚΟΥ	148.91	-149.63	19.26	-15.94	149.27	17.60	26.48	-20.47	111.04	-119.71	23.48	115.38
10	F5,N	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με I (120X60)mm, πάχους κορμού και πελμάτων 6mm, ύψους 200mm	80	ΜΕΣΟΝ ΔΟΚΟΥ & ΚΟΡΜΟΣ	176.15	-182.16	25.22	-25.14	179.16	25.18	36.40	-35.99	30.62	-41.04	36.20	35.83
11	P1	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με κατακόρυφο πέτασμα αλουμινίου	0	ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ	109,23	-109,48	40,79	-39,49	109,36	40,14	41,06	-39,87	100,58	-102,93	40,47	101,76
12	P2	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με κατακόρυφο πέτασμα αλουμινίου	0	ΠΕΤΑΣΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	134,36	-132,81	29,27	-28,52	133,59	28,90	36,11	-31,93	119,86	-126,51	34,02	123,19

Πίν. 4.1 Σύνοψη πειραματικών αποτελεσμάτων (φέρουσα ικανότητα).

Α/ Α	ΣΥΜΒΟΛΙ ΣΜΟΣ	ΕΝΙ ΣΧΥ ΣΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ	ΑΞΟΝΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΤΥΛΟΥ (KN)	ΑΣΤΟΧΙΑ	Ε (KNmm)			Ε/2δ (KNmm/mm)			ζ (%)		
						Άθροισμα 1ου & 2ου κύκλου			Άθροισμα 1ου & 2ου κύκλου			Μέση τιμή 1ου & 2ου κύκλου		
						δ=9mm	δ=18mm	δmax	δ=9mm	δ=18mm	δmax	δ=9mm	δ=18mm	δmax
1	F1	ΟΧΙ	Γυμνό με τη μεταλλική διάταξη Λ	0	ΤΥΠΙΚΗ ΣΤΥΛΩΝ	235	577	1557	13.1	16.0	18.5	9.2	9.8	12.8
2	F1,N	ΟΧΙ	Γυμνό με τη μεταλλική διάταξη Λ	80	ΤΥΠΙΚΗ ΣΤΥΛΩΝ	572	1344	3946	31.8	37.3	50.6	8.7	9.3	13.9
3	F2	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με λεπίδα 6Χ70mm, ύψους 100mm	0	ΚΟΡΜΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ	2574	696	820	143.0	19.3	13.7	14.0	10.1	9.5
4	F2,N	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με λεπίδα 6Χ70mm, ύψους 100mm	80	ΚΟΡΜΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ	3366	1373	3670	187.0	38.1	51.0	14.0	8.5	12.1
5	F3	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με Ι (60Χ30)mm, πάχους κορμού και πελμάτων 6mm, ύψους 100mm	0	ΚΟΡΜΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ	2338	6398	1395	129.9	177.7	23.3	13.1	14.3	10.8
6	F3,N	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με Ι (60Χ30)mm, πάχους κορμού και πελμάτων 6mm, ύψους 100mm	80	ΚΟΡΜΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ	3147	9728	8757	174.8	270.2	208.5	12.9	14.3	14.3
7	F4	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με Ι (80Χ40)mm, πάχους κορμού και πελμάτων 6mm, ύψους 200mm	0	ΚΟΡΜΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ	1851	6210	2135	102.9	172.5	27.4	12.3	13.5	13.0
8	F4,N	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με Ι (80Χ40)mm, πάχους κορμού και πελμάτων 6mm, ύψους 200mm	80	ΜΕΣΟΝ ΔΟΚΟΥ	2929	9103	10616	162.8	252.9	252.8	12.5	13.7	13.8
9	F5	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με Ι (120Χ60)mm, πάχους κορμού και πελμάτων 6mm, ύψους 200mm	0	ΜΕΣΟΝ ΔΟΚΟΥ	1701	6232	7330	94.5	173.1	174.5	10.7	12.8	13.4
10	F5,N	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με Ι (120Χ60)mm, πάχους κορμού και πελμάτων 6mm, ύψους 200mm	80	ΜΕΣΟΝ ΔΟΚΟΥ & ΚΟΡΜΟΣ	2074	7071	9370	115.2	196.4	142.0	10.9	12.7	13.9
11	P1	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με κατακόρυφο πέτασμα αλουμινίου	0	ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ	395	1203	4535	21,9	33,4	58,1	10,7	11,2	12,7
12	P2	ΝΑΙ	Ενισχυμένο με κατακόρυφο πέτασμα αλουμινίου	0	ΠΕΤΑΣΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	799	2280	9102	44,4	63,3	137,9	10,3	10,1	13,0

Πίν. 4.2 Σύνοψη πειραματικών αποτελεσμάτων (απορρόφηση ενέργειας και ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση).

5. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών, η οποία αφορά τη φέρουσα ικανότητα (διάγραμμα περιβάλλουσας φορτίου - μετατόπισης ζυγώματος δοκιμίου), την απόσβεση ενέργειας (διάγραμμα απορροφώμενης ενέργειας, ανηγμένης απορροφώμενης ενέργειας, ισοδύναμης ιξώδους απόσβεσης - μετατόπισης ζυγώματος δοκιμίου) και την πλαστιμότητα του συστήματος. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε με βάση τα ακόλουθα κριτήρια:

- Επίπεδο ενίσχυσης πλαισίου Ο.Σ.
- Ύπαρξη αξονικού φορτίου στους στύλους.

5.1 Επίπεδο ενίσχυσης πλαισίου Ο.Σ.

5.1.1 Δοκίμια χωρίς αξονικό φορτίο στους στύλους

- Φέρουσα ικανότητα συστήματος

Παρακάτω (Σχ. 5.1) παρουσιάζεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα των περιβαλλουσών των πρώτων κύκλων φόρτισης για όλα τα δοκίμια χωρίς αξονικό φορτίο. Όπως είναι αναμενόμενο, το δοκίμιο F1 το οποίο δεν φέρει ενίσχυση, εμφανίζει τη μικρότερη φέρουσα ικανότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Περίπου σε μετακίνηση 21mm από τη θέση ισορροπίας εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της, την οποία και διατηρεί με ελαφρά πτωτικές τάσεις προς τη λήξη της πειραματικής δοκιμής.

Ακολουθεί το πρώτο ενισχυμένο δοκίμιο F2, ο κατακόρυφος σύνδεσμος του οποίου προκαλεί δραστική αύξηση της φέρουσας ικανότητάς του, η μέγιστη τιμή της οποίας εμφανίζεται σε μετακίνηση 12mm και αντιστοιχεί περίπου στο τριπλάσιο της μέγιστης αντοχής του γυμνού δοκιμίου. Μετά τη μετακίνηση αυτή ακολουθεί η απόσχιση του κατακόρυφου συνδέσμου ενίσχυσης, η οποία σταδιακά υποβιβάζει τη φέρουσα ικανότητα μέχρι τη σταθεροποίησή της, στους επόμενους δύο κύκλους, σε τιμή ίση με του αντίστοιχου γυμνού πλαισίου. Είναι εμφανής από το διάγραμμα η ταύτιση των κλάδων μετά τα 18mm για τα δοκίμια F1 και F2.

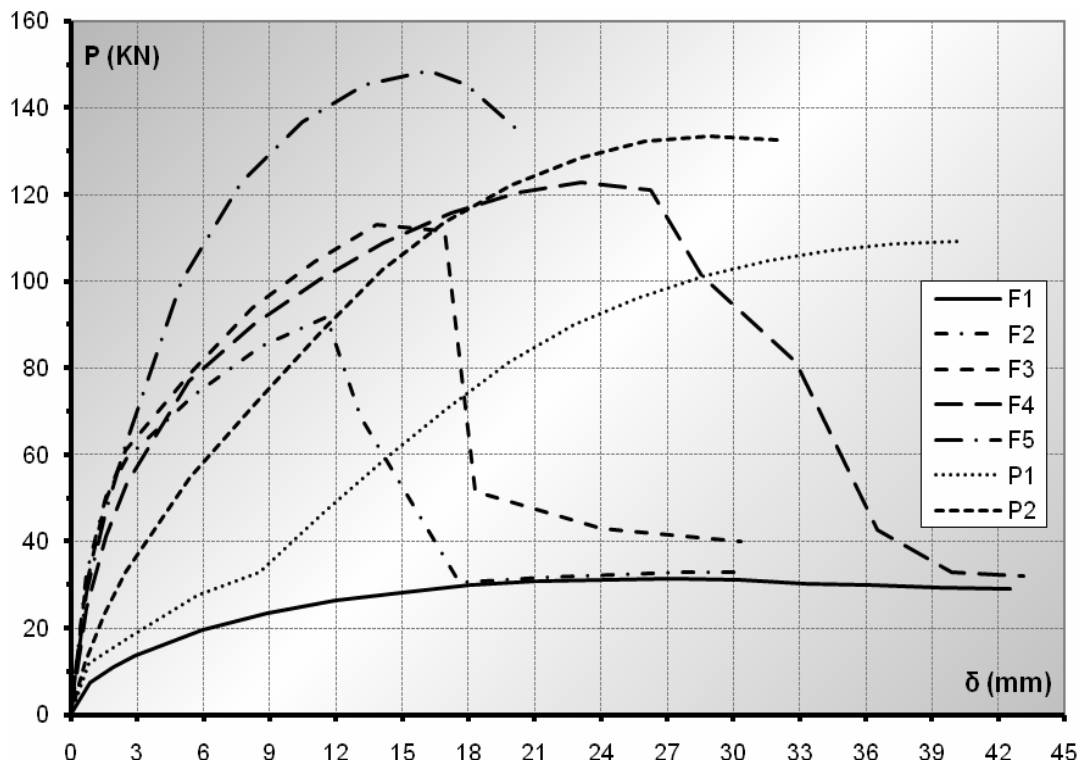
Το επόμενο ενισχυμένο δοκίμιο F3 αυξάνει επιπλέον τη φέρουσα ικανότητα, αποδίδοντας μέγιστη αντοχή αυξημένη περίπου κατά 3,8 και 1,3 φορές από την αντίστοιχη των δοκιμών F1 και F2. Η διαφορά της φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου F3 από το δοκίμιο F2 αμβλύνεται καθώς αυξάνει η επιβαλλόμενη μετακίνηση. Η μέγιστη τιμή της αντοχής του F3 αναπτύσσεται σε μετακίνηση 18mm, λίγο πριν την αστοχία του κατακόρυφου συνδέσμου. Στα επόμενα επίπεδα μετακίνησης είναι εμφανής η απότομη πτώση της αντοχής αλλά και η τάση ταύτισης με τη συμπεριφορά του γυμνού πλαισίου F1.

Το δοκίμιο F4, με ύψος κατακόρυφου συνδέσμου 200mm, είναι εμφανές ότι παρουσίασε μια εξαιρετικά πλαστική συμπεριφορά σε σχέση με τα υπόλοιπα, δεδομένου ότι αφενός αναβάθμισε ακόμη περισσότερο τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου, αφετέρου τη διατήρησε σε υψηλές τιμές ακόμη και σε προχωρημένα επίπεδα μετακίνησης. Η αστοχία του κατακόρυφου συνδέσμου παρατηρήθηκε στα 27mm. Ακολούθως, μετά τον πτωτικό κλάδο, παρατηρείται ταύτιση για μια ακόμη φορά με το γυμνό δοκίμιο F1.

Το δοκίμιο F5, με τον ισχυρότερο κατακόρυφο σύνδεσμο ενίσχυσης, όπως ήταν αναμενόμενο, ανέπτυξε τη μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα σε σχέση με όλα τα προηγούμενα. Παρόλα αυτά, το μεγάλο μήκος του κατακόρυφου συνδέσμου (200mm) δεν προσέφερε την επιθυμητή πλαστιμότητα καθώς η μεταφορά της έντασης στο μέσον της δοκού διαμέσου ενός τόσο ισχυρού συνδέσμου, είχε ως συνέπεια την αστοχία της δοκού με αποτέλεσμα να μην αστοχήσει ο σύνδεσμος.

Το δοκίμιο P1, μέχρι τη μετατόπιση των 9mm παρουσίασε ήπια αύξηση της φέρουσας ικανότητας σε σχέση με το γυμνό δοκίμιο (F1). Από τα 9mm και μετά παρατηρείται αύξηση της κλίσης της καμπύλης με τάση σταθεροποίησης στα 110KN στη μέγιστη μετατόπιση. Όμως, όπως προαναφέρθηκε, η αύξηση αυτή της αντοχής οφείλεται στην παρουσία του πετάσματος χωρίς όμως αυτό να αποδώσει την αναμενόμενη συμπεριφορά μιας και λόγω αστοχίας των κάτω συνδέσεων του πετάσματος με την πλάκα της βάσης του δοκιμίου δεν επιτράπηκε η διατμητική παραμόρφωσή του και κατά συνέπεια η απορρόφηση μεγάλης ποσότητας ενέργειας.

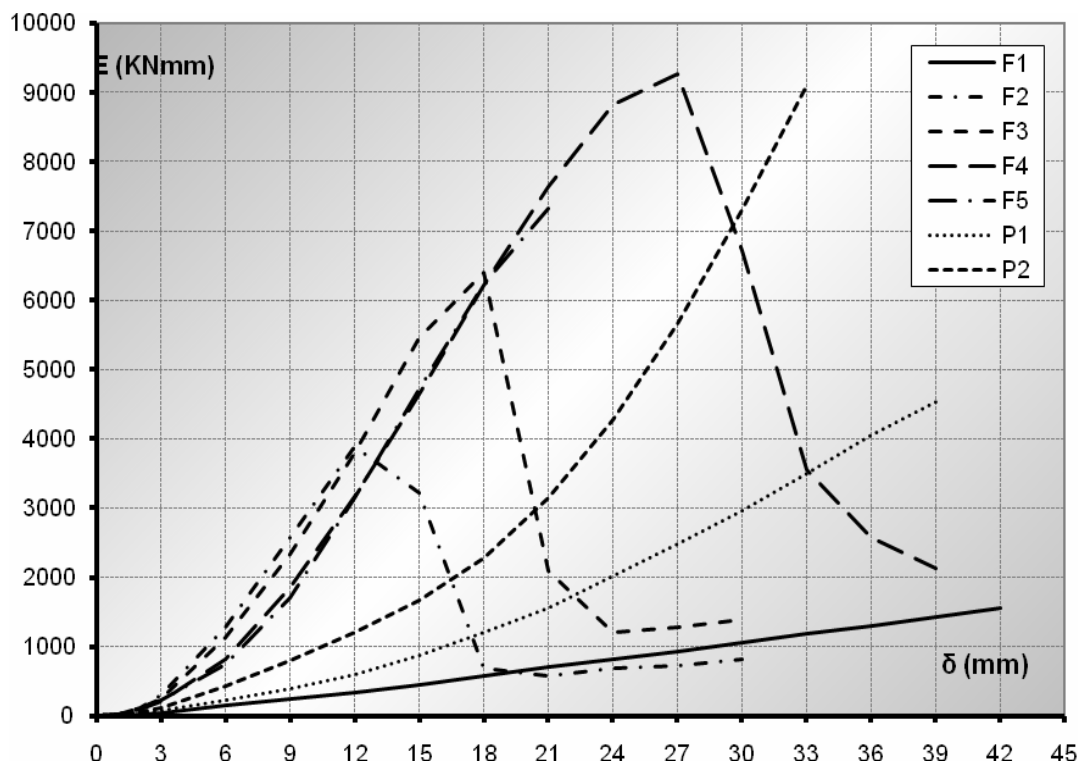
Το δοκίμιο P2, αποτελεί τη βελτιωμένη εκδοχή του δοκιμίου P1 μιας και η ενίσχυση των συνδέσεων απέτρεψε απρόβλεπτες μορφές αστοχίας με τη βλάβη να επικεντρώνεται, όπως είχε σχεδιασθεί, στο πέτασμα αλουμινίου το οποίο μέσω της διατμητικής παραμόρφωσης κατά την ανακύκλιση καθιστά το πλαίσιο δύσκαμπτο αυξάνοντας την αντοχή του. Πράγματι, στη μέγιστη μετατόπιση η αντοχή παρουσίασε αύξηση 16% σε σχέση με το δοκίμιο P1 στην ίδια μετατόπιση, χωρίς μάλιστα να εμφανισθούν οι ανεπιθύμητες μορφές βλάβης που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο δοκίμιο P1. Η αντοχή είναι συγκρίσιμη με τα ενισχυμένα δοκίμια, μάλιστα δεν εμφανίζεται σαφής πτωτικός κλάδος με την αύξηση της μετακίνησης.



Σχ. 5.1 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής.
(Πρώτοι κύκλοι. Δοκίμια χωρίς αξονικό φορτίο).

- Απορροφώμενη ενέργεια

Ανάλογη ως ένα βαθμό συμπεριφορά με τη φέρουσα ικανότητα ακολούθησε και η μεταβολή της απορροφώμενης ενέργειας του συστήματος. Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η απορροφώμενη ενέργεια σε κάθε επίπεδο μετακίνησης, ως άθροισμα των πρώτων και των δευτέρων κύκλων φόρτισης σε κάθε βήμα.



Σχ. 5.2 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής.
(Άθροισμα 1^{ων} & 2^{ων} κύκλων. Δοκίμια χωρίς αξονικό φορτίο).

Από το διάγραμμα φαίνεται η σχεδόν γραμμική αύξηση της ενέργειας για το γυμνό δοκίμιο F1 διατηρώντας πάντως σχετικά χαμηλές τιμές.

Το δοκίμιο F2 λόγω της ενίσχυσης παρουσίασε δραστική αύξηση της ενέργειας με τη μέγιστη τιμή της να εμφανίζεται στη θέση της μέγιστης αντοχής λίγο πριν την αστοχία του κατακόρυφου συνδέσμου.

Η απορρόφηση ενέργειας του δοκιμίου F3 ταυτίζεται με την αντίστοιχη του F2 μέχρι τη μετατόπιση των 12mm, όπου παρατηρήθηκε η αστοχία του κατακόρυφου συνδέσμου για το F2. Στη συνέχεια η άνοδος συνεχίστηκε μέχρι την αστοχία του κατακόρυφου συνδέσμου όπου παρατηρήθηκε η μέγιστη τιμή της.

Το δοκίμιο F4 παρουσίασε καλύτερη συμπεριφορά από τα προηγούμενα, δεδομένου ότι οι πλούσιοι βρόχοι σε συνδυασμό με τη διατήρηση υψηλής αντοχής σε προχωρημένα επίπεδα μετακίνησης, συνετέλεσαν στην απορρόφηση μεγάλης ποσότητας ενέργειας ακόμη και σε μετακινήσεις οι οποίες δεν επιτεύχθηκαν στα προηγούμενα δοκίμια.

Το δοκίμιο F5 όσον αφορά την απορροφώμενη ενέργεια ακολούθησε ουσιαστικά τον κλάδο του δοκιμίου F4 μέχρι τη μετακίνηση των 21mm αποδίδοντας υψηλές τιμές. Στη

συνέχεια πάντως, όπως προαναφέρθηκε, η εκτεταμένη βλάβη της δοκού οδήγησε σε αστοχία του πλαισίου πριν την αστοχία του κατακόρυφου συνδέσμου ενίσχυσης με αποτέλεσμα να διακοπεί πρόωρα η πειραματική δοκιμή.

Η απορρόφηση ενέργειας του δοκιμίου P1 είναι χαμηλή, γεγονός που αποδίδεται στο φτωχό μηχανισμό που αναπτύχθηκε στις συνδέσεις και δεν επέτρεψε την παραμόρφωση στο σώμα του πετάσματος. Η αύξηση σε σχέση με το γυμνό δοκίμιο οφείλεται στην παρουσία του πετάσματος που όμως δεν απέδωσε τα αναμενόμενα. Οι τιμές της απορροφώμενης ενέργειας του δοκιμίου P1 υπολείπονται κατά πολύ των άλλων μορφών ενίσχυσης.

Η διαφοροποίηση του μηχανισμού απορρόφησης ενέργειας που προσέδωσε στο δοκίμιο P2 το πέτασμα μέσω της διαμητικής του παραμόρφωσης, απέδωσε πλούσιους βρόχους με άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της απορροφώμενης ενέργειας. Στη μέγιστη μετατόπιση (33mm), παρατηρείται αύξηση 157% σε σχέση με το δοκίμιο P1. Παρόλο που οι τιμές της απορροφώμενης ενέργειας του δοκιμίου P2 σε προχωρημένα επίπεδα μετακίνησης είναι υψηλή και συγκρίσιμη με την αντίστοιχη των άλλων μορφών ενίσχυσης, σε χαμηλά επίπεδα μετακίνησης υπολείπεται αυτών εμφανώς.

- Ανηγγμένη απορροφώμενη ενέργεια

Η ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια (Σχ. 5.3) του δοκιμίου F1 ακολούθησε πρακτικά την εξέλιξη της απορροφώμενης ενέργειας. Παρατηρείται μια σχετικά απότομη αύξηση μέχρι τη μετακίνηση των 6mm, η οποία συνεχίστηκε μέχρι και τα 21mm με χαμηλότερο ρυθμό, ενώ από τα 21mm και μέχρι το τέλος του πειράματος σταθεροποιείται στη μέγιστη τιμή της.

Το δοκίμιο F2, που αντιστοιχεί στο πρώτο επίπεδο ενίσχυσης, στη θέση της μέγιστης αντοχής παρουσίασε και τη μέγιστη ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια (μετακίνηση 12mm).

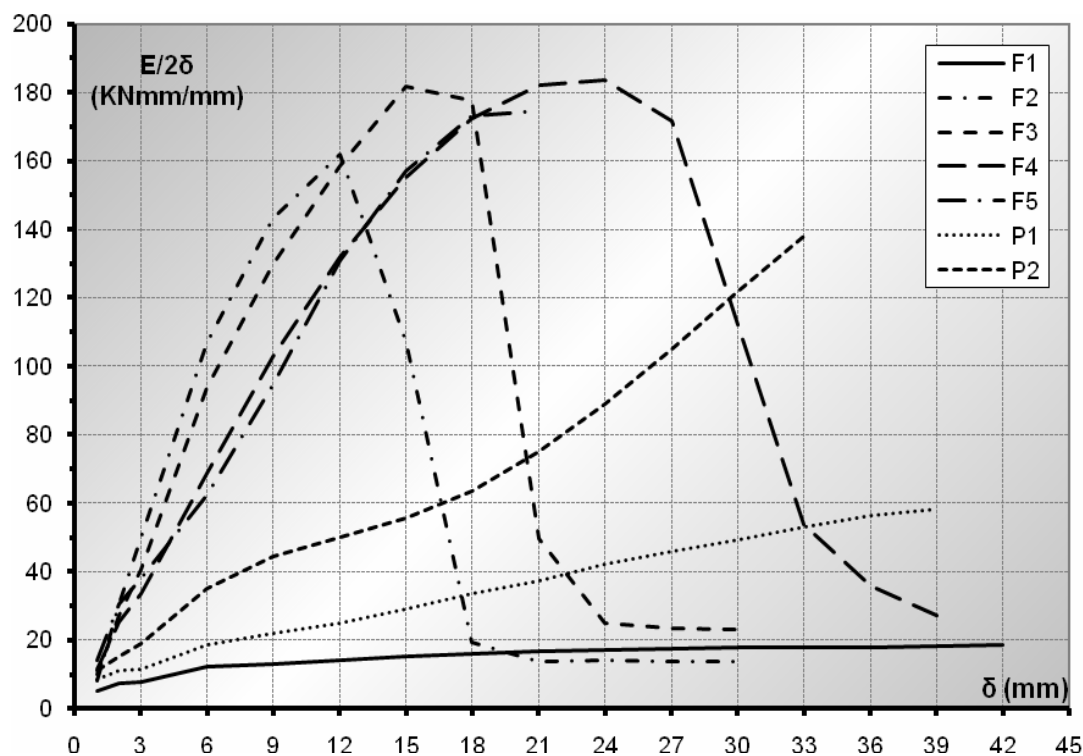
Την ίδια πορεία μέχρι τη συγκεκριμένη μετακίνηση ακολούθησε και το δοκίμιο F3, το οποίο όμως ανέπτυξε τη μέγιστη τιμή της ανηγμένης ενέργειας στη μετακίνηση των 18mm.

Το δοκίμιο F4 παρουσίασε εξαιρετική συμπεριφορά με υψηλές τιμές σε προχωρημένα επίπεδα μετακίνησης. Λόγω της αναγωγής πάντως, η μέγιστη τιμή της ουσιαστικά ταυτίζεται με τη μέγιστη τιμή του δοκιμίου F3, οι τιμές όμως αυτές αναπτύχθηκαν σε διαφορετικά επίπεδα μετακίνησης.

Η αναγωγή της απορροφώμενης ενέργειας σε επίπεδα μετακίνησης, για το δοκίμιο F5, δεν μετέβαλε ουσιαστικά την καμπύλη δεδομένου ότι και πάλι παρατηρείται ταύτιση με την καμπύλη του δοκιμίου F4 μέχρι τη μετακίνηση των 21mm στην οποία αστόχησε το πλαίσιο.

Αναμενόμενη ήταν η απεικόνιση της συμπεριφοράς του δοκιμίου P1 όσον αφορά την αναγωγή της απορροφώμενης ενέργειας. Η κλίση της καμπύλης μειώθηκε αισθητά, εμφανίζοντας τάση σταθεροποίησης στα 60KNmm. Το δοκίμιο διατήρησε πάντως τιμές μεγαλύτερες του γυμνού δοκιμίου F1 δεδομένου ότι, παρά την ανεπιθύμητη λειτουργία του πετάσματος, αυτό προσέδωσε στο σύστημα μια σχετική δυσκαμψία και αντοχή.

Η αναγωγή της απορροφώμενης ενέργειας για το δοκίμιο P2 παρουσίασε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με το δοκίμιο P1. Παρόλο που η ανηγμένη ενέργεια υπολείπεται σαφώς των άλλων μορφών ενίσχυσης, παρουσιάζει το πλεονέκτημα της συνεχούς ανόδου, ακόμη κι όταν τα άλλα δοκίμια αναπτύσσουν πτωτικό κλάδο.



Σχ. 5.3 Ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής.
(Αθροισμα 1^{ων} & 2^{ων} κύκλων. Δοκίμια χωρίς αξονικό φορτίο).

- Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση

Η τιμή της ισοδύναμης ιξώδους απόσβεσης (Σχ. 5.4) του γυμνού δοκιμίου F1, καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής, παρουσίασε μια διακύμανση από 8,5% έως 13% με τάσεις σταθεροποίησης προς το τέλος.

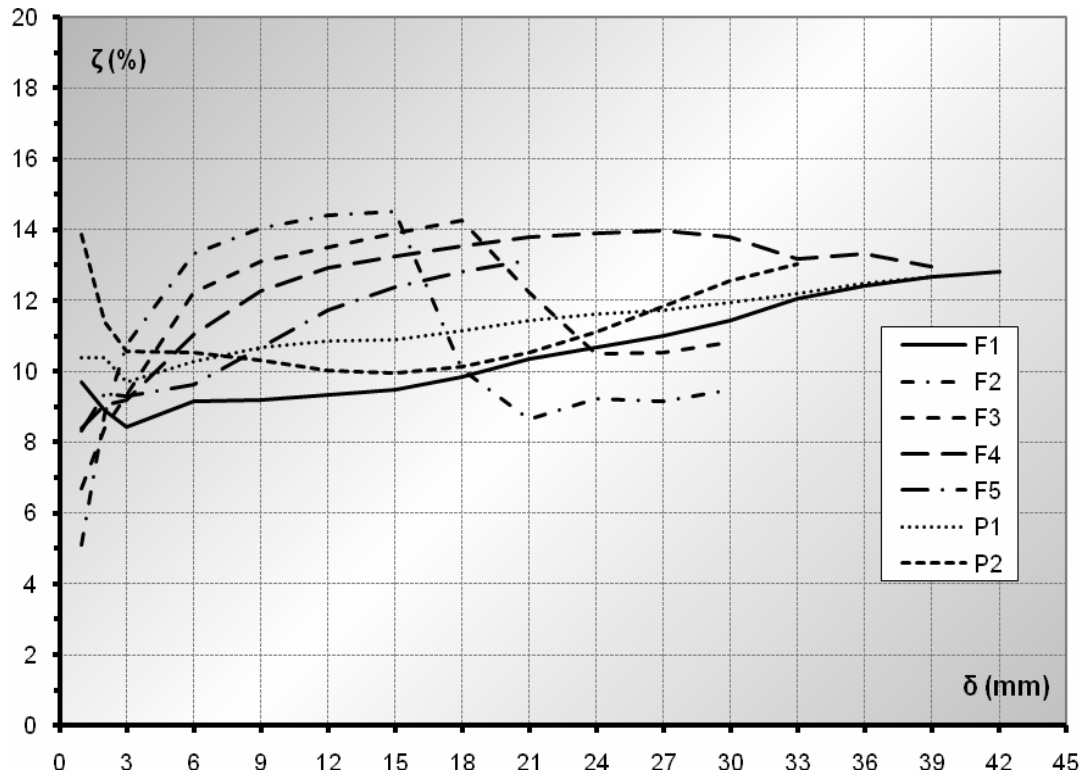
Παρατηρώντας τις καμπύλες όλων των ενισχυμένων δοκιμών με συνδέσμους Λ προκύπτει το συμπέρασμα ότι παρουσιάζουν εμφανή τάση προσέγγισης της ιδανικής πλαστικής συμπεριφοράς με τιμή $\zeta = \frac{1}{2\pi} = 15,92\%$. Τα δοκίμια F2 και F3 εμφανίζουν απότομη αύξηση από τη μετατόπιση μόλις των 6mm, ενώ μέχρι τη μετατόπιση των 15mm διατηρούν τιμές περίπου στο 14%. Η τιμή αυτή παρουσιάζει πτώση μετά την αστοχία του συνδέσμου με τάσεις προσέγγισης του κλάδου του γυμνού δοκιμίου.

Το δοκίμιο F4, από τη μετακίνηση των 6mm και μετά, παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά, με τιμές της ισοδύναμης ιξώδους απόσβεσης να κυμαίνονται από 11% μέχρι 14%, τιμή η οποία διατηρείται ακόμη και σε μεγάλες μετακινήσεις. Το δοκίμιο, το οποίο μέχρι τα 30mm δεν παρουσιάζει πτωτικό κλάδο, τείνει στη συνέχεια να ταυτιστεί με το γυμνό δοκίμιο F1.

Το δοκίμιο F5, με την αύξηση της μετατόπισης, παρουσιάζει εμφανή τάση ανόδου σε τιμές περίπου 14%. Η πρόωρη αστοχία της δοκού δεν επιτρέπει πάντως την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για μετακίνηση πέραν των 21mm.

Χαμηλές τιμές παρατηρήθηκαν για το δοκίμιο P1 οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ (10 - 12)%. Η τιμή δείχνει να εγγίζει το 13% σε υψηλά επίπεδα μετατόπισης.

Το δοκίμιο P2 απέδωσε επίσης χαμηλές τιμές ιξώδους απόσβεσης, αντίστοιχες με αυτές του P1. Και τα δύο πάντως δοκίμια με το πέτασμα αλουμινίου παρουσίασαν τιμές κοντά στο γυμνό δοκίμιο F1, αρκετά χαμηλότερες από τις τιμές των ενισχυμένων δοκιμών με σύνδεσμο Λ, για το διάστημα των μετατοπίσεων που διατηρούσαν το σύνδεσμο ενίσχυσης ενεργό.



Σχ. 5.4 Ισοδύναμη ιξώδους απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής.
(Μέση τιμή 1^{ων} & 2^{ων} κύκλων. Δοκίμια χωρίς αξονικό φορτίο).

Παρατηρείται πάντως ότι στην περιοχή των τιμών των κρίσιμων σχετικών μετατοπίσεων, 10 - 20‰, έναντι τιμών 9,2 - 9,8% για το γυμνό πλαίσιο, η τιμή της ισοδύναμης ιξώδους απόσβεσης για τα δοκίμια F2 και F3, αυξάνεται σε 13,0 - 14,5%, για το δοκίμιο F4 σε 12,2 - 13,5%, ενώ για το δοκίμιο F5 σε 10,7 - 12,8%, ενώ για τα P1 και P2 σε 10,2 - 11,1%. Είναι προφανές ότι η τιμή της ισοδύναμης ιξώδους απόσβεσης μεγιστοποιείται όταν η βλάβη επικεντρώνεται στο μεταλλικό σύνδεσμο.

Η συμπεριφορά των δοκιμών (P1 και P2) τα οποία φέρουν ενίσχυση πετάσματος αλουμινίου παρουσίασαν απόκλιση από τα υπόλοιπα ενισχυμένα, αποδίδοντας σχετικά χαμηλές τιμές 10 - 12%, χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις.

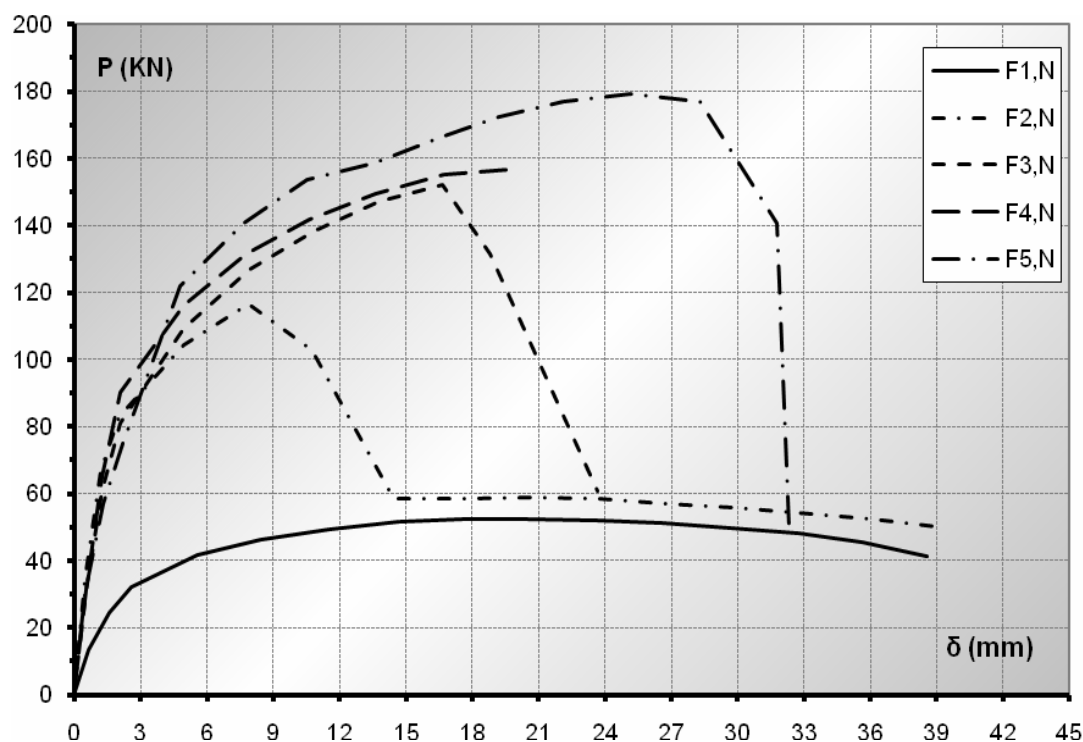
5.1.2 Δοκίμια με αξονικό φορτίο στους στύλους

- Φέρουσα ικανότητα συστήματος

Η προσθήκη αξονικού φορτίου στους στύλους συνετέλεσε στην αύξηση τόσο της φέρουσας ικανότητας, αλλά και κατ' επέκταση των άλλων υπό εξέταση παραμέτρων σε όλα τα δοκίμια. Ήδη για το γυμνό δοκίμιο F1,N η φέρουσα ικανότητα έφτασε τα 52kN παρουσιάζοντας παρόμοια συμπεριφορά με το αντίστοιχο χωρίς αξονικό όσον αφορά την καμπύλη των περιβαλλουσών των βρόχων (Σχ. 5.5).

Το δοκίμιο F2,N μέσω του κατακόρυφου συνδέσμου αύξησε κατά 2,3 φορές τη μέγιστη αντοχή σε σχέση με το αντίστοιχο γυμνό F1,N. Μετά την αστοχία του κατακόρυφου συνδέσμου, η μεταβολή της φέρουσας ικανότητας ακολούθησε την αντίστοιχη του γυμνού πλαισίου.

Εμφανώς βελτιωμένο το δοκίμιο F3,N αύξησε τη μέγιστη αντοχή κατά 20% σε σχέση με το F2,N προσδίδοντας γωνιακή παραμόρφωση 18‰. Μετά την αστοχία του συνδέσμου το δοκίμιο ακολουθεί την τυπική καμπύλη του γυμνού πλαισίου.



Σχ. 5.5 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής.
(Πρώτοι κύκλοι. Δοκίμια με αξονικό φορτίο).

Το δοκίμιο F4,N αναπτύσσει πλάστιμη συμπεριφορά σε σχέση με τα προηγούμενα καθώς η μέγιστη αντοχή αναπτύσσεται σε μεγαλύτερες μετακινήσεις, αποδίδοντας συγχρόνως εξαιρετική αντοχή. Παρόλα αυτά, λόγω της έντονης ρηγματώσης της δοκού και την αστοχία του δοκιμίου, η πλάστιμη αυτή συμπεριφορά διακόπτεται πρόωρα.

Τέλος, το δοκίμιο F5,N παρουσίασε εξαιρετική συμπεριφορά αναπτύσσοντας τη μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα από οποιοδήποτε άλλο δοκίμιο, ενώ ταυτόχρονα

συμπεριφέρθηκε πλάστιμα διατηρώντας την αντοχή σε πολύ υψηλά επίπεδα για πολλά επίπεδα μετακίνησης. Η συμπεριφορά αυτή διακόπηκε στα 30mm περίπου με την αστοχία του κατακόρυφου συνδέσμου.

- Απορροφώμενη ενέργεια

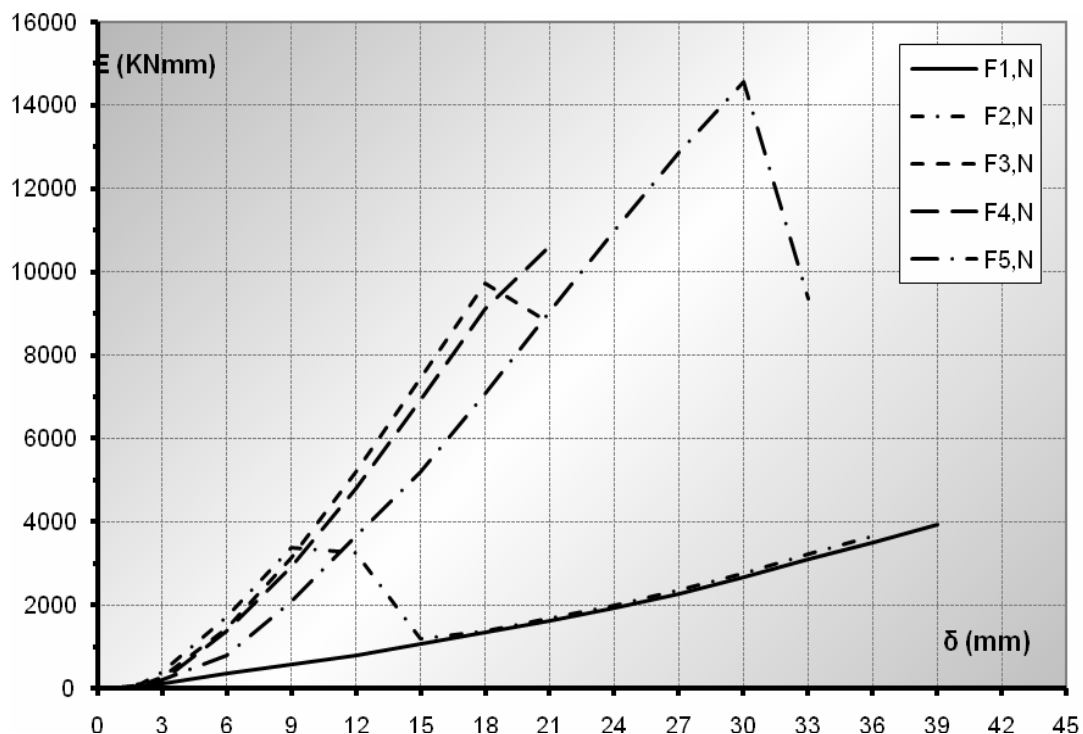
Η συμπεριφορά του γυμνού δοκιμίου F1,N όσον αφορά την απορροφώμενη ενέργεια (Σχ. 5.6) ήταν αισθητά βελτιωμένη έναντι του F1, απορροφώντας 2,7 φορές περισσότερη ενέργεια στη μετατόπιση των 39mm με συνεχώς αυξανόμενη τάση.

Το πρώτο ενισχυμένο δοκίμιο F2,N απορρόφησε ικανοποιητική ενέργεια αυξάνοντάς την κατά 4,5 φορές στη μετακίνηση των 12mm σε σχέση με το F1,N. Στο επόμενο βήμα ο κατακόρυφος σύνδεσμος είχε ήδη αστοχήσει, ενώ η καμπύλη από τη μετατόπιση των 15mm και μετά ταυτίζεται απόλυτα με το αντίστοιχο τμήμα του γυμνού δοκιμίου F1,N.

Το δοκίμιο F3,N παρουσιάζει περαιτέρω αύξηση μέχρι τη μετατόπιση των 18mm που αστόχησε ο σύνδεσμος. Κατόπιν παρουσιάζει πτωτικό κλάδο με τάση ταύτισης με τον αντίστοιχο κλάδο του δοκιμίου F1,N.

Το δοκίμιο F4,N αυξάνει την απορροφώμενη ενέργεια μέχρι τη μετακίνηση των 21mm, όπου αστοχεί ο σύνδεσμος για το δοκίμιο F4,N

Το δοκίμιο F5,N, αποδίδοντας εξαιρετικά πλούσιους βρόχους, απορροφά όπως είναι αναμενόμενο τη μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας από οποιοδήποτε δοκίμιο και μάλιστα σε προχωρημένο επίπεδο μετακίνησης (30mm).



Σχ. 5.6 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής.
(Άθροισμα 1^{ωv} & 2^{ωv} κύκλων. Δοκίμια με αξονικό φορτίο).

- Ανηγγμένη απορροφώμενη ενέργεια

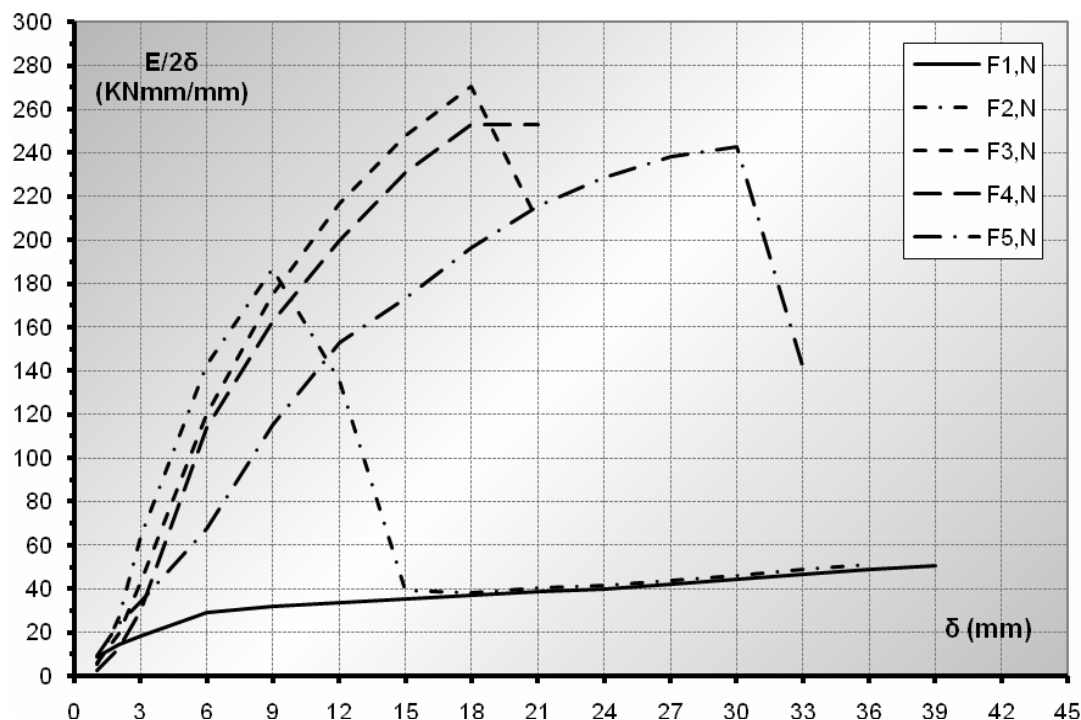
Αναμενόμενη ήταν η εξέλιξη της ανηγμένης ενέργειας (Σχ. 5.7), οι μέγιστες τιμές της οποίας αντιστοιχούν σε μετατόπιση λίγο πριν την αστοχία του συνδέσμου ή της δοκού.

Το δοκίμιο F1,N παρουσιάζει μια ομαλή αυξητική τάση συναρτήσει της μετακίνησης.

Το δοκίμιο F2,N παρουσιάζει πολλαπλάσια ανηγμένη ενέργεια έναντι του F1,N, συγκρίσιμη και λίγο μεγαλύτερη των επόμενων δοκιμών λόγω της αστοχίας του συνδέσμου σε χαμηλά επίπεδα μετακίνησης.

Τα δοκίμια F3,N και F4,N απορρόφησαν σημαντική ενέργεια για το επίπεδο της συγκεκριμένης μετακίνησης.

Το δοκίμιο F5,N παρουσίασε ικανοποιητική συμπεριφορά, παρόλα αυτά υστερεί των δοκιμών F3,N και F4,N σε μικρές μετακινήσεις. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι παρόλο που το F5,N απορρόφησε μεγάλη ποσότητα ενέργειας (Σχ. 5.6), την ενέργεια αυτή την απορρόφησε σε προχωρημένη μετακίνηση (30mm). Η αναγωγή επομένως των τιμών της ενέργειας στο επίπεδο μετακίνησης (Σχ. 5.7) αντιστοιχεί σε μικρότερες τιμές.



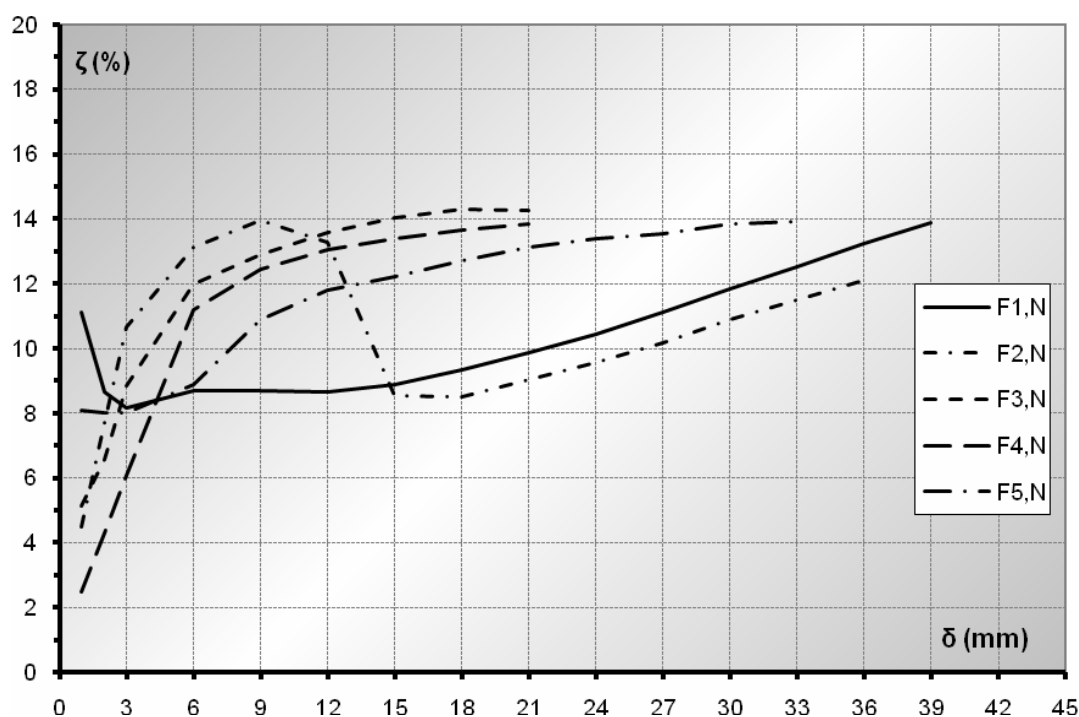
Σχ. 5.7 Ανηγγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής.
(Αθροισμα 1^{ων} & 2^{ων} κύκλων. Δοκίμια με αξονικό φορτίο).

- Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση

Η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση (Σχ. 5.8) του γυμνού δοκιμίου (F1,N) παρουσιάζει πτώση στα τρία πρώτα επίπεδα μετακίνησης. Στη συνέχεια ακολουθεί μια τάση σταθεροποίησης μέχρι τη μετακίνηση των 15mm και στη συνέχεια συνεχόμενη αύξηση μέχρι την τελική τιμή (14%) στη μετατόπιση των 39mm.

Όλα τα ενισχυμένα δοκίμια τείνουν προς την τιμή 14%, με ορισμένα να την ξεπερνούν και να πλησιάζουν ακόμη περισσότερο την ιδανική πλαστική συμπεριφορά με τιμή $\zeta = \frac{1}{2\pi} = 15,92\%$. Παρατηρείται ότι φθίνοντα κλάδο μετά την αστοχία του συνδέσμου παρουσιάζει μόνον το δοκίμιο F2,N. Αντίθετα τα δοκίμια F3,N, F4,N και F5,N, παρά την αστοχία του συνδέσμου και τον πτωτικό κλάδο τόσο της φέρουσας ικανότητας όσο και της απορροφώμενης ενέργειας, δεν παρουσίασαν πτωτικό κλάδο στην ισοδύναμη ιξώδη απόσβεση.

