

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



Διατριβή επί διδακτορία

**Καινοτόμα συστήματα
δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας,
σε πολυώροφα αντισεισμικά μεταλλικά κτίρια.**

Innovative systems for stiffness and energy dissipation
IN ST E D

**Σχεδιασμός,
πειραματική και αναλυτική διερεύνηση.**

Φαίδων Καρυδάκης

Πολιτικός μηχανικός ΕΜΠ, M.Sc., DIC
Βοηθός Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών ΕΜΠ (1977-)

Επιβλέπων: Γεώργιος Ιωαννίδης, Καθηγητής ΕΜΠ

Μέλη συμβουλευτικής επιτροπής:

Χ. Γαντές, Καθηγητής ΕΜΠ

Ι. Ερμόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2011

Στον Αρμάνδο μου και τα όνειρα του...

... στον Σόλωνα μου και τα χαμένα του (τα χαμένα μας) όνειρα!

Στην Σίσσυ, για όλα όσα περάσαμε μαζί ...

Ευχαριστίες οφείλω, στους φίλους μου:

Γιάννη Βάγια,
για την αρχική του ιδέα
την ηθική του συμπαράσταση και συνεχή προτροπή,

Γιώργο Ιωαννίδη,
για την ηθική και υλική του συνδρομή,

Γιάννη Ερμόπουλο,
για τη συμμετοχή του στην τριμελή
και για την ανοχή του σαν διευθυντής του εργαστηρίου,

Γιώργο Γκαζέτα,
για τη συνεχή του υποστήριξη
και όχι μόνον σαυτή την προσπάθεια,

Ξενοφώντα Λιγνό,
για τη συνεργασία του στην εκτέλεση των πειραμάτων

στους συνεργάτες μου

Κώστα Τσοκανή και Patricia Timer
για τη βοήθεια τους

και τέλος στον

Πάυλο Θανόπουλο,
του οποίου η διδακτορική διατριβή
πάνω στην μέθοδο INERD, απετέλεσε πηγή για πολλές
από τις γενικές πληροφορίες και τις βιβλιογραφικές πηγές

Περιεχόμενα:

Περίληψη – δημοσιεύσεις - συνέδρια	1-3
Πρόλογος	1-7
1. Εισαγωγή	
1.1. Αντισεισμικός σχεδιασμός σε κτίρια από χάλυβα.	1-9
1.2. Απαιτήσεις στον σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών σε περιοχές με υψηλή σεισμικότητα.	1-9
1.3. Σχεδιασμός αντιμετώπισης του σεισμικού προβλήματος.	1-11
2. Καινοτόμα συστήματα - Σχεδιασμός.	
2.1. Συνήθη συστήματα αντισεισμικού σχεδιασμού.	2-1
2.2. Κατακόρυφη Vierendeel.	2-6
2.3. Ελεγχόμενη αντίσταση.	2-8
2.4. Πλαστιμότητα – ικανοτικός σχεδιασμός.	2-9
2.5. Αντικαταστασιμότητα.	2-11
2.6. Προοδευτική αστοχία.	2-12
2.7. Προτεινόμενες διατάξεις και μορφές δοκών.	2-12
3. Πειραματική διερεύνηση.	
3.1. Σχεδιασμός πειραματικής διάταξης.	3-1
3.2. Γεωμετρία πειραματικής διάταξης– κόμβοι.	3-4
3.3. Επιβαλλόμενα μεγέθη, μέθοδος επιβολής, πρωτόκολλα φόρτισης.	3-9
3.4. Μετρήσεις	3-11
3.5. Έλεγχοι ακρίβειας – διορθώσεις.	3-14
3.6. Δοκιμαστικές μετρήσεις.	3-15
4. Επιλογή πειραματικών διατάξεων.	
4.1. Τύποι δοκών δυσκαμψίας.	4-1
4.2. Προσαρμογές στις ιδιαιτερότητες του πειράματος.	4-4
4.3. Ιδιότητες του υλικού	4-5
5. Τα πειράματα	5-1
5.1. Πείραμα # 1 - 1 IPE 100.	5-1-1
5.2. Πείραμα # 2 - 5 IPE 100.	5-2-1
5.3. Πείραμα # 3 - 5 SHS 80/5	5-3-1
5.3. Πείραμα # 4 - 1 δίδυμη ορθογωνική ράβδος τύπου INERD 2*12/30	5-4-1
5.4. Πείραμα # 5 - 5 δίδυμες ορθογωνικές ράβδοι τύπου INERD 2*12/30	5-5-1
5.6. Πείραμα # 6 - 5 HE-A 100	5-6-1
5.7. Πείραμα # 7 - 1 HE-A 100	5-7-1
5.8. Πείραμα # 8 – 5 IPE (80-100-120-140-160)	5-8-1
5.9. Πείραμα # 9 - 5 SHS 80/5 με επιμήκεις σκισμές (holes)	5-9-1
5.10. Πείραμα # 10 - 5 HE-A 100 με εγκοπές (dog bones)	5-10-1
5.11. Πείραμα # 11 - 1 rod Φ33 με μονόπλευρο σπείρωμα (single screw).	5-11-1
5.12. Πείραμα # 12 - 1 rod Φ33 με αμφίπλευρο σπείρωμα (double screw)	5-12-1

5.13. Πείραμα # 13 - 1 rod Φ33 με μονόπλευρο σπείρωμα (double screw) Impact loading	5-13-1
5.14. Πείραμα # 14 - 5 rod Φ33 με μονόπλευρο σπείρωμα (single screw)	5-14-1
5.15. Πείραμα # 15 - 5 rod Φ33 με μονόπλευρο σπείρωμα (single screw) δακτυλιοειδείς εγκοπές.	5-15-1
6. Κριτική στην πειραματική διαδικασία.	
6.1. Γενικά.	6-1
6.2. Παρατηρήσεις - Βελτιώσεις – Σχεδιασμός νέων πειραμάτων.	6-2
7. Αναλυτική προσέγγιση	
7.0.1 Προσομοιώματα ανάλυσης.	7-1
7.0.2 Γραμμικοί φορείς	7-4
7.0.3 Φορείς με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία.	7-5
7.0.4 Push over.	7-5
7.0.5 Ανακυκλιζόμενη αυξανόμενη φόρτιση (ECCS).	7-6
7.0.6 Δυναμικές αναλύσεις, χρονοϊστορία (επιταχυνσιογραφήματα)	7-6
7.1 Διάταξη συστήματος INSTED, συνολικό φορέας επιπέδου πλαισίου.	7.1-1
7.2 Φορείς προσομοιωμένοι με ραβδόμορφα στοιχεία.	
7.2.1 1 IPE 100 Πείραμα #1	7.2.1-1
7.2.2 5 IPE 100 Πείραμα #2	7.2.2-1
7.2.3 5 SHS 80/5 Πείραμα #3	7.2.3-1
7.2.4 1 BAR 2*12/30 Πείραμα #4	7.2.4-1
7.2.5 5 BAR 2*12/30 Πείραμα #5	7.2.5-1
7.2.6 5 HE-A 100 Πείραμα #6	7.2.6-1
7.2.7 1 HE-A 100 Πείραμα #7	7.2.7-1
7.2.8 5 IPE 80-160 Πείραμα #8	7.2.8-1
7.2.9 5 SHS 80/5 holes Πείραμα #9	7.2.9-1
7.2.10 5 HE-A 100 slots Πείραμα #10	7.2.10-1
7.2.11 1 ROD Φ33 100 Πείραμα #11-12	7.2.11-1
7.2.12 5 ROD Φ33 100 Πείραμα #14	7.2.12-1
7.3 Φορείς προσομοιωμένοι με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία.	
7.3.1 1 IPE 100 Πείραμα #1	7.3.1-1
7.2.1 1 BAR 2*12/30 Πείραμα #4	7.3.2-1
7.4 Φορείς προσομοιωμένοι με επάλληλα ραβδόμορφα στοιχεία.	
7.2.1 1 BAR 2*12/30 Πείραμα #4	7.4.1-1
7.2.1 5 BAR 2*12/30 Πείραμα #5	7.4.2-1
7.2.1 1 ROD Φ33 100 Πείραμα #11-12	7.4.3-1
7.2.1 5 ROD Φ33 100 Πείραμα #14	7.4.4-1
7.5 Αναλύσεις με χρονοϊστορία, φορείς με ραβδόμορφα στοιχεία.	
7.5.1 5 IPE 100 Πείραμα #2	7.5.1-1
8. Συγκριτική παρουσίαση πειραματικών και αναλυτικών διερευνήσεων.	8-1
9. Μεθοδολογία σχεδιασμού	
9.1 Αναλυτικά προσομοιώματα.	9-1

	1- 3
9.2 Ισοδύναμα προσομοιώματα.	9-1
10. Συμπεράσματα	
10.1 Αντοχή, δυσκαμψία, λειτουργικότητα, απορρόφηση ενέργειας	10-1
10.2 Επισκευασιμότητα – ευκολία αντικατάστασης	10-6
10.3 Τελική σχεδιαστική προσέγγιση	10-7
10.4 Εφαρμογές στην πράξη	10-9
11. Βιβλιογραφία	

Περίληψη – δημοσιεύσεις – συνέδρια.

Το αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής είναι ένα καινοτόμο σύστημα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας σε πολυώροφα αντισεισμικά μεταλλικά κτίρια που αναπτύχθηκε μετά από μία αρχική ιδέα του καθηγητή κ. Ι. Βάγια.

Στα πολυώροφα μεταλλικά κτίρια η απαιτούμενη αντοχή και δυσκαμψία έναντι οριζόντιων φορτίων εξασφαλίζονται συνήθως, είτε με πλαίσια ικανά να παραλάβουν ροπές στους κόμβους τους, είτε με συστήματα αντιδιαγωνίων ράβδων, με ή χωρίς εκκεντρότητα.

Λαμβάνοντας υπ' όψη τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε συστήματος, προτείνεται ένα νέο, που αντικαθιστά τις αντιδιαγώνιες ράβδους ή τα πλαίσια ροπής, με μία σύνθετη δοκό, η οποία αποτελείται από δύο ισχυρούς κατακόρυφους στύλους συνδεόμενους καθ' ύψος με οριζόντιες δοκούς σε σχετικά πυκνή διάταξη, δηλαδή με μία κατακόρυφη δοκό Vierendeel.

Το προτεινόμενο καινοτόμο σύστημα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας, συνοπτικά καλούμενο στη συνέχεια «σύστημα INSTED» (**I**nnovative **s**tiffness and **e**nergy **d**issipation system), έχει τα χαρακτηριστικά ενός τοιχώματος δυσκαμψίας αλλά με τα πρόσθετα πλεονεκτήματα, εφ' ενός της ικανότητας απορρόφησης μεγάλης ποσότητας ενέργειας μέσω των πλαστικών παραμορφώσεων των πλαστικών μελών και αφ' ετέρου, εφ' όσον απαιτηθεί μετά από μία μεγάλη σεισμική καταπόνηση, την ευκολία επισκευής ή και πλήρους αντικατάστασης των μελών αυτών.

Το προτεινόμενο σύστημα διερευνήθηκε πειραματικά σε πραγματική κλίμακα στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ και συσχετίστηκε με ανάλογες μη γραμμικές αναλύσεις.

Οι ενδιάμεσες δοκοί δυσκαμψίας που συνδέονται στα υποστυλώματα μέσω μετωπικών πλακών σε ισχυρές δοκούς υποδοχείς είναι, είτε ολόσωμες πλαστικές δοκοί, είτε συμπαγείς ράβδοι κυκλικής ή τετραγωνικής διατομής (πείροι) που συνδέουν τα δύο τμήματα κάθε δοκού στο μέσον της απόστασης μεταξύ των υποστυλωμάτων.

Και στις δύο πιο πάνω παραλλαγές, η αντίσταση στα οριζόντια φορτία και οι πλαστικοποιήσεις υπό το σεισμό σχεδιασμού συγκεντρώνονται σε συγκεκριμένα προεπιλεγμένα στοιχεία και θέσεις, προστατεύοντας τα υπόλοιπα στοιχεία από διαρροή. Επί πλέον το σύστημα απορρόφησης ενέργειας δεν συμμετέχει στην παραλαβή των κατακόρυφων φορτίων διαφοροποιώντας έτσι τα στοιχεία του φορέα με βάση την κύρια λειτουργία τους. Και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και ευχέρεια αντικατάστασής των πλαστικοποιηθέντων στοιχείων.

Καίτοι το προτεινόμενο σύστημα δυσκαμψίας λειτουργεί πλαισιακά, υπάρχει πλεονέκτημα στην ευχέρεια αντικατάστασης των πλαστικών μελών, σε σύγκριση με ένα φορέα με πλαίσια ροπής, όπου οι πλαστικές αρθρώσεις σχηματίζονται στις δοκούς που δεν είναι εύκολα προσβάσιμες και αντικαταστάσιμες, αποτελούν δε βασικό μέρος του μηχανισμού μεταφοράς των κατακόρυφων φορτίων στο έδαφος.

Στην πειραματική διερεύνηση χρησιμοποιήθηκαν πέντε δοκοί ανά όροφο. Ο αριθμός αυτός δεν είναι προφανώς δεσμευτικός, εξαρτάται από την απαιτούμενη κατά περίπτωση αντοχή και δυσκαμψία και καθορίζεται από το μελετητή. Είναι επίσης δυνατός ο σχεδιασμός των ενδιάμεσων δοκών με διαφορετικές διατομές ώστε να υπάρχει προοδευτική αστοχία.

Στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, πραγματοποιήθηκαν 15 πειράματα σε φυσική κλίμακα με τη διάταξη του προτεινόμενου συστήματος, στο ύψος ενός ορόφου.

Τα πειράματα αναφέρονται είτε σε ομάδες απλών δοκών, IPE 100, SHS 80/5, HE-A100, είτε σε διατάξεις κεντρικού πείρου, με ορθογωνικές ράβδους 2*12/30, ράβδους κυκλικής διατομής Φ33, είτε σε ομάδες δοκών με διαφορετικές διατομές καθ' ύψος, IPE 80/100/120/140/160, κοιλοδοκοί SHS 80/5 με διαφορετικές επιμήκεις σκισμές, πλατύπελμες δοκοί HE-A 100, με διαφορετικού βάθους εγκοπές και ράβδοι κυκλικής διατομής Φ33 με διαφορετικού βάθους δακτυλιοειδείς εγκοπές.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύπου πρωτόκολλα για τις φορτίσεις. Το πρωτόκολλο ECCS, με αυξανόμενη ανακυκλιζόμενη φόρτιση, σε ομάδες των τριών ίσων κύκλων και το πρωτόκολλο IMPACT, με μονότονα αυξανόμενη φόρτιση μέχρι την μέγιστη δυνατή μετακίνηση, και στην συνέχεια τρεις κυκλικές φορτίσεις στην μέγιστη τιμή μετακίνησης.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων καταλήγουν σε ένα βρόχος υστέρησης, για το διάγραμμα μεταβολής της μετακίνησης στον πόδα του συστήματος INSTED, σαν συνάρτηση της επιβαλλόμενης δύναμης.

Στα πλαίσια μελέτης του καινοτόμου συστήματος απορρόφησης ενέργειας πραγματοποιήθηκαν επίσης, αναλυτικές διερευνήσεις για την προσέγγιση της συμπεριφοράς του συστήματος και με αριθμητικό τρόπο. Έγιναν μη γραμμικές αναλύσεις προσομοιώνοντας το σύστημα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και χρήση του λογισμικού SOFISTIK. Η επιλογή του συγκεκριμένου λογισμικού έγινε με γνώμονα την μεγάλη διάδοση του σε επαγγελματικούς μελετητικούς οίκους, ώστε να διερευνηθεί η αξιοπιστία προσομοιωμάτων, που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε πραγματικά έργα.

Μελετήθηκε η επιρροή των διαφόρων παραμέτρων στην αντοχή και τη δυσκαμψία του εξεταζόμενου συστήματος και τη συμπεριφορά του υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα και διατυπώθηκαν κανόνες για την εφαρμογή του συστήματος στην πράξη και την απαιτούμενη μεθοδολογία σχεδιασμού.

Χρησιμοποιήθηκαν απλά προσομοιώματα, με γραμμικά στοιχεία δοκών, η σύνθετα προσομοιώματα με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων από τα οποία προέκυψαν αντίστοιχοι βρόχοι υστέρησης, που συγκρίνονται με τους πειραματικούς, και οδηγούν σε προτάσεις εφαρμογής.

Η διατριβή περιλαμβάνει, πέραν του εισαγωγικού τμήματος και των συμπερασμάτων ,πέντε κύρια κεφάλαια, που αναφέρονται:

- στον σχεδιασμό του προτεινόμενου συστήματος,
- στην πειραματική διερεύνηση,
- στην κριτική των πειραμάτων και σε προτάσεις βελτίωσης,
- στην αναλυτική υπολογιστική προσέγγιση,
- στην προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδιασμού και ελέγχου του συστήματος, .

Τα κτίρια με το προτεινόμενο σύστημα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας INSTED, συμπεριφέρονται εξαιρετικά, σε σύγκριση πάντα προς αντίστοιχα συμβατικά πλαίσια με συνδέσεις πλήρους αντοχής. Το κριτήριο, το οποίο ορίζεται για σχετική μετακίνηση ορόφου 2,5%, αντιστοιχεί ουσιαστικά στο σεισμό σχεδιασμού που υιοθετούν οι σύγχρονοι κανονισμοί (π.χ. Ε.Α.Κ., EC8).

Οι συνδέσεις που δοκιμάστηκαν πειραματικά ξεπέρασαν εύκολα την στοχευμένη σχετική μετακίνηση ορόφου του 4%, και μάλιστα με μεγάλους κύκλους υστέρησης. Η εγγενής ιδιότητα του συστήματος να σχεδιάζεται ώστε να έχει την απαιτούμενη δυσκαμψία και αντοχή και να προσαρμόζεται στις λειτουργικές απαιτήσεις του έργου, το καθιστά ιδιαίτερα αποτελεσματικό.

Γενικότερα, τα βασικά πλεονεκτήματα του προτεινομένου συστήματος INSTED μπορούν να συνοψιστούν παρακάτω:

- Μπορεί να σχεδιαστεί με την επιθυμητή δυσκαμψία για πλευρικά φορτία μικρής έντασης και με υψηλή πλαστιμότητα για φορτία μεγαλύτερης έντασης.
- Προστατεύει όλα τα υπόλοιπα μέλη του φορέα από αστοχία σε σεισμική φόρτιση.
- Η πλαστικοποίηση της κατασκευής περιορίζεται στην περιοχή των συνδέσεων, και συγκεκριμένα στις δοκούς, σε επιλεγμένες θέσεις, ή στις κεντρικές ράβδους, οι οποίες μπορούν εύκολα να αντικατασταθούν σε περίπτωση που αυτό κριθεί απαραίτητο.
- Παρουσιάζουν πολύ καλή ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά, ακόμα και σε μεγάλες παραμορφώσεις. Δεν υπάρχει κίνδυνος ψαθυρής αστοχίας λόγω ολιγοκυκλικής κόπωσης, εξαιτίας της επιλογής της περιοχής που πλαστικοποιείται.
- Ο αντισεισμικός σχεδιασμός των φορέων με το σύστημα INSTED μπορεί να γίνει με παρόμοια μεθοδολογία με αυτήν που ακολουθείται για τα συμβατικά πλαίσια. Επιπλέον, αυτό το σύστημα παρουσιάζει μεγάλη ολκιμότητα, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η χρήση μιας μεγαλύτερης τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς.
- Με τον διαχωρισμό των στοιχείων του φορέα σε στοιχεία που λειτουργούν για κατακόρυφα φορτία, και στα στοιχεία του προτεινομένου συστήματος που λειτουργούν για οριζόντια φορτία, επιτυγχάνεται εύκολα ένας βέλτιστος οικονομικά σχεδιασμός, με πλήρη απόδοση όλων των δομικών στοιχείων.
- Τα «αναλώσιμα» τμήματα του φορέα, οι δοκοί ή οι κεντρικές συνδετικές ράβδοι είναι ιδιαίτερα χαμηλού κόστους και εύκολο να αντικατασταθούν χωρίς διακοπή της λειτουργίας του υπόλοιπου δομήματος.

Δημοσιεύσεις

Κατά την εκπόνηση της Δ.Δ. έγιναν οι ακόλουθες ανακοινώσεις σε συνέδρια:

- Karydakis Ph., Ioannides G., Vayas I.: “Innovative stiffness and energy dissipation system, for multi-storey steel buildings of aseismic design”, Proceedings of the 5th European conference on steel and composite structures, 3-5 September 2008, Gratz, Austria, R. Ofner, D. Beg, J. Fink, R. Greiner, H. Unterweger, volume B, p. 1383-1388, published by ECCS, 2008.
- Φ. Καρυδάκης, Ι. Βάγιας, Γ. Ιωαννίδης: Καινοτόμο σύστημα ακαμψίας και απορρόφησης ενέργειας σε μεταλλικά κτίρια, Πρακτικά του 6ου Εθνικού Συνεδρίου Μεταλλικών Κατασκευών, Ιωάννινα 2-4.10.2008, τόμος ΙΙ, σελ. 395-402, Εταιρεία Ερευνών Μεταλλικών Έργων ΕΕΜΕ.
- Ο. Palkopoulou, P. Karydakis & I. Vayas: Innovative bracing system for seismic resistant steel structures. Stessa 2009: Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas. page 73, Mazzolani, Ricles & Sauce (eds), 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-56326-0
- Karydakis Ph., Ioannides G., Vayas I.: “INSTED, final report. Innovative stiffness and energy dissipation system, for multi-storey steel buildings of aseismic design”. The paper has been initially accepted for presentation at EUROSTEEL 2011.
- Φ. Καρυδάκης, Ι. Βάγιας, Γ. Ιωαννίδης: Το σύστημα INSTED, ένα καινοτόμο αντισεισμικό σύστημα για μεταλλικά κτίρια.». Το άρθρο έχει γίνει αρχικά αποδεκτό για παρουσίαση στο 7ου Εθνικό Συνέδριο Μεταλλικών Κατασκευών, Βόλος 10.2011.

Η διατριβή εξ άλλου αποτέλεσε τη βάση για τη συμμετοχή του Εργαστηρίου μας στο ανταγωνιστικό Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα FUSEIS, το οποίο σε μεγάλο του μέρος αποτελεί συνέχεια της εν λόγω εργασίας και στο οποίο συμμετέχουν:

- Το εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών του ΕΜΠ.
- Τα Πολυτεχνεία του Μιλάνου, της Λισσαβόνας και του Aachen,
- Η βιομηχανία ΠΡΑΚΣΥΣ/ΣΙΔΕΝΟΡ.

Πρόλογος.

Τον Ιούλιο του 1975, γράφοντας τον πρόλογο της εργασίας μου στα πλαίσια του M.Sc. στο Imperial College, σένα παγκάκι, στον κήπο του κεντρικού κτιρίου του Πανεπιστημίου του Λονδίνου¹, προσπαθούσα να μεταφράσω ένα απόσπασμα του ποιήματος του Γ. Σεφέρη, «ένας γέροντας στην ακροποταμιά».

Ο ποιητής έλεγε: «*θα ήθελα να μιλήσω απλά, ας μου δοθεί ετούτη η χάρη*», και εγώ φοβόμουν τότε, ότι το επίπεδο και περισσότερο το βάθος των γνώσεων μου στο αντικείμενο της εργασίας (μη γραμμική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία), δεν θα μου επέτρεπε να εκφράσω με αρκετά απλά λόγια τη δουλειά μου.

Σήμερα μετά από 35+ ακόμη χρόνια, στα οποία υπηρέτησα με περισσή αγάπη την επιστήμη μου και τον σχεδιασμό των μεταλλικών κατασκευών ειδικότερα, περισσότερο μέσα από τα έργα μου και συμπληρωματικά μέσα από την διδασκαλία του μαθήματος των μεταλλικών και συμμίκτων κατασκευών στο ΕΜΠ, που βασιζόταν κύρια στην επαγγελματική μου εμπειρία, νομίζω ότι μπορώ πια, πραγματικά, να μιλήσω απλά.

Γιατί, όπως γράφει στο ίδιο ποίημα, ο αγαπημένος μου λυρικός δημιουργός: *«μπορεί να θέλω να πω καθώς, το μακρύ ποτάμι, που πηγάζει από τις μεγάλες λίμνες τις κλειστές βαθειά στην Αφρική, και ήτανε κάποτε θεός, και ύστερα γένηκε δρόμος, και δωρητής και δικαστής και δέλτα, και που δεν είναι ποτές του το ίδιο, κατά που δίδασκαν οι παλιοί γραμματισμένοι, κι ωστόσο μένει πάντα το ίδιο σώμα, το ίδια στρώμα, το ίδιο σημείο, ο ίδιος προσανατολισμός»*

Έτσι και εγώ, προσπάθησα πάντα, με σταθερά ιδιαίτερη προσήλωση στα έργα μου, να βάζω κάτι παραπάνω, ένα μικρό λιθαράκι, μια μικρή προσθήκη στον δομικό σχεδιασμό που θα έκανε το έργο ασφαλέστερο, λειτουργικότερο, οικονομικότερο, ευκολότερο, κομψότερο, καλύτερο.

Η μακρόχρονη και επίμονη αυτή προσπάθεια, στην κατά τεκμήριο επιτυχημένη σταδιοδρομία μου, όχι οικονομικά, αλλά με κριτήριο τον σχεδιασμό και την αποδοχή των έργων μου, με έκανε να πιστεύω ότι θα αρκούσε, για να καταλάβω και τυπικά, αυτό που είχα κατακτήσει στην πράξη, την αναγνώριση της συμμετοχής μου στη εξέλιξη της επιστήμης του δομοστατικού σχεδιασμού έργων και ιδιαίτερα μεταλλικών.

Νόμιζα ότι, συγκρίνοντας την δουλειά μου, με την ακαδημαϊκή ανάλυση κάποιου δομικού υποσυστήματος, ενός τυπικού υποψήφιου διδάκτορα, θα μπορούσε να κριθεί αρκετή. Στο κάτω-κάτω είμαι από τους ελάχιστους μη ακαδημαϊκούς αποδεκτούς από το ακαδημαϊκό σύστημα, κύρια με γνώμονα το έργο μου. Εδώ όμως έσφαλα.

Με την προτροπή του αγαπημένου μου φίλου και συνεργάτη, καθηγητή Ι. Βάγια, και βασισμένος σε μια δική του αρχική ιδέα, ασχολήθηκα με την ανάπτυξη ενός

¹ όπου παρακολουθούσα διαλέξεις στα πλαίσια του Communist University, που οργάνωνε ο φοιτητικός σύλλογος,

καινοτόμου συστήματος για την αντιμετώπιση των οριζοντίων φορτίων σε πολυώροφα μεταλλικά κτίρια.

Ο βασικός σχεδιασμός, τα πρώτα στάδια της πειραματικής διερεύνησης και των αντιστοίχων αριθμητικών αναλύσεων, για το νέο αυτό σύστημα, αποτελεί το αντικείμενο αυτής της διατριβής.

Είναι αλήθεια, ότι και αυτό το κύρια ερευνητικό έργο, το περιέβαλα με την ίδια αγάπη, όπως και όλα τα υπόλοιπα έργα μου, και ελπίζω ότι αυτό φαίνεται.

Στα πλαίσια της προσπάθειας αυτής, με την ευγενική συνεισφορά παλαιών συνεργατών μου από την βιομηχανία, σχεδίασα και έστησα ένα νέο τμήμα του εργαστηρίου μεταλλικών κατασκευών, με νέο πλαίσιο δοκιμών, κατάλληλο για πειράματα σε χωρικές διατάξεις, σε κλίμακα 1:1. Στην πορεία αυτή είχα την αμέριστη συνδρομή πολλών από τους συναδέλφους μου στο εργαστήριο, τους οποίους και ευχαριστώ ιδιαίτερα μαζί με κάποιους αγαπητούς συνεργάτες από το γραφείο μου, των οποίων η συνεισφορά υπήρξε καθοριστική.

Το νέο καινοτόμο αυτό σύστημα παραλαβής των οριζοντίων φορτίων σε πολυώροφα μεταλλικά κτίρια, βασίζεται σε μία κατακόρυφη σύνθετη δοκό τύπου Vierendeel, που αποτελείται από δύο ισχυρούς στύλους από κοίλη διατομή, σε μικρή μεταξύ τους απόσταση, που συνδέονται μεταξύ τους με οριζόντιες δοκούς σε σχετικά πυκνή διάταξη. Η κατακόρυφη αυτή σύνθετη δοκός, αποτελεί το κύριο δομικό στοιχείο, που παρέχει στο κτίριο την απαιτούμενη δυσκαμψία και αντοχή σε οριζόντια φορτία.

Σε οριζόντια φόρτιση, οι συνδετικές δοκοί εντείνονται καμπτικά, και εφ' όσον οι φορτίσεις ξεπεράσουν κάποιο δεδομένο επιθυμητό επίπεδο, τότε δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις που απορροφούν μεγάλη ποσότητα ενέργειας, επιδεικνύοντας εξαιρετική αντισεισμική συμπεριφορά.

Για την πειραματική διερεύνηση, κατασκευάστηκε στο εργαστήριο ειδική διάταξη, και έγινε σειρά πειραμάτων, σε φυσική κλίμακα ενός ορόφου, με διαφόρους τύπους συνδετικών δοκών.

Τα πειραματικά αποτελέσματα και οι αναλύσεις με μη γραμμικά προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων έδειξαν ιδιαίτερα ικανοποιητική πλαστική συμπεριφορά και μεγάλη απορρόφηση ενέργειας, με μετακινήσεις μεταξύ των ορόφων (inter-storey drift) μεγαλύτερες τους 4% του ύψους του ορόφου.

Ακόμη, θα ήθελα να προσθέσω ότι προσπάθησα να διατυπώσω την διατριβή αυτή «επί τω συντομότερω», όπως έμαθα διαβάζοντας επί χρόνια στο οπισθόφυλλο των σχολικών μου τετραδίων² και μετά από τα τόσα χρόνια της θητείας μου στο εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών του ΕΜΠ, σίγουρα “I did not lack the time”.

² Pascal: “I have made this letter longer than usual, only because I lacked the time to make it shorter”.

1. Εισαγωγή

1.1 Αντισεισμικός σχεδιασμός σε κτίρια από χάλυβα.

Τα κτίρια με φέροντα οργανισμό από χάλυβα, είναι μία από τις πλέον διαδεδομένες μορφές δομικού συστήματος διεθνώς.

Στην Ελλάδα με κάποια καθυστέρηση, οι οικονομικές σχέσεις μεταξύ του κόστους των πρώτων υλών, της ανθρώπινης εργασίας, και του χρόνου κατασκευής (παραγωγής και ανέγερσης), έχουν τελικά επιτρέψει στην βιομηχανία των χαλύβδινων κατασκευών να ξεπεράσει την αδράνεια και την κεκτημένη ταχύτητα που υπήρχε στην αγορά, με τον συμβατικό τρόπο κατασκευής κτιρίων κύρια από σκυρόδεμα και να διεκδικήσει το τμήμα που δικαιωματικά της αξίζει.

Στα πλαίσια αυτής της ανάπτυξης, υπάρχει μια αντίστοιχη σημαντική κινητικότητα στην έρευνα, σε θέματα σχετικά με τα χαλύβδινα κτίρια, για σύγχρονη αντιμετώπιση του δομικού και ειδικότερα του αντισεισμικού σχεδιασμού.

Οι ιδιότητες του χάλυβα σαν υλικό, με μεγάλη πλαστιμότητα, άρα και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και καλή συμπεριφορά σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, είχαν οδηγήσει στην θεώρηση ότι οι χαλύβδινες κατασκευές είχαν εξαιρετικές αντισεισμικές ιδιότητες.

Ο μεγάλος όμως αριθμός αστοχιών στους σεισμούς του Northridge (1994 Καλιφόρνια) και του Kobe (1995 Ιαπωνία) αποτέλεσαν το έναυσμα για εκτεταμένες έρευνες στα αντισεισμικά συστήματα των μεταλλικών κατασκευών και την αποτελεσματικότητά τους, τόσο σε επίπεδο γενικού σχεδιασμού, όσο και σε επίπεδο σχεδιασμού των επί μέρους κατασκευαστικών λεπτομερειών του φορέα και των αντισεισμικών συστημάτων.

1.2 Απαιτήσεις στον σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών σε περιοχές με υψηλή σεισμικότητα.

Κάθε δόμημα που σχεδιάζεται σε περιοχή με μέση ή υψηλή σεισμικότητα οφείλει να διαθέτει ικανή αντοχή ώστε να παραλάβει τα σεισμικά φορτία χωρίς ολική αστοχία. Είναι όμως αποδεκτό ένα επίπεδο βλαβών, ανάλογα με την σπουδαιότητα του έργου και τις απαιτήσεις που προκύπτουν από αυτή.

Στην διεθνή βιβλιογραφία ορίζονται τρεις στάθμες επιτελεστικότητας (performance levels) και επιλέγεται η επιθυμητή για την εκάστοτε κατασκευή, ανάλογα με τις προϋποθέσεις που πρέπει να πληροί. Οι στάθμες είναι:

1. **Αποφυγή διακοπής λειτουργίας**, που απαιτείται για κατασκευές που συμμετέχουν στην αντιμετώπιση των αποτελεσμάτων του σεισμού, είναι επικίνδυνες για την ασφάλεια των ανθρώπων ή του περιβάλλοντος ή είναι μεγάλης πολιτιστικής αξίας. Κατασκευές αυτής της κατηγορίας πρέπει να

σχεδιάζονται έτσι ώστε οι βλάβες ακόμη και στα μη φέροντα στοιχεία να είναι πρακτικά αμελητέες, ώστε να είναι δυνατή η απρόσκοπτη λειτουργία τους, ακόμη και μετά από έναν ισχυρό σεισμό.

Το κριτήριο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για μικρότερης σημασίας κατασκευές στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας, για σειμούς μικρότερης έντασης, που μπορούν να συμβούν αρκετές φορές στην διάρκεια ζωής του έργου.

2. **Προστασία ανθρώπινης ζωής.** Σε κτίρια που δεν είναι απαραίτητη η απρόσκοπτη λειτουργία τους στην διάρκεια ενός ιδιαίτερα μεγάλου σεισμού, γίνεται η παραδοχή ότι η κατασκευή θα υποστεί βλάβες στα μη φέροντα στοιχεία, ενώ ο φέρων οργανισμός θα μπει στην πλαστική περιοχή, ώστε να απορροφηθεί η ενέργεια του σεισμού. Το κτίριο στην φάση αυτή πρέπει να συνεχίζει να μπορεί να φέρει τα κατακόρυφα φορτία, χωρίς να δημιουργηθούν κίνδυνοι για τους ανθρώπους μέσα και γύρω από αυτό. Είναι επιθυμητό οι βλάβες στον φέροντα οργανισμό να είναι σχετικά περιορισμένες, σε μέγεθος και σε έκταση, ώστε το κτίριο να είναι επισκευάσιμο. Αυτό το κριτήριο χρησιμοποιούν κύρια οι κανονισμοί για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών, και αφορά στον σεισμό σχεδιασμού, που έχει πιθανότητες να συμβεί μια φορά στην διάρκεια ζωής του έργου.
3. **Αποφυγή κατάρρευσης.** Σε περίπτωση ενός εξαιρετικά μεγάλου σεισμού, μεγαλύτερου από τον σεισμό σχεδιασμού, είναι κανονιστικά αποδεκτό ότι η κατασκευή θα υποστεί πολύ μεγάλες παραμορφώσεις και βλάβες, οπότε βασικός στόχος γίνεται η αποφυγή μερικής ή ολικής κατάρρευσης. Στην περίπτωση αυτή, επιδιώκεται μια κατανομή των πλαστικών αρθρώσεων (ζωνών) σε μεγάλο μέρος της κατασκευής, μορφώνοντας έναν αποδεκτό μηχανισμό αστοχίας, που να μεγιστοποιεί την απορρόφηση ενέργειας και να αποφεύγει την κατάρρευση. Οι βλάβες είναι πιθανό να είναι σε πολύ μεγάλη έκταση ώστε να είναι οικονομικά ασύμφορη η επισκευή τους.

Στην βιβλιογραφία, οι τρεις αυτές στάθμες επιτελεστικότητας συνδέονται με αντίστοιχες τιμές της ανηγμένης πλευρικής μετακίνησης (inter-storey drift).

Οι τρεις καθοριστικές για την σεισμική απόκριση της κατασκευής ιδιότητες είναι:

1. **Η αντοχή.** Τα μέλη της κατασκευής πρέπει να έχουν επαρκή αντοχή ώστε να συμπεριφερθούν όπως προβλέπεται για τα φορτία σχεδιασμού.
2. **Η δυσκαμψία.** Η είσοδος του φορέα στην πλαστική περιοχή, συνεπάγεται αύξηση των παραμορφώσεων. Ο φορέας πρέπει να έχει επαρκή πλευρική δυσκαμψία, ώστε για τον σεισμό σχεδιασμού να μην εμφανίσει πλευρικές μετακινήσεις τόσο μεγάλες, που να μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές επιρροές 2ης τάξης που να οδηγήσουν σε σταδιακή κατάρρευση ή και ανατροπή της κατασκευής. Η δυσκαμψία είναι σημαντική και για συχνότερους λιγότερο ισχυρούς σειμούς αφού η αντοχή και η λειτουργικότητα των μη

φερόντων στοιχείων συνδέονται άμεσα με την σχετική πλευρική μετακίνηση των ορόφων.

3. **Η Πλαστιμότητα.** Στον σχεδιασμό της κατασκευής πρέπει να συμπεριλαμβάνεται ο καθορισμός περιοχών απορρόφησης ενέργειας, συνήθως σε δοκούς ή συνδέσμους δυσκαμψίας, που πρέπει να αστοχούν πρώτοι και να ικανοποιούν τις απαιτήσεις πλαστιμότητας σε τοπικό επίπεδο, να δέχονται μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις, χωρίς αστοχία ή τοπικό λυγισμό επιτρέποντας την επέκταση της πλαστικής περιοχής σε μεγαλύτερο τμήμα του φορέα και στην απορρόφηση της μεγαλύτερης δυνατής ενέργειας.

Με δεδομένη την δημιουργία πλαστικών περιοχών στον φορέα, σαν αναπόσπαστο στοιχείο του αντισεισμικού σχεδιασμού και παράλληλα σαν μέθοδο προστασίας των υπολοίπων δομικών στοιχείων, η ύπαρξη βλαβών και εν γένει μεγάλων παραμορφώσεων στα φέροντα δομικά στοιχεία γίνεται αποδεκτή.

Προκύπτει λοιπόν σαν σημαντική πρόσθετη απαίτηση των ιδιοτήτων της κατασκευής και μια τέταρτη ιδιότητα η επισκευασιμότητα.

4. **Η επισκευασιμότητα.** Η αντιμετώπιση των βασικών επιδιώξεων στον σχεδιασμό των κτιρίων είναι πιθανόν να οδηγήσει σε μεγάλες βλάβες. Ο περιορισμός τους σε έκταση και η κατά το δυνατόν συγκέντρωσή τους, η δυνατότητα ταχείας και οικονομικής επισκευής ακόμη και μετά τον σεισμό σχεδιασμού ή και μεγαλύτερου, είναι σημαντικά στοιχεία για τον επιτυχή σχεδιασμό ενός φορέα.

1.3. Σχεδιασμός αντιμετώπισης του σεισμικού προβλήματος.

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών γίνεται με βάση την παραδοχή ότι είναι αποδεκτή η μερική πλαστικοποίησή τους, με τον σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων σε επιλεγμένα σημεία της κατασκευής που δεν οδηγούν σε γενικότερη αστοχία, όπως στα άκρα δοκών, ή με την τοπική διαρροή των συνδέσμων δυσκαμψίας ή των δοκών σύζευξης. Η εξασφαλισμένη αυτή δυνατότητα των επιλεγμένων στοιχείων του φορέα, επιτρέπει στην ανάλυση, οι σεισμικές δυνάμεις να λαμβάνονται μειωμένες σε σχέση με αυτές που προκύπτουν για ελαστική ανάλυση της κατασκευής.

Η απομείωση αυτή, αντιστοιχεί στην απομείωση των εντατικών μεγεθών, όπως αυτά προκύπτουν από την φασματική ανάλυση με ελαστικά φάσματα για την προσομοίωση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του δομήματος και προκύπτει από την διαίρεση των ελαστικών εντατικών μεγεθών με τον συντελεστή συμπεριφοράς q , ο οποίος εξαρτάται από τον τύπο της κατασκευής και στην ουσία περιγράφει την δυνατότητα της να απορροφήσει ενέργεια με την είσοδο της σε πλαστική περιοχή.