Παρατηρείται και πάλι ότι η τιμή της ισοδύναμης ιξώδους απόσβεσης μεγιστοποιείται όταν η βλάβη επικεντρώνεται στο μεταλλικό σύνδεσμο. Στην περιοχή των τιμών των κρίσιμων σχετικών μετατοπίσεων, 10 - 20%, έναντι τιμών 8,7 - 9,3% για το γυμνό πλαίσιο, η τιμή της ισοδύναμης ιξώδους απόσβεσης για τα δοκίμια F2,N, F3,N αυξάνεται σε 12,7 - 14,1%, για το δοκίμιο F4,N σε 12,5 - 13,7%, ενώ για το δοκίμιο F5,N σε 10,9 - 12,7%, τιμές που πρακτικά είναι ίσες με τις αντίστοιχες των δοκιμών χωρίς αξονικό.



Σχ. 5.8 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής.
(Μέση τιμή $1^{\omega\omega}$ & $2^{\omega\omega}$ κύκλων. Δοκίμια με αξονικό φορτίο).

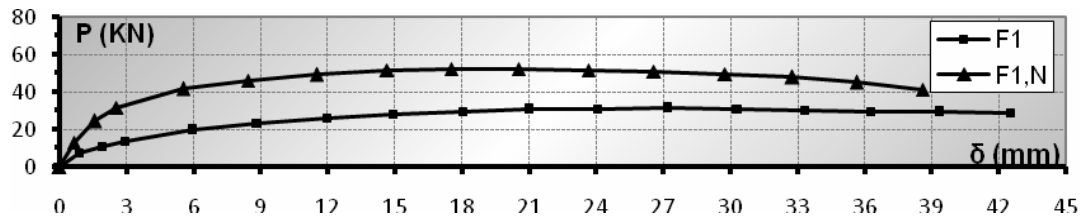
5.2 Ύπαρξη αξονικού φορτίου στους στύλους

5.2.1 Φέρουσα ικανότητα

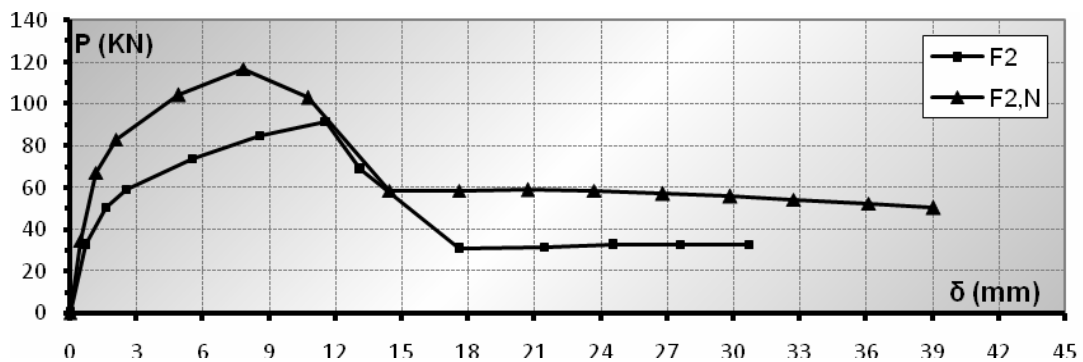
Στα διαγράμματα που ακολουθούν (Σχ. 5.9 - 5.13) απεικονίζονται συγκριτικά οι περιβάλλουσες των βρόχων καθενός δοκιμίου χωρίς αξονική και του αντίστοιχου με αξονική για τους πρώτους κύκλους φόρτισης. Σημειώνεται ότι τα διαγράμματα της φέρουσας ικανότητας, όπως εξ άλλου και τα διαγράμματα της ενέργειας που ακολουθούν, διαθέτουν κοινή κλίμακα αξόνων προς διευκόλυνση της οπτικής σύγκρισης μεταξύ τους.

Όπως εύκολα διακρίνεται, η ύπαρξη αξονικού φορτίου στους στύλους αυξάνει αισθητά τη φέρουσα ικανότητα των δοκιμών. Ακόμη και από τους πρώτους κύκλους φόρτισης η θλιπτική αξονική δύναμη των στύλων προσφέρει δυσκαμψία και φέρουσα ικανότητα. Η αύξηση της μέγιστης αντοχής δεν διαφέρει σημαντικά μεταξύ των δοκιμών, ανεξαρτήτως επιπέδου ενίσχυσης.

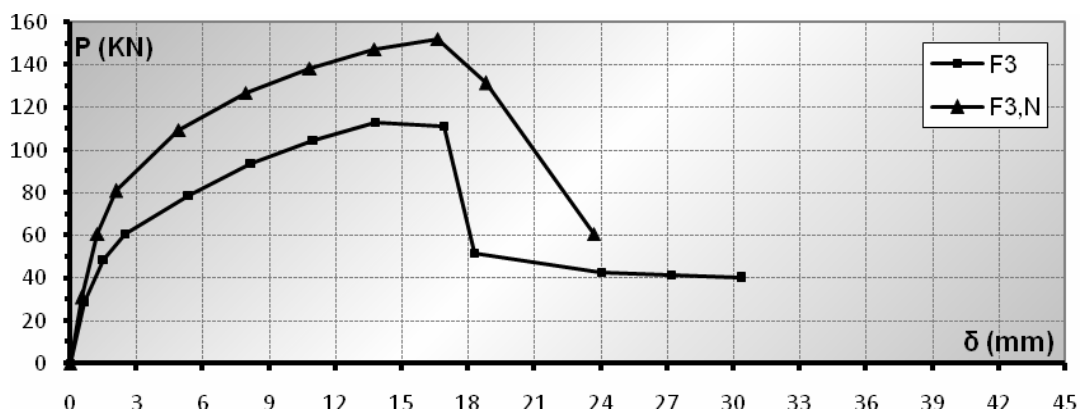
Έτσι, ενώ σε όλα τα δοκίμια η ύπαρξη αξονικού φορτίου επέφερε αύξηση της μέγιστης αντοχής κατά 20 – 40kN, τα δοκίμια F3D και F4D παρουσίασαν πιο ήπια αύξηση, τα τάξεως των 10kN.



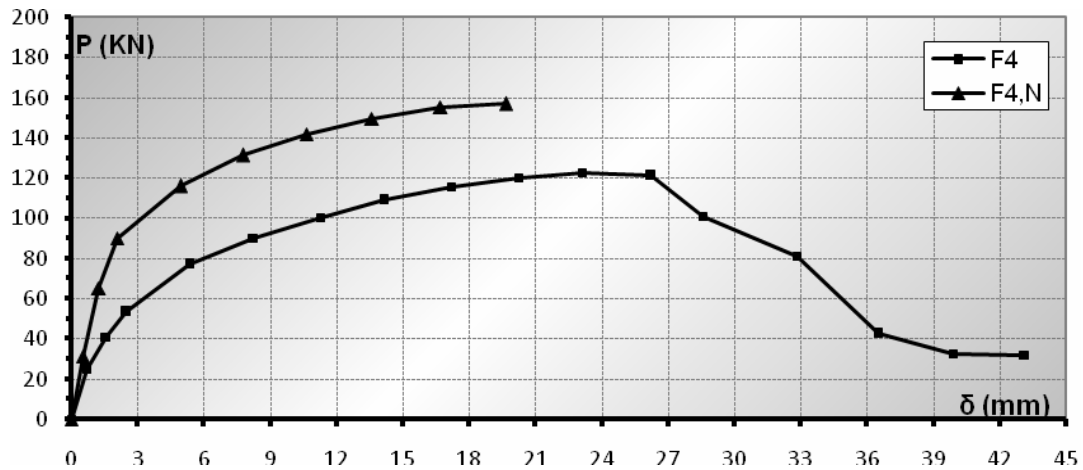
Σχ. 5.9 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής.
(Πρώτοι κύκλοι. Δοκίμια F1 - F1,N).



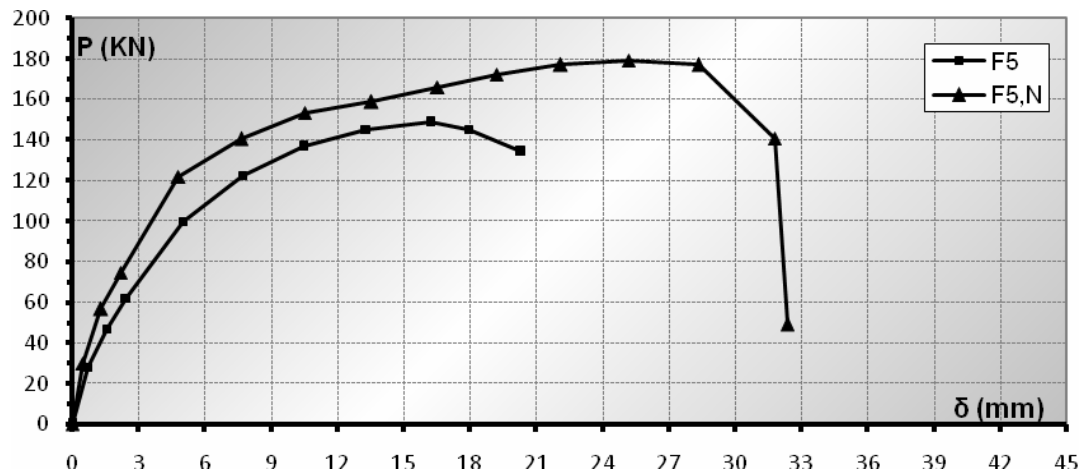
Σχ. 5.10 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής.
(Πρώτοι κύκλοι. Δοκίμια F2 - F2,N).



Σχ. 5.11 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής.
(Πρώτοι κύκλοι. Δοκίμια F3 - F3,N).



Σχ. 5.12 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής.
(Πρώτοι κύκλοι. Δοκίμια F4 - F4,N).



Σχ. 5.13 Περιβάλλουσα βρόχων - Μετατόπιση κεφαλής.
(Πρώτοι κύκλοι. Δοκίμια F5 - F5,N).

Στην πρώτη δυάδα δοκιμίων, τα δοκίμια αναφοράς F1 - F1,N, παρατηρείται αύξηση της φέρουσας ικανότητας με αύξοντα ρυθμό στους πρώτους κύκλους φόρτισης. Η διαφορά δείχνει να σταθεροποιείται μετά τα 3mm στα 20kN (αύξηση 67%) και να διατηρείται σταθερή για πολλά επίπεδα μετακίνησης, ενώ μετά τα 21mm η διαφορά μειώνεται ελαφρά λόγω του φθίνοντα κλάδου του F1,N.

Στα δοκίμια F2 – F2,N η μέγιστη αύξηση παρατηρείται σε μετακίνηση περίπου 9mm λίγο πριν την έναρξη της αστοχίας του κατακόρυφου συνδέσμου, με τη διαφορά να κυμαίνεται στα 25kN η οποία αντιστοιχεί σε αύξηση 28%. Ο φθίνοντας κλάδος δείχνει πλήρη ταύτιση στα δύο δοκίμια, ενώ όταν το φορτίο σταθεροποιείται από τα 18mm και μετά, διατηρείται μια διαφορά 30kN.

Στα δοκίμια F3 – F3,N η αύξηση της φέρουσας ικανότητας φθάνει τα 40kN (αύξηση 36%), η οποία και πάλι αναπτύχθηκε λίγο πριν την αστοχία του συνδέσμου. Στη συνέχεια δείχνει να διατηρείται η διαφορά που παρατηρήθηκε στα δοκίμια αναφοράς F1 – F1,N (20kN).

Στα δοκίμια F4 – F4,N η διαφορά της φέρουσας ικανότητας δείχνει να σταθεροποιείται από τη μετακίνηση των 3mm και να διατηρείται μέχρι την αστοχία της δοκού του δοκιμίου F4,N. Η διαφορά των μεγίστων τιμών αντοχών είναι περίπου 40kN και αντιστοιχεί σε ποσοστό αύξησης 33%.

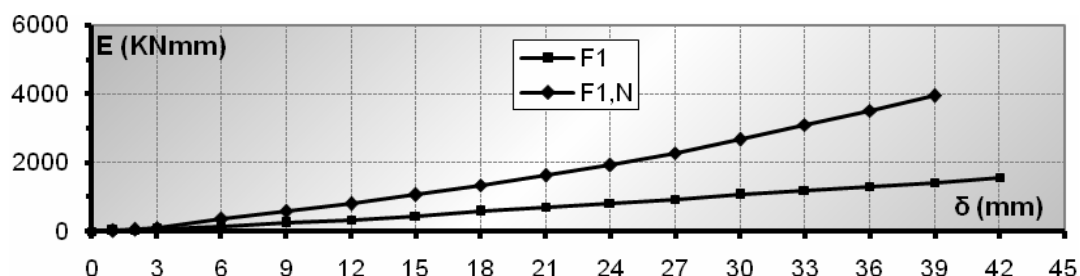
Τέλος τα δοκίμια F5 – F5,N, όσον αφορά τις μέγιστες τιμές των αντοχών, παρουσιάζουν αύξηση υπό την επίδραση του αξονικού φορτίου κατά 30kN, ποσοστό 20%. Επισημαίνεται ότι λόγω της πρώιμης αστοχίας της δοκού του δοκιμίου F5 η εμφάνιση των μεγίστων τιμών αντοχής δεν συμπίπτουν στο ίδιο επίπεδο μετακίνησης.

Κατά τα φαινόμενα, οι παρατηρούμενες σχεδόν σταθερές διαφορές σε όλα τα δοκίμια, οφείλονται στη σταθερή αύξηση της φέρουσας ικανότητας των στύλων λόγω του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου, ενώ δεν παίζει ρόλο στις διαφορές αυτές το είδος του συνδέσμου.

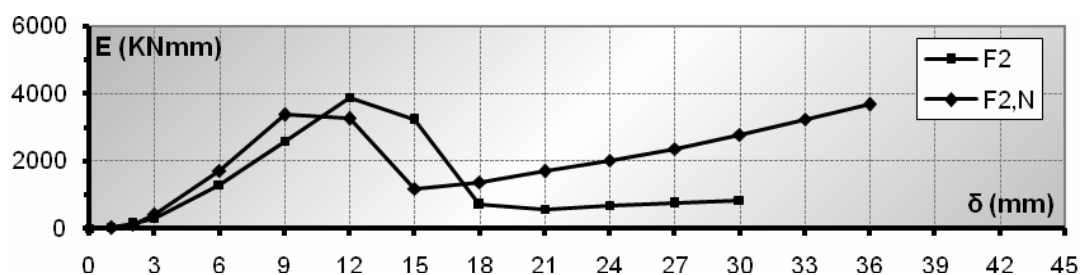
5.2.2 Απορροφώμενη ενέργεια

Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα που ακολουθούν (Σχ. 5.14 - 5.18), η ύπαρξη αξονικού φορτίου στους στύλους συνετέλεσε στην αύξηση και της απορροφώμενης ενέργειας. Η αύξηση της φέρουσας ικανότητας η οποία περιγράφηκε παραπάνω δημιούργησε πιο πλούσιους βρόχους με άμεσο επακόλουθο την αύξηση και της απορροφώμενης ενέργειας.

Στο δοκίμιο αναφοράς παρατηρείται αύξηση της απορροφώμενης ποσότητας ενέργειας από τους πρώτους κύκλους φόρτισης, η οποία διατηρεί αυξόντα ρυθμό μέχρι το τέλος της πειραματικής δοκιμής.

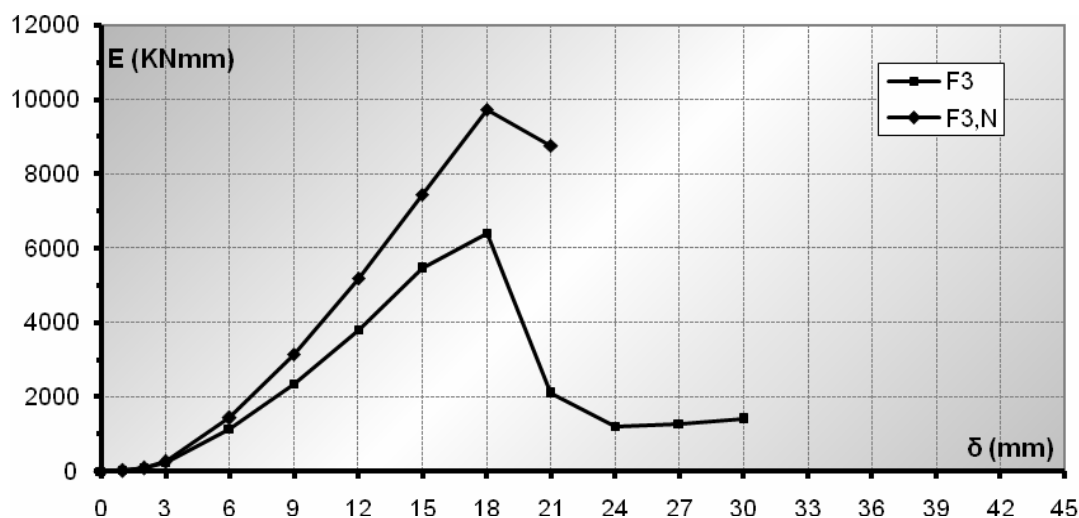


Σχ. 5.14 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής.
(Αθροισμα 1^{ων} & 2^{ων} κύκλων. Δοκίμια F1 - F1,N).

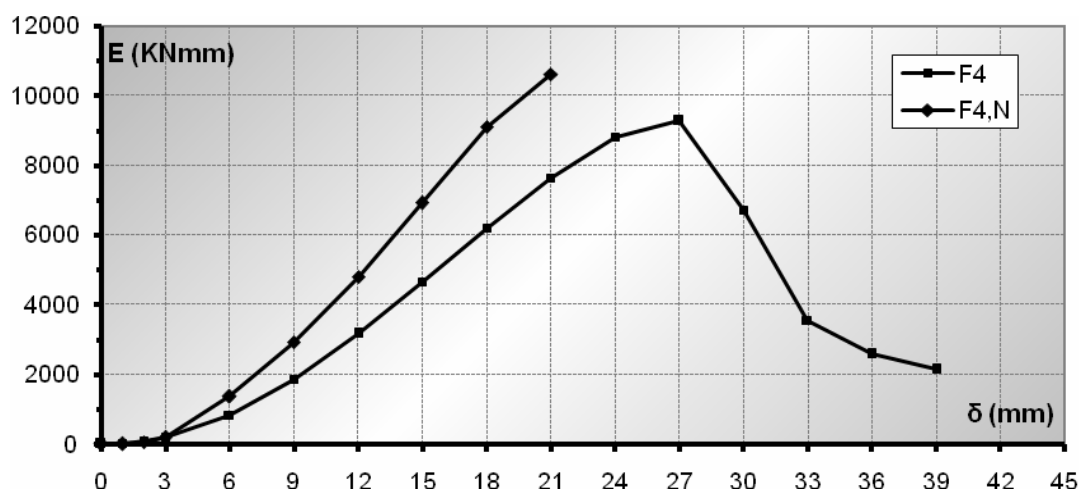


Σχ. 5.15 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής.
(Αθροισμα 1^{ων} & 2^{ων} κύκλων. Δοκίμια F2 - F2,N).

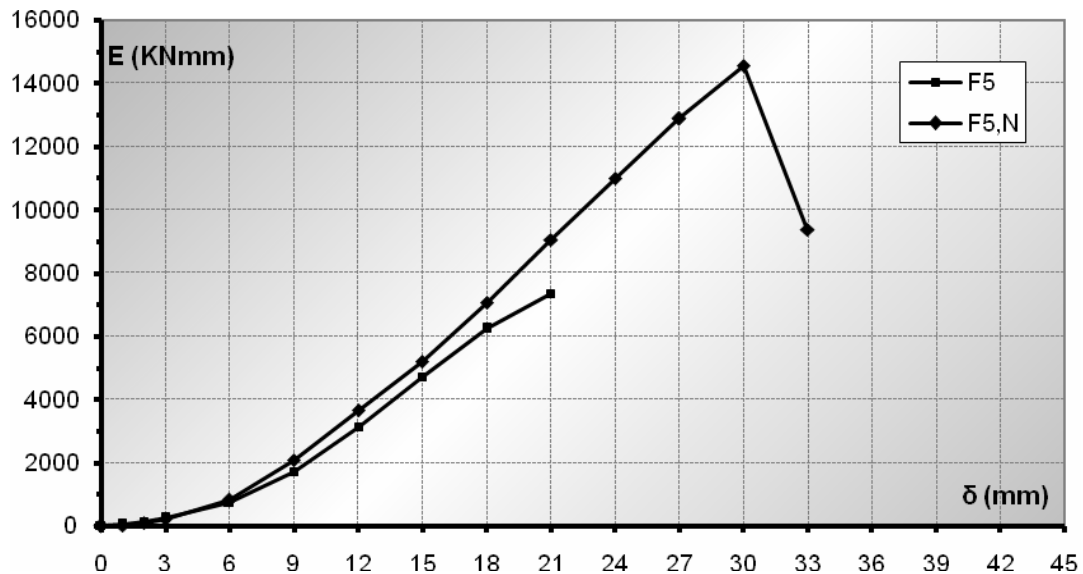
Τα δοκίμια παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά, με την αύξηση λόγω του αξονικού φορτίου να είναι ορατή από τους πρώτους κύκλους φόρτισης και να ακολουθεί σταθερά αυξοντα ρυθμό. Η μέγιστη τιμή όσον αφορά τα ενισχυμένα δοκίμια αναπτύσσεται λίγο πριν την αστοχία (είτε της δοκού είτε του συνδέσμου), ενώ ακόμη και μετά την αστοχία φαίνεται να διατηρείται αυτή η διαφορά σταθερή. Χαρακτηριστικά, τα δοκίμια F2 - F2,N μετά την αστοχία του κατακόρυφου συνδέσμου, από τη μετακίνηση των 18mm και μετά, παρουσιάζουν σχεδόν απόλυτη ταύτιση με τα δοκίμια αναφοράς F1 - F1,N στα ίδια επίπεδα μετακίνησης. Την ίδια τάση φαίνεται να έχουν και οι δυάδες F3 – F3,N και F4 – F4,N παρόλο που δεν είναι απόλυτα καθαρή. Στη δυάδα F5 – F5,N η αύξηση δεν είναι τόσο αισθητή, κατά τα φαινόμενα λόγω της πρώιμης αστοχίας της δοκού.



Σχ. 5.16 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής.
(Αθροισμα $1^{\omega v}$ & $2^{\omega v}$ κύκλων. Δοκίμια F3 - F3,N).



Σχ. 5.17 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής.
(Αθροισμα $1^{\omega v}$ & $2^{\omega v}$ κύκλων. Δοκίμια F4 - F4,N).

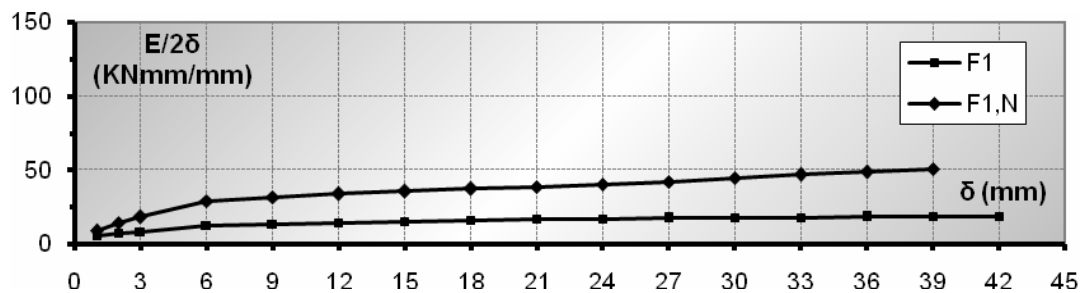


Σχ. 5.18 Απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής.
(Αθροισμα 1^{ων} & 2^{ων} κύκλων. Δοκίμια F5 - F5,N).

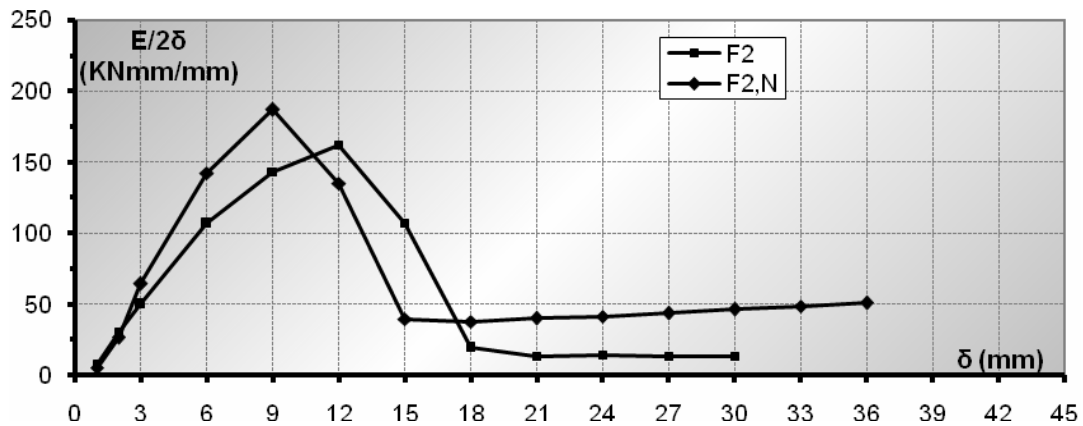
5.2.3 Ανηγγμένη απορροφώμενη ενέργεια

Η ανηγμένη απορροφώμενη ενέργεια απεικονίζεται στα γραφήματα που ακολουθούν (Σχ. 5.19 - 5.23). Όπως φαίνεται, η μορφή των καμπυλών είναι παρόμοια με τη μορφή της απορροφώμενης ενέργειας.

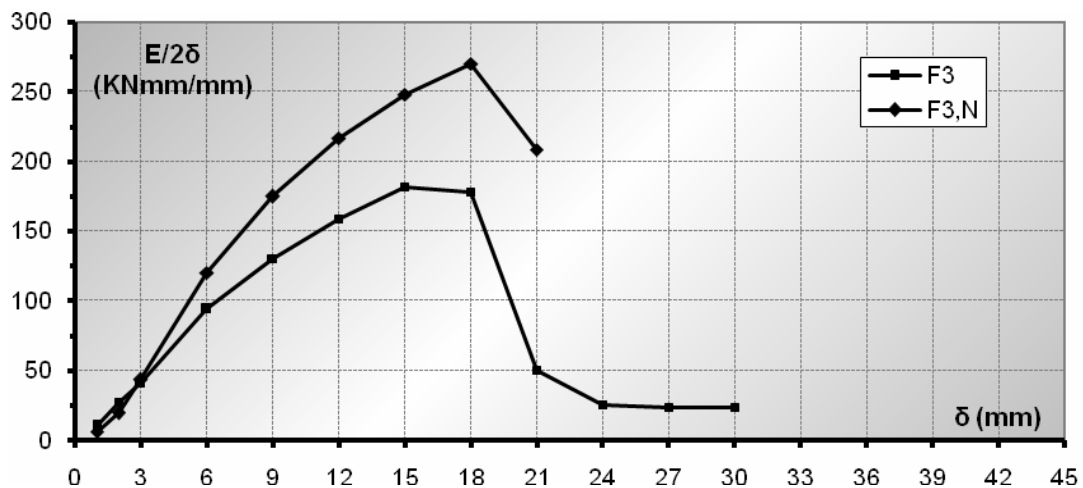
Και πάλι παρατηρείται αύξηση στην πλειοψηφία των δοκιμών μέχρι το σημείο έναρξης της αστοχίας. Ακολουθεί ο φθίνοντας κλάδος, μετά τον οποίο γενικά παρατηρείται τάση επανόδου των ενισχυμένων δοκιμών προς τις μορφές των καμπυλών των αντίστοιχων δοκιμών αναφοράς.



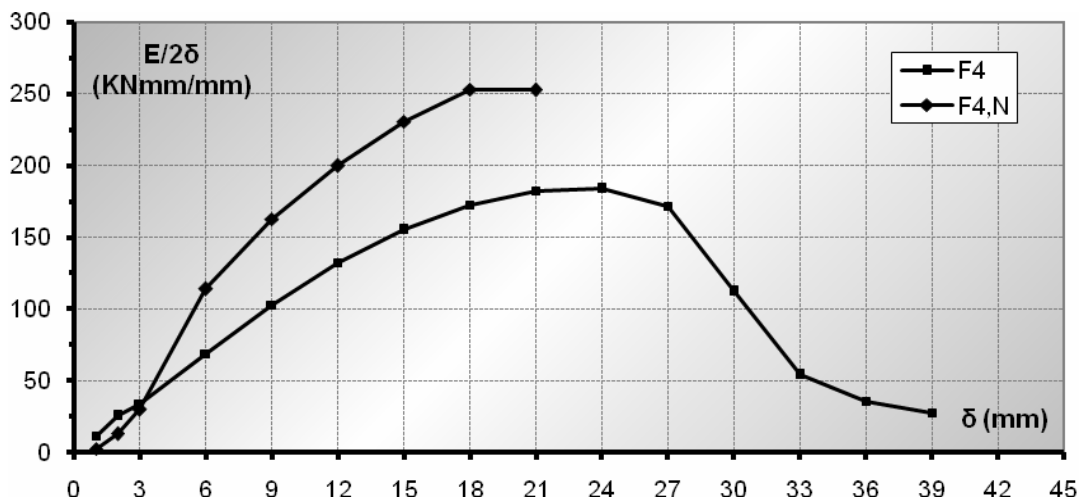
Σχ. 5.19 Ανηγγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής.
(Αθροισμα 1^{ων} & 2^{ων} κύκλων. Δοκίμια F1 - F1,N).



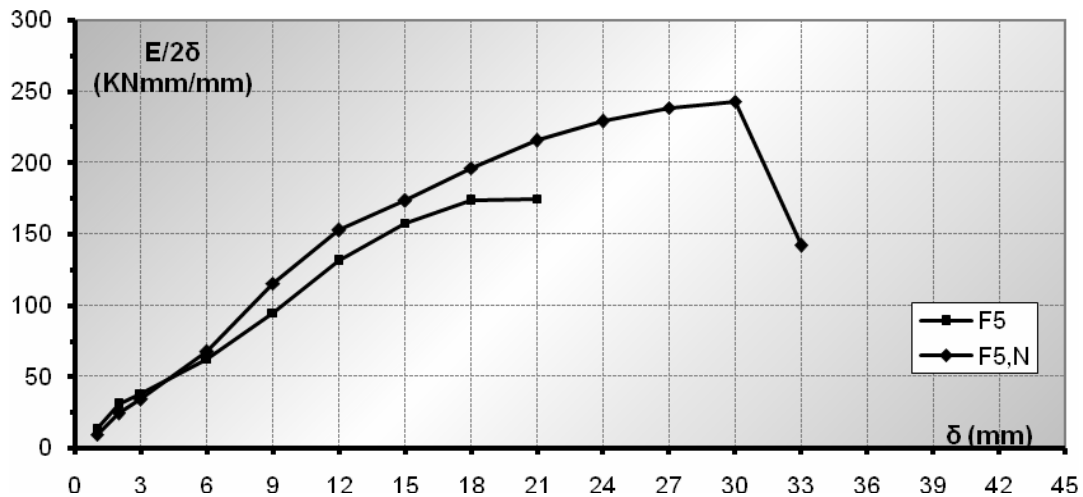
Σχ. 5.20 Ανηγγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής.
(Αθροισμα $1^{\omega v}$ & $2^{\omega v}$ κύκλων. Δοκίμια F2 - F2,N).



Σχ. 5.21 Ανηγγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής.
(Αθροισμα $1^{\omega v}$ & $2^{\omega v}$ κύκλων. Δοκίμια F3 - F3,N).



Σχ. 5.22 Ανηγγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής.
(Αθροισμα $1^{\omega v}$ & $2^{\omega v}$ κύκλων. Δοκίμια F4 - F4,N).

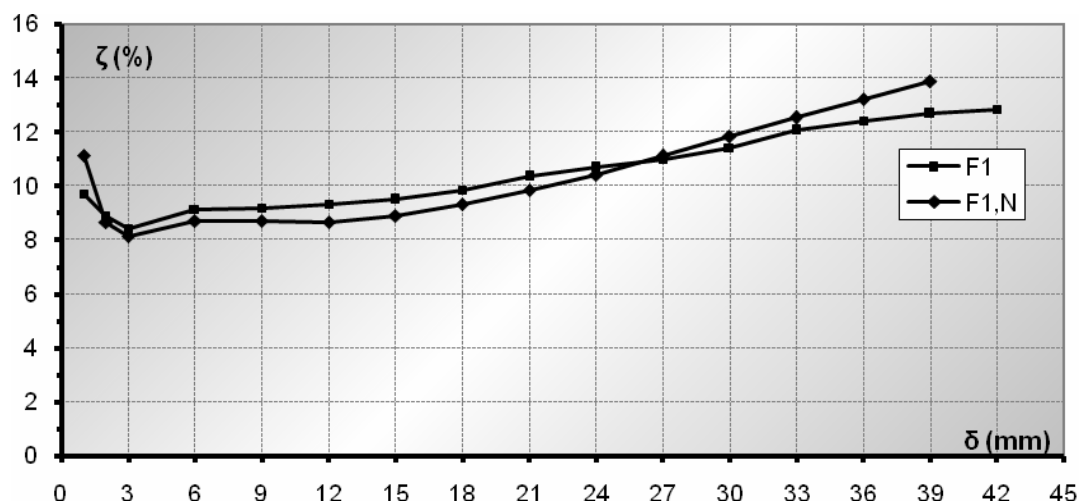


Σχ. 5.23 Ανηγγμένη απορροφώμενη ενέργεια - Μετατόπιση κεφαλής.
(Αθροισμα $1^{\omega\nu}$ & $2^{\omega\nu}$ κύκλων. Δοκίμια F5 - F5,N).

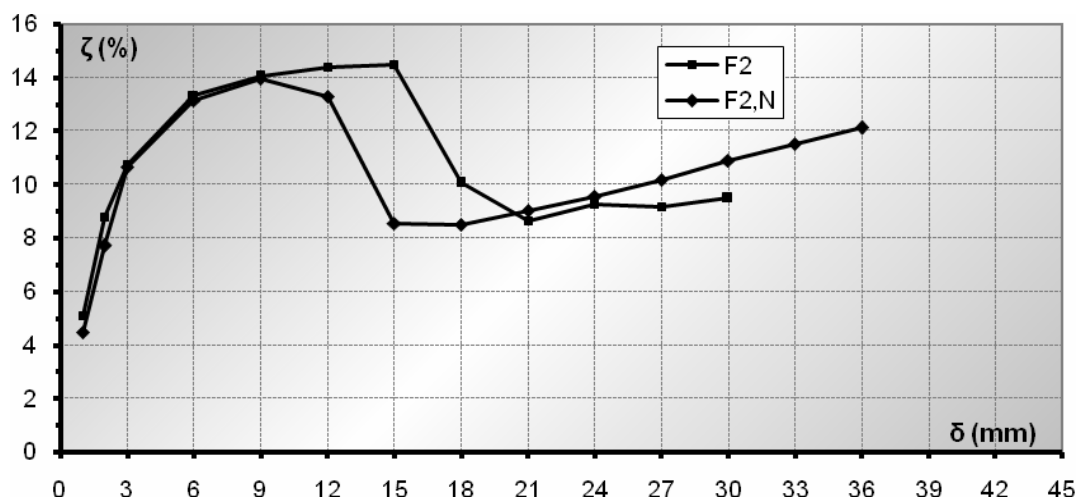
Σε προχωρημένες μετατοπίσεις (π.χ. δοκίμια F1 - F1,N, F2 - F2,N) η αναγωγή της απορροφώμενης ενέργειας συνετέλεσε στον περιορισμό της κλίσης της καμπύλης. Είναι φανερή η διαφορά της κλίσης της καμπύλης για τα δοκίμια F1 - F1,N πριν και μετά την αναγωγή της απορροφώμενης ενέργειας. Το ίδιο ισχύει και για τα δοκίμια F2 - F2,N από τη μετακίνηση των 18mm και μετά. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι τα υψηλά ποσά ενέργειας που απορρόφησαν τα δοκίμια οφείλονται μάλλον στο αυξημένο επίπεδο μετακίνησης που επέτυχαν και λιγότερο στη φέρουσα ικανότητά τους.

5.2.4 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση

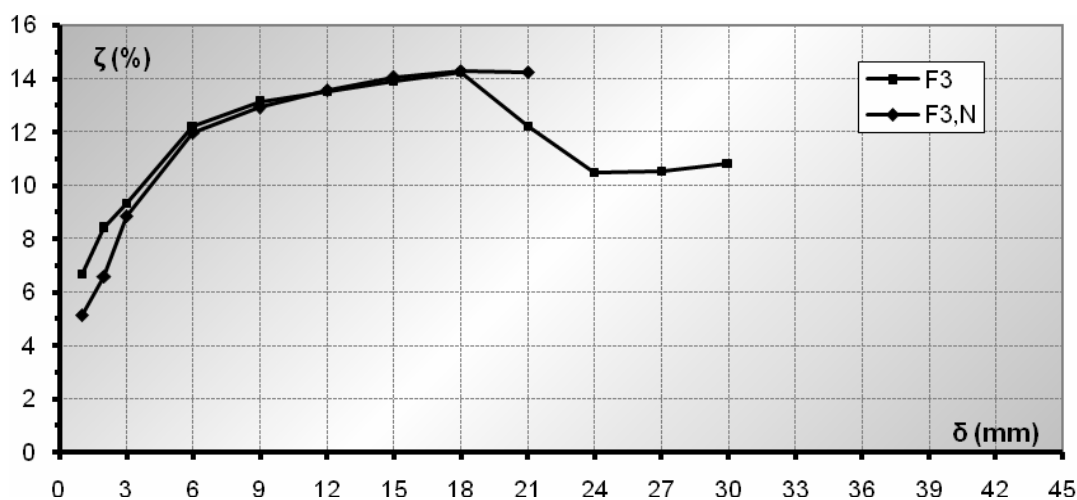
Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχ. 5.24 - 5.28) απεικονίζεται η μεταβολή της ισοδύναμης ιξώδους απόσβεσης.



Σχ. 5.24 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής.
(Μέση τιμή $1^{\omega\nu}$ & $2^{\omega\nu}$ κύκλων. Δοκίμια F1 - F1,N).



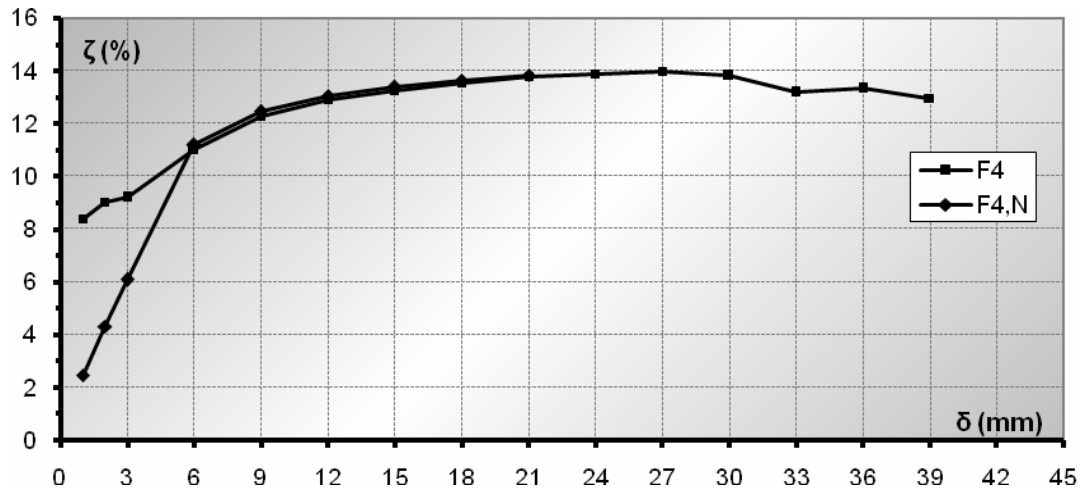
Σχ. 5.25 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής.
(Μέση τιμή $1^{\omega v}$ & $2^{\omega v}$ κύκλων. Δοκίμια F2 - F2,N).



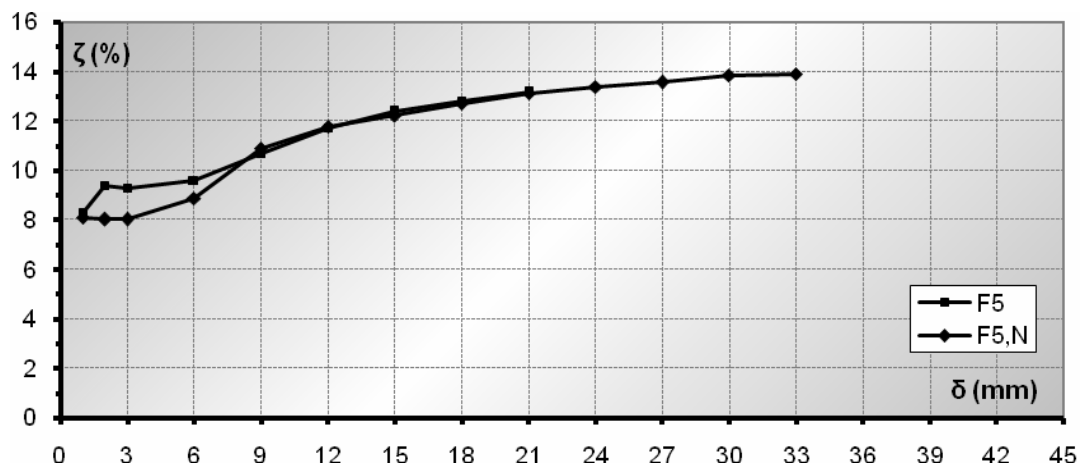
Σχ. 5.26 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής.
(Μέση τιμή $1^{\omega v}$ & $2^{\omega v}$ κύκλων. Δοκίμια F3 - F3,N).

Είναι προφανές ότι δεν παρουσιάζεται μεταβολή λόγω αξονικού φορτίου στους στύλους, με εξαίρεση ίσως μερικές περιπτώσεις στα πρώτα επίπεδα μετακίνησης αλλά και στο μεταβατικό στάδιο του φθίνοντα κλάδου κατά την αστοχία, μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής.

Παρατηρώντας τις καμπύλες όλων των δοκιμών προκύπτει ότι το γυμνό δοκίμιο διατηρεί τιμές κοντά στο 10% με αυξητικές τάσεις σε προχωρημένα επίπεδα μετακίνησης. Αντίθετα, τα ενισχυμένα τείνουν να προσεγγίσουν την ιδανική πλαστική συμπεριφορά που αντιστοιχεί, όπως έχει προαναφερθεί, σε τιμή $1/2\pi = 15,92\%$ ενώ μετά την αστοχία του συνδέσμου ακολουθούν τη συμπεριφορά του δοκιμίου αναφοράς.



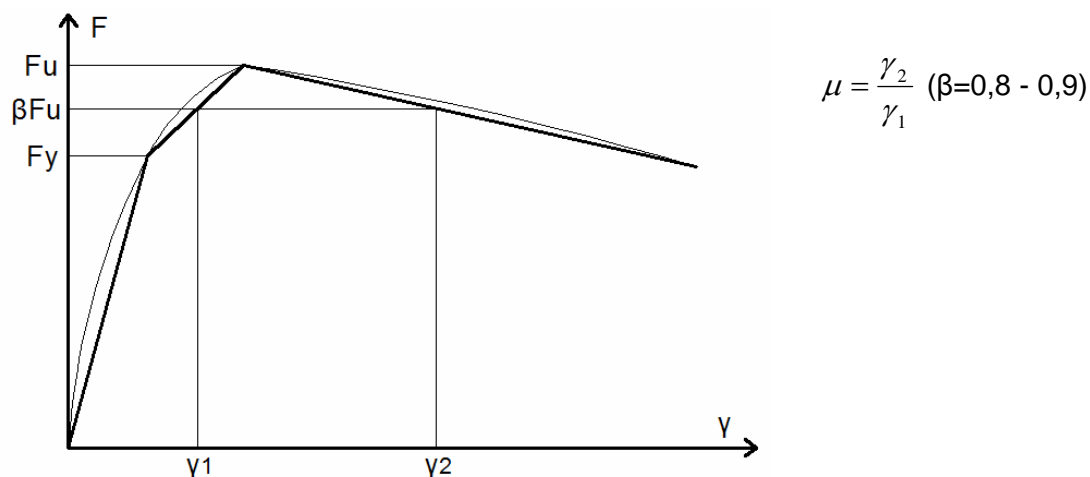
Σχ. 5.27 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής.
(Μέση τιμή $1^{\omega v}$ & $2^{\omega v}$ κύκλων. Δοκίμια F4 - F4,N).



Σχ. 5.28 Ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση - Μετατόπιση κεφαλής.
(Μέση τιμή $1^{\omega v}$ & $2^{\omega v}$ κύκλων. Δοκίμια F5 - F5,N).

5.3 Πλαστιμότητα

Αντίθετα με τα υπολογιστικά προσομοιώματα, στο πείραμα δεν μπορεί να ορισθεί η διαρροή και η αστοχία με σαφήνεια. Για την εκτίμηση λοιπόν της πλαστιμότητας των πειραματικών δοκιμίων, στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται διάφορες εκφράσεις δείκτη πλαστιμότητας. Ειδικά στην παρούσα περίπτωση που εμφανίζεται φθίνοντας κλάδος, ο δείκτης πλαστιμότητας μπορεί να εκτιμηθεί από την παρακάτω σχέση (βλέπε και σχήμα 5.29), εκφράζει δηλαδή το λόγο των μετατοπίσεων που αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό της οριακής αντοχής του δοκιμίου (80-90)%. Με βάση τον ορισμό αυτό προκύπτουν οι τιμές του πίνακα 5.1. Σημειώνεται ότι οι τιμές που βρίσκονται σε παρένθεση προέκυψαν από προεκβολή των διαγραμμάτων, καθώς δεν διατίθενται πρωτογενείς πειραματικές τιμές.



Σχ. 5.29 Ορισμός του δείκτη πλαστιμότητας

ΔΟΚΙΜΙΑ	β=0,8			β=0,9		
	γ1	γ2	μ	γ1	γ2	μ
F1	11,00	(55,00)	(5,00)	15,00	(45,00)	(3,00)
F2	5,50	12,70	2,31	8,00	12,20	1,53
F3	7,60	17,40	2,29	10,30	17,10	1,66
F4	10,70	29,20	2,73	15,00	27,50	1,83
F5	7,40	(23,00)	(3,11)	10,00	20,50	2,05
F1,N	5,60	38,30	6,84	9,50	33,60	3,54
F2,N	3,50	11,60	3,31	5,00	10,40	2,08
F3,N	7,10	19,50	2,75	10,50	18,10	1,72
F4,N	6,70	(36,00)	(5,37)	10,50	(31,00)	(2,95)
F5,N	8,50	31,60	3,72	14,60	29,80	2,04
P1	22,00	(57,00)	(2,59)	27,00	(51,00)	1,89
P2	15,30	(45,00)	(2,94)	19,50	(38,00)	(1,95)

Πίν. 5.1 Δείκτης πλαστιμότητας

Από τον πίνακα 5.1 προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

- Οι τιμές του δείκτη πλαστιμότητας είναι μεγαλύτερες στα δοκίμια με αξονικό φορτίο.
- Οι τιμές του δείκτη πλαστιμότητας σε γενικές γραμμές αυξάνονται με το επίπεδο ενίσχυσης, από το δοκίμιο F2 προς το F5 και από το F2,N προς το F5,N, παρατηρούνται όμως και ορισμένες εξαιρέσεις.
- Παρόλη τη βελτίωση στα δοκίμια με υψηλό επίπεδο ενίσχυσης, οι τιμές του δείκτη πλαστιμότητας υπολείπονται των αντίστοιχων τιμών των γυμνών πλαισίων.
- Τα δοκίμια P1 και P2 εμφανίζουν τιμές δείκτη πλαστιμότητας που πλησιάζουν τα δοκίμια F4 και F5 με ισχυρή ενίσχυση μορφής Λ.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Γενικά στοιχεία

Όπως προαναφέρθηκε, στο πλαίσιο αυτής της έρευνας μελετήθηκαν διάφορες παράμετροι διαμόρφωσης των δοκιμών, έτσι ώστε να συγκροτηθεί κατά το δυνατό μια ευρεία εικόνα όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης μορφής ενίσχυσης. Οι παράμετροι αυτές είναι οι εξής:

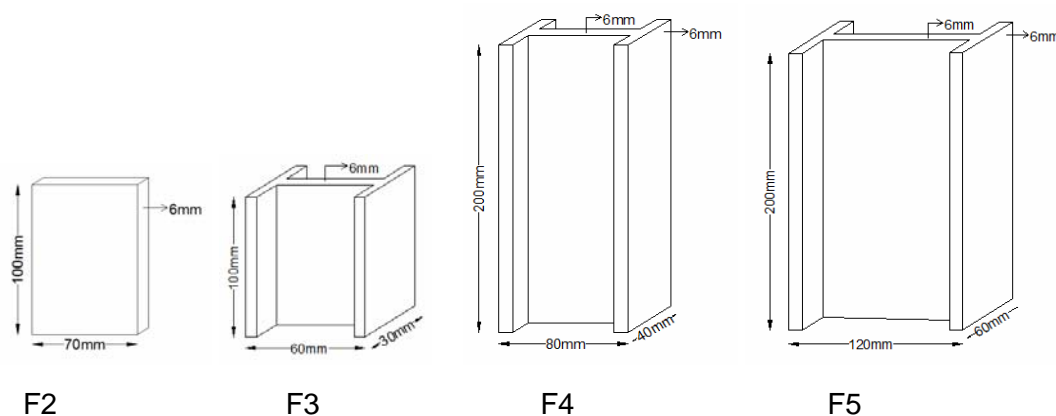
- Διαστάσεις και σχήμα διατομής κατακόρυφου μεταλλικού συνδέσμου.
- Ύπαρξη αξονικού φορτίου στους στύλους.

Προκειμένου να μελετηθεί μια κατά το δυνατόν ευρεία περιοχή μεταβολής των χαρακτηριστικών που περιγράφουν τη σεισμική συμπεριφορά των δοκιμών, όπως η αντοχή, η δυσκαμψία, η πλαστιμότητα, η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, επιλέχθηκαν κατακόρυφοι μεταλλικοί σύνδεσμοι δύο κατηγοριών.

- Κατακόρυφοι χαλύβδινοι σύνδεσμοι μικρού σχετικά ύψους
- Κατακόρυφα πετάσματα αλουμινίου μεγάλου ύψους

6.2 Διαστάσεις και σχήμα διατομής κατακόρυφου χαλύβδινου συνδέσμου

Όπως προαναφέρθηκε, έμφαση δόθηκε στους κατακόρυφους χαλύβδινους συνδέσμους σχετικά μικρού ύψους, οι οποίοι είναι συνολικά τεσσάρων ειδών (Σχ. 6.1).



Σχ. 6.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κατακόρυφων μεταλλικών συνδέσμων.

Για δεδομένο πλαίσιο, καθένας μεταλλικός σύνδεσμος εισήγαγε ένα διαφορετικό επίπεδο αναβάθμισης. Το ερώτημα που επί της ουσίας ετέθη είναι η διερεύνηση του άνω ορίου του επιπέδου επέμβασης ώστε το υφιστάμενο πλαίσιο να υφίσταται μεν βλάβες χωρίς όμως να καταστρέφεται, η δε απορρόφηση ενέργειας να συντελείται κυρίως στον κατακόρυφο μεταλλικό σύνδεσμο, ακόμη και μέχρι την καταστροφή του. Είναι προφανές ότι σε υφιστάμενες κατασκευές, σχεδιασμένες με παλιούς κανονισμούς, δεν ενδείκνυται η άκριτη και υπερβολική επέμβαση, η οποία ενδέχεται να οδηγήσει σε αστοχία στοιχείων του πλαισίου, στα οποία συγκεντρώνεται υψηλή ένταση ή απαίτηση μετακίνησης. Κατά κανόνα είναι προτιμότερη μια λελογισμένη αύξηση αντοχής ή/και δυσκαμψίας, ανάλογα με την

περίπτωση, με σύγχρονη εξασφάλιση δυνατότητας απορρόφησης ενέργειας και πλαστιμότητας, στοιχεία τα οποία διαθέτει ο υπό μελέτη μεταλλικός σύνδεσμος.

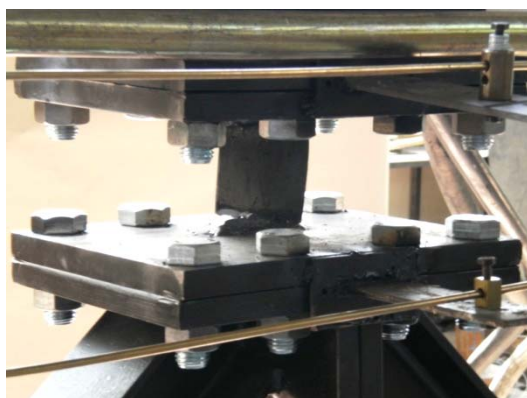
Ο πρώτος κατακόρυφος σύνδεσμος που μελετήθηκε συνίσταται σε μια μεταλλική λάμα F2 μήκους 100mm (Σχ. 6.1), η οποία συγκολλήθηκε ισχυρά επί των βοηθητικών πλακών. Αυτή η μορφή ενίσχυσης αποτέλεσε το χαμηλότερο επίπεδο ενίσχυσης προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά τόσο της λάμας, όσο και του πλαισίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αναμφισβήτητα η ύπαρξη της λάμας προσέδωσε στο πλαίσιο σημαντική αύξηση τόσο της φέρουσας ικανότητας όσο και της δυσκαμψίας. Βελτιώθηκε επίσης σημαντικά η απορρόφηση ενέργειας και η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση, καθώς η αστοχία επικεντρώθηκε κυρίως στο μεταλλικό σύνδεσμο. Επί πλέον, οι βλάβες στα στοιχεία σκυροδέματος ήταν πλαστικού χαρακτήρα. Διαπιστώθηκε ότι αδύνατο σημείο της συμπεριφοράς ήταν η σχετικά πρώιμη αστοχία του συνδέσμου σε χαμηλά επίπεδα σχετικής μετακίνησης ορόφου, της τάξεως του 12‰ (Φωτ. 6.1α) με σύγχρονη εμφάνιση λυγισμού των ακραίων κατακόρυφων ινών της λάμας και στρέβλωσης του συνδέσμου.

Το επόμενο βήμα για την αναβάθμιση των δοκιμών αποτέλεσε η χρήση κατακόρυφου μεταλλικού συνδέσμου διατομής I, μήκους και πάλι 100mm F3 (Σχ. 6.1). Η διατομή αυτής της μορφής αποτέλεσε ουσιαστικά μια βελτιωμένη εκδοχή της λάμας F2, καθώς αποσκοπούσε περισσότερο στην αύξηση της γωνιακής μετακίνησης και λιγότερο στην αύξηση της αντοχής. Πράγματι, τα αποτελέσματα αυτής της διατομής παρουσιάστηκαν βελτιωμένα σε σχέση με τα αντίστοιχα της λάμας. Τα πέλματα της διατομής συνέβαλαν ουσιαστικά στην αποτροπή φαινομένων στρέβλωσης, με αποτέλεσμα να επιβραδυνθεί η αστοχία του συνδέσμου και να αυξηθεί με αυτόν τον τρόπο η σχετική μετακίνηση σε 18‰, άρα και η πλαστιμότητα του δοκιμίου (Φωτ. 6.1β). Αυξήθηκαν επίσης, όχι όμως θεαματικά, η φέρουσα ικανότητα και η ανηγμένη απορρόφηση ενέργειας. Αντίθετα, σημαντική ήταν η αύξηση της απορρόφησης ενέργειας και της ιξώδους απόσβεσης. Και πάλι οι βλάβες στα στοιχεία σκυροδέματος ήταν πλαστικού χαρακτήρα.

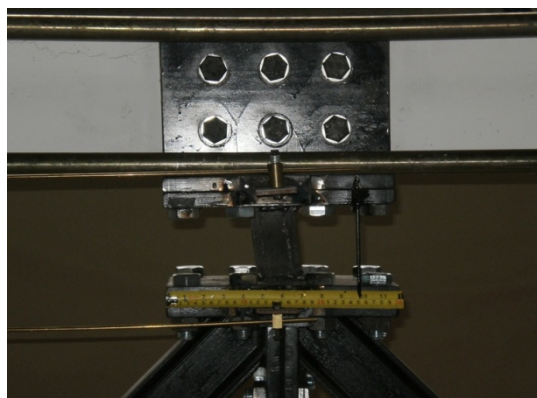
Επιχειρήθηκε κατόπιν μια πιο δραστική αναβάθμιση του δοκιμίου, με στόχο όχι τόσο την αύξηση της αντοχής αλλά και πάλι την περαιτέρω αύξηση της γωνιακής μετακίνησης. Τούτο επιτεύχθηκε με την εφαρμογή του κατακόρυφου συνδέσμου F4 (Σχ. 6.1), διατομής I, κάπως μεγαλύτερης διατομής και διπλάσιου μήκους 200mm σε σχέση με τον προηγούμενο σύνδεσμο. Τα δοκίμια αυτά παρουσίασαν και πάλι μια μικρή αύξηση αντοχής και ανηγμένης απορρόφησης ενέργειας και μια σημαντική αύξηση της ιξώδους απόσβεσης. Η κύρια όμως βελτίωση έναντι του προηγούμενου δοκιμίου συνίσταται στη σημαντική αύξηση της σχετικής μετακίνησης ορόφου που ανέβηκε στο 24‰, που αποδίδεται στην αύξηση του ύψους του συνδέσμου. Το θετικό αυτό στοιχείο επισκιάσθηκε πάντως από το γεγονός ότι, πέραν των πλαστικών βλαβών στους στύλους, σε μεγάλες μετακινήσεις άρχισαν να εμφανίζονται σοβαρές βλάβες στο μέσον του ζυγώματος, καθώς η δοκός δεν ήταν επαρκώς οπλισμένη για να παραλάβει τις υψηλές τοπικές εντάσεις που άρχισαν να συγκεντρώνονται στο σημείο σύνδεσης του συνδέσμου με τη δοκό. Η μορφή αστοχίας δεν ήταν επικεντρωμένη πλέον στο σύνδεσμο αλλά ήταν μικτή, γεγονός που οδήγησε σε ελαφρά μείωση της ιξώδους απόσβεσης (Φωτ. 6.1γ).

Τελευταία επιλογή ήταν η χρήση του συνδέσμου F5 (Σχ. 6.1), μήκους 200mm, μεγαλύτερης όμως διατομής I, που επιλέχθηκε με στόχο να διαπιστωθεί κατά πόσον ένα

πλαίσιο Ο.Σ., σχεδιασμένο με παλιούς κανονισμούς, μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη ενός τόσο ισχυρού μεταλλικού συνδέσμου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αυξημένη αντοχή του συνδέσμου συνετέλεσε μεν στην μικρή αύξηση της φέρουσας ικανότητας σε σχέση με τους υπόλοιπους συνδέσμους, παράλληλα όμως οδήγησε σε εκτεταμένες βλάβες του πλαισίου κυρίως στο μέσον του ζυγώματος (Φωτ. 6.1δ). Σημειώνεται ότι η απορρόφηση ενέργειας και η ιξώδης απόσβεση μειώθηκαν. Οι βλάβες ήταν ψαθυρού τύπου και επικεντρώθηκαν στα στοιχεία σκυροδέματος, υπό μειωμένες σχετικές μετακινήσεις ορόφου. Και πάλι η μορφή αστοχίας ήταν μικτή καθώς στο δοκίμιο χωρίς αξονικό ο σύνδεσμος δεν παρουσίασε εμφανείς βλάβες ενώ στο δοκίμιο με το αξονικό αστόχησε μεν τελικά, μετά από έντονες όμως βλάβες στη δοκό.



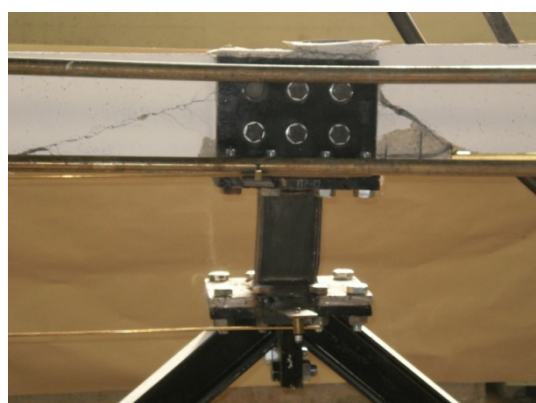
(α)



(β)



(γ)



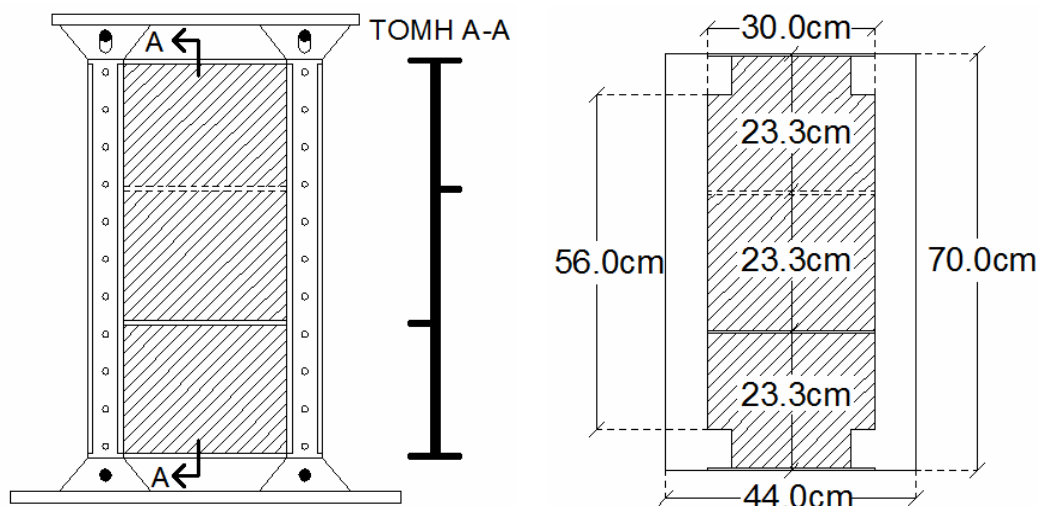
(δ)

Φωτ. 6.1 Χαρακτηριστικές μορφές αστοχιών των δοκιμίων.

6.3 Κατακόρυφο πέτασμα αλουμινίου

Τα δοκίμια P1 και P2 αποτελούν τα πλαίσια Ο.Σ. τα οποία ενισχύθηκαν με ορθογωνικού σχήματος πέτασμα αλουμινίου. Μια τέτοιου είδους ενίσχυση επιλέχθηκε προκειμένου να αξιολογηθεί η συνεισφορά μιας «ελαφράς» μορφής ενίσχυσης (από αλουμίνιο) σε σχέση με τους βαρείς χαλύβδινους συνδέσμους μορφής Λ οι οποίοι καταλήγουν σε κατακόρυφο σύνδεσμο υψηλής απόσβεσης.

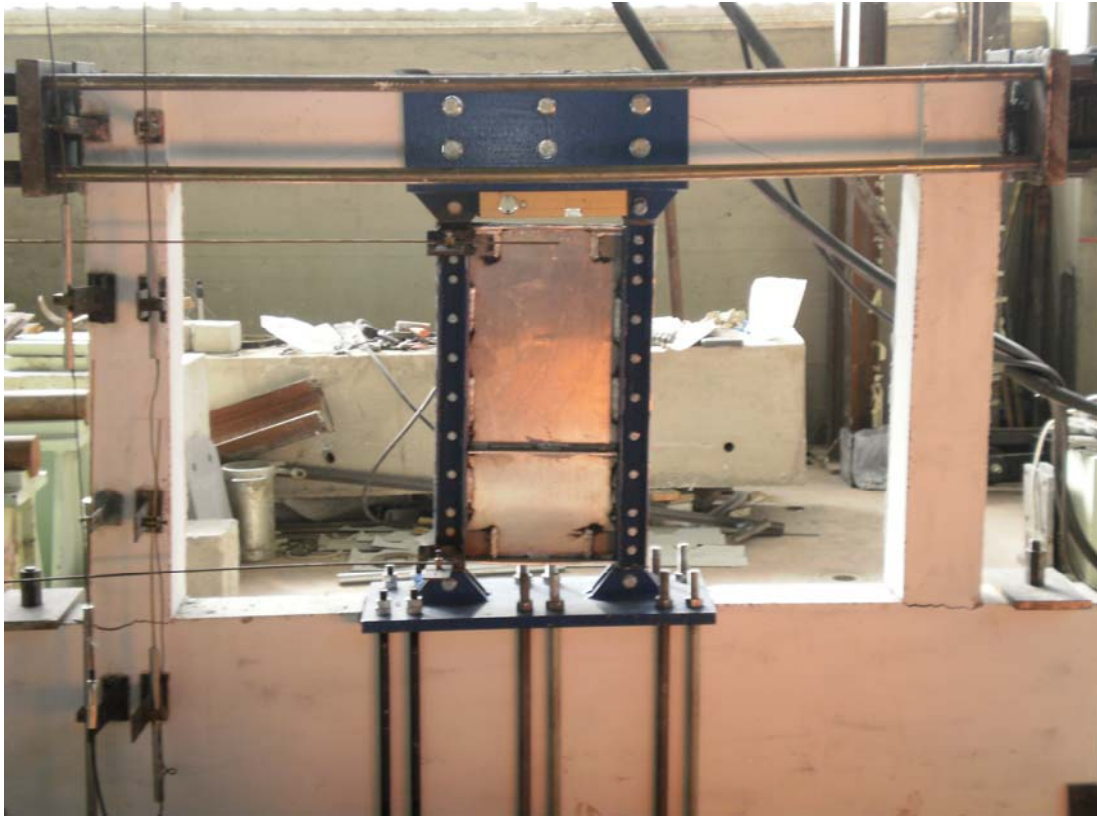
Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπό εξέταση πετάσματος αλουμινίου (Σχ. 6.2) επιλέχθηκαν μετά από προδιαστασιολόγηση, προσαρμοζόμενα προς την κλίμακα του πλαισίου (1:3). Στο πέτασμα πάχους 5mm τοποθετήθηκαν εγκάρσιες ενισχύσεις διατομής (5X50)mm σε συμμετρικό σχεδιασμό.



Σχ. 6.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πετάσματος αλουμινίου.

Στην πρώτη πειραματική δοκιμή, του δοκιμίου P1, το πέτασμα απέδωσε μια ήπια αύξηση της αντοχής σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς F1, με στενούς πάντως βρόχους. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην αστοχία των κάτω συνδέσεων του πετάσματος με τη χαλύβδινη πλάκα που εφαρμόζει στη βάση του δοκιμίου. Το γεγονός αυτό είχε ως άμεσο επακόλουθο την αδυναμία του πετάσματος να παραμορφωθεί διατμητικά μέσα στο επίπεδό του, διατηρώντας ορθογωνικό σχήμα ακόμη και σε προχωρημένα επίπεδα μετακίνησης. Έτσι δεν μπόρεσε να αποδώσει την αναμενόμενη αύξηση της αντοχής αλλά κυρίως την αύξηση της απορρόφησης ενέργειας. Συμπερασματικά, η μεν φέρουσα ικανότητα αυξήθηκε λόγω της ύπαρξης μιας πρακτικώς άκαμπτου κατασκευής στο εσωτερικό του πλαισίου, η αδυναμία όμως παραμόρφωσης του πετάσματος κατά την ανακύκλιση της φόρτισης συνετέλεσε στην αδυναμία απορρόφησης ενέργειας και τη στένωση των βρόχων. Τελικά, μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής δοκιμής, το πέτασμα αλουμινίου παρέμεινε अपαραμόρφωτο ενώ το πλαίσιο εμφάνισε την τυπική καμπτική αστοχία στύλων με πλαστικές αρθρώσεις στην κεφαλή και τον πόδα αλλά και τη ρηγμάτωση της δοκού στο σημείο σύνδεσης του μεταλλικού στοιχείου Π στο μέσον της (Φωτ. 6.2α).

Η ανάγκη για την αποτροπή τέτοιου είδους ανεπιθύμητων αστοχιών οδήγησε στον ανασχεδιασμό τη διάταξης, διατηρώντας ίδιο το πέτασμα, ενισχύοντας όμως τόσο τα μεταλλικά στοιχεία διατομής U για την αποφυγή φαινομένων σύνθλιψης άντυγας αλλά και τη χρήση ισχυρότερων κοχλιών στις τέσσερις οπές σύνδεσης του πετάσματος με τη δοκό και τη βάση του δοκιμίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν σαφή βελτίωση τόσο όσον αφορά την αντοχή του δοκιμίου, όσο και την απορρόφηση ενέργειας. Το δοκίμιο αποδείχτηκε πιο δύσκαμπτο, μεγαλύτερης αντοχής και με πλούσιους βρόχους υστέρησης ενώ ήταν εμφανής και η διατμητική παραμόρφωση του πετάσματος αλουμινίου (Φωτ. 6.2β).



(α) Δοκίμιο P1



(β) Δοκίμιο P2

Φωτ. 6.2 Χαρακτηριστικές μορφές αστοχιών των δοκιμίων.

6.4 Ύπαρξη αξονικού φορτίου στους στύλους

Η επίδραση του αξονικού φορτίου επί των στύλων κρίθηκε απαραίτητη παράμετρος προς εξέταση, καθώς με τον τρόπο αυτό εκπροσωπούνται πλαίσια χαμηλού ή υψηλού ορόφου. Η παράμετρος αυτή εξετάστηκε μόνον στα δοκίμια με τους χαλύβδινους συνδέσμους.

Σε όλα τα δοκίμια, υπό την επίδραση αξονικού φορτίου, το πλαίσιο καθίσταται πιο δύσκαμπτο και αποκτά μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα. Επιπλέον, λόγω της σύνθλιψης, οι ρηγματώσεις στην κεφαλή και τον πόδα των στύλων περιορίστηκαν αισθητά σε σχέση με τα δοκίμια χωρίς αξονικό φορτίο. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώθηκε και από τις μετρήσεις των ηλεκτρονικών μηκυνσιόμετρων τα οποία τοποθετήθηκαν σε κατάλληλα σημεία έτσι ώστε να καταγράφουν τη μεταβολή του εύρους των ρωγμών κατά την ανακύκλιση και τα οποία έδειξαν αισθητή μείωση εύρους ρωγμών με την ύπαρξη του αξονικού φορτίου. Γενικά το αξονικό φορτίο στους στύλους κατέστησε πιο ευάλωτες τις δοκούς, στις οποίες συγκεντρώθηκε περισσότερη βλάβη.

6.5 Σύνοψη συμπερασμάτων

Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτουν τα εξής βασικά συμπεράσματα για τους χαλύβδινους συνδέσμους:

- Η χρήση συνδέσμου διατομής διπλού ταυ είναι πιο αποδοτική από τη χρήση συνδέσμου διατομής λεπίδας.
- Η επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του συνδέσμου (μέγεθος διατομής και ύψος) πρέπει να γίνεται έτσι ώστε το επίπεδο αναβάθμισης σε όρους φέρουσας ικανότητας να είναι της τάξεως του διπλάσιου - τριπλάσιου της αρχικής. Στο επίπεδο αυτό φαίνεται να εξασφαλίζεται η πλάστιμη αστοχία του συνδέσμου και όχι η ψαθυρή του δοκιμίου από Ο.Σ.
- Όταν τούτο επιτυγχάνεται, η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση μεγιστοποιείται και προσφέρει, πέραν της αντοχής, έναν ισχυρό πρόσθετο μηχανισμό παραλαβής της σεισμικής διέγερσης.
- Σε όλα τα δοκίμια, υπό την επίδραση αξονικού φορτίου, το πλαίσιο καθίσταται πιο δύσκαμπτο, αποκτά μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα και απορροφά περισσότερη ενέργεια. Γενικά το αξονικό φορτίο στους στύλους κατέστησε πιο ευάλωτες τις δοκούς, στις οποίες συγκεντρώθηκε περισσότερη βλάβη.
- Σε όλα τα ενισχυμένα δοκίμια, στα οποία αστόχησε ο μεταλλικός σύνδεσμος, αμέσως μετά την αστοχία διακρίνεται μια σαφής τάση προσέγγισης της συμπεριφοράς του αντίστοιχου γυμνού δοκιμίου αναφοράς. Όταν αντίθετα εμφανίζονται αστοχίες στην περιοχή της σύνδεσης με τη δοκό, οι αστοχίες αυτές είναι ψαθυρές και το δοκίμιο δεν είναι σε θέση πλέον να ανακάμψει, έστω στα χαμηλά προ της επέμβασης επίπεδα.

Για τα πετάσματα αλουμινίου προκύπτουν τα εξής βασικά συμπεράσματα:

- Σε σχέση με του χαλύβδινους συνδέσμους ενίσχυσης μορφής Λ, η ενίσχυση με πέτασμα αλουμινίου φαίνεται να υστερεί κυρίως σε απορρόφηση ενέργειας, ακόμη κι όταν ενεργοποιείται το πέτασμα.

- Σε αντιστάθμισμα, οι επιτυγχανόμενες μετατοπίσεις είναι πολύ μεγαλύτερες, χωρίς πτώση αντοχής ή καταστροφής της ενίσχυσης, τούτο λόγω του μεγάλου ύψους της διάταξης ενίσχυσης.
- Βασικό μειονέκτημα των πετασμάτων αλουμινίου αποτελεί η δυσκολία κατασκευής και εφαρμογής ενός τέτοιου συστήματος. Η σύνθεση και η διάταξη ενός τέτοιου πετάσματος απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στη λεπτομέρεια προκειμένου να αξιοποιηθούν πλήρως οι ιδιότητες του αλουμινίου, αποτρέποντας όμως και την εμφάνιση ανεπιθύμητων μορφών αστοχίας. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην εμφανιστούν φαινόμενα κάμψης κοχλίων και σύνθλιψης άντυγας στις συνδέσεις τόσο των μεταλλικών στοιχείων όσο και του «ευαίσθητου» φύλλου αλουμινίου.
- Το βασικό αυτό μειονέκτημα έρχεται σε αντίθεση με τον τεθέντα εξ αρχής στόχο της ενίσχυσης με χαμηλού επιπέδου τεχνολογικά μέσα.
- Ένα άλλο μειονέκτημα αποτελεί η δυσκολία προμήθειας αλουμινίου σχετικά χαμηλής αντοχής. Η ιδιότητα αυτή είναι απαιτητή καθώς υψηλές αντοχές του υλικού θα προσέφεραν υπερβολικά υψηλές αντοχές στο πέτασμα, οι οποίες ενδεχομένως θα οδηγούσαν σε ανεπιθύμητες αστοχίες του ενισχυόμενου φατνώματος, όπως τούτο συνέβη με τα σκοπίμως υπερενισχυμένα δοκίμια μορφής Λ.

6.6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με βάση τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών για τους συνδέσμους μορφής Λ και τη σχετική εμπειρία που αποκτήθηκε από τη μελέτη της συμπεριφοράς τους, προτείνονται τρεις κατευθύνσεις περαιτέρω πειραματικής έρευνας:

- Σημαντικό και κρίσιμο αντικείμενο έρευνας αποτελούν οι μέθοδοι σύνδεσης των μεταλλικών στοιχείων με τα στοιχεία σκυροδέματος. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν γενικά υπερδιαστασιολογημένοι σύνδεσμοι, με στόχο την σκόπιμη αποτροπή της αστοχίας τους και την επικέντρωση στα χαρακτηριστικά του συνδέσμου.
- Το ίδιο ισχύει και με τα διαγώνια μεταλλικά στοιχεία δικτύωσης, τα οποία και πάλι με τη λογική της υπερδιαστασιολόγησης, πρακτικά εξαιρέθηκαν από τα προς διερεύνηση μέλη στην παρούσα εργασία.
- Μια ενδιαφέρουσα παραλλαγή της παρούσας μεθόδου, παρόλο που επιβαρύνεται οικονομικά και τεχνολογικά η λύση ενίσχυσης, θα ήταν η χρήση ενός μεταλλικού πλαισίου στην εσωτερική περίμετρο του προς ενίσχυση φατνώματος. Με τον τρόπο αυτό αμβλύνονται οι εισαγόμενες τοπικές εντάσεις στα σημεία σύνδεσης της μεταλλικής ενίσχυσης με τα στοιχεία σκυροδέματος και αποτρέπονται τοπικές αστοχίες, συνήθως ψαθυρού τύπου. Μια λιγότερο δραστική, ίσως όμως αποτελεσματική λύση, θα ήταν η τοποθέτηση μόνον μιας κατάλληλα διαστασιολογημένης μεταλλικής δοκού κάτω από τη δοκό σκυροδέματος κάθε ενισχυόμενου φατνώματος, χωρίς σύνδεση μεταξύ τους, αγκυρούμενης δηλαδή στις κεφαλές των παρακείμενων υποστυλωμάτων. Με τον τρόπο αυτό δεν εισάγεται ένταση στο μέσον της υφιστάμενης δοκού σκυροδέματος, η οποία υπό προϋποθέσεις αποδείχθηκε ότι μπορεί να οδηγήσει σε ψαθυρή αστοχία του συστήματος.

Οι παραπάνω προτάσεις εντάσσονται στη λογική που πρυτάνευσε για την επιλογή των συγκεκριμένων κατευθύνσεων της παρούσας έρευνας, δηλαδή των απλών μορφών

επέμβασης, με συνήθη υλικά, χαμηλού κόστους και επιπέδου τεχνολογίας, χαμηλής όχλησης και εύκολα αντικαταστάσιμων. Στην περίπτωση που υιοθετηθούν υψηλότερα επίπεδα τεχνολογικών απαιτήσεων, το πεδίο έρευνας διευρύνεται σημαντικά και ξεφεύγει από τους στόχους των προτάσεων που επιχειρούνται εδώ.

Λαμπρό επίσης διανοίγεται και το αντικείμενο της αναλυτικής προσέγγισης του προβλήματος, το οποίο περιλαμβάνει αρκετές πτυχές, όπως για παράδειγμα η επιτυχής επιλογή προχωρημένων προσομοιωμάτων ανάλυσης που να επαληθεύουν επαρκώς τα πειραματικά αποτελέσματα, και η αναζήτηση της κάθε φοράς βέλτιστης επιλογής κατάλληλων συνδέσμων, τόσο σε πλήθος όσο και σε γεωμετρία, ειδικότερα ως προς τη σχέση διατομής και μήκους συνδέσμου.

Όσον αφορά τα πετάσματα αλουμινίου, η πειραματική έρευνα δεν έφθασε σε αρκετό βάθος ώστε να εξάγονται ασφαλή συμπεράσματα. Εκτιμάται όμως ότι τα τεχνολογικά προβλήματα εφαρμογής αποτελούν αποθαρρυντικό παράγοντα. Όμως διατίθενται περιθώρια περαιτέρω έρευνας προς διάφορες κατευθύνσεις, όπως για παράδειγμα η διερεύνηση τοποθέτησης ενός μεταλλικού πλαισίου εντός του πλαισίου Ο.Σ. ή ακόμη και μιας μεταλλικής δοκού επί της δοκού Ο.Σ., η οποία θα προστατεύει την ασθενή δοκό σκυροδέματος χωρίς να εμποδίζει τη λειτουργία του πετάσματος, η διερεύνηση και άλλων πετασμάτων από άποψη γεωμετρίας και υλικών κ.λ.π.

6.7 Σχολιασμός της κλίμακας 1:3

Με την ολοκλήρωση των συμπερασμάτων της πειραματικής έρευνας είναι χρήσιμος ο σχολιασμός της κλίμακας 1:3 που επιλέχθηκε για την εκτέλεση του συνόλου των πειραμάτων της παρούσας έρευνας και η εκτίμηση της επίπτωσής της σε κρίσιμα ζητήματα σχεδιασμού και εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου ενίσχυσης σε πραγματικές κατασκευές.

Όπως επανειλημμένα προαναφέρθηκε, η συγκεκριμένη κλίμακα επιβλήθηκε από τις δυνατότητες της διαθέσιμης πειραματικής διάταξης τόσο ως προς τη γεωμετρία της όσο και ως προς τα μεγέθη των απαιτούμενων φορτίων. Είναι επίσης αυτονόητο ότι η υπό κλίμακα εκτέλεση πειραμάτων μειώνει δραστικά το κόστος των πειραμάτων. Δεδομένου μάλιστα ότι τα πειράματα εκτελέσθηκαν υπό οιονεί στατικές φορτίσεις, τα θεωρητικά προβλήματα κλίμακας ξεπεράσθηκαν εύκολα. Ως προς τα υλικά, βοήθησε αποφασιστικά η προηγούμενη ανάλογη εμπειρία σε συνθέσεις σκυροδεμάτων μικρού μεγίστου αδρανούς ενώ αντιμετωπίσθηκαν με επιτυχία τα προβλήματα των μικρών διαμέτρων και διατομών των μεταλλικών στοιχείων.

Το κρίσιμο για την απόκριση των δοκιμών, ιδίως στην περιοχή των μικρών μετακινήσεων, μέγεθος των οπών διέλευσης των ντιζών σύνδεσης των μεταλλικών συνδέσμων με το πλαίσιο σκυροδέματος αντιμετωπίσθηκε με τη μέγιστη δυνατή κατασκευαστική ακρίβεια. Είναι όμως σαφές από την απόκριση των πειραματικών δοκιμών σε σχέση με τα αναλυτικά προσομοιώματα ότι οι τζόγοι των διελεύσεων καθυστερούν την εμπλοκή των ενισχύσεων. Υπό την έννοια αυτή εκτιμάται ότι σε πραγματικές κατασκευές η ίδια γεωμετρική ανοχή σε απόλυτα μεγέθη θα οδηγήσει σε βελτίωση της συμπεριφοράς.

Γ. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΕΛΕΙΩΝ ΥΣΤΕΡΗΤΙΚΩΝ ΒΡΟΓΧΩΝ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΝΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ

7.1 Εισαγωγή

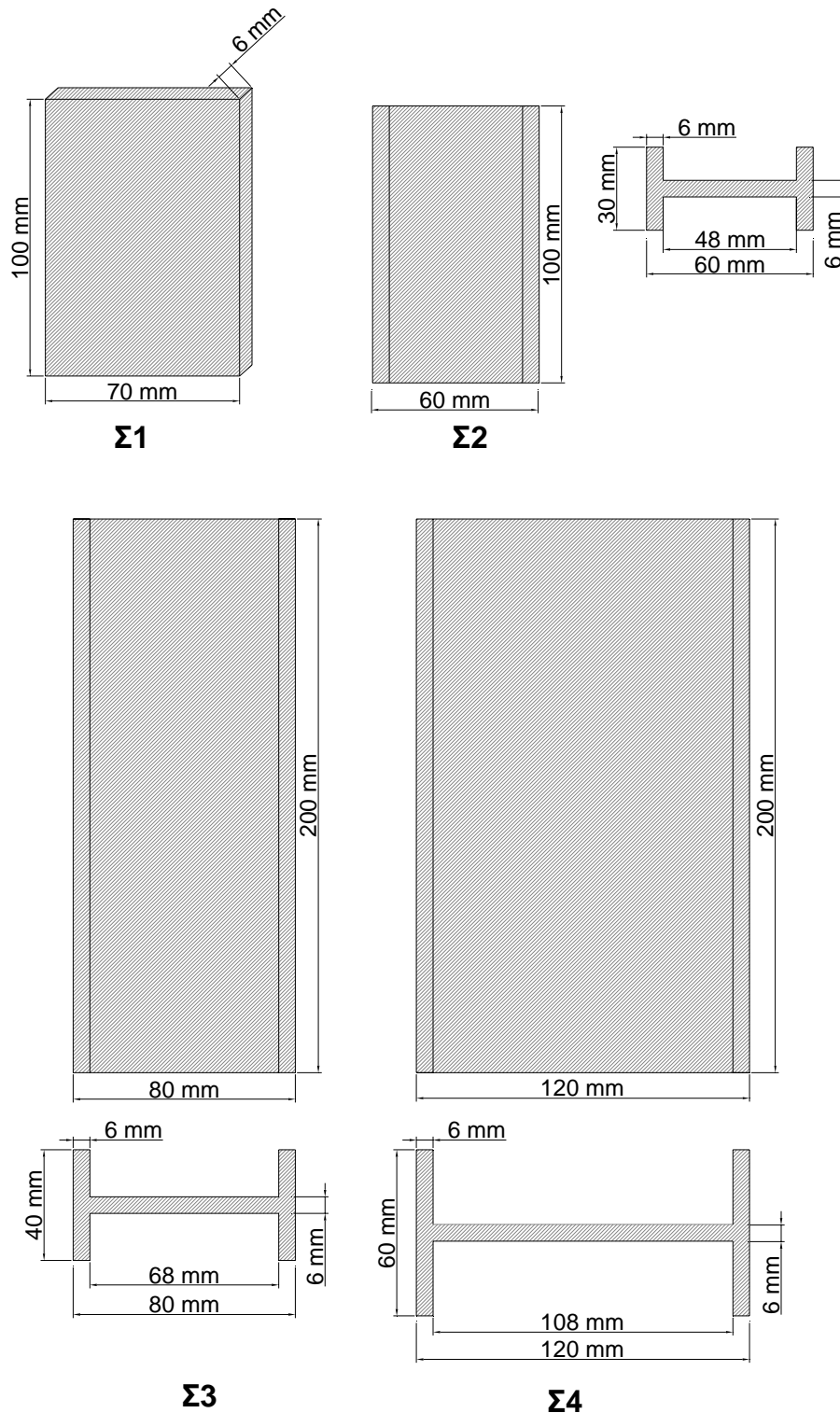
Στόχος της ενότητας αυτής είναι η εκτίμηση της ιδεατής συμπεριφοράς όλων των τύπων των μεταλλικών συνδέσμων που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση των υπό μελέτη πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος, καθώς επίσης και του πετάσματος αλουμινίου. Συνεπώς, πρώτο βήμα της αναλυτικής προσέγγισης του προβλήματος αποτελεί η μελέτη της συμπεριφοράς των μεμονωμένων αυτών συνδέσμων μέσω αριθμητικής προσομοίωσης. Αρχικά, δημιουργήθηκαν ακριβή τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για όλες τις περιπτώσεις των συνδέσμων. Στη συνέχεια, διερευνήθηκε η αξιοπιστία δισδιάστατων προσομοιωμάτων των μεταλλικών αυτών συνδέσμων σε σχέση με τα αντίστοιχα τρισδιάστατα, με στόχο τη μετέπειτα χρήση τους στα προσομοιώματα των ενισχυμένων πλαισιακών φορέων. Η αξιοπιστία των δισδιάστατων προσομοιωμάτων αξιολογείται μετά από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με τα αντίστοιχα των τρισδιάστατων προσομοιωμάτων, τα οποία θεωρούνται πιο ρεαλιστικά, λόγω της φύσης των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούν.

7.2 Αριθμητική προσομοίωση μεταλλικών συνδέσμων

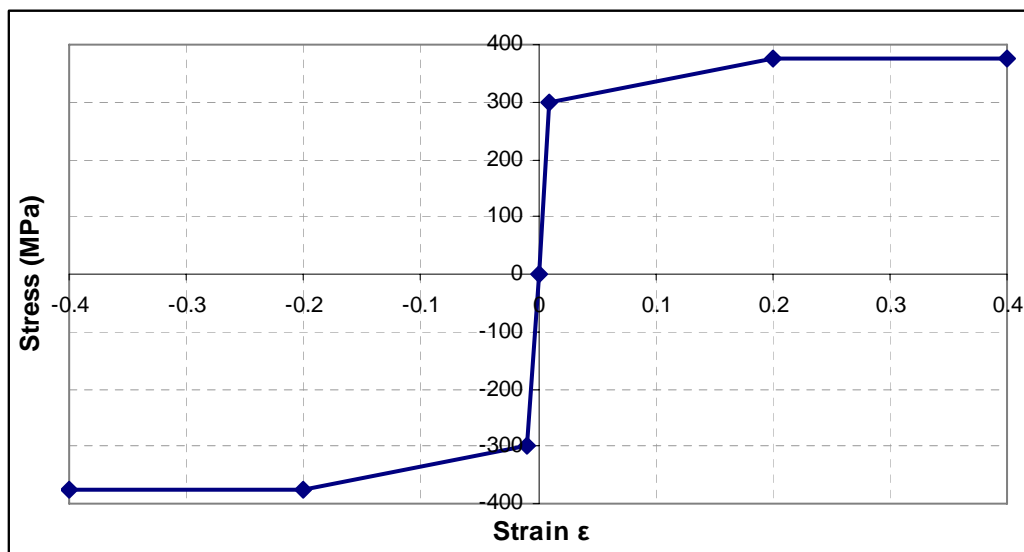
Επελέγησαν προς διερεύνηση τέσσερις τύποι μεταλλικών συνδέσμων Σ1, Σ2, Σ3 και Σ4, η μορφή και οι διαστάσεις των οποίων φαίνονται στο σχήμα 7.1. Ο πρώτος σύνδεσμος είναι ορθογωνικής διατομής, ενώ όλοι οι υπόλοιποι είναι διατομής διπλού ταυ. Οι κατακόρυφοι μεταλλικοί σύνδεσμοι είναι χαλύβδινοι με ελαστοπλαστική συμπεριφορά και $f_y / f_u = 300 / 375$. Στο σχήμα 7.2 παρουσιάζεται ο νόμος τάσεων - παραμορφώσεων που διέπει τη συμπεριφορά του χάλυβα. Το μέτρο ελαστικότητας τέθηκε ίσο με 210GPa και ο λόγος Poisson $\nu = 0.3$.

Στο σχήμα 7.3 φαίνονται τα τρισδιάστατα και δισδιάστατα αριθμητικά προσομοιώματα και για τους τέσσερις τύπους μεταλλικών συνδέσμων. Για την τρισδιάστατη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν οκτακομβικά ισοπαραμετρικά εξάεδρα πεπερασμένα στοιχεία, ενώ για τη δισδιάστατη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν επίπεδα τετρακομβικά ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία επίπεδης έντασης. Στα δισδιάστατα προσομοιώματα το πρόβλημα της συνεκτίμησης της τρίτης διάστασης του προβλήματος (κάθετα στο επίπεδο προσομοίωσης) αντιμετωπίστηκε με την απόδοση διαφορετικών τιμών στο πάχος των στοιχείων. Έτσι, στην περίπτωση του πρώτου μεταλλικού συνδέσμου Σ1 ορθογωνικής διατομής, δόθηκε στα πεπερασμένα στοιχεία πάχος ίσο με 6mm, ενώ στις περιπτώσεις των μεταλλικών συνδέσμων διατομής Σ2, Σ3 και Σ4 διπλού T, δόθηκε στα στοιχεία που προσομοιώνουν τον κορμό τους πάχος ίσο με 6mm και σε εκείνα που προσομοιώνουν τα πέλματά τους, πάχος ίσο με 30mm, 40mm και 60mm, αντίστοιχα.

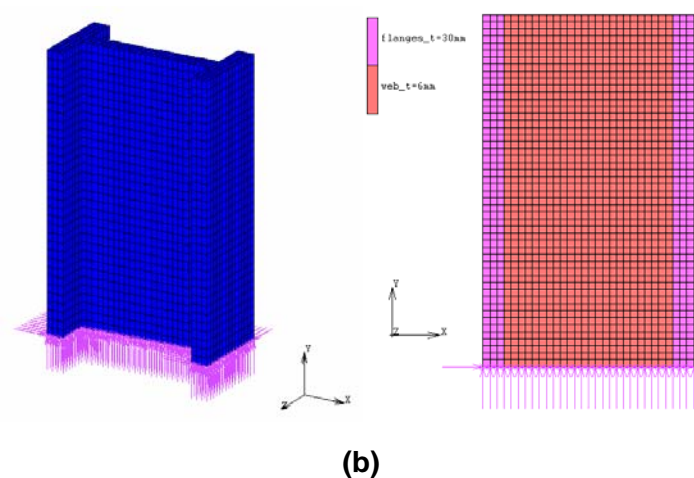
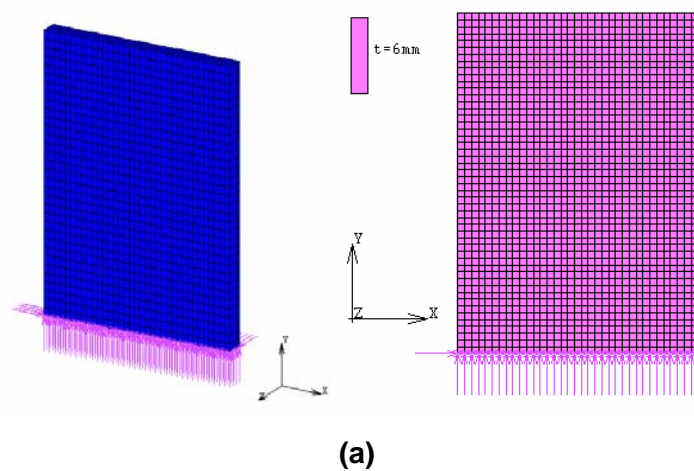
Αναφορικά με τις συνθήκες φόρτισης, στους μεταλλικούς συνδέσμους ασκήθηκε στο ανώτερο επίπεδο κόμβων τους οριζόντια στατική μονοτονική και στατική πλήρως ανακυκλιζόμενη φόρτιση με τη μορφή επιβεβλημένων μετατοπίσεων. Η μέγιστη επιβαλλόμενη μετατόπιση ήταν σε κάθε περίπτωση ίση με $\pm 20\text{mm}$. Το ιστορικό της ανακυκλιζόμενης φόρτισης φαίνεται στο σχήμα 7.4. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού MSC-MARC (MSC 2010).



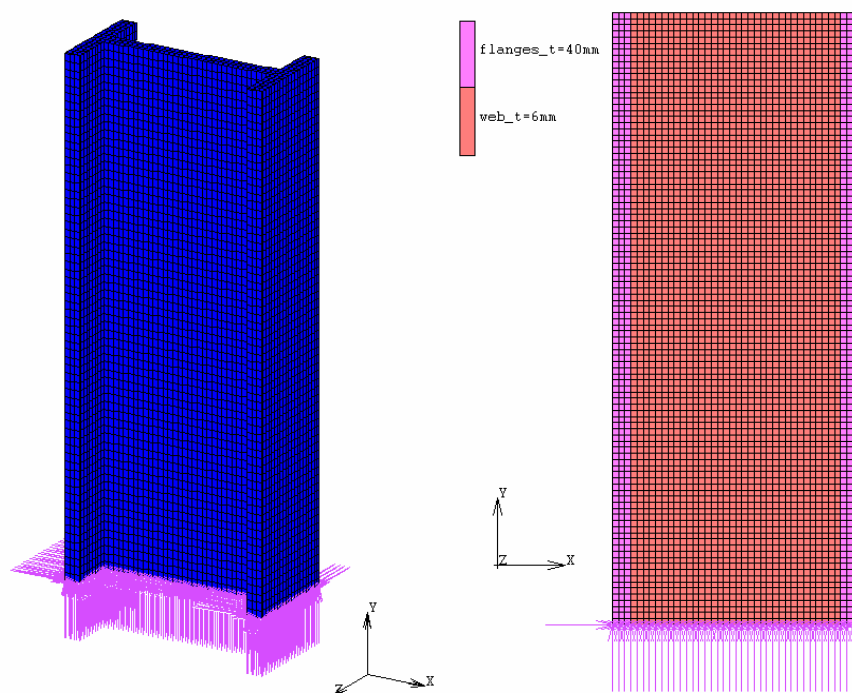
Σχ. 7.1 Οι τέσσερις τύποι μεταλλικών συνδέσμων που εξετάστηκαν.



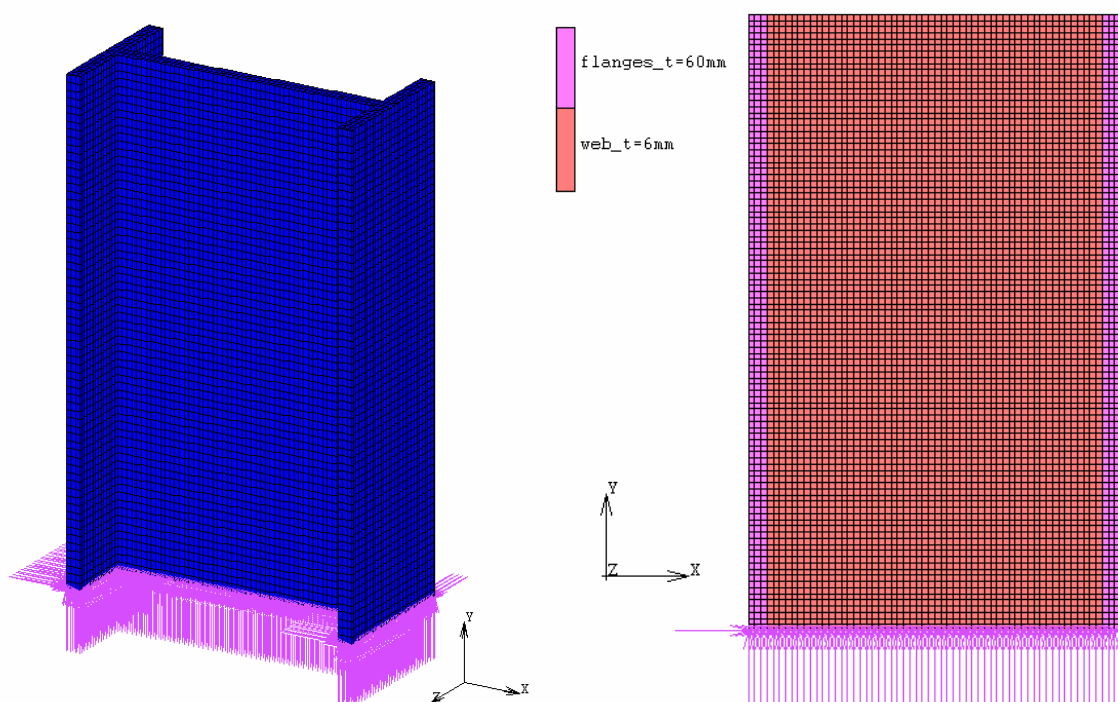
Σχ. 7.2 Νόμος τάσεων - παραμορφώσεων χάλυβα.



Σχ. 7.3 Τρισδιάστατη και δισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση των μεταλλικών συνδέσμων
(a) Σ1, (b) Σ2, (c) Σ3 και (d) Σ4.

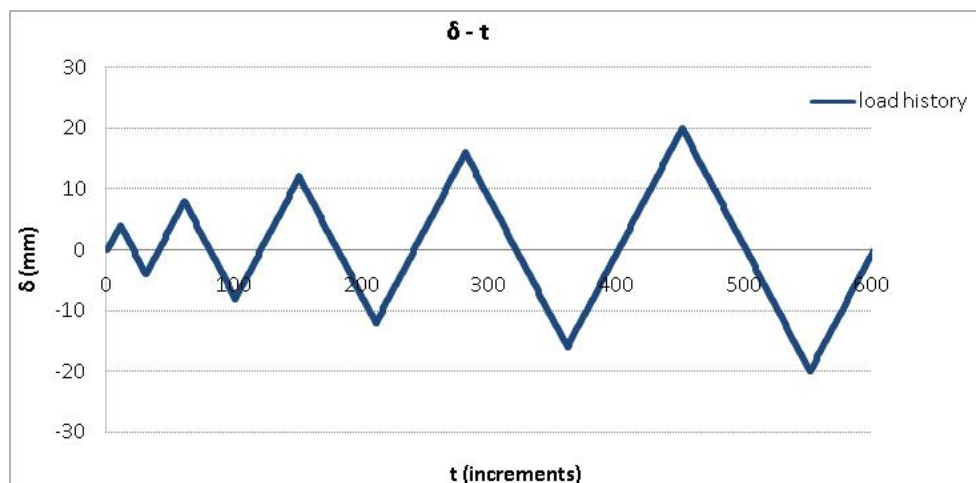


(c)



(d)

Σχ. 7.3 (συν.) Τρισδιάστατη και δισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση των μεταλλικών συνδέσμων (a) Σ1, (b) Σ2, (c) Σ3 και (d) Σ4.