Εφ' όσον αποδεχόμαστε την είσοδο του δομήματος στην πλαστική περιοχή, πρέπει να εξασφαλίσουμε ότι η κατασκευή έχει την δυνατότητα να παραμορφωθεί, όπως

θεωρήθηκε αρχικά, χωρίς να απολέσει την ικανότητα να παραλαμβάνει τουλάχιστον τα φορτία που αντιστοιχούν στην δεδομένη εντατική κατάσταση.

Αυτό απαιτεί την εξασφάλιση της λειτουργίας της πλαστικής άρθρωσης, χωρίς τοπικούς λυγισμούς της διατομής, που αντιστοιχεί σε χρήση συμπαγών διατομών, τύπου 1, στις θέσεις των πλαστικών ζωνών, αντίστοιχα στην επιβολή περιορισμών λυγηρότητας στους κατακόρυφους συνδέσμους δυσκαμψίας για την αποφυγή λυγισμικής συμπεριφοράς του μέλους, και στην διάταξη καταλλήλων ενισχύσεων που αποτρέπουν τοπικές λυγισμικές αστοχίες, στις πλαστικές ζώνες των δοκών σύζευξης.

Εφ' όσον εξασφαλιστεί η πλάστιμη συμπεριφορά της κατασκευής, που επιτρέπει την ανάπτυξη μηχανισμών απορρόφησης ενέργειας χωρίς αστοχίες, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι το δόμημα θα ικανοποιήσει τις απαιτήσεις λειτουργικότητας και οι μετακινήσεις του, στην διάρκεια του σεισμού, θα βρίσκονται μέσα στα επιτρεπτά όρια. Αυτό ελέγχεται με τον περιορισμό των σχετικών μετακινήσεων των ορόφων, που εκφράζεται με τον δείκτη σχετικής μεταθετότητας θ (inter storey drift sensitivity coefficient), που λαμβάνει υπ όψη τον λόγο της τέμνουσας δύναμης προς την κατακόρυφη αντίδραση για κάθε όροφο. Για τιμές του θ μικρότερες του 0,1, το δόμημα θεωρείται ότι έχει ικανή δυσκαμψία, για τιμές ανάμεσα στο 0,1 και το 0,2 πρέπει να ληφθούν υπ όψη οι επιρροές 2^{ης} τάξης, ενώ τιμές μεγαλύτερες του 0,2 δεν είναι αποδεκτές και πρέπει αντίστοιχα να αυξηθεί η δυσκαμψία της κατασκευής. Αυτά όμως ισχύουν για τον σεισμό σχεδιασμού. Η ικανότητα της κατασκευής να αντέχει μεγαλύτερες μετακινήσεις μέσα στα πλαίσια της ελαστοπλαστικής της συμπεριφοράς, χωρίς απώλεια ευστάθειας και συνολικής δυσκαμψίας είναι το τελικά ζητούμενο.

Η παραπάνω διαδικασία οδηγεί σε μία σωστά σχεδιασμένη κατασκευή, που θα συμπεριφερθεί ικανοποιητικά στην διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης, τα χαρακτηριστικά της οποίας είναι μέσα στα πλαίσια που προβλέπονται από τους κανονισμούς.

Παρόλα αυτά, οι ασάφειες που εμπεριέχονται στους κανονισμούς είναι πολλές και οι πιθανότητες να ξεπεραστεί το μέγεθος τους σεισμού σχεδιασμού, είναι απρόβλεπτη και καθόλου απίθανη. Είναι λοιπόν απαραίτητο να ελέγχεται ότι τα γειτνιάζοντα με τα πλαστικοποιημένα μέλη, είναι σε θέση να παραλάβουν τα εντατικά μεγέθη των πλαστικών ζωνών, χωρίς είσοδο στην πλαστική περιοχή. Με τον ικανοτικό αυτό σχεδιασμό, εξασφαλίζεται η ανάπτυξη πλαστικών ζωνών απορρόφησης ενέργειας μόνον στις προεπιλεγμένες θέσεις, διατηρώντας την ακεραιότητα της κατασκευής και την αποφυγή κατάρρευσης.

Με τον σχεδιασμό αυτό αποφεύγονται οι επικίνδυνες μορφές αστοχίας, η ανάπτυξη μηχανισμών κατάρρευσης και οι πολύ μεγάλες παραμορφώσεις.

Για να μειωθεί η σεισμική απόκριση ενός φορέα, πρέπει η να έχουμε η έναν πιο εύκαμπτο φορέα με μικρή σχετικά σεισμική απόκριση η έναν φορέα με ικανότητα απορρόφησης ενέργειας που αντίστοιχα οδηγεί σε μεγάλο συντελεστή συμπεριφοράς q και σε κανονιστικά μειωμένα σεισμικά φορτία.

Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας προϋποθέτει την δυνατότητα του φορέα να πλαστικοποιείται μερικά, διατηρώντας ικανή δυσκαμψία και αντοχή, που εξασφαλίζουν την μη κατάρρευση και αποδεκτή λειτουργικότητα.

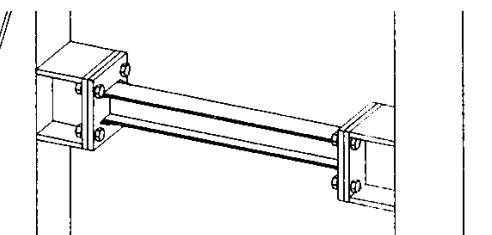
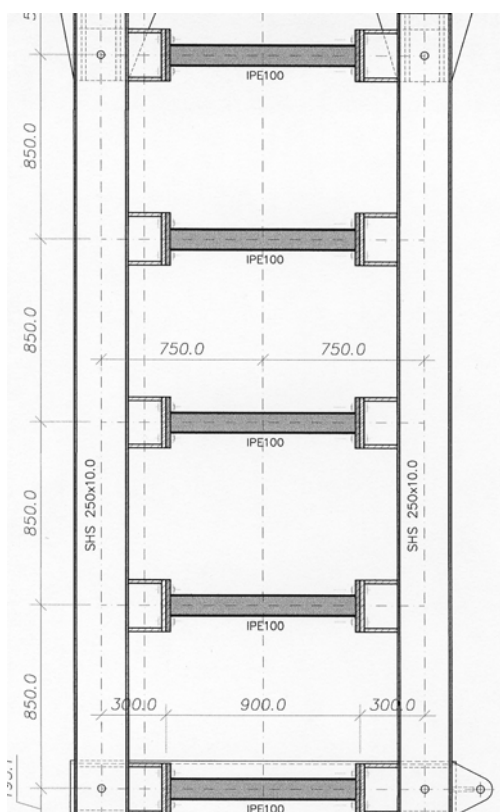
Επειδή όμως η πλαστικοποίηση οδηγεί ουσιαστικά σε τοπικές αστοχίες, είναι πρακτικά απαραίτητη η διαμόρφωση ενός συστήματος, όπου οι πλαστικοποιημένες ζώνες στις οποίες υπάρχουν σημαντικές παραμορφώσεις να συγκεντρώνονται σε προεπιλεγμένα τμήματα του φορέα και να μπορούν να επισκευαστούν, με την ελάχιστη δυνατή διατάραξη του συνολικού δομήματος.

10 Συμπεράσματα.

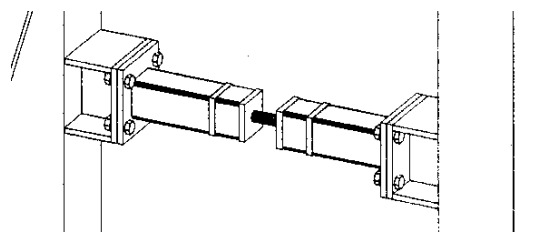
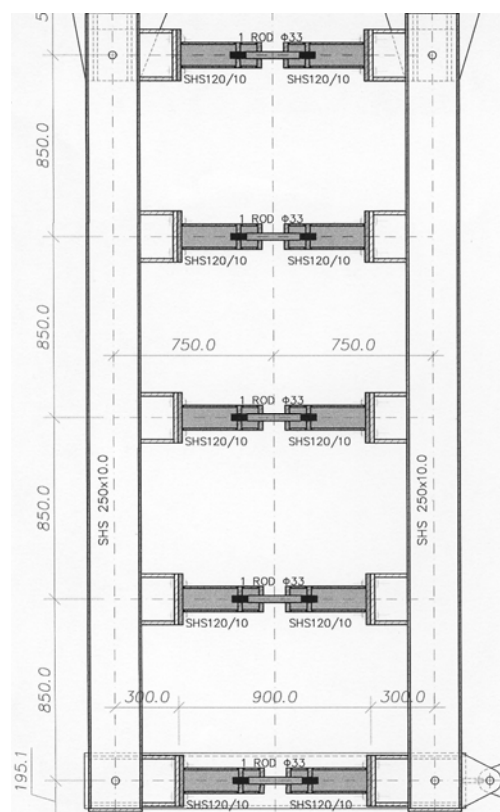
10.1 Αντοχή, δυσκαμψία, λειτουργικότητα, απορρόφηση ενέργειας.

Ξεκινώντας το σχεδιασμό του καινοτόμου αντισεισμικού συστήματος μορφώθηκε ένα πλαίσιο με στύλους και δοκούς, μια κατακόρυφη Vierendeel, που παράλληλα με την οριζόντια δυσκαμψία και αντοχή την οποία προσθέτει στο γενικό δομικό σύστημα, στοχεύει και στη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των δοκών, που θα επεκτείνονται σε πλαστικές αρθρώσεις-ζώνες και θα απορροφούν ενέργεια βελτιώνοντας με αυτό τον τρόπο σημαντικά, τη σεισμική απόκριση.

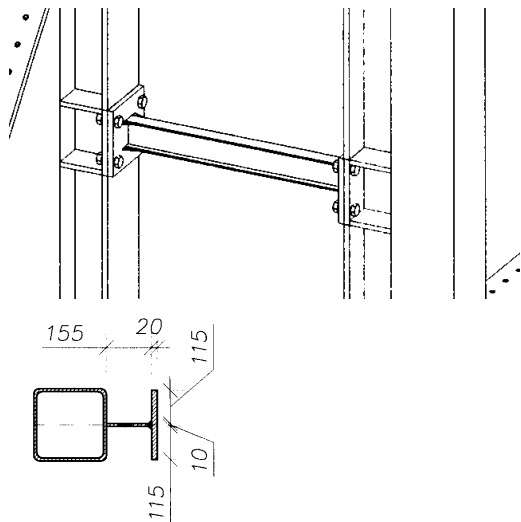
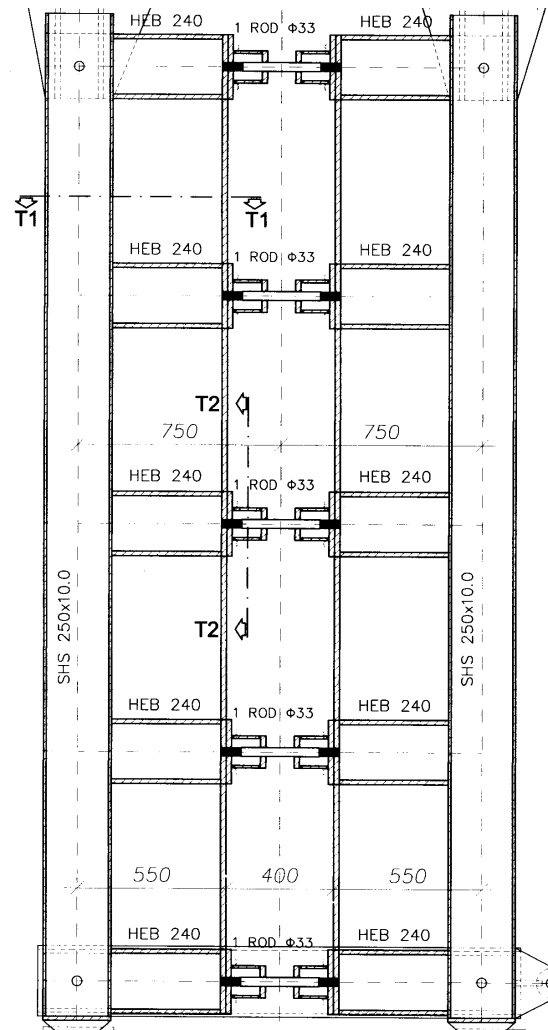
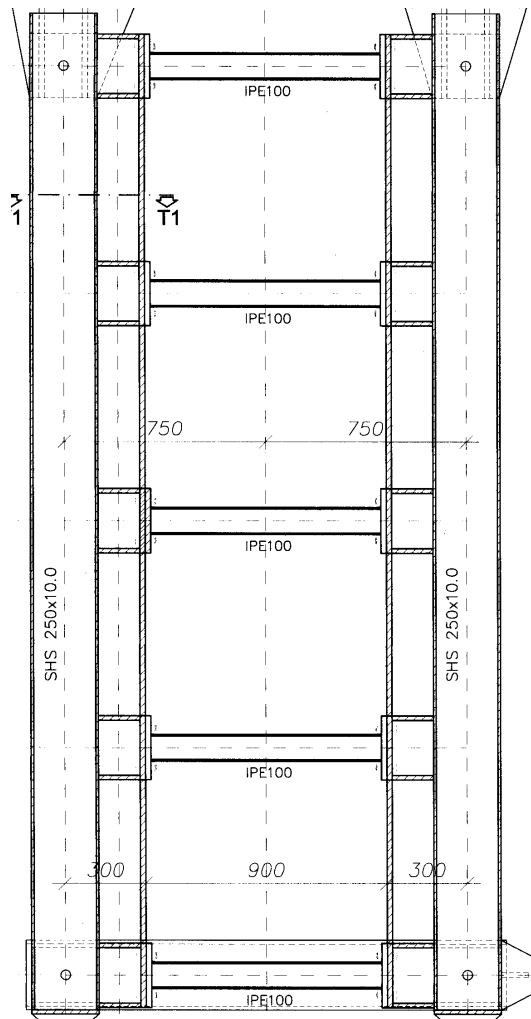
Οι στύλοι πρέπει να είναι ισχυροί, για να συμμετέχουν στην παραλαβή και των κατακόρυφων φορτίων, πέραν από την αξονική ένταση που προέρχεται από τη λειτουργία τους ως πέλματα της κατακόρυφης δοκού Vierendeel. Παράλληλα πρέπει να διαθέτουν ικανοποιητική αντοχή και έναντι εγκάρσιας λυγισμικής εκτροπής, εφ' όσον στο ύψος του ορόφου δεν έχουν καμία ενδιάμεση εξασφάλιση σε αυτή τη διεύθυνση. Μια κατάλληλα ενισχυμένη ορθογωνική κοιλοδοκός αποτελεί την ενδεδειγμένη λύση.



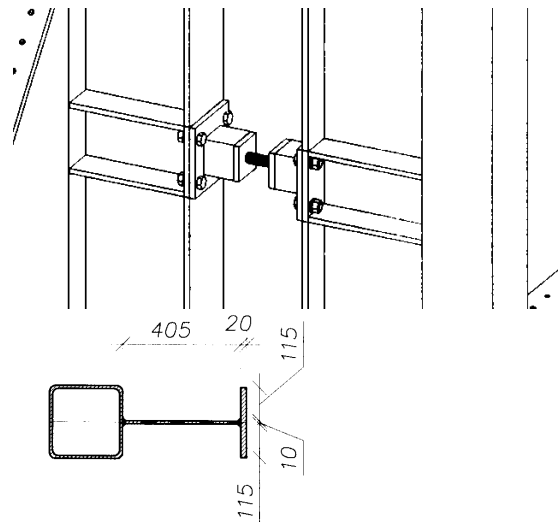
Σχήμα 10.1. Οι αρχικά σχεδιασμένοι φορείς για ολόσωμες δοκούς.



Σχήμα 10.2. Οι αρχικά σχεδιασμένοι φορείς για δοκούς τύπου INERD.



Σχήμα 10.3. Οι ενισχυμένοι στύλοι για φορείς με ολόσωμες δοκούς.



Σχήμα 10.4. Οι ενισχυμένοι στύλοι για φορείς με δοκούς τύπου INERD.

Για τις δοκούς του συστήματος, εφ' όσον η λειτουργία τους είναι κύρια καμπτική, η αρχική επιλογή είναι διατομές διπλού T, με δεδομένη τη μεγάλη απόδοση της διατομής σε καμπτική αντοχή, τη μεγάλη πλαστική ροπή και την αντίστοιχα μεγάλη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας, σε σχέση πάντοτε με τον αντίστοιχο διατιθέμενο

χάλυβα. Σημειώνεται εδώ ότι οι δοκοί του συστήματος, γενικά δεν συμμετέχουν στην παραλαβή κατακόρυφων φορτίων.

Προσθέτοντας στα άκρα των δοκών σύνδεσης, τις ισχυρές και δύσκαμπτες δοκούς υποδοχείς που αποτελούν επέκταση των υποστυλωμάτων, απομακρύνονται οι δοκοί σύνδεσης από τον κόμβο, οπότε για την ίδια οριζόντια φόρτιση απαιτούνται μικρότερες διατομές ενώ μεγαλώνει η απαιτούμενη, για τη διατήρηση της αναμενόμενης σχετικής μετακίνησης των ορόφων (inter storey drift), πλαστιμότητα.

Η διατήρηση αυτής της υψηλής τιμής πλαστιμότητας, στοχευόμενη οριζόντια μετακίνηση του συστήματος *Insted*, προ τελικής αστοχίας, ήταν 4-5% δεν είναι απόλυτα απαραίτητη, δεδομένου ότι η μέγιστη, πρακτικά αποδεκτή από τους κανονισμούς, τιμή της σχετικής μετακίνησης των ορόφων δεν ξεπερνά κατά πολύ το 2%. Η ικανότητα αυτή μετελαστικής συμπεριφοράς, επιτρέπει να θεωρήσουμε σημαντικά μεγαλύτερους συντελεστές συμπεριφοράς q , εφ' όσον το σύστημα μας έχει αυτή τη μεγάλη ικανότητα παραμόρφωσης, διατηρώντας τη δομική ακεραιότητα του για ικανό αριθμό απόλυτα πλαστικών κύκλων, με μεγάλη απορρόφηση ενέργειας.

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των πειραμάτων, μετά την ολοκληρωτική είσοδο στη πλαστική περιοχή, που αντιστοιχεί σε σχετική μετακίνηση ορόφων της τάξης του 1.2-1.5%, το σύστημα εξακολουθεί να διατηρεί τη δομική του ακεραιότητα, με αυξανόμενη αντίσταση, κυρίως λόγω κράτυνσης, μέχρι την αστοχία που επέρχεται για σχετική μετακίνηση σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση της τάξης του 4.0 έως 4.5%.

Οι διατομές τύπου IPE και HE-A που εξετάστηκαν έδειξαν εξαιρετική συμπεριφορά, με τα HE-A, να έχουν μία σχετική ευαισθησία σε τοπικό λυγισμό για μεγάλες στροφές. Με δεδομένη όμως τη δημιουργία τοπικών απομειώσεων στην περιοχή των στηρίξεων (dog bones) η τοπική λυγηρότητα των διατομών στην περιοχή των πλαστικών ζωνών μειώνεται ικανοποιητικά και το πρόβλημα αίρεται.

Αντίθετα η δημιουργία των παραπάνω απομειώσεων (dog bones) σε διατομές τύπου IPE, περιορίζει σημαντικά τη διατομή, και στην περίπτωση αυτή, η προσθήκη ενισχύσεων για την απομάκρυνση της πλαστικής ζώνης από τη σύνδεση είναι η πλέον ενδεδειγμένη λύση, που παράλληλα επεκτείνει επ' αόριστον το θεωρητικό μήκος της πλαστικής ζώνης σε όλο το μήκος της δοκού.

Το μειονέκτημα που παρουσιάζουν οι διατομές διπλού T, είναι η μικρή συμμετοχή του κορμού στην πλαστική αντοχή και ως εκ τούτου η απότομη είσοδος στην πλαστική περιοχή, με πρακτικά διγραμμικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων, που οδηγεί σε θεωρητική απώλεια ευστάθειας με την πλαστικοποίηση των πελμάτων, εφ' όσον το επιβεβλημένο φορτίο εξακολουθεί να αυξάνεται.

Σε μία ανάλυση με τη ωθητική μέθοδο (push over), το σύστημα έχει θεωρητικά, σταθερή μη αυξανόμενη αντίσταση σε οριζόντια φορτία με αποτέλεσμα την απότομη αστοχία, ταυτόχρονα με την είσοδο των πελμάτων στην πλαστική περιοχή.

Φυσικά αυτό δεν ισχύει στην πράξη, λόγω της δυναμικής μορφής του σεισμικού φαινομένου, κατά το οποίο εφ' όσον η αντίσταση διατηρείται τουλάχιστον σταθερή, χωρίς εκδήλωση φαινομένων τοπικής αστοχίας, η φόρτιση αντιστρέφεται, η ευστάθεια του συστήματος επανέρχεται και το κριτήριο δεν είναι πλέον η αυξανόμενη αντοχή αλλά η πλαστιμότητα του συστήματος η δε αστοχία επέρχεται μόνον όταν ξεπεραστούν τα όρια πλαστιμότητας σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Αυτή η δυναμική θεώρηση εμφανίζεται και στη νέα θεωρία της ελεγχόμενης αστοχίας του θεμελίου, με τη σημαντική υποδιαστασιολόγηση του για στατικά φορτία, η οποία επαρκεί για την ανάλυση με χρονοϊστορία δυναμικών σεισμικών φορτίσεων, ενώ παράλληλα αποφορτίζει σεισμικά τον υπόλοιπο φορέα. Η μέθοδος αυτή, διερευνάται μέσα στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος DARE, από το εργαστήριο εδαφοδυναμικής του ΕΜΠ.

Παρόλα αυτά, κανονιστικά, αλλά κύρια σχεδιαστικά, είναι σημαντικό να υπάρχει αυξανόμενη αντίσταση με την αύξηση του σεισμικού φορτίου και η είσοδος στην πλαστική περιοχή, όπου συντελείται η απορρόφηση ενέργειας, να μην σηματοδοτεί και τη μέγιστη αντοχή του συστήματος.

Ο σχεδιασμός αυτός ξεπερνάει πολλά γραφειοκρατικά προβλήματα στη διαδικασία ελέγχων και ανταποκρίνεται καλά και σε στατικές – ψευδοδυναμικές μεθόδους, όπως η ωθητική μέθοδος (push over).

Ακόμη η μερική είσοδος ελεγχόμενων τμημάτων του φορέα σε πλαστική περιοχή βοηθά με την απορρόφηση ενέργειας την ελαχιστοποίηση της σεισμικής καταπόνησης και την αποδοτικότερη συμπεριφορά των υπολοίπων στοιχείων του δομήματος.

Η διατήρηση της αυξανόμενης αντίστασης συνεπάγεται την ανάγκη προοδευτικής αστοχίας του συστήματος.

Η προοδευτική αστοχία μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους:

- τη χρήση διατομών, που να αστοχούν προοδευτικά
- τη χρήση διαφορετικών διατομών στις συνδετήριες δοκούς

Διατομές που αστοχούν και εισέρχονται στην πλαστική περιοχή, προοδευτικά είναι:

- οι ορθογωνικές κοιλοδοκοί, όπου ο κορμός συμμετέχει περισσότερο από τα διπλά T, στην πλαστική ροπή
- οι κυκλικές κοιλοδοκοί, όπου η μεταβολή είναι ακόμη ομαλότερη, λόγω της μη ύπαρξης ενιαίου πέλματος που να πλαστικοποιείται ταυτόχρονα
- οι συμπαγείς διατομές, ορθογωνικές η κυκλικές.

Οι συμπαγείς διατομές, έχουν μεγάλη αντοχή σε εγκάρσιο και στρεπτοκαμπτικό λυγισμό μικρή τοπική λυγηρότητα και ως εκ τούτου μεγάλη πλαστιμότητα.

Η απώλεια σε απόδοση υλικού, λόγω της συγκέντρωσης μεγάλου τμήματος του κοντά στον ουδέτερο άξονα, μπορεί να κερδηθεί με μείωση του μήκους των δοκών, η οποία

εν συνεχεία οδηγεί σε μικρότερα εντατικά μεγέθη, μικρότερες καμπτικές ροπές, αλλά πολύ μεγαλύτερες παραμορφώσεις.

Έχουμε λοιπόν αρχικά τη μόρφωση των συνδετήριων δοκών με κοιλοδοκούς, τετραγωνικής και κυκλικής διατομής, που εξελίσσονται σε κεντρικούς πείρους τύπου INERD, πάλι με ορθογωνικές η κυκλικές διατομές αλλά συμπαγείς.

Για την επίτευξη προοδευτικής αστοχίας στο συνολικό φορέα του συστήματος, με είσοδο στην πλαστική περιοχή των συνδετήριων δοκών σε διαφορετικό χρόνο, πρέπει να έχουμε δοκούς με διαφορετικό λόγο, δυσκαμψίας προς αντοχή. Με την παραδοχή των πρακτικά άκαμπτων στύλων, οι στροφές στα άκρα των συνδετήριων δοκών είναι παραπλήσιες και η ροπή που αναπτύσσει κάθε δοκός στο άκρο της είναι ανάλογη της δυσκαμψίας της και της ροπή αδρανείας της διατομής αντίστοιχα.

Στις προσπάθειες που έγιναν αρχικά, στον πρώτο κύκλο των δεκαπέντε πειραμάτων, όπως αναφέρεται στα αντίστοιχα επί μέρους κεφάλαια, η χρήση πέντε διαφορετικών δοκών IPE 80 έως IPE 160, δεν ολοκληρώθηκε λόγω μεγάλης σχετικής ευκαμψίας της συνολικής εγκατάστασης, κάτι που διορθώθηκε στη συνέχεια για τα πειράματα που θα ακολουθήσουν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος FUSEIS.

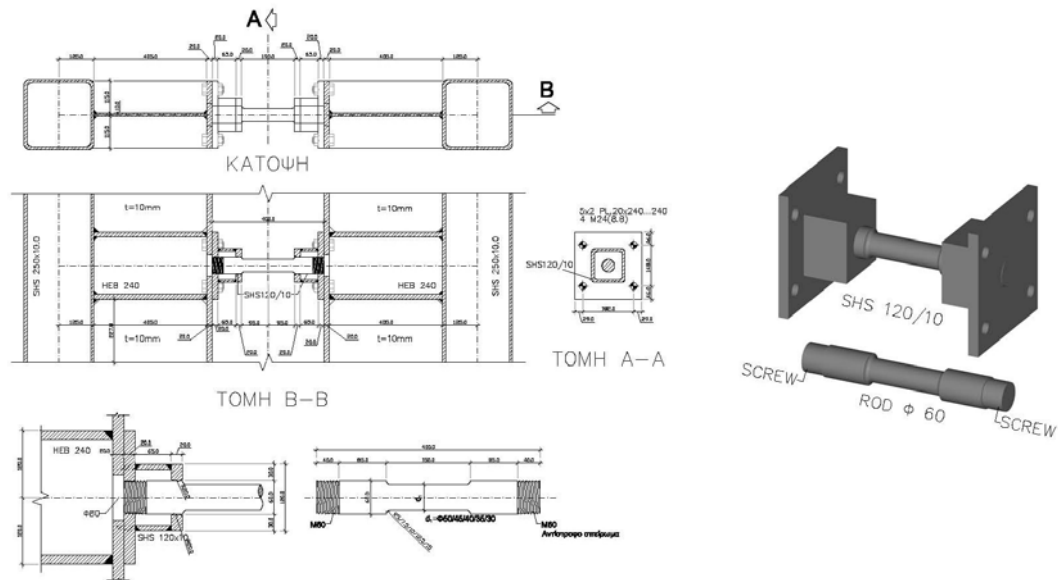
Οι δοκιμές με διαφορετικής διαμέτρου οπές σε τετραγωνικές κοιλοδοκούς SHS 80/5, και με διαφορετικού βάρους εγκοπές (dog bones) σε διατομές HE-A 100, οδήγησαν σε ταυτόχρονη είσοδο στην πλαστική περιοχή χωρίς προοδευτική αστοχία.

Αντίθετα η χρήση κυκλικών συμπαγών ράβδων τύπου INERD, με δακτυλιοειδείς εγκοπές διαφορετικού βάρους για κάθε δοκίμιο, έδειξαν εξαιρετική συμπεριφορά με προοδευτική είσοδο στην πλαστική περιοχή κάθε ράβδου και αντίστοιχη προοδευτική αστοχία μεταξύ του συνόλου των ράβδων. Το μικρό μήκος των εγκοπών όμως, δημιούργησε έντονη συσσώρευση τάσεων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία συνθηκών ολιγοκυκλικής κόπωσης και την προοδευτική μεν αλλά ταχεία αστοχία των διατομών, σε αντίθεση με τις διατομές χωρίς εγκοπή που έδειξαν σαφώς πιο πλάστιμη συμπεριφορά, με πρόβλημα πάλι στην περιοχή επαφής λόγω τοπικού τραυματισμού των δοκιμίων.

Η εμπειρία αυτής της αρχικής σειράς πειραμάτων οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι τα συμπαγή κυκλικά δοκίμια, τύπου INERD, με δακτυλιοειδείς εγκοπές απομείωσης της διατομής που να εκτείνονται όμως σε όλο το μήκος της ράβδου, ξεκινώντας από μικρή απόσταση από το σημείο στήριξης και την περιοχή τραυματισμού, είναι ο ιδανικός συνδυασμός γιατί:

- απαιτεί μικρό μήκος δοκιμίου και μικρό αναλώσιμο κόστος
- παρέχει μεγάλη ευκολία τοποθέτησης με το σχεδιασμό που επιτρέπει την πρακτικά αυτόματη προσαρμογή του μήκους του και τη δυνατότητα αντικατάστασης ακόμη και σε έντονα παραμορφωμένους βασικούς φορείς
- το ίδιο το δοκίμιο έχει ομαλή είσοδο στην πλαστική περιοχή και μεγάλο μήκος ανάπτυξης της πλαστικής ζώνης, με αποτέλεσμα την προοδευτική και μεγάλη δυνατότητα απορρόφησης ενεργείας

- καθιστά ιδιαίτερα εύκολη την αλλαγή της διαμέτρου της αναλώσιμης ράβδου, ακόμη και για όμοιες δοκούς υποδοχείς, ώστε να μπορεί να υλοποιηθεί η προοδευτική αστοχία μεταξύ των δοκών.



Σχ.9.5. Οι τελική προτεινόμενη διάταξη της κατακόρυφης Vierendeel του συστήματος INSTED με τον ενισχυμένο στύλο και την κεντρική συνδετήρια ράβδο τύπου INERD, με κεντρική απομείωση της διατομής

10.2 Επισκευασιμότητα – ευκολία αντικατάστασης.

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, εφ' όσον ο όλος μηχανισμός απόσβεσης βασίζεται στην απορρόφηση ενεργείας από την πλαστική παραμόρφωση των συνδετήριων δοκών της κατακόρυφης δοκού Vierendeel, είναι πιθανή, μετά την ολοκλήρωση των κύκλων υστέρησης, η ανάγκη επισκευής των παραμορφωμένων δοκών.

Λόγω της συγκέντρωσης και του περιορισμού των αστοχιών στις συνδετήριες δοκούς, αρκεί για την πλήρη αποκατάσταση του φορέα η αποκατάσταση των δοκών που έχουν παρουσιάσει κάποιας μορφής βλάβη, είτε με τοπικές αστοχίες (λυγισμός πελμάτων, έναρξη ρηγματώσης) είτε με παραμένουσες πλαστικές παραμορφώσεις.

Εφ' όσον οι δοκοί δεν συμμετέχουν στην παραλαβή κατακορύφων φορτίων, είναι θεωρητικά εύκολη η αφαίρεση των δοκών για επισκευή και η επανατοποθέτησή τους, στη συνέχεια.

Στην πράξη οι επιβεβλημένες πλαστικές παραμορφώσεις των συνδετήριων δοκών καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολη την απομάκρυνσή τους, χωρίς την τμηματική τους τουλάχιστον καταστροφή, με αποκοπή τμημάτων των δοκών. Είναι εύκολο να φανταστεί κανείς την μεγάλη δυσκολία αντίστοιχων επεμβάσεων σε τμήματα του φορέα που συμμετέχουν στην παραλαβή κατακορύφων φορτίων, όπως σε δοκούς πλαισίων ροπής, πόσο μάλλον, αν κανείς συνυπολογίσει τις γενικότερες οικοδομικές

εργασίες που απαιτούνται για την αποκάλυψη, μερική αντικατάσταση και ολική αποκατάσταση των αντίστοιχων οικοδομικών στοιχείων στην περιοχή της αστοχίας.

Η επανατοποθέτηση των δοκών είναι αντίστοιχα επίπονη. Οι μικροπαραμορφώσεις στις μετωπικές πλάκες σύνδεσης καθιστούν δυσχερή την επανατοποθέτηση των δοκών και ακόμη περισσότερο την εξασφάλιση ικανοποιητικής επαφής, χωρίς διάκενα, μεταξύ των μετωπικών πλακών.

Ήδη στα πλαίσια των πειραμάτων, υπήρχαν μικροαποκλίσεις στην παραλληλότητα των επιπέδων των μετωπικών πλακών. Τυχόν μικροδιαφορές στα μήκη των δοκών μπορεί εύκολα να καλυφθούν με προσθήκες ελασμάτων, αλλά γωνιακές αποκλίσεις αφήνουν πρισματικά διάκενα που δημιουργούν υστέρηση στην απόκριση του συστήματος. Αποκλίσεις της τάξης των λίγων χιλιοστών αντιστοιχούν, λόγω του μικρού μήκους των δοκών και του μικρού σχετικά μεγέθους των μετωπικών πλακών, σε στροφές που αναλογούν σε 1% (!) της γωνιακής παραμόρφωσης μεταξύ διαδοχικών ορόφων. Παρόλα αυτά, μετά από λίγους κύκλους στην πλαστική περιοχή, το φαινόμενο αυτοδιορθώνεται. Παραμένει ένα μικρό άλμα στην αναστροφή της ροπής, αλλά είναι κάτι απόλυτα αποδεκτό γενικά στις σιδηρές κατασκευές.

Από την πειραματική εμπειρία η αντικατάσταση των ολόσωμων δοκών, απαιτούσε σημαντική προσπάθεια, και συνήθως την καταστροφή του προς αντικατάσταση δοκιμίου, κάτι που καθιστά προφανή την αδυναμία εφαρμογής οποιασδήποτε επισκευής. Αντίθετα η αντικατάσταση, και εφ' όσον απαιτηθεί η πιθανή ενίσχυση είναι απόλυτα εφικτή, σε περιορισμένο και στην ουσία προεπιλεγμένο τμήμα του φορέα.

Στις περιπτώσεις των κεντρικών ράβδων τύπου INERD, ο σχεδιασμός τους, τόσο για κυκλικές όσο και για ορθογωνικές ράβδους εμπεριέχει τη δυνατότητα αυξομείωσης του μήκους τους, ώστε να προσαρμόζονται με απόλυτη ακρίβεια στις κατασκευαστικές ατέλειες του υπόλοιπου φορέα. Στην περίπτωση ανάγκης αντικατάστασης της ράβδου, αλλά και των δοκών υποδοχέων, συνήθως απαιτείται η καταστροφή της ράβδου. Μετά την αντικατάσταση της η επανατοποθέτηση του όλου συστήματος είναι ιδιαίτερα απλή, λόγω της δυνατότητας επαναπροσαρμογής του μήκους του.

10.3 Τελική σχεδιαστική προσέγγιση.

Συγκεντρώνοντας την εμπειρία, όπως αυτή σωρεύτηκε μέσα από την έρευνα, πειραματική και αναλυτική, την κριτική θεώρηση της διαδικασίας και των αποτελεσμάτων, κατέληξα στις ακόλουθες τροποποιήσεις για τις εναλλακτικές λύσεις των διατάξεων του προτεινόμενου συστήματος insted:

Βελτιώσεις της κατακόρυφης vierendeel, στύλοι - δοκοί υποδοχείς.

Η ευκαμψία του συστήματος στύλοι-δοκοί υποδοχείς, παρουσίαζε μία ελαστική συμπεριφορά που αλλοίωνε την επιθυμητή κατανομή των αντιστάσεων στις συνδετήριες δοκούς. Αυτό είναι εμφανές στα διαγράμματα διατμητικών μετακινήσεων, στα άκρα των δοκών υποδοχέων, που είναι ορατή η μικρή υστέρηση σε κατακόρυφη μετακίνηση των ακραίων έναντι των μεσαίων δοκών.

Το πρόβλημα αυτό παρουσιάστηκε ιδιαίτερα έντονα όταν η τάξη μεγέθους της δυσκαμψίας των συνδετήριων δοκών, προσέγγισε αυτή του συστήματος στύλων δοκών υποδοχέων, όπως στην περίπτωση των διαφόρων IPE 80 – 160, όπου ενώ θεωρητικά η δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων θα έπρεπε να ξεκινήσει από τη μεγαλύτερη δοκό, αστόχησαν μερικά μόνον οι μικρότερες δοκοί.

Και όλα αυτά χωρίς να συνυπολογιστεί η συνεισφορά των στύλων στην παραλαβή και μεταφορά κατακορύφων φορτίων. Είναι λοιπόν απαραίτητη η ενίσχυση των στύλων, και αυτό μπορεί να γίνει με την προσθήκη καταλλήλων ενισχύσεων, που στην ουσία ενσωματώνουν τις δοκούς υποδοχείς στους στύλους, δημιουργώντας έναν ιδιαίτερα ισχυρό στύλο με πρακτικά απαραμόρφωτους στερεούς κόμβους, μεταξύ των στύλων και των δοκών υποδοχέων.

Βελτιώσεις της κατακόρυφης vierendeel, συνδετήριες δοκοί.

Για τη συμπεριφορά των συνδετηρίων δοκών έχουν γίνει αναλυτικές αναφορές στα προηγούμενα κεφάλαια.

Τα στοιχεία που πρέπει να βελτιωθούν είναι:

- η δυνατότητα προσαρμογής κατά την έννοια του μήκους
- η δυνατότητα εύκολης αντικατάστασης
- η σταδιακή αστοχία
- η αποφυγή μεγάλης συγκέντρωσης τάσεων και κόπωσης
- ο καθορισμός σαφούς και μεγάλου μήκους θέσης δημιουργίας της πλαστικής ζώνης, μακριά από τον κόμβο και τις περιοχές στήριξης που καταπονούν και τραυματίζουν τις δοκούς

Η δυνατότητα προσαρμογής του μήκους δίνει ουσιαστικό σχεδιαστικό προβάδισμα στις δοκούς τύπου INERD και η ευκολία κατεργασίας στις κυκλικές δοκούς.

Η δυνατότητα εύκολης αντικατάστασης έρχεται αυτόματα με τη δυνατότητα προσαρμογής του μήκους.

Η σταδιακή αστοχία σε επίπεδο διατομής είναι μεγαλύτερη στις συμπαγείς και ιδιαίτερα στις κυκλικές συμπαγείς διατομές.

Η αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων και κόπωσης απαιτεί μεγάλο μήκος δυνατότητας ανάπτυξης της πλαστικής ζώνης, που οδηγεί στη δημιουργία ιδιαίτερα επιμήκων dog

bones, η δακτυλιοειδών εγκοπών που να εκτείνονται σε όλο το μήκος της ράβδου, ξεκινώντας σε μικρή απόσταση από τη στήριξη. Ο λόγος που στις συνήθεις δοκούς τα dog bones έχουν περιορισμένο μήκος, είναι η ανάγκη της δοκού να παραλάβει και κατακόρυφα φορτία, κάτι που δεν ισχύει στο σύστημα INSTED, όπου οι συνδετήριες δοκοί δεν συμμετέχουν στην παραλαβή κατακορύφων φορτίων, επομένως δεν υπάρχει κανένας λόγος για τον περιορισμό του μήκους τους, τα οποία μπορούν και πρέπει να εκτείνονται σε όλο το μήκος της δοκού η ράβδου.

Τέλος σχετικά με την αποφυγή τραυματισμού επιτυγχάνεται αυτόματα με την εφαρμογή των dog –bones, σε μικρή απόσταση από τη στήριξη.

Βελτιώσεις της πειραματικής διάταξης - πλαίσιο.