Σχ. 7.4 Ιστορικό ανακυκλιζόμενης φόρτισης.

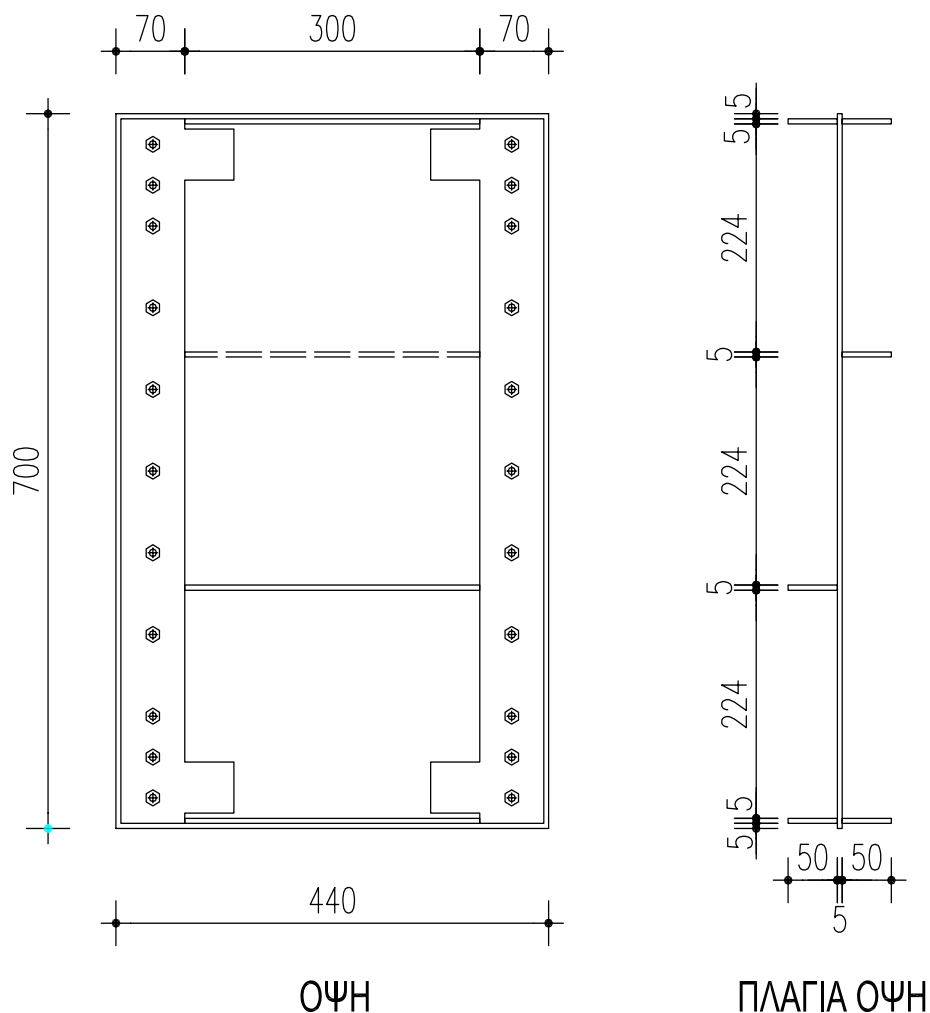
7.3 Αριθμητική προσομοίωση πετάσματος αλουμινίου

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η αριθμητική προσομοίωση του πετάσματος αλουμινίου, η μορφή και οι διαστάσεις του οποίου φαίνονται στο σχήμα 7.5. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, το πέτασμα έχει πάχος ίσο με 5mm, ενώ σε επιλεγμένα σημεία φέρει εγκάρσιες ενισχύσεις διατομής 5x50mm, ώστε να περιορίζεται η πιθανότητα εμφάνισης τοπικών λυγισμών. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι στα κατακόρυφα άκρα του το πέτασμα ενισχύθηκε με δύο επιπλέον στρώσεις αλουμινίου, για να αποτραπούν φαινόμενα απόσχισης στις περιοχές αυτές. Για το υλικό θεωρήθηκε ελαστοπλαστική συμπεριφορά με $f_y / f_u = 85 / 100$. Στο σχήμα 7.6 παρουσιάζεται ο νόμος τάσεων - παραμορφώσεων που διέπει τη συμπεριφορά του αλουμινίου. Το μέτρο ελαστικότητας τέθηκε ίσο με 70 GPa και ο λόγος Poisson $\nu = 0.3$.

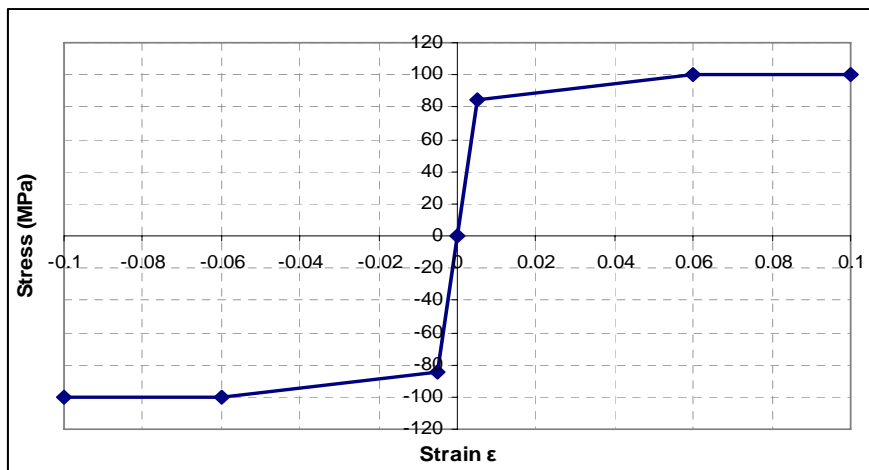
Δημιουργήθηκε εξ αρχής ένα δισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης, για το οποίο χρησιμοποιήθηκαν επίπεδα τετρακομβικά ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία επίπεδης έντασης. Και σε αυτή την περίπτωση, το πρόβλημα της συνεκτίμησης της τρίτης διάστασης του προβλήματος (κάθετα στο επίπεδο προσομοίωσης) αντιμετωπίστηκε με την απόδοση διαφορετικών τιμών στο πάχος των στοιχείων. Έτσι, στα στοιχεία που προσομοιώνουν το πέτασμα του αλουμινίου δόθηκε πάχος ίσο με 5mm, στα στοιχεία που προσομοιώνουν τις ενισχυμένες περιοχές των κατακόρυφων άκρων δόθηκε πάχος ίσο με 15mm και στα στοιχεία που αντιπροσωπεύουν τις εγκάρσιες ενισχύσεις δόθηκε πάχος ανάλογα με την καθ' ύψος θέση της κάθε ενίσχυσης (βλέπε πλάγια όψη του σχήματος 7.5). Πιο συγκεκριμένα, στα πεπερασμένα στοιχεία που προσομοιώνουν τις δύο ακραίες εγκάρσιες ενισχύσεις δόθηκε πάχος ίσο με 105mm, ενώ στα στοιχεία που προσομοιώνουν τις δύο μεσαίες εγκάρσιες ενισχύσεις δόθηκε πάχος ίσο με 55mm. Στο σχήμα 7.7a παρουσιάζεται το δισδιάστατο μοντέλο του υπό εξέταση πετάσματος μετά τη διακριτοποίηση. Με διαφορετικό χρώμα εμφανίζονται οι ομάδες στοιχείων στις οποίες έχουν δοθεί διαφορετικά πάχη, σε αντιστοιχία με τη γεωμετρία του προβλήματος. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.7b, έχουν προσομοιωθεί με ιδιαίτερη ακρίβεια και οι κοχλίες που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση του πετάσματος στο πλαίσιο Ο/Σ, καθώς επίσης και οι αντίστοιχες οπές. Μεταξύ του κάθε κοχλία και της αντίστοιχης οπής του αριθμητικού προσομοιώματος θεωρήθηκαν συνθήκες μονόπλευρης

επαφής. Στη λεπτομέρεια του σχήματος 7.7b παρουσιάζονται με διαφορετικό χρώμα οι κοχλίες και το τμήμα του πετάσματος αλουμινίου που φέρει τις οπές, καθώς αυτά έχουν οριστεί ως διαφορετικά παραμορφώσιμα σώματα μεταξύ των οποίων θεωρούνται οι συνθήκες επαφής.

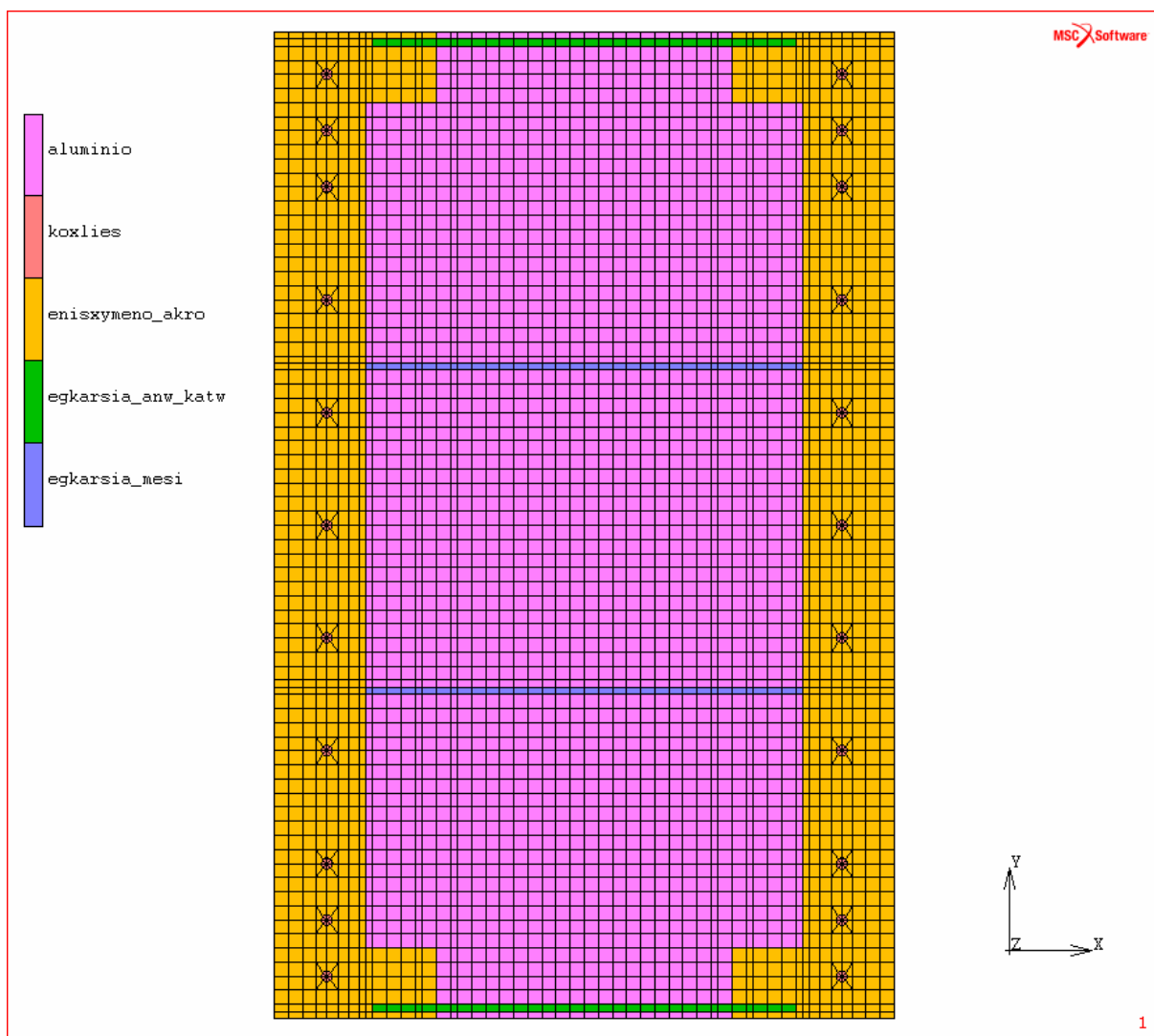
Οι συνθήκες φόρτισης παρέμειναν οι ίδιες με εκείνες των μεταλλικών συνδέσμων. Το πέτασμα αλουμινίου υποβλήθηκε σε οριζόντια στατική μονοτονική και στατική πλήρως ανακυκλιζόμενη φόρτιση με τη μορφή επιβεβλημένων μετατοπίσεων. Η μέγιστη επιβαλλόμενη μετατόπιση ήταν σε κάθε περίπτωση ίση με $\pm 20\text{mm}$. Το ιστορικό της ανακυκλιζόμενης φόρτισης φαίνεται στο σχήμα 7.4. Η επίλυση πραγματοποιήθηκε και πάλι με τη χρήση του λογισμικού MSC-MARC.



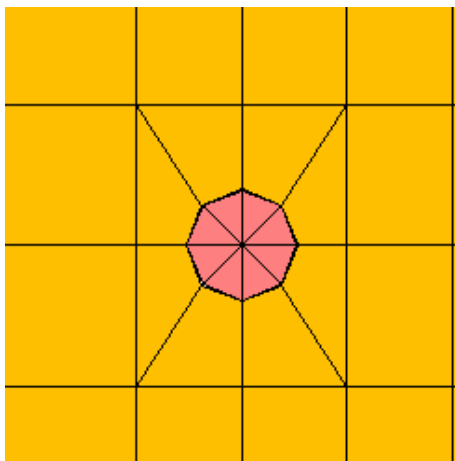
Σχ. 7.5 Πέτασμα αλουμινίου (οι διαστάσεις σε mm).



Σχ. 7.6 Νόμος τάσεων - παραμορφώσεων αλουμινίου.



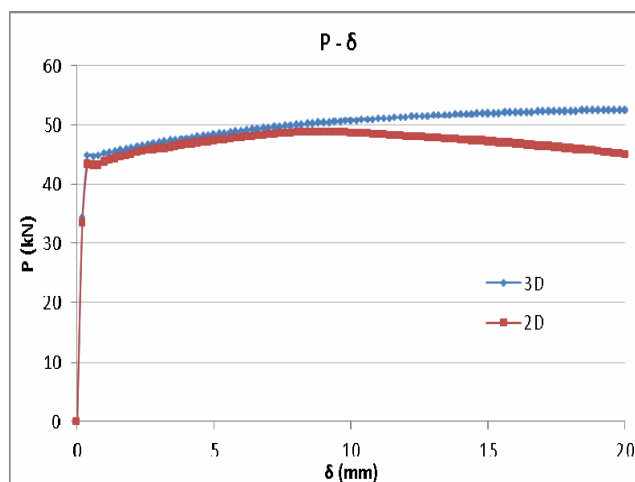
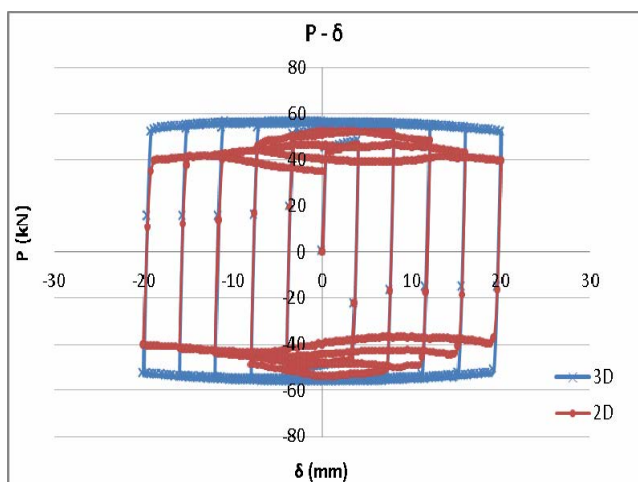
Σχ. 7.7a Δισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα του πετάσματος αλουμινίου.



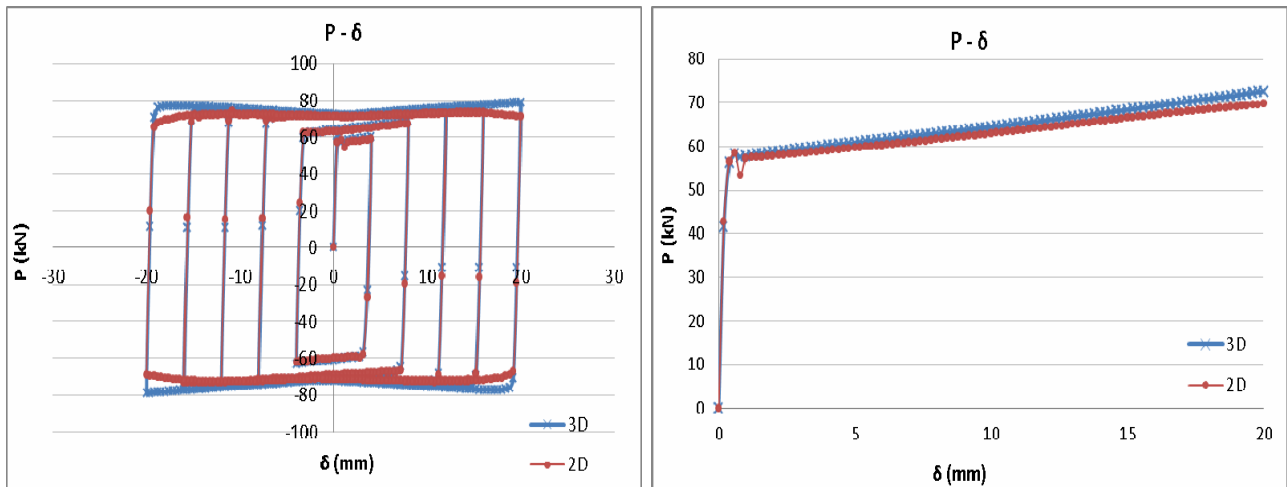
Σχ. 7.7b Λεπτομέρεια της διακριτοποίησης των κοχλίων και του τμήματος του πετάσματος αλουμινίου που φέρει τις οπές, μεταξύ των οποίων θεωρούνται συνθήκες επαφής.

7.4 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

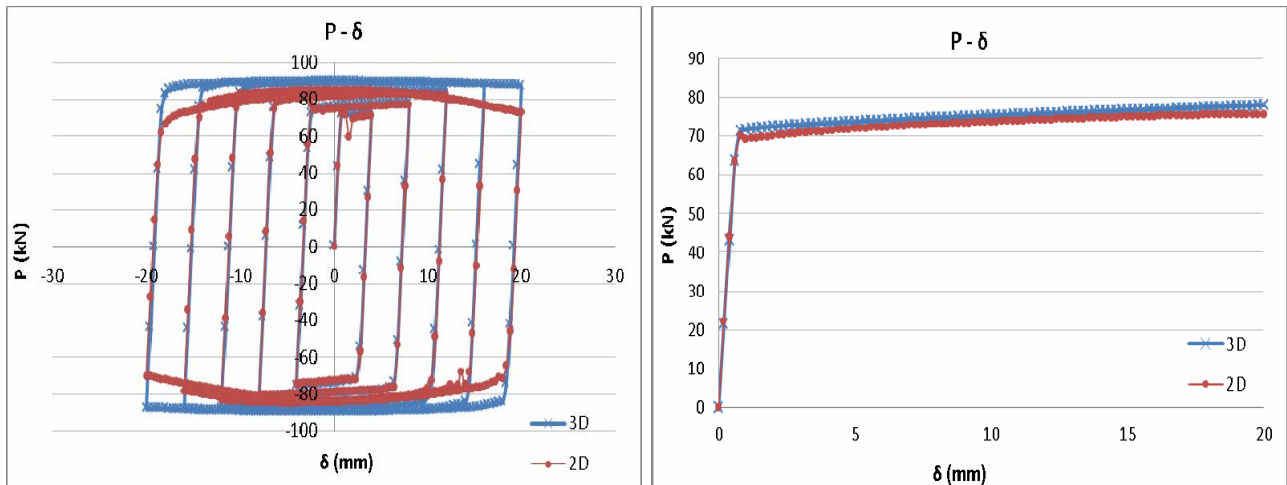
Στην παρούσα παράγραφο παρατίθενται τα αποτελέσματα των αναλύσεων όλων των προαναφερθέντων αριθμητικών μοντέλων. Ουσιαστικά πρόκειται για την εκτιμώμενη ιδεατή συμπεριφορά και αντοχή, τόσο των μεταλλικών συνδέσμων, όσο και του πετάσματος αλουμινίου. Αρχικά, στα σχήματα 7.8, 7.9, 7.10 και 7.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τους μεταλλικούς συνδέσμους Σ1, Σ2, Σ3 και Σ4, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται οι καμπύλες φορτίου - μετακίνησης που προκύπτουν από το τρισδιάστατο και δισδιάστατο προσομοίωμα, σε στατική μονοτονική και στατική πλήρως ανακυκλιζόμενη φόρτιση, για κάθε σύνδεσμο ξεχωριστά. Από τη σύγκριση των καμπυλών προκύπτει ότι τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης και δισδιάστατης ανάλυσης βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ τους και συνεπώς, η δισδιάστατη προσομοίωση των μεταλλικών συνδέσμων αποδεικνύεται επαρκούς ακρίβειας ώστε να εφαρμοστεί στη μετέπειτα προσομοίωση των ενισχυμένων πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος.



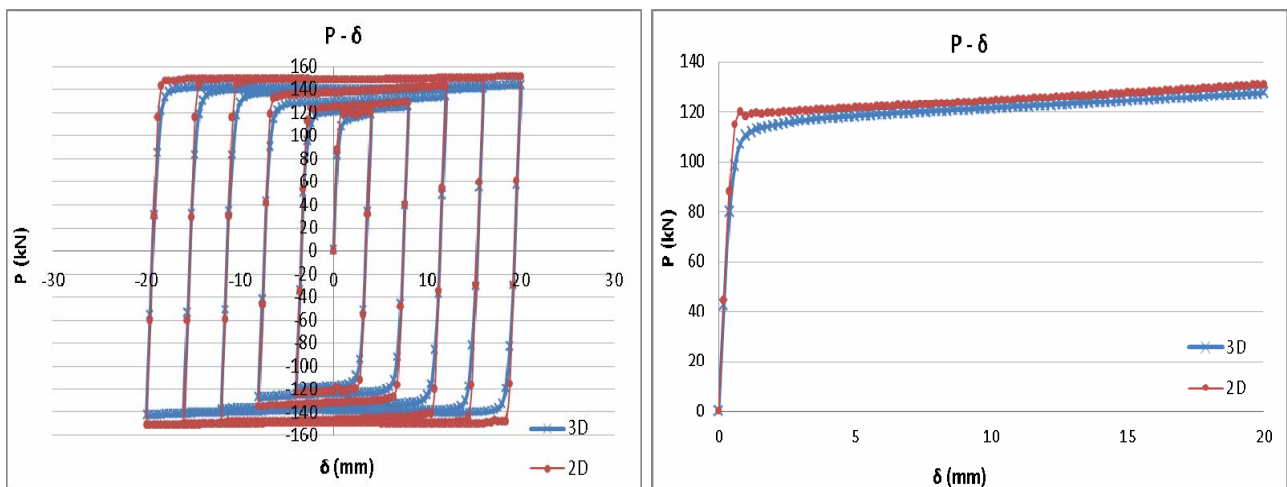
Σχ. 7.8 Καμπύλες P - δ της τρισδιάστατης και δισδιάστατης ανάλυσης για το μεταλλικό σύνδεσμο Σ1 σε στατική πλήρως ανακυκλιζόμενη και στατική μονοτονική φόρτιση.



Σχ. 7.9 Καμπύλες $P-\delta$ της τρισδιάστατης και δισδιάστατης ανάλυσης για το μεταλλικό σύνδεσμο Σ2 σε στατική πλήρως ανακυκλιζόμενη και στατική μονοτονική φόρτιση.

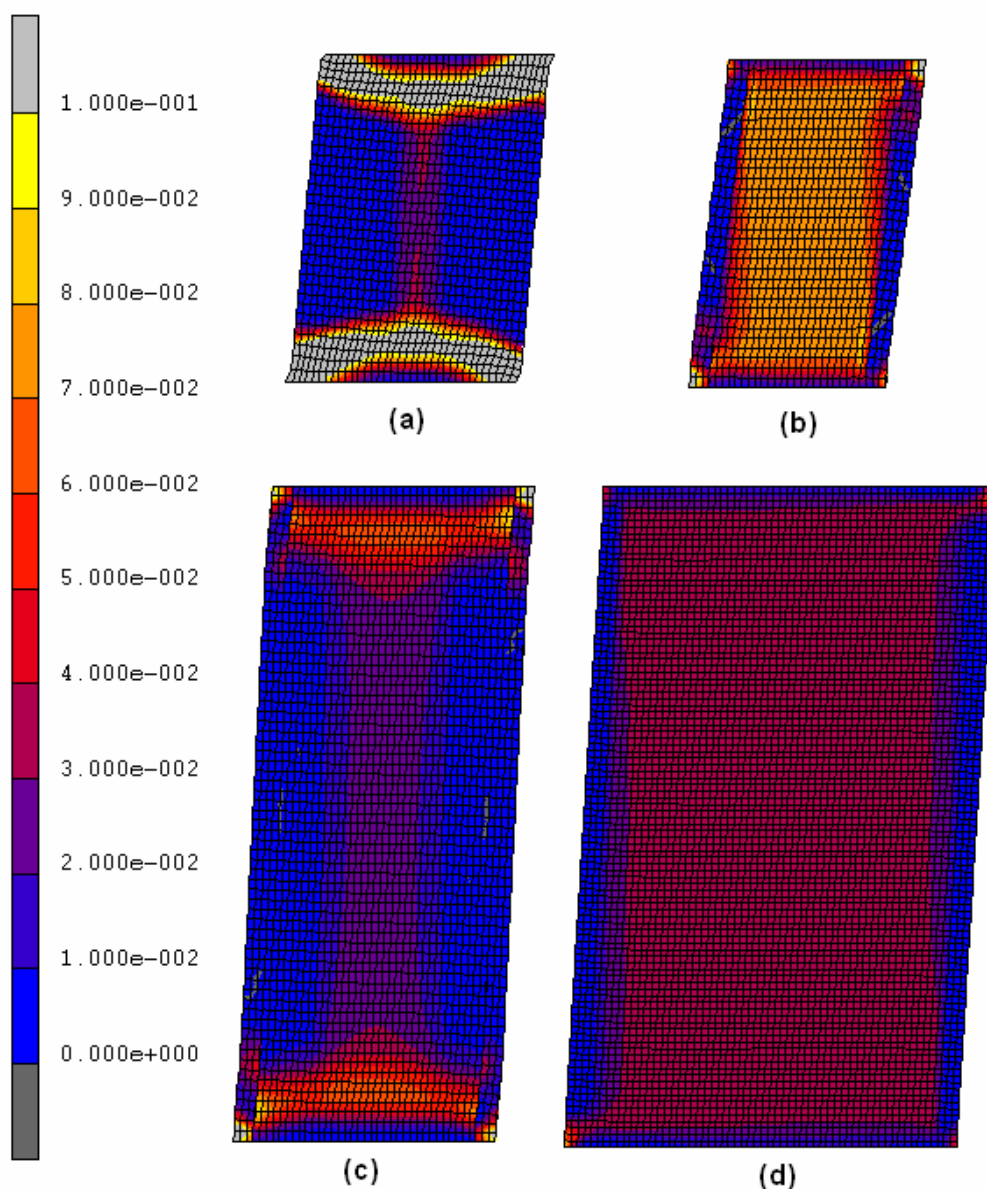


Σχ. 7.10 Καμπύλες $P-\delta$ της τρισδιάστατης και δισδιάστατης ανάλυσης για το μεταλλικό σύνδεσμο Σ3 σε στατική πλήρως ανακυκλιζόμενη και στατική μονοτονική φόρτιση.



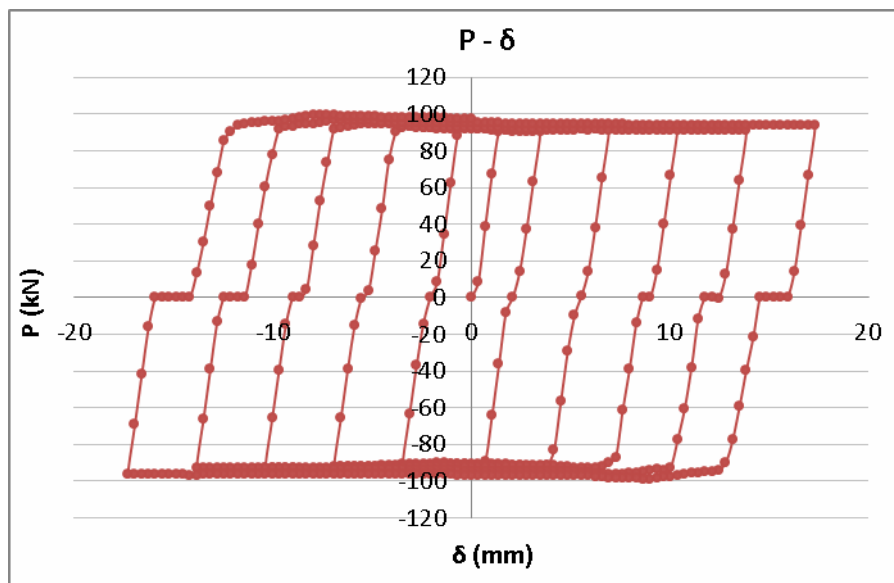
Σχ. 7.11 Καμπύλες P-δ της τρισδιάστατης και δισδιάστατης ανάλυσης για το μεταλλικό σύνδεσμο Σ4 σε στατική πλήρως ανακυκλιζόμενη και στατική μονοτονική φόρτιση.

Επίσης, στο σχήμα 7.12 παρουσιάζονται τα πεδία των πλαστικών παραμορφώσεων των τεσσάρων μεταλλικών συνδέσμων Σ1, Σ2, Σ3 και Σ4 για μετακίνηση ίση με 12mm. Παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του συνδέσμου ορθογωνικής διατομής Σ1 είναι μικτού καμπτικού - διατμητικού τύπου με συγκέντρωση των πλαστικών παραμορφώσεων στο άνω και κάτω τμήμα του συνδέσμου (σχήμα 7.12a). Επίσης, η συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι μεταλλικοί σύνδεσμοι διατομής διπλού ταυ, Σ2 και Σ4, είναι μικτού καμπτικού - διατμητικού τύπου, με πλαστικές παραμορφώσεις να κατανέμονται σχεδόν ομοιόμορφα σε όλο τον κορμό των συνδέσμων αλλά και ταυτόχρονα συγκεντρωμένες παραμορφώσεις στα πέλματά τους, στην κεφαλή και τον πόδα των συνδέσμων (σχήματα 7.12b και 7.12d). Τέλος, ο σύνδεσμος Σ3 παρουσιάζει μικτή καμπτική και διατμητική συμπεριφορά, με σημαντικότερη τη συγκέντρωση των πλαστικών παραμορφώσεων στα πέλματα, στο άνω και κάτω τμήμα του συνδέσμου (σχήμα 7.12c).

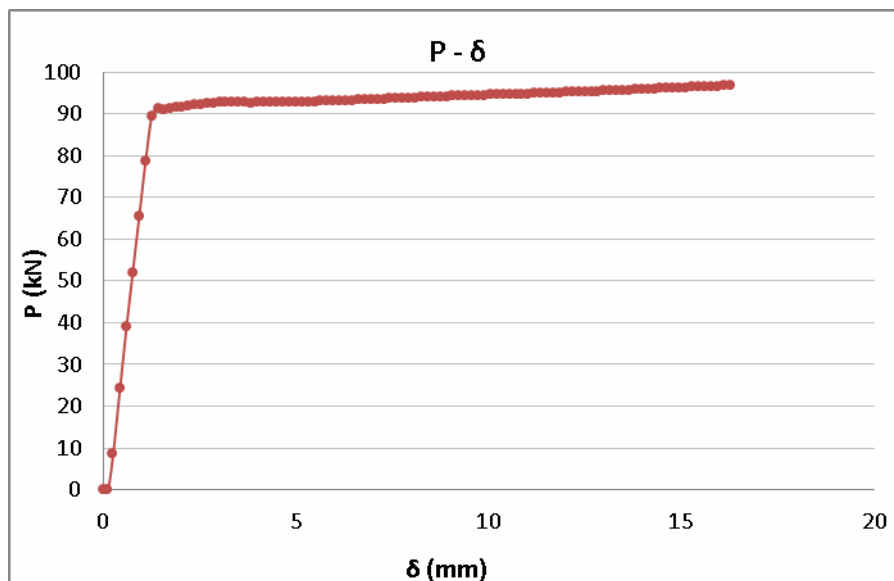


Σχ. 7.12 Πεδία πλαστικών παραμορφώσεων των μεταλλικών συνδέσμων
(α) Σ1, (β) Σ2, (γ) Σ3 και (δ) Σ4.

Στη συνέχεια, στα σχήματα 7.13 και 7.14 παρουσιάζονται οι καμπύλες δύναμης - μετακίνησης, όπως προέκυψαν από την ανάλυση του δισδιάστατου προσομοιώματος για το πέτασμα αλουμινίου, για τις δύο περιπτώσεις φόρτισης, αντίστοιχα. Η σύγκριση της εκτιμώμενης αντοχής του πετάσματος σε σχέση με τις τιμές της αντοχής των μεταλλικών συνδέσμων αποδεικνύει την εύστοχη επιλογή διαστάσεων και γενικότερα τον ορθό σχεδιασμό του πετάσματος αλουμινίου έτσι ώστε η φέρουσα ικανότητά του να είναι αντίστοιχη με εκείνη των μεταλλικών συνδέσμων.



Σχ. 7.13 Καμπύλη P-δ της δισδιάστατης ανάλυσης για το πέτασμα αλουμινίου σε στατική πλήρως ανακυκλιζόμενη φόρτιση.



Σχ. 7.14 Καμπύλη P-δ της δισδιάστατης ανάλυσης για το πέτασμα αλουμινίου σε στατική μονοτονική φόρτιση.

8. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

8.1 Εισαγωγή

Μετά την εκτίμηση της συμπεριφοράς των τεσσάρων τύπων μεμονωμένων μεταλλικών συνδέσμων καθώς και του πετάσματος αλουμινίου μέσω αριθμητικής προσομοίωσης, έγινε προσπάθεια μελέτης της συμπεριφοράς ολόκληρου του συστήματος του γυμνού και των ενισχυμένων πλαισίων. Πιο συγκεκριμένα, στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αριθμητικά προσομοιώματα του γυμνού πλαισίου F1, των ενισχυμένων πλαισίων F2, F3, F4 και F5 που ενισχύονται με τους μεταλλικούς συνδέσμους Σ1, Σ2, Σ3 και Σ4, αντίστοιχα, καθώς και του πλαισίου P2 που ενισχύεται με το πέτασμα αλουμινίου.

Όλα τα παραπάνω πλαίσια προσομοιώθηκαν αριθμητικά, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις κρίσιμες μη - γραμμικότητες, όπως η ρηγμάτωση του σκυροδέματος, η διαρροή του χαλύβδινου οπλισμού και η διαρροή του μεταλλικού συνδέσμου ή του πετάσματος αλουμινίου. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης συγκρίθηκαν στη συνέχεια με τα αντίστοιχα πειραματικά.

8.2 Αριθμητική προσομοίωση τρισδιάστατου προβλήματος μέσω δισδιάστατου προσομοιώματος

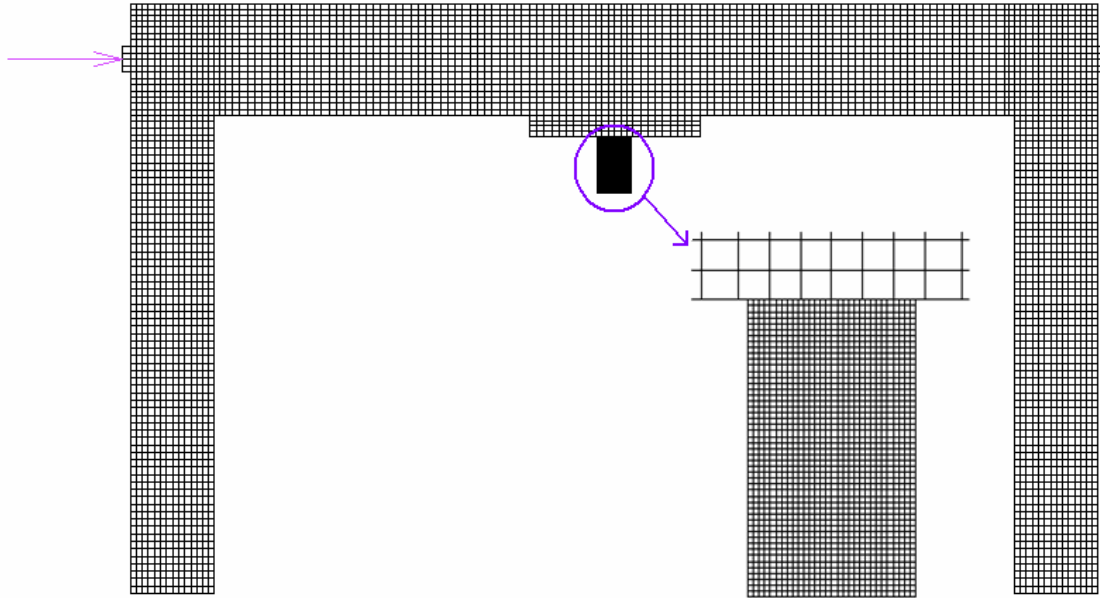
Η αριθμητική προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών παρουσίασε μια σειρά δυσκολιών εξαιτίας της πολυπλοκότητας του συστήματος και της ύπαρξης διάφορων μη - γραμμικών φαινομένων, όπως η ρηγμάτωση του σκυροδέματος και η πλαστικοποίηση του μεταλλικού συνδέσμου. Επίσης, προέκυψαν κάποια προβλήματα προσομοίωσης, τα οποία έπρεπε να λυθούν αποτελεσματικά. Στις παρακάτω υποπαραγράφους παρουσιάζονται διεξοδικά οι τρόποι αντιμετώπισης της κάθε μιας παραμέτρου του προβλήματος, ξεχωριστά.

8.2.1 Γεωμετρικές ιδιότητες

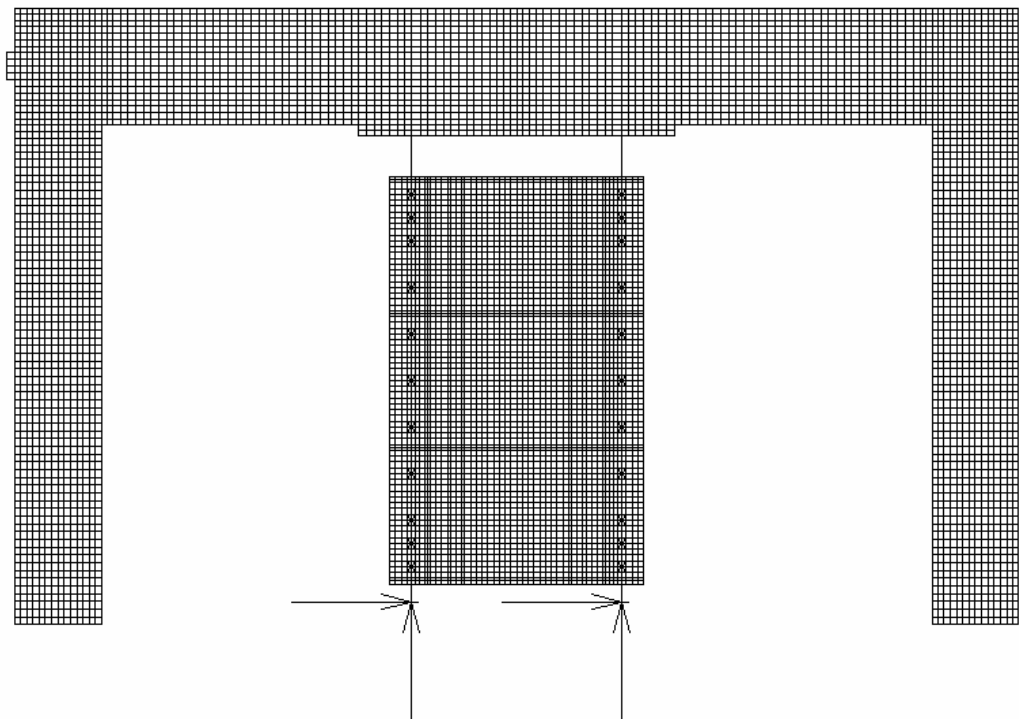
Γενικά, ένα τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα θεωρείται πιο ρεαλιστικό και αξιόπιστο εξαιτίας της φύσης των πεπερασμένων στοιχείων τα οποία χρησιμοποιεί. Παρόλα αυτά, έχει το σημαντικό μειονέκτημα του μεγάλου υπολογιστικού κόστους. Έτσι προέκυψε η ανάγκη δημιουργίας ενός απλούστερου δισδιάστατου προσομοιώματος, ικανού να περιγράφει με επαρκή ακρίβεια τη συνολική συμπεριφορά του υπό μελέτη προβλήματος.

Για την υλοποίηση του δισδιάστατου προσομοιώματος χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι πεπερασμένων στοιχείων. Για την προσομοίωση του σκυροδέματος, του μεταλλικού συνδέσμου και του πετάσματος αλουμινίου, καθώς και του στοιχείου σχήματος Π που συνδέει τον κατακόρυφο μεταλλικό σύνδεσμο με το μέσο του ζυγώματος, χρησιμοποιήθηκαν τετρακομβικά επίπεδα πεπερασμένα στοιχεία επίπεδης έντασης, ενώ για την προσομοίωση του διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού χρησιμοποιήθηκαν ραβδωτά στοιχεία δοκού σταθερής διατομής. Στο σχήμα 8.1 παρουσιάζεται το αριθμητικό προσομοίωμα του ενισχυμένου πλαισίου F3. Στο ίδιο σχήμα δίδεται και η λεπτομέρεια του διακριτοποιημένου μεταλλικού συνδέσμου. Λεπτομέρειες για τη σύνδεση των δύο κανάβων (στους οποίους έχει

χρησιμοποιηθεί για προφανείς λόγους διαφορετική πυκνότητα διακριτοποίησης) δίδονται παρακάτω. Στο σχήμα 8.2 παρουσιάζεται ενδεικτικά και το αριθμητικό προσομοίωμα του πλαισίου που ενισχύεται με το πέτασμα αλουμινίου.

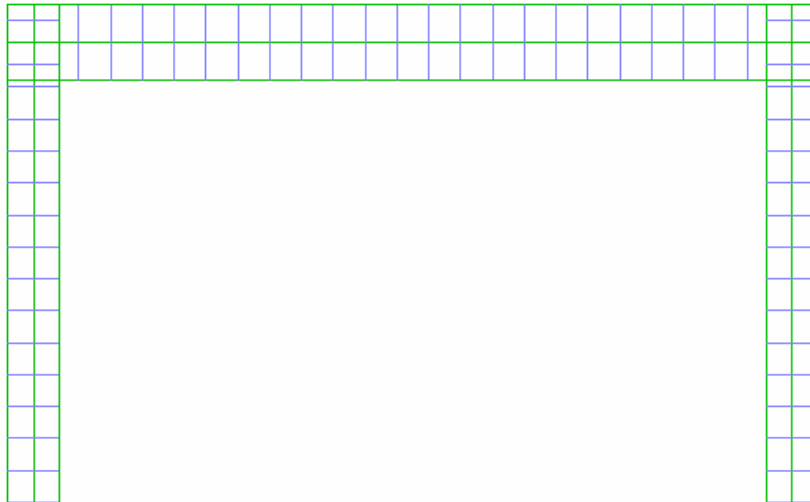


Σχ. 8.1 Το δισδιάστατο προσομοίωμα του ενισχυμένου πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος και λεπτομέρεια του διακριτοποιημένου μεταλλικού συνδέσμου.

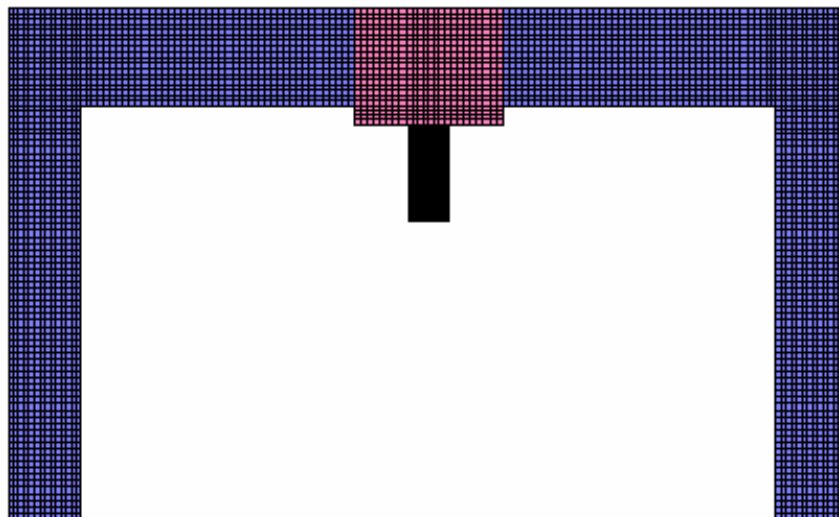


Σχ. 8.2 Το δισδιάστατο προσομοίωμα του πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένου με το πέτασμα αλουμινίου.

Πρέπει να σημειωθεί επίσης, ότι το δισδιάστατο αυτό προσομοίωμα του πλαισίου Ο/Σ αποτελείται από διάφορα επάλληλα επίπεδα πεπερασμένων στοιχείων, κάθε ένα από τα οποία προσομοιώνει ένα ξεχωριστό τμήμα του κάθε δοκιμίου. Τα επάλληλα αυτά επίπεδα πεπερασμένων στοιχείων συνδέονται μεταξύ τους σε κοινούς κόμβους, έχουν επομένως κοινές μετατοπίσεις. Στο σχήμα 8.3 παρουσιάζονται ενδεικτικά, με διαφορετικό χρώμα, τα διάφορα σύνολα πεπερασμένων στοιχείων που αποτελούν το αριθμητικό προσομοίωμα του δοκιμίου F4.



(a)



(b)

Σχ. 8.3 Τα επάλληλα σύνολα στοιχείων του δισδιάστατου μοντέλου, που προσομοιώνουν
α) το διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό και β) το σκυρόδεμα, το μεταλλικό σύνδεσμο και το
μεταλλικό στοιχείο σχήματος Π που συνδέει το σύνδεσμο με το μέσο του ζυγώματος.

Το πρόβλημα της συνεκτίμησης της τρίτης διάστασης του συστήματος (κάθετα στο επίπεδο προσομοίωσης) αντιμετωπίστηκε με την απόδοση διαφορετικών τιμών στο πάχος των διαφόρων στοιχείων. Συγκεκριμένα, στα επιφανειακά στοιχεία που προσομοιώνουν το σκυρόδεμα της δοκού και των στύλων δόθηκε πάχος ίσο με το πλάτος των διατομών των μελών, δηλαδή 100mm για τη δοκό και 150mm για τους στύλους. Τα πεπερασμένα στοιχεία που προσομοιώνουν το διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό είναι δικομβικά στοιχεία δοκού, σταθερής διατομής, συνδεδεμένα στο ίδιο δίκτυο κόμβων με τα επιφανειακά στοιχεία. Στα στοιχεία αυτά δόθηκε εμβαδόν διατομής ίσο με το ισοδύναμο εμβαδόν των ράβδων του διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού αντίστοιχα. Έτσι, για τη σειρά των στοιχείων που προσομοιώνουν τον άνω και κάτω οπλισμό των μελών δόθηκε εμβαδόν διατομής ίσο με $3 \times 28.26 = 84.78 \text{ mm}^2$ (3Ø6) και στα στοιχεία του διαμήκους οπλισμού που βρίσκεται στο μέσο της διατομής των μελών δόθηκε εμβαδόν ίσο με $2 \times 28.26 = 56.52 \text{ mm}^2$ (2Ø6). Στη σειρά των στοιχείων που αντιπροσωπεύουν τον εγκάρσιο οπλισμό δόθηκε εμβαδόν ίσο με $2 \times 5.72 = 11.44 \text{ mm}^2$, έτσι ώστε να υπολογιστούν τα δύο κατακόρυφα σκέλη των δίτητων συνδετήρων Ø2.7.

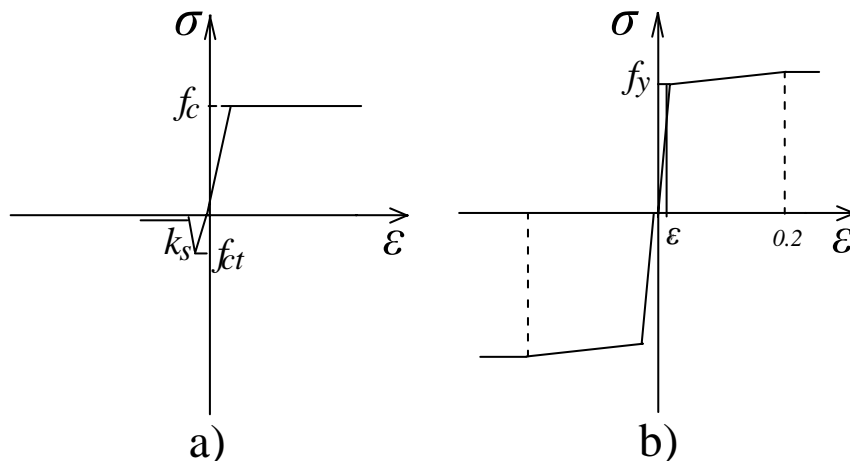
Για την προσομοίωση των μεταλλικών συνδέσμων μορφώθηκε ένα πολύ πιο πυκνό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων επίπεδης έντασης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 8.1. Η πυκνή διακριτοποίηση των μεταλλικών συνδέσμων κρίθηκε απαραίτητη για την ακριβέστερη προσομοίωση της συμπεριφοράς τους που κυριαρχεί στη συνολική συμπεριφορά των ενισχυμένων πλαισίων. Τα δύο δίκτυα πεπερασμένων στοιχείων, εκείνο που αντιστοιχεί στο πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος και εκείνο που αντιστοιχεί στο μεταλλικό σύνδεσμο, ενώθηκαν μέσω κινηματικών συνθηκών, καθώς οι κόμβοι των στοιχείων τους στο κοινό τους όριο δεν συμπίπτουν. Για το πρόβλημα της συνεκτίμησης της τρίτης διάστασης, τόσο των μεταλλικών συνδέσμων, όσο και του πετάσματος αλουμινίου, υιοθετήθηκε και πάλι η διαδικασία απόδοσης διαφορετικών τιμών πάχους στα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία που προσομοιώνουν τις διαφορετικές γεωμετρίες αυτών των στοιχείων ενίσχυσης. Οι διαφορετικές αυτές τιμές πάχους των στοιχείων για κάθε μεταλλικό σύνδεσμο και για το πέτασμα αλουμινίου αναφέρονται αναλυτικά στις παραγράφους 7.2 και 7.3, αντίστοιχα.

8.2.2 Ιδιότητες υλικών

Καθώς τα υπό μελέτη πλαίσια Ο/Σ σχεδιάστηκαν σύμφωνα με παλαιότερους Κανονισμούς, χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τους χαμηλής αντοχής σκυρόδεμα με θλιπτική αντοχή ίση με 16 MPa και εφελκυστική αντοχή ίση με 2.1 MPa. Για τα στοιχεία που προσομοιώνουν το σκυρόδεμα θεωρήθηκε ελαστοπλαστική συμπεριφορά κατά τη θλίψη και δυνατότητα ρηγμάτωσης μετά την εξάντληση της εφελκυστικής του αντοχής. Ο νόμος τάσεων – παραμορφώσεων που διέπει τη συμπεριφορά του σκυροδέματος φαίνεται στο σχήμα 8.4a. Η εξάντληση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος μετά τη ρηγμάτωση εκφράζεται μέσω του φθίνοντα κλάδου του νόμου τάσεων - παραμορφώσεων, με κλίση $k_s=10$ GPa. Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος θεωρήθηκε ίσο με 28.4 GPa και ο λόγος Poisson $\nu=0.16$.

Για το χάλυβα του διαμήκους οπλισμού ισχύει $f_y / f_u = 442 / 517$, ενώ για το χάλυβα του εγκάρσιου οπλισμού $f_y / f_u = 377 / 428$. Η συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμού διέπεται από

ελαστοπλαστικό νόμο με κρατυνόμενο πλαστικό κλάδο (σχήμα 8.4b). Το μέτρο ελαστικότητας είναι ίσο με 200 GPa και ο λόγος Poisson $\nu=0.20$. Επίσης, για το χάλυβα των συνδέσμων ισχύει $f_y / f_u = 271 / 366$ και για το πέτασμα αλουμινίου $f_y / f_u = 85 / 100$. Για τους μεταλλικούς συνδέσμους θεωρήθηκε μέτρο ελαστικότητας ίσο με 210 GPa και λόγος Poisson $\nu=0.30$, ενώ για το αλουμίνιο θεωρήθηκε μέτρο ελαστικότητας ίσο με 70 GPa και λόγος Poisson $\nu=0.30$. Οι νόμοι τάσεων - παραμορφώσεων που διέπουν τη συμπεριφορά των στοιχείων που προσομοιώνουν τους μεταλλικούς συνδέσμους και το πέτασμα αλουμινίου έχουν παρουσιαστεί στα σχήματα 7.2 και 7.6, αντίστοιχα.



Σχ. 8.4 Νόμοι τάσεων - παραμορφώσεων που διέπουν τη συμπεριφορά α) του σκυροδέματος και β) των χαλύβδινων οπλισμών του κάθε προσομοιώματος.

8.2.3 Συνοριακές συνθήκες – διαδικασία επιβολής της φόρτισης

Αρχικά, όλα τα δοκίμια (F1, F2, F3, F4, F5 και P2) υποβλήθηκαν σε οριζόντια ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Στη συνέχεια, μια δεύτερη σειρά δοκιμών, πανομοιότυπων με τα αρχικά, μελετήθηκε με πρόσθετο σταθερό αξονικό φορτίο ίσο με 80 kN σε κάθε στύλο (δοκίμια F1,N, F2,N, F3,N, F4,N και F5,N). Το οριζόντιο κυκλικό φορτίο ασκείται σταδιακά με τη μορφή επιβεβλημένων μετατοπίσεων, ενώ το συνεχές κατακόρυφο αξονικό φορτίο ασκείται ως σημειακό φορτίο, ακριβώς πριν την επιβολή της ανακυκλιζόμενης φόρτισης.

Η προσομοίωση της διαδικασίας επιβολής της φόρτισης δημιούργησε κάποιες δυσκολίες, οι οποίες έπρεπε να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά. Γενικά, δεν ήταν δυνατό να επιβληθεί το φορτίο απευθείας σε κάποιο κόμβο του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων διότι, εξαιτίας των μη - γραμμικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος (πλαστικοποίηση και ρηγμάτωση), τα γειτονικά σ' αυτόν τον κόμβο στοιχεία παρουσίαζαν σημαντικές παραμορφώσεις. Πιο συγκεκριμένα, όταν το φορτίο είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία θλιπτικών τάσεων στην περιοχή επιβολής του, οι μεγάλες τιμές των δυνάμεων που εμφανίζονταν στους κόμβους επιβολής του φορτίου είχαν ως αποτέλεσμα την πρόωρη πλαστικοποίηση του σκυροδέματος και τη δημιουργία ενός μη πραγματικού πεδίου τάσεων. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού τοποθετήθηκε σε κάθε θέση επιβολής φορτίου ένα μεταλλικό πλακίδιο, μέσω του οποίου ασκείται το αντίστοιχο φορτίο.

Αντίθετα, κατά την αντιστροφή της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, το επιβεβλημένο φορτίο είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία εφελκυστικών τάσεων στην περιοχή επιβολής του. Λόγω της δυνατότητας ρηγματώσης του σκυροδέματος, εμφανίζονταν τοπικά συγκεντρώσεις τάσεων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μη πραγματικών ρηγματώσεων από τα πρώτα κιόλας βήματα της φόρτισης. Το αποτέλεσμα ήταν η συγκέντρωση των παραμορφώσεων γύρω από τα σημεία επιβολής της φόρτισης, η καταστροφή του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων στην περιοχή αυτή και τελικά ο πρόωρος τερματισμός της αριθμητικής διαδικασίας. Έτσι, για την επιβολή της ανακυκλιζόμενης φόρτισης υιοθετήθηκε ένα σύστημα αποτελούμενο από δύο πλακίδια, τα οποία τοποθετήθηκαν στην αριστερή και δεξιά πλευρά του πλαισίου αντίστοιχα, στον άξονα επιβολής του φορτίου. Μεταξύ των πλακιδίων και του δοκιμίου θεωρήθηκαν συνθήκες μονόπλευρης επαφής και στη συνέχεια, τα πλακίδια ενώθηκαν μεταξύ τους με δύο άκαμπτες ευθύγραμμες ράβδους έτσι ώστε να επιτευχθεί η εφαρμογή της φόρτισης και προς τις δύο κατευθύνσεις. Η ανακυκλιζόμενη φόρτιση επιβλήθηκε μέσω του συστήματος των πλακιδίων. Έτσι, εξασφαλίστηκε η μεταφορά αποκλειστικά και μόνον θλιπτικών δυνάμεων στο δοκίμιο μέσω των αντίστοιχων επιφανειών επαφής και για τις δύο διευθύνσεις της φόρτισης. Το προσομοίωμα αυτό, δημιουργεί συνθήκες φόρτισης αντίστοιχες με αυτές που εμφανίζονται στα πειραματικά δοκίμια.

Τέλος, αναφορικά με τις συνοριακές συνθήκες, για το γυμνό πλαίσιο που φέρει τη μεταλλική διάταξη μορφής Λ, καθώς και για τα πλαίσια που ενισχύονται με τους μεταλλικούς συνδέσμους, θεωρήθηκε πάκτωση στις θέσεις όπου οι διαγώνιες μεταλλικές ράβδοι υψηλής δυστένειας και αντοχής συνδέονται με το πλαίσιακό σύστημα και τους μεταλλικούς συνδέσμους. Το σκεπτικό της θεώρησης της πάκτωσης στα σημεία αυτά, βασίστηκε καταρχήν στο γεγονός ότι οι ράβδοι είναι υπερδιαστασιολογημένες, έτσι ώστε να μην αποτελούν παράμετρο του υπό μελέτη προβλήματος, τόσο κατά την πειραματική όσο και κατά την αριθμητική διαδικασία.

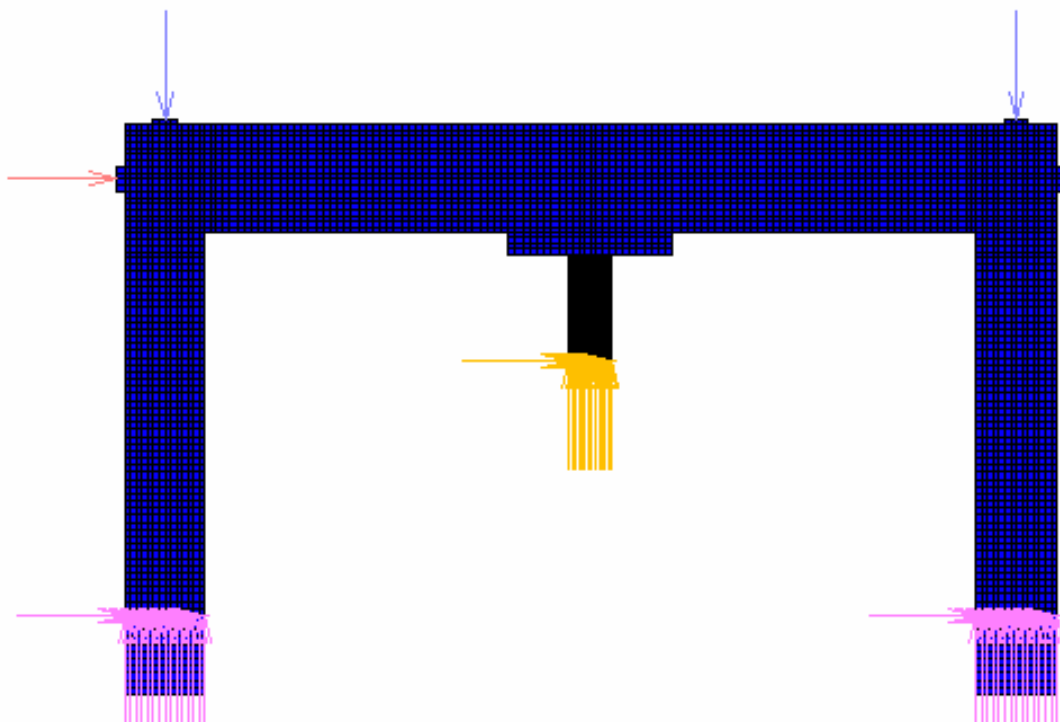
Επιπλέον, έγιναν και υπολογισμοί για να διαπιστωθεί η ενδοσιμότητα του συστήματος των ράβδων δικτύωσης στο σημείο όπου αυτό συνδέεται με το μεταλλικό σύνδεσμο. Αρχικά, για το σύνδεσμο που εμφάνισε τη μεγαλύτερη αντίσταση υπολογίστηκε η ροπή που αναπτύσσεται στο κατώτερο μέρος του συνδέσμου, όπου έχει θεωρηθεί η πάκτωση ενώ στην πραγματικότητα υπάρχει η σύνδεση με τις ράβδους δικτύωσης. Η ροπή υπολογίστηκε για τη μέγιστη επιβαλλόμενη μετατόπιση. Στη συνέχεια, προσομοιώθηκε το σύστημα των ράβδων δικτύωσης σε πρόγραμμα στατικής ανάλυσης και του επιβλήθηκε η παραπάνω υπολογισμένη ροπή στο θεωρητικό σημείο σύνδεσης των δύο ράβδων με το μεταλλικό σύνδεσμο, καθώς και οι αντίστοιχες οριζόντιες και κατακόρυφες δυνάμεις. Οι μετατοπίσεις και οι στροφές που προέκυψαν μετά από την ανάλυση ήταν σχεδόν μηδενικές (της τάξης των 0.2 του χιλιοστού) με αποτέλεσμα να αποδεικνύεται ότι, με τη θεώρηση της πάκτωσης στο σημείο σύνδεσης των ράβδων δικτύωσης με το σύνδεσμο, το σφάλμα που εισάγεται είναι αμελητέο.

Γενικά, πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι παραδοχές που έγιναν κατά τη δημιουργία του αριθμητικού προσομοιώματος είχαν ως στόχο την απλούστευση της διαδικασίας μόρφωσής του, καθώς και τη μείωση του υπολογιστικού κόστους έτσι ώστε το προτεινόμενο αριθμητικό προσομοίωμα να είναι διαχειρίσιμο και να μπορεί να μορφωθεί και να χρησιμοποιηθεί σχετικά εύκολα για την εξαγωγή γρήγορων και αξιόπιστων συμπερασμάτων. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και η ορθότητα των παραδοχών επιβεβαιώθηκε με τη σύγκριση των

αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά, αλλά και με την προσεκτική παρατήρηση των ευρημάτων των πειραματικών δοκιμών. Με τον τρόπο αυτό εξακριβώθηκε, σε κάθε περίπτωση ξεχωριστά, ότι οι παραδοχές που εισήχθησαν στο αριθμητικό προσομοίωμα δεν έρχονται σε αντίθεση με τα πραγματικά φαινόμενα και δεν αλλοιώνουν σε καμία περίπτωση τα αποτελέσματα.

Για το πλαίσιο που ενισχύεται με το πέτασμα αλουμινίου θεωρήθηκε άρθρωση στα σημεία σύνδεσης του πετάσματος με τη βάση του δοκιμίου, ενώ το άνω τμήμα του πετάσματος συνδέθηκε με το μεταλλικό στοιχείο σχήματος Π μέσω κατάλληλων συνδέσμων, έτσι ώστε να μεταφέρεται η οριζόντια μετατόπιση από το πλαίσιο στο πέτασμα. Παράλληλα, δεν μεταφέρεται από τους συνδέσμους αυτούς κατακόρυφη δύναμη. Έτσι, μέσω των συνδέσμων αυτών, προσομοιώνονται με ακρίβεια οι συνθήκες που δημιουργούνται στο αντίστοιχο πειραματικό δοκίμιο μέσω των οπών σχήματος οβάλ που έχουν επιλεγεί για τις συγκεκριμένες θέσεις, όπως έχει ήδη περιγραφθεί στην υποπαράγραφο 2.4.1.

Στο σχήμα 8.5 παρουσιάζονται ενδεικτικά όλες οι επιβαλλόμενες φορτίσεις και οι συνοριακές συνθήκες για την περίπτωση του αριθμητικού μοντέλου F4,N. Πιο συγκεκριμένα, με διαφορετικό χρώμα φαίνονται οι πακτώσεις που έχουν θεωρηθεί στα σημεία όπου οι διαγώνιες μεταλλικές ράβδοι συνδέονται με το πλαίσιο και το σύνδεσμο, καθώς και η επιβαλλόμενη οριζόντια ανακυκλιζόμενη φόρτιση και τα κατακόρυφα οριζόντια φορτία στους στύλους.



Σχ. 8.5 Οι επιβαλλόμενες φορτίσεις και οι θεωρούμενες συνοριακές συνθήκες του αριθμητικού μοντέλου, για την ενδεικτική περίπτωση του ενισχυμένου πλαισίου F4,N.

8.2.4 Διαδικασία αριθμητικής επίλυσης

Η επίλυση του υπό μελέτη προβλήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού MSC-MARC. Για το χειρισμό των μη - γραμμικοτήτων του προβλήματος εφαρμόστηκε η επαναληπτική διαδικασία Newton - Raphson. Η ανακυκλιζόμενη φόρτιση εφαρμόστηκε βήμα προς βήμα με τη μορφή επιβεβλημένων μετατοπίσεων δ και στη συνέχεια μετρήθηκαν οι προκύπτουσες δυνάμεις στα σημεία επιβολής της μετατόπισης. Υιοθετήθηκε κριτήριο σύγκλισης βασισμένο στις παρασιτικές δυνάμεις, το οποίο εκφράζεται με τη μορφή:

$$\|f - p\| < \varepsilon \|f\|$$

όπου f είναι οι επιβεβλημένες δυνάμεις και p οι εσωτερικές δυνάμεις του συστήματος, $f - p$ είναι το διάνυσμα των παρασιτικών δυνάμεων και ε η επιθυμητή ακρίβεια, η οποία τέθηκε ίση με 0.01 για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν.

9. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ

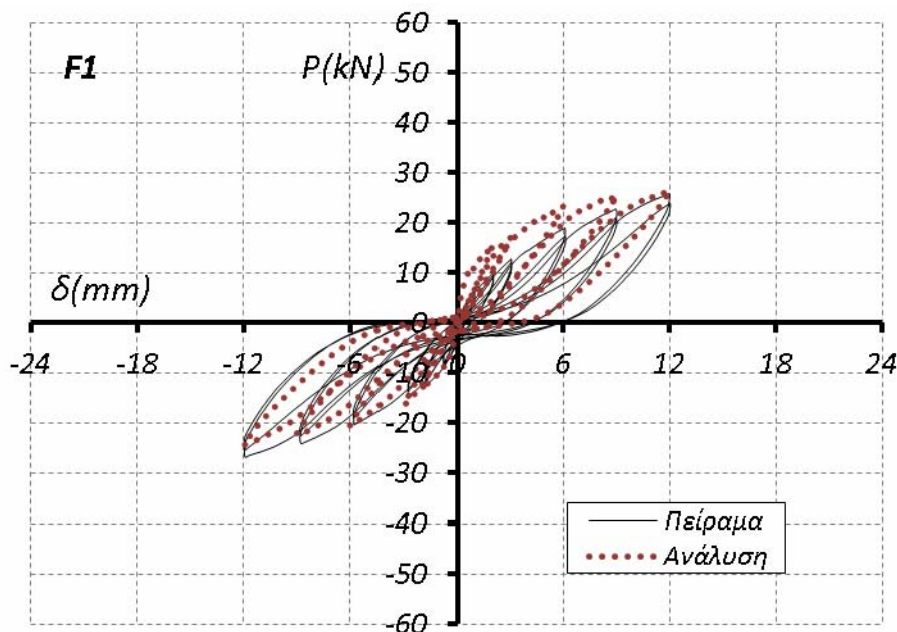
Αρχικά, θα πρέπει να σημειωθεί πως, γενικά, δεν ήταν δυνατή η προσομοίωση των εκτελεσθέντων πειραμάτων πέραν μιας μετατόπισης περίπου 12 mm. Αιτία ήταν οι σημαντικές ρηγματώσεις που εμφανίστηκαν για μετατοπίσεις μεγαλύτερες της μετακίνησης αυτής, οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα αριθμητικές αστάθειες που οδηγούσαν στον τερματισμό της εφαρμοζόμενης επαναληπτικής διαδικασίας Newton - Rapshon. Για τον ίδιο λόγο και προκειμένου να απλοποιηθεί η διαδικασία της αριθμητικής προσομοίωσης, επιβλήθηκε στο αριθμητικό προσομοίωμα μόνο ένας κύκλος φόρτισης για κάθε επίπεδο μετακίνησης, αντί για τους δύο κύκλους που περιλαμβάνει η ιστορία φόρτισης των πειραμάτων. Έτσι, ως προς αυτό το σημείο, οι πειραματικές καμπύλες δύναμης - μετακίνησης που χρησιμοποιούνται στην ενότητα αυτή για τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά, είναι στην πραγματικότητα μέρος μόνο των ολοκληρωμένων διαγραμμάτων P-δ του κάθε πειράματος. Τέλος, στην ενότητα αυτή, τα αριθμητικά αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται μεμονωμένα, αλλά πάντα σε σύγκριση με τα πειραματικά, έτσι ώστε μέσα από τη σύγκριση αυτή να αναδεικνύονται τόσο οι πιθανές αδυναμίες, όσο και η αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα των αριθμητικών προσομοιωμάτων.

9.1 Γυμνά πλαίσια

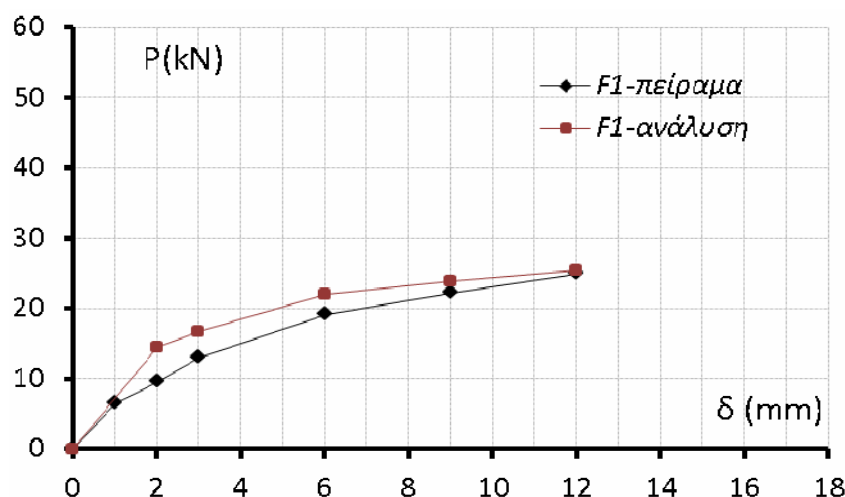
9.1.1 Πλαίσιο F1

Η σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών δύναμης - μετακίνησης για το γυμνό πλαίσιο F1 παρουσιάζεται στο σχήμα 9.1. Όπως φαίνεται, υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στα αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα για τις μικρότερες τιμές της μετατόπισης, ενώ για μεγαλύτερες τιμές υπάρχει αρκετά καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων όσον αφορά την αντοχή του φορέα. Οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν στους αρχικούς κύκλους φόρτισης οφείλονται κυρίως στην εμφάνιση των πρώτων ρωγμών, οι οποίες στη συνέχεια σταθεροποιούνται όταν δημιουργηθούν οι πλαστικές αρθρώσεις. Επίσης, το αριθμητικό προσομοίωμα δεν μπορεί να αποδόσει ιδιαίτερα ικανοποιητικά το κλείσιμο των ρωγμών και επομένως τη συμπεριφορά του δοκιμίου κατά την αντιστροφή της φόρτισης. Έτσι, το αριθμητικό μοντέλο αδυνατεί να προσεγγίσει επακριβώς τον κλάδο αποφόρτισης της πειραματικής καμπύλης φορτίου - μετατόπισης, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται στενότεροι βρόγχοι υστέρησης στην αντίστοιχη αριθμητική καμπύλη.

Στο σχήμα 9.2 παρουσιάζεται η σύγκριση των περιβαλλουσών φορτίου - μετατόπισης που προκύπτουν από τα πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα για το γυμνό πλαίσιο F1. Στο διάγραμμα αυτό δίνονται μόνο θετικές τιμές του φορτίου P για κάθε επίπεδο της επιβεβλημένης μετακίνησης, οι οποίες αντιστοιχούν στη μέση τιμή που εμφανίζεται για τους θετικούς και αρνητικούς κύκλους φόρτισης. Στο σχήμα απεικονίζονται καθαρά οι ασυμφωνίες που εμφανίζονται στους πρώτους κύκλους φόρτισης, ενώ για τους μετέπειτα κύκλους τα αποτελέσματα συγκλίνουν.

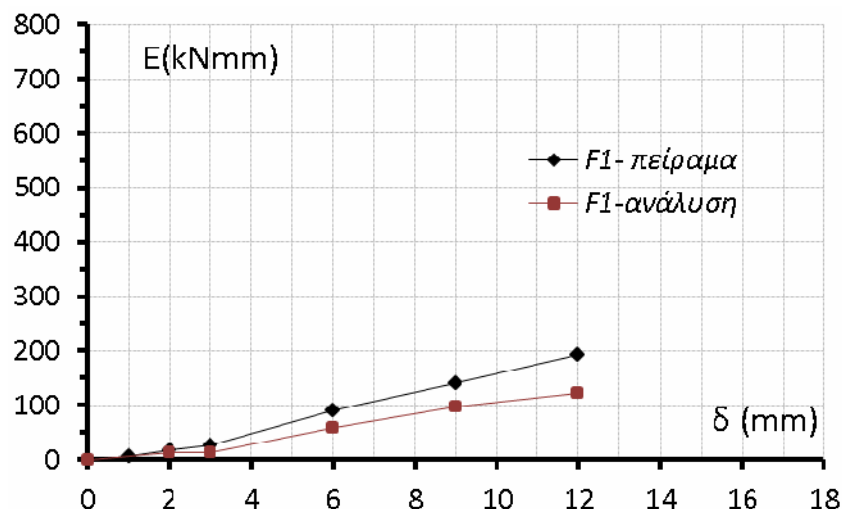


Σχ. 9.1 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών δύναμης - μετακίνησης για το γυμνό πλαίσιο F1.



Σχ. 9.2 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών περιβαλλουσών δύναμης - μετακίνησης για το γυμνό πλαίσιο F1.

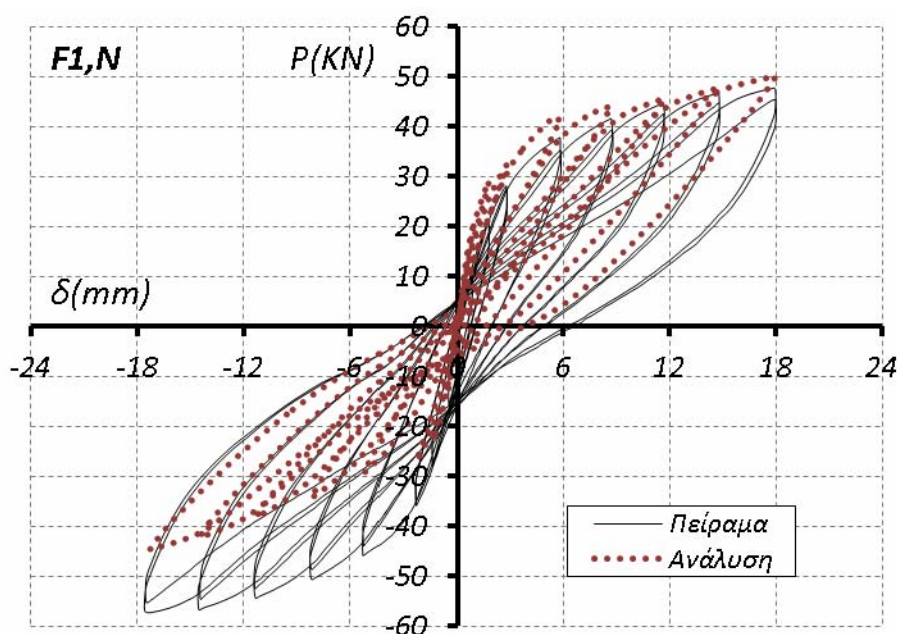
Στο σχήμα 9.3 φαίνεται η απορροφώμενη ενέργεια σε σχέση με τη μετατόπιση, για κάθε κύκλο φόρτισης. Αρχικά, όσο τα μη - γραμμικά φαινόμενα είναι περιορισμένα, η σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα πειραματικά είναι αρκετά καλή. Όμως, καθώς τα μη - γραμμικά φαινόμενα διαδίδονται στον πλαισιακό φορέα και κυριαρχούν, εμφανίζονται αρκετά μεγάλες διαφορές. Αυτές οι διαφορές οφείλονται στην αδυναμία του αριθμητικού αλγορίθμου να αποδίδει ικανοποιητικά τη διαδικασία αποφόρτισης, δηλαδή το κλείσιμο των ρωγμών που συμβαίνει κατά την αντιστροφή της φόρτισης. Έτσι, ενώ στο σχήμα 9.2 οι αναλυτικά προσδιοριζόμενες τιμές φορτίου είναι μεγαλύτερες από τις πειραματικές, στο σχήμα 9.3 συμβαίνει το αντίστροφο για τις απορροφώμενες ενέργειες.



Σχ. 9.3 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών απορροφώμενης ενέργειας – μετακίνησης για το γυμνό πλαίσιο F1.

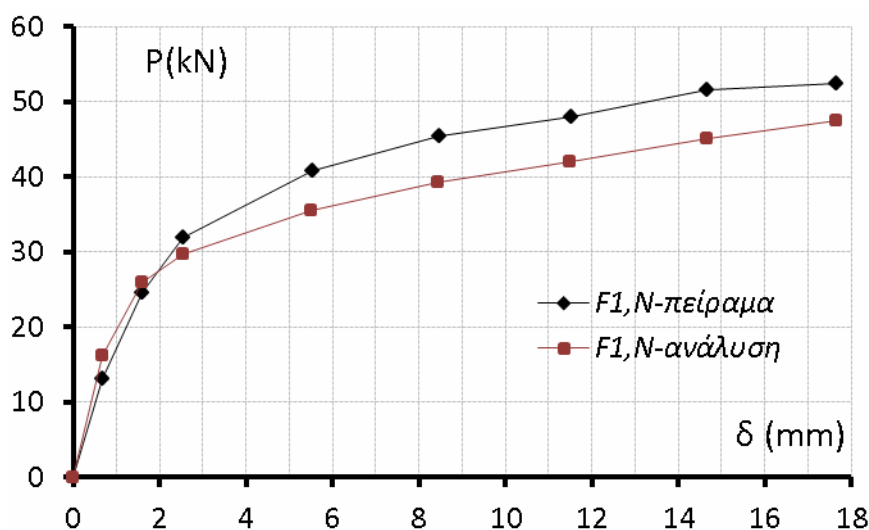
9.1.2 Πλαίσιο F1,N

Το πλαίσιο F1,N είναι πανομοιότυπο με το πλαίσιο F1, αλλά με την προσθήκη αξονικού φορτίου στους στύλους. Στο σχήμα 9.4 γίνεται σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών δύναμης - μετακίνησης. Είναι εμφανές ότι η αδυναμία του αριθμητικού μοντέλου να προσομοιώσει ικανοποιητικά το κλείσιμο των ρωγμών κατά την αντιστροφή της φόρτισης, που είχε παρατηρηθεί και στην περίπτωση του δοκιμίου F1, γίνεται τώρα εντονότερη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όχι μόνο την ύπαρξη στενότερων υστερητικών βρόγχων στην αριθμητική καμπύλη σε σχέση με την αντίστοιχη πειραματική, αλλά και τη σημαντική μείωση των τιμών του φορτίου P , που παρουσιάζουν οι αρνητικοί κύκλοι της αριθμητικής καμπύλης.

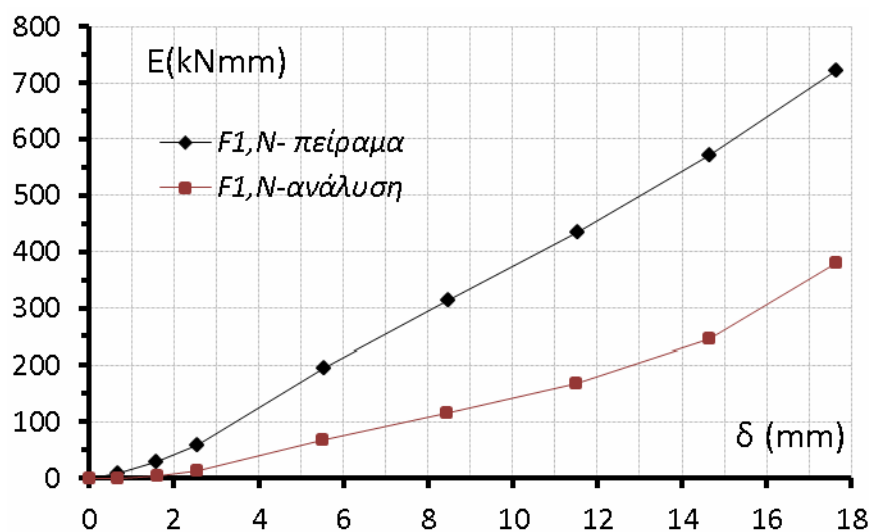


Σχ. 9.4 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών δύναμης - μετακίνησης για το γυμνό πλαίσιο F1,N.

Στα σχήματα 9.5 και 9.6 παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα των αριθμητικών και πειραματικών περιβαλλουσών δύναμης - μετακίνησης και απορροφώμενης ενέργειας - μετακίνησης. Οι ασυμφωνίες που παρατηρήθηκαν στο διάγραμμα P-δ μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων, αντικατοπτρίζονται και στα δύο αυτά διαγράμματα. Πιο συγκεκριμένα, εξαιτίας των χαμηλότερων τιμών του φορτίου που εμφανίζει η αριθμητική καμπύλη P-δ στους αρνητικούς κύκλους φόρτισης, παρουσιάζονται μικρές αποκλίσεις μεταξύ της αριθμητικής και της πειραματικής περιβάλλουσας, καθώς αυξάνεται η μετατόπιση. Οι αποκλίσεις μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων γίνονται εντονότερες στην περίπτωση του διαγράμματος της απορροφώμενης ενέργειας, καθώς υπεισέρχεται και ο παράγων των στενότερων αριθμητικών βρόγχων υστέρησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.6.



Σχ. 9.5 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών περιβαλλουσών δύναμης - μετακίνησης για το γυμνό πλαίσιο F1,N.



Σχ. 9.6 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών απορροφώμενης ενέργειας - μετακίνησης για το γυμνό πλαίσιο F1,N.

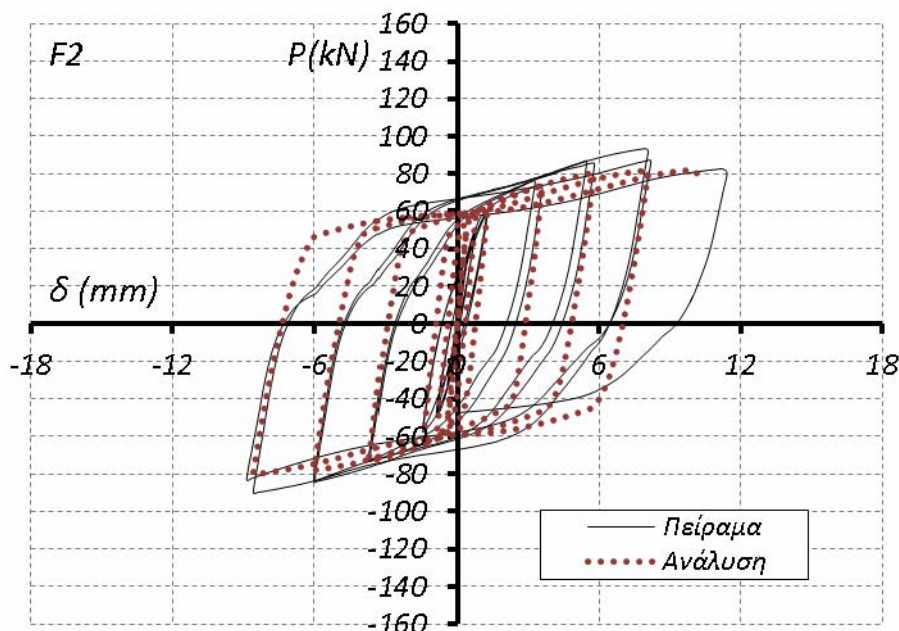
9.2 Πλαίσια ενισχυμένα με μεταλλικούς συνδέσμους

9.2.1 Πλαίσιο F2

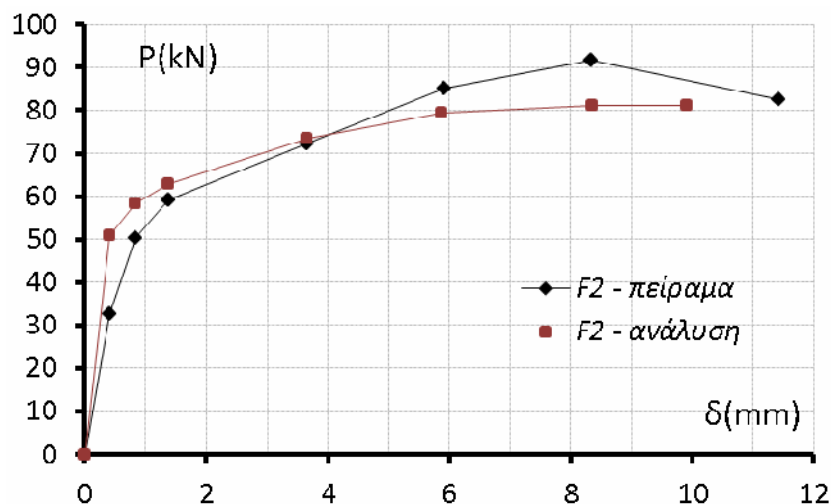
Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης για το πλαίσιο F2, το οποίο έχει ενισχυθεί με τον πρώτο σύνδεσμο Σ1, ορθογωνικής διατομής. Στο σχήμα 9.7 γίνεται η σύγκριση της αριθμητικής καμπύλης δύναμης - μετακίνησης με την αντίστοιχη πειραματική. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα αυτά, γίνεται προφανές πως η συνολική συμπεριφορά του ενισχυμένου πλαισίου βελτιώνεται σημαντικά μετά την άμεση ενεργοποίηση του μεταλλικού συνδέσμου. Επίσης, από το σχήμα 9.7 φαίνεται ότι η αριθμητική καμπύλη δύναμης - μετακίνησης προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια την αντίστοιχη πειραματική σε σχέση με τη δυσκαμψία, τις τιμές του φορτίου, την ποιότητα των υστερητικών βρόγχων.

Στα σχήματα 9.8 και 9.9 συγκρίνονται οι πειραματικές και αριθμητικές περιβάλλουσες $P-\delta$ και τα αποτελέσματα για την απορροφώμενη ενέργεια, αντίστοιχα. Η συμφωνία μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων αποδεικνύεται και μέσα από τα διαγράμματα αυτά. Ιδιαίτερα, οι τιμές της απορροφώμενης ενέργειας που προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση βρίσκονται πολύ κοντά στις αντίστοιχες πειραματικές.

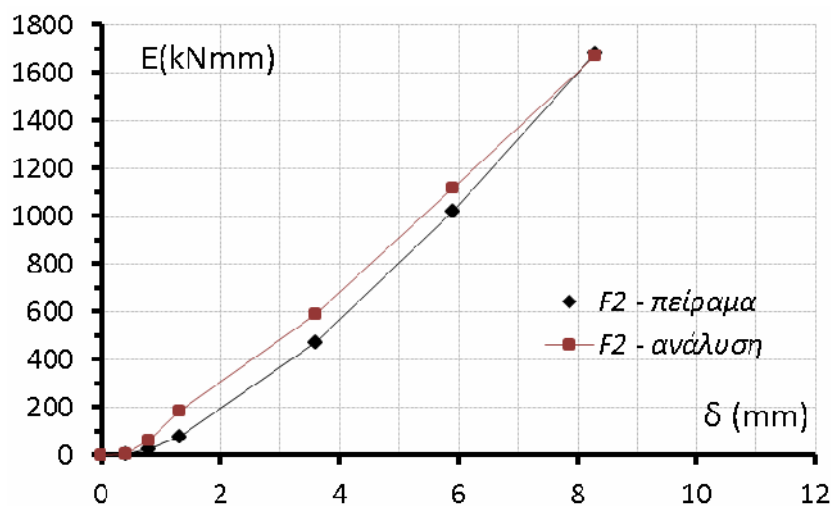
Στο σχήμα 9.10 παρουσιάζεται η εικόνα των πεδίων των πλαστικών παραμορφώσεων του μεταλλικού συνδέσμου για μετατόπιση περίπου ίση με 10 mm, όπως προέκυψε από την ανάλυση. Παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του συνδέσμου ορθογωνικής διατομής είναι κυρίως μικτού καμπτικού - διατμητικού τύπου με συγκέντρωση των πλαστικών παραμορφώσεων στην κεφαλή και στον πόδα του συνδέσμου. Αυτή η εικόνα των πλαστικών παραμορφώσεων είναι απόλυτα συμβατή με τον τύπο αστοχίας του συνδέσμου στο αντίστοιχο πείραμα, όπως φαίνεται και από τη φωτογραφία του σχήματος 9.10.



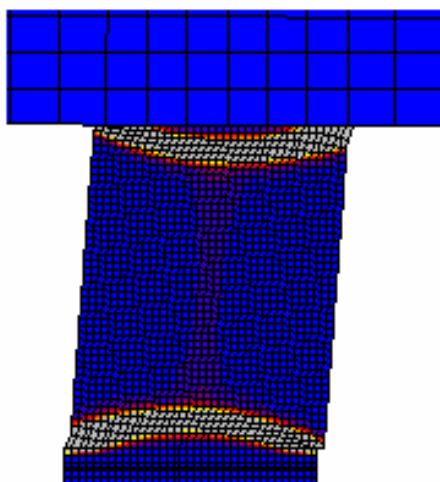
Σχ. 9.7 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F2.



Σχ. 9.8 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών περιβαλλουσών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F2.



Σχ. 9.9 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών απορροφώμενης ενέργειας – μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F2.



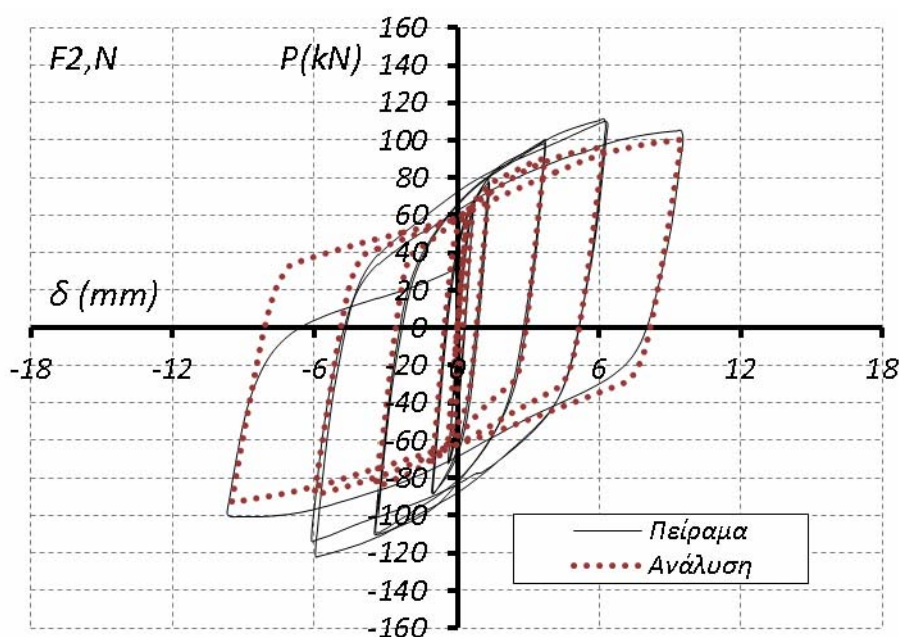
Σχ. 9.10 Πεδία πλαστικών παραμορφώσεων του μεταλλικού συνδέσμου από την αριθμητική ανάλυση του πλαισίου F2 και εικόνα αστοχίας του συνδέσμου στο αντίστοιχο πείραμα.

9.2.2 Πλαίσιο F2,N

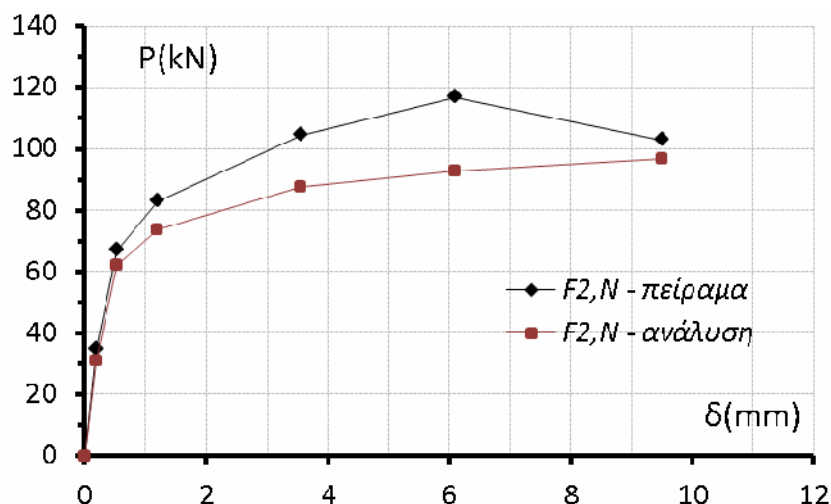
Στο σχήμα 9.11 παρουσιάζεται η σύγκριση της αριθμητικής καμπύλης δύναμης - μετακίνησης του ενισχυμένου πλαισίου F2,N με αξονικό φορτίο στους στύλους, με την αντίστοιχη πειραματική καμπύλη. Φαίνεται ότι υπάρχει γενικά καλή συμφωνία μεταξύ αριθμητικής και πειραματικής καμπύλης, ιδιαίτερα σε σχέση με τη δυσκαμψία του συστήματος και την ποιότητα των βρόγχων υστέρησης. Παρόλα αυτά, παρατηρείται μια διαφοροποίηση στις τιμές του φορτίου και κυρίως κατά τους αρνητικούς κύκλους φόρτισης. Η διαφοροποίηση αυτή εμφανίζεται στα ανώτερα στάδια της επιβεβλημένης μετατόπισης και αντικατοπτρίζεται και στο συγκριτικό διάγραμμα του σχήματος 9.12. Από τη σύγκριση των περιβαλλουσών P-δ προκύπτει ότι, ενώ για χαμηλές τιμές της μετακίνησης τα αριθμητικά αποτελέσματα ουσιαστικά συμπίπτουν με τα πειραματικά, για μεγαλύτερες τιμές της μετακίνησης η αριθμητική καμπύλη αντιστοιχεί σε χαμηλότερες τιμές φορτίου, σε σχέση με την πειραματική.

Στο σχήμα 9.13 συγκρίνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για την απορροφώμενη ενέργεια με τα αντίστοιχα πειραματικά και προκύπτει ότι βρίσκονται σε σχετικά καλή συμφωνία μεταξύ τους, ιδιαίτερα εάν ληφθούν υπόψη οι σημαντικές μη - γραμμικότητες του φυσικού προβλήματος.

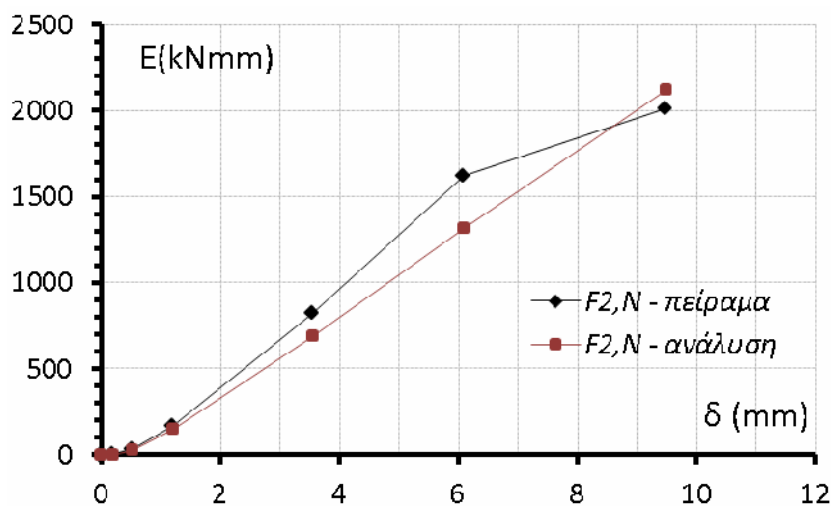
Τέλος, στο σχήμα 9.14 παρουσιάζεται η εικόνα των πεδίων των πλαστικών παραμορφώσεων του μεταλλικού συνδέσμου για μετατόπιση περίπου ίση με 10 mm, όπως προέκυψε από την ανάλυση του πλαισίου F2,N. Παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του συνδέσμου είναι και σε αυτή την περίπτωση μικτού καμπτικού - διατμητικού τύπου με σημαντικότερη συγκέντρωση των πλαστικών παραμορφώσεων στην κεφαλή και στον πόδα του συνδέσμου. Αυτή η εικόνα των πλαστικών παραμορφώσεων είναι απόλυτα συμβατή με τον τύπο αστοχίας του συνδέσμου στο αντίστοιχο πείραμα, όπως έχει ήδη περιγραφεί στην παράγραφο 4.4.



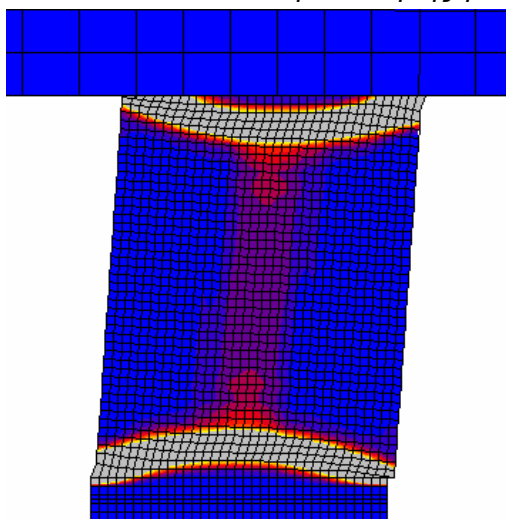
Σχ. 9.11 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F2,N.