Ως τελικό σημείο βελτίωσης, όχι στο προτεινόμενο δομικό σύστημα, αλλά στην πειραματική διαδικασία, απαραίτητη για τη συνέχεια της έρευνας, είναι η ενίσχυση του πλαισίου δοκιμών ώστε να μπορεί χωρίς μεγάλες μετακινήσεις να δέχεται ισχυρότερα δοκίμια και μεγαλύτερο έμβολο, ικανό να εξασκήσει μεγαλύτερα φορτία στο σύστημα.

Οι ενισχύσεις αυτές, που σχεδιάστηκαν και έχουν ήδη κατασκευαστεί, συνίστανται στην ενίσχυση του ζυγώματος του πλαισίου και κύρια του κόμβου κεφαλής, που συνδέει το οριζόντιο ζύγωμα με το κεκλιμένο ανώτερο τμήμα του υποστύλωματος και η σύνδεση του πλαισίου με το ισχυρό δάπεδο του εργαστηρίου, με αντηρίδες, στη διεύθυνση επιβολής των δυνάμεων. Οι αντηρίδες τοποθετούνται κατά επέκταση του κεκλιμένου τμήματος του στύλου και του κάτω ζυγώματος του πλαισίου, εξασφαλίζοντας πρακτικά το αμετακίνητο του συστήματος.

10.4 Εφαρμογές στην πράξη.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, το σύστημα INSTED μπορεί εύκολα και απόλυτα σύννομα να εφαρμοστεί στη συνήθη επαγγελματική πρακτική, αφού αρχικά τουλάχιστον είναι τμήμα ενός χωρικού πλαισίου, που εμπίπτει και καλύπτεται απόλυτα από τις κανονιστικές διατάξεις των Ευρωκωδίκων.

Στα πλαίσια αυτά έχει εφαρμοστεί σε διάφορα υπό κατασκευή, ιδιωτικά και δημόσια έργα στην περιοχή των Αθηνών, με χρήση όμως του συντελεστή q με την τιμή 4, όπως προβλέπεται από τον ΕΑΚ.

Στα πλαίσια των περαιτέρω διερευνήσεων, με το πρόγραμμα FUSEIS, που είναι σε εξέλιξη και που αποτελεί συνέχεια αυτής της διατριβής, θα καθοριστεί ευνοϊκότερος συντελεστής q , που θα αντιστοιχεί στη μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του προτεινόμενου συστήματος.

11 Βιβλιογραφία.

1. AISC: Seismic provisions for structural steel buildings, including supplement No. 1, American Institute of steel Construction, Chicago, Illinois, USA, 2005.
2. Aribert J. M. and Grecea D.: The base shear force approach, Moment resistant connections of steel frames in seismic areas, Mazzolani F. M. ed., Section 8.3, E & FN Spoon, London, England, 2000.
3. Ballio G., Mazzolani F. M., Plumier A. And Sedlacek G.: Background Document on the q factors of dissipative earthquake resistant structures, Background documents for Eurocode 8 Part 1 – Volume 2 – Design rules – Specific rules for steel structures, p. 128-133, Commission of the European Communities, 1988.
4. Ballio G. and Castiglioni C. A.: A unified approach for the design of steel structures under low and/or high cycle fatigue, Journal of Constructional Steel Research, Volume 34, P. 75 – 101, Elsevier, 1995.
5. Băluț N. and Gioncu V.: Suggestion for an improved “dog-bone” solution, Proceedings of the 4th conference on Behaviour of steel structures in seismic areas (STESSA), 9-12 June 2003, Naples, Italy, Mazzolani F. M. ed., p. 129-134, A.A. Belkema Publishers, The Netherlands, 2003.
6. Bernuzzi C., Calado L. and Castiglioni C. A.: Ductility and load carrying capacity prediction of steel beam-to-column connections under cyclic reversal loading, Journal of earthquake engineering, vol. 1, no. 2, p. 401-432, 1997.
7. Black R. G., Wenger W. A. and Popov E.P.: Inelastic Buckling of Steel Struts Under Cyclic Load Reversal. Report No. UCB/EERC-80/40. Berkeley: Earth. Eng. Research Center. Univ. of California, 1980.
8. Bruneau M., Uang C. M. and Whittaker A.: Ductility design of steel structures, McGraw-Hill, New York, 1998.
9. Bursi O. S., Ferrari F. and Somnavilla M.: The INERD project – Detailed Report, Universita degli studi di Trento, 2004.
10. Calado L. and Azevedo J.: A model for predicting the Failure of structural steel elements, Journal of Constructional Steel Research, vol. 14, issue 1, p. 41-64, 1989.
11. Calado L. and Castiglioni C. A.: Low cycle fatigue testing of semi-rigid beam-to-column connections, 3th International workshop on connections in steel structures, Trento, p. 371-380, 1995.

12. Calado L. and Castiglioni C.A.: Steel beam-to-column connections under low-cyclic fatigue experimental and numerical research, Proceedings of XI world conference on earthquake engineering, Acapulco, Mexico, 1996.
13. Calado L., Simões da Silva L. and Simões R.: Cyclic behaviour of steel and composite beam-to-column joints, AISC, Fourth International Workshop on Connections in Steel Structures, p. 159-169, October 22-25, Roanoke, VA, 2000.
14. Calado L., Castiglioni C. A. and Bernuzzi C.: Seismic behaviour of welded beam-to-column joints: Experimental and numerical analysis, AISC, Fourth International Workshop on Connections in Steel Structures, p. 244-256, October 22-25, Roanoke, VA, 2000.
15. Calado L., Ferreira J. and Feligioni S.: Characterization of dissipative connections for concentric bracing systems in steel frames in seismic areas, Detailed Report, IST Lisbon, 2004.
16. Castiglioni C.A., Brescianini J., Crespi A., Dell' Anna S. and Lazzarotto L.: INERD – Dissipative connections for concentric bracing systems for steel frames in seismic areas – Final Report, Politecnico di Milano, 2004.
17. Chan S. L., and Chui P. P. T.: Non-linear static and cyclic analysis of steel frames with semi-rigid connections, Elsevier, Oxford, UK, 2000.
18. Chen S. J., Yeh C. H. and Chu J. M.: Ductile steel beams-to-column connections for seismic resistance, Journal of structural engineering, vol. 122, no. 11, p. 1292-1299, 1996.
19. Chen S.J., Chu J. M. and Chou Z. L.: Dynamic behaviour of steel frames with beam flanges shaved around connection, Journal of constructional steel research, vol. 42, no. 1, p. 49-70, 1997.
20. Chopra A. K.: Dynamics of structures – Theory and applications to earthquake engineering, Prentice-Hall Inc., 1995.
21. Chryssanthopoulos M. K.: Probabilistic basis and code format for loading, Dynamic loading and design of structures, Kappos A. J. ed., Spon Press, 2002.
22. Dougherty E.R.: Probability and statistics for the engineering, computing and physical sciences, Prentice-Hall Inc., 1990.
23. European Committee for Standardisation (CEN): prEN 1990, Eurocode – Basis of structural design, 2001.
24. European Committee for Standardisation (CEN): prEN 1991, Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-1 : General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings, 2001.

25. European Committee for Standardisation (CEN): prEN 1993, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2003.
26. European Committee for Standardisation (CEN): prEN 1993, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints, 2003.
27. European Committee for Standardisation (CEN): EN 1998, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, 2004.
28. European Convention for Constructional Steelwork (ECCS): Recommended testing procedure for assessing the behaviour of structural steel elements under cyclic loads, ECCS Publ. No 45, Rotterdam, The Netherlands, 1986.
29. Faggiolo B. and Landolfo R.: Dog-bone technique for the seismic improvement of steel moment resisting frames, Proceedings of the 4th European conference on steel and composite structures, 8-10 June 2005, Maastricht, The Netherlands, Hoffmeister B. and Hechler O. eds., volume C, p. 5.2-105 – 5.2-113, Druck and Verlagshaus Mainz, Germany, 2005.
30. FEMA-355D: State of the art report on connection performance, Federal Emergency Management Agency, 2000.
31. FEMA 273: NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, Federal Emergency Management Agency, 1997.
32. Gioncu V. and F. M. Mazzolani: Ductility of seismic resistant steel structures, Spon Press, London, UK, 2002.
33. Mazzolani F. M. and Piluso V.: Theory and design of seismic resistant steel frames, E & FN Spon, London, UK, 1995.
34. Mazzolani F.M.: Design of moment resisting frames, Seismic Resistant Steel Structures, Mazzolani F.M. and Gioncu V. (eds), chapter 4, p. 169-182, Springer-Verlag Wien New York, 2000.
35. Plumier A.: New idea for safe structure in seismic zone, IABSE Symposium, Brussels, Belgium, 1990.
36. Plumier A. (co-ordinator), Doneux C., Castiglioni C., Brescianini J., Crespi A., Dell' Anna S., Lazzarotto L., Calado L., Ferreira J., Feligioni S., Bursi O. S., Ferrario F., Sommovilla M., Vayas I., Thanopoulos P. and Demarco T.: Two Innovations for Earthquake Resistant DESIGN – The INERD Project – Final Report, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel : Steel RTD, Technical Report No. 6, 2004.

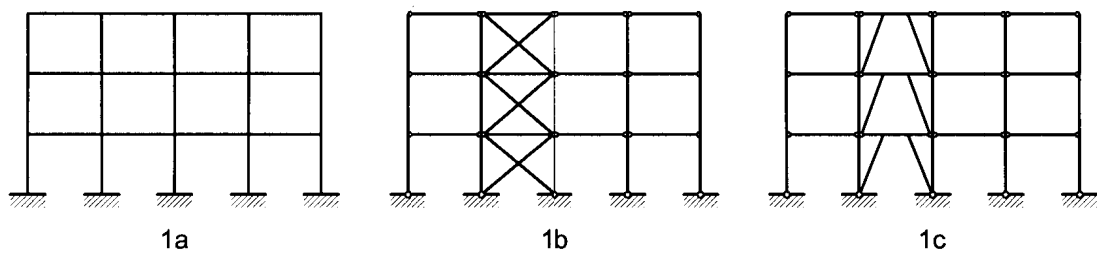
37. Vayas I.: Design of braced frames, Seismic Resistant Steel Structures, Mazzolani F. M. and Gioncu V. (eds), chapter 5, p. 241-288, Springer-Verlag Wien New York, 2000.
38. Vayas I. and Thanopoulos P.: INERD Project, Final Report, NTUA, 2004.
39. Vayas I., Calado L., Castiglioni C. A., Plumier A. and Thanopoulos P.: Innovative dissipative (INERD) connections for seismic resistant steel frames, Korea ISSS '05.
40. Vayas I., Thanopoulos P., Plumier A., Castiglioni C. A. and Calado L.: Behaviour of seismic resistant braced frames with innovative dissipative (INERD) connections, Proceedings of the 4th European conference on steel and composite structures, 8-10 June 2005, Maastricht, The Netherlands, Hoffmeister B. and Hechler O. eds., volume C, p. 5.2-25 – 5.2-32, Druck and Verlaghaus Mainz, Germany, 2005.
41. Vayas I. and Thanopoulos P.: Innovative dissipative (INERD) pin connections for seismic resistant braced frames, International journal of steel structures, vol. 5, no. 5, p. 453-463, 2005.
42. Vayas I. and Thanopoulos P.: Seismic resistant braced frames with dissipative (INERD) connections, Accepted for publication in the proceedings of the 5th conference on Behaviour of steel structures in seismic areas (STESSA), Yokohama, Japan, 2006.
43. Βάγιας, Ι., Ερμόπουλος Ι. και Ιωαννίδης Γ.: Σιδηρές κατασκευές – Παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, τόμος Ι, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 1997, 2005.
44. Βάγιας, Ι., Ερμόπουλος Ι. και Ιωαννίδης Γ.: Σιδηρές κατασκευές – Παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, τόμος ΙΙ, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 1999.
45. Βάγιας Ι.: Σιδηρές Κατασκευές – Ανάλυση και διαστασιολόγηση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2003.
46. Βάγιας, Ι., Θανόπουλος, Π. και Δασίου Μ. Ε.: Συνδέσεις απορρόφησης ενέργειας “INERD”, Πρακτικά 5ου Εθνικού συνεδρίου μεταλλικών κατασκευών, τόμ. 1, σελ. 51 - 58, Ξάνθη, Ελλάδα, 2005.
47. Ερμόπουλος, Ι.: Ευρωκώδικας 1 – Βάσεις σχεδιασμού και δράσεις επί των κατασκευών. Ερμηνευτικά σχόλια και παραδείγματα εφαρμογής, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 1997.
48. Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000, (2006)

49. Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ): ελληνικός Αντισεισμικός Σχεδιασμός 2000, Εκδόσεις ΣΠΜΕ, 2001. Τροποποιήσεις και συμπληρώσεις λόγω αναθεώρησης του χάρτη ζωνών επικινδυνότητας, απόφαση υπ' αριθ. Δ17α/115/9/ΦΝ275, Εφημερίς της κυβέρνησεως της Ελληνικής δημοκρατίας, α.φ. 1154, 12 Αυγ. 2003.
50. ASCE Composite Construction Committee, 'Recommendations for Seismic Design of Hybrid Coupled Walls' (Draft)
51. Argyris J.H., H.P. Mlejnek (1991), 'Dynamics of Structures', Elsevier
52. ATC – 40, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Applied Technology Council, California (1996)
53. EN 1993 (Eurocode 3), Design of steel structures, CEN, European Committee for Standardization, (2004)
54. EN 1998 (Eurocode 8), Design of structures for earthquake resistance, CEN, European Committee for Standardization, (2004)
55. FEMA – 350, Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, (June 2000)
56. FEMA – 356, Prestandard and Commentary for the seismic rehabilitation of Buildings, (November 2000)
57. Kappos A.J. (1999), 'Evaluation of behaviour factors on the basis of ductility and overstrength studies', Engineering Structures pp 823-835, Elsevier
58. Patrick J. Fortney, Bahram M. Shahrooz and Gian A. Rassati (December 2007), 'Large-scale testing of a Replaceable 'Fuse' Steel Coupling Beam', Journal of Structural Engineering, ASCE pp 1801-1807
59. Popov E.P., Engelhardt M.D. (1988), 'Seismic Eccentrically Braced Frames', J. Construct. Steel Research 10, pp 321-354
60. Sanchez-Ricart L., Plumier A. (2008), 'Parametric study of ductile moment-resisting steel frames: A first step towards Eurocode 8 calibration', Earthquake Engineering and Structural Dynamics, pp 1135-115
61. Παύλος Θανόπουλος: Αντισεισμική συμπεριφορά μεταλλικών φορέων με συστήματα απορρόφησης ενέργειας. Διδακτορική διατριβή, Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώβριος 2006

2. Καινοτόμα συστήματα - σχεδιασμός.

2.1 Συνήθη συστήματα αντισεισμικού σχεδιασμού.

Σε πολυώροφα μεταλλικά κτίρια η οριζόντια αντίσταση και δυσκαμψία συνήθως εξασφαλίζεται είτε από πλαίσια ικανά να παραλάβουν ροπή, (Σχ. 1a), είτε από συστήματα συνδέσμων δυσκαμψίας, αντιδιαγωνίων, με η χωρίς εκκεντρότητα (Σχ. 1 b-c).



Σχ. 1 Βασικοί τύποι συστημάτων δυσκαμψίας

Οι τρεις αυτοί βασικοί τύποι φορέων περιγράφονται και εξετάζονται στην συνέχεια.,

1 Πλαίσια ροπής

Τα πλαίσια ροπής αποτελούνται από δοκούς και υποστυλώματα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω άκαμπτων συνδέσεων, οι οποίες μπορούν να παραλάβουν ροπή. Οι στεροί κόμβοι που σχηματίζονται αποτελούν τη βάση του συστήματος της πλευρικής δυσκαμψίας του πλαισίου. Τα πλαίσια αυτά είναι οι περισσότερο εύκαμπτοι φορείς από τους τύπους που αναφέρονται παραπάνω και ο περιορισμός των σχετικών μετακινήσεων των ορόφων είναι συνήθως το κρισιμότερο κριτήριο στον αντισεισμικό σχεδιασμό.

Η πλαισιακή λειτουργία των κόμβων συμμετέχει στην παραλαβή οριζοντίων αλλά και κύρια κατακορύφων φορτίων.

Ο ικανοτικός σχεδιασμός αποσκοπεί στην εξασφάλιση ενός αποδεκτού μηχανισμού αστοχίας, στον οποίο τα υποστυλώματα παραμένουν στην ελαστική περιοχή (εξαιρουμένων μερικών θέσεων) όταν στα άκρα των δοκών έχουν σχηματιστεί πλαστικές αρθρώσεις.

Ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των υποστυλωμάτων, και η διατμητική διαρροή του φανώματος του κορμού του υποστυλώματος το οποίο ορίζεται από τα πέλματα της δοκού, οδηγούν σε μεγάλες πλευρικές παραμορφώσεις και επομένως, πρέπει να αποφεύγονται. Η κατανομή των πλαστικών αρθρώσεων σε μεγάλο μέρος της κατασκευής και σύμφωνα με την επιθυμητή διάταξη, οδηγεί στην αποτελεσματική απορρόφηση της ενέργειας του σεισμού με αποδεκτές πλευρικές και

παραμένουσες παραμορφώσεις, αφού οι μεταλλικές δοκοί επιδεικνύουν άριστη ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά.

Μέχρι τους σεισμούς του Northridge στο Los Angeles (1994) και του Hanshin στο Kobe (1995), ήταν διαδεδομένη η πεποίθηση ότι τα πλαίσια αυτού του τύπου συμπεριφέρονται εξαιρετικά κατά τη διάρκεια των σεισμών, με βασική προϋπόθεση να αποφευχθούν φαινόμενα μαλακού ορόφου. Επιπλέον, όταν οι πλαστικές αρθρώσεις εμφανίζονται στα υποστυλώματα, παρουσιάζεται κατώτερη υστερητική συμπεριφορά και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε σχέση με την δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στις δοκούς, λόγω της παρουσίας σημαντικής αξονικής δύναμης.

Παρά την καλή φήμη των μεταλλικών κατασκευών, ο σεισμός του Northridge, ο οποίος προκάλεσε ζημιές 16,7-33,6 δις. €, αποκάλυψε μια σημαντικότερη έλλειψη στη σχεδιαστική λογική η οποία επικρατούσε στους ισχύοντες κανονισμούς, ειδικότερα στον σχεδιασμό των κόμβων και στην διατήρηση της απαιτούμενης πλαστιμότητας.

Οι μεταλλικές κατασκευές συμπεριφέρθηκαν όπως αναμενόταν κατά τη διάρκεια του σεισμού και τηρήθηκαν οι απαιτούμενες στάθμες επιτελεστικότητας. Εν τούτοις, κατά την καταγραφή που ακολούθησε το σεισμό, φάνηκε ότι υπήρχε πολύ σημαντικότερο πρόβλημα από αυτό που εκτιμήθηκε αρχικά. Κύριος λόγος ήταν το φαινόμενο σχηματισμού και εξάπλωσης ρωγμών στις περιοχές των συγκολλητών κόμβων, και ειδικά στα κάτω πέλματα των δοκών. Κατόπιν προσεκτικότερης παρατήρησης, αποδείχθηκε ότι μόνο σε λίγες περιπτώσεις τα μεταλλικά πλαίσια ροπής συμπεριφέρθηκαν όπως έπρεπε, με το σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των δοκών. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η δοκός επέδειξε επαρκή υπεραντοχή, με αποτέλεσμα την απευθείας φόρτιση των συνδέσεων με το σύνολο της σεισμικής ενέργειας.

Η αστοχία αυτής της μορφής μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω της πολύ μεγάλης ταχύτητας επιβολής παραμόρφωσης, των μεγάλων προς τα πάνω αποκλίσεων της τάσης διαρροής του χάλυβα και κυρίως, της κακής ποιότητας συγκολλήσεων, ειδικά στις δύσκολα προσβάσιμες περιοχές, όπως το κάτω πέλμα των δοκών.

Τα παραπάνω φαινόμενα δε λαμβάνονταν υπόψη από κανονισμούς και κατασκευαστές, με αποτέλεσμα τις εκτεταμένες ζημιές σε πλήθος κατασκευών. Στην περίπτωση που οι ρωγμές δεν προκάλεσαν σημαντικότερες αστοχίες, ήταν απαραίτητη η άμεση επισκευή τους, κάτι ιδιαίτερα δύσκολο λόγω της θέσης των ρωγμών και της φύσης της αστοχίας.

Λίγο αργότερα, ο σεισμός του Kobe προκάλεσε μια τεράστια καταστροφή, τόσο από πλευράς θυμάτων με 6.400 νεκρούς, όσο και από οικονομικής άποψης με ζημιές που ξεπέρασαν τα 110 δις. €. Ο σεισμός προκάλεσε την κατάρρευση περισσότερων από 100.000 κτιρίων και σπιτιών, σοβαρές ζημιές σε 90.000 κτίρια και ελαφρότερες ζημιές σε επιπλέον 150.000 κτίρια. Πολλά από τα κτίρια που κατέρρευσαν ή υπέστησαν σοβαρές βλάβες ήταν μεταλλικά, με αποτέλεσμα την επιβεβαίωση της ανησυχίας για την σεισμική επάρκεια των μεταλλικών κατασκευών, που είχαν δημιουργηθεί μετά το σεισμό του Northridge.

Η Ιαπωνική αντισεισμική τεχνολογία, από τις κορυφαίες παγκοσμίως, δέχθηκε ένα ισχυρό πλήγμα, αναστατώνοντας την επιστημονική κοινότητα. Η αναπάντεχη καταστροφή έγινε αδιάψευστος μάρτυρας ότι, εκτός από την υποεκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής και την κακή ποιότητα των συγκολλήσεων, υπήρχε ένα κενό στους κανονισμούς όσον αφορά σε οικονομοτεχνικά κριτήρια. Με άλλα λόγια, έγινε φανερό ότι εκτός από την αποφυγή της κατάρρευσης ή την προστασία της ανθρώπινης ζωής, ένα κριτήριο που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον αντισεισμικό σχεδιασμό είναι η ευκολία και το κόστος επισκευής μιας κατασκευής.

Σε αυτή την κατεύθυνση, έγιναν προσπάθειες να βελτιωθεί η αντισεισμική συμπεριφορά των πλαισίων ροπής. Ένας τρόπος είναι η απομάκρυνση της θέσης της πλαστικής άρθρωσης από τον κόμβο, είτε χρησιμοποιώντας ενισχυμένη διατομή στη συμβολή δοκού και υποστυλώματος, είτε μειώνοντας τη διατομή της δοκού σε κάποια απόσταση από το υποστύλωμα, αφαιρώντας υλικό από τα πέλματα. Ο δεύτερος τρόπος οδηγεί στην απομειωμένη διατομή δοκού, dog-bone connection, αρχικού σχεδιασμού του A. Plumier.

Παρ' όλη την πρόοδο που έχει σημειωθεί για αυτού του τύπου τις κατασκευές, ένα βασικό πρόβλημα που παραμένει είναι ότι οι ζώνες που έχουν υποστεί βλάβες λόγω του σεισμού, βρίσκονται στα άκρα των δοκών, αποτελούν μέρος του μηχανισμού παραλαβής των κατακόρυφων φορτίων και δεν είναι ούτε εύκολα προσβάσιμες, ούτε εύκολα αντικαταστάσιμες. Ως αποτέλεσμα, η επιθεώρηση και επισκευή τους μετά από ένα σημαντικό σεισμό είναι δύσκολη και συνεπάγεται σημαντικό κόστος και χρόνο διακοπής λειτουργίας του κτιρίου και ανακατασκευή σημαντικού τμήματος των οικοδομικών στοιχείων πλήρωσης.

2 Πλαίσια με κεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας

Τα πλαίσια με κεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας διαφοροποιούνται από τα πλαίσια ροπής, καθώς οι συνδέσεις μεταξύ δοκών και υποστυλωμάτων μπορεί να είναι απλές συνδέσεις τέμνουσας, χωρίς να συμμετέχουν ουσιαστικά στην παραλαβή οριζοντίων φορτίων. Τα πλευρικά φορτία (σεισμός, άνεμος) παραλαμβάνονται από το σύστημα κατακόρυφων συνδέσμων δυσκαμψίας. Δεδομένου ότι οι σύνδεσμοι αυτοί βρίσκονται σε μερικά μόνο σημεία της κάτοψης του κτιρίου, είναι χρήσιμη η λειτουργία της οριζόντιας πλάκας ως διάφραγμα, ώστε να μεταβιβάζει και να κατανέμει την ένταση στους συνδέσμους μεταξύ των διαφόρων πλαισίων και χωρίς ιδιαίτερη αξονική καταπόνηση των δοκών. Τα πλαίσια αυτά είναι πιο δύσκαμπτα, ουσιαστικά αμετάθετα, και η αντοχή των μελών είναι συνήθως το κριτήριο που καθορίζει τον αντισεισμικό σχεδιασμό.

Σε αυτή την περίπτωση, ο ικανοτικός σχεδιασμός έχει ως στόχο την εξασφάλιση ότι οι σύνδεσμοι αποτελούν το πιο αδύναμο μέρος της κατασκευής και ότι, όταν αυτοί θα διαρρεύσουν απορροφώντας ενέργεια, ο υπόλοιπος φορέας και κύρια τα υποστυλώματα στα οποία συντρέχουν οι σύνδεσμοι, θα παραμείνει ελαστικός, συνεχίζοντας να φέρει χωρίς προβλήματα τα κατακόρυφα φορτία. Ο βασικός

μηχανισμός απορρόφησης της ενέργειας του σεισμού για συνδέσμους μορφής αντιδιαγωνίων (X) είναι μέσω της διαρροής της εφελκόμενης διαγωνίου, ενώ η θλιβόμενη διαγώνιος συνήθως δε σχεδιάζεται με επαρκή αντοχή έναντι λυγισμού, και η συνεισφορά της αγνοείται. Στην περίπτωση συνδέσμων Λ ή V, η συνεισφορά της θλιβόμενης διαγωνίου είναι απαραίτητη για την ισορροπία του συστήματος και συμμετέχει στην παραλαβή των σεισμικών φορτίων, καθιστώντας το όλο σύστημα πιο ευάλωτο λόγω της ψαθυρής αστοχίας σε λυγισμό του θλιβόμενου μέλους του συνδέσμου και πρακτικά αδύνατο τον σχεδιασμό με μηχανισμούς απορρόφησης ενέργειας, γιαυτό και κανονιστικά τιμωρείται με πρακτικά υποχρεωτική ελαστική ανάλυση ($q=1.5$).

Τα πλαίσια αυτού του τύπου υπερτερούν σε σχέση με τα πλαίσια ροπής ως προς την αυξημένη τους αντοχή και πλευρική δυσκαμψία, αλλά έχουν μικρότερη πλαστιμότητα. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στη σταδιακή υποβάθμιση (degradation) του βρόχου υστέρησης των διαγωνίων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση και παράλληλα στην λυγισμική συμπεριφορά της θλιβόμενης αντιδιαγωνίου. Εκτός του φορτίου λυγισμού, το οποίο μετά τον πρώτο κύκλο θλίψης μειώνεται δραματικά, επηρεάζεται και η εφελκυστική συμπεριφορά της διαγωνίου, λόγω της προϋπάρχουσας λυγισμικής παραμόρφωσης από τον θλιβόμενο κύκλο.

Παρ' όλο που η θλιβόμενη διαγώνιος (σύνδεσμοι τύπου X) αγνοείται στο σχεδιασμό, και η συνεισφορά της είναι συνήθως αμελητέα, η μεγάλη διαφορά της συμπεριφοράς των συνδέσμων σε θλίψη και εφελκυσμό είναι ένα μειονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου πλαισίων. Συγκεκριμένα, ο λυγισμός του ενός συνδέσμου έχει ως αποτέλεσμα τη στιγμιαία ανακατανομή των δυνάμεων στα υπόλοιπα μέλη και, τελικά, στον εφελκόμενο σύνδεσμο, με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της έντασής του, φαινόμενο ιδιαίτερα έντονο στους πρώτους κύκλους της φόρτισης.

Στα πλεονεκτήματα των πλαισίων με κεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας πρέπει να προστεθεί ο «θεωρητικός» διαχωρισμός των δομικών στοιχείων που συμμετέχουν στην κατακόρυφη και οριζόντια λειτουργία του φορέα και ως εκ τούτου, η ευκολότερη αντικατάστασή τους, η οποία μπορεί να γίνει μετά το σεισμό χωρίς να επηρεαστεί το βασικό φέρον σύστημα των κατακόρυφων φορτίων, το οποίο αποτελείται από τις δοκούς και τα υποστυλώματα.

3. Πλαίσια με έκκεντρους συνδέσμους δυσκαμψίας.

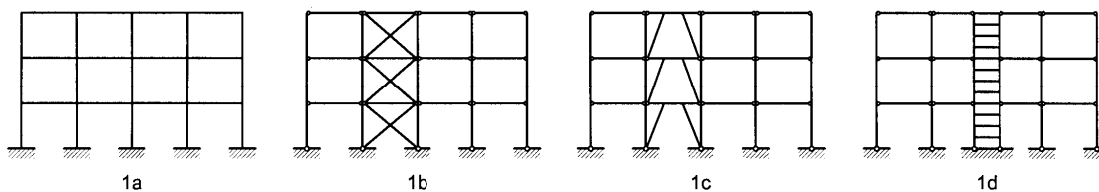
Συμπληρωματικά προς τους δύο τύπους πλαισίων που περιγράφονται παραπάνω, υπάρχει και μια τρίτη κατηγορία με κοινά στοιχεία και με τις άλλες δύο. Σε αυτό τον τύπο πλαισίων υπάρχουν επίσης κατακόρυφοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας, οι οποίοι δε συντρέχουν στους κόμβους δοκών υποστυλωμάτων ή στο μέσο της δοκού, αλλά τέμνονται με τις δοκούς σε κάποια απόσταση από τους κόμβους ή μεταξύ τους. Λόγω της εκκεντρότητας των συνδέσμων, το τμήμα της δοκού μέσω του οποίου μεταφέρονται οι δυνάμεις των συνδέσμων, το οποίο ονομάζεται δοκός σύζευξης, καταπονείται από έντονη κάμψη και διάτμηση.

Όπως προηγουμένως, ο ικανοτικός σχεδιασμός γίνεται έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι η δοκός σύζευξης είναι το πιο αδύναμο μέλος σε σχέση με τα υπόλοιπα που συνδέονται με αυτήν. Ανάλογα με το μήκος της και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής της (ουσιαστικά την πλαστική ροπή αντοχής και την αντοχή έναντι τέμνουσας), η δοκός χαρακτηρίζεται ως καμπτική ή διατμητική και σχεδιάζεται ανάλογα. Στην πρώτη περίπτωση σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα της δοκού σύζευξης, μέσω της στροφής των οποίων απορροφάται η ενέργεια του σεισμού. Στη δεύτερη περίπτωση, διαρρέει ο κορμός λόγω διάτμησης, οπότε η ενέργεια απορροφάται σε όλο το μήκος της δοκού. Για τις ενδιάμεσες καταστάσεις, οι δύο μηχανισμοί αστοχίας συνυπάρχουν.

Τα πλαίσια με έκκεντρους συνδέσμους δυσκαμψίας συνδυάζουν κάποια από τα πλεονεκτήματα των δύο άλλων τύπων πλαισίων. Κατά συνέπεια, έχουν μεγαλύτερη αντοχή και πλευρική δυσκαμψία από τα πλαίσια ροπής, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζουν μεγαλύτερη πλαστιμότητα σε σχέση με τα πλαίσια με κεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας. Παρ' όλα αυτά, δεν παύουν να υφίστανται προβλήματα επισκευασιμότητας μετά το σεισμό, λόγω του σχηματισμού ζωνών απορρόφησης ενέργειας στις δοκούς, οι οποίες δεν είναι εύκολα προσβάσιμες και αποτελούν βασικό μέρος του μηχανισμού μεταφοράς των κατακόρυφων φορτίων στο έδαφος.

2.2 Καινοτόμα συστήματα – Σχεδιασμός Κατακόρυφη Vierendeel.

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, σε πολύροφα μεταλλικά κτίρια η οριζόντια αντίσταση και δυσκαμψία εξασφαλίζεται είτε από πλαίσια ικανά να παραλάβουν ροπή, (Σχ. 2.1 1a), είτε από συστήματα συνδέσμων, με ή χωρίς εκκεντρότητα (Σχ. 2.1 1 b-c). Κάθε ένα από αυτά τα συστήματα έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του, σε σχέση με την ολική δυσκαμψία την πλαστιμότητα, την αντοχή, την απορρόφηση ενέργειας, την λειτουργικότητα και την ευχέρεια επισκευής η και ολικής αντικατάστασης, εφ' όσον απαιτηθεί.



Σχ. 2.1. Διάφοροι τύποι συστημάτων δυσκαμψίας και το προτεινόμενο σύστημα “INSTED”

Συγκρίνοντας και αξιολογώντας τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, προτείνεται ένας άλλος τύπος συστήματος οριζόντιας δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας που αντικαθιστά τους αντιδιαγωνίους συνδέσμους σε ένα φάτνωμα, με μία σύνθετη δοκό, αποτελούμενη από δύο ισχυρούς κατακόρυφους στύλους (αρχικά ορθογωνικής κοίλης διατομής), συνδεδεμένες με οριζόντιες δοκούς σε σχετικά πυκνή διάταξη, μια κατακόρυφη δοκό vierendeel (Σχ.2.1 1d)

Το καινοτόμο αυτό σύστημα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας (**innovative stiffness and energy dissipation system** για συντομία “**INSTED**”) προσομοιάζει με ένα τοίχωμα δυσκαμψίας, αλλά με το πρόσθετο πλεονέκτημα της ιδιαίτερα πλαστικής συμπεριφοράς και ως εκ τούτου την ικανότητα απορρόφησης μεγάλης ποσότητας ενέργειας μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης των προεπιλεγμένων προς τούτο δοκών και εφ' όσον απαιτηθεί μετά από μία μεγάλη σεισμική καταπόνηση την ευκολία επισκευής ακόμη και πλήρους αντικατάστασης.

Το προτεινόμενο σύστημα έχει διερευνηθεί πειραματικά σε πραγματική κλίμακα στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, και η πειραματική ανάλυση υποστηρίζεται με αντίστοιχες μη γραμμικές στατικές και δυναμικές αναλύσεις.

Το νέο αυτό σύστημα βασίζεται σε ένα ισχυρό ζεύγος κατακορύφων υποστυλωμάτων, που συνδέονται μεταξύ τους με ικανό αριθμό οριζοντίων δοκών δυσκαμψίας σε κάθε όροφο, σχηματίζοντας ένα σύνθετο υποστύλωμα, με παράλληλες συνδέσεις, μια κατακόρυφη δοκό vierendeel.

Στον αρχικό σχεδιασμό χρησιμοποιήθηκαν 5 δοκοί ανά όροφο, αλλά ο αριθμός αυτός δεν είναι δεσμευτικός, είναι συνάρτηση της απαιτούμενης δυσκαμψίας-αντοχής, του διατιθέμενου χώρου και καθορίζεται από τον χρήστη.

Το σύστημα αυτών των δοκών δεν συμμετέχει στην παραλαβή των κατακόρυφων στοιχείων, και σχεδιάζεται ώστε να καλύπτει τις ανάγκες αντοχής και δυσκαμψίας του συνολικού δομήματος σε οριζόντια φορτία. Οι στύλοι, στους οποίους καταλήγουν και άλλα δομικά στοιχεία, (δοκοί πλαισιακού συστήματος, τεγίδες κλπ) μπορούν ανεξάρτητα να συμμετέχουν παράλληλα και στην παραλαβή κατακορύφων φορτίων.

Αυτό δεν αποκλείει την μερική συμμετοχή και του υπόλοιπου φορέα, στην παραλαβή οριζοντίων φορτίων, σε περίπτωση που μορφώνεται από πλαίσια ροπής, αφού υπάρχει πάντα, στα πλαίσια των δυνατοτήτων του επιλεκτικού σχεδιασμού, η δυνατότητα τροποποίησης της σχέσης δυσκαμψίας-αντοχής του συστήματος INSTED, ώστε να ελέγχει την απαιτούμενη στο έργο δυσκαμψία και αντοχή και να φτάνει πρώτο σε αστοχία και αντίστοιχα σε απορρόφηση ενέργειας. Η δυνατότητα αυτή δίνει ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα στον σχεδιασμό, αφού η χρήση πλαισίων ροπής για κατακόρυφα φορτία δίνει σημαντικά οικονομικά πλεονεκτήματα στον σχεδιασμό, ακόμη και με την χρήση πλαστικής ανάλυσης για βελτιστοποίηση απόδοσης σύμμικτου δομικού συστήματος, αλλά η ικανότητα του υπόλοιπου, εκτός INSTED, συστήματος να παραλάβει ροπές, αποτελεί μία ακόμη πρόσθετη γραμμή άμυνας που συνεισφέρει στις οριακές καταστάσεις αστοχίας, προσθέτοντας ασφάλεια στην κατασκευή.

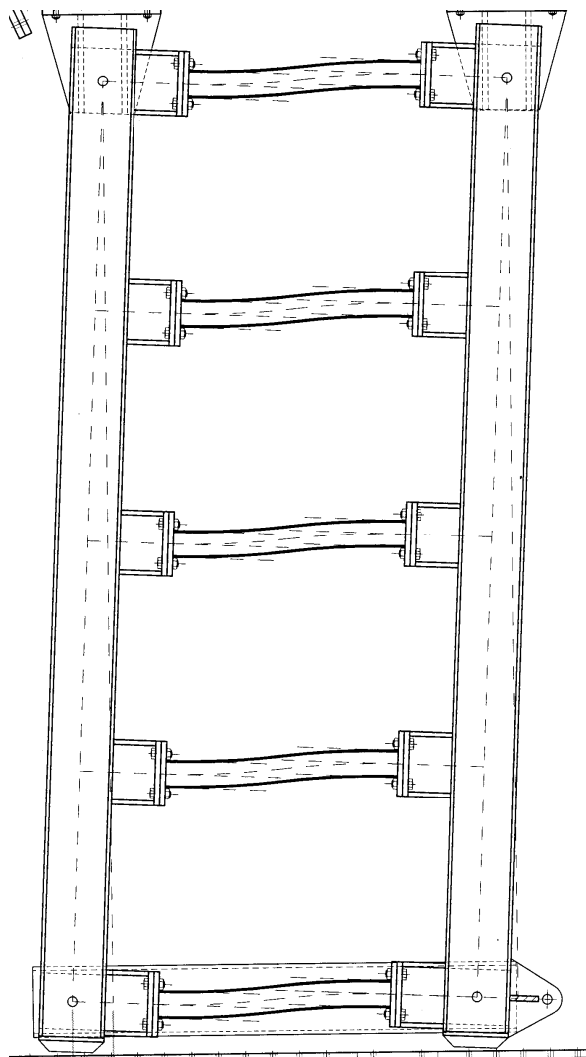
2.2 Ελεγχόμενη αντίσταση.

Αυτό που επιδιώκεται είναι η συγκέντρωση των κύριων στοιχείων δυσκαμψίας-αντοχής του συστήματος σε οριζόντια φορτία, σε μία μόνον περιοχή, αντίστοιχη με τα τοιχώματα δυσκαμψίας σε πιο συμβατικά συστήματα.

Με δεδομένο ότι η δυσκαμψία-αντοχή του INSTED, μπορεί να σχεδιαστεί σύμφωνα με τις ανάγκες του δομήματος (τον επιθυμητό σχεδιασμό από τον μηχανικό), ανεξάρτητα από το υπόλοιπο δομικό σύστημα, μπορεί να διαταχθεί σε επιθυμητές αρχιτεκτονικά και λειτουργικά περιοχές.

Συγκεντρώνοντας τα στοιχεία απορρόφησης ενέργειας σε μία μικρή απόλυτα ελεγχόμενη περιοχή του έργου, έχουμε την δυνατότητα της εύκολης επέμβασης, επισκευής και αντικατάστασης, ακόμη και ενίσχυσης, εφ' όσον απαιτηθεί, χωρίς την διατάραξη του συνολικού οικοδομικού πλέγματος.

Έχουμε λοιπόν σε κάθε κατακόρυφη σύνθετη δοκό INSTED, δύο ισχυρούς παράλληλους στύλους, σε πρώτο σχεδιασμό αμφιαρθρωτούς, συνδεδεμένους με οριζόντιες δοκούς δυσκαμψίας, που διατάσσονται κατανεμημένες καθ' ύψος, μέσα στα πλαίσια του κάθε ορόφου.