Σχ. 9.12 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών περιβαλλουσών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο $F2,N$.



Σχ. 9.13 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών απορροφώμενης ενέργειας - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο $F2,N$.



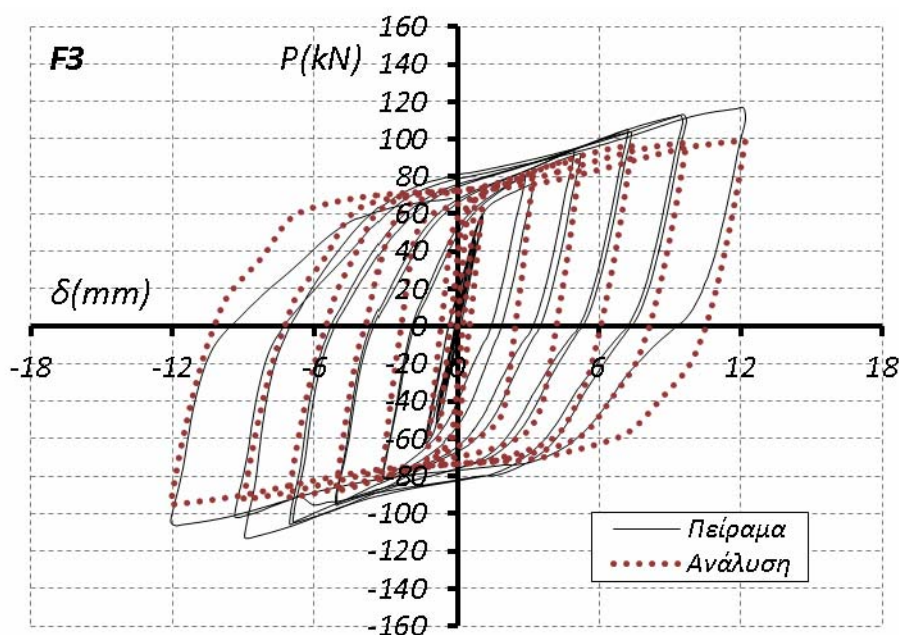
Σχ. 9.14 Πεδία πλαστικών παραμορφώσεων του μεταλλικού συνδέσμου από την αριθμητική ανάλυση του πλαισίου $F2,N$ και εικόνα αστοχίας του συνδέσμου στο αντίστοιχο πείραμα.

9.2.3 Πλαίσιο F3

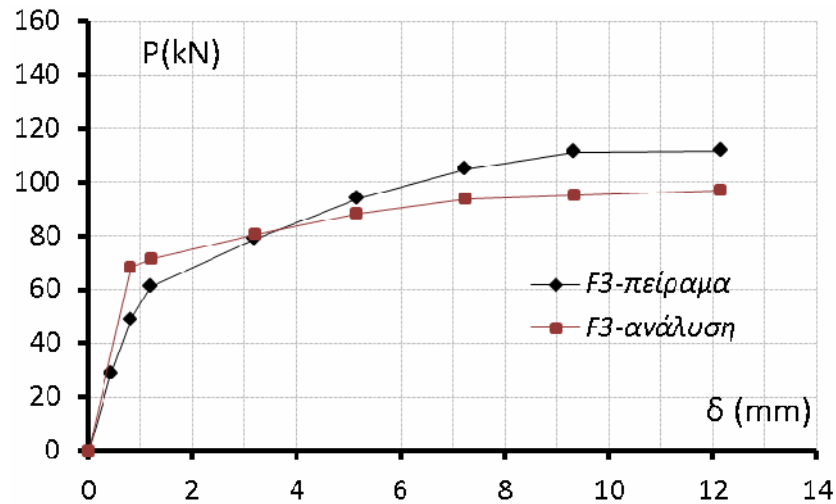
Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης για το πλαίσιο F3, το οποίο έχει ενισχυθεί με το σύνδεσμο Σ2, διατομής διπλού ταυ. Στο σχήμα 9.15 γίνεται η σύγκριση της αριθμητικής καμπύλης δύναμης - μετακίνησης με την αντίστοιχη πειραματική. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα αυτά, γίνεται προφανές πως η αριθμητική καμπύλη δύναμης - μετακίνησης προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια την αντίστοιχη πειραματική όσον αφορά τη δυσκαμψία και την ποιότητα των υστερητικών βρόγχων, άρα και τη γενικότερη συμπεριφορά του δοκιμίου. Παρατηρείται μια μικρή διαφοροποίηση μεταξύ αριθμητικής και πειραματικής καμπύλης αναφορικά με τις τιμές της δύναμης για τις μεγαλύτερες τιμές της μετατόπισης. Πιο συγκεκριμένα, για μεγαλύτερες τιμές της μετατόπισης, από το αριθμητικό προσομοίωμα προκύπτουν ελαφρώς μικρότερες τιμές του φορτίου σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές, γεγονός που αντικατοπτρίζεται και στη σύγκριση των περιβαλλουσών P-δ του σχήματος 9.16.

Στο σχήμα 9.17 συγκρίνονται οι τιμές της απορροφώμενης ενέργειας, όπως προκύπτουν από την ανάλυση και το αντίστοιχο πείραμα. Τα αριθμητικά αποτελέσματα σχεδόν ταυτίζονται με τα πειραματικά, κατά συνέπεια το αριθμητικό μοντέλο κρίνεται αξιόπιστο και στον υπολογισμό της απορροφώμενης ενέργειας του πλαισιακού συστήματος.

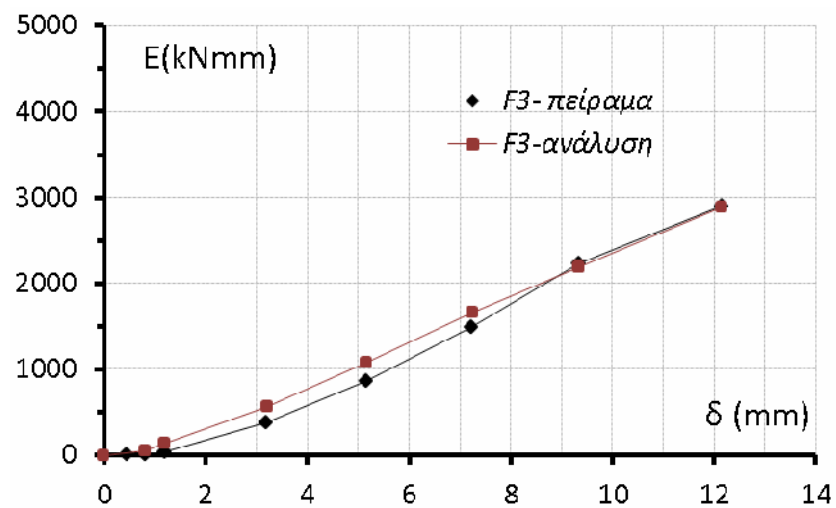
Στο σχήμα 9.18 παρουσιάζεται η εικόνα των πεδίων των πλαστικών παραμορφώσεων του μεταλλικού συνδέσμου για μετατόπιση περίπου ίση με 10 mm, όπως προέκυψε από την ανάλυση του πλαισίου F3. Παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του συνδέσμου είναι μικτού καμπτικού - διατμητικού τύπου με σημαντικότερη συγκέντρωση των πλαστικών παραμορφώσεων στα πέλματα, στην κεφαλή και τον πόδα του συνδέσμου. Αυτή η εικόνα των πλαστικών παραμορφώσεων είναι απόλυτα συμβατή με τον τύπο αστοχίας του συνδέσμου στο αντίστοιχο πείραμα, όπως φαίνεται στη φωτογραφία του σχήματος 9.18.



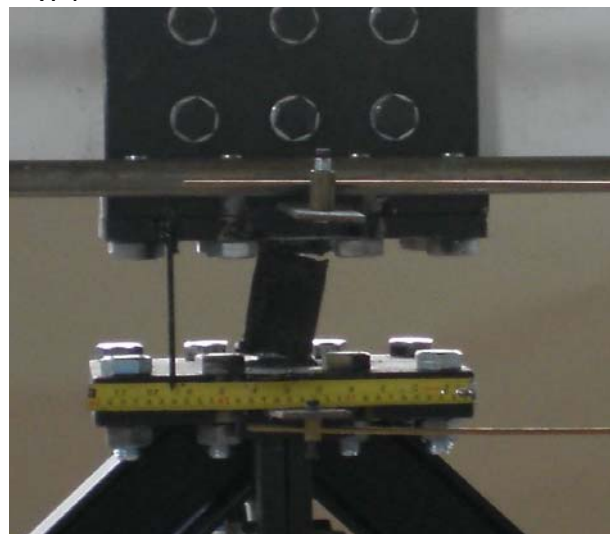
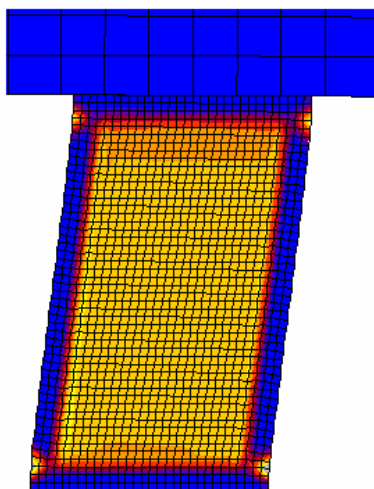
Σχ. 9.15 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F3.



Σχ. 9.16 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών περιβαλλουσών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F3.



Σχ. 9.17 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών απορροφώμενης ενέργειας - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F3.



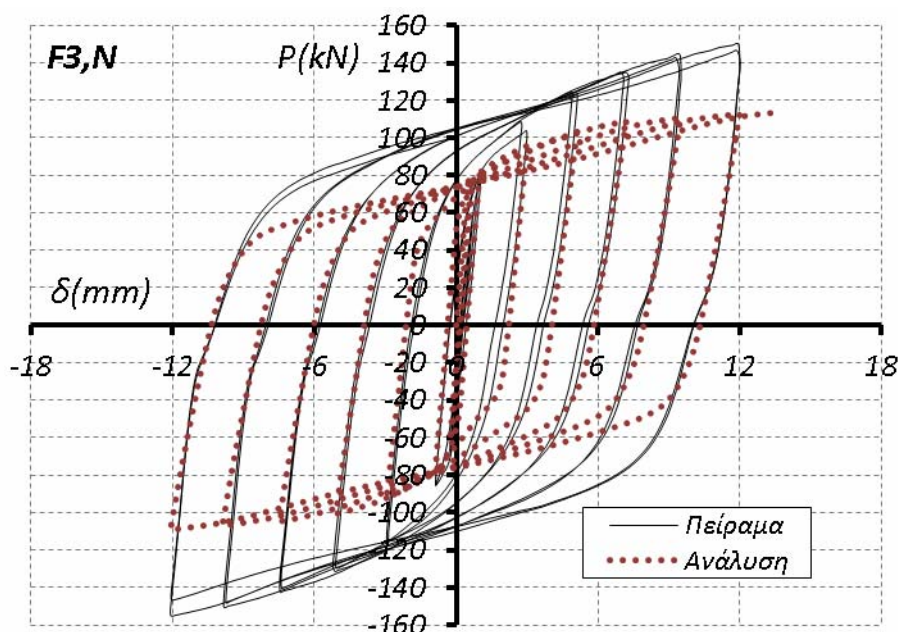
Σχ. 9.18 Πεδία πλαστικών παραμορφώσεων του μεταλλικού συνδέσμου από την αριθμητική ανάλυση του πλαισίου F3 και εικόνα αστοχίας του συνδέσμου στο αντίστοιχο πείραμα.

9.2.4 Πλαίσιο F3,N

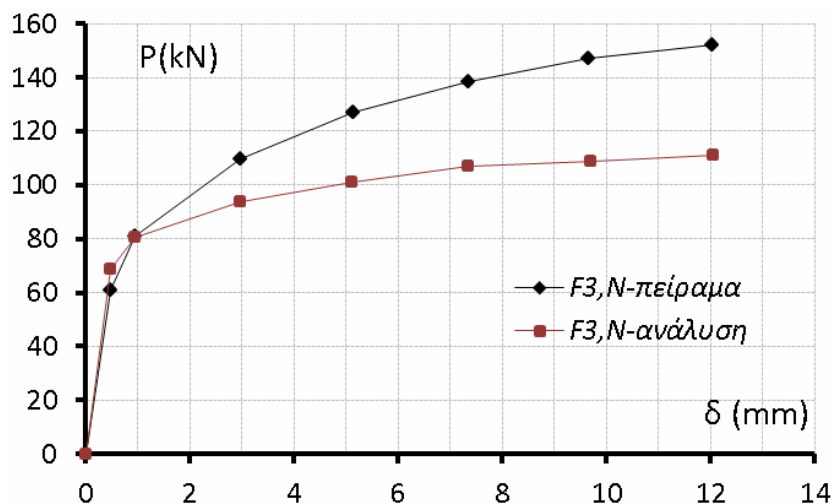
Στο σχήμα 9.19 παρουσιάζεται η σύγκριση της αριθμητικής καμπύλης δύναμης - μετακίνησης του ενισχυμένου πλαισίου F3,N με αξονικό φορτίο στους στύλους, με την αντίστοιχη πειραματική καμπύλη. Φαίνεται ότι υπάρχει γενικά καλή συμφωνία μεταξύ αριθμητικής και πειραματικής καμπύλης, ιδιαίτερα σε σχέση με τη δυσκαμψία του συστήματος και την ποιότητα των βρόγχων υστέρησης. Παρατηρείται, όμως, μια απόκλιση στις τιμές του φορτίου, τόσο κατά τους αρνητικούς, όσο και κατά τους θετικούς κύκλους φόρτισης. Η απόκλιση αυτή αντικατοπτρίζεται και στο συγκριτικό διάγραμμα του σχήματος 9.20. Από τη σύγκριση των περιβαλλουσών P-δ προκύπτει ότι για το μεγαλύτερο εύρος των τιμών της μετακίνησης, η αριθμητική καμπύλη αντιστοιχεί σε χαμηλότερες τιμές φορτίου, σε σχέση με την πειραματική.

Στο σχήμα 9.21 συγκρίνονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για την απορροφώμενη ενέργεια, με τα αντίστοιχα πειραματικά και προκύπτει ότι βρίσκονται σε σχετικά καλή συμφωνία μεταξύ τους για τις χαμηλές τιμές της μετατόπισης, ενώ για μεγαλύτερες τιμές της μετακίνησης εμφανίζονται και οι σημαντικότερες αποκλίσεις μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών τιμών της απορροφώμενης ενέργειας.

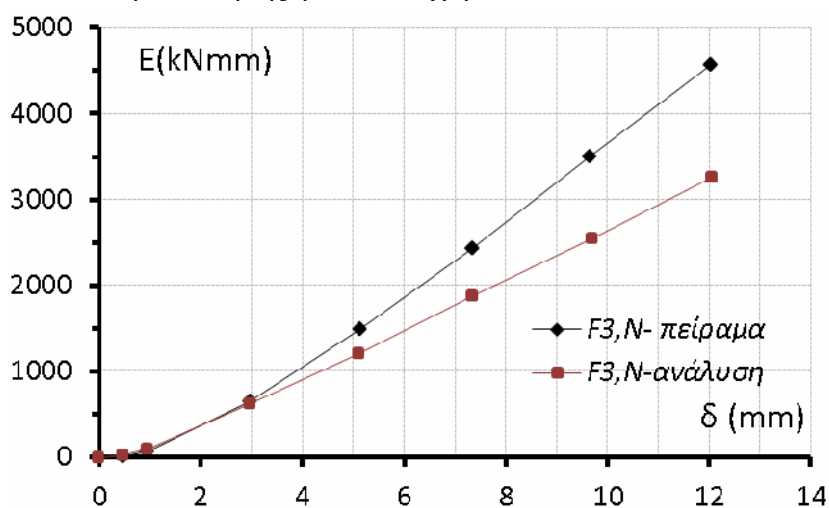
Τέλος, στο σχήμα 9.22 παρουσιάζεται η εικόνα των πεδίων των πλαστικών παραμορφώσεων του μεταλλικού συνδέσμου για μετατόπιση περίπου ίση με 10 mm, όπως προέκυψε από την ανάλυση του πλαισίου F3,N. Παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του συνδέσμου είναι και πάλι μικτού καμπτικού - διατμητικού τύπου με σημαντικότερη συγκέντρωση των πλαστικών παραμορφώσεων στα πέλματα, στην κεφαλή και τον πόδα του συνδέσμου. Αυτή η εικόνα των πλαστικών παραμορφώσεων είναι απόλυτα συμβατή με τον τύπο αστοχίας του συνδέσμου στο αντίστοιχο πείραμα, όπως φαίνεται στη φωτογραφία του ίδιου σχήματος.



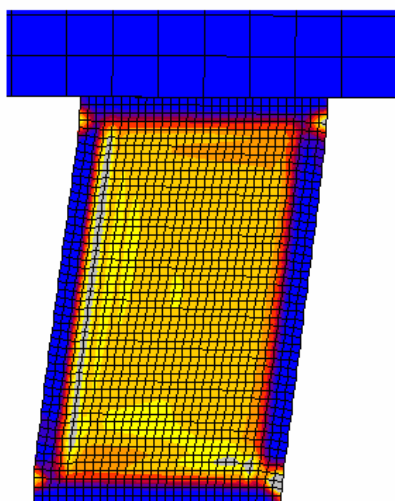
Σχ. 9.19 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F3,N.



Σχ. 9.20 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών περιβαλλουσών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F3,N.



Σχ. 9.21 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών απορροφώμενης ενέργειας - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F3,N.

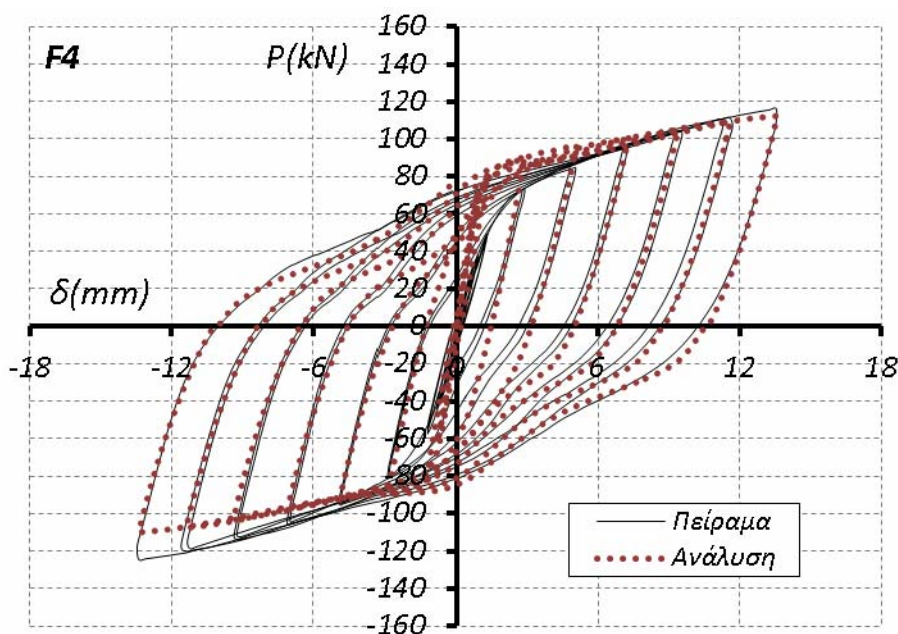


Σχ. 9.22 Πεδία πλαστικών παραμορφώσεων του μεταλλικού συνδέσμου από την αριθμητική ανάλυση του πλαισίου F3,N και εικόνα αστοχίας του συνδέσμου στο αντίστοιχο πείραμα.

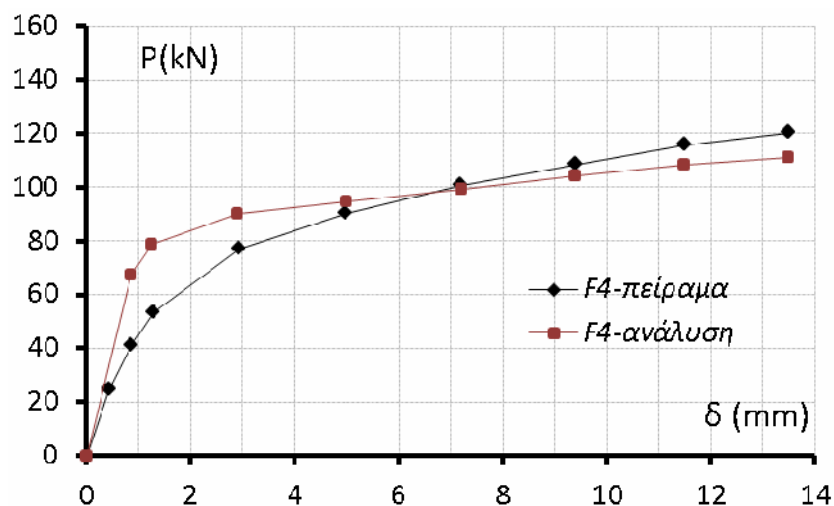
9.2.5 Πλαίσιο F4

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης για το πλαίσιο F4, το οποίο έχει ενισχυθεί με τον σύνδεσμο Σ3, διατομής διπλού ταυ, μεγαλύτερου όμως μήκους. Στο σχήμα 9.23 γίνεται η σύγκριση της αριθμητικής καμπύλης δύναμης-μετακίνησης με την αντίστοιχη πειραματική. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προκύπτει πως η αριθμητική καμπύλη βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με την πειραματική. Έτσι, υπάρχει σύμπτωση αποτελεσμάτων αναφορικά με τη δυσκαμψία, την ποιότητα των υστερητικών βρόγχων και τις τιμές της δύναμης P . Αυτή η ιδιαίτερα ικανοποιητική προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων από το αριθμητικό προσομοίωμα γίνεται εμφανής και από τα συγκριτικά διαγράμματα των Σχημάτων 9.24 και 9.25. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 9.24 φαίνεται η πολύ καλή συμφωνία μεταξύ της αριθμητικής και πειραματικής περιβάλλουσας P - δ , ενώ στο σχήμα 9.25 φαίνεται ότι οι τιμές της απορροφώμενης ενέργειας που προκύπτουν από την ανάλυση συμπίπτουν με τις αντίστοιχες πειραματικές.

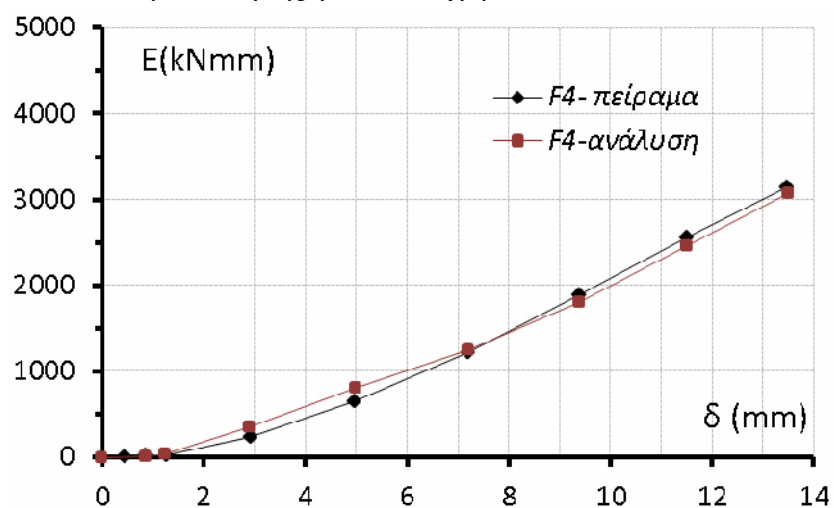
Στο σχήμα 9.26 παρουσιάζεται η εικόνα των πεδίων των πλαστικών παραμορφώσεων του μεταλλικού συνδέσμου για επιβεβλημένη μετατόπιση περίπου ίση με 10 mm, όπως προέκυψε από την ανάλυση του πλαισίου F4. Παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του συνδέσμου είναι μικτού καμπτικού - διατμητικού τύπου με σημαντικότερη συγκέντρωση των πλαστικών παραμορφώσεων στα πέλματα, στην κεφαλή αλλά κυρίως στον πόδα του συνδέσμου. Η αστοχία όμως είναι κυρίως καμπτικού τύπου, γεγονός που είναι συμβατό με τον τύπο αστοχίας του συνδέσμου στο αντίστοιχο πείραμα, όπως φαίνεται και στη φωτογραφία του σχήματος.



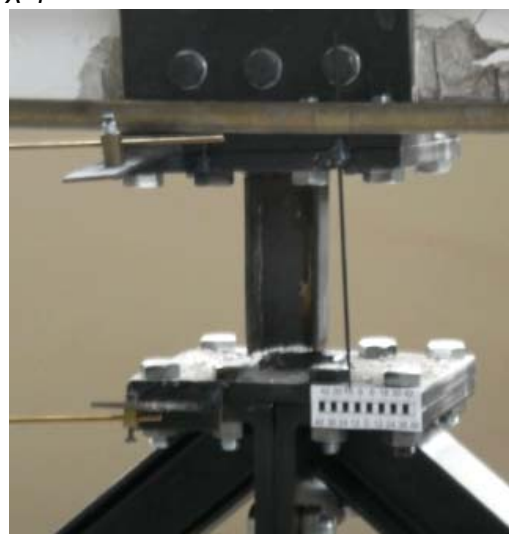
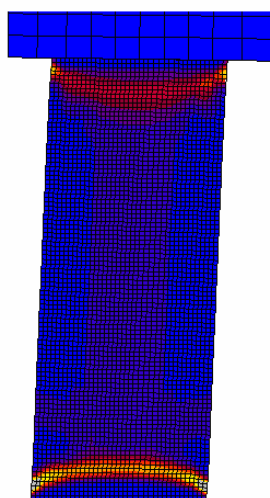
Σχ. 9.23 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F4.



Σχ. 9.24 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών περιβαλλουσών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F4.



Σχ. 9.25 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών απορροφώμενης ενέργειας - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F4.



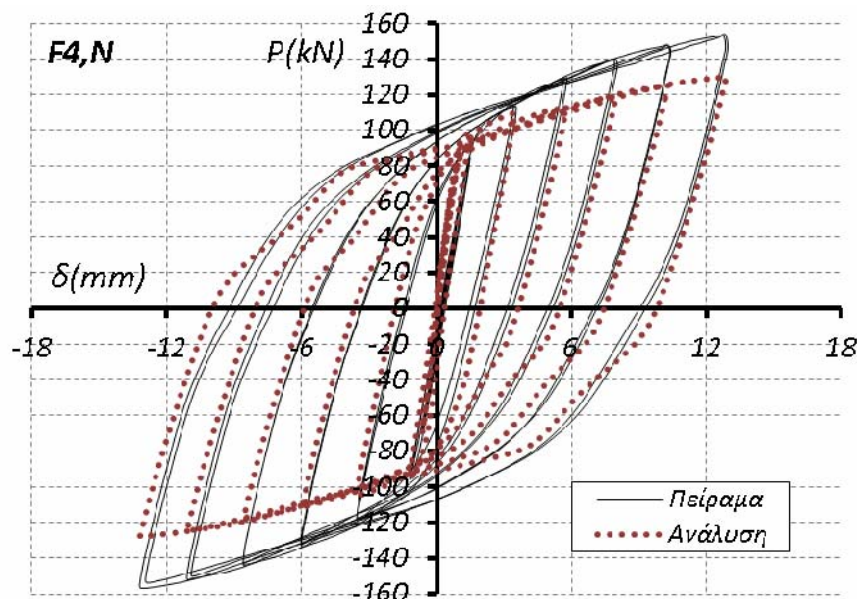
Σχ. 9.26 Πεδία πλαστικών παραμορφώσεων του μεταλλικού συνδέσμου από την αριθμητική ανάλυση του πλαισίου F4 και εικόνα αστοχίας του συνδέσμου στο αντίστοιχο πείραμα.

9.2.6 Πλαίσιο F4,N

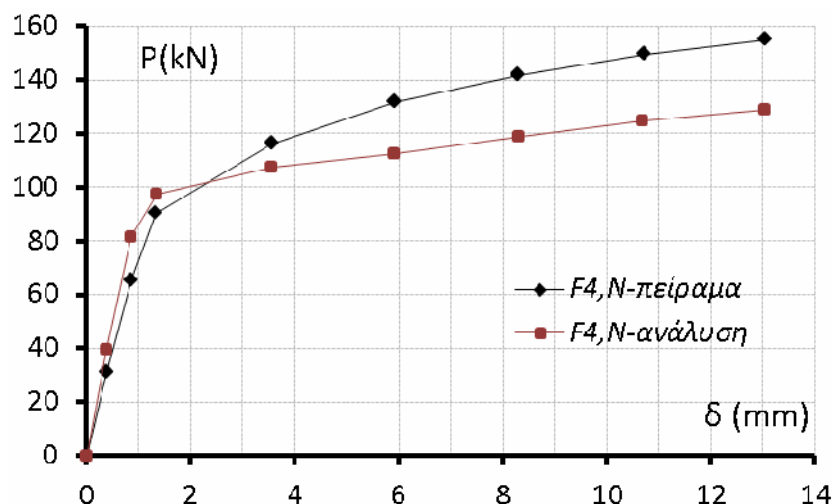
Στο σχήμα 9.27 παρουσιάζεται η σύγκριση της αριθμητικής καμπύλης δύναμης - μετακίνησης του ενισχυμένου πλαισίου F4,N με αξονικό φορτίο στους στύλους, με την αντίστοιχη πειραματική καμπύλη. Φαίνεται ότι υπάρχει γενικά καλή συμφωνία μεταξύ αριθμητικής και πειραματικής καμπύλης, ιδιαίτερα σε σχέση με τη δυσκαμψία του συστήματος και την ποιότητα των βρόγχων υστέρησης. Παρατηρείται, όμως, μια μικρή απόκλιση στις τιμές του φορτίου, τόσο κατά τους αρνητικούς, όσο και κατά τους θετικούς κύκλους φόρτισης. Η απόκλιση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση της αριθμητικής περιβάλλουσας P-δ σε σχέση με την πειραματική. Όπως φαίνεται στο σχήμα 9.28, η αριθμητική καμπύλη αντιστοιχεί σε χαμηλότερες τιμές φορτίου P σε σχέση με την πειραματική, για το μεγαλύτερο εύρος των τιμών της μετακίνησης δ.

Στο σχήμα 9.29 συγκρίνονται οι τιμές της απορροφώμενης ενέργειας και παρατηρείται ότι βρίσκονται σε σχετικά καλή συμφωνία μεταξύ τους για τις χαμηλές τιμές της επιβεβλημένης μετατόπισης, ενώ για μεγαλύτερες τιμές της μετακίνησης εμφανίζονται κάποιες αποκλίσεις μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Οι μικρές αυτές αποκλίσεις οφείλονται αποκλειστικά στις χαμηλότερες τιμές του φορτίου που προκύπτουν από την ανάλυση, καθώς οι υστερητικοί βρόγχοι της ανάλυσης και του πειράματος βρίσκονται σε απόλυτη συμφωνία σε σχέση με τη μορφή και το εύρος τους.

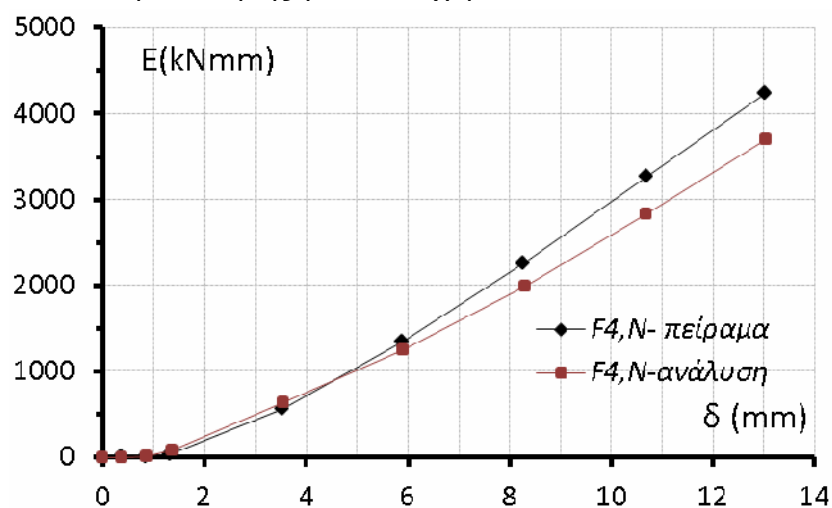
Τέλος, στο σχήμα 9.30 παρουσιάζεται η εικόνα των πεδίων των πλαστικών παραμορφώσεων του μεταλλικού συνδέσμου για επιβεβλημένη μετατόπιση περίπου ίση με 10 mm, όπως προέκυψε από την ανάλυση του πλαισίου F4,N. Παρατηρείται και πάλι ότι η συμπεριφορά του συνδέσμου είναι μικτού καμπτικού - διατμητικού τύπου με σημαντικότερη συγκέντρωση των πλαστικών παραμορφώσεων στα πέλματα, στην κεφαλή και στον πόδα του συνδέσμου. Οι παραμορφώσεις αυτές είναι όμοιες με τις παραμορφώσεις που εμφάνισε ο συγκεκριμένος σύνδεσμος στο αντίστοιχο πείραμα, όπως φαίνεται στη φωτογραφία του σχήματος 9.30. Υπενθυμίζεται ότι το συγκεκριμένο πείραμα τερματίστηκε πρόωρα.



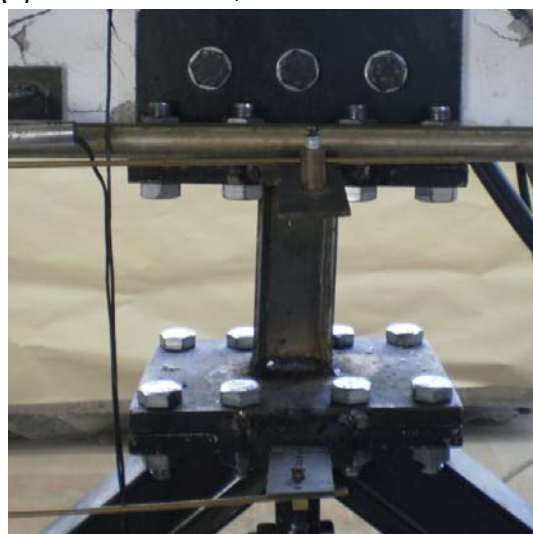
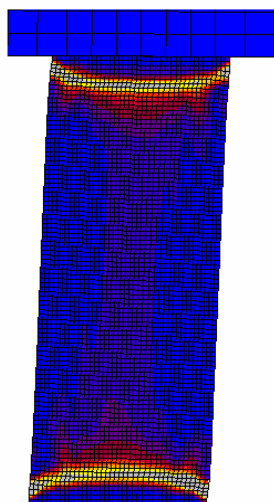
Σχ. 9.27 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F4,N.



Σχ. 9.28 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών περιβαλλουσών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F4,N.



Σχ. 9.29 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών απορροφώμενης ενέργειας - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F4,N.



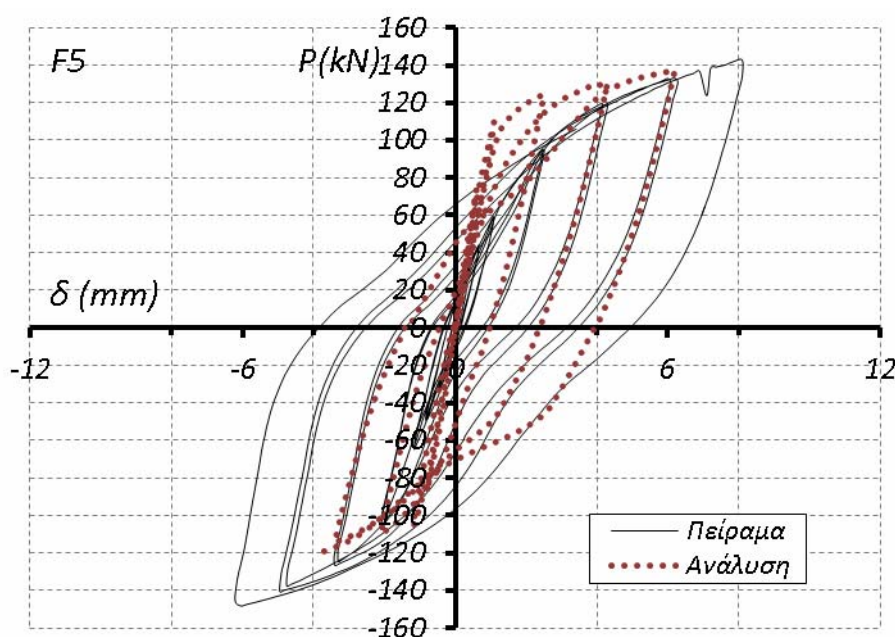
Σχ. 9.30 Πεδία πλαστικών παραμορφώσεων του μεταλλικού συνδέσμου από την αριθμητική ανάλυση του πλαισίου F4 και εικόνα παραμόρφωσης του συνδέσμου στο αντίστοιχο πείραμα.

9.2.7 Πλαίσιο F5

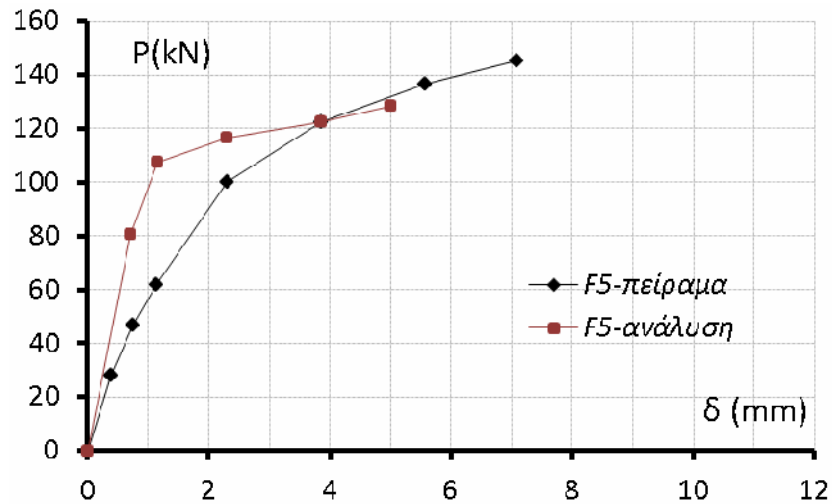
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης για το πλαίσιο F5, το οποίο έχει ενισχυθεί με τον πολύ ισχυρό σύνδεσμο Σ4, διατομής διπλού ταυ. Στο σχήμα 9.31 γίνεται η σύγκριση της αριθμητικής καμπύλης δύναμης - μετακίνησης με την αντίστοιχη πειραματική. Επίσης, στα σχήματα 9.32 και 9.33 γίνεται η σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών περιβαλλουσών $P-\delta$ και των τιμών της απορροφώμενης ενέργειας, αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα, στην περίπτωση του πλαισίου F5 τα αριθμητικά αποτελέσματα περιορίστηκαν στους πρώτους πέντε κύκλους της φόρτισης, μέχρι τη μετατόπιση των 6 mm, περίπου. Αιτία για αυτό ήταν οι σημαντικές ρηγματώσεις που αναπτύχθηκαν στο ζύγωμα του πλαισίου του αριθμητικού μοντέλου, οι οποίες εμφανίστηκαν και στο αντίστοιχο πείραμα, με αποτέλεσμα τη σχετικά πρόωμη διακοπή τόσο του πειράματος, όσο και της εφαρμοζόμενης επαναληπτικής διαδικασίας Newton - Rapshon της αριθμητικής ανάλυσης.

Από τη σύγκριση των περιορισμένων αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά προκύπτει ότι, για τις χαμηλές τιμές της επιβεβλημένης μετατόπισης, παρουσιάζονται κάποιες διαφοροποιήσεις στις τιμές της δύναμης P (σχήμα 9.32), ενώ οι τιμές της απορροφώμενης ενέργειας που προκύπτουν από το πείραμα και την ανάλυση βρίσκονται σε καλή συμφωνία μεταξύ τους (σχήμα 9.33).

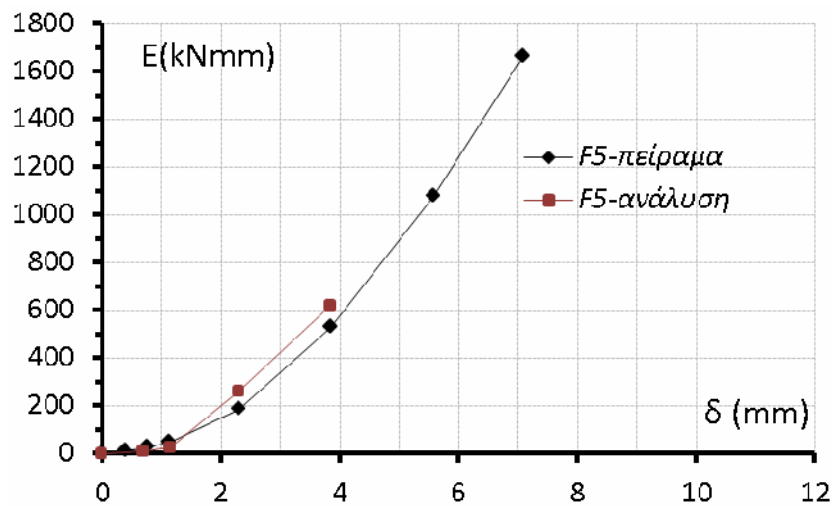
Επίσης, στο σχήμα 9.34 παρουσιάζεται η εικόνα των πεδίων των πλαστικών παραμορφώσεων του μεταλλικού συνδέσμου για επιβεβλημένη μετατόπιση περίπου ίση με 6 mm, όπως προέκυψε από την ανάλυση του πλαισίου F5. Παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του συνδέσμου είναι κυρίως καμπτικού τύπου με σημαντικότερη συγκέντρωση των πλαστικών παραμορφώσεων στον πόδα του συνδέσμου. Οι παραμορφώσεις αυτές είναι όμοιες με τις παραμορφώσεις που εμφάνισε ο σύνδεσμος στο αντίστοιχο πείραμα. Υπενθυμίζεται ότι το πείραμα αυτό διακόπηκε πρόωρα χωρίς να αστοχήσει ο σύνδεσμος.



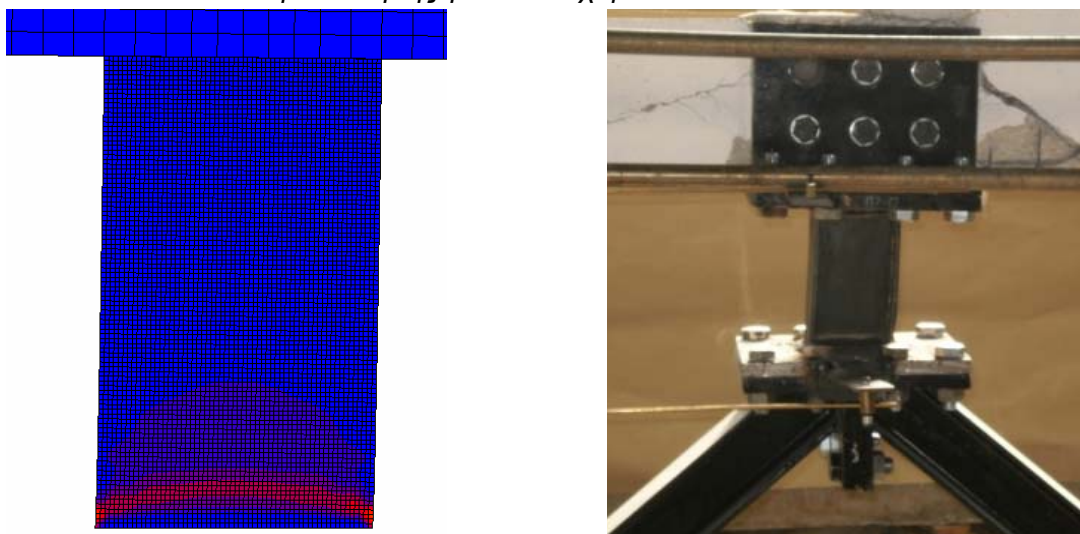
Σχ. 9.31 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F5.



Σχ. 9.32 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών περιβαλλουσών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F5.



Σχ. 9.33 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών απορροφώμενης ενέργειας - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F5.



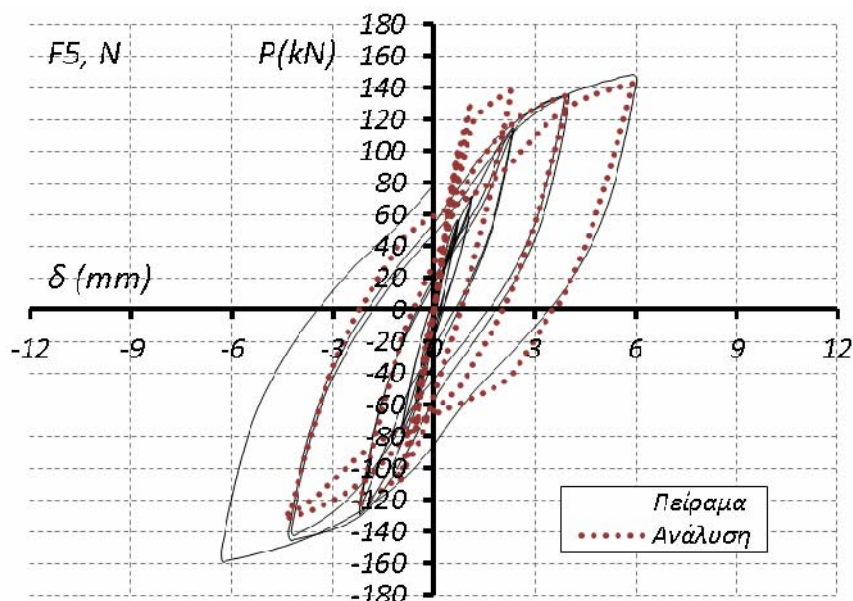
Σχ. 9.34 Πεδία πλαστικών παραμορφώσεων του μεταλλικού συνδέσμου από την αριθμητική ανάλυση του πλαισίου F5 και εικόνα παραμόρφωσης του συνδέσμου στο αντίστοιχο πείραμα.

9.2.8 Πλαίσιο F5,N

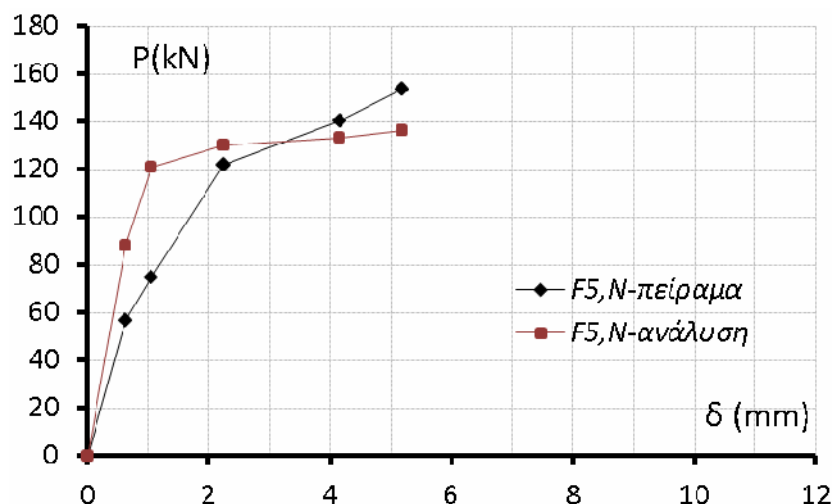
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης για το πλαίσιο F5,N, το οποίο είναι όμοιο με το πλαίσιο F5 αλλά με αξονικό φορτίο στους στύλους. Επισημαίνεται πως στο αντίστοιχο πείραμα, η επιβολή του αξονικού φορτίου συνέβαλε στη μείωση των ασταθειών και επομένως, στη συνέχιση της πειραματικής δοκιμής, σε αντίθεση με τη δοκιμή του πλαισίου F5, η οποία διακόπηκε πρόωρα. Αντίθετα, στην αριθμητική ανάλυση, η προσθήκη του αξονικού φορτίου δεν επέφερε τα αντίστοιχα ευεργετικά αποτελέσματα. Εξαιτίας αυτού, η παρούσα ανάλυση τερματίστηκε πρόωρα στη μετατόπιση των 5 mm, περίπου λόγω εκτεταμένων ρηγματώσεων και ασταθειών.

Στο σχήμα 9.35 γίνεται σύγκριση της αριθμητικής καμπύλης δύναμης - μετακίνησης με την αντίστοιχη πειραματική, ενώ στα σχήματα 9.36 και 9.37 γίνεται η σύγκριση των περιβαλλουσών P-δ και της απορροφώμενης ενέργειας, αντίστοιχα. Από τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα πειραματικά προκύπτει ότι για τις χαμηλές τιμές της επιβεβλημένης μετατόπισης παρουσιάζονται κάποιες διαφοροποιήσεις στις τιμές της δύναμης P (σχήμα 9.36). Αντίθετα, οι τιμές της απορροφώμενης ενέργειας που προκύπτουν από το πείραμα και την ανάλυση βρίσκονται σε καλή συμφωνία μεταξύ τους (σχήμα 9.37).

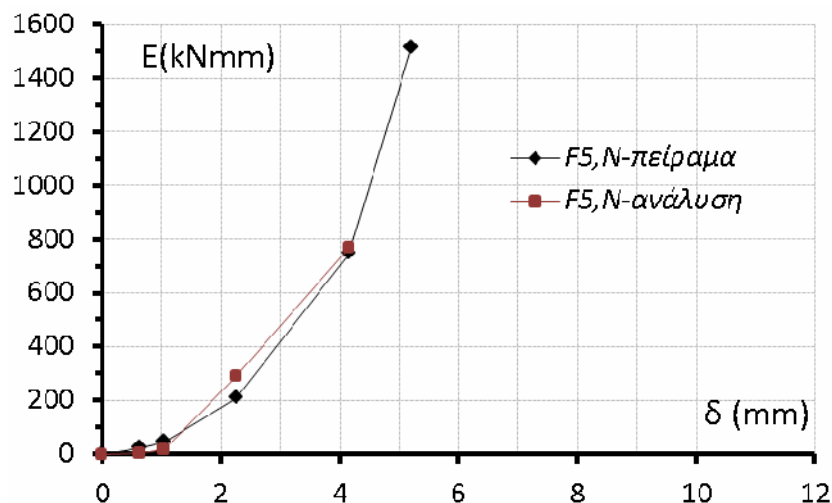
Στο σχήμα 9.38 παρουσιάζεται η εικόνα των πεδίων των πλαστικών παραμορφώσεων του μεταλλικού συνδέσμου για επιβεβλημένη μετατόπιση περίπου ίση με 5 mm, όπως προέκυψε από την ανάλυση του πλαισίου F5,N. Η συμπεριφορά του συνδέσμου είναι κυρίως καμπικού τύπου με σημαντικότερη συγκέντρωση των πλαστικών παραμορφώσεων στον πόδα του συνδέσμου. Οι παραμορφώσεις αυτές είναι συμβατές με τον τύπο αστοχίας που εμφάνισε ο συγκεκριμένος σύνδεσμος στο αντίστοιχο πείραμα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 9.38. Παράλληλα, παρατηρείται μικρή στροφή της δοκού του πλαισίου, που οφείλεται στην αύξηση της ροπής που επιβάλλεται σε αυτή από το σύνδεσμο. Συνεπώς, ο σύνδεσμος είναι μερικώς πακτωμένος στην κεφαλή του, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγαλύτερων τάσεων και παραμορφώσεων στην πόδα του που είναι πλήρως πακτωμένος.



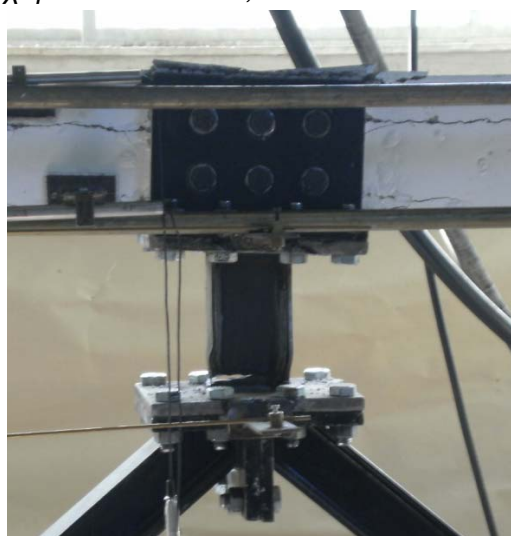
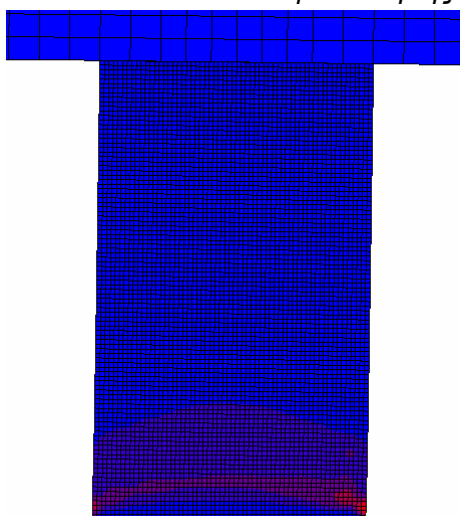
Σχ. 9.35 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F5,N.



Σχ. 9.36 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών περιβαλλουσών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F5,N.



Σχ. 9.37 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών απορροφώμενης ενέργειας - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο F5,N.



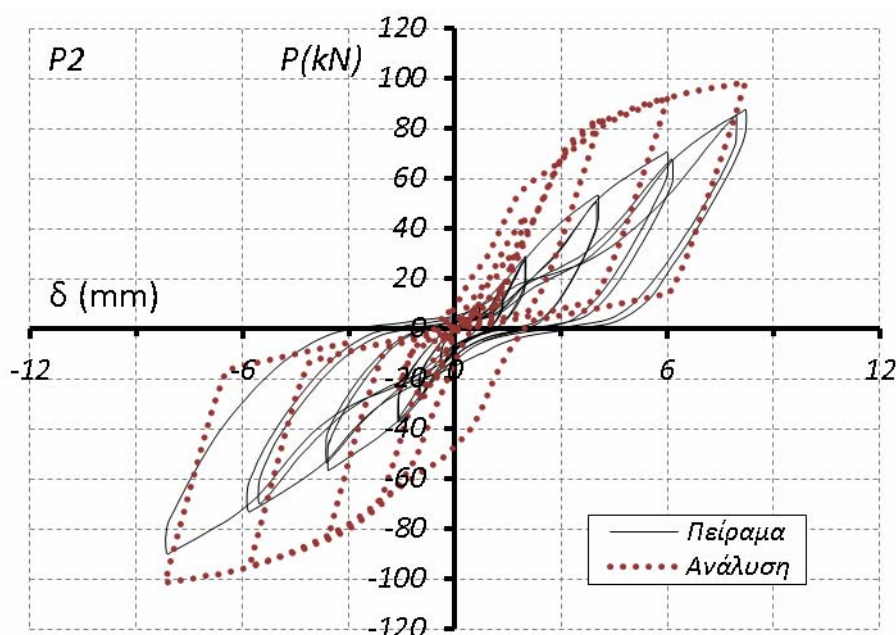
Σχ. 9.38 Πεδία πλαστικών παραμορφώσεων του μεταλλικού συνδέσμου από την αριθμητική ανάλυση του πλαισίου F5,N και εικόνα αστοχίας του συνδέσμου στο αντίστοιχο πείραμα.

9.3 Πλαίσιο ενισχυμένο με πέτασμα αλουμινίου

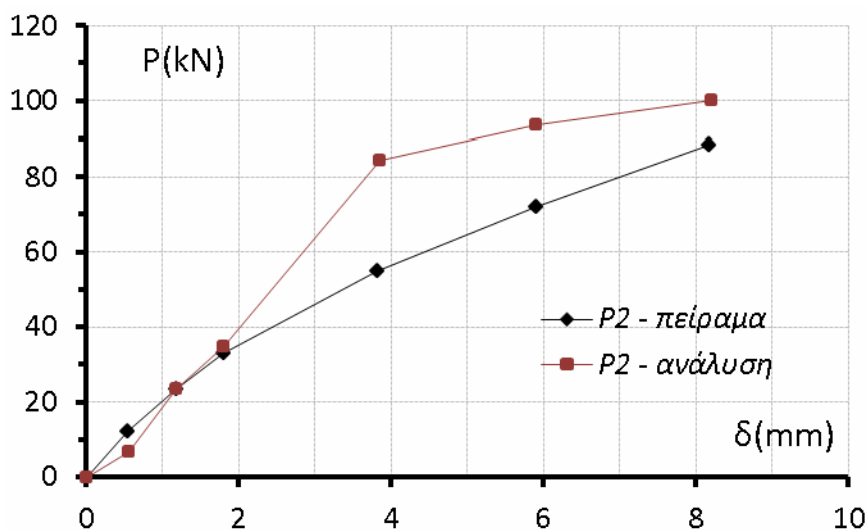
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης για το πλαίσιο P2, το οποίο έχει ενισχυθεί με το πέτασμα αλουμινίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι το αριθμητικό μοντέλο ονομάζεται P2, καθώς τα αποτελέσματά του θα συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα του δοκιμίου P2. Επιλέχθηκε το δοκίμιο αυτό για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων διότι, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 4.12, το P2 αποτελεί ουσιαστικά βελτίωση του δοκιμίου P1 στο οποίο παρατηρήθηκαν μη αναμενόμενες αστοχίες στη σύνδεση του πετάσματος με τη μεταλλική πλάκα της βάσης του δοκιμίου.

Στο σχήμα 9.39 γίνεται η σύγκριση της αριθμητικής καμπύλης δύναμης - μετακίνησης με την αντίστοιχη πειραματική. Επίσης, στα σχήματα 9.40 και 9.41 γίνεται η σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών περιβαλλουσών P-δ και των τιμών της απορροφώμενης ενέργειας, αντίστοιχα. Από τη σύγκριση των καμπυλών P-δ παρατηρείται ότι, για τα μεγαλύτερα επίπεδα της μετατόπισης, οι τιμές του φορτίου που προκύπτουν από την ανάλυση είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες πειραματικές. Η απόκλιση αυτή στις τιμές του φορτίου γίνεται εμφανής και στο σχήμα 9.40 από τη σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών περιβαλλουσών P-δ, όπου, για τα τελευταία επίπεδα της μετακίνησης, η αριθμητική περιβάλλουσα βρίσκεται υψηλότερα από την πειραματική.

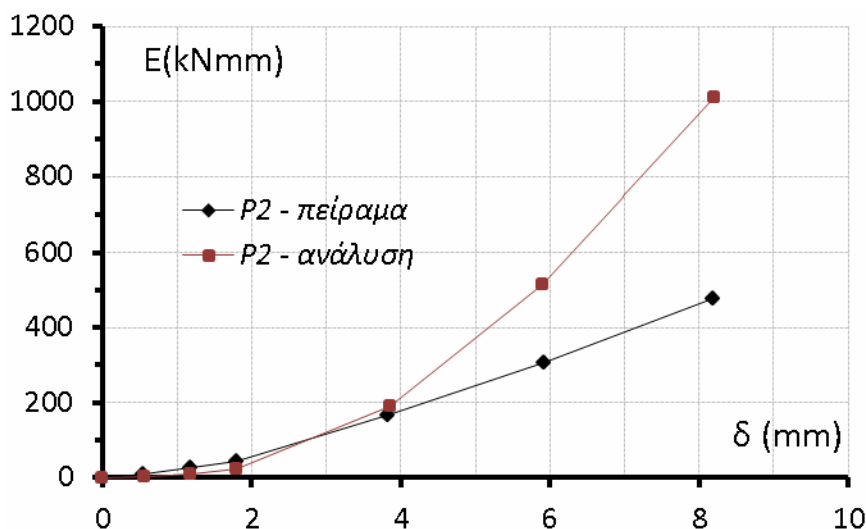
Από τη σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών του σχήματος 9.39 παρατηρείται ακόμη ότι οι αριθμητικοί υστερητικοί βρόγχοι είναι πιο πλούσιοι από τους πειραματικούς, κυρίως για τα τελευταία επίπεδα της μετακίνησης. Επομένως, και οι τιμές της απορροφώμενης ενέργειας που προκύπτουν από την ανάλυση είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες πειραματικές για τους δύο τελευταίους κύκλους φόρτισης (σχήμα 9.41). Αντίθετα, για μικρές τιμές της μετατόπισης, οι αριθμητικές και πειραματικές τιμές της απορροφώμενης ενέργειας βρίσκονται πολύ κοντά, καθώς το πέτασμα του αλουμινίου δεν έχει ακόμα ενεργοποιηθεί.



Σχ. 9.39 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο P2.



Σχ. 9.40 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών περιβαλλουσών δύναμης - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο P2.



Σχ. 9.41 Σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών καμπυλών απορροφώμενης ενέργειας - μετακίνησης για το ενισχυμένο πλαίσιο P2.

9.4 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Για όλα τα δοκίμια των πλαισίων που εξετάστηκαν πειραματικά δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα δισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα αριθμητικά μοντέλα δημιουργήθηκαν έτσι ώστε να λαμβάνουν υπόψη όλα τα μη γραμμικά φαινόμενα του φυσικού προβλήματος, όπως η ρηγμάτωση του σκυροδέματος, η διαρροή του χάλυβα των οπλισμών καθώς και η διαρροή των συνδέσμων ενίσχυσης. Η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αριθμητικού μοντέλου αποδεικνύεται μέσω της σύγκρισης των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Μετά από τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων για τα γυμνά πλαίσια F1 και F1,N με τα αντίστοιχα πειραματικά, προέκυψαν κάποιες διαφορές, τόσο στις τιμές της

δύναμης P , όσο και στις τιμές της απορροφώμενης ενέργειας. Οι διαφορές αυτές μπορούν να αποδοθούν στην πιθανή αδυναμία του αριθμητικού αλγορίθμου να αποδίδει ικανοποιητικά τη διαδικασία αποφόρτισης, δηλαδή το κλείσιμο των ρωγμών που συμβαίνει κατά την αντιστροφή της φόρτισης.

Αντίθετα, για όλες τις περιπτώσεις των πλαισίων που ενισχύονται με τους μεταλλικούς συνδέσμους, τα αριθμητικά αποτελέσματα βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά, αναφορικά με τη δυσκαμψία του συστήματος, τη μορφή και την ποιότητα των υστερητικών βρόγχων, τις τιμές της δύναμης P και τις τιμές της απορροφώμενης ενέργειας. Η καλή προσέγγιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων από το αριθμητικό προσομοίωμα στις περιπτώσεις των ενισχυμένων πλαισίων, οφείλεται στο γεγονός ότι στη γενικότερη συμπεριφορά του πλαισιακού συστήματος κυρίαρχο ρόλο παίζει η συμπεριφορά του μεταλλικού συνδέσμου. Έτσι, το αριθμητικό μοντέλο είναι ικανό να προσομοιώσει σωστά την ιστροπική και ομογενή συμπεριφορά του συνδέσμου, καθώς και την ευσταθή ελαστοπλαστική παραμόρφωσή του. Πρέπει να σημειωθεί ότι στις περισσότερες περιπτώσεις των ενισχυμένων πλαισίων με το πρόσθετο αξονικό φορτίο στους στύλους, τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσίασαν μια μικρή απόκλιση από τα πειραματικά αναφορικά μόνο με τις τιμές της δύναμης P . Παρόλα αυτά, το αριθμητικό μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστο, εάν ληφθεί υπόψη η πολυπλοκότητα του προβλήματος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της δυσκαμψίας, της φέρουσας ικανότητας και της απορροφώμενης ενέργειας ενός πλαισίου ενισχυμένου με μεταλλικό σύνδεσμο.

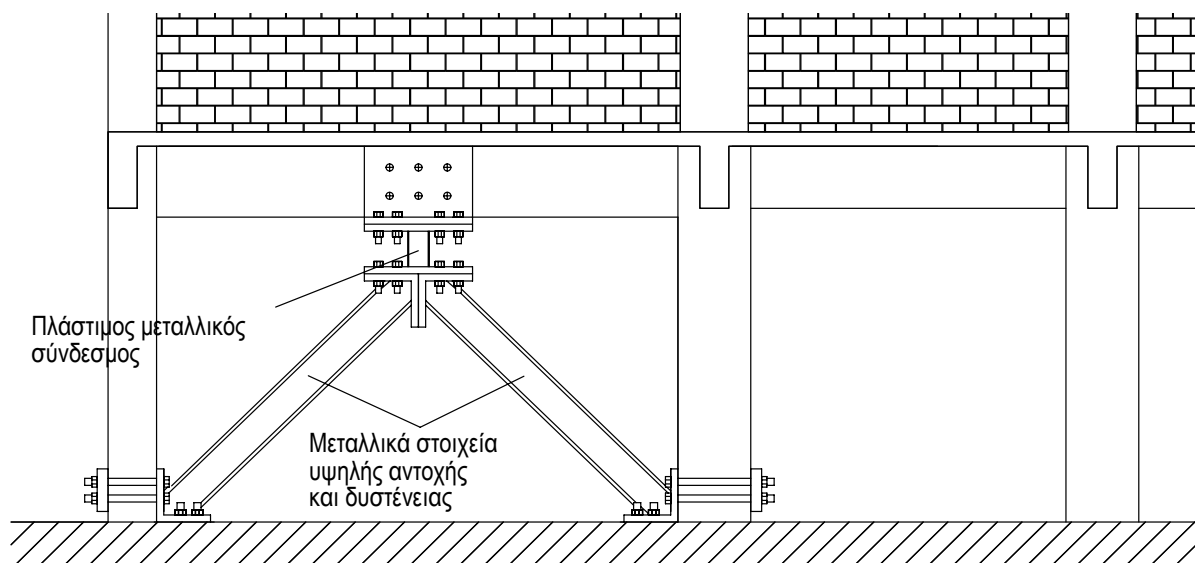
Μια ακόμη απόδειξη της αξιοπιστίας του προτεινόμενου αριθμητικού μοντέλου αποτελεί η εικόνα των πεδίων των πλαστικών παραμορφώσεων των μεταλλικών συνδέσμων που προκύπτει από την κάθε ανάλυση. Σε όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις, η εικόνα των πλαστικών παραμορφώσεων του κάθε συνδέσμου που προκύπτει από την ανάλυση είναι όμοια με την παραμόρφωση που παρατηρείται στο αντίστοιχο πείραμα και απόλυτα συμβατή με τον τύπο αστοχίας του συνδέσμου στο τέλος του πειράματος. Έτσι, το αριθμητικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση του τύπου της αστοχίας ενός συνδέσμου που χρησιμοποιείται για την ενίσχυση ενός πλαισίου.

Τέλος, παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων στην περίπτωση του πλαισίου που ενισχύεται με πέτασμα αλουμινίου σε σχέση με τις τιμές της δύναμης P και της απορροφώμενης ενέργειας. Εκτιμάται ότι οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται σε τοπικά φαινόμενα, κυρίως στις περιοχές των συνδέσεων, τα οποία δεν είναι σε θέση να απεικονίσει επαρκώς το αριθμητικό προσομοίωμα.

10. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΛΗΡΟΥΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

10.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα διερευνάται η δυνατότητα ανάπτυξης μεθοδολογίας ενίσχυσης υφιστάμενων πολυώροφων κτιρίων με pilotis, μέσω μεταλλικών διατάξεων υψηλής απόσβεσης. Οι προτεινόμενες διατάξεις, όπως ήδη έχει περιγραφεί, αποτελούνται από μεταλλικά στοιχεία υψηλής αντοχής και δυστένειας που συνδέονται σε διάταξη μορφής Λ, τα οποία, αντί να συνδεθούν απ' ευθείας με τον υφιστάμενο φέροντα οργανισμό, όπως σε παρεμφερή συστήματα, συνδέονται σ' αυτόν με την παρεμβολή ενός πλαστικού μεταλλικού στοιχείου (σχήμα 10.1). Ο σύνδεσμος αυτός μπορεί να έχει διάφορες μορφές, όπως λεπίδας, ή διπλού ταυ. Κατά τη σεισμική φόρτιση ο σύνδεσμος πλαστικοποιείται και μέσω της ανακύκλισης της φόρτισης πραγματοποιείται απορρόφηση ενέργειας, επιτυγχάνοντας υψηλές τιμές υστερητικής απόσβεσης. Με το προτεινόμενο σύστημα αυξάνεται η δυσκαμψία και η αντοχή της κατασκευής αλλά και η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας, βελτιώνοντας συνολικά την αντισεισμική συμπεριφορά του υφιστάμενου κτιρίου. Βέβαια, για την επιτυχία της επέμβασης απαιτείται η κατάλληλη διαστασιολόγηση του συνδέσμου. Για το λόγο αυτό, στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο θέμα της προδιαστασιολόγησης των συνδέσμων. Τέλος, μελετάται ως παράδειγμα η περίπτωση ενός πολυώροφου κτιρίου με pilotis, σχεδιασμένου με παλαιότερους Αντισεισμικούς Κανονισμούς (Παναγόπουλος, 2011), τόσο πριν την ενίσχυση όσο και μετά την ενίσχυση με το προτεινόμενο σύστημα. Η αποτίμηση της συμπεριφοράς του κτιρίου γίνεται με τη μέθοδο της στατικής μη γραμμικής ανάλυσης, ενώ η στοχευόμενη μετακίνηση της κατασκευής υπολογίζεται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8. Στα προσομοιώματα που χρησιμοποιούνται λαμβάνεται υπόψη με επαρκή ακρίβεια η συμμετοχή των τοιχοπληρώσεων.



Σχ. 10.1 Το προτεινόμενο σύστημα ενίσχυσης με τους πλάστιμους μεταλλικούς συνδέσμους.

10.2 Προδιαστασιολόγηση των συνδέσμων

Σε αυτή την παράγραφο προτείνεται μεθοδολογία για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών της ενίσχυσης (τύπος συνδέσμου, αριθμός συνδέσμων, διαστάσεις). Γενικά, η συμπεριφορά μίας κατασκευής μπορεί να αποτυπωθεί από την καμπύλη ικανότητας η οποία μπορεί να εκφραστεί είτε σε όρους τέμνουσας βάσης – μετακίνησης οροφής (καμπύλη $F_b - d_{roof}$) ή σε όρους του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος (καμπύλη $F^* / m^* - d^*$ σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8). Στην τελευταία περίπτωση, μπορεί στο ίδιο διάγραμμα να σχεδιαστεί και το φάσμα του σεισμού σχεδιασμού, δηλαδή η απαίτηση. Επίσης, στο ίδιο διάγραμμα μπορούν να σημειωθούν οι οριακές μετακινήσεις που αντιστοιχούν στην εξάντληση της ικανότητας παραμόρφωσης της κατασκευής ανάλογα με τα διάφορα επίπεδα επιτελεστικότητας, όπως αυτά ορίζονται από τους διάφορους αντισεισμικούς κανονισμούς (Eurocode 8 (2004), ΚΑΝΕΠΕ (2009)). Ειδικά στην περίπτωση των κτιρίων που εξετάζονται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, όπου κρίσιμη είναι η συμπεριφορά της pilotis, η καμπύλη $F^* / m^* - d^*$ μπορεί να υπολογιστεί από την καμπύλη $F_b - d_{pil}$, όπου d_{pil} η μετακίνηση που αντιστοιχεί στη στάθμη της οροφής της pilotis. Οι μετασχηματισμοί είναι πολύ απλοί και γίνονται με βάση τις σχέσεις του παραρτήματος Β του Μέρους 1 του Ευρωκώδικα 8, όπου οι μετακινήσεις Φ_i κανονικοποιούνται ως προς τη μετακίνηση της οροφής της pilotis. Για παράδειγμα, στο σχήμα 10.2 απεικονίζεται με συνεχή γραμμή η συμπεριφορά ενός υφιστάμενου κτιρίου. Η μέγιστη μετακίνηση που μπορεί να επιτευχθεί από την κατασκευή για το επίπεδο «οιονεί κατάρρευση» συμβολίζεται με d_{OK}^* και σηματοδοτεί την εξάντληση κρίσιμων μεγεθών παραμόρφωσης των στοιχείων της κατασκευής (π.χ. ικανότητα πλαστικής στρόφης στύλων ή δοκών σε κρίσιμες για την κατασκευή θέσεις), σύμφωνα με τα όρια του αντίστοιχου επιπέδου επιτελεστικότητας. Ανάλογα, μπορούν να καθοριστούν οι οριακές μετακινήσεις που αντιστοιχούν στα υπόλοιπα επίπεδα επιτελεστικότητας (άμεση χρήση μετά το σεισμό - ΑΧ, προστασία ζωής - ΠΖ). Η μέγιστη πιθανή μετακίνηση της κατασκευής για το σεισμό σχεδιασμού (στοχευόμενη μετακίνηση – target displacement) μπορεί να υπολογιστεί με τη διαδικασία που προτείνεται στο παράρτημα Β του Μέρους 1 του Ευρωκώδικα 8. Υπολογίζοντας το ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού που διέρχεται από το σημείο της στοχευόμενης μετακίνησης (αυξάνοντας το ζ), μπορεί να προκύψει μια εικόνα της ικανότητας απόσβεσης του εξεταζόμενου συστήματος. Στην περίπτωση που η στοχευόμενη μετακίνηση είναι μεγαλύτερη από την οριακή μετακίνηση που αντιστοιχεί στο προκαθορισμένο επίπεδο επιτελεστικότητας, θεωρείται ότι η κατασκευή αδυνατεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του συγκεκριμένου επιπέδου για το σεισμό σχεδιασμού. Αν το προκαθορισμένο επίπεδο επιτελεστικότητας είναι αυτό της «οιονεί κατάρρευσης», τότε θεωρείται ότι η κατασκευή είναι πιθανό να καταρρεύσει για το σεισμό σχεδιασμού. Αυτό συμβαίνει και στο παράδειγμα του σχήματος 10.2. Συνεπώς, η κατασκευή θα πρέπει να ενισχυθεί ακολουθώντας κάποια στρατηγική (αύξηση δυσκαμψίας ή/και αντοχής, αύξηση ικανότητας παραμόρφωσης κλπ). Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι το επίπεδο απόσβεσης που υπολογίστηκε για το υφιστάμενο κτίριο είναι πλασματικό, υπό την έννοια ότι εφόσον η κατασκευή αδυνατεί να εκπληρώσει τα κριτήρια επιτελεστικότητας για τη στοχευόμενη μετακίνηση, προφανώς δεν μπορεί να επιτύχει και το θεωρητικά υπολογιζόμενο επίπεδο απόσβεσης ζ_Y .

Στη συνέχεια θα δοθεί μια μέθοδος που επιτρέπει την προδιαστασιολόγηση των μεταλλικών συνδέσμων που χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή για την ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών με pilotis. Η μέθοδος προϋποθέτει τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος του υφιστάμενου κτιρίου (στοχευόμενη μετακίνηση $d_{t,Y}^*$, λόγος δύναμης προς μάζα $F_{y,Y}^*/m_Y^*$, απόσβεση ζ_Y , συντελεστής μετασχηματισμού Γ_Y) και ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

1. Επιλογή επιπέδου επιτελεσματικότητας για το ενισχυμένο κτίριο. Καθώς η προτεινόμενη μεθοδολογία ενίσχυσης έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση των επεμβάσεων στα υφιστάμενα στοιχεία, μπορεί να καθοριστεί η μέγιστη επιθυμητή μετακίνηση σχεδιασμού του ενισχυμένου κτιρίου $d_{t,E}^*$, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις επιτελεσματικότητας σε αυτά. Η μετακίνηση αυτή μπορεί να καθοριστεί με τη βοήθεια των χαρακτηριστικών που επισημάνθηκαν από την αποτίμηση του υφιστάμενου κτιρίου. Για παράδειγμα, για επίπεδο επιτελεσματικότητας «προστασία ζωής», η $d_{t,E}^*$ μπορεί να καθοριστεί μικρότερη ή ίση με τη μετακίνηση που εξαντλεί τις παραμορφώσεις των υφιστάμενων δομικών στοιχείων για το επιλεγμένο επίπεδο επιτελεσματικότητας, δηλ. $d_{t,E}^* \leq d_{\Pi Z,E}^*$. Σημειώνεται ότι ο προσδιορισμός της $d_{\Pi Z,E}^*$ μπορεί να γίνει στο ενισχυμένο σύστημα από τη μετακίνηση $d_{\Pi Z}$ (που προσδιορίζεται μονοσήμαντα από τα χαρακτηριστικά των στύλων της pilotis) μέσω της σχέσης $d_{\Pi Z,E}^* = \frac{d_{\Pi Z}}{\Gamma_E}$, όπου όμως ο συντελεστής Γ_E είναι άγνωστος. Ως απλούστευση, μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι λόγω της αλλαγής των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών του ενισχυμένου κτιρίου ο συντελεστής αυτός θα είναι μικρότερος του Γ_Y , για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προσέγγιση $\Gamma_E = 0.75\Gamma_Y$.
2. Γίνεται η παραδοχή ότι το ενισχυμένο κτίριο πρέπει να διαθέτει ικανότητα απόσβεσης μεγαλύτερη από αυτή του υφιστάμενου κτιρίου. Έχοντας εκτιμήσει την ικανότητα απόσβεσης του υφιστάμενου κτιρίου από την προηγούμενη φάση, επιλέγεται το επιθυμητό επίπεδο απόσβεσης, $\zeta_E > \zeta_Y$.
3. Έχοντας καθορίσει τα $d_{t,E}^*$ και ζ_E , μπορεί να καθοριστεί η φασματική επιτάχυνση του ενισχυμένου κτιρίου $F_{y,E}^*/m_E^*$ από το σημείο τομής του ανελαστικού φάσματος που αντιστοιχεί στο ζ_E με την κατακόρυφο που άγεται από την τετμημένη $d_{t,E}^*$ (βλ. σχήμα 10.2).
4. Από την τομή του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού με την κατακόρυφο που άγεται από την τετμημένη $d_{t,E}^*$, καθορίζεται η αρχική ιδιοπερίοδος του ενισχυμένου κτιρίου, T_E , ενώνοντας το σημείο αυτό με την αρχή των αξόνων (βλ. σχήμα 10.2).
5. Προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά του ενισχυμένου συστήματος και του συστήματος ενίσχυσης. Η δυσκαμψία K_E της ενισχυμένης κατασκευής μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$K_E = K_Y \left(\frac{T_E}{T_Y} \right)^2 \quad (1)$$

όπου K_Y και T_Y είναι αντίστοιχα η δυσκαμψία και ιδιοπερίοδος της υφιστάμενης κατασκευής. Η πρόσθετη δυσκαμψία που πρέπει να παρέχει το σύστημα ενίσχυσης, K_{Π} , μπορεί να υπολογιστεί από τις δυσκαμψίες του υφιστάμενου και του ενισχυμένου συστήματος:

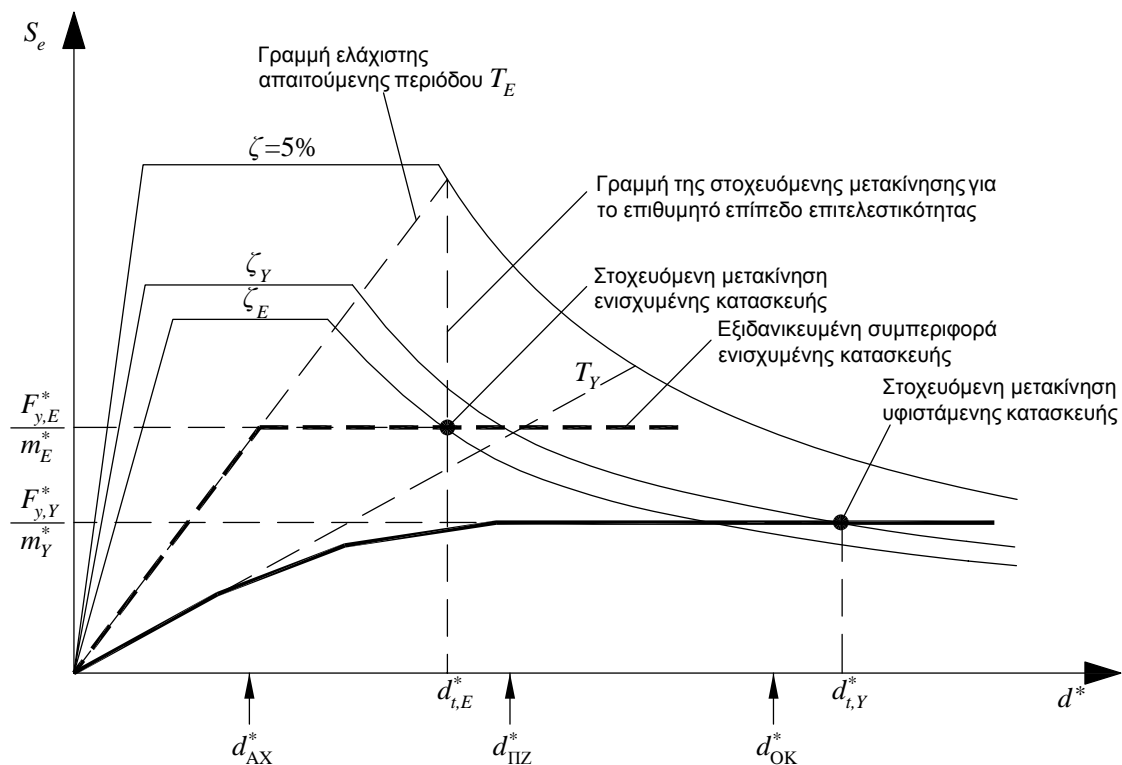
$$K_E = K_Y + K_{\Pi} \Rightarrow K_{\Pi} = K_E - K_Y . \quad (2)$$

Η τέμνουσα βάσης του ενισχυμένου συστήματος, $F_{b,E}$, μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω προσεγγιστική σχέση:

$$\frac{F_E^* / m_E^*}{F_Y^* / m_Y^*} = \frac{\Gamma_E m_E^*}{\Gamma_Y m_Y^*} \approx \frac{F_E}{F_Y} \Rightarrow F_{b,E} \approx F_{b,Y} \frac{F_E^* / m_E^*}{F_Y^* / m_Y^*} \quad (3)$$

όπου $F_{b,Y}$ είναι η τέμνουσα βάσης της υφιστάμενης κατασκευής και Γ_Y , Γ_E είναι οι συντελεστές μετασχηματισμού του υφιστάμενου και ενισχυμένου κτιρίου αντίστοιχα. Η παραπάνω σχέση προϋποθέτει ότι τα γινόμενα $\Gamma_Y m_Y^*$ και $\Gamma_E m_E^*$ είναι περίπου ίσα. Στη συνέχεια, μπορεί να προσδιοριστεί η πρόσθετη αντοχή F_{Π} που πρέπει να παρέχει το σύστημα ενίσχυσης από τη σχέση:

$$F_{\Pi} = F_{b,E} - F_{b,Y} . \quad (4)$$



Σχ. 10.2 Γραφική παράσταση της διαδικασίας προδιαστασιολόγησης των συνδέσμων.

Στο σημείο αυτό μπορεί να γίνει η επιλογή του αριθμού και των θέσεων που θα τοποθετηθούν τα συστήματα ενίσχυσης. Εάν επιλεγούν n θέσεις τοποθέτησης όμοιων συνδέσμων, οι απαιτήσεις $K_{\Pi,i}$ και $F_{\Pi,i}$ για κάθε θέση είναι:

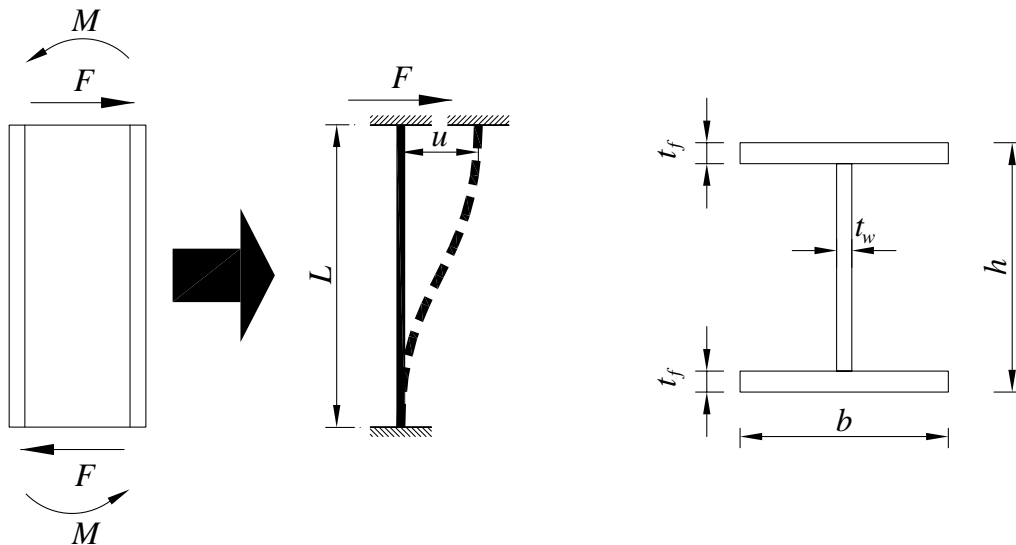
$$K_{\Pi,i} = \frac{K_{\Pi}}{n}, \quad F_{\Pi,i} = \frac{F_{\Pi}}{n}. \quad (5)$$

Με τα παραπάνω χαρακτηριστικά, μπορεί να γίνει η επιλογή των διαστάσεων των συνδέσμων. Για συνδέσμους σχήματος διπλού ταυ, μπορεί να γίνει εύκολα ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών της διατομής τους ώστε να ικανοποιούνται οι παραπάνω απαιτήσεις. Έστω ο σύνδεσμος του σχήματος 10.3, μήκους L , με τη διατομή που δίνεται στο ίδιο σχήμα. Ο σύνδεσμος παραμορφώνεται με τρόπο ώστε το στατικό σύστημα να είναι αυτό της αμφίπακτης δοκού. Η δύναμη V που αντιστοιχεί σε μετακίνηση u , στη γραμμική περιοχή συμπεριφοράς, δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{12EJ}{L^3} u = K_{\Pi,i} u \quad (6)$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας και J η ροπή αδρανείας της διατομής, και

$$K_{\Pi,i} = \frac{12EJ}{L^3}. \quad (7)$$



Σχ. 10.3 Παραμόρφωση του συνδέσμου και του αντίστοιχου στατικού συστήματος και η διατομή του θεωρούμενου συνδέσμου.

Συμβολίζοντας τη δύναμη κατά την οποία επέρχεται η διαρροή του συνδέσμου με F_y και τη ροπή διαρροής M_y προκύπτει:

$$F_{\Pi,i} = F_y = \frac{2M_y}{L} \quad (8)$$

Η καμπτική αντοχή της διατομής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$M_y = W_{pl} f_y = F W_{el} f_y \quad (9)$$

όπου W_{el} και W_{pl} οι ελαστικές και πλαστικές ροπές αντίστασης της διατομής, F ο συντελεστής σχήματος και f_y η τάση διαρροής του χρησιμοποιούμενου χάλυβα. Διαιρώντας τις σχέσεις (7) και (8) και λαμβάνοντας υπόψη ότι $J/W_{el} = h/2$ προκύπτει:

$$\frac{K_{\Pi,i}}{V_{\Pi,i}} = \frac{12EJL}{2L^3 F W_{el} f_y} = \frac{6EJ}{L^2 F W_{el} f_y} = \frac{3Eh}{L^2 F f_y} \quad (10)$$

Η προηγούμενη σχέση επιτρέπει τον καθορισμό των απαιτούμενων χαρακτηριστικών του συνδέσμου (ποιότητα χάλυβα, μήκος, διατομή) με βάση το λόγο των απαιτήσεων $K_{\Pi,i}/V_{\Pi,i}$. Σημειώνεται ότι, προφανώς, υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί των παραπάνω παραμέτρων που ικανοποιούν τον απαιτούμενο λόγο $K_{\Pi,i}/V_{\Pi,i}$.

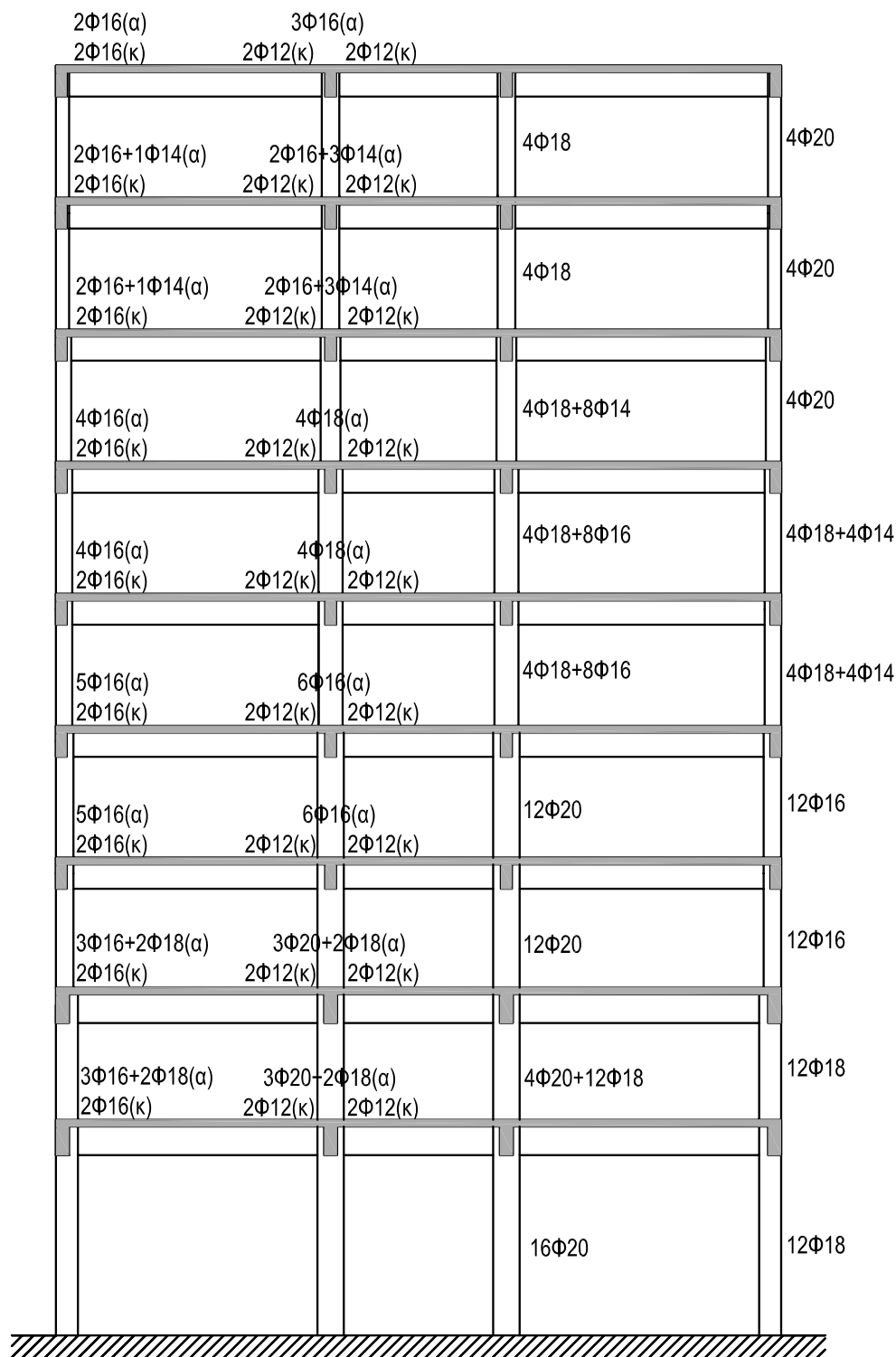
10.3 Εφαρμογή της μεταλλικής ενίσχυσης σε εννιαώροφο κτίριο

Στη συνέχεια, δίνεται εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας στην ενίσχυση ενός εννιαώρφου κτιρίου, σχεδιασμένου με παλαιότερους αντισεισμικούς κανονισμούς (Παναγόπουλος, 2011). Πρόκειται για ένα τυπικό κτίριο τις δεκαετίας του '60 με *pilotis* και είναι αντιπροσωπευτικό των υπό ενίσχυση ελληνικών κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, δηλαδή είναι κατασκευασμένο από τα συνήθη υλικά προηγούμενων δεκαετιών (λείος χάλυβας χαμηλής αντοχής και σκυρόδεμα επίσης χαμηλής αντοχής). Το κτίριο είναι κατασκευασμένο με τον Αντισεισμικό Κανονισμό του 1959 με σεισμικό συντελεστή $\varepsilon=0.06$ και με τις κατασκευαστικές συνθήκες της περιόδου αυτής, δηλαδή μικρά μήκη αγκύρωσης, αραιούς συνδετήρες χωρίς επιμέλεια στη διαμόρφωση των αγκίστρων τους κλπ. Το κτίριο είναι αμιγώς πλαισιακό με ανοίγματα 6.0, 4.0, 6.0 m. Το ύψος του ισογείου είναι 4.5 m και των υπόλοιπων ορόφων 3.0 m. Το πλαίσιο που φαίνεται στο σχήμα 10.4 θεωρείται ότι αποτελεί το τυπικό πλαίσιο του κτιρίου, δηλαδή το κτίριο συγκροτείται από τα ίδια ακριβώς πλαίσια τοποθετημένα ανά 3.0 m μεταξύ τους.

Η ποιότητα σκυροδέματος που προβλεπόταν από την μελέτη ήταν B225 (αντίστοιχη στην ποιότητα C16/20 του σημερινού κανονισμού). Τα υποστυλώματα και οι δοκοί φέρουν διαμήκη οπλισμό με ποιότητα χάλυβα StIII και εγκάρσιο οπλισμό ποιότητας StI (με τάσεις διαρροής αντίστοιχα 420 και 220 MPa). Στο σχήμα 10.5 παρουσιάζεται αναλυτικά ο οπλισμός των δομικών μελών του κτιρίου. Οι συνδετήρες τόσο των υποστυλωμάτων όσο και των δοκών είναι διατομής Φ8 και τοποθετούνται ανά 200 mm κατά μήκος του στοιχείου. Όλα τα φατνώματα της ανωδομής θεωρούνται τοιχοπληρωμένα με τοιχοποιία θλιπτικής αντοχής $f_{wk}=5.0$ MPa και πάχους 15 cm.

Για την ανάλυση του κτιρίου, μορφώθηκε κατάλληλο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων. Οι στύλοι και οι δοκοί του παραπάνω κτιρίου προσομοιώθηκαν με δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία δοκού στα οποία δόθηκαν κατάλληλες ιδιότητες. Το μέτρο ελαστικότητας ελήφθη γενικώς ίσο με $E=27.5$ GPa ενώ στις δοκούς μειώθηκε κατά 50% για να προσομοιωθεί η πρόωρη ρηγμάτωση του σκυροδέματος σε αυτές. Η περιοχή που βρίσκεται εντός των κόμβων δοκών - στύλων λήφθηκε υπόψη ως απαραμόρφωτη. Ως θέσεις

233



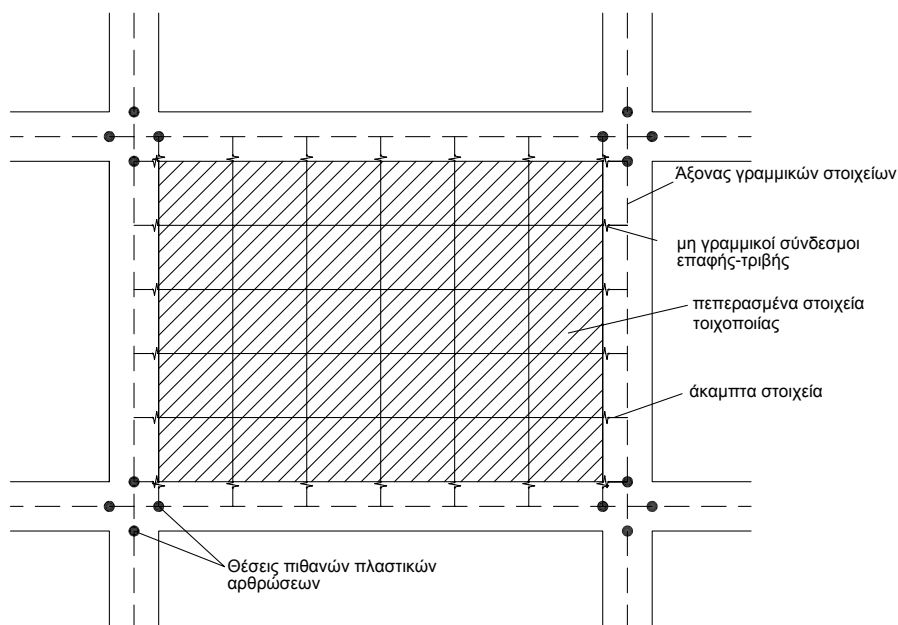
Σχ. 10.5 Οπλισμός του εννιαώροφου κτιρίου.

Για να επιτευχθεί μια όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική προσομοίωση της συμπεριφοράς της τοιχοποιίας κατά τη διάρκεια του σεισμού χρησιμοποιήθηκαν επίπεδα πεπερασμένα στοιχεία. Συγκεκριμένα, οι τοιχοποιίες προσομοιώθηκαν σε κάθε φάτνωμα με δίκτυο τετρακομβικών επίπεδων πεπερασμένων στοιχείων σταθερού πάχους 15 cm. Τα στοιχεία αυτά συνδέονται με το πλαίσιο μέσω μη γραμμικών στοιχείων που κατά την αξονική τους διεύθυνση

μεταφέρουν μόνο θλιπτικές δυνάμεις ενώ στην εγκάρσια διεύθυνση τους λαμβάνουν υπόψη και μεταφέρουν τις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται μεταξύ του πλαισίου και της τοιχοποιίας (σχήμα 10.6). Για την τριβή μεταξύ τοιχοποιίας και πλαισίου ελήφθη υπόψη μοντέλο τύπου Coulomb με συντελεστή ίσο με $\mu = 0.6$.

Τα κατανεμημένα μόνιμα φορτία της κατασκευής υπολογίστηκαν σε 6 kN/m^2 και το κινητό φορτίο ελήφθη ίσο με 2 kN/m^2 . Τέλος, έγινε τραπεζοειδής κατανομή των φορτίων των πλακών στις δοκούς. Επιπλέον, ελήφθησαν υπόψη τα φορτία των τοιχοποιιών που εδράζονται απευθείας επάνω στις δοκούς (4 kN/m).