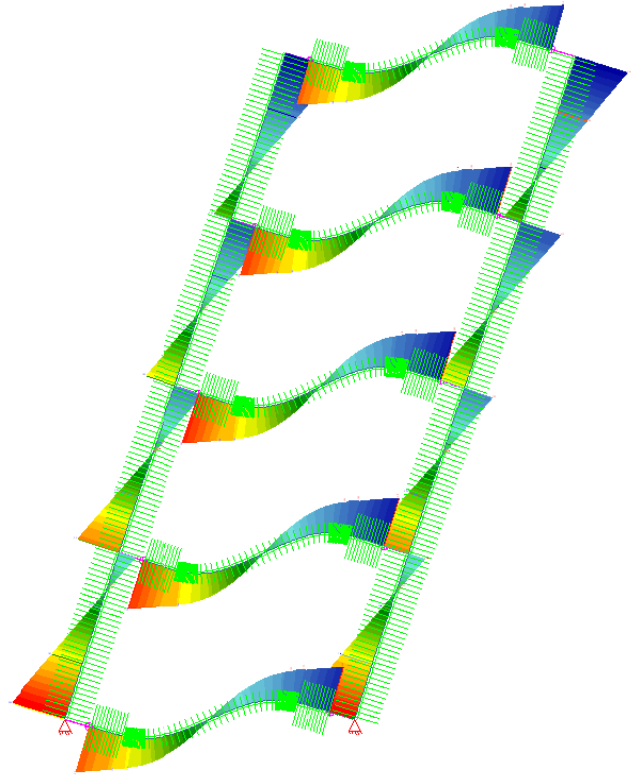
Σχ. 2.2. Η βασική διάταξη του προτεινόμενου συστήματος "INSTED".

Με την συνδεσμολογία αυτή, η αντοχή και η δυσκαμψία του συστήματος, καθορίζεται από το μήκος, την διατομή και τον αριθμό των δοκών δυσκαμψίας.

Η αύξηση του αριθμού των δοκών, μπορεί να γίνει με μοναδικό περιορισμό την απαραίτητη λειτουργική απόσταση ανάμεσα στις δοκούς, ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση και πιθανή αντικατάστασή τους.

Παρατηρώντας το διάγραμμα καμπτικών ροπών του προτεινομένου συστήματος (σχήμα 2.3), για οριζόντια φορτία, τμήμα της σεισμικής τέμνουσας του ορόφου, εύκολα διακρίνεται ότι, τα υποστυλώματα παραμένουν σχετικά άτονα, με την μεγαλύτερη ποσότητα εσωτερικής ενέργειας να συγκεντρώνεται στις δοκούς σύνδεσης.

Απαιτούνται λοιπόν σχετικά ισχυροί στύλοι για να λειτουργούν στην ελαστική περιοχή και με μικρές παραμορφώσεις, ώστε το μεγαλύτερο μέρος της παραμόρφωσης και της εσωτερικής ενέργειας να συγκεντρώνεται στις δοκούς, οι οποίες δημιουργούν πλαστικές αρθρώσεις - ζώνες, για καταπονήσεις πάνω από τον σεισμό σχεδιασμού.



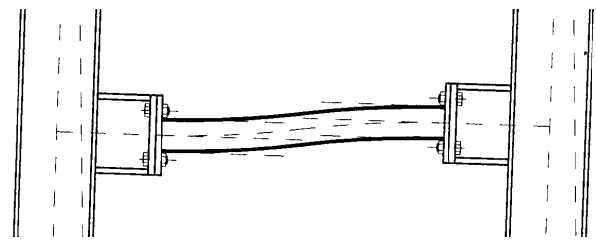
Σχ. 2.3. Το διάγραμμα καμπτικών ροπών για οριζόντιες δυνάμεις στο σύστημα INSTED

2.4 Πλαστιμότητα – ικανοτικός σχεδιασμός.

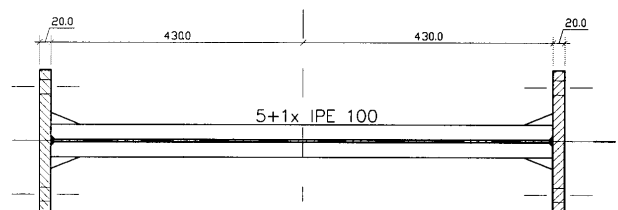
Για να εξασφαλιστεί η δημιουργία των επικείμενων πλαστικών αρθρώσεων μέσα στο επιθυμητό μήκος των δοκών, εκτός της περιοχής της σύνδεσης, οι δοκοί δυσκαμψίας συνδέονται μέσω μετωπικών πλακών σε ισχυρές δοκούς υποδοχείς που είναι ηλεκτροσυγκολλημένες στα υποστυλώματα.

Έτσι οι πλαστικές ζώνες, περιορίζονται μέσα στις επιθυμητές περιοχές των αναλώσιμων δοκών.

Ακόμη, τα άκρα των δοκών έχουν ενισχυθεί με πρόσθετα ελάσματα, ώστε να απομακρυνθούν οι πλαστικές ζώνες από τους κόμβους.

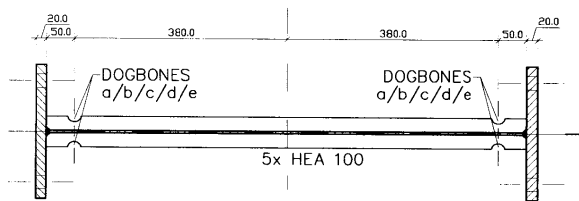


Σχ. 2.4. Το επιθυμητό μήκος ανάπτυξης πλαστικών ζωνών.



Σχ. 2.5 Διάταξη ενισχύσεων στα άκρα των δοκών

Εναλλακτικά είναι δυνατή η τοπική εξασθένηση των δοκών, με εγκοπές ή σχισμές (dog bones-slots), σε απόσταση από την σύνδεση, για τον καθορισμό της θέσης δημιουργίας των πλαστικών ζωνών.

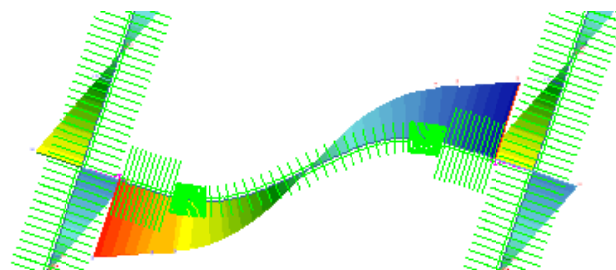


Σχ. 2.6 Διάταξη εγκοπών εξασθένησης της διατομής

Η αντοχή των δοκών, που είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή των στύλων, εξασφαλίζει την αρχή του ικανοτικού σχεδιασμού και καθορίζει κύρια την συνολική δυσκαμψία και αντοχή του συστήματος.

Οι δοκοί επιλέγονται να λειτουργούν ελαστικά, μέσα στα απαιτούμενα λειτουργικά πλαίσια, για σεισμικές φορτίσεις μικρότερες από τον σεισμό σχεδιασμού και με τον σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων και απορρόφηση ενέργειας για μεγαλύτερες σεισμικές καταπονήσεις.

Παρατηρώντας την μορφή του διαγράμματος, για την κάθε δοκό, είναι προφανές ότι ανάλογα με την θέση δημιουργίας της πλαστικής άρθρωσης, απαιτείται αντίστοιχα και δοκός διαφορετικής αντοχής.



Σχ. 2.7 Οι τιμές της ροπής σχεδιασμού ανάλογα με την επιλογή της θέσης δημιουργίας της πλαστικής ζώνης

Για την ίδια οριζόντια δύναμη στην κεφαλή της σύνθετης δοκού, ανάλογα με το μήκος που επιλέγουμε για τις οριζόντιες δοκούς δυσκαμψίας, άρα και την απόσταση από τον κόμβο στην οποία σχεδιάζουμε την δημιουργία της πλαστικής ζώνης, η ροπή επομένως και η απαιτούμενη διατομή της δοκού μειώνεται δραματικά και μπορεί να αντικατασταθεί με μία απλή ράβδο, ορθογωνικής ή κυκλικής διατομής.

Στον πρώτο κύκλο των πειραμάτων, οι δοκοί ήταν IPE 100 ή αντίστοιχα RHS 80/5 για καθαρό (μη ενισχυμένο) μήκος δοκού $380 \times 2 = 760$ mm. Οι αντίστοιχες ορθογωνικές ράβδοι, ήταν $2 \times 25/12,5$ και η κυκλική ράβδος $\Phi 33$ με ενεργό μήκος 11.0 και 12.5 cm.

Δυναμεις και ροπές στους διάφορους συνδυασμούς των διατάξεων του INSTED.							
$h_f =$	3,40 m	$b =$	150,0 cm	$n =$	5 beams	$l_f =$	86,0 cm
5*IPE100	Aa= 10,3 cm ² Wel= 34,2 cm ³ Wpl= 39,4 cm ³ fya= 23,5 kN/cm ² Mel= 803,7 kNcm Mpl= 925,9 kNcm P2o= 21,5 kN P1= 47,5 kN	5*SHS80/5	Aa= 14,9 cm ² Wel= 34,7 cm ³ Wpl= 41,7 cm ³ fya= 23,5 kN/cm ² Mel= 815,45 kNcm Mpl= 979,95 kNcm P2o= 22,8 kN P1= 50,3 kN	5*2bar25/12,5	Aa= 7,2 cm ² Wel= 3,60 cm ³ Wpl= 5,40 cm ³ fya= 23,5 kN/cm ² Mel= 84,60 kNcm Mpl= 126,90 kNcm P2o= 23,07 kN P1= 50,90 kN b= 2,40 cm h= 3,00 cm l_f= 11,00 cm	5*2rodΦ33	Aa= 8,55 cm ² Wel= 3,53 cm ³ Wpl= 5,99 cm ³ fya= 23,5 kN/cm ² Mel= 82,91 kNcm Mpl= 140,75 kNcm P2o= 22,52 kN P1= 49,68 kN d= 3,3 cm h= cm l_f= 12,50 cm

Πιν. 2.1 Τιμές οριζόντιας δύναμης στην κεφαλή του συστήματος για αντίστοιχες διατάξεις δοκών

Στο πίνακα #2.1, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μεγέθη των οριζοντίων δυνάμεων που αναπτύσσονται στις θέσεις σχεδιασμού της πλαστικής ζώνης, για διάφορους τύπους δοκών.

Οι τιμές είναι παραπλήσιες, είτε για ισοδύναμες δοκούς με πλήρες άνοιγμα 76 cm, μεταξύ των θέσεων δημιουργίας της πλαστικής άρθρωσης (IPE100, SHS80/5), είτε εναλλακτικά, για μικρές καμπτόμενες ράβδους στο μέσο των δοκών, κυκλικής η ορθογωνικής διατομής, με αντίστοιχη ενεργή απόσταση ανάμεσα στις πλαστικές αρθρώσεις 11-12.5 cm.

Κυριότερα όμως, με το προτεινόμενο σύστημα, είναι δυνατός ο καθορισμός και η επίτευξη της απαιτούμενης δυσκαμψίας και αντοχής, από τον σχεδιασμό μόνον του συστήματος INSTED, αφήνοντας όλο το υπόλοιπο δομικό σύστημα ανεπηρέαστο.

Ο βαθμός της δυσκαμψίας, και της αντοχής σε οριζόντια φορτία, καθορίζεται από τον σχεδιασμό των κατακόρυφων δοκών “vierendeel”, την διάταξη τους στο κτίριο και τον ειδικό επί μέρους σχεδιασμό τους. Αρκεί βέβαια, η δυσκαμψία του υπολοίπου συστήματος (στην περίπτωση πλαισίων ροπής) να μην ανταγωνίζεται στην δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων, αυτή του συστήματος INSTED, στο οποίο πρέπει να αρχίζουν και να περιορίζονται οι δημιουργούμενες πλαστικές ζώνες.

Η επιτυχία αυτής της αυξημένης δυσκαμψίας στο σύστημα και ο περιορισμός των αστοχιών στην περιοχή των οριζοντίων δοκών προκύπτει σχεδόν αυτόματα, από την χρήση ικανού αριθμού οριζοντίων δοκών που αυξάνει σημαντικά την τοπική δυσκαμψία του πλαισιακού συστήματος, μειώνοντας την καταπόνηση στα υπόλοιπα στοιχεία, που όμως παραμένουν σαν δεύτερη γραμμή άμυνας, εφόσον απαιτηθεί, μετά την πλαστικοποίηση και τελική αστοχία των δοκών του συστήματος INSTED.

2.5 Αντικαταστασιμότητα.

Βασική προϋπόθεση για την εύρυθμη λειτουργία ενός «αναλώσιμου» συστήματος είναι η δυνατότητα επισκευής μετά την χρήση, όταν φτάσει σε επίπεδα που να ξεπερνούν τα όρια λειτουργικότητας.

Αυτό είναι και ένα από τα βασικά μειονέκτημα των πλαισίων ροπής, γιατί οι θέσεις της δημιουργίας των πλαστικών ζωνών και των σημείων που απαιτούνται αποκαταστάσεις, είναι σε καίρια σημεία του φορέα, και η επισκευή η αντικατάσταση τους απαιτεί επεμβάσεις σε δοκούς φέρουσες κατακόρυφα φορτία, σε θέσεις που απαιτούν υποστύλωση, και σημαντικές πρόσθετες οικοδομικές επισκευές, σε εκτεταμένες περιοχές του δομήματος.

Στο προτεινόμενο σύστημα, οι πλαστικές ζώνες περιορίζονται στις οριζόντιες δοκούς των στοιχείων INSTED, που δεν συμμετέχουν στην παραλαβή κατακορύφων φορτίων, και βρίσκονται σε επιλεγμένες θέσεις, εύκολα επισκέψιμες. Η επισκευή τους, που περιορίζεται στην πιθανή αντικατάσταση των δοκών, είναι απλή, ιδιαίτερα στην

περίπτωση των συστημάτων με κεντρικές ράβδους INERD, όπου η εύκολη αυξομείωση του μήκους των δοκών καθιστά ιδιαίτερα απλή την αφαίρεση και επανατοποθέτηση τους, μετά από επισκευή η αντικατάσταση.

2.6 Προοδευτική αστοχία.

Εφ' όσον πρόκειται για ένα αναλώσιμο τμήμα της κατασκευής, είναι δυνατός και επιθυμητός ένας σχεδιασμός που να επιτρέπει την σταδιακή πλαστικοποίηση των δοκών, ώστε η απορρόφηση ενέργειας να αρχίζει από χαμηλές τιμές σεισμικής έντασης, και να αυξάνεται προοδευτικά.

Αυτό που μοιάζει ιδιαίτερα πολύπλοκο έως ανεφάρμοστο, σε έναν σχεδιασμό που εμπεριέχει τον συνολικό φορέα και το σύνολο των φορτίσεων, είναι ιδιαίτερα απλό στο προτεινόμενο σύστημα, γιατί ο σχεδιασμός αφορά ένα ημιανεξάρτητο τμήμα του δομικού συστήματος που λειτουργεί μόνον για τις οριζόντιες, κύρια σεισμικές φορτίσεις.

Αρκεί να διαταχθούν στις σύνθετες δοκούς INSTED, στα πλαίσια κάθε ορόφου, δοκοί με διαφορετικό λόγο δυσκαμψίας-αντοχής, έτσι ώστε για την κοινή γωνιακή παραμόρφωση του συστήματος άρα και των δοκών, να υπάρχει προοδευτική πλαστικοποίηση.

Αυτό μπορεί να γίνει με χρήση διαφορετικών δοκών καθ' ύψος (βλ. σειρά πειραμάτων #5 και #6ε), με δοκούς της ίδιας σειράς και διαφορετικού μεγέθους (IPE80-IPE160), η με όμοιες δοκούς με διαφορετικές απομειώσεις διατομής (dog bones, slots, ring slots) η τέλος με όμοιες δοκούς με διαφορετικά μήκη.

2.7 Προτεινόμενες διατάξεις και μορφές δοκών.

Από τα στοιχεία του σχεδιασμού του συστήματος, δεδομένο είναι το συνολικό ύψος του ορόφου, και η διάταξη των θέσεων των στοιχείων INSTED, από τον συνολικό σχεδιασμό του δομήματος (αρχιτεκτονικό - στατικό) και παραμένουν για επιλογή οι ακόλουθες παράμετροι:

- Η απόσταση των στύλων.
- Ο αριθμός, οι αποστάσεις και η μορφή των οριζοντίων δοκών.
- Η διάταξη των δοκών υποδοχέων, και η μορφή της σύνδεσης με τις δοκούς δυσκαμψίας.
- Η διαμόρφωση των θέσεων δημιουργίας της πλαστικής άρθρωσης.

Η απόσταση των στύλων πρέπει να είναι περιορισμένη, τόσο για αρχιτεκτονικούς λόγους, όσο και για την ανάπτυξη σημαντικών καταπονήσεων στις δοκούς για μικρές σχετικά οριζόντιες μετακινήσεις. Στις δοκιμές μας, καθορίστηκε στα 1.5 m. Τιμή που ικανοποιεί λειτουργικούς και αρχιτεκτονικούς λόγους, αλλά κύρια προσδίδει μεγάλη δυσκαμψία στην σύνθετη κατακόρυφη δοκό, με σχετικά μικρές διατομές οριζοντίων δοκών. Μεγαλύτερες αποστάσεις καθιστούν το σύστημα πιο εύκαμπτο, και απαιτούνται μεγάλες διατομές δοκών για να εξασφαλίσουν την παραλαβή ικανού τμήματος της συνολικής οριζόντιας δύναμης.

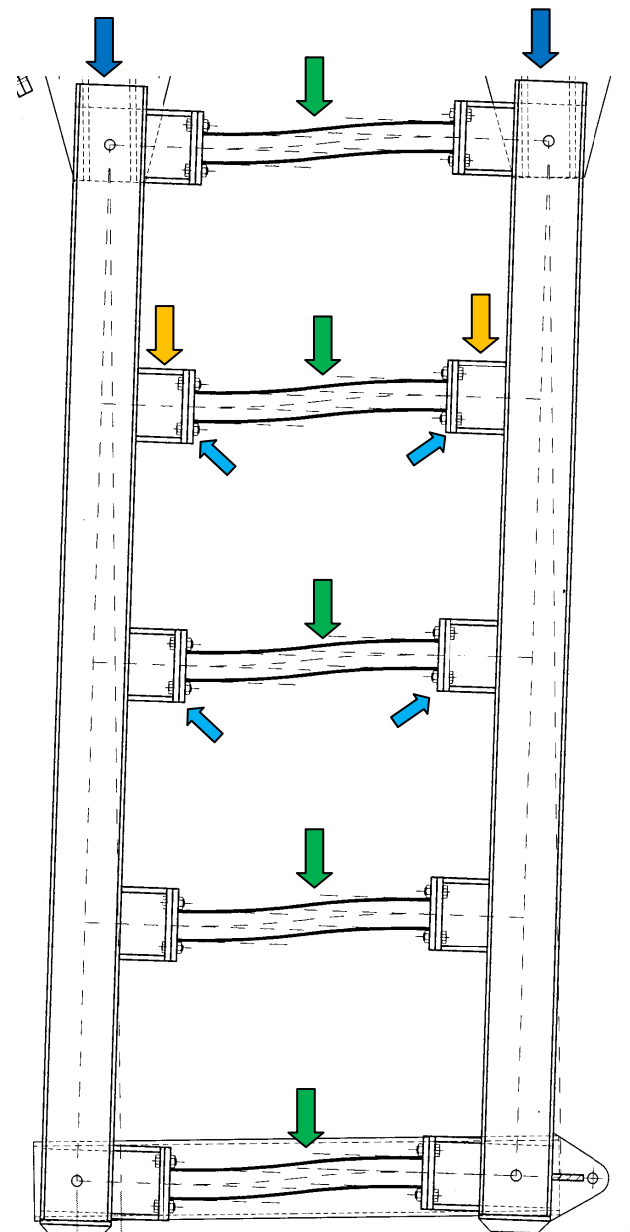
Για τον αριθμό των δοκών, όσο μεγαλύτερος τόσο καλύτερα. Γιατί μειώνει τις καταπονήσεις (ροπές) στους στύλους, αυξάνοντας αντίστοιχα την αντοχή και δυσκαμψία του συστήματος. Ο αριθμός περιορίζεται από τον απαιτούμενο χώρο για επεμβάσεις επισκευής και

αντικατάστασης, αλλά και από το ύψος των δοκών. Αποστάσεις της τάξης των 85 cm, που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ήταν ιδιαίτερα άνετες και μεγαλύτερος αριθμός δοκών, σε αποστάσεις μέχρι και 50 cm είναι μάλλον επιθυμητός.

Η διάταξη των δοκών υποδοχέων, έχει σκοπό να μεταφέρει την πλαστική περιοχή μακριά από τους στύλους, και να περιορίσει την απαιτούμενη διατομή των δοκών δυσκαμψίας, λόγω μείωσης της ροπής που μεταφέρεται στο υποστύλωμα. Είναι καθαρά θέμα σχεδιασμού.

Εφ' όσον οι δοκοί σχεδιάζονται με ειδική διαμόρφωση του άκρου τους, ώστε η πλαστική ζώνη να απέχει από την σύνδεση με τις δοκούς υποδοχείς, τότε αυτές μπορεί να αποτελούν τμήμα του στύλου, ώστε και ο στύλος να ισχυροποιείται, και η απαιτούμενη διατομή της δοκού να μειώνεται, με τελικό όριο την επιμήκυνση των δοκών υποδοχέων, και την υποκατάσταση των οριζοντίων δοκών, με απλές ορθογωνικές ή κυκλικές ράβδους τύπου INERD. Αυτός ο τύπος σχεδιασμού είναι αυτός που τελικά προτείνεται (βλ. συμπεράσματα).

1. Κατακόρυφοι στύλοι.
(αμφιαρθρωτοί
η τμήμα πλαισίου)
2. Δοκοί υποδοχείς.
(ηλεκτροσυγκολλημένες
στους στύλους)
3. Οριζόντιες δοκοί
δυσκαμψίας.
4. Μετωπικές πλάκες
σύνδεσης δοκών
δυσκαμψίας και



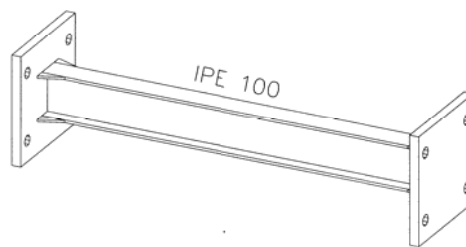
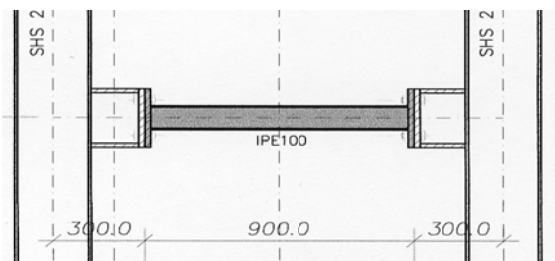
Σχ. 2.8 Η διάταξη των βασικών στοιχείων του συστήματος INSTED

Η ειδική αυτή διαμόρφωση στα άκρα των δοκών πρέπει να είναι, η ελάσματα ενίσχυσης στα άκρα της δοκού, μέχρι τις μετωπικές πλάκες, η καλύτερα αποτμήσεις στις δοκούς (dogbones) στα πέλατα διατομών διπλού «Τ», η επιμήκεις οπές (slots) στα πέλατα κοιλοδοκών.

Για την περίπτωση της χρήση κεντρικών ράβδων, η χρήση κυκλικών δακτυλιοειδών απομειώσεων της διατομής σε κυκλικές ράβδους, η αντίστοιχα κατακορύφων dogbones, σε ορθογωνικές ράβδους, που αντίστοιχα απομακρύνουν την θέση της πλαστικής ζώνης από την περιοχή της στήριξης, που αποτελεί και θέση τραυματισμού της διατομής, είναι επιθυμητή και οδηγεί σε καλύτερη πλαστική συμπεριφορά του συστήματος.

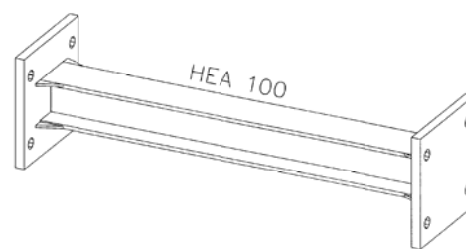
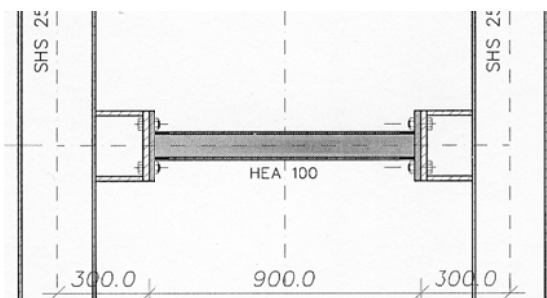
Για τις μορφές των δοκών υπάρχουν οι ακόλουθες δυνατότητες, που αποτέλεσαν και τις μορφές των δοκιμών στα πλαίσια της πειραματικής διερεύνησης.

Για την περίπτωση των ολόσωμων δοκών, αυτές μπορεί να είναι: δοκοί μέσου πλάτους, πλατύπελμες η κοιλοδοκοί, με ενισχύσεις στα άκρα.



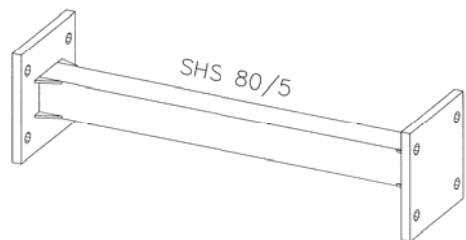
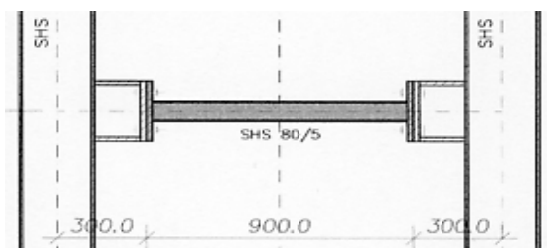
Σχ. 3 Δοκός μέσου πλάτους με ενισχύσεις

Σχ. 4 Δοκός μέσου πλάτους με ενισχύσεις



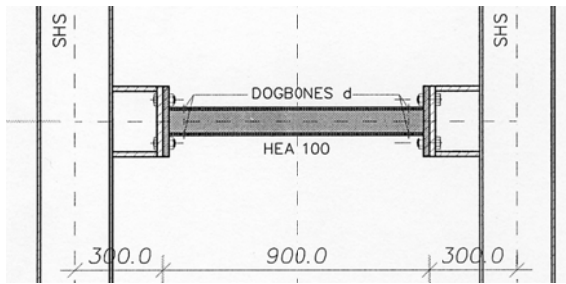
Σχ. 5 Πλατύπελμη δοκός με ενισχύσεις

Σχ. 6 Πλατύπελμη δοκός με ενισχύσεις

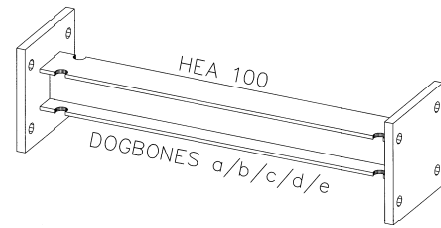


Σχ. 2.13 Κοιλοδοκός με ενισχύσεις

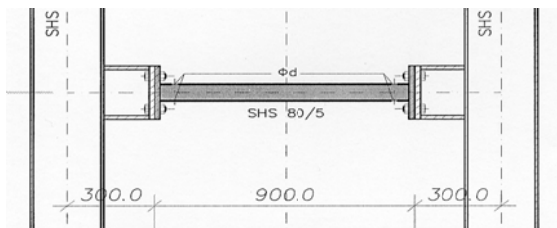
Σχ. 7 Κοιλοδοκός με ενισχύσεις



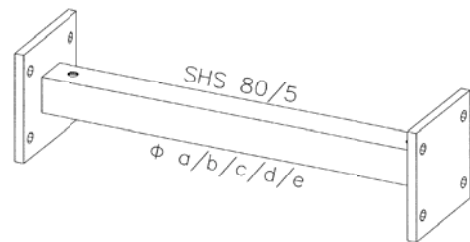
Σχ. 8 Πλατύπελη δοκός με σχισμές



Σχ. 2.16 Πλατύπελη δοκός με σχισμές

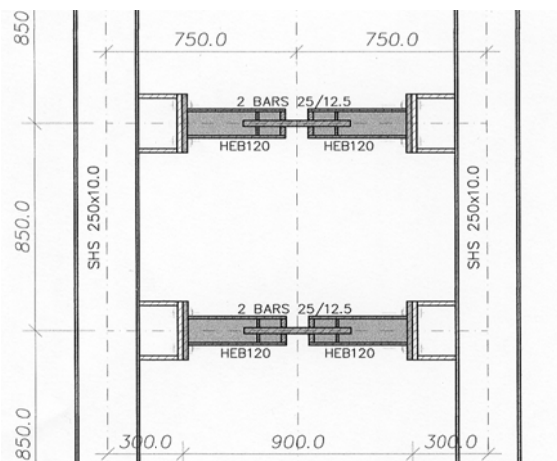


Σχ. 9 Κοιλοδοκός με επιμήκεις σχισμές

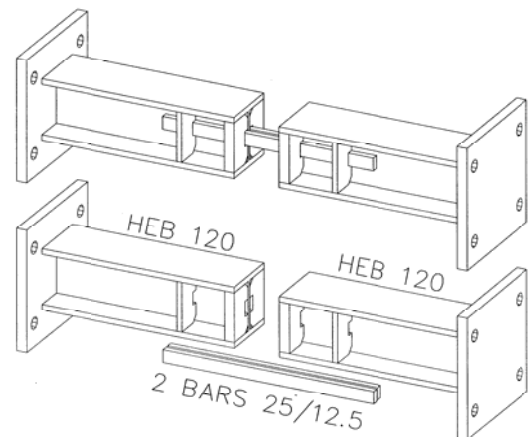


Σχ. 2.10 Κοιλοδοκός με επιμήκεις σχισμές

Προχωρώντας περισσότερο, και διατάσσοντας στο μέσον της δοκού αναλώσιμα στοιχεία, απαιτείται η επιμήκυνση των δοκών υποδοχέων. Η επιμήκυνση αυτή μπορεί να γίνει είτε με προσθήκη συμπληρωματικού τμήματος, ώστε να είναι δυνατή η χρήση του ίδιου συστήματος στύλων-δοκών υποδοχέων, όπως εφαρμόστηκε στα πειράματα, είτε με επιμήκυνση της δοκού υποδοχέα, η οποία μπορεί να αποτελεί και τμήμα του στύλου, που είναι και ο τελικά προτεινόμενος σχεδιασμός.

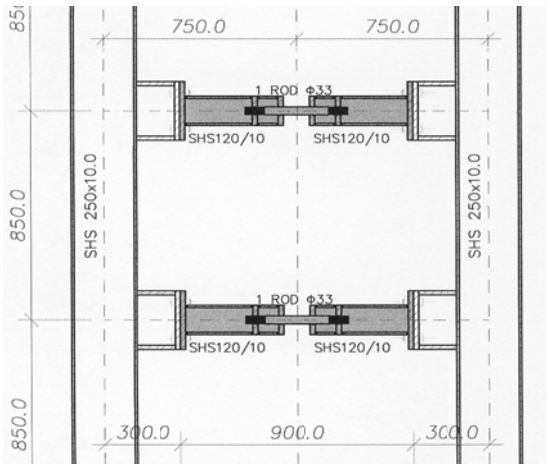


Σχ. 2.19 Ορθογωνικές ράβδοι τύπου INERD, με συμπληρωματικές δοκούς υποδοχείς

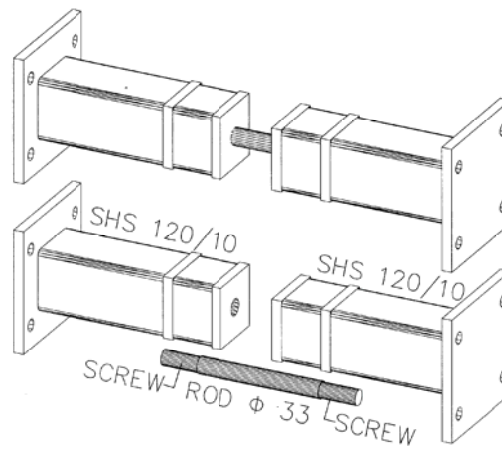


Σχ. 2.11 Ορθογωνικές ράβδοι τύπου INERD με συμπληρωματικές δοκούς υποδοχείς

Μεταξύ των δοκών υποδοχέων υπάρχει το σύστημα των καμπτόμενων ράβδων που μπορεί να είναι κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής.



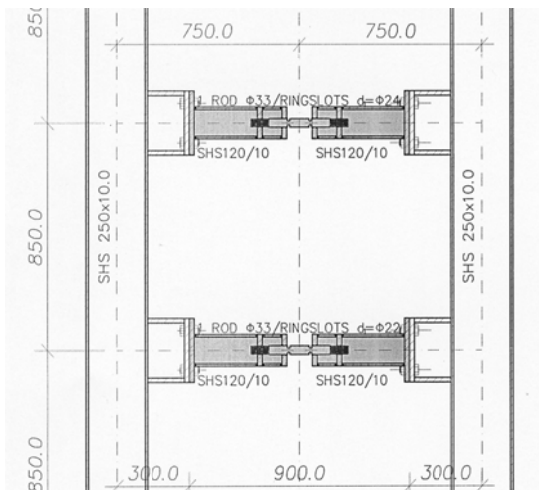
Σχ. 2.12 Κυκλικές ράβδοι τύπου INERD



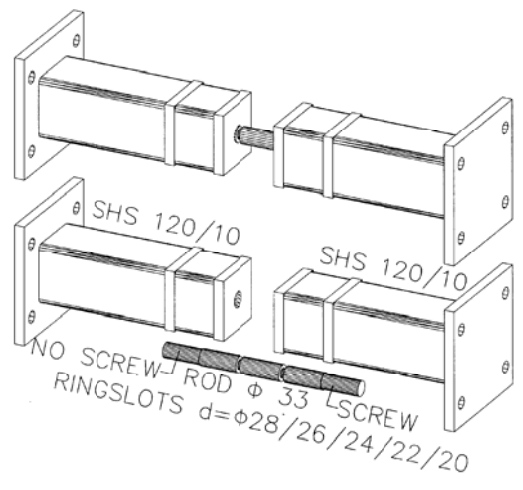
Σχ. 2.13 Κυκλικές ράβδοι τύπου INERD

Είναι απαραίτητο οι αναλώσιμες ράβδοι να έχουν τις απαιτούμενες διαστάσεις, ώστε να μπορούν να αναπτύξουν πλαστικές ζώνες στο μήκος που απαιτείται, ώστε το σύστημα να φτάσει σε ικανή μετακίνηση χωρίς ψαθυρές αστοχίες, η εκτεταμένες ρηγματώσεις.

Μόνο πρόβλημα είναι η καταπόνηση στην περιοχή επαφής, σημείο της μέγιστης ροπής στις ράβδους, που δημιουργεί τοπικούς τραυματισμούς και επιταχύνει την αστοχία. Το πρόβλημα αυτό μπορεί εύκολα να ξεπεραστεί με την δημιουργία απομειωμένων διατομών σε απόσταση από τις στηρίξεις, όπως ήδη εφαρμόστηκε, με δημιουργία δακτυλίων (ring slots) στις κυκλικές ράβδους σε απόσταση από τις στηρίξεις. Αντίστοιχες απομειώσεις με την μορφή κατακορύφων αποτμήσεων, dog bones, μπορούν να γίνουν στις ορθογωνικές ράβδους.



Σχ. 2.14 Κυκλικές ράβδοι με απομείωση διατομής (ringslots)



Σχ. 2.15 Κυκλικές ράβδοι με απομείωση διατομής (ringslots)

Η εφαρμογή των καμπτόμενων ράβδων τύπου INERD στο κέντρο των συνδετηρίων δοκών, έχει πολλά πλεονεκτήματα. Κατ αρχήν η ορθογωνική και ακόμη περισσότερο η κυκλική διατομή ράβδος, παρουσιάζει μία προοδευτική πλαστικοποίηση, σε σχέση με την διγραμμική πλαστική συμπεριφορά των δοκών, κύρια τύπου διπλού «T».

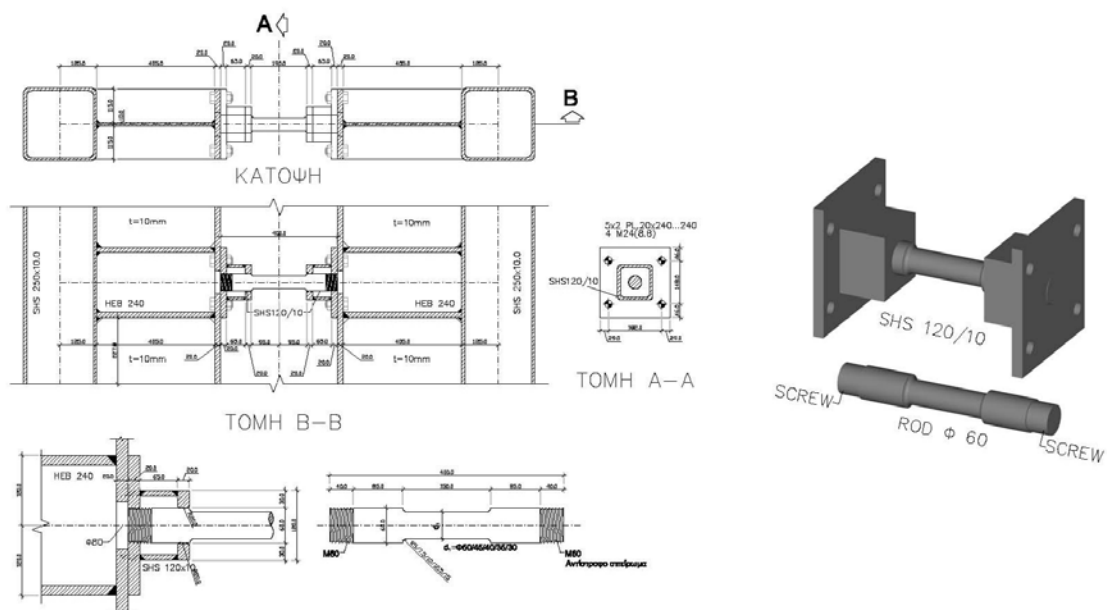
Ακόμη, έχει το μεγάλο πλεονέκτημα της αυτοπροσαρμογής στο μήκος, που καθιστά ιδιαίτερη απλή και ακριβή την τοποθέτησή τους και ακόμη περισσότερο την αντικατάστασή τους, ακόμη και σε περίπτωση έντονης πλαστικοποίησης. Το αναλώσιμο τμήμα, είναι ιδιαίτερα

απλό και με ελάχιστο κόστος, εφ' όσον οι δοκοί υποδοχείς και οι επεκτάσεις τους παραμένουν απαραμόρφωτοι.

Είναι απαραίτητο οι αναλώσιμες ράβδοι να έχουν τις απαιτούμενες διαστάσεις, ώστε να μπορούν να αναπτύξουν πλαστικές ζώνες στο μήκος που απαιτείται, ώστε το σύστημα να φτάσει σε ικανή μετακίνηση χωρίς ψαθυρές αστοχίες, η εκτεταμένες ρηγματώσεις.

Μόνο πρόβλημα είναι η καταπόνηση στην περιοχή επαφής, σημείο της μέγιστης ροπής στις ράβδους, που δημιουργεί τοπικούς τραυματισμούς και επιταχύνει την αστοχία. Το πρόβλημα αυτό μπορεί εύκολα να ξεπεραστεί με την δημιουργία απομειωμένων διατομών σε απόσταση από τις στηρίξεις, όπως ήδη εφαρμόστηκε, με δημιουργία δακτυλίων (ring slots) στις κυκλικές ράβδους σε απόσταση από τις στηρίξεις. Αντίστοιχες απομειώσεις με την μορφή κατακορύφων αποτμήσεων, dog bones, μπορούν να γίνουν στις ορθογωνικές ράβδους.

Ο τελικά ιδανικός σχεδιασμός είναι η απομείωση να εκτείνεται σε όλο το μεσαίο τμήμα της ορθογωνικής ή κυκλικής ράβδου, ώστε να μην υπάρχει περιορισμός στο μήκος ανάπτυξης της πλαστικής ζώνης, η οποία να μπορεί να καταλάβει το σύνολο της ράβδου, εκτός όμως των περιοχών στήριξης.