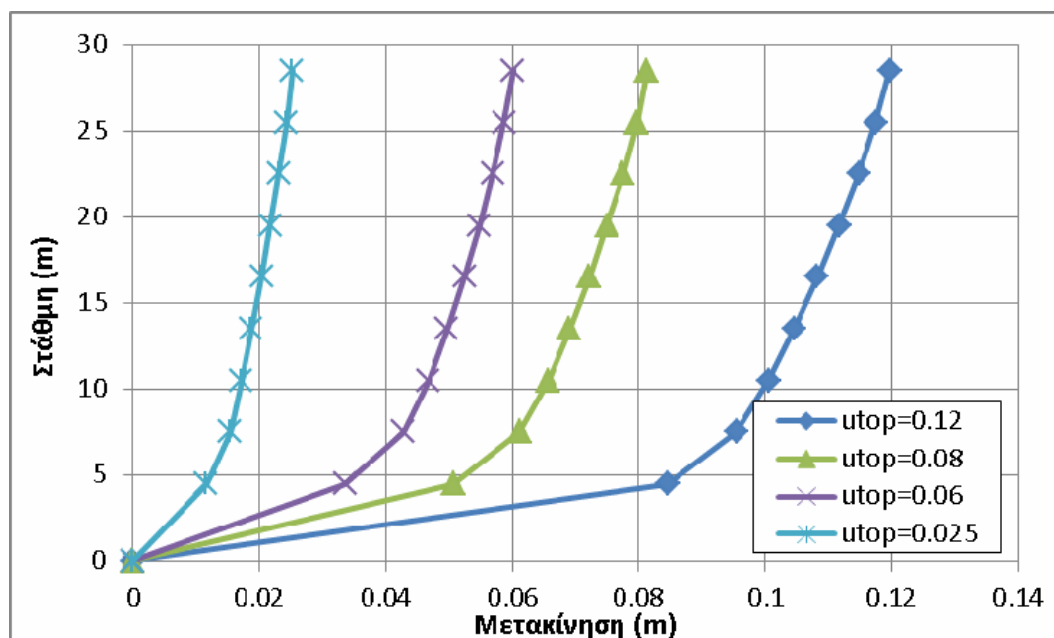
Τόσο για την αποτίμηση της αντοχής, όσο και για την ενίσχυση, χρησιμοποιήθηκαν τα φάσματα του Ευρωκώδικα 8 με ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II ($\alpha=0.24$), κατηγορία σπουδαιότητας 1, κατηγορία εδάφους C και συντελεστή εδάφους $S=1.15$. Τέλος, επιλέχθηκε επίπεδο επιτελεστικότητας «προστασίας ζωής».



Σχ. 10.6 Προσομοίωση της τοιχοποιίας.

Το προσομοίωμα υποβλήθηκε σε μη γραμμική στατική ανάλυση, από την οποία διαπιστώθηκαν οι αδυναμίες του κτιρίου. Η ύπαρξη των τοιχοπληρώσεων στην ανωδομή δημιουργεί ένα προφίλ μετακινήσεων στο οποίο παρατηρούνται μεγάλη γωνιακή παραμόρφωση στον μαλακό όροφο (pilotis) και μικρότερες στους ορόφους της ανωδομής (σχήμα 10.7). Ως αποτέλεσμα, τα άκρα των υποστυλωμάτων της pilotis πλαστικοποιούνται γρήγορα και εμφανίζονται γωνίες στροφής χορδής πέραν των επιτρεπτών ορίων του επιπέδου επιτελεστικότητας που επιλέχθηκε. Η τέμνουσα βάσης του κτιρίου είναι $F_{b,Y} = 650 \text{ kN}$ και η δυσκαμψία $K_Y = 65.500 \text{ kN/m}$. Η στοχευόμενη μετακίνηση είναι $d_{t,Y}^* = 9.6 \text{ cm}$ και ο λόγος $F_{y,Y}^* / m_Y^* = 0.13$, ενώ η απόσβεση του υφιστάμενου κτιρίου $\zeta_E = 29\%$. Ο συντελεστής μετασχηματισμού είναι $\Gamma_Y = 0.66$ και η μετακίνηση της pilotis υπολογίζεται σε $d_{pil,Y} = \Gamma_Y d_{t,Y}^* = 6.3 \text{ cm}$. Η μετακίνηση αυτή δημιουργεί γωνιακή παραμόρφωση μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί στη στάθμη επιτελεστικότητας «προστασία ζωής» σύμφωνα με τον

ΚΑΝΕΠΕ. Η μετακίνηση που θα ικανοποιούσε τα προηγούμενα όρια υπολογίζεται σε $d_{\Pi Z} = 5.4 \text{ cm}$. Επομένως, κρίνεται σκόπιμο να γίνει ενίσχυση της pilotis για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του κτιρίου έναντι σεισμού. Η ενίσχυση αποσκοπεί στην αύξηση της δυσκαμψίας και της αντοχής του ορόφου της pilotis με στόχο τη μείωση των μετακινήσεων σε αυτή.



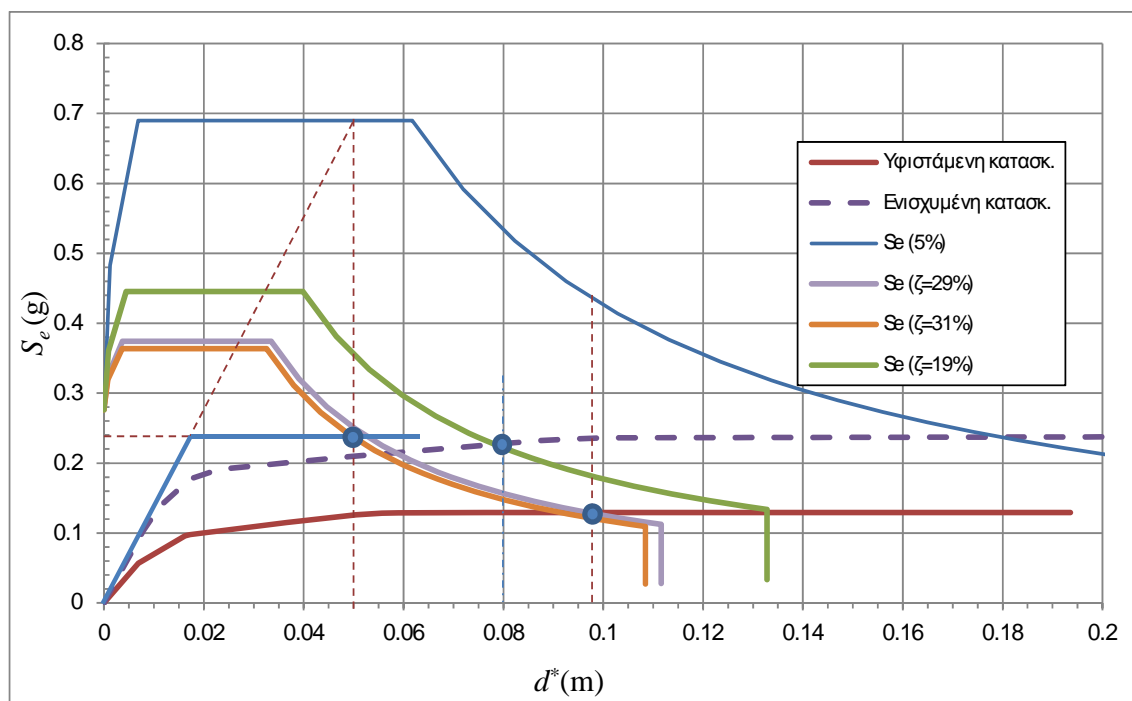
Σχ. 10.7 Προφίλ μετακινήσεων του μη ενισχυμένου κτιρίου.

Η προδιαστασιολόγηση του συνδέσμου γίνεται με τη μεθοδολογία που διατυπώθηκε στην παράγραφο 10.2, από τα χαρακτηριστικά του υφιστάμενου κτιρίου. Η καμπύλη $F^*/m^* - d^*$ του υφιστάμενου κτιρίου δίνεται στο σχήμα 10.8 (συνεχής γραμμή). Γίνεται υπόθεση του συντελεστή $\Gamma_E = 0.75\Gamma_Y = 0.50$ λόγω αλλαγής των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών του ενισχυμένου κτιρίου σε σχέση με το μη ενισχυμένο. Συνεπώς, σε όρους του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος, η οριακή μετακίνηση που αντιστοιχεί στο επίπεδο επιτελεστικότητας «προστασία ζωής» είναι $d_{\Pi Z, E}^* = d_{\Pi Z} / \Gamma_E = 10.8 \text{ cm}$. Επιλέγεται μια σημαντικά μικρότερη στοχευόμενη μετακίνηση για το ενισχυμένο κτίριο $d_{t, E}^* = 5.0 \text{ cm}$ και απόσβεση $\zeta_E = 31\%$. Με τα χαρακτηριστικά αυτά υπολογίζεται $F_{y, E}^* / m_E^* = 0.24$, $T_E = 0.54 \text{ sec}$, $K_E = 107.000 \text{ kN/m}$ και τελικώς $K_{\Pi} = 41.500 \text{ kN/m}$. Επίσης, από τη σχέση (3) υπολογίζεται η τέμνουσα βάσης του ενισχυμένου κτιρίου $F_{b, E} = 1130 \text{ kN}$ και συνεπώς η δύναμη που πρέπει να παραλαμβάνει το σύστημα ενίσχυσης $F_{\Pi} = 480 \text{ kN}$.

Επιλέγεται να τοποθετηθούν δύο πανομοιότυποι σύνδεσμοι στα ακριανά φατνώματα του κτιρίου, άρα κάθε σύνδεσμος θα πρέπει να έχει δυσκαμψία 20.750 kN/m και ικανότητα παραλαβής δύναμης 240 kN . Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά σχεδιάστηκε μεταλλικός σύνδεσμος με διατομή διπλού ταυ με ύψος $h = 120 \text{ mm}$, πάχος πελμάτων και κορμού $t_f = t_w = 20 \text{ mm}$ και πλάτος πέλματος $b = 200 \text{ mm}$. Το μήκος του συνδέσμου υπολογίστηκε σε $L = 1.59 \text{ m}$ με χάλυβα ποιότητας S355. Για την προσομοίωση των συνδέσμων

χρησιμοποιούνται γραμμικά δομικά στοιχεία με διατομή ίση με αυτή του διπλού του και θεωρούνται ως θέσεις πιθανών πλαστικών αρθρώσεων τα άνω και κάτω άκρα τους.

Στη συνέχεια γίνεται εκ νέου μη γραμμική στατική ανάλυση του ενισχυμένου κτιρίου για να διαπιστωθεί κατά πόσο είναι επιτυχείς οι επιλογές της προδιαστασιολόγησης. Η καμπύλη ικανότητας του ενισχυμένου κτιρίου αποτυπώνεται στο ίδιο διάγραμμα με την καμπύλη ικανότητας του μη ενισχυμένου κτιρίου (σχήμα 10.8 – διακεκομμένη γραμμή). Παρατηρείται ότι, ενώ η αντοχή και η αρχική δυσκαμψία του ενισχυμένου κτιρίου ανταποκρίνονται πλήρως στις προδιαγραφές της προδιαστασιολόγησης, εμφανίζονται διαφορές ως προς τη στοχευόμενη μετακίνηση και το επίπεδο υστερητικής απόσβεσης. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στο ότι η στοχευόμενη μετακίνηση υπολογίζεται βάσει του Ευρωκώδικα 8 με τη βοήθεια διγραμμικής προσέγγισης της καμπύλης συμπεριφοράς, που δεν ταυτίζεται πάντα με την πραγματική. Σε γενικές γραμμές πάντως τα αποτελέσματα είναι πολύ ικανοποιητικά σε ότι αφορά τη συνολική συμπεριφορά του ενισχυμένου κτιρίου.

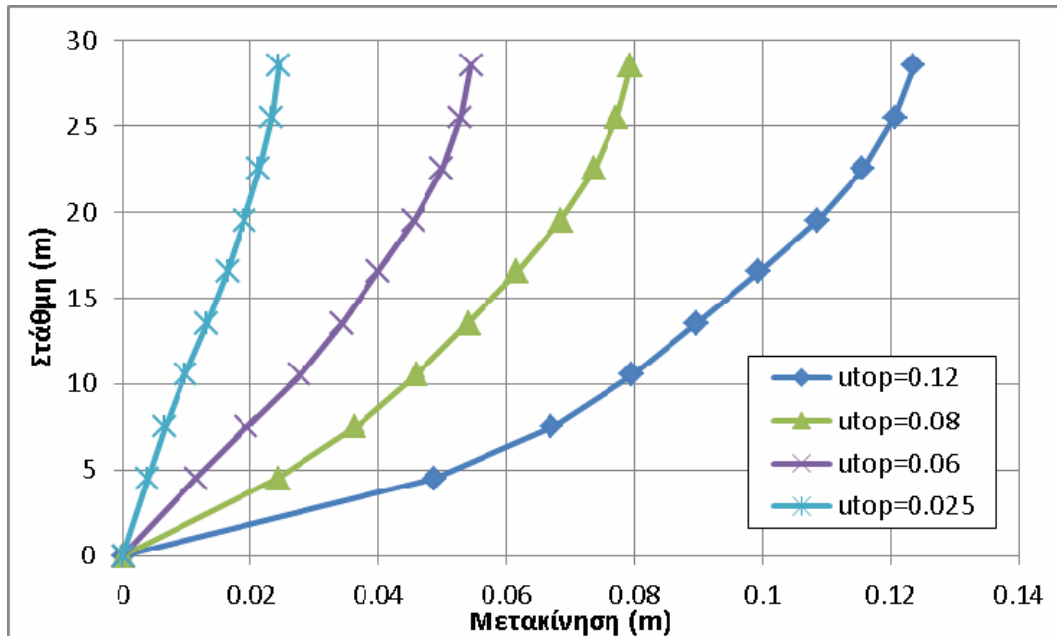


Σχ. 10.8 Καμπύλη φασματικής ικανότητας ενισχυμένου και μη ενισχυμένου κτιρίου.

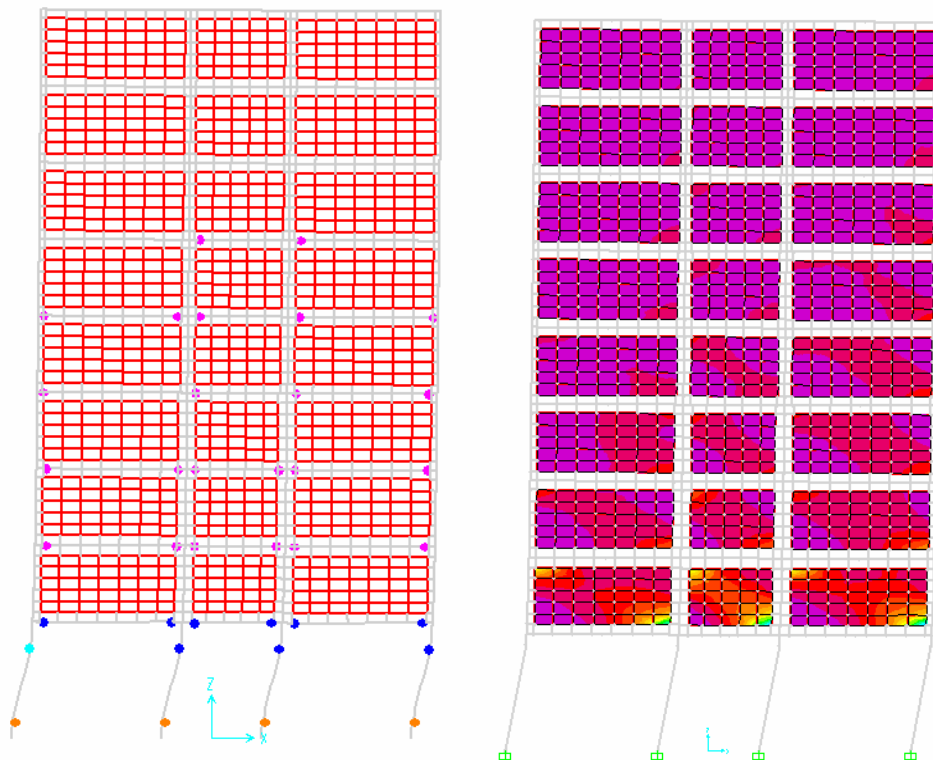
Στο σχήμα 10.9 παρουσιάζονται τα νέα προφίλ των μετακινήσεων μετά την ενίσχυση. Παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του ενισχυμένου κτιρίου διαφέρει σημαντικά και η γωνιακή παραμόρφωση της pilotis είναι εμφανώς μικρότερη σε σχέση με το μη ενισχυμένο κτίριο. Ουσιαστικά, ο μαλακός όροφος έχει εξαλειφθεί.

Στο σχήμα 10.10 φαίνεται η παραμόρφωση του φορέα και η κατανομή των τάσεων στην τοιχοποιία για το μη ενισχυμένο κτίριο, ενώ στο σχήμα 10.11 φαίνεται η παραμόρφωση του φορέα και η κατανομή των τάσεων στην τοιχοποιία για το ενισχυμένο. Η εικόνα των παραμορφώσεων του κτιρίου πριν και μετά την ενίσχυση, επιβεβαιώνει το παραπάνω συμπέρασμα. Επίσης, από την εικόνα των πεδίων των τάσεων παρατηρείται αύξηση στις τάσεις της τοιχοποιίας μετά την ενίσχυση, κυρίως στους κατώτερους ορόφους, οι τιμές των οποίων όμως είναι χαμηλότερες από την κρίσιμη θλιπτική αντοχή. Στο σχήμα 10.12

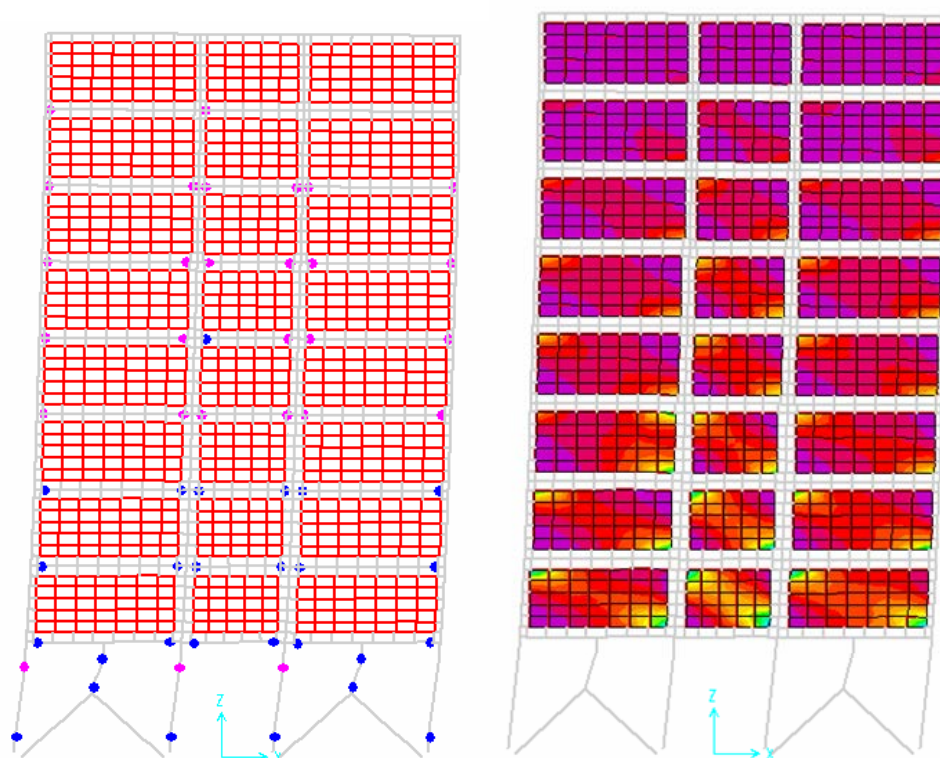
συνοψίζονται οι μέγιστες τιμές των τάσεων της τοιχοποιίας πριν και μετά την ενίσχυση. Παρατηρείται ότι, παρόλο που οι μέγιστες τάσεις σχεδόν διπλασιάστηκαν σε κάποιες περιπτώσεις, δε διαπιστώθηκε υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής των τοιχοποιιών λόγω της προσθήκης των μεταλλικών συνδέσμων.



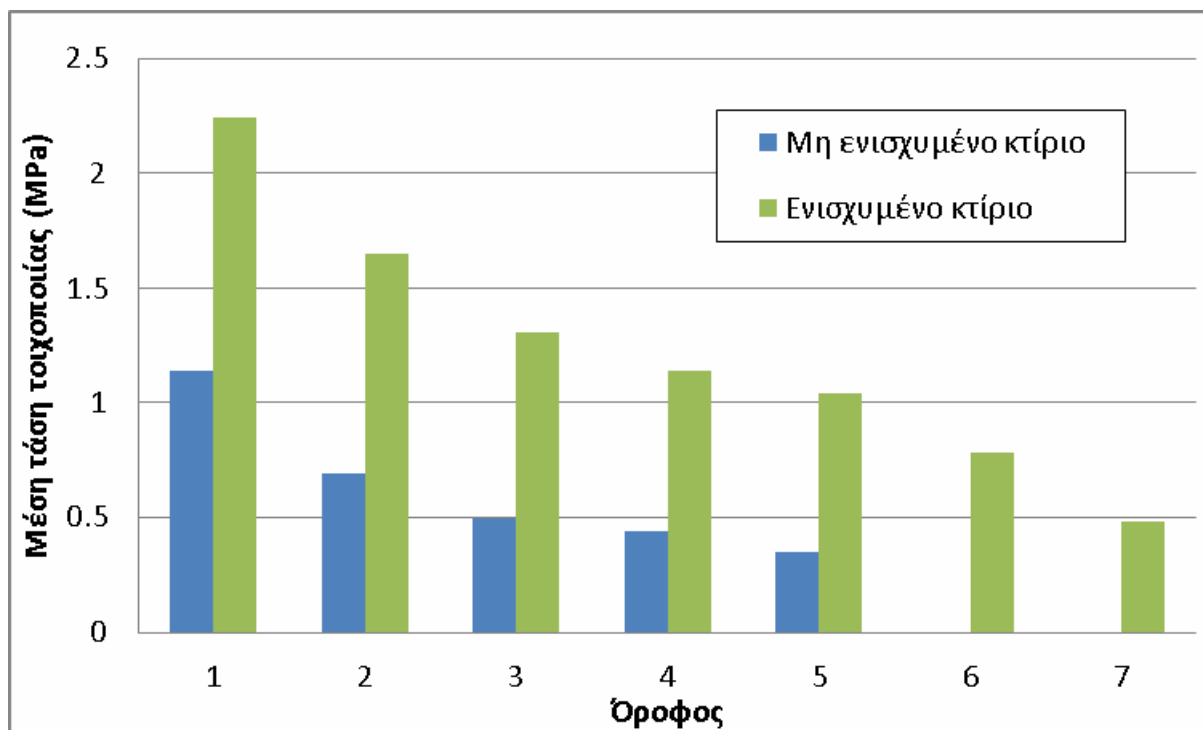
Σχ. 10.9 Προφίλ μετακινήσεων του ενισχυμένου κτιρίου.



Σχ. 10.10 Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων στην τοιχοποιία για το μη ενισχυμένο κτίριο.



Σχ. 10.11 Παραμορφωμένη κατάσταση και κατανομή των τάσεων στην τοιχοποιία για το ενισχυμένο κτίριο.



Σχ. 10.12 Μέγιστες τιμές των τάσεων της τοιχοποιίας σε κάθε όροφο για το μη ενισχυμένο και το ενισχυμένο κτίριο.

10.4 Συμπεράσματα

Η παρουσία των μεταλλικών συνδέσμων προκαλεί αύξηση της δυσκαμψίας της pilotis εμποδίζοντας το κτίριο να αναπτύξει μηχανισμό ορόφου. Περιορίζονται σημαντικά οι μετακινήσεις της κορυφής με αποτέλεσμα η αύξηση των μετακινήσεων καθ' ύψος του κτιρίου να γίνεται πιο ομαλά και να μην περιορίζονται οι παραμορφώσεις κυρίως στην pilotis. Επιπλέον, οι μεταλλικοί σύνδεσμοι όταν ενεργοποιούνται απορροφούν μεγάλο ποσοστό της σεισμικής έντασης και οδηγούνται γρήγορα στη διαρροή. Με αυτό τον τρόπο ανακουφίζουν την pilotis και καθυστερούν τα άκρα των υποστυλωμάτων να φτάσουν στη διαρροή. Παράλληλα με την αποφυγή εμφάνισης μηχανισμού ορόφου, περιορίζονται σημαντικά οι γωνίες στροφής χορδής των υποστυλωμάτων. Η σημαντική μείωση των παραμορφώσεων στην pilotis προκαλεί όμως αύξηση της έντασης στην ανωδομή. Ο φέρων οργανισμός δέχεται μεγαλύτερες καταπονήσεις και έτσι, αρκετές δοκοί της ανωδομής παρουσιάζουν στα άκρα τους πλαστικές αρθρώσεις, ενώ παράλληλα στον οργανισμό πλήρωσης εμφανίζεται αύξηση των τάσεων. Επομένως, η μεταλλική ενίσχυση με τον σύνδεσμο υψηλής δυσκαμψίας βελτιώνει την συμπεριφορά του κτιρίου, αποτρέποντας την εμφάνιση μαλακού ορόφου, ωστόσο πρέπει να επιλέγεται με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην δημιουργούνται νέα προβλήματα στην ανωδομή.

Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι για την αποτίμηση της συμπεριφοράς του φορέα που έχει ενισχυθεί με τις προτεινόμενες διατάξεις δεν αρκεί η εφαρμογή της στατικής γραμμικής ανάλυσης, αλλά είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί μία από τις εξής μεθόδους:

- στατική μη γραμμική ανάλυση, όπως εφαρμόστηκε στο παράδειγμα του ενισχυμένου εννιαώροφου κτιρίου που περιγράφεται εκτενώς στην παράγραφο 10.3,
- δυναμική μη γραμμική ανάλυση με εν χρόνω ολοκλήρωση.

Για την ανάλυση του ενισχυμένου φορέα πρέπει να μορφωθεί κατάλληλο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων. Όπως αποδεικνύεται από το παράδειγμα του εννιαώροφου κτιρίου οι προτεινόμενες μεταλλικές διατάξεις μπορούν να προσομοιωθούν αποτελεσματικά σε κοινά λογισμικά στατικής ανάλυσης μέσω απλουστευμένων γραμμικών στοιχείων. Οι αρχές προσομοίωσης που εφαρμόζονται είναι αυτές που απαιτούνται από αντισεισμικούς κανονισμούς, όπως ο Ευρωκώδικας 8 και ο ΚΑΝΕΠΕ. Σε κάθε περίπτωση, για τον επιτυχή έλεγχο της συμπεριφοράς του ενισχυμένου φορέα, θα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στο αριθμητικό μοντέλο μια όσο το δυνατό ακριβέστερη προσομοίωση της συμπεριφοράς των τοιχοπληρώσεων.

Αξιολογώντας την αξιοπιστία της μεθόδου, η διαδικασία προδιαστασιολόγησης των μεταλλικών συνδέσμων βασίζεται στη μέθοδο μη-γραμμικής στατικής ανάλυσης (Pushover). Επομένως, η διαδικασία προδιαστασιολόγησης αυτόματα υιοθετεί όλα τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής. Γενικά όμως αποτελεί μια αξιόπιστη, αποτελεσματική και εύκολη διαδικασία για την προδιαστασιολόγηση των υπό μελέτη μεταλλικών συνδέσμων. Αφού έχουν επιλεγεί τα χαρακτηριστικά των συνδέσμων για την ενίσχυση μιας οποιασδήποτε υφιστάμενης κατασκευής μέσω της προτεινόμενης μεθοδολογίας, στη συνέχεια, η αποτίμηση της συμπεριφοράς της ενισχυμένης κατασκευής μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς περιορισμούς, με οποιαδήποτε άλλη κατάλληλη μέθοδο, όπως με ισοδύναμη στατική ανάλυση, μη-γραμμική ανάλυση με χρονική ολοκλήρωση κλπ.

11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Aiken I., Nims D.K., Whittaker A.S. and Kelly J.M., 1993: "Testing of Passive Energy Dissipation Systems". *Earthquake Spectra*, Vol 9, No 3.
- Aiken I., Lopez W., Moore K., Prasad B., Sinclair M., Deierlein G., Goel S., Lyons B., Maranian P., Miranda E., Popov E., Saunders M. and Stojandinovic B., 1999: "Recommended Provisions for Buckling-Restrained Braced Frames". *Structural Engineers Association of Northern California - Seismology and Structural Standards Committee*.
- Antonucci R., Balducci F., Bartera F., Castellano M.G., Fuller K. and Giacchetti R., 2004: "Shaking table testing of an rc frame with dissipative bracings". *13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada*, # 1967.
- Antonucci R., Balducci F., Bartera F., Castellano G. and Chaudat T., 2006: "Shaking table tests on rc frame braced with fluid viscous dampers". *1st European Conference of Earthquake Engineering and Seismology, Geneva*, # 650.
- Astaneh-Asl A., 1998: "Seismic Behavior and Design of Gusset Plates Structural steel educational council". *Technical information and product service*.
- Badoux M. and Jirsa J.O., 1990: "Steel bracing of rc frames for seismic retrofitting". *Journal of Structural Engineering*, Vol 116, No 1.
- Bairrao R., Bursi O., Carydis P., Maggonete G., Mouzakis H., Tirelli D. and Williams M., 2004: "Benchmark testing and performance comparison of shaking tables and reaction walls". *13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada*, # 441.
- Bartera F. and Giacchetti R., 2004: "Steel dissipating braces for upgrading existing building frames". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 60, pp 751-769.
- Berman J.W. and Bruneau M., 2007: "Experimental and analytical investigation of tubular links for eccentrically braced frames". *Engineering Structures*, Vol 29, pp 1929 - 1938.
- Bouwkamp J., 2000: "A ductile steel eccentrically-braced system as seismic retrofit for brick-masonry infilled concrete frames". *G. Penelis International symposium on concrete and masonry structures*.
- Bruneau M. and Sarraf M., 2000: "Innovative application of ductile systems in seismic retrofit of deck truss bridges". *12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand*, # 1350.
- Bruneau M., Engelhardt M., Filiatrault A., Goel S.G., Itani A. et al., 2005: "Review of selected recent research on US seismic design and retrofit strategies for steel structures". *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol 7, pp 103-114.
- Bubela R.K., Prion H.G.L. and Ventura C.E., 2002: "Cyclic testing of steel chevron braced frames with vertical slotted connections". *12th European Conference on Earthquake Engineering, London*, # 863.
- Bush T.D., Jones E.A. and Jirsa J.O., 1991(α): "Behaviour of RC frame strengthened using structural steel bracing". *Journal of Structural Engineering*, Vol 117, No 4, pp 1115-1126.
- Bush T.D., Wyllie L.A. and Jirsa J.O., 1991(β): "Observation on two seismic strengthening schemes for concrete frames". *Earthquake Spectra*, Vol 7, No 4.
- Butterworth J.W., 1999: "Seismic damage limitation in steel frames using friction energy dissipaters". *6th International Conference on Steel & Space Structures, Singapore*.

- Butterworth J. and Clifton C., 2000: "Performance of hierarchical friction dissipating joints in moment resisting steel frames". *12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, # 718*.
- Carden L.P., Itani A.M. and Buckle I.G., 2006: "Seismic Performance of Steel Girder Bridges with Ductile Cross Frames Using Single Angle X Braces". *Journal of Structural Engineering, Vol 132, No 3, pp 329-337*.
- Chan R., Albermani F. and Williams M., 2007: "Hysteretic Damping of Shear Panel Energy Dissipater". *5th Australasian Congress on Applied Mechanics, ACAM 2007, Australia*.
- Chao S-H, Khandelwal K. and El Tawil S., 2005: "Ductile web fracture initiation in steel shear links". *Journal of Structural Engineering, Vol 132, No 8, pp 1192-1200*.
- Chen S-T, Jeng V., Chen S-J and Chen C-C., 2001: "Seismic assesement and strengthening method of existing rc buildings in response to code revision". *Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Vol 3, No 1, pp 67-77*.
- Ciampi V., De Angelis M. and Renzi E., 2000: "Optimal semi active and passive control of the seismic response of coupled frame bracing systems". *12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, # 2288*.
- D' Aniello M., 2006: "Seismic upgrading of rc structure by steel eccentric bracing (an experimental and numerical study)". *Pollack Periodica, An international journal for Engineering and information Sciences, Vol 1, No 2, pp 17-32*.
- De Oliveira J-C, Packer J. and Christopoulos C., 2008: "Cast Steel Connectors for Circular Hollow Section Braces under Inelastic Cyclic Loading". *Journal of Structural Engineering, Vol 134, No 3, pp 374-383*.
- Diaferio M., Foti D. and Nobile R., 2009: "Hysteretic dissipaters made of aluminium and steel: Optimal design and preliminary characterization tests". *International Journal of Advanced Structural Engineering, Vol 1, No 1, pp 77-92*.
- Di Sarno L. and Elnashai A.S., 2002: "Seismic Retrofitting of steel and composite building structures". Mid-America Earthquake Center Civil and Environmental Engineering Department University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Di Sarno L. and Elnashai A.S., 2005: "Innovative strategies for seismic retrofitting of steel and composite structures". *Earthquake engineering and structural dynamics, Vol 7, pp 115-135*.
- Di Sarno L., Elnashai A.S. and Nethercot D.A., 2008: "Seismic response of stainless steel braced frames". *Journal of Constructional Steel Research, Vol 64, pp 914-925*.
- Dolce M., Cardone D., Marnetto R., Mucciarelli M., Nigro D., Ponzo F.C. and Santansiero G., 2004: "Experimental static and dynamic response of a real rc frame upgreaded with sma re-centering and dissipating braces". *13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada, # 2878*.
- Dolce M., Cardone D., Ponzo F. and Valente C., 2005: "Shaking table tests on reinforced concrete frames without and with passive control systems". *Earthquake engineering and structural dynamics, Vol 34, pp 1687-1717*.
- Dorka U.E. and Schmidt K., 2002: "Retrofitting of Buildings with Masonry Infill using HYDE concept". *12th European Conference on Earthquake Engineering, London, # 206*.
- Dorka U.E. and Gleim S., 2006: "Hyde systems for earthquake protection of residential buildings". *Advances in Earthquake Engineering for Urban Risk Reduction, pp 195-208*.
- Δρίτσος Στ., 2005: «Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών». Πάτρα.

- EUROCODE 8: "Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings". CEN 2004.
- Field C.J., 2003: "Simulation of full-scale seismic-resistant structural frame tests using LS-DYNA 960 Implicit Solver". *4th European LS-DYNA users conference*, pp 17-30.
- Foti D., Bozzo L. and Lopez-Almansa F., 1998: "Numerical Efficiency assessment of energy dissipators for seismic protection of buildings". *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol 27, pp 543-556.
- Fukuyama H. and Sugano S., 2000: "Japanese seismic rehabilitation of concrete buildings after the Hyogoken-Nanbu Earthquake". *Cement & Concrete Composites* Vol 22, pp 59-79.
- Ghaffarzadeh H. and Maheri M.R., 2006: "Mechanical Compression release device in steel bracing system for retrofitting RC frames". *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol 5, No1 pp 151-158.
- Ghobarah A. and Abou Elfath H., 2001: "Rehabilitation of a r/c frame using eccentric steel bracing". *Engineering Structures*, Vol 23, pp 745-755.
- Hitaka T., Matsui C. and Sakai J., 2007: "Cyclic tests on steel and concrete-filled tube frames with SlitWalls". *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol 36, pp 707-727.
- Infanti S., Papanikolas P., Benzon G. and Castellano M.G., 2004: "Rion Antirio bridge: Design and full scale testing of the seismic protection devices". *13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada*, # 2174.
- Inoue K., Sawaizumi S. and Higashibata Y., 2001: "Stiffening requirements for unbonded braces encased in concrete panels". *Journal of Structural Engineering*, Vol 127, No 6, pp 712-719.
- Ishii T., Mukai T., Kitamura H., Shimizu T., Fujisawa K. and Ishida Y., 2004: "Seismic retrofit for existing r/c building using energy dissipative braces". *13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada*, # 1209.
- Jara J.M., Ayala A.G. and Miranda E., 2001: "Seismic behaviour of structures with energy dissipating systems in Mexico". *12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand*, # 175.
- Kazem H. and Nateghi F., 2006: "Seismic strengthening of a low rise steel framed school". *1st European Conference of Earthquake Engineering and Seismology, Geneva*, # 588.
- Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.): Τελικό σχέδιο κειμένου – 3. Αθήνα, 2009.
- Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ. ΕΠΕ.), 2010. *Τελικό κείμενο*, ΟΑΣΠ.
- Kim J. and Seo Y., 2004: "Seismic design of low-rise steel frames with buckling-restrained braces". *Engineering Structures*, Vol 26, pp 543-551.
- Kim W-b., 2001: "Ultimate strength of tube-gusset plate connections considering eccentricity". *Engineering Structures*, Vol 23, pp 1418-1426.
- Kit Miyamoto H., 2000: "State of the art application of passive energy dissipaters". *12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand*, # 1052.
- Kunisue A., Koshika N., Kurokawa Y., Suzuki N., Agami J. and Sakamoto M., 2000: "Retrofitting method of existing reinforced concrete buildings using elasto-plastic steel dampers". *12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand*, #648.
- Lin P.Y., Chung L.L., Loh C.H., Cheng C.P., Roschke P.N. and Chang C.C., 2002: "Experimental study of seismic protection for structures using mr dampers". *12th European Conference on Earthquake Engineering, London*, # 249.

- Lotfollahi M. and Mofid M., 2008: "Innovative method in seismic design of slab-on-girder steel bridges". *Journal of Constructional Steel Research*.
- Lu X. and Zhou Q., 2002: "Dynamic analysis method of a combined energy dissipation system and its experimental verification". *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol 31, pp 1251-1265.
- Maheri M.R. and Sahebi A., 1997: "Use of steel bracing in reinforced concrete frames". *Engineering Structures*, Vol 19, No 12, pp 1018-1024.
- Maheri M.R. and Akbari R., 2003 (α): "Seismic behaviour factor, R, for steel X-braced and knee-braced RC buildings". *Engineering Structures*, Vol 25, pp 1505-1513.
- Maheri M.R. and Hadjipour A., 2003 (β): "Experimental investigation and design of steel brace connection to RC frame". *Engineering Structures*, Vol 25, pp 1707-1714.
- Maheri M.R., Kousari R. and Razazan M., 2003 (γ): "Pushover tests on steel X-braced and knee-braced RC frames". *Engineering Structures*, Vol 25, pp 1697-1705.
- Maheri M.R., 2005: "Recent advances in seismic retrofit of rc frames". *Asian Journal of Civil Engineering (building and housing)*, Vol 6, No 5, pp 373-391.
- Malhotra A., Carson D., Gopal P., Braimah A., Di Giovanni G. and Pall R., 2004: "Friction dampers for seismic upgrade of st. Vincent hospital, Ottawa". *13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada*, # 1952.
- Martinez Romero E., 1993: "Experiences on the use of supplementary energy dissipators on building structures". *Earthquake Spectra*, Vol 9, No 3.
- Martinez-Rodrigo M. and Romero M.L., 2003: "An optimum retrofit strategy for moment resisting frames with nonlinear viscous dampers for seismic applications". *Engineering Structures*, Vol 25, pp 913-925.
- Martinez-Rueda J-E., 2002: "On the Evolution of Energy Dissipation Devices for Seismic Design". *Earthquake Spectra*, Vol 18, No 2, pp 309-346.
- Mardinez-Rueda J-E., 2004: "Cyclic response of a low invasivity bracing system for the passive control of framed structures". *13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada*, # 951.
- Masri A.C. and Goel S.C., 1996: "Seismic design and testing of an rc slab-column frame strengthened by steel bracing". *Earthquake Spectra*, Vol 12, No 4.
- Mazzolani F., Della Corte G. and Faggiano B., 2004: "Seismic upgrading of rc buildings by means of advanced techniques: The ILVA-IDEM project". *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004*. #2703.
- Mazzolani F., 2006: "Seismic upgrading of RC buildings by advanced techniques". The ILVA-IDEM Research Project. *Polimetrika. International Scientific Publisher*.
- Mazzolani F., 2009: "Steel bracing systems for the seismic upgrading of RC structures". *Steel Construction*, Vol 2, No 4.
- Mazzolani F., Dell a Corte G. and D' Aniello M., 2009: "Experimental analysis of steel dissipative bracing systems for seismic upgrading". *Journal of Civil Engineering and Management*. Vol 15, No 1, pp 7-19.
- Mitchell D., Tremblay R., Karacabeyli E., Paultre P., Saatcioglu M., Anderson D.L. Murat Saatcioglu and Donald L. Anderson., 2003: "Seismic force modification factors for the proposed 2005 edition of the National Building Code of Canada". *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol 30, pp 308-327.

- Molina F., Sorace S., Terenzi G., Magonette G. and Viaccoz B., 2004: "Seismic tests on reinforced concrete and steel frames retrofitted with dissipative braces". *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol 33, pp 1373-1394.
- Molina F., Bairrao R., Blakeborough T., Bursi O., Tirelli D., Magonette G., Mouzakis H. and Williams M., 2006: "Testing performance benchmark for shaking tables and reaction walls within the neforee project". *1st European Conference of Earthquake Engineering and Seismology, Geneva*, # 303.
- MSC Software Corporation, MSC Marc, *Volume A: Theory and User Information*, Version 2010.
- Mualla I. and Belev B., 2002 (α): "Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation". *Engineering Structures*, Vol 24, pp 365-371.
- Mualla I., Nielsen L.O., Belev B., Liao W.I., Loh C.H. and Agrawal A., 2002 (β): "Numerical predictions of shaking table tests on a full scale friction damped structure". *12th European Conference on Earthquake Engineering, London*, # 190.
- Nateghi-A F., 1995: "Seismic strengthening of eightstorey RC apartment building using steel braces". *Engineering Structures*, Vol 17, No 6, pp 455-461.
- Okazaki T., Engelhardt M.D., Nakashima M. and Suita K., 2004: "Experimental study on link-to-column connections in steel eccentrically braced frames". *13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada*, # 275.
- Okazaki T. and Engelhardt M., 2007: "Cyclic loading behavior of EBF links constructed of ASTM A992 steel". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 63, pp 751-765.
- Osanai Y. and Watanabe F., 2000: "Seismic upgrading by precast concrete brace with energy dissipating friction joint". *12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand*, # 587.
- Ozhendekci D. and Ozhendekci N., 2008: "Effects of the frame geometry on the weight and inelastic behaviour of eccentrically braced chevron steel frames". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 64, pp 326-343.
- Pall A., Vezina S., Proulx P. and Pall R., 1993: "Friction damper for seismic control of Canadian space agency headquarters". *Earthquake Spectra*, Vol 9, No 3.
- Παναγόπουλος Γ., 2011: "Αποτίμηση σεισμικής τρωτότητας υφιστάμενων κατασκευών Ο/Σ με τη βοήθεια σύγχρονων αναλυτικών μεθόδων". *Υπό ολοκλήρωση διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.*
- Perera R., Gomez S. and Alarcon E., 2004: "Experimental and analytical study of masonry infill reinforced concrete frames retrofitted with steel braces". *Journal of Structural Engineering*, Vol 130, No 12, pp 2032-2039.
- Perry C.L., Fierro E.A., Sedarat H. and Scholl R.E., 1993: "Seismic upgrade in San Francisco using energy dissipation devices". *Earthquake Spectra*, Vol 9, No 3.
- Pincheira J.A., 1993: "Design strategies for the seismic retrofit of reinforced concrete frames". *Earthquake Spectra*, Vol 9, No 4.
- Pinto A., Varum H. and Molina J., 2002: "Experimental assessment and retrofit of full scale models of existing rc frames". *12th European Conference on Earthquake Engineering, London*, #855.
- Pinto A. and Taucer F., 2006: "Assessment and retrofit of full scale models of existing rc frames". *Advances in Earthquake Engineering for Urban Risk Reduction*, pp 353-367.

- Popov E.P. and Engelhardt M.D., 1988: "Seismic eccentrically braced frame". *J. Construct. Steel Research*, Vol 10, pp 321-354.
- Rai D. and Wallace B., 1998: "Aluminium shear - links for enhanced seismic resistance". *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol 27, pp 315-342.
- Rai D. and J Wallace B., 2000: "Aluminium shear - link for seismic energy dissipation". *12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand*, # 279.
- Rai D. and Goel S.G., 2003: "Seismic evaluation and upgrading of chevron braced frames". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 59, pp 971-994.
- Renzi E., Ranieri N. and Decanio G., 2004: "Experimental verification of seismic protection of steel and rc structures at Enea-Casaccia shaking tables". *13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada*, # 846.
- Richards P.W. and Uang C-M., 2006: "Testing Protocol for Short Links in Eccentrically Braced Frames". *Journal of Structural Engineering*, Vol 132, No 8, pp 1183-1191.
- Sabelli R., Mahin S. and Chang C., 2003: "Seismic demands on steel braced frame buildings with bucklingrestrained braces". *Engineering Structures*, Vol 25, pp 655-666.
- Sam M-T, Balendra T. and Liaw C-Y., 1995: "Earthquake-resistant steel frames with energy dissipating knee elements". *Engineering Structures*, Vol 17, No 5, pp 334-343.
- Sarraf M. and Bruneau M., 1998: "Ductile seismic retrofit of steel deck - truss bridges". *Journal of Structural Engineering*, Vol 124, No 11, pp 1263-1271.
- Sarraf M. and Bruneau M., 2004: "Performance tests of innovative steel retrofitted deck truss bridges". *13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada*, # 1803.
- Schmid K. and Dorka U.E., 2004: "Experimental verification of hyde system". *13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada*, # 3163.
- Solá L-J., 2007: "Retrofitting of rc structures on gravity columns using inverted-Y steel bracings".
- Sorace S. and Terenzi G., 2008: "Seismic Protection of Frame Structures by Fluid Viscous Damped Braces". *Journal of Structural Engineering*, Vol 134, No 1, pp 45-55.
- Σπυράκος Κ., 2004: «Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία». Αθήνα.
- Στυλιανίδης Κ., 1985: «Πειραματική έρευνα συμπεριφοράς τοιχοπληρωμένων μονώροφων πλαισίων Ο.Σ. υπό ανακυκλιζόμενη ψευδοστατική οριζόντια φόρτιση». *Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη*.
- Στυλιανίδης Κ., 2006: «Λήψη αποφάσεων για την προσεισμική και μετασεισμική ενίσχυση κτιρίων». *Μεταπτυχιακό πρόγραμμα ΑΣΤΕ, Θεσσαλονίκη, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.*
- Sugano S., 1996: "State of the art in technics of rehabilitation of buildings", *CD Proc. of the 11th World Conference in Earthquake Engineering, paper No 2175, Acapulco*.
- Sugano S., 2006: "Recent advances in the seismic rehabilitation of reinforced concrete buildings in Japan". *Advances in Earthquake Engineering for Urban Risk Reduction*, pp 19-31.
- Symans M.D., Charney F.A., Whitteker A.S., Constantinou M.C., Kircher C.A., Johnson M.W. and Mc Namara M.J., 2008: "Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments". *Journal of Structural Engineering*, Vol 134, No 1, pp 3-21.

- Takenaka T., 1999: "The steel brace adhesion method for strengthening buildings against earthquakes while the buildings are still being used acquires technical evaluation from the Japan building disaster prevention association".
- Tehranizadeh M., 2001: "Passive energy dissipation device for typical steel frame building in Iran". *Engineering Structures*, Vol 23, pp 643-655.
- Tremblay R. and Robert N., 2000: "Seismic design of low- and medium-rise chevron braced steel frames". *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol 27, No 6, pp 1192-1206.
- Tremblay R., Bolduc P., Neville R. and Devall R., 2006: "Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems". *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol 33, No 2, pp 183-198.
- Tsai K.C., Yang Y.F., and Lin J.L., 1993 (α): "Seismic eccentrically braced frame". *The structural design of tall buildings*, Vol 2, pp 53-74.
- Tsai K-C, Chen H-W, Hong C-P and Su Y-F., 1993 (β): "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic resistant construction". *Earthquake Spectra*, Vol 9, No 3.
- Tsai K-C, Weng Y.T., Lin S-L and Goel S., 2004: "Pseudo dynamic test of a full scale ctf/brb frame: part 1 - performance based specimen design". *13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada*, # 750.
- Uang C-M., Seible F., Mc Danniel C. and Chou C-C., 2005: "Performance evaluation of shear links and orthotropic bridge deck panels for the new San Francisco–Oakland Bay Bridge". *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol 34, pp 393-408.
- Vezina S. and Pall R.T., 2004: "Seismic retrofit of muctc building using friction dampers, Palais des Congres, Montreal". *13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada*, # 1946.
- Vulcano A. and Mazza F., 2000: "Comparative study of the seismic performance of frames using different dissipative braces". *12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand*, # 1982.
- Watanabe F., Miyazaki S., Tani M. and Kono S., 2004: "Seismic strengthening using precast prestressed concrete braces". *13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada*, paper #3406.
- Whittaker A.S., Bertero V.V., Thompson C.L. and Alonso L.J., 1991: "Seismic testing of steel plate energy dissipation devices". *Earthquake Spectra*, Vol 7, No 4.
- Φαρδής Μ., Δρίτσος ΣΤ., 2003: «Σεισμικές βλάβες, Επισκευές και Ενισχύσεις». Τόμος Α'. Αποτίμηση σεισμικών βλαβών, επισκευές και ενισχύσεις κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Πάτρα.
- Xie Q., 2005: "State of the art of buckling-restrained braces in Asia". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 61, pp 727-748.
- Youssef M.A., Ghaffarzadeh H. and Nehdi., 2007: "Seismic performance of RC frames with concentric internal steel bracing". *Engineering Structures*, Vol 29, pp 1561-1568.
- Zahrai M. and Bruneau M., 1999: "Cycling testing of ductile end diaphragms for slab-on-grider steel bridges". *Journal of Structural Engineering*, Vol 125, No 9, pp 987-996.
- Zahrai M. and Bruneau M., 2000: "Seismic performance of diaphragms in slab-on-girder steel bridges". *12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand*, # 2406.
- Zahrai S.M. and Moslehi Tabar A., 2006: "Cyclic behaviour of steel braced frames having shear panel system". *Asian Journal of Civil Engineering (building and housing)*, Vol 7, No 1, pp 13-26.