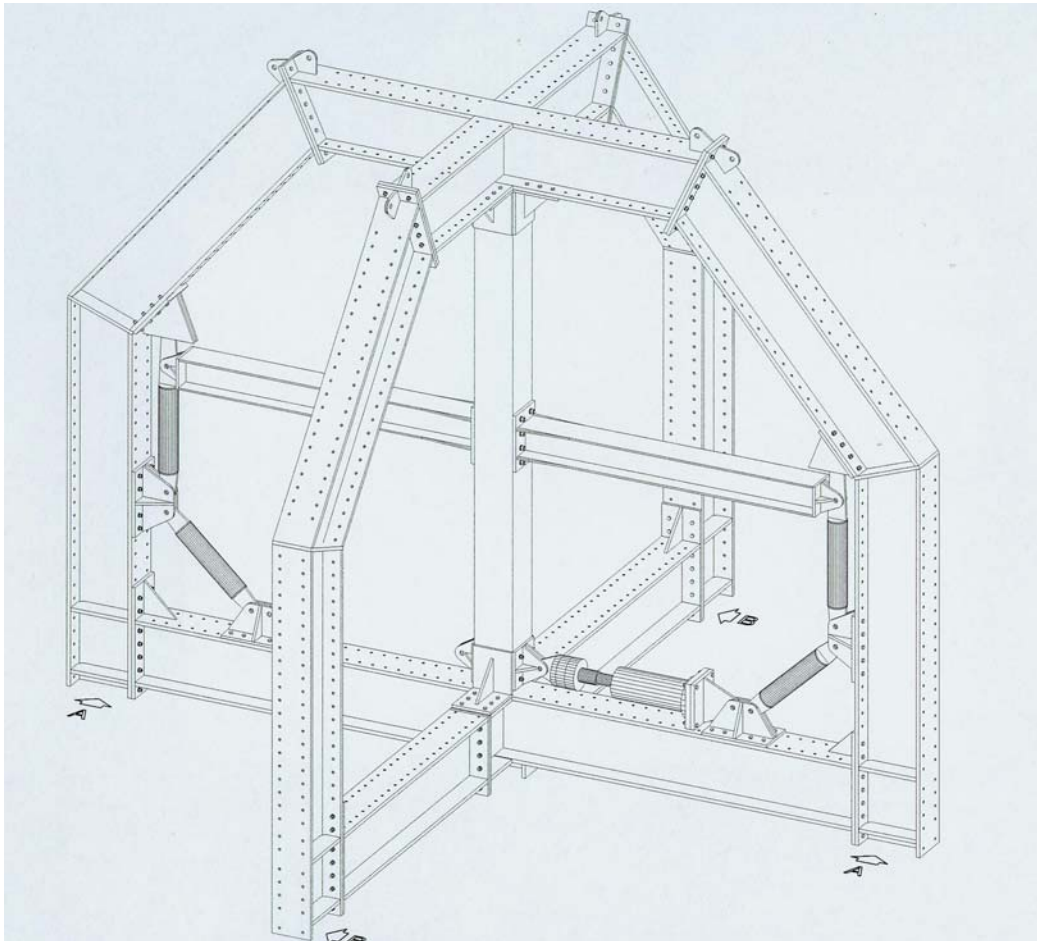


Σχ. 2.16 Ο ιδεατός σχεδιασμός με κυκλικές ράβδους με απομείωση διατομής σε όλο το μήκος της ράβδου

3. Πειραματική διερεύνηση.

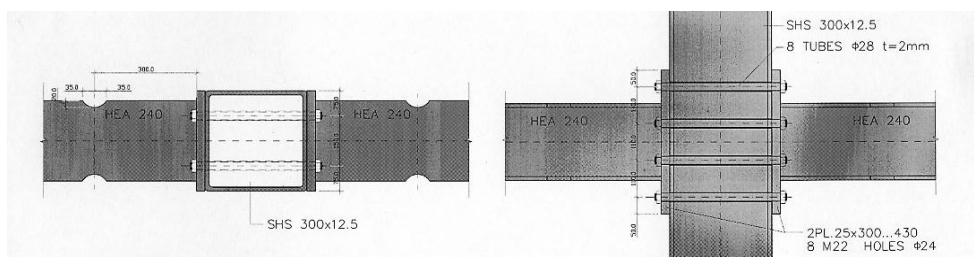
3.1 Σχεδιασμός πειραματικής διάταξης.

Στο εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών του ΕΜΠ, υπήρχε ένα πλαίσιο δοκιμών, το οποίο είχα σχεδιάσει και κατασκευάσει, για ένα προηγούμενο ερευνητικό πρόγραμμα, που αφορούσε σε δοκιμές σε κόμβους πλαισίων και που στην πορεία σταμάτησε.



Σχ.3.1 Αξονομετρικό σχέδιο της αρχικής διάταξης του πλαισίου δοκιμών.

Στα πλαίσια αυτής της έρευνας, θα δοκιμαζόταν ένα νέο σύστημα κόμβου με σύνδεση ροπής, μεταξύ υποστυλωμάτων και δοκών που είχαμε σχεδιάσει.

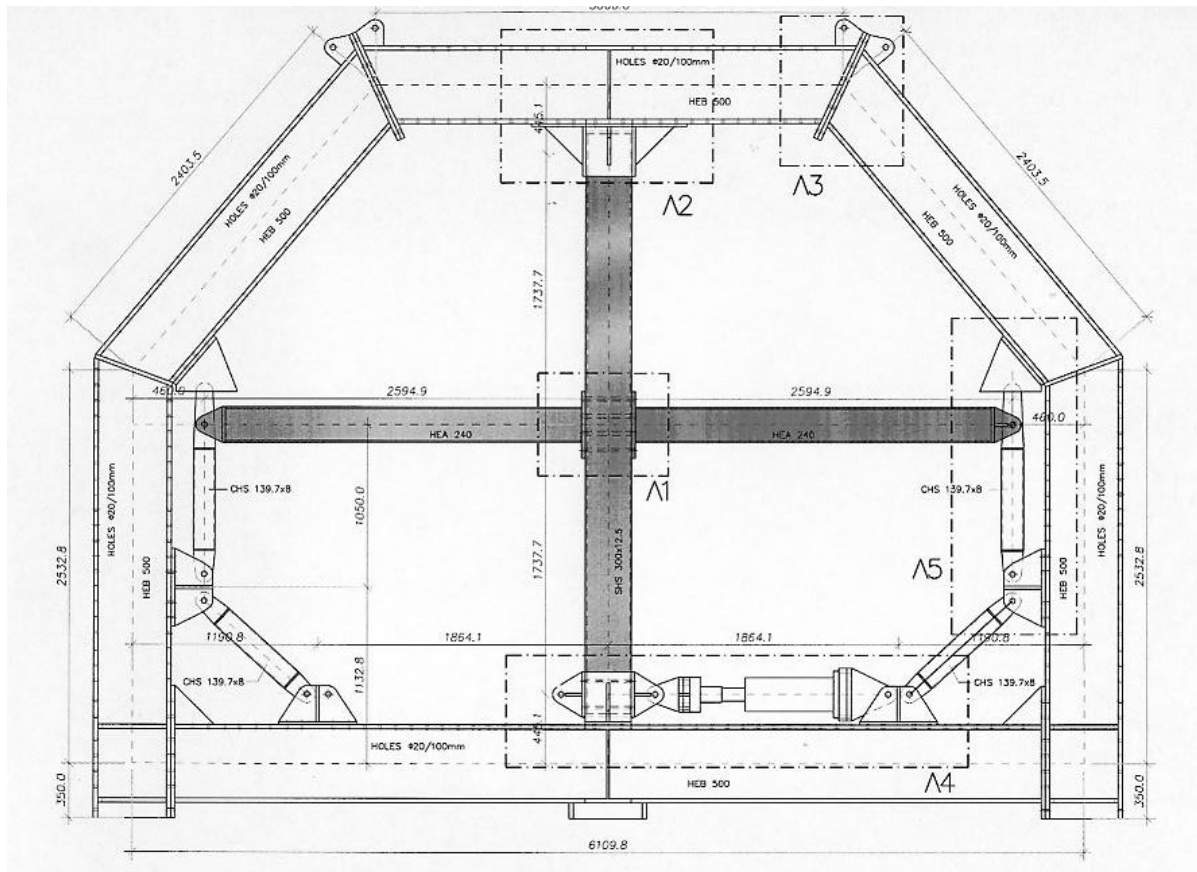


Σχ.3.2. Η διάταξη του προς δοκιμή κόμβου.

Τα υποστυλώματα στο σύστημα που είχαμε σχεδιάσει, μορφώνονται από κοιλοδοκούς, που συνδέονται με τις εκατέρωθεν δοκούς μέσω μετωπικών πλακών. Η σύνδεση γίνεται με διαμεπή κοχλίωση και ενίσχυση των κοιλοδοκών στις θέσεις των οπών με σωληνίσκους που διασχίζουν την κοιλοδοκό και ηλεκτροσυγκολλώνται στα τοιχώματα της.

Με αυτό τον σχεδιασμό δημιουργείται μία σύνδεση μεταξύ των τοιχωμάτων του στύλου, που βοηθάει τον τοπικό λυγισμό, ενισχύει την ακαμψία του κόμβου, επιτρέπει την αντικατάσταση των κοχλιών και σφραγίζει το εσωτερικό του υποστυλώματος από το περιβάλλον, προστατεύοντας το από διάβρωση.

Στο πλαίσιο, αρχικά σε ένα επίπεδο και στην συνέχεια στον χώρο, θα επιβαλλόταν μέσω υδραυλικού κυλίνδρου, μετακίνηση στον πόδα του στύλου, που αντιστοιχούσε στο μέσον του ύψους του ορόφου στο σημείο μηδενισμού ροπών.



Σχ.3.3. Η αρχική πειραματική διάταξη για την μελέτη αντοχής κόμβου.

Η μετακίνηση αυτή αντιστοιχεί στην μετακίνηση του εδάφους σε σεισμική φόρτιση, και ο φορέας ανθίσταται με την καμπτική καταπόνηση του κόμβου και της σύνδεσης ροπής.

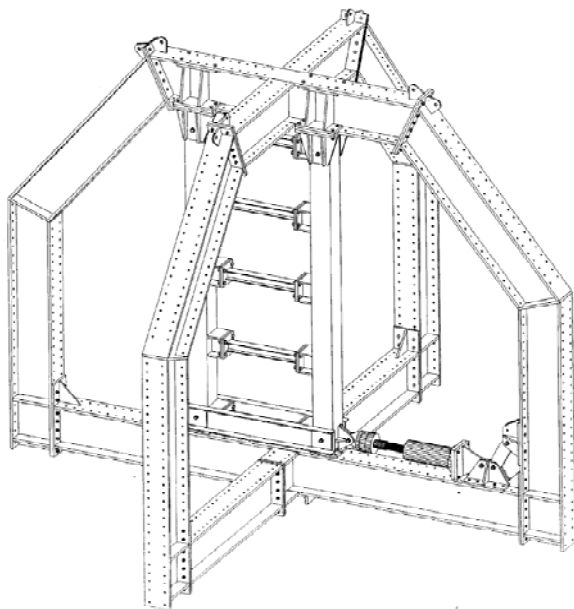
Το σύστημα προέβλεπε οριζόντιες κυλίσεις στα άκρα των δοκών του δοκιμίου, που αντιστοιχούν στα μέσα των ζυγμάτων του αντίστοιχου πλαισιακού φαντώματος και στον πόδα του στύλου και άρθρωση στην κεφαλή του στύλου.

Η μετακίνηση στον πόδα, επιβαλλόταν με έναν υδραυλικό κύλινδρο με δυνατότητα επιβολής φορτίου ± 150 kN και διαδρομή εμβόλου ± 150 mm.

Στα πλαίσια του προγράμματος INSTED, για τις πειραματικές διερευνήσεις θέλαμε, να έχουμε ύψος ενός ορόφου και σαν ύψος ορόφου θεωρείται το μικτό ύψος, από διάφραγμα σε διάφραγμα.

Το πλαίσιο που είχε αρχικά σχεδιαστεί για τις δοκιμές κόμβων μεταξύ υποστυλωμάτων και δοκών ήταν σε ύψος ενός ορόφου, σε κλίμακα 1:1 και μπορούσε να δεχτεί μια κατακόρυφη Vierendeel, ύψους ανάμεσα στην στήριξη και τον άξονα επιβολής φορτίου, 3.40 m, που ήταν ικανοποιητικό.

Ο επιθυμητός στόχος σχετικής μετακίνησης των διαφραγμάτων του ορόφου, inter-storey drift, θα θέλαμε να είναι το 5%, δηλαδή $3400 \cdot 5\% = 170$ mm, με διαθέσιμη όμως μετακίνηση εμβόλου ± 150 kN, έπρεπε να συμβιβαστούμε με σχετική μετακίνηση στο 4%, στα ± 135 mm, που είναι ικανοποιητικό.



Σχ.3.4. Αξονομετρικό σχέδιο της τελικής διάταξης του πλαισίου δοκιμών

Εκτός όμως από τις διαστάσεις του εμβόλου, υπήρχε περιορισμός και στις διαστάσεις του πλαισίου δοκιμών στο πάνω ζύγωμα, λόγω των κεκλιμένων υποστυλωμάτων, σε σχέση με την τοποθέτηση της κατακόρυφης Vierendeel, επομένως ± 150 mm, ήταν τελικά η συνολικά διαθέσιμη μετακίνηση.

Η μέγιστη δύναμη του εμβόλου ήταν 150 kN, σχετικά μικρή για πείραμα σε πραγματική κλίμακα. Θεωρώντας έναν ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας και με δεδομένη την αναμενόμενη υπεραντοχή και κράτυνση του χάλυβα θα έπρεπε να κινηθούμε σε δυνάμεις σχεδιασμού για τέμνουσα ορόφου της τάξης των 50 kN.

Για την γεωμετρία του συστήματος, θεωρητικό ύψος 3.40 μ, άνοιγμα δοκών 1.50 m, από τον πίνακα #1 προκύπτει ότι αυτή η δύναμη (50 kN) αντιστοιχεί σε πέντε δοκούς IPE100, η SHS80/5, για χάλυβα ποιότητας S235, και αντίστοιχα σε δύο επί πέντε ράβδους 30/12 mm, η σε πέντε κυκλικές ράβδους $\Phi 33$ mm.

Ένα τριώροφο κτίριο διαστάσεων 30*30 m, έχει ένα συνολικό κατακόρυφο φορτίο, για τον σεισμικό συνδυασμό δράσεων, της τάξης του $\Sigma P_v = 30 \cdot 30 \cdot 3 \cdot 10 = 2700$ kN, που αντιστοιχεί σε οριζόντια σεισμική τέμνουσα βάσης $\Sigma P_h = 2700 \cdot 0,16 = 432$ kN.

Με αντοχή σχεδιασμού κάθε κατακόρυφης σύνθετης δοκού, 50 kN, θα απαιτούντο τουλάχιστον 8 αντίστοιχες κατακόρυφες σύνθετες δοκοί ανά διεύθυνση (για ένα τριώροφο κτίριο 30*30 m). Για να φτάσει κανείς σε μικρότερα νούμερα, θα έπρεπε η να αυξήσει τον αριθμό των δοκών, η την ακαμψία τους η και τα δύο.

Τελικά κάθε κατακόρυφη vierendeel σαν αυτή που δοκιμάζαμε αντιστοιχεί για τριώροφο κτίριο σε μία επιφάνεια 112.5 m².

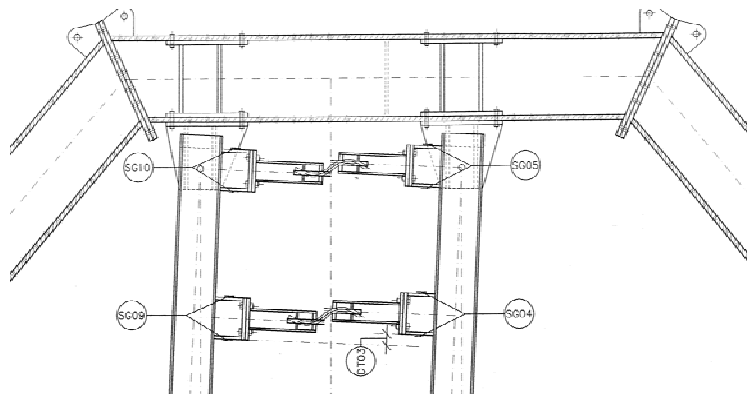
3.2 Γεωμετρία πειραματικής διάταξης – κόμβοι.

Με δεδομένη την γεωμετρία του δοκιμαστικού πλαισίου INSTED, διαμορφώθηκαν οι κόμβοι σύνδεσης στην κεφαλή και τον πόδα.

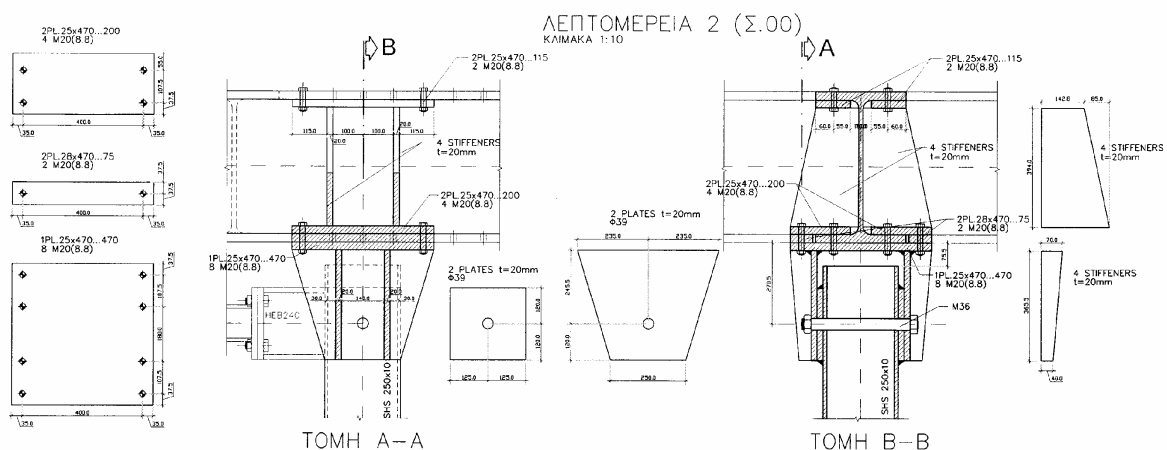
Στην κεφαλή διαμορφώθηκαν δύο κόμβοι, με κεντρικό πείρο - άρθρωση και πλάκες σύνδεσης με το κάτω πέλμα του ζυγώματος του πλαισίου.

Οι συνδέσεις σχεδιάστηκαν με ενισχύσεις από μετωπικές πλάκες και εγκάρσιες νευρώσεις, ανάμεσα στα πέλματα, ώστε τα φορτία και οι αντίστοιχες ροπές που δημιουργούν να κατανέμονται και στα δύο πέλματα για αποφυγή τοπικών αστοχιών.

Ο πείρος σύνδεσης των κεφαλών των στύλων στις υποδοχές του πλαισίου, ήταν εφαρμοστός, με διαφορά διαμέτρου πείρου οπής 1 mm, για να περιοριστούν κατά το δυνατό, οι παρασιτικές διαφορικές μετακινήσεις, μεταξύ του πλαισίου και του δοκιμίου.



Σχ.3.5. Η σύνδεση του πλαισίου δοκιμών με την κατακόρυφη Vierendeel του συστήματος INSTED

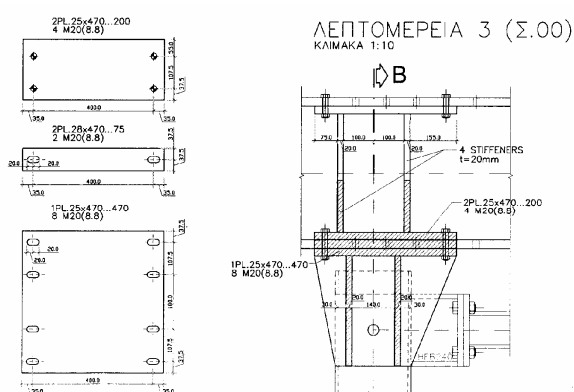


Σχ.3.6 Κατασκευαστικές διατάξεις του κεντρικού κόμβου κεφαλής.

Ο πείρος είχε κωνική κεφαλή στην μία πλευρά, για την εφαρμοστή τοποθέτηση του στην οπή και ασφάλειες στα άκρα του, για την εξασφάλιση της σταθερότητας του έναντι τυχόν ολισθήσεων στην διάρκεια των δοκιμών.

Η τοποθέτηση του πείρου έγινε με κρούση, ενώ σημαντική ποσότητα γράσου ελαχιστοποιούσε την ανάπτυξη τριβών.

Η σύνδεση κεφαλής αντιστοιχεί στην σύνδεση με το διάφραγμα της πάνω πλάκας, και εξασφαλίζει το οριζόντιο σχετικό αμετάθετο, μεταξύ των δύο στύλων του συστήματος INSTED αλλά και όλων των στύλων του ορόφου, που εδώ υλοποιείται με τη σύνδεση στο ζύγωμα του πλαισίου.



Σχ.3.7 Κατασκευαστικές διατάξεις του ακραίου κόμβου κεφαλής.

Φωτ.3.1 Ο ακραίος κόμβος κεφαλής.

Στην θέση ακριβώς των πείρων, διατάσσεται και ο υποδοχέας για την πρώτη οριζόντια δοκό ακαμψίας, ώστε να μην λειτουργεί τμήμα του στύλου σαν πρόβολος.

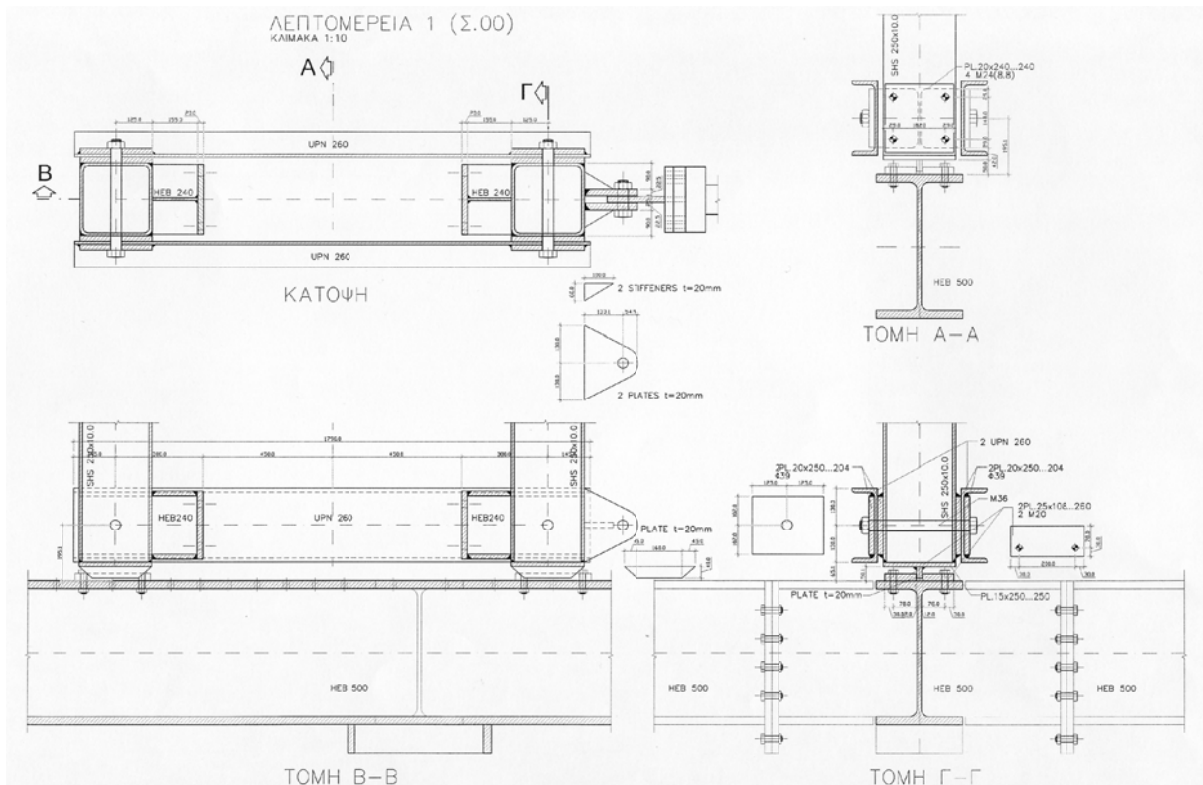
Με την στήριξη αυτή, οι δύο στύλοι μπορούν να αιωρούνται ελεύθερα, με μόνη αρχική αντίσταση την τριβή και την αντίστοιχη ροπή που αναπτύσσεται περί τους δύο πείρους, που είναι αμελητέα.

Επομένως η αντίσταση του συστήματος από την ελεύθερη αιώρηση περιορίζεται ουσιαστικά από την ακαμψία των δοκών και την λειτουργία της κατακόρυφης Vierendeel.

Στο κάτω άκρο των στύλων, στην θέση της τελευταίας δοκού δυσκαμψίας, τοποθετούνται με αντίστοιχες αρθρώσεις και πείρους, δύο συνδετικές δοκοί, UPN240, που εξασφαλίζουν το σχετικό αμετακίνητο, μεταξύ των κάτω άκρων των δύο στύλων, αντίστοιχα με το κάτω διάφραγμα η την σύνδεση με την θεμελίωση.

Η σύνδεση αυτή γίνεται με μη εφαρμοστούς πείρους ($\Delta d=3\text{mm}$), και στο ενδιάμεσο κενό τοποθετείται manson από ορείχαλκο για περιορισμό των τριβών, και ευκολότερη

αφαίρεση και επανατοποθέτηση του πείρου, στην διαδικασία αντικατάστασης των δοκιμίων.

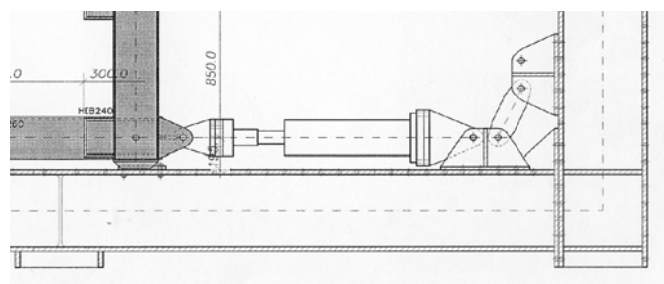


Σχ.3.8 Κατασκευαστικές διατάξεις του πόδα της κατακόρυφης Vierendeel του συστήματος INSTED

Στην άκρη του ενός στύλου υπάρχει δίδυμο κομβοέλασμα σύνδεσης με την κεφαλή του υδραυλικού κυλίνδρου. Και στην σύνδεση αυτή, με μη εφαρμοστό πείρο, τοποθετήθηκε τριβέας από ορείχαλκο.

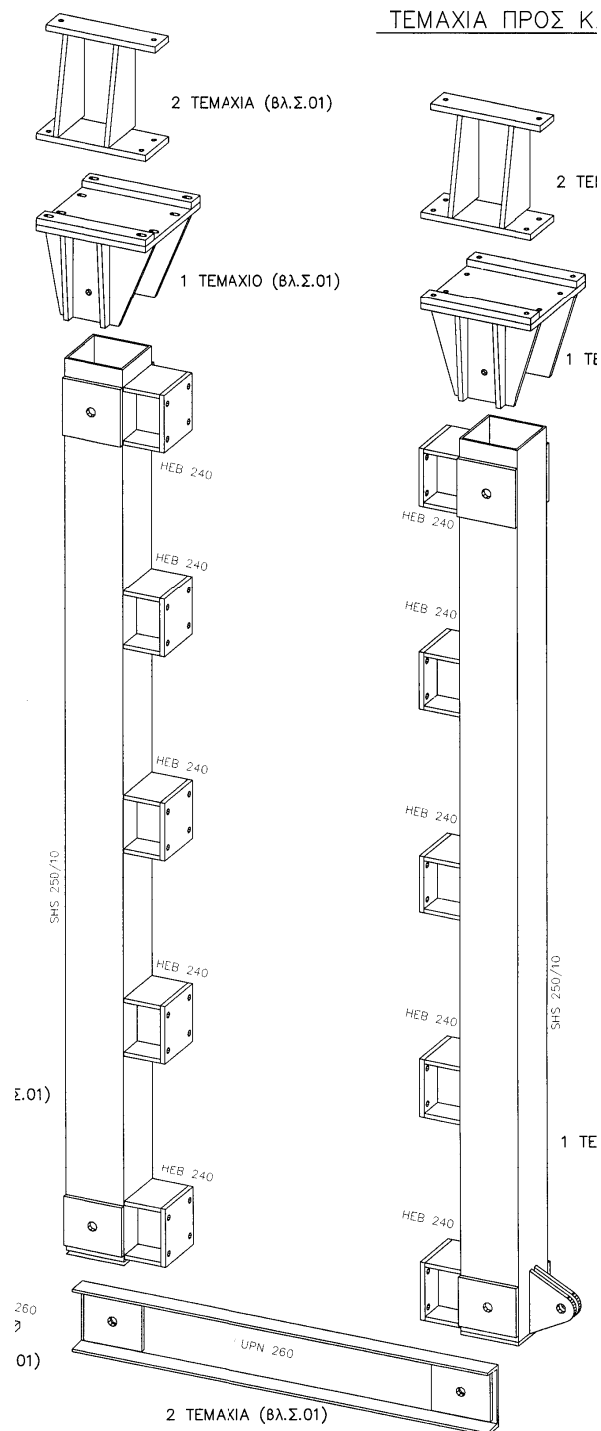
Στο κάτω μέρος του κάθε στύλου, υπάρχει ηλεκτροσυγκολλημένη μετωπική πλάκα με ένα κατακόρυφο κομβοέλασμα σε κάθε στύλο, που εφαρμόζουν ανάμεσα σε διαμήκεις οδηγούς, τοποθετημένους στο πάνω πέλμα του κάτω ζυγώματος του πλαισίου δοκιμών, για να εξασφαλίζεται η διάταξη έναντι οριζόντιας εκτροπής του πόδα των στύλων. Λόγω της επιμήκους μορφής των κομβοελασμάτων, υπάρχει μία πρόσθετη σχετική εξασφάλιση και έναντι στροφής των στύλων.

Το έμβολο τοποθετείται οριζόντια, και στηρίζεται στην κεφαλή του, στην υποδοχή στον πόδα του στύλου, και στην βάση του σε κατάλληλα διαμορφωμένη σύνδεση, που εδράζεται στο κάτω ζύγωμα του πλαισίου και υποστηρίζεται με συνδετικό κομβοέλασμα, στο στύλο του πλαισίου.



Σχ.3.9 Η σύνδεση πλαισίου-INSTED-εμβόλου

Η όλη γεωμετρία στην τοποθέτηση του εμβόλου, ήταν συμμετρική ως προς την διαδρομή του, ώστε για κατακόρυφη θέση των στύλων, άρα μηδενική ένταση του συστήματος, το έμβολο να βρίσκεται στο κέντρο της διαδρομής του, δίνοντας την δυνατότητα για συμμετρική επιβαλλόμενη μετακίνηση ± 150 mm.



Σχ.3.10 Η διάταξη των κατακόρυφων στύλων της Vierendeel, με τις δοκούς υποδοχείς και τις συνδέσεις κεφαλής και ποδός.

3.3 Επιβαλλόμενα μεγέθη, μέθοδος επιβολής, πρωτόκολλα φόρτισης.

Το επιβαλλόμενο μέγεθος είναι η οριζόντια διαμήκης μετακίνηση στον πόδα του πλαισίου. Με τη μετακίνηση αυτή, προσομοιώνεται η σεισμική κίνηση του εδάφους και με την αντίσταση στην κεφαλή, από το σχετικό αμετακίνητο του ζυγώματος του πλαισίου δοκιμών, η αδρανειακή αντίσταση της μάζας της ανωδομής, στη σχετική μετακίνηση του εδάφους.

Η αντίσταση του φορέα, μέσω του συστήματος insted στη σχετική μετακίνηση, αποτελεί το σύστημα παραλαβής των σεισμικών φορτίων που αναπτύσσονται ανάμεσα στην ανωδομή και την έδραση του δομήματος (θεμελίωση).

Η μετακίνηση στον πόδα του πλαισίου, επιβάλλεται μέσω του εμβόλου του υδραυλικού κυλίνδρου και το μέγεθος και η ταχύτητα επιβολής, ελέγχεται ηλεκτρονικά μέσω υπολογιστή.

Προσδιορίζοντας ένα πρωτόκολλο φόρτισης, με διαδοχικά ζεύγη τιμών, χρόνου - μετακίνησης, καθορίζεται η ταχύτητα και η ιστορία της φόρτισης, φροντίζοντας πάντοτε η ταχύτητα μετακίνησης να είναι μέσα στις δυνατότητες της αντλίας λαδιού που τροφοδοτεί το έμβολο.

Αρχικά μετρήθηκε η ταχύτητα του εμβόλου χωρίς φορτίο, και ήταν:

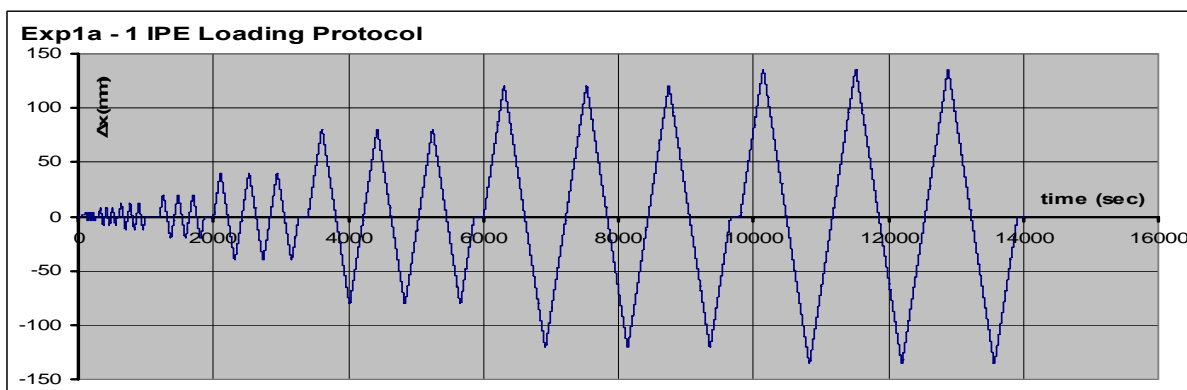
$$V_{\max}^+ = 300 \text{ mm} / 197'' = 1.50 \text{ mm/sec} \quad \text{στην εκτόνωση του εμβόλου.}$$

$$V_{\max}^- = 300 \text{ mm} / 161'' = 1.86 \text{ mm/sec} \quad \text{στην επαναφορά του εμβόλου.}$$

Στο πρώτα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ταχύτητα 0.4 mm/sec, περίπου το 1/4 της ταχύτητας του εμβόλου χωρίς φορτίο και αργότερα αυξήθηκε στα 0.8 mm/sec.

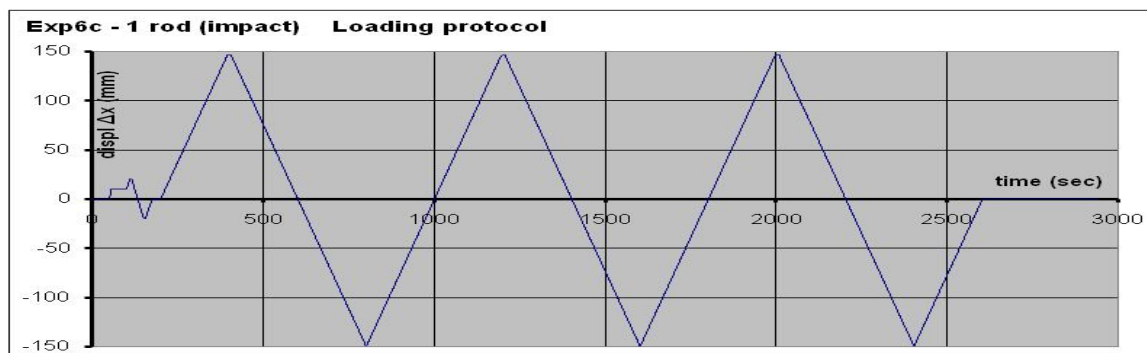
Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύπου πρωτόκολλα φόρτισης:

- Το πρωτόκολλο ECCS (Σχ. 3.11) , με αυξανόμενου εύρους, ανακυκλιζόμενη φόρτιση, σε ομάδες των τριών ίσων κύκλων, με τη μετακίνηση να αυξάνεται σταδιακά, μέχρι τη μέγιστη προβλεπόμενη μετακίνηση (135 mm) η την αστοχία και



Σχ.3.11 Το αρχικό τυπικό πρωτόκολλο φόρτισης κατά ECCS

- το πρωτόκολλο IMPACT (Σχ. 3.12), με μονότονα αυξανόμενη φόρτιση μέχρι τη μέγιστη μετακίνηση (135 mm) και στη συνέχεια επαναλαμβανόμενες κυκλικές φορτίσεις στη μέγιστη τιμή μετακίνησης, μέχρι τη θραύση των δοκιμίων.



Σχ. 3.12 Το πρωτόκολλο φόρτισης IMPACT

Για την ελεγχόμενη επιβολή των μετακινήσεων και τις καταγραφές των μετρήσεων που αναφέρονται στη συνέχεια, κατασκευάστηκε ειδικό λογισμικό και δοκιμάστηκαν διάφοροι αλγόριθμοι ελέγχου ταχύτητας-μετατοπίσεων ώστε να προσεγγιστεί καλύτερα το επιθυμητό διάγραμμα.

Η μικρή παλινδρόμηση που φαίνεται στην αρχή του διαγράμματος, είναι η διαδικασία αυτοελέγχου του αλγόριθμου που καθορίζει την ελεγχόμενη επιβολή της μετακίνησης.

Στα πειράματα που έγιναν με πρωτόκολλα επιβολής μετακινήσεων, σύμφωνα κατά ECCS, επιβάλλονται τριάδες κυκλικής φόρτισης, σε κύκλους όμοιων μετακινήσεων, με ίσες θετικές και αρνητικές τιμές, που προοδευτικά αυξάνονται. Στόχος είναι η σχετική μετακίνηση των διαφραγμάτων οροφής και πόδα, inter-storey drift, να φτάσει στο 4%, στα 135 mm.

Η τιμή αυτή ξεκινάει με μετακινήσεις μέσα στην ελαστική περιοχή, ± 4 mm και αυξάνεται σταδιακά, μέχρι τα 135 mm, 4% του inter storey drift και τελικά εφ' όσον δεν υπάρξει αστοχία, μέχρι τη δυνατότητα της πειραματικής διάταξης, που είναι 150 mm, 4.41%.

Στα πρώτα δοκίμια οι τιμές των επιβαλλόμενων μετακινήσεων ήταν:

Ομάδα κύκλων	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Δx (mm)	4.0	8.0	12.0	20.0	40.0	80.0	120.0	135.0	150.0
Δt (sec)	10.0	20.0	30.0	50.0	100.0	200.0	300.0	357.0	375.0

Η επιβαλλόμενη μεταβολή των μετακινήσεων είναι γραμμική, με σταθερή ταχύτητα, και μικρή παραμονή 5 sec, στο μέγιστο της μετακίνησης κάθε κύκλου. Η ταχύτητα ήταν 0.4 mm/sec, περίπου 25% της δυνατότητας του εμβόλου.

Ο συνολικός χρόνος του πειράματος με το αρχικό πρωτόκολλο φόρτισης ήταν 18600 sec.

Μετά τα πρώτα πειράματα, αποφασίστηκε η αύξηση του αριθμού των κύκλων, με παρεμβολή ενδιάμεσων τιμών και η παράλληλη αύξηση της ταχύτητας στο διπλάσιο, 0.8 mm/sec, στο 50% της δυνατότητας του εμβόλου, πάλι με παραμονή 5 sec, στο μέγιστο της μετακίνησης κάθε κύκλου.

Ομάδα κύκλων	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Δx (mm)	4.0	8.0	12.0	20.0	40.0	60.0	80.0	100.0	120.0	135.0	150.0
Δt (sec)	5.0	10.0	15.0	25.0	50.0	75.0	100.0	125.0	150.0	178.5	187.5

Ο συνολικός χρόνος με αυτό το πρωτόκολλο φόρτισης ήταν 12000 sec.

Προς το τέλος της σειράς των πειραμάτων δοκιμάστηκε συμπληρωματικά ένα πρόσθετο πρωτόκολλο φόρτισης με μονότονη αύξηση της μετακίνησης μέχρι τα 150 mm, και μετά επαναλαμβανόμενοι κύκλοι, με την ίδια μέγιστη μετακίνηση (+-) μέχρι την αστοχία. Η φορτίσεις αυτές εμφανίζονται με το χαρακτηρισμό “impact loading”.

3.4 Μετρήσεις.

Στη διαδικασία του πειράματος μετρήθηκαν:

- Η δύναμη και η μετακίνηση στην κεφαλή του εμβόλου. (P1 και ΔL)
- Η διαφορική εγκάρσια μετακίνηση στα άκρα των δοκών. (DT01 – DT02 – DT03)
- Οι ροπές στα μέσα των δοκών υποδοχέων.
- Οι ροπές στα μέσα των επιμηκύνσεων των πρόσθετων δοκών υποδοχέων, για τις περιπτώσεις των κεντρικών καμπτόμενων ράβδων.

Η δύναμη και η μετακίνηση στην κεφαλή του εμβόλου. (P1 και Δx)

Βασική μέτρηση ήταν η σχέση δύναμης-μετακίνησης στην κεφαλή του εμβόλου. Με ένα ηλεκτρονικό βελόμετρο τοποθετημένο πάνω στο έμβολο, καταγράψαμε συνεχώς τη σχετική μετακίνηση της κεφαλής του εμβόλου, την εκάστοτε θέση της κεφαλής σε σχέση με την αρχική μηδενική θέση. Αντίστοιχα, με μία κυψέλη φορτίου στην κεφαλή του εμβόλου, καταγράψαμε το φορτίο που εξασκούσε το έμβολο στο σύστημα.

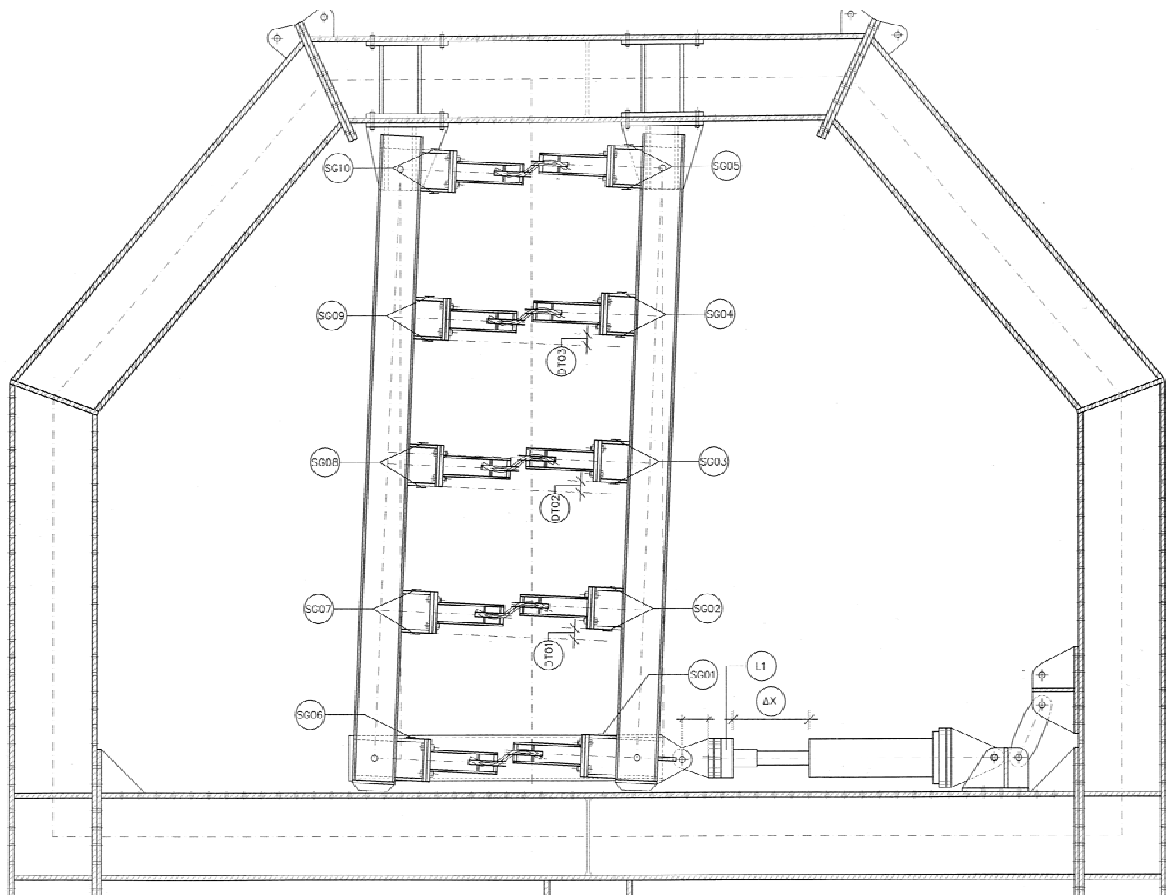
Η μέτρηση είναι ιδιαίτερα ακριβής για το φορτίο, για τη μετακίνηση όμως, παρεμβάλλονται οι παρασιτικές ελαστικές μετακινήσεις του πλαισίου και των κόμβων του και οι αθροιστικές μικρομετακινήσεις της αλληλουχίας των συνδέσεων των στύλων με το πλαίσιο, των στύλων με το έμβολο, του εμβόλου με το πλαίσιο κλπ.

Ακόμη υπάρχουν οι μικρομετακινήσεις από τις ανοχές και τις ατέλειες σύνδεσης των δοκών με τις δοκούς υποδοχείς, αλλά αυτές είναι μέσα στη λογική της τελικής κατασκευής και θα υπάρχουν και στο τελικό προϊόν. Με αυτό το σκεπτικό έγινε προσπάθεια οι συνδέσεις που αφορούσαν στο πλαίσιο και στην αλληλουχία της

φόρτισης να είναι εφαρμοστές, με ανοχές μηχανουργικού επιπέδου, ενώ οι συνδέσεις των στοιχείων του συστήματος INSTED, συνδέσεις στύλων-δοκών, με συνήθεις κατασκευαστικές ανοχές.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί το πρόβλημα από την «κατασκευαστική» ακρίβεια στις δοκούς δυσκαμψίας και τις συνδετικές τους μετωπικές πλάκες. Λόγω του σχετικά μικρού μήκους των δοκών, αποκλίσεις στην επαφή της μετωπικής πλάκας 2 mm, είναι της τάξης του 10% της μέγιστης στροφής, άρα μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στροφές στους αρχικούς κύκλους, στους οποίους η ακρίβεια είναι αρκετά περιορισμένη, λόγω των ατελειών, ευτυχώς όμως χωρίς σημασία.

Αντίθετα οι σχετικές μετακινήσεις του πλαισίου (οριζόντια μετακίνηση του ζυγώματος σε σχέση με τη δοκό βάσης), από την επιβολή του ζεύγους των οριζοντίων δυνάμεων, που ανάλογα με την δυσκαμψία των δοκών σύνδεσης, μετρήθηκε από $\pm 2,5$ έως και ± 12.5 mm, είχαν μία πρόσθετη μείωση της ακρίβειας των τελικών πειραμάτων από 2%-10%.

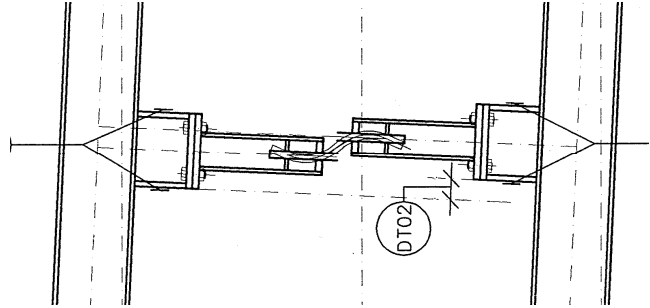


Σχ.3.13 Η πειραματική διάταξη και τα μετρούμενα μεγέθη

Η διαφορική εγκάρσια μετακίνηση στα άκρα των δοκών. (DT01 – DT02 – DT03)

Πρόσθετες μετρήσεις, με ηλεκτρονικά βελόμετρα, προσαρμοσμένα σε ειδική βάση, ήταν οι κατακόρυφες διατμητικές μετακινήσεις, μεταξύ των δοκών υποδοχέων, στα άκρα των δοκών δυσκαμψίας.

Οι μετακινήσεις αυτές είναι θεωρητικά ανάλογες με το λόγο του ανοίγματος των στύλων προς το ύψος τους ($1500 \text{ mm} / 3400 \text{ mm} = 0.4412$), εμπεριέχουν όμως αποκλίσεις που προέρχονται από την ελαστικότητα των στύλων, που λόγω της καμπύλωσης τους, δίνει διαφορετικές τιμές καθ ύψος στις σχετικές στροφές των δοκών, αλλά είναι απαλλαγμένες από τις παρασιτικές μετακινήσεις του πλαισίου και των συνδέσεων μεταξύ των εξωτερικών τμημάτων της πειραματικής συσκευής (στύλος-έμβολο-πλάισιο) συνδέοντας απόλυτα την εσωτερική ελαστική-πλαστική παραμόρφωση του συστήματος με την επιβαλλόμενη δύναμη.



Σχ.3.13 Η διαφορική εγκάρσια μετακίνηση

Οι μετρήσεις αυτές έγιναν στις τρεις μεσαίες από τις πέντε συνολικά δοκούς.

Οι ροπές στα μέσα των δοκών υποδοχέων.

Με ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα (strain gauges) τοποθετημένα σε ζεύγη στα μέσα του άνω και κάτω πέλματος των δοκών υποδοχέων, με σύνδεση μισής γέφυρας η τέταρτου γέφυρας (half bridge η quarter bridge) μετρήθηκαν οι παραμορφώσεις στο πάνω και κάτω πέλμα των δοκών υποδοχέων και εφ' όσον αυτές οι δοκοί παραμένουν πάντοτε στην ελαστική περιοχή, τότε οι μετρήσεις αντιστοιχούν σε ροπές, στις αντίστοιχες θέσεις.

Οι μετρήσεις αυτές έγιναν συνολικά σε δέκα σημεία, σε κάθε δοκό και στα δύο της άκρα, με είκοσι strain-gauges.

Οι ροπές στα μέσα των επιμηκύνσεων των πρόσθετων δοκών υποδοχέων, για τις περιπτώσεις των κεντρικών καμπτόμενων ράβδων.

Αντίστοιχα με τις μετρήσεις στις δοκούς υποδοχείς, με ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα (strain gauges) τοποθετημένα σε ζεύγη στα μέσα του άνω και κάτω πέλματος των επεκτάσεων των δοκών υποδοχέων, με σύνδεση μισής γέφυρας η τέταρτου γέφυρας (half bridge η quarter bridge) μετρήθηκαν οι παραμορφώσεις στο πάνω και κάτω πέλμα, που αντιστοιχούν σε ροπές κάμψης, στις αντίστοιχες θέσεις.

Οι μετρήσεις αυτές έγιναν συνολικά σε τρία σημεία, στις τρεις μεσαίες δοκούς στο ένα τους άκρο.

3.5 Έλεγχοι ακρίβειας – διορθώσεις.

Ένα από τα βασικά προβλήματα στην όλη ακρίβεια της πειραματικής διαδικασίας, αλλά και στη μεθοδολογία κατασκευής και πιθανής αντικατάστασης των δοκών, είναι η καλή συναρμογή τους με τους στύλους. Εγγενές πρόβλημα στη χρήση μετωπικών πλακών. Η ακρίβεια στην κατασκευή των δοκιμίων, αλλά και οι ατέλειες (αρχικές, από την κατασκευή, συγκολλήσεις-μεταφορά, συναρμολόγηση) η και πιθανόν επίκτητες από τη διενέργεια των πειραμάτων και τις επακόλουθες παραμένουσες μικροπαραμορφώσεις, δημιουργούν ατέλειες στην εφαρμογή, λόγω αποκλίσεων τόσο στο μήκος όσο στην επιπεδότητα και το μεν μήκος μπορεί να ξεπεραστεί, με αρχικά κοντύτερη κατασκευή και χρήση προσθηκών, αλλά η απόκλιση σε στροφή δεν αντιμετωπίζεται απλά (σφηνοειδείς πλάκες κάνουν το σύστημα ιδιαίτερα πολύπλοκο και ευπαθές, ακόμη και για εργαστηριακές συνθήκες).

Λόγω του μικρού μήκους των δοκών, η απόκλιση αυτή σε στροφή, δημιουργεί ένα κενό και αντίστοιχο πήδημα, στην ομαλή λειτουργία του συστήματος, και πιθανόν να τραυματίσει τους κοχλίες σύνδεσης. Μία αρχική προένταση (ισχυρή σύσφιξη των κοχλιών) αίρει μερικά το πρόβλημα, αλλά δημιουργεί τοπικές εντάσεις που αλλοιώνουν τις μετρήσεις στα αρχικά στάδια των μικρών παραμορφώσεων, όπου η επιβληθείσα, στροφή-ένταση, είναι αντίστοιχης τάξης μεγέθους με τις δημιουργούμενες από τις αρχικά μικρές επιβεβλημένες πειραματικά παραμορφώσεις.

Αυτό δεν έχει καμία ουσιαστική σημασία στην πράξη, εκτός από την πραγματική δυσκολία τοποθέτησης, και ακόμη περισσότερο αντικατάστασης των παραμορφωμένων δοκών δυσκαμψίας.

Είναι όμως ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα των δοκών με κεντρικές ράβδους τύπου INERD, στις οποίες υπάρχει η εγγενής δυνατότητα, είτε με κοχλίωση, είτε με ολίσθηση, της προσαρμογής του μήκους των και αντίστοιχα η απλούστατη αφαίρεση και αντικατάσταση τους.

Στην αρχή της διαδικασίας, με τις πρώτες δοκιμές, προέκυψε ότι στις συνδέσεις του πλαισίου με την Vierendeel του συστήματος INSTED και ειδικότερα στις θέσεις των πείρων, η ανοχή που υπήρχε, ήταν αθροιστικά εκτός των απαιτήσεων του πειράματος, και οι πείροι αντικαταστάθηκαν με εφαρμοστούς, (στην κεφαλή των στύλων), ή προστέθηκαν ενδιάμεσοι τριβείς από ορείχαλκο, που κάλυψαν πλήρως τις ανοχές και μείωσαν τις τριβές. Ακόμη προστέθηκε μία κεκλιμένη δεσμική ράβδος, που βοηθούσε στην παραλαβή των οριζοντίων δυνάμεων στη βάση του υδραυλικού κυλίνδρου και τη σύνδεση της με το πλαίσιο.

Με αυτές τις τροποποιήσεις, οι παρασιτικές μετακινήσεις ήταν αποτέλεσμα κύρια της ελαστικής κινητότητας του πλαισίου και στις μικρές ανοχές του λοξού κόμβου, και μετρήθηκαν να είναι από 2% έως 15% ανάλογα με τη δυσκαμψία του δοκιμαζόμενου συστήματος INSTED.

Για τη μέτρηση των διαφορικών διατμητικών μετακινήσεων κατασκευάσαμε στο εργαστήριο, ειδικές βάσεις για τη στήριξη των βελομέτρων, που στερεώνονται με κοχλίες στις μετωπικές πλάκες σύνδεσης των δοκών δυσκαμψίας στους υποδοχείς. Κάποιες αρχικές ανησυχίες για την ευκαμψία των βάσεων, λόγω του σχετικά μεγάλου μήκους των, ξεπεράστηκαν με το πρώτα πειράματα. Τα βελομέτρα είχαν διαδρομή μέτρησης 50 mm, και πρόσθετη ανοχή περίπου 6 mm.. Η ευκαμψία αυτή, χωρίς να παρεμβάλλεται στην ακρίβεια των μετρήσεων των βελομέτρων, λειτούργησε θετικά στην προστασία τους, όταν η μετακίνηση ξεπερνούσε τη διαδρομή του βελομέτρου σε θλίψη. Η απαιτούμενη διαδρομή του βελομέτρου θα ήταν: $150 * 0.4412 = 66.18$ mm, ενώ η διαθέσιμη ήταν 56 mm.



Φωτ.3.1 Το σύστημα μέτρησης διατμητικών μετακινήσεων

Μικρό πρόβλημα παρουσιάστηκε στις στηρίξεις των βελομέτρων, που χρησιμοποιούσαν τις οπές και αντίστοιχα τους κοχλίες των μετωπικών πλακών.

Αν και αρχικά οι οπές για τη στήριξη των βελομέτρων ήταν εφαρμοστές, απαιτήθηκε η περαιτέρω διάνοιξη

τους, για να προσαρμοστούν στις αντίστοιχες ανοχές, άρα και απαιτήσεις τοποθέτησης των κοχλίων των δοκιμίων και των μετωπικών πλακών. Μικρομετακινήσεις λόγω σχετικής ολίσθησης των μετωπικών πλακών, μεταφερόντουσαν και στα βελομέτρα.

3.6 Δοκιμαστικές μετρήσεις.

Μετά την ολοκλήρωση της συναρμολόγησης της συσκευής, με την τοποθέτηση και των επεκτάσεων των δοκών υποδοχέων για ορθογωνικές ράβδους, τοποθετήθηκε ένα εικονικό δοκίμιο τύπου INERD από αφρώδες πλαστικό, και έγιναν δοκιμές φορτίσεων και καταγραφών για να ελεγχθούν οι δυνατότητες της πειραματικής διάταξης.



Φωτ.3.2 Το σύνολο της πειραματικής συσκευής στις αρχικές δοκιμές



Φωτ.3.3 Η ελαστική δοκιμαστική ράβδος

Στη διάρκεια των δοκιμών, χρειάστηκε να γίνουν αλλαγές στον αλγόριθμο ελέγχου της μετακίνησης και στη μορφή των καταγραφών, λόγω του μεγάλου χρόνου του πειράματος αλλά και του αριθμού των καταγραφομένων μετρήσεων, που είχε εξαντλήσει τις δυνατότητες εισόδου του καταγραφικού συστήματος.

Οι καταγραφές έγιναν με συχνότητα μία ομάδα καταγραφών ανά sec, που αντιστοιχεί σε 20 έως 400 καταγραφές ανά κύκλο, ανάλογα με το μέγεθος του κύκλου (Πίνακας 3.1).

Time between sample (s) = 1,000000							
Channel Names							
Displacement	Load	DT-01	DT-03	SG-02	SG-07	embolo 1	
mm	kN	mm	mm	Strain	Strain	Voltage	
1	0,011873	-7,03325	0,02907	0,38794	-1,18	-0,92621	-0,00119
2	0,027092	-7,09192	-0,0225	0,325622	-1,35707	-0,98522	-0,08128
3	-0,00335	-7,20926	-0,04313	0,30485	-1,41609	-0,98522	0,010039
4	-0,01857	-7,24837	-0,03282	0,284077	-1,41609	-1,04422	0,055689
5	-0,01857	-7,26793	-0,07408	0,273691	-1,29804	-0,98522	0,055699
6	-0,02871	-7,22881	-0,05345	0,294463	-1,35707	-1,04422	0,086138
7	-0,01349	-7,22881	-0,05345	0,294463	-1,29804	-0,98522	0,040473
8	-0,02364	-7,22881	-0,04313	0,30485	-1,41609	-0,98522	0,070919
9	-0,02871	-7,22881	-0,04313	0,294463	-1,41609	-1,04422	0,086154
10	-0,03379	-7,1897	-0,05345	0,294463	-1,47511	-1,10323	0,101358
11	-0,02364	-7,11148	-0,04313	0,30485	-1,35707	-0,98522	0,070919
12	-0,02364	-7,05281	-0,06376	0,30485	-1,47511	-0,92621	0,070906
13	-0,03379	-7,03325	-0,05345	0,284077	-1,47511	-1,04422	0,101412
14	-0,03379	-6,99414	-0,05345	0,284077	-1,47511	-0,98522	0,101376
15	-0,02871	-6,89636	-0,05345	0,294463	-1,47511	-0,98522	0,086154
16	-0,02871	-6,83769	-0,04313	0,315236	-1,41609	-0,92621	0,086154
17	-0,01857	-6,81813	-0,03282	0,30485	-1,41609	-1,04422	0,055689
18	-0,03379	-6,85724	-0,07408	0,284077	-1,47511	-1,04422	0,101412
19	-0,02364	-6,81813	-0,05345	0,294463	-1,41609	-1,04422	0,070919
20	-0,03379	-6,72035	-0,04313	0,273691	-1,35707	-0,98522	0,101394
21	-0,02871	-6,68124	-0,06376	0,294463	-1,47511	-1,04422	0,086169
22	-0,02364	-6,68124	-0,04313	0,294463	-1,35707	-0,98522	0,070919

Πιν. 3.1 Ενδεικτικό αρχείο καταγραφής πειραματικών μετρήσεων

4. Επιλογή πειραματικών διατάξεων.

4.1 Τύποι δοκών δυσκαμψίας.

Οι τύποι των δοκών δυσκαμψίας που σχεδιάστηκαν και που εφαρμόστηκαν στα πλαίσια αυτής της πρώτης φάσης της πειραματικής διερεύνησης του συστήματος INSTED ήταν:

- Ολόσωμες δοκοί διατομής διπλού T, μέσου πλάτους (IPE), πλατύπελμες (HE-A) και κοιλοδοκοί (SHS), με τριγωνικά ενισχυτικά ελάσματα στα άκρα.
- Ολόσωμες δοκοί διατομής διπλού T, πλατύπελμες με εγκοπές απομείωσης των πελμάτων (dogbones), σε μικρή απόσταση από τη μετωπική πλάκα, και κοιλοδοκοί, με εγκάρσιες επιμήκειες σχισμές απομείωσης στα πέλματα.
- Ολόσωμες διατομές (INERD) στο μέσο του ανοίγματος της δοκού, ορθογωνικής (bar) η κυκλικής (rod) διατομής.
- Ολόσωμες διατομές (INERD) στο μέσο του ανοίγματος, κυκλικής (rod) διατομής, με δακτυλιοειδείς εγκοπές απομείωσης σε μικρή απόσταση από τα άκρα των πρόσθετων δοκών υποδοχέων.

Για τις δοκούς με ενισχύσεις στα άκρα και τις δοκούς με το σύστημα INERD, έγιναν για κάθε περίπτωση δύο σειρές πειραμάτων. Μία με ένα και μία με πέντε δοκίμια.

Εφ' όσον τα υποστυλώματα έχουν σημαντική δυσκαμψία, σε σχέση πάντοτε με τις δοκούς, ώστε να παραμένουν ευθύγραμμα και να εξασφαλίζουν τη ίδια στροφή στις κεφαλές των δοκών, τα πειράματα θα ήταν τα ίδια, με πενταπλάσια τιμή στην επιβαλλομένη δύναμη, στην περίπτωση των πέντε δοκών, σε σχέση με αυτή της μίας.

Επομένως για διατάξεις με περισσότερες της μίας δοκούς, ενδιαφέρον αποκτά η χρησιμοποίηση διαφορετικού τύπου δοκών καθ' ύψος, στο ίδιο φάτνωμα, ώστε να υπάρχει προοδευτική αστοχία με σταδιακή πλαστικοποίηση.

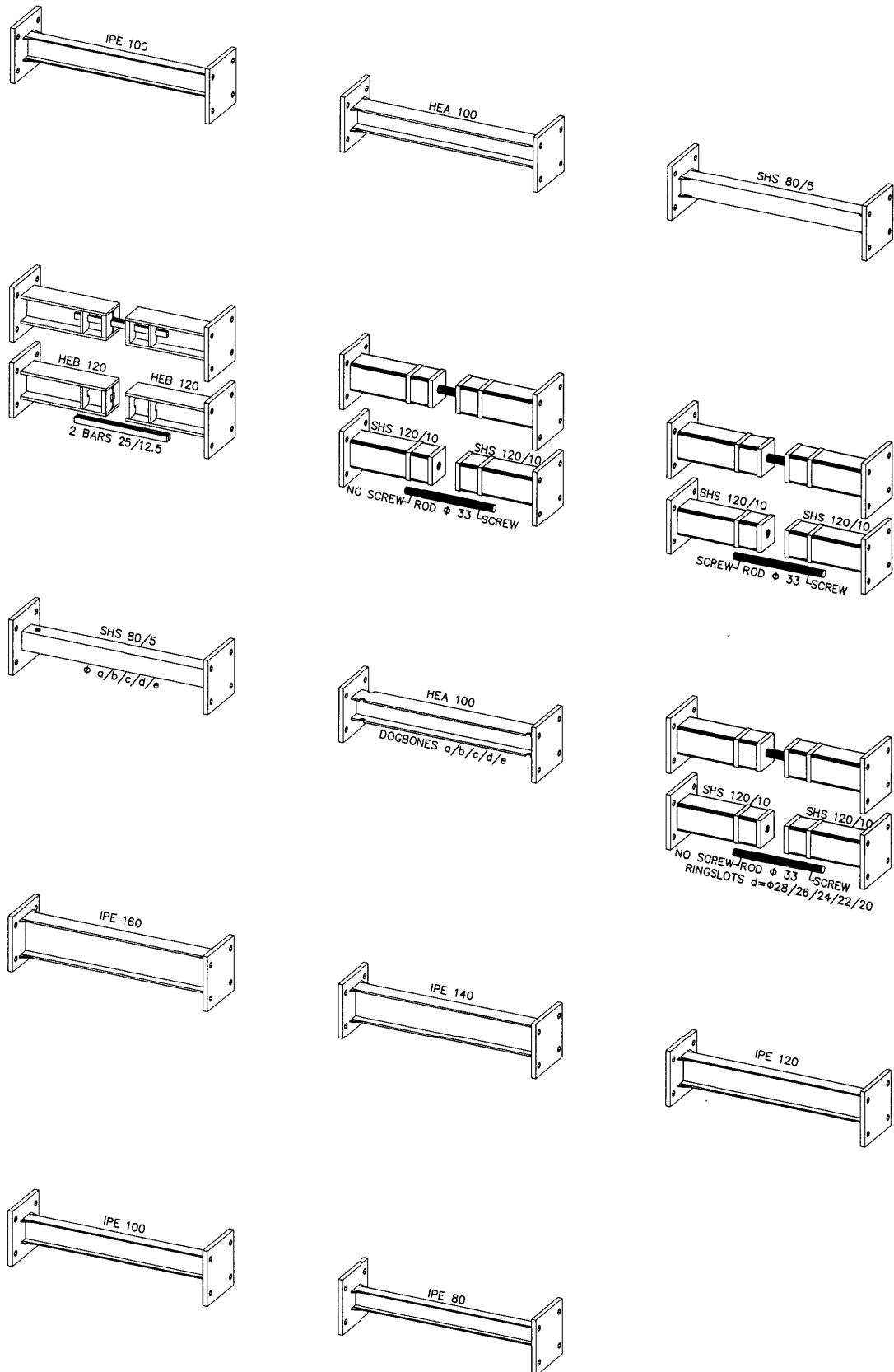
Όπως αναφέρεται και προηγούμενα, αρχικά σχεδιάστηκαν και δοκιμάστηκαν τρεις αντίστοιχες ομάδες απλών δοκών, με ενισχύσεις στα άκρα. Σκοπός της πρώτης σειράς των πειραμάτων ήταν η συγκριτική παρατήρηση της συμπεριφοράς τριών διαφορετικών τύπων δοκών.

Οι τρεις τύποι ήταν:

- συνήθης δοκός μέσου πλάτους, IPE 100.
- τετραγωνική κοιλοδοκός αντιστοίχων αδρανειακών μεγεθών SHS 80/5.
- πλατύπελμη δοκός HE-A100

Ενώ οι δύο πρώτοι τύποι, η δοκός μέσου πλάτους IPE 100, και η τετραγωνική κοιλοδοκός SHS 80/5, είχαν παραπλήσια μεγέθη αντοχής και δυσκαμψίας, η

μικρότερη διαθέσιμη πλατύπελμη δοκός HE-A 100, έχει σημαντικά μεγαλύτερη, υπερδιπλάσια, αντοχή και τριπλάσια αδρανειακά χαρακτηριστικά και δεν ήταν άμεσα συγκρίσιμη.



Σχ. 4.1 Οι τύποι των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε η σύνθετη δοκός τύπου INERD, με ορθογωνική συνδετική ράβδο στο μέσον του ανοίγματος, σε μεγέθη με αντίστοιχες αντοχές με τις προηγούμενες, και έγιναν τα αντίστοιχα πειράματα με 1 και 5 δοκούς. Η ορθογωνικές ράβδοι είχαν τη δυνατότητα προσαρμογής κατά μήκος, ολισθαίνοντας στις δοκούς υποδοχείς τους.

Η εμπειρία των ορθογωνικών ράβδων και η επιτυχία του σχεδιασμού, οδήγησε στο σχεδιασμό του ανάλογου συστήματος με κυκλικές ράβδους, με τη δυνατότητα του ελέγχου του μήκους της ράβδου, με διπλή αντίστροφη κοχλίωση ή ολίσθηση στο ένα άκρο με απλή μονόπλευρη κοχλίωση.

Οι διατάξεις τύπου INERD, ήταν:

- Δίδυμες ορθογωνικές ράβδοι 2*12/30
- Απλή κυκλική ράβδος Φ33, με διπλή η απλή κοχλίωση

που δοκιμάστηκαν σε απλή η πενταπλή διάταξη.

Ακολούθησε η διάταξη με πέντε διαφορετικές δοκούς μέσου πλάτους, IPE 80/100/120/140/160. Η διάταξη αυτή ξεπερνούσε τις δυνατότητες του πειραματικού εξοπλισμού λόγω της πολύ μεγάλης αντοχής και δυσκαμψίας των δοκών σε σχέση πάντα με τη δυσκαμψία του πλαισίου δοκιμών και των κατακόρυφων στύλων.

Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα προχωρήσαμε στο σχεδιασμό μικρότερων διαφορετικών διατομών, όπου στην επιτυχημένη διάταξη των πέντε δοκών διατομής SHS 80/5, προσθέσαμε στα πέλματα επιμήκεις σχισμές, διαφόρου πλάτους, μεταβλητού σε κάθε δοκό. Εφ' όσον η διάταξη λειτουργούσε ως απομείωση της διατομής, σε μικρή απόσταση από τη μετωπική πλάκα, δεν απαιτείται πλέον ενίσχυση στο άκρο της δοκού.

Αντίστοιχη διάταξη, είναι η δημιουργία διαφορετικών εγκοπών τύπου dogbones, στα άκρα των πελμάτων δοκών διπλού «Τ». Σε δοκούς HE-A 100, διανοίχθηκαν εγκοπές διαφόρου βάθους, στα άκρα των πελμάτων, όπου αντίστοιχα δεν απαιτούνται οι προσθήκες ενισχυτικών ελασμάτων στα άκρα.

Τέλος συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω, στην ιδιαίτερα επιτυχημένη διάταξη της κεντρικής κυκλικής ράβδου, διατάσσονται σε μικρή απόσταση από το άκρο των πρόσθετων δοκών υποδοχέων, δακτυλιοειδείς εγκοπές με διάφορα βάθη.

Οι διατάξεις με διαφορετικές διατομές καθ ύψος ήταν:

- Πέντε διαφορετικές διατομές IPE 80/100/120/140/160.
- Τετραγωνικές κοιλοδοκοί SHS 80/5 με διαφορετικές επιμήκεις σχισμές.
- Πλατύπελμες δοκοί HE-A 100, με διαφορετικού βάθους εγκοπές στα πέλματα.
- Κυκλικές ράβδοι Φ33 με διαφορετικού βάθους δακτυλιοειδείς εγκοπές.

4.2 Προσαρμογή στις ιδιαιτερότητες του πειράματος.

Η γιαγιά μου έλεγε: «η καλή νοικοκυρά με το κουτάλι γνέθει»¹, και ο Μπέρτολντ Μπρεχτ αντίστοιχα: «το σπίτι χτίστηκε με τις πέτρες που υπήρχαν, η επανάσταση έγινε με τους επαναστάτες που υπήρχαν, δουλέψαμε με τη σοφία και το θάρρος που είχαμε στη διάθεση μας»²

Έτσι και εμείς, χρησιμοποιήσαμε για την κατασκευή:

- του αρχικού πλαισίου,
- των στύλων της Vierendeel και των συστημάτων ανάρτησης, και επιβολής φορτίου,
- των δοκιμίων,
- των συμπληρωματικών μικροκατασκευών και βελτιώσεων

φιλικά προσκείμενες κατασκευαστικές εταιρείες, που κατασκεύαζαν με τη συνήθη εργοστασιακή ακρίβεια και ανοχές, τα μέλη και τις συνδέσεις.

Το πλαίσιο, είχε σχεδιαστεί ώστε να είναι δυνατή η αφαίρεση της σταυροειδούς κεφαλής του, για να τοποθετούνται εύκολα τα δοκίμια και τα βοηθητικά τμήματα του. Η λοξή διάταξη της σύνδεσης, μεταξύ των στύλων και του ζυγώματος, αν και θεωρητικά σωστά σχεδιασμένη, με τις μετωπικές πλάκες-ενισχύσεις στη διεύθυνση της διχοτόμου της γωνίας, δημιουργούσε σημαντικά προβλήματα στην τοποθέτηση των δοκιμίων, ιδιαίτερα λόγω της μη ύπαρξης ελασμάτων οδηγών. Η τοποθέτηση σε κεκλιμένο επίπεδο, δημιουργούσε δυνάμεις εκτροπής στους στύλους, καθιστώντας τη συναρμολόγηση δύσκολη.

Ακόμη, ακριβώς λόγω της λοξότητας, η τελική επαφή στη σύνδεση, δεν είχε την απαιτούμενη ακρίβεια, το μικρό διάκενο που παρέμενε, δημιουργούσε κάποια πρόσθετη κινητικότητα στην καμπτική στροφή του κόμβου, με αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση της συνολικής δυσκαμψίας του πλαισίου. Ενδιάμεση προσπάθεια να ελαχιστοποιηθεί το διάκενο με σύσφιξη (προένταση των κοχλιών) οδήγησε σε μερική αστοχία της κοχλίωσης και αντικατάσταση των κοχλιών.

Μετά την ολοκλήρωση του πρώτου κύκλου πειραμάτων, ο κόμβος επανασχεδιάστηκε, ώστε να ενισχυθεί, να αυξηθεί η δυσκαμψία του, και να καταστεί ευκολότερη η τοποθέτηση της κεφαλής του πλαισίου δοκιμών. Η τροποποίηση αυτή έχει κατασκευαστεί για τις επόμενες φάσεις της συνεχιζόμενης πειραματικής διερεύνησης και παρουσιάζεται μαζί με τις υπόλοιπες βελτιώσεις στα επόμενα κεφάλαια της διατριβής.

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι οι παρατηρήσεις αυτές αφορούν σε βελτιώσεις της συσκευής και της πειραματικής διαδικασίας για διεύρυνση της δυνατότητας

¹ Προσωπικές αναμνήσεις

² Μπέρτολτ Μπρέχτ, από το ποίημα, «Κακές εποχές», από τη συλλογή, «74 ποιήματα», εκδόσεις «Θεμέλη», μετάφραση Πέτρου Μάργαρη.

πειραμάτων σε δοκίμια μεγαλύτερης αντοχής και δυσκαμψίας και σε καμία περίπτωση σε μειώνουν την αξιοπιστία των πειραμάτων που έγιναν, όπως αυτά περιγράφονται αναλυτικά στα επί μέρους κεφάλαια.

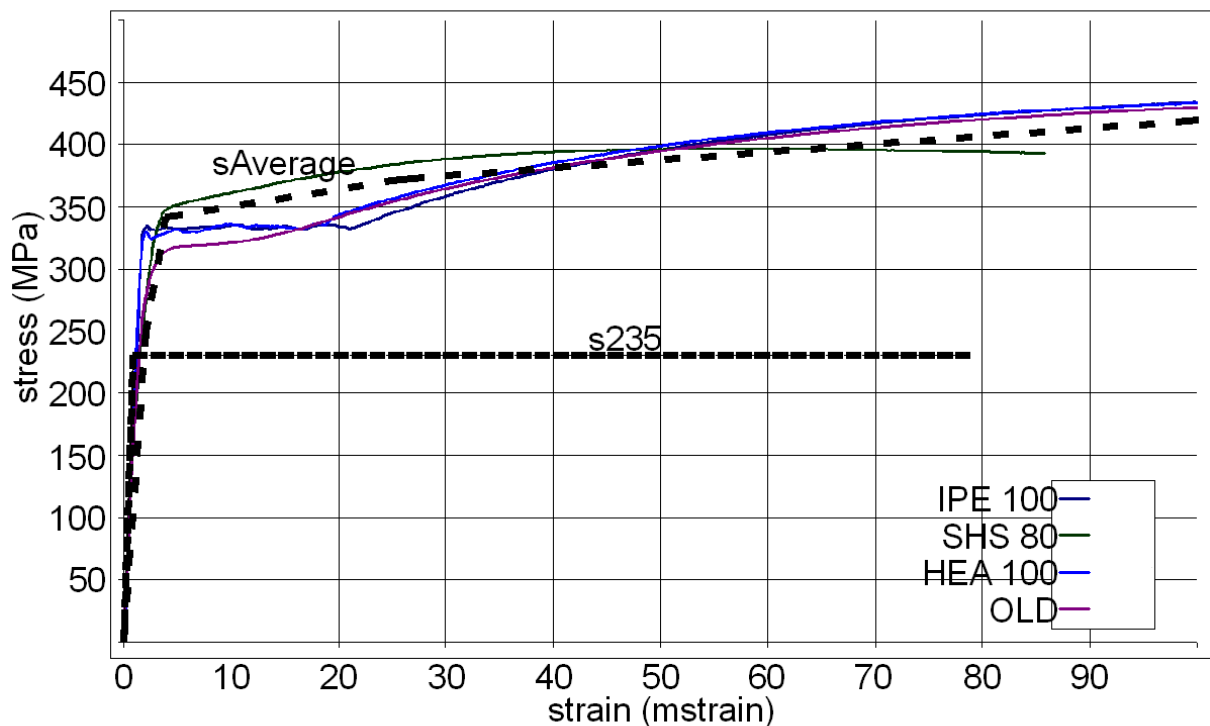
4.3 Ιδιότητες υλικού, διγραμμικό, τριγραμμικό, τριγραμμικό με κράτυνση.

Ένα από τα βασικά προβλήματα στο σχεδιασμό αντισεισμικών συστημάτων με απορρόφηση ενέργειας είναι η ποιότητα του χάλυβα. Συνήθως, όπως και στην περίπτωση μας, ο σχεδιασμός προβλέπει ένα μαλακό χάλυβα, με χαμηλό όριο διαρροής, που είναι συνήθως χάλυβας S235.

Στην αγορά οι διατιθέμενοι σήμερα χάλυβες S235 έχουν σημαντικά αυξημένα όρια διαρροής και θραύσης, προερχόμενοι συνήθως από παρτίδες παραγωγής υψηλότερης ποιότητας χαλύβων, κάτι που δεν παρουσιάζει προβλήματα σε συνήθη σχεδιασμό, παρά μόνο στην περίπτωση της προσχεδιασμένης αστοχίας, όπως στο σύστημα INSTED.

Στα πλαίσια αυτής της πειραματικής διερεύνησης έγιναν δοκιμές σε πρότυπα δοκίμια που αποκόπηκαν από μη καταπονημένες περιοχές των δοκών διατομής IPE100, SHS 80/5, HE-A 100 και ROD 2*12/30.

Τα διαγράμματα, που παρουσιάζονται στο σχήμα 7.2.1, είναι παραπλήσια για όλες τις διατομές και προσεγγίζουν τα αναμενόμενα διαγράμματα για χάλυβα S355.



Σχήμα 7.2.1 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων υλικού δοκιμίων

Οι αναλύσεις στους ραβδωτούς φορείς, έγιναν για διγραμμικό διάγραμμα, αρχικά με σημείο διαρροής το θεωρητικό που αντιστοιχεί στην ονομαστική τάση του S235, και στη συνέχεια με τριγραμμικό διάγραμμα, που προσεγγίζει τη μέση καμπύλη των διαγραμμάτων υλικού, όπως αυτά προέκυψαν από δοκιμές.

5 Τα πειράματα

Κατάλογος πειραμάτων

Από τον Ιούλιο μέχρι τον Νοέμβριο του 2007, έγιναν 15 πειράματα, στο εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ.

Τα πειράματα και η σειρά με την οποία έγιναν φαίνεται στον πίνακα 5.1.

	#	Τύπος δοκιμίου	Ημερομ.	displ Δx	Σχόλια
1	1a	1 IPE 100	3-7-2007	0-135 mm	
2	1b	5 IPE 100	12-7-2007	0-135 mm	
	1c	5 IPE 100	17-7-2007	135-150 mm	συνέχεια του 1b
3	2a	5 SHS 80/5	19-7-2007	0 - 135 mm	
	2b	5 SHS 80/5	19-7-2007	135-150 mm	συνέχεια του 2a
4	3a	1 bar (2*12/30)	24-7-2007	0-135 mm	
5	3b	5 bar (2*1.2/3.0)	4-10-2007	0-150 mm	
4	3c	1 bar (2*1.2/3.0)	10-10-2007	0-135 mm	Επανάληψη του 3a
5	3d	5 bar (2*1.2/3.0)	23-10-2007	0-150 mm	Επανάληψη του 3b
6	4a	5 HEA 100	11-9-2007	0-150 mm	
7	4b	1 HEA 100	18-9-2007	0-150 mm	
8	5a	5 IPE 80-160	20-9-2007	0-150 mm	
9	5b	5 SHS 80/5 (holes)	20-11-2007	0-150 mm	Επιμήκειες σκισμές
10	5c	5 HEA 100 (slots)	13-11-2007	0-150 mm	Εγκάρσιες εγκοπές
11	6a	1 rod Φ33 (1screw)	25-10-2007	0-150 mm	
12	6b	1 rod Φ33 (2screw)	30-10-2007	0-150 mm	
13	6c	1 rod Φ33 (2screw)	30-10-2007	0-150 mm	Impact cycles
14	6d	5 rod Φ33 (1screw)	1-11-2007	0-150 mm	
15	6e	5 rod Φ33 (1screw)	5-12-2007	0-150 mm	Δακτυλοειδείς εγκοπές

Πιν. 5.1 Κατάλογος πειραμάτων

Η πρώτη σειρά πειραμάτων αναφέρεται σε τρεις ομάδες απλών δοκών, με ενισχύσεις στα άκρα. Οι τρεις τύποι ήταν:

- συνήθης δοκός μέσου πλάτους IPE 100 (πειράματα 1 και 2)
- τετραγωνική κοιλοδοκός αντιστοιχών αδρανειακών χαρακτηριστικών SHS 80/5. (πείραμα 3)
- Πλατύπελμη δοκός HE-A100 (πειράματα 6 και 7)

Η δεύτερη σειρά πειραμάτων, με διατάξεις τύπου INERD, ήταν:

- Δίδυμες ορθογωνικές ράβδοι 2*12/30 (πειράματα 4 και 5)
- Κυκλική ράβδος Φ33, με απλή κοχλίωση (πειράματα 11 και 14)
- Κυκλική ράβδος Φ33, με διπλή κοχλίωση (πειράματα 12 και 13)

Οι διατάξεις με διαφορετικές διατομές καθ' ύψος ήταν:

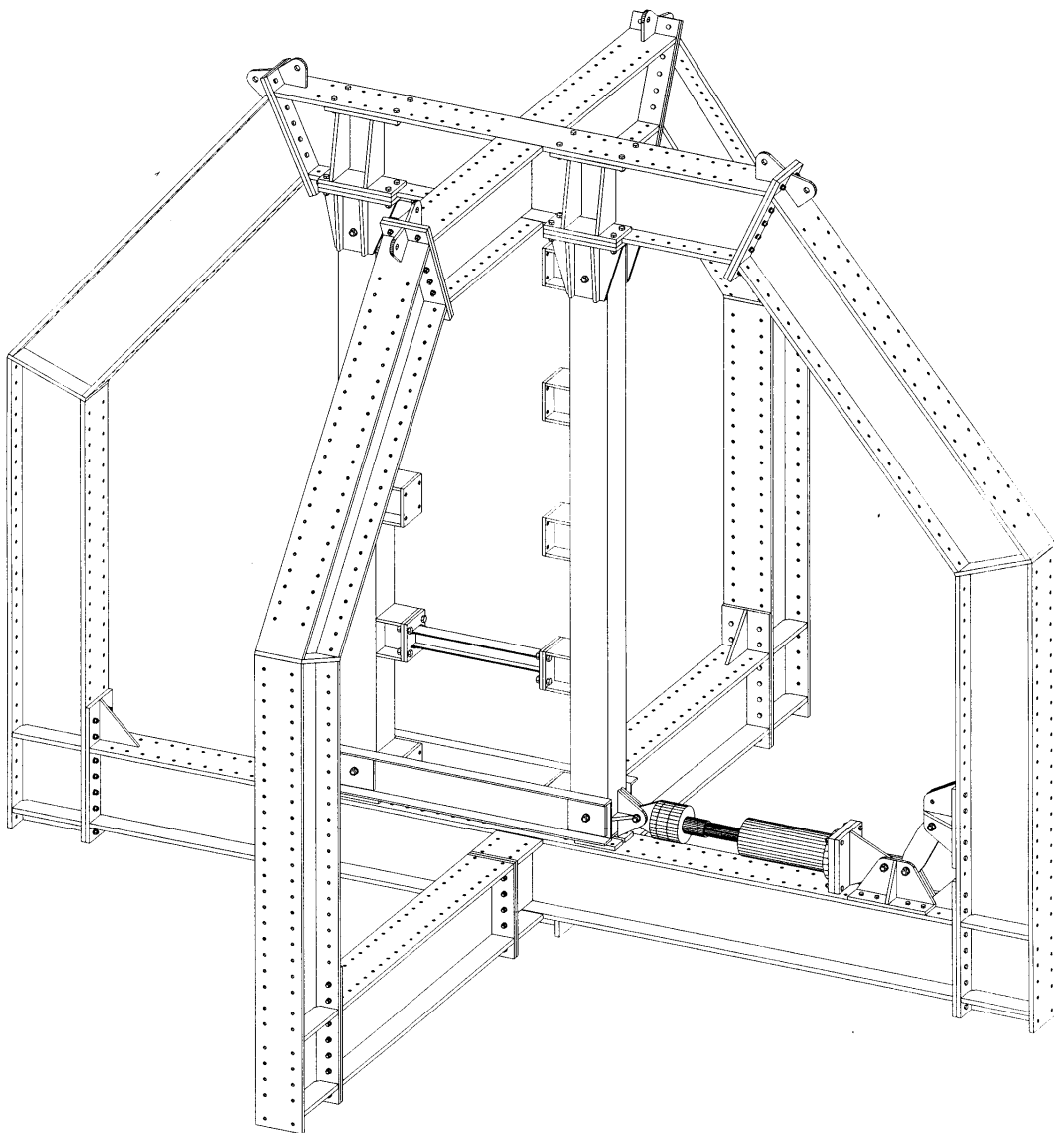
- Πέντε διαφορετικές διατομές IPE 80/100/120/140/160. (πείραμα 8)
- Τετραγωνικές κοιλοδοκοί SHS 80/5 με διαφορετικές επιμήκεις σχισμές. (πείραμα 9)
- Πλατύπελμες δοκοί HE-A 100, με διαφορετικού βάθους εγκοπές στα πέλματα. (πείραμα 10)
- Κυκλικές ράβδοι Φ33 με διαφορετικού βάθους δακτυλιοειδείς εγκοπές. (πείραμα 15)

5.1 Πείραμα 1 - 1 IPE 100

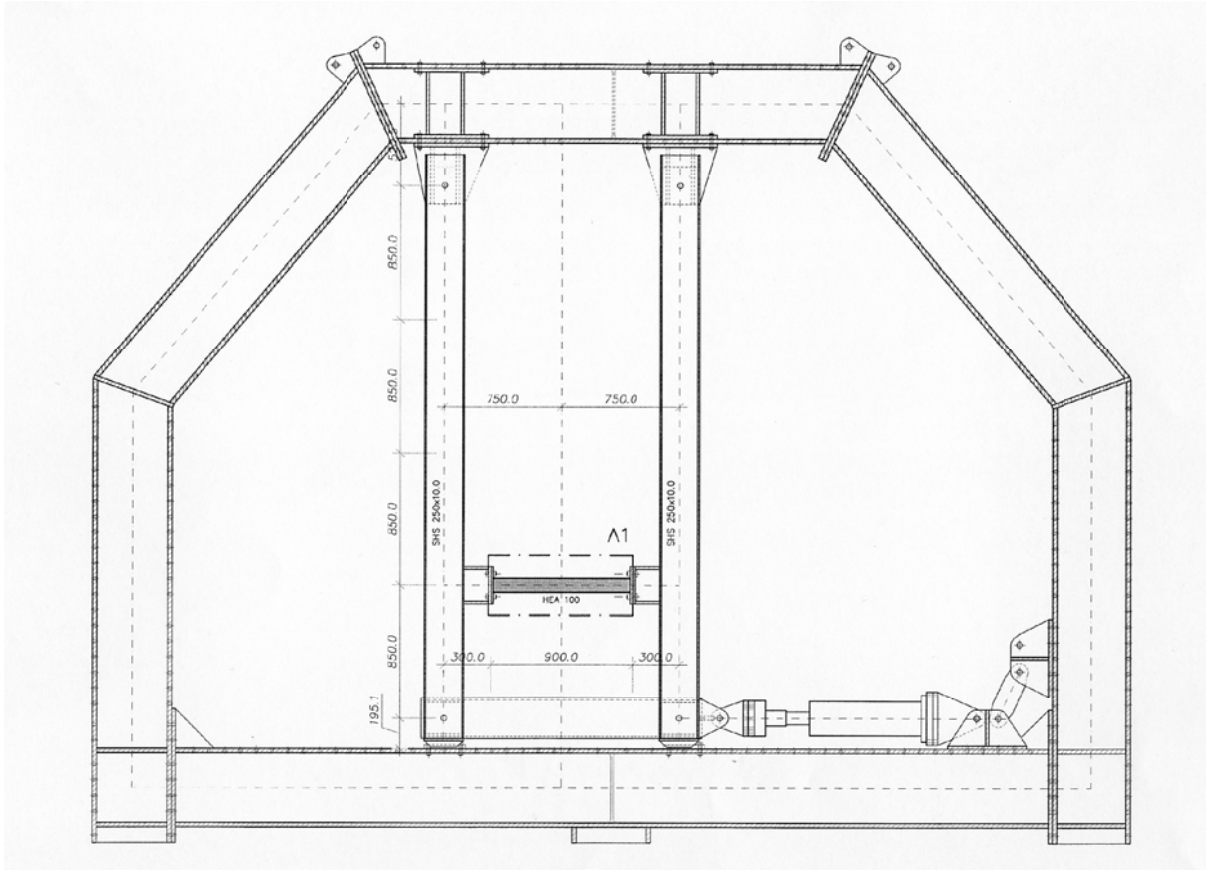
	#	Τύπος δοκιμίου	Ημερομ.	displ Δx	Σχόλια
1	1a	1 IPE 100	3-7-2007	0-135 mm	

Το πρώτο πείραμα έγινε με μία μόνον συνδετήρια δοκό, IPE 100, τοποθετημένη στην δεύτερη από κάτω θέση των στύλων, για καλύτερη εποπτεία. Το πείραμα ακολούθησε το αρχικό πρωτόκολλο φόρτισης και ολοκληρώθηκε με μετακίνηση 135 mm.

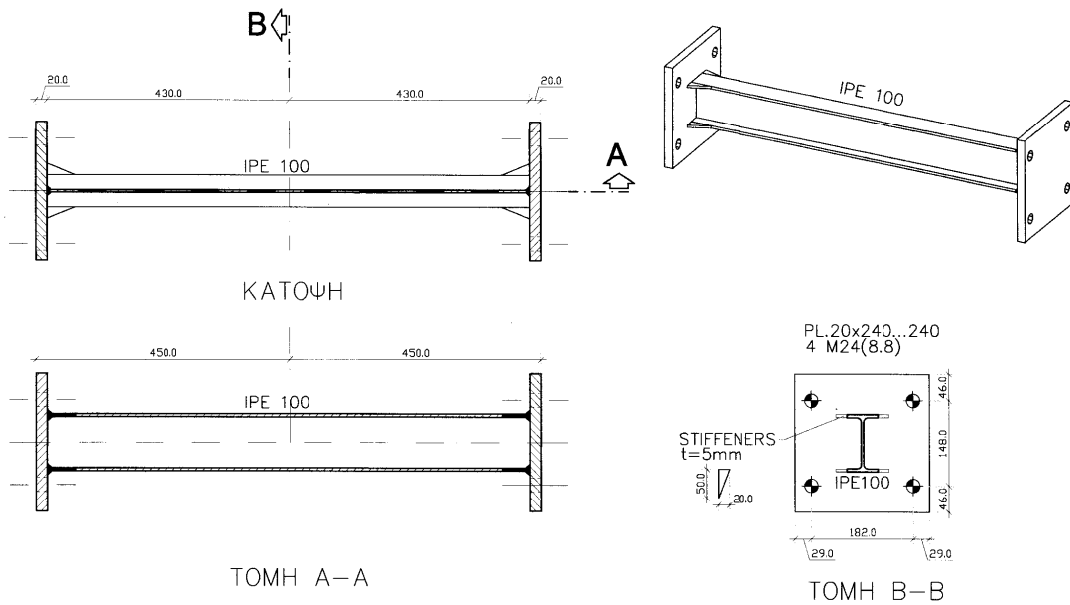
Στη οριζόντια μετακίνηση των 135 mm η δοκός παρουσίασε αστοχία, με κατακόρυφη ρωγή στο άκρο της, στο τέλος του μη ενισχυμένου τμήματος.



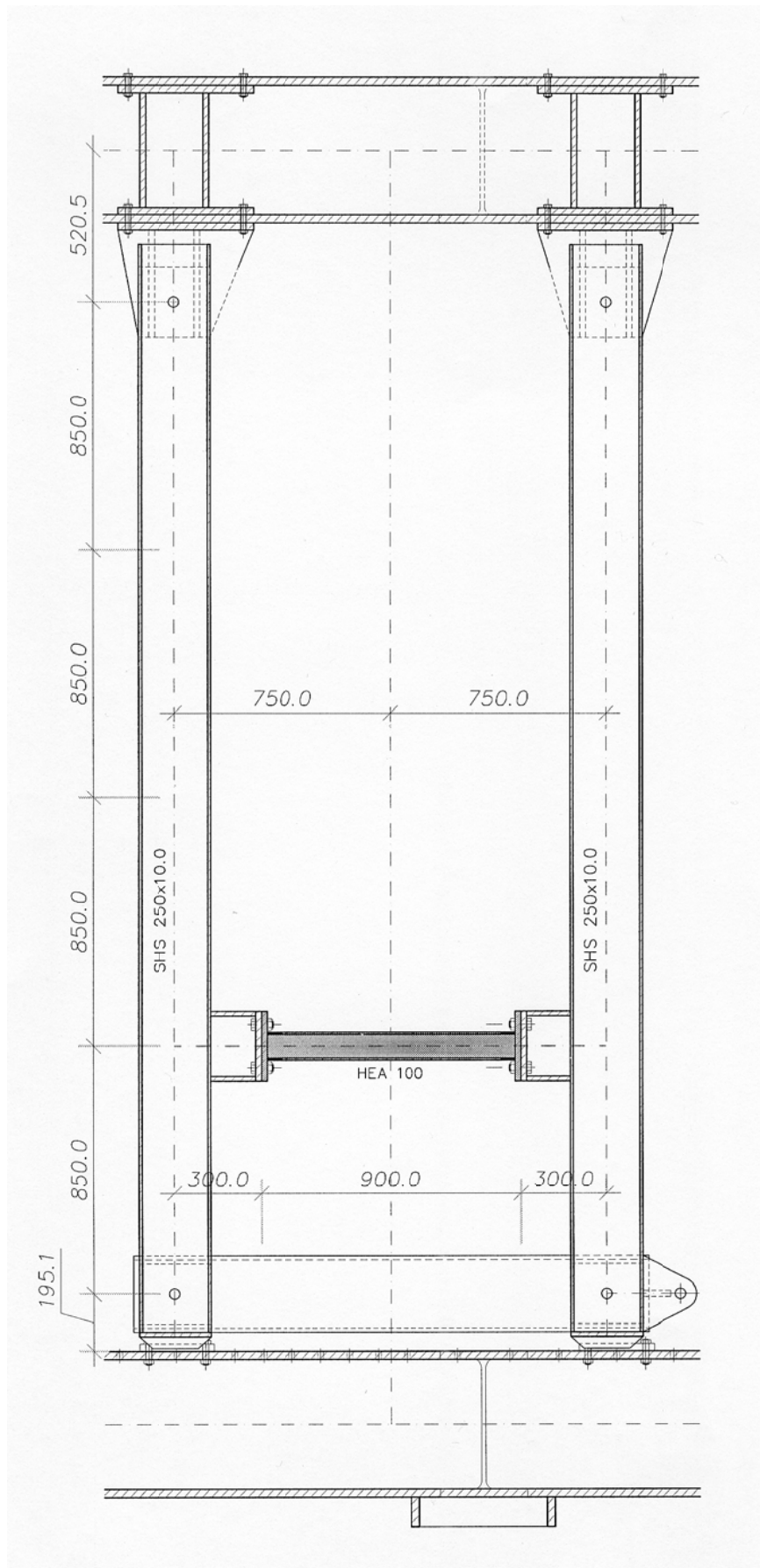
Σχ.5.1.1. Αξονομετρικό σχέδιο της πειραματικής διάταξης με 1 IPE 100



Σχ.5.1.2. Συνολική όψη της πειραματικής διάταξης



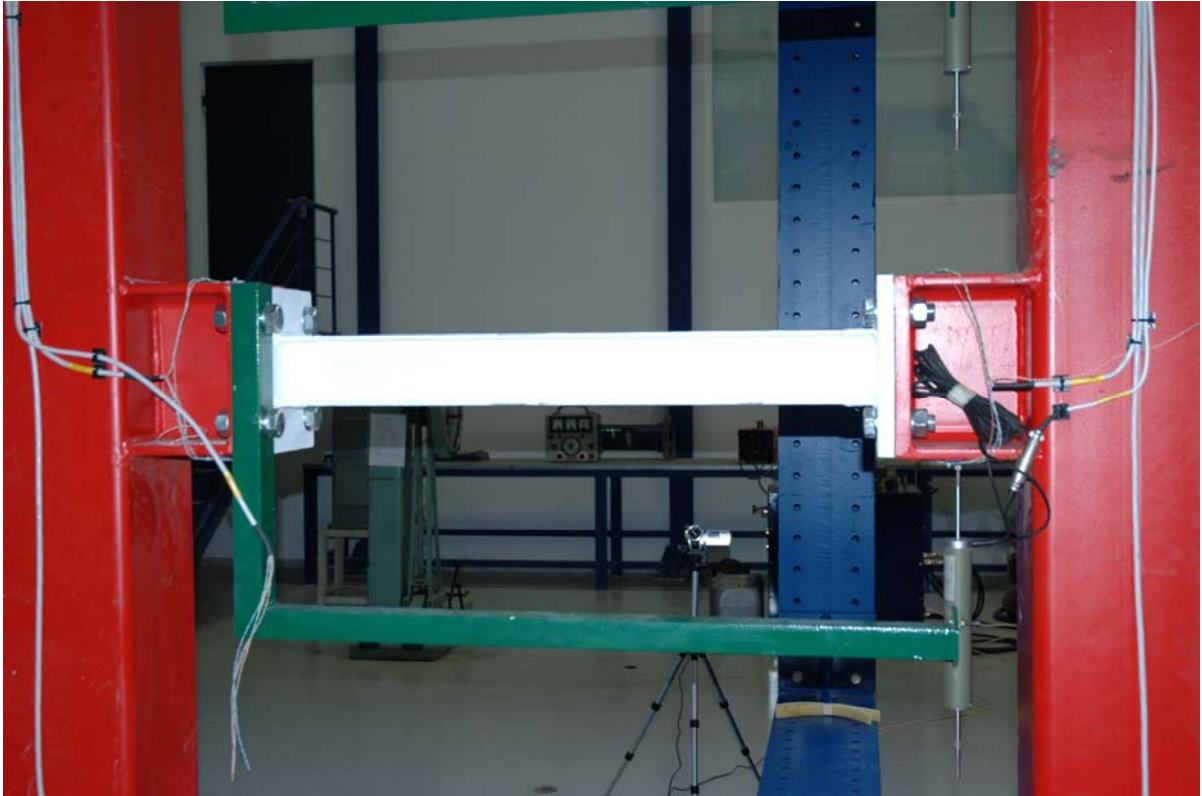
Σχ.5.1.3. Το δοκίμιο του πειράματος 1 - IPE 100 με ενίσχυση στα άκρα



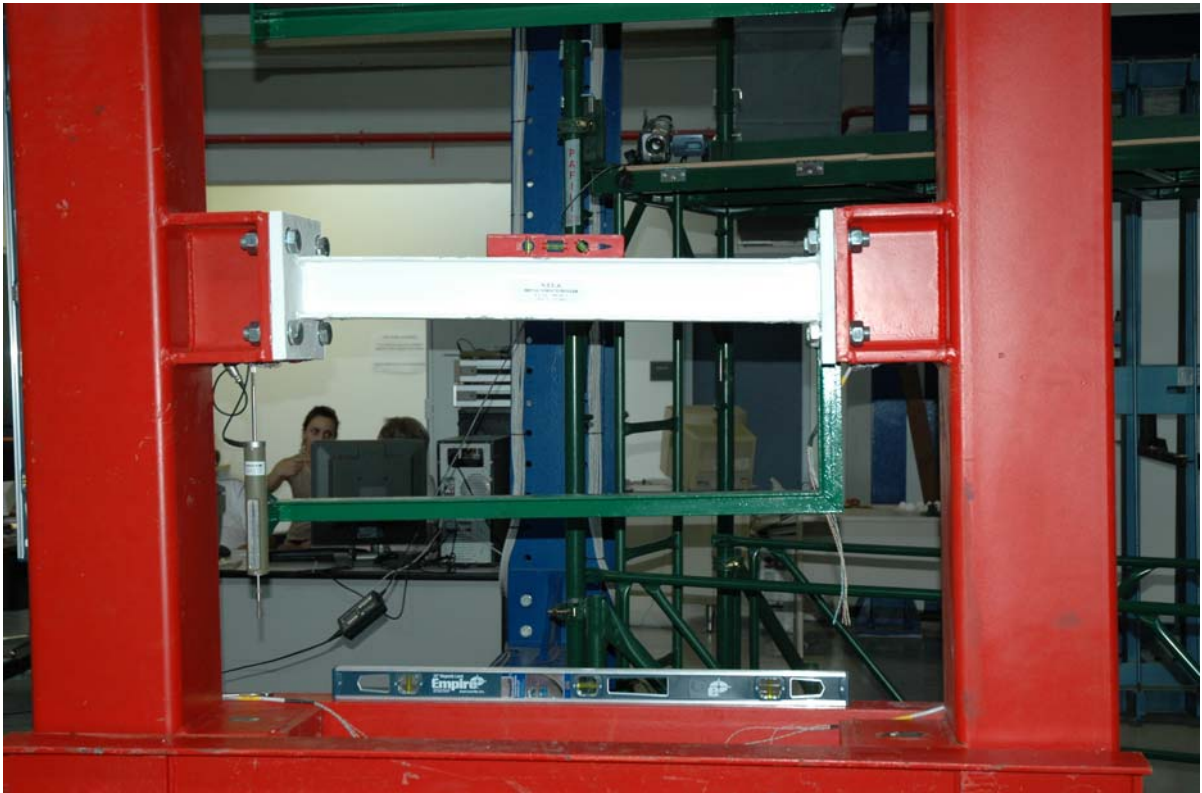
Σχ.5.1.4. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) με μία δοκό IPE 100



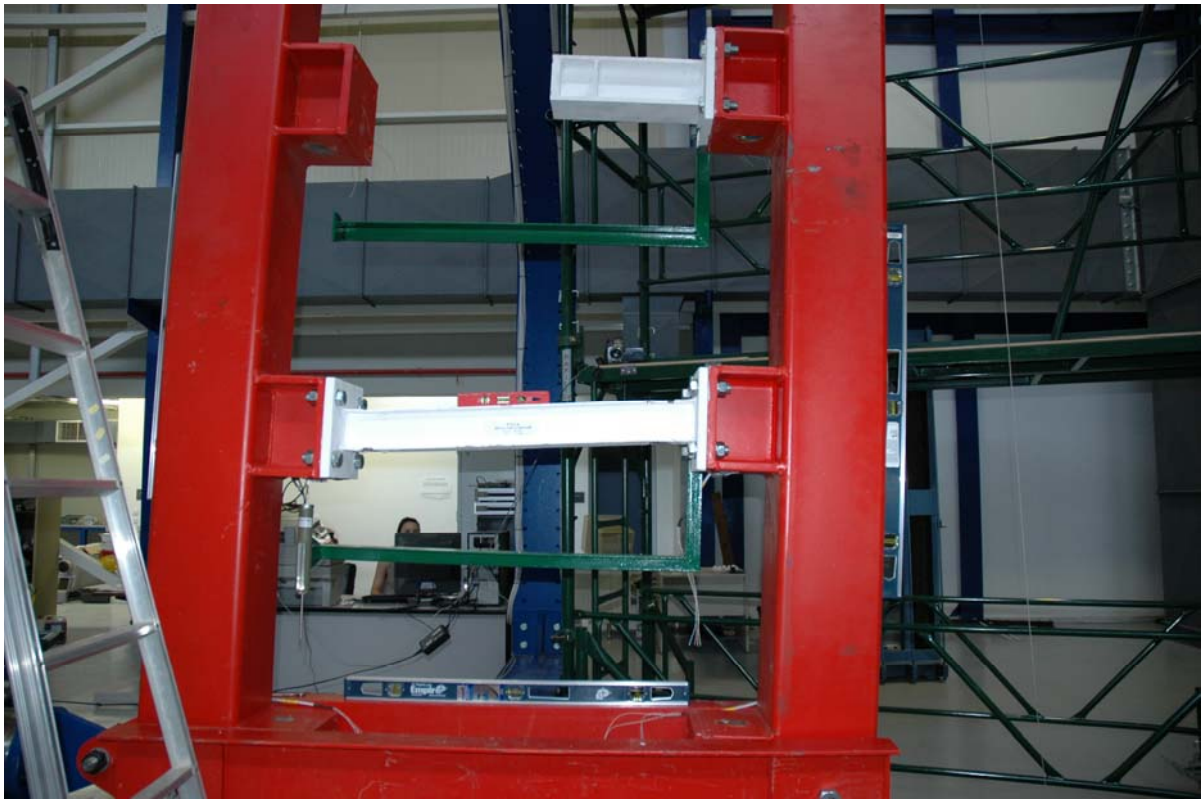
Φωτ. 5.1.1. Όψη της κατακόρυφης vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 1 IPE 100



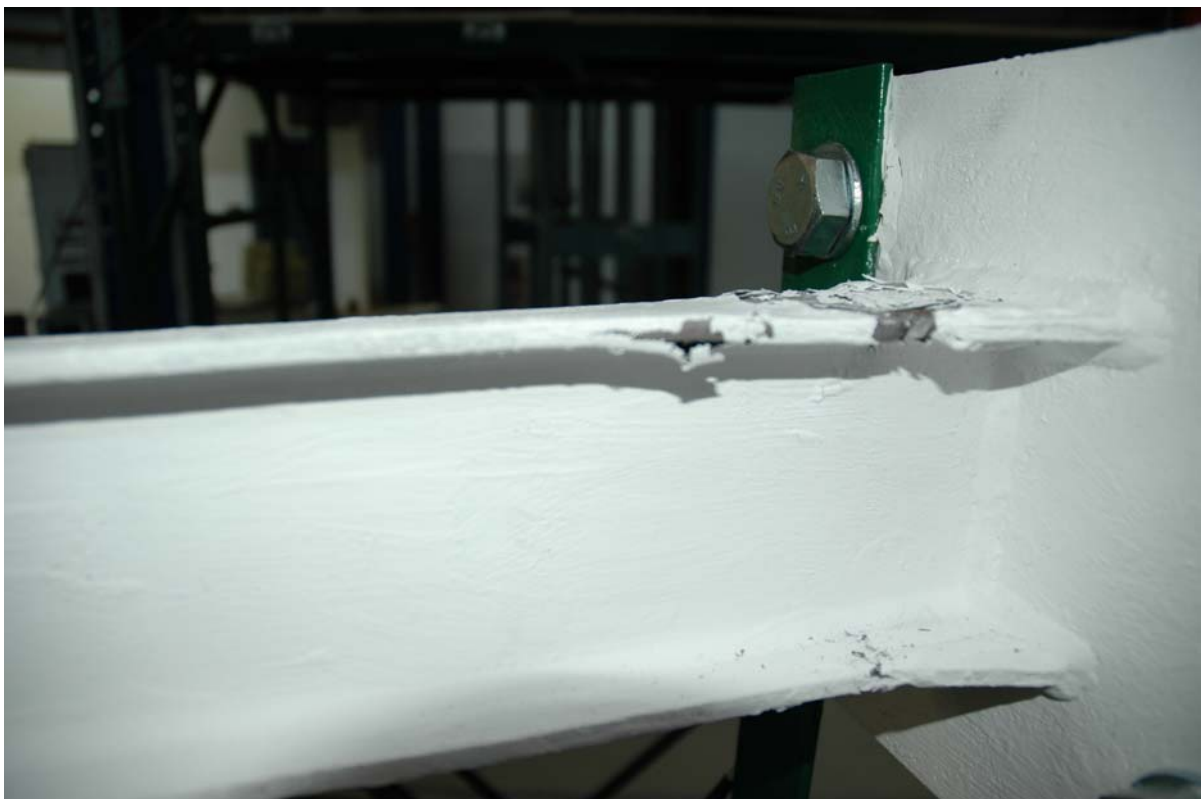
Φωτ. 5.1.2. Όψη του δοκιμίου 1 IPE 100, απαραμόρφωτου



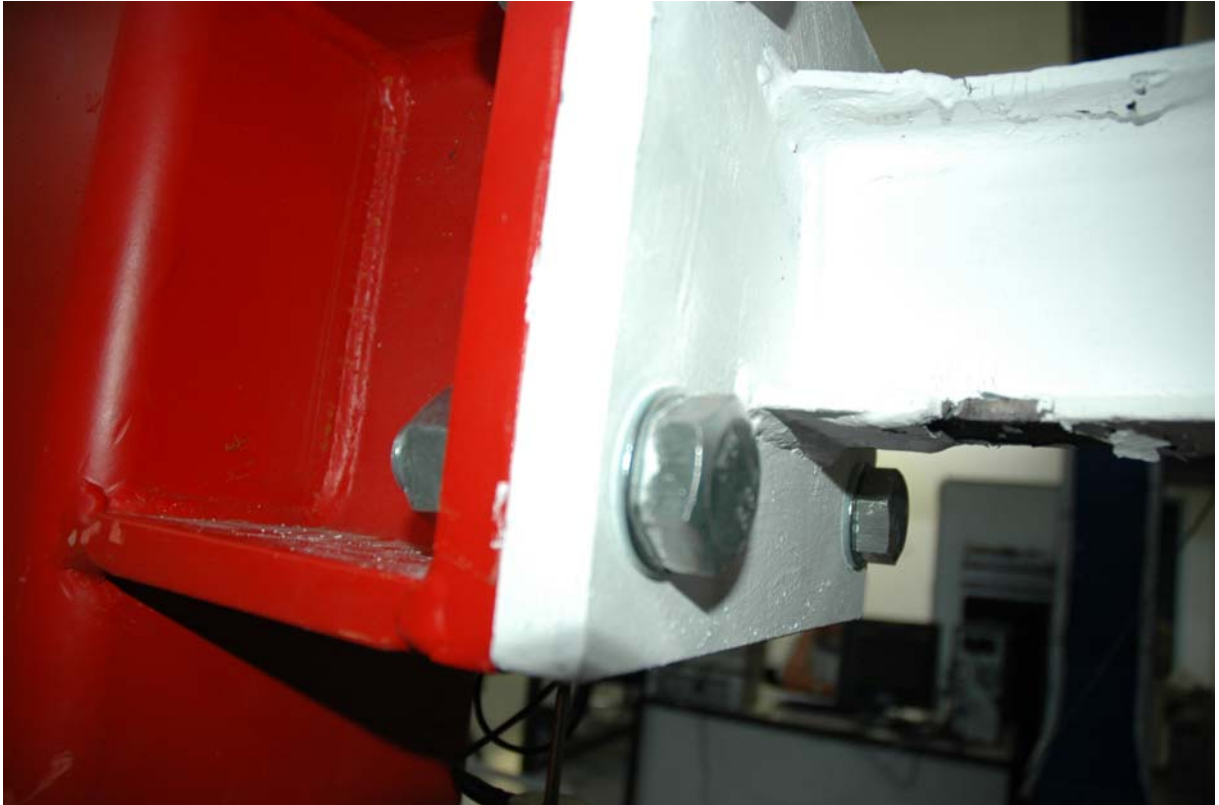
Φωτ. 5.1.3. Όψη του δοκιμίου 1 IPE 100, παραμορφωμένου



Φωτ. 5.1.4. Όψη του δοκιμίου 1 IPE 100, αρχή της αστοχίας



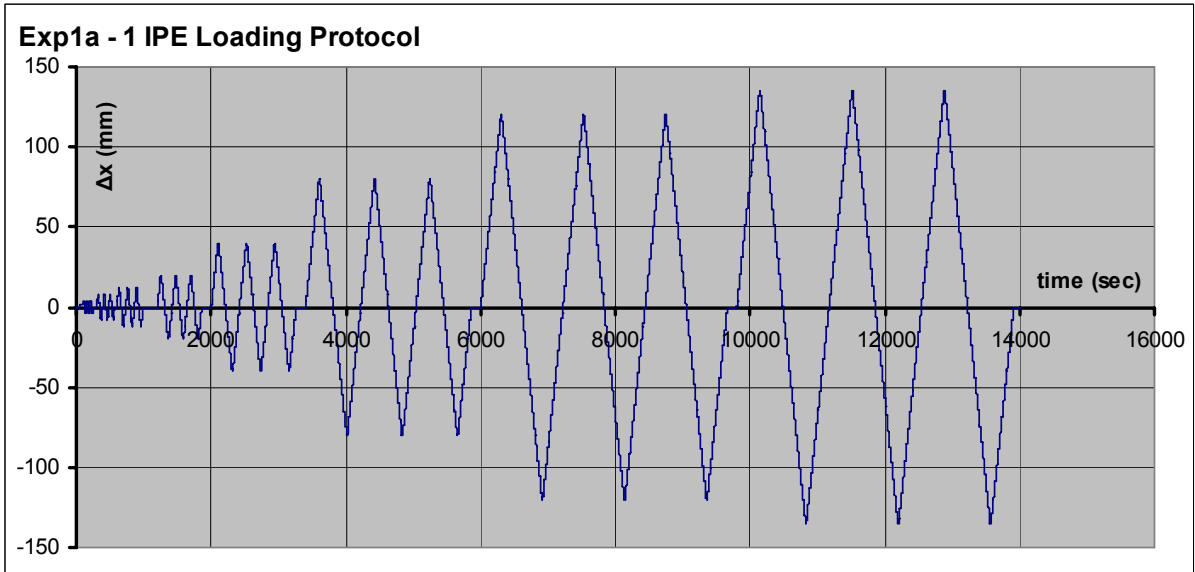
Φωτ. 5.1.5. Όψη του δοκιμίου 1 IPE 100, αρχή της αστοχίας, λεπτομέρεια



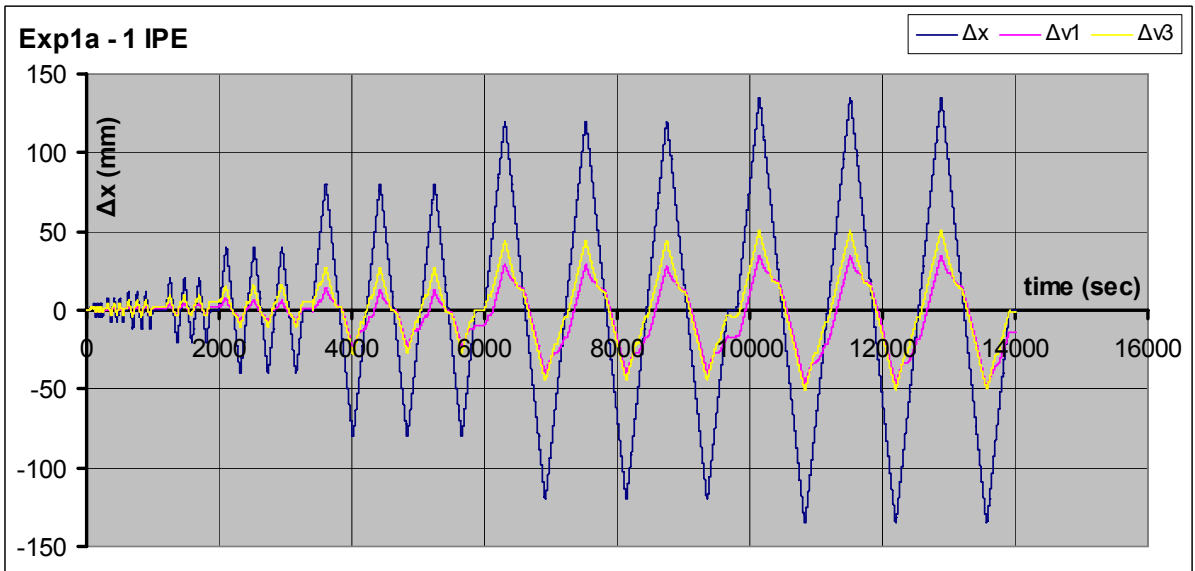
Φωτ. 5.1.6. Περιοχή στήριξης του δοκιμίου 1 IPE 100, αρχή της αστοχίας, λεπτομέρεια



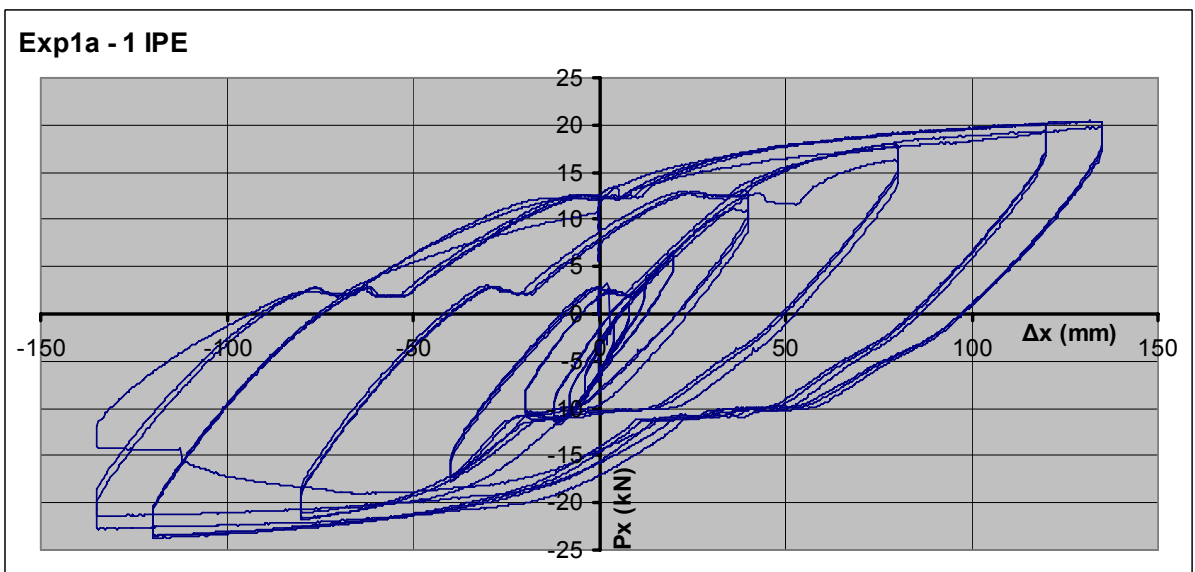
Φωτ. 5.1.7 . Κάτοψη περιοχής στήριξης του δοκιμίου 1 IPE 100, αρχή της αστοχίας, λεπτομέρεια



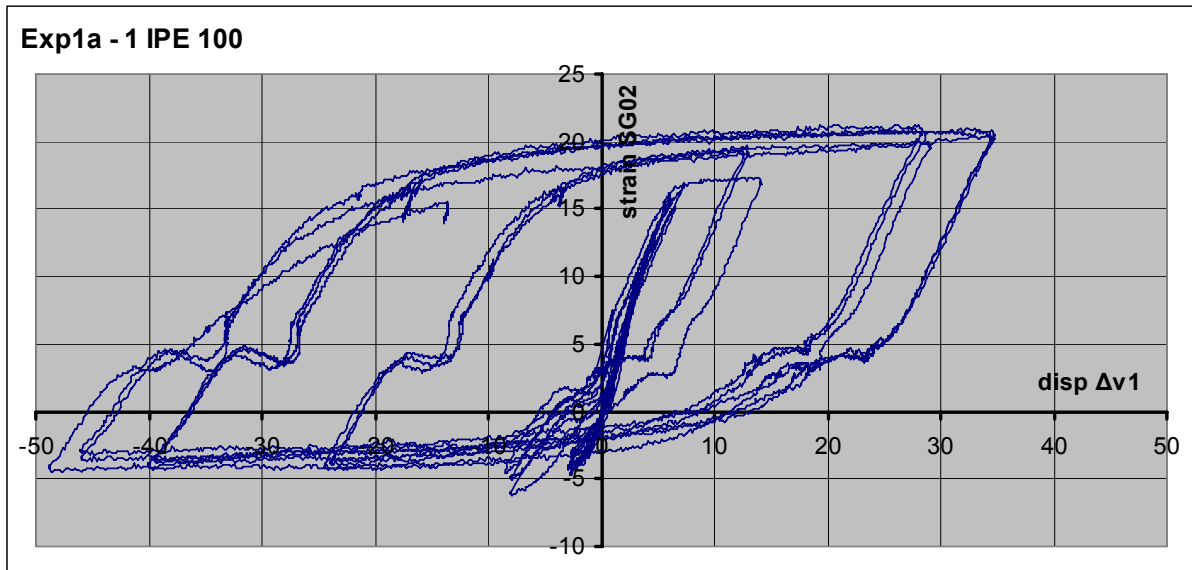
Διαγρ. 5.1.1. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (1 IPE)



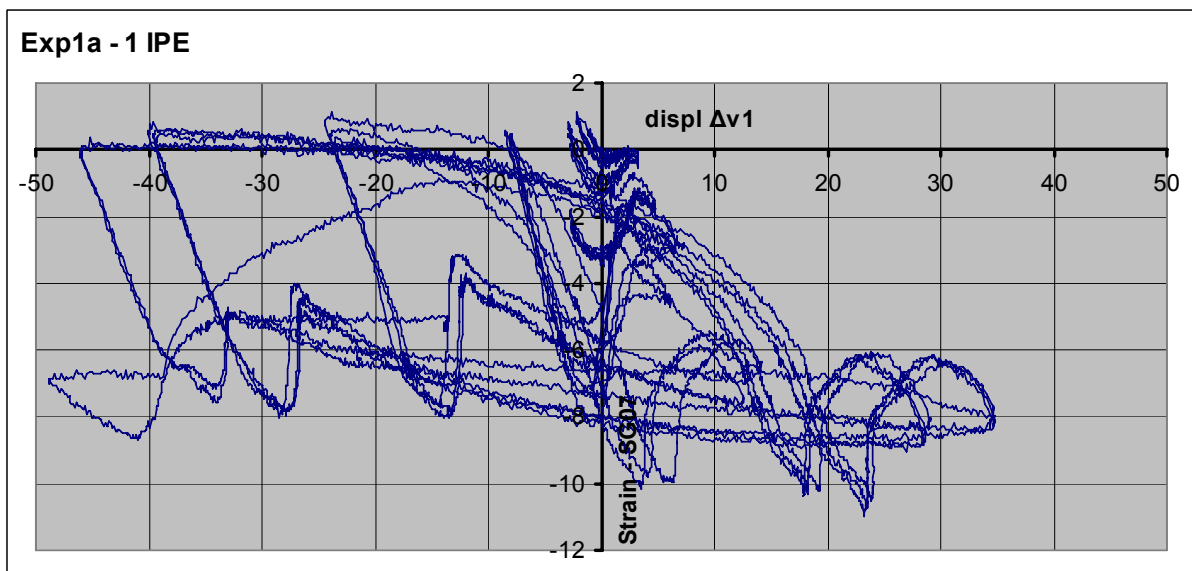
Διαγρ. 5.1.3. Διάγραμμα οριζόντιων και διατμητικών μετακινήσεων (1 IPE)



Διαγρ. 5.1.2. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (1 IPE)



Διαγρ. 5.1.4. Διάγραμμα διαμηθικών μετακινήσεων-παραμορφωσης ακραίας ίνας (1 IPE)



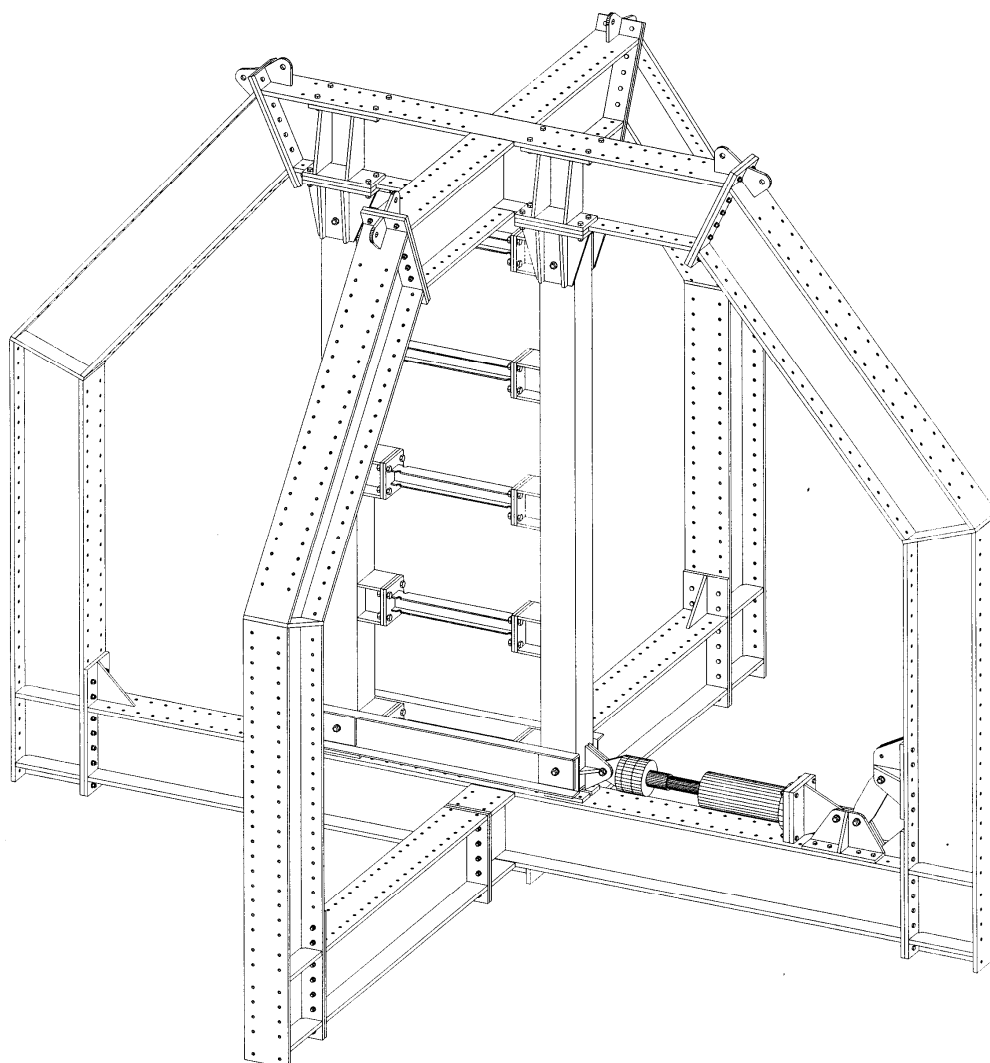
Διαγρ. 5.1.5. Διάγραμμα διαμηθικών μετακινήσεων-παραμορφωσης ακραίας ίνας (1 IPE)

5.10 Πείραμα 10 – 5 HE-A 100 με επιμήκεις αποτιμήσεις πελμάτων (dogbones).

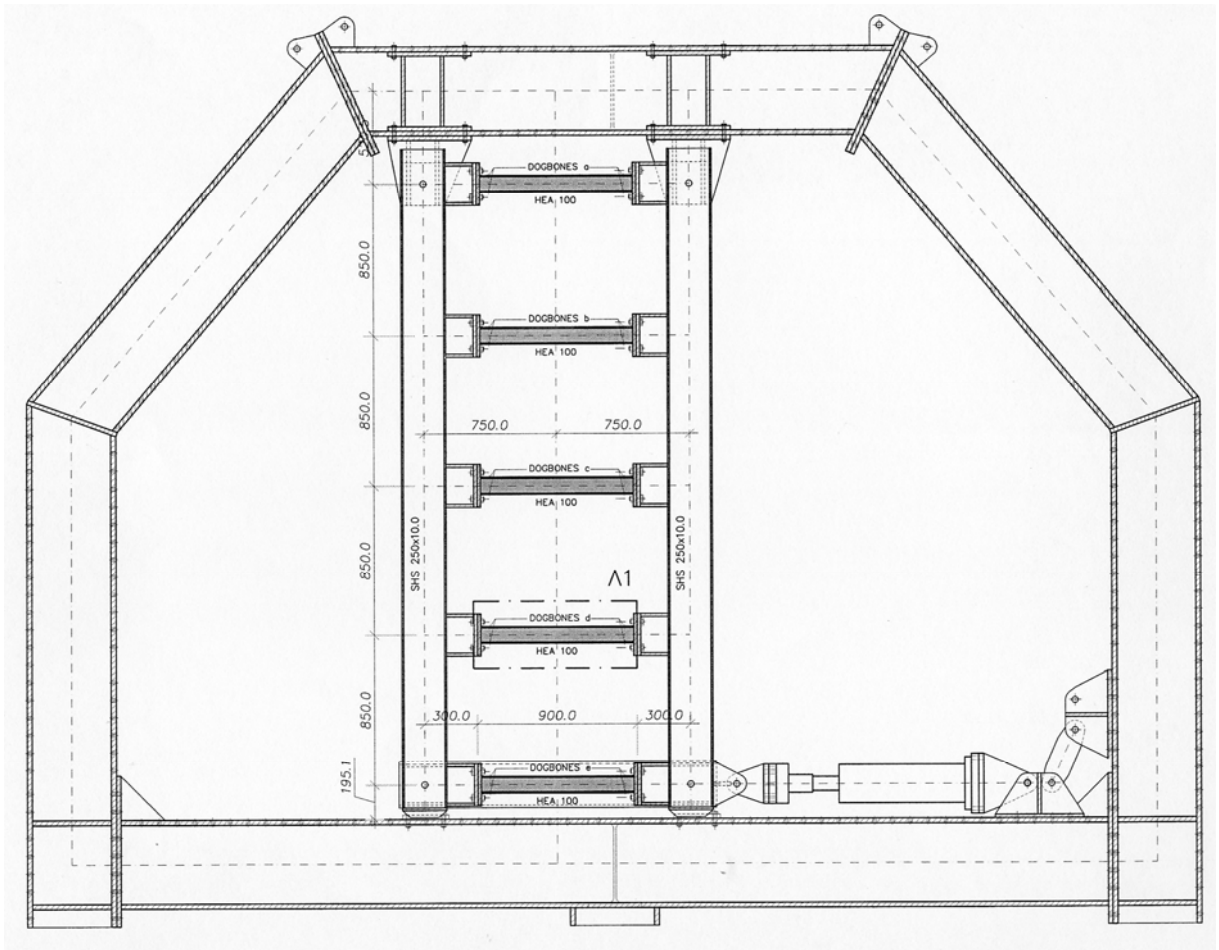
	#	Τύπος δοκιμίου	Ημερομ.	displ Δx	Σχόλια
10	5c	5 HEA 100 (slots)	13-11-2007	0-150 mm	Εγκάρσιες εγκοπές

Τρίτο πείραμα με αναμενόμενη προοδευτική αστοχία μεταξύ των συνδετήριων δοκών, με πλήρη διάταξη και ίδιες συνδετήριες δοκούς HE-A 100, με επιμήκεις εγκάρσιες εγκοπές (αποτιμήσεις) διαφορετικού βάθους. Το πείραμα ακολούθησε το αρχικό πρωτόκολλο φόρτισης, και ολοκληρώθηκε με τις μέγιστες δυνατές, 150 mm.

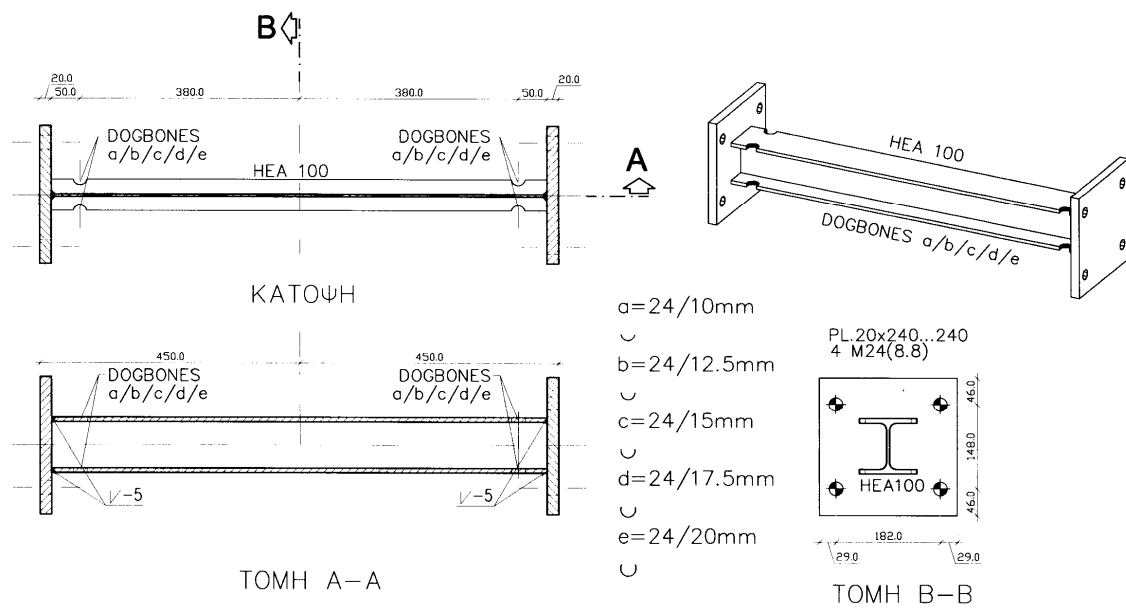
Το πείραμα ολοκληρώθηκε χωρίς επιτυχία, γιατί η απομείωση της διατομής δεν άλλαξε την τάξη μεγέθους της δυσκαμψίας του συστήματος όπως και στην περίπτωση των απλών δοκών HE-A 100, δεν είχαμε είσοδο στην πλαστική περιοχή. Ακόμη εφ' όσον (όπως αναφέρεται αναλυτικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο) η αναλογία της μεταβολής ροπής αδρανείας και ροπής αντιστάσεως ήταν η ίδια, είχε σαν αποτέλεσμα την θεωρητική ταυτόχρονη είσοδο στην πλαστική περιοχή όλων των δοκιμίων.



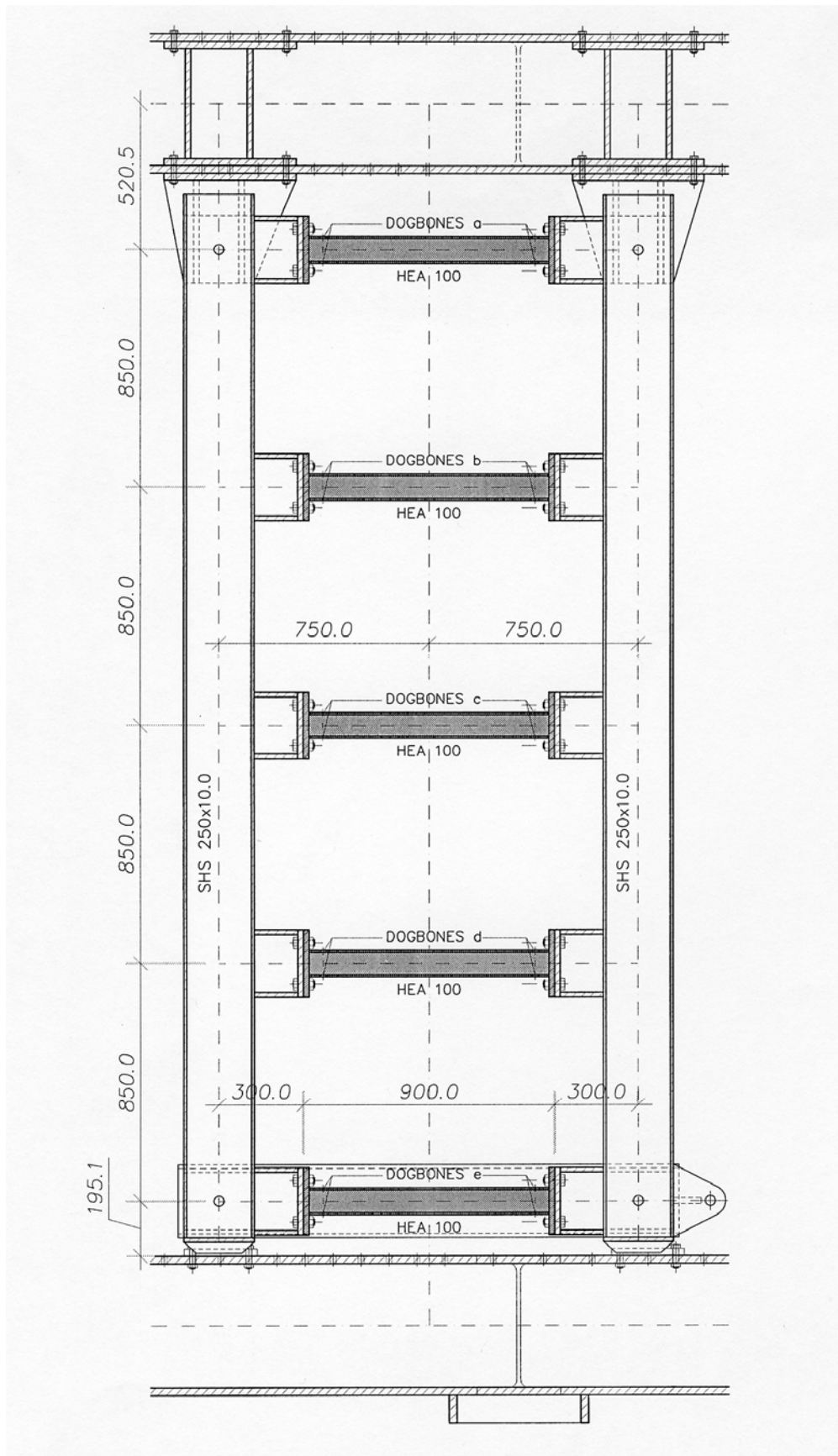
Σχ.5.10.1. Αξονομετρικό σχέδιο της πειραματικής διάταξης με 5 HE-A 100 Dogbones.



Σχ.5.10.2. Συνολική όψη της πειραματικής διάταξης (5 HE-A Dogbones)



Σχ.5.10.3. Τα δοκίμια του πειράματος 5 HE-A Dogbones



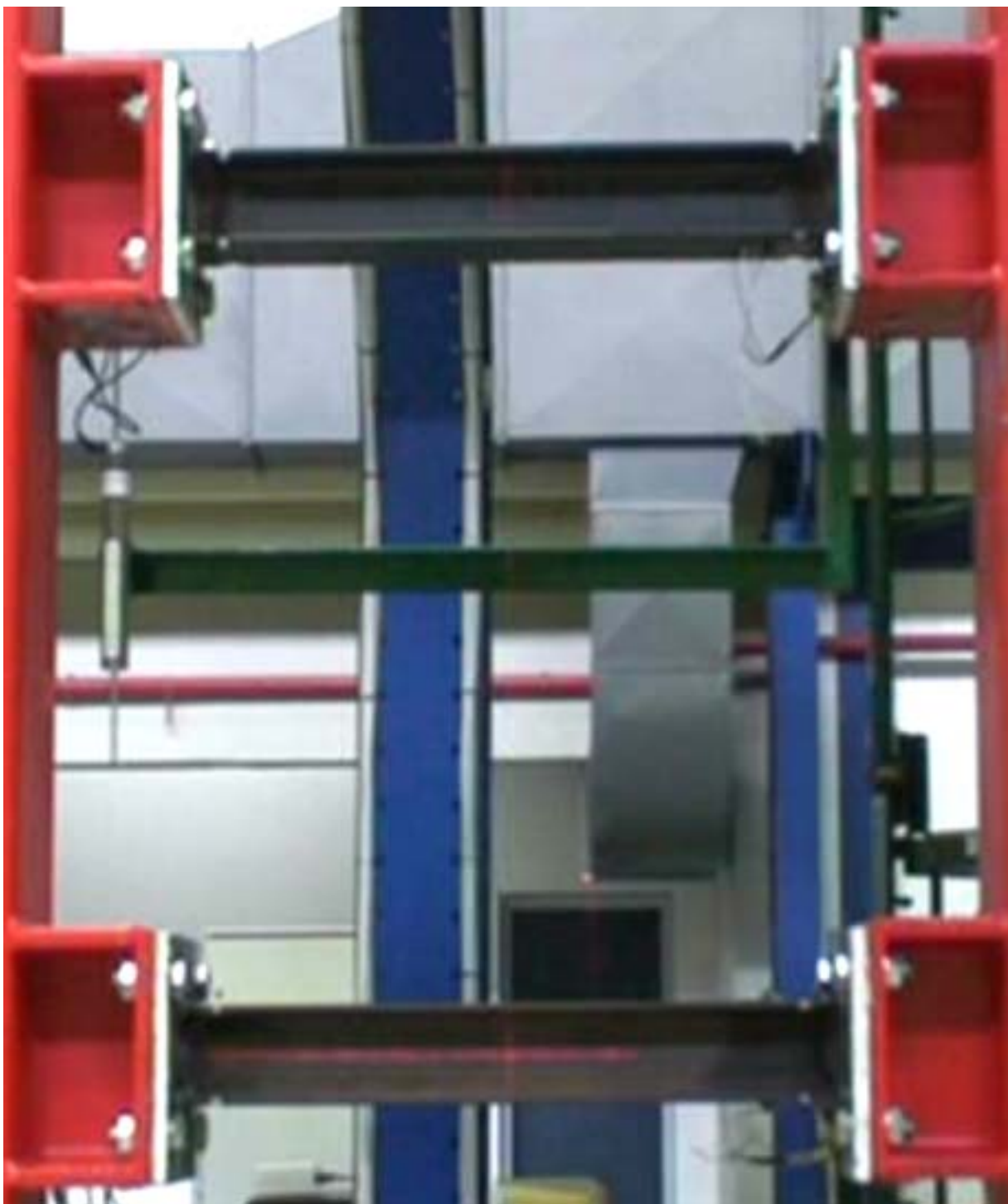
Σχ.5.10.4. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη συστήματος INSTED) 5 HE-A 100 Dogbones



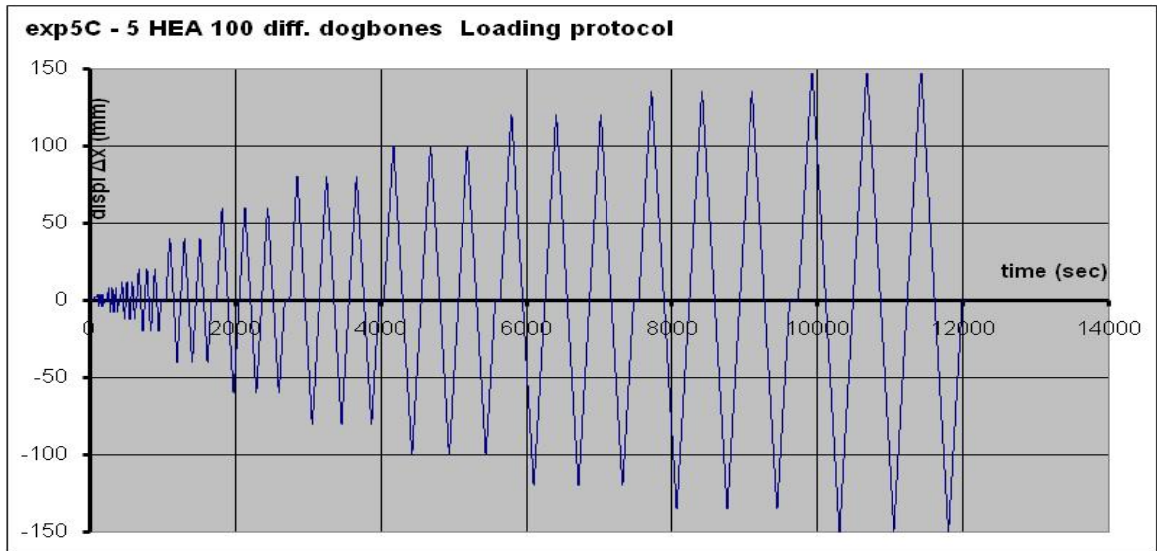
Φωτ. 5.10.1. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED)
Πείραμα 5 HE-A 100 Dogbones



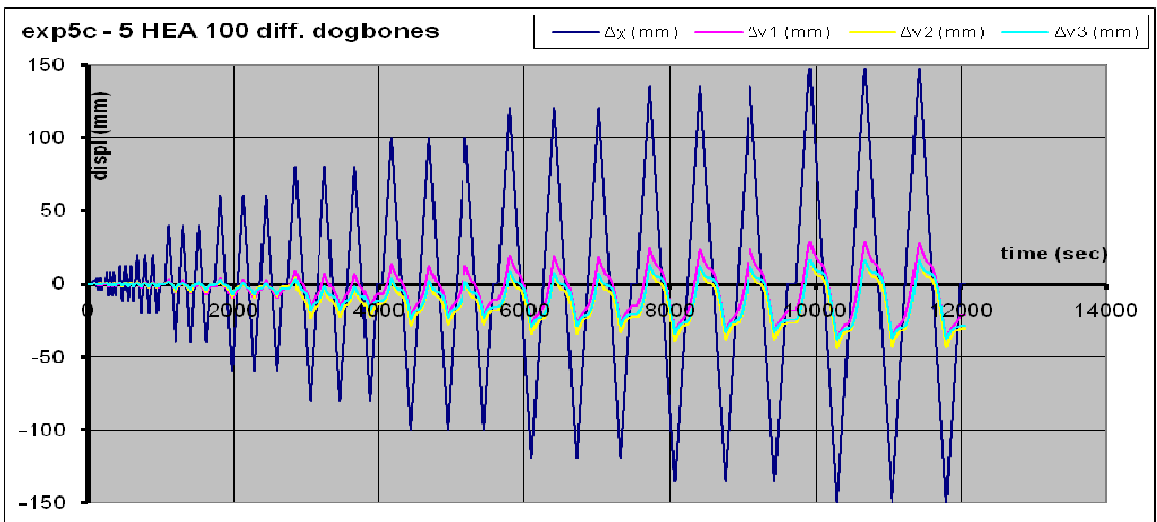
Φωτ. 5.10.2. Γενική διάταξη του πλαισίου δοκιμών του συστήματος INSTED
(5 HE-A 100 Dogbones)



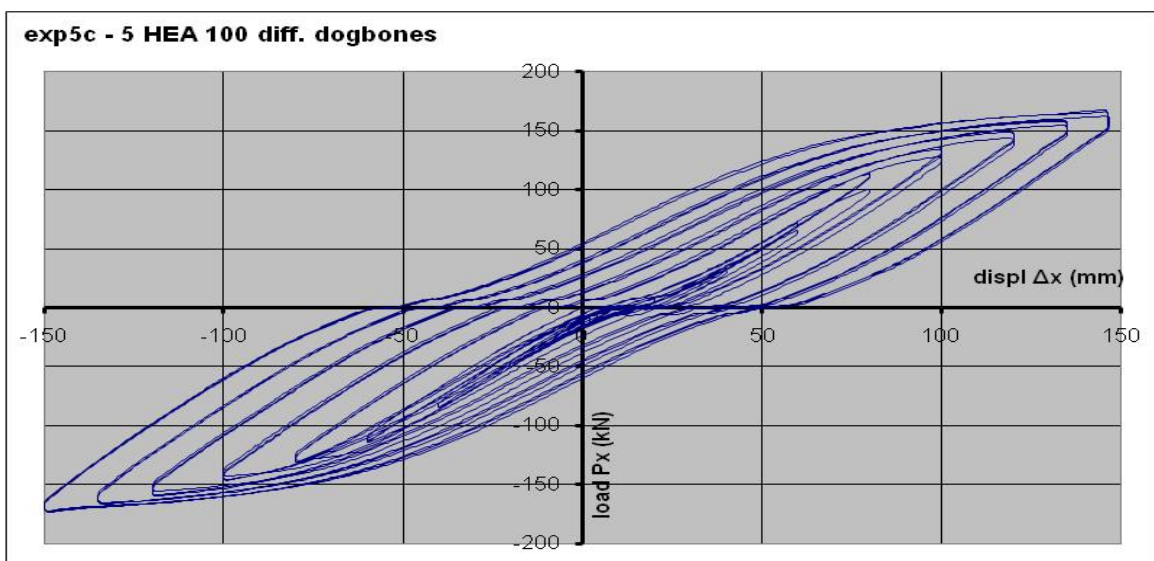
Φωτ. 5.10.3. Γενική διάταξη του πλαισίου δοκιμών του συστήματος INSTED (5 HE-A 100 Dogbones)



Διαγρ. 5.10.1. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (5 SHS 80/5 holes) έως $\Delta x=150$ mm



Διαγρ. 5.10.2. Διάγραμμα οριζοντίων και διατμητικών μετακινήσεων $\Delta x=0-150$ mm (5 SHS 80/5 holes)



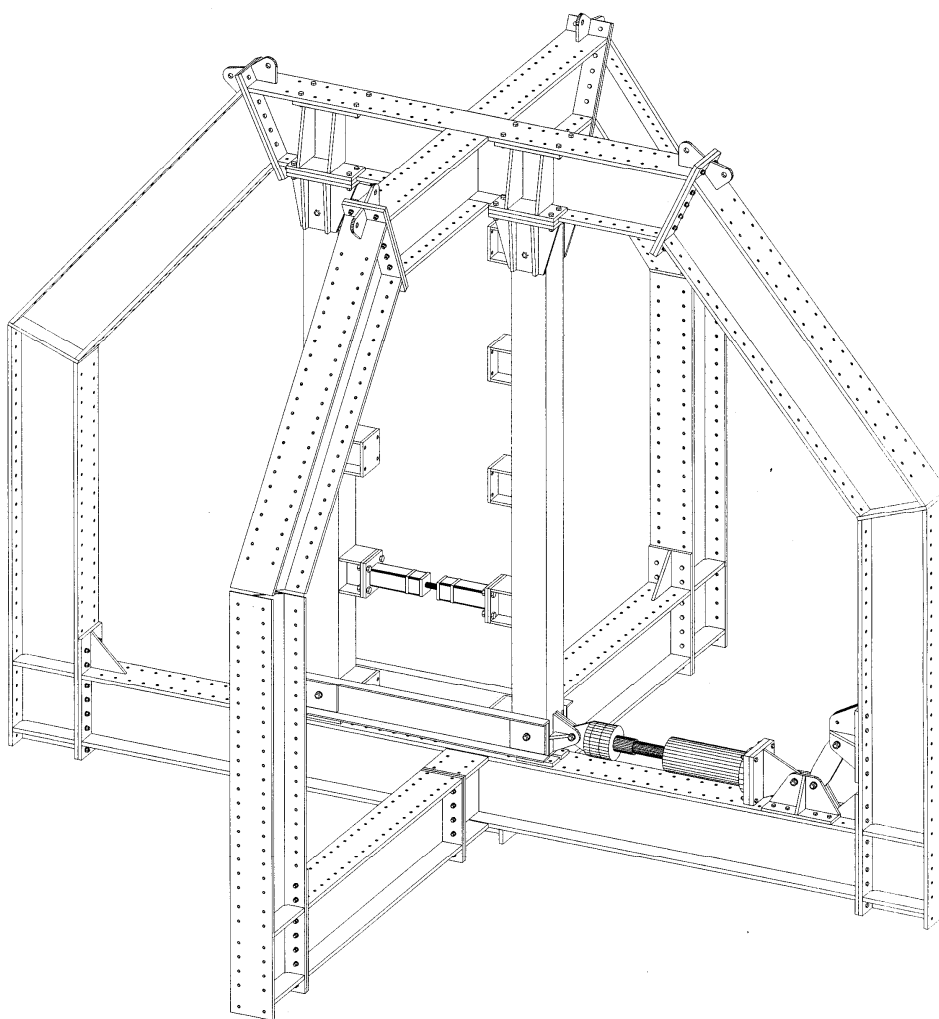
Διαγρ. 5.10.3. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (5 SHS 80/5 holes) $\Delta x=0-150$ mm

5.11 Πείραμα 11 –1 rod Φ33 με μονόπλευρο σπείρωμα (single screw).

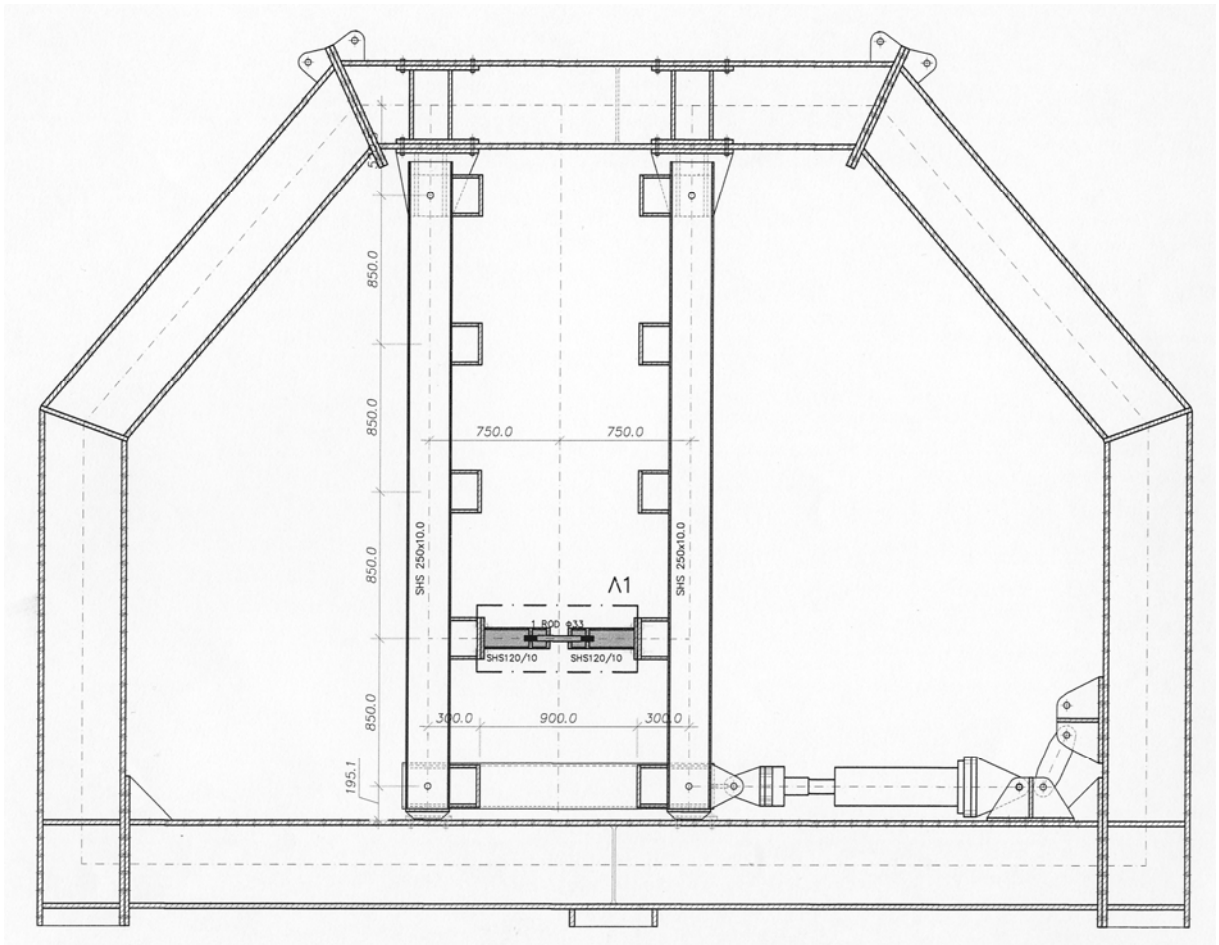
	#	Τύπος δοκιμίου	Ημερομ.	displ Δx	Σχόλια
11	6a	1 rod Φ33 (1screw)	25-10-2007	0-135 mm	

Η τελευταία σειρά πειραμάτων αποτελεί την εξέλιξη των δοκιμών τύπου INERD, με την αλλαγή των τετραγωνικών και ορθογωνικών ράβδων σε κυκλικές. Η τροποποίηση αυτή έχει πολύ ευκολότερη κατεργασία, τόσο των απολήξεων (σπειρώματα) όσο και της διαμόρφωσης των επιφανειών επαφής μεταξύ του δοκιμίου και των δοκών υποδοχέων, όπου είναι δυνατή η διαμόρφωση ομαλής επιφάνεια. Τέλος η κυκλική διατομή παρουσιάζει ομαλότερη είσοδο στην πλαστική ζώνη από την τετραγωνική και μεγαλύτερη ακόμη πλαστιμότητα. Το πείραμα ακολούθησε το αρχικό πρωτόκολλο φόρτισης, και ολοκληρώθηκε με τις μέγιστες μετακινήσεις στο 4%, 135 mm.

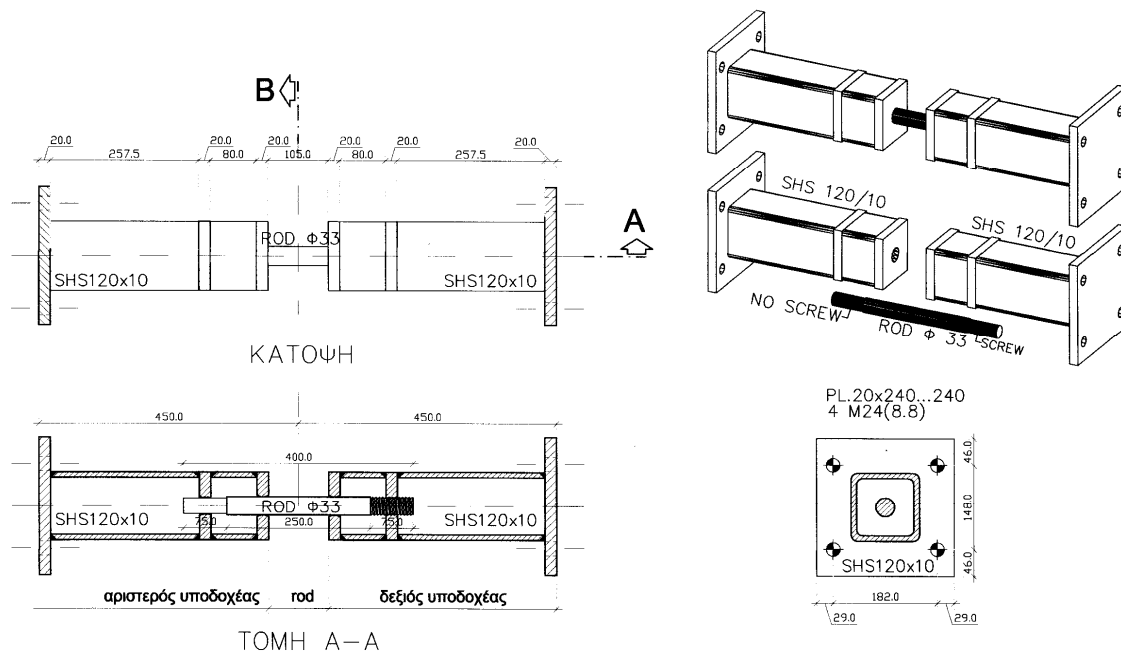
Το δοκίμιο είχε μονόπλευρο σπείρωμα κοχλίωσης, που επέτρεπε την σχετική ολίσθηση στις δοκούς υποδοχής χωρίς αρχικά τουλάχιστον ανάπτυξη εφελκυστικών δυνάμεων. Το πείραμα ολοκληρώθηκε με μεγάλη επιτυχία, με αστοχία σε δύο από τις πέντε ράβδους. Στην αστοχία επέδρασε και η καταπόνηση επαφής στις θέσεις της μέγιστης ροπής.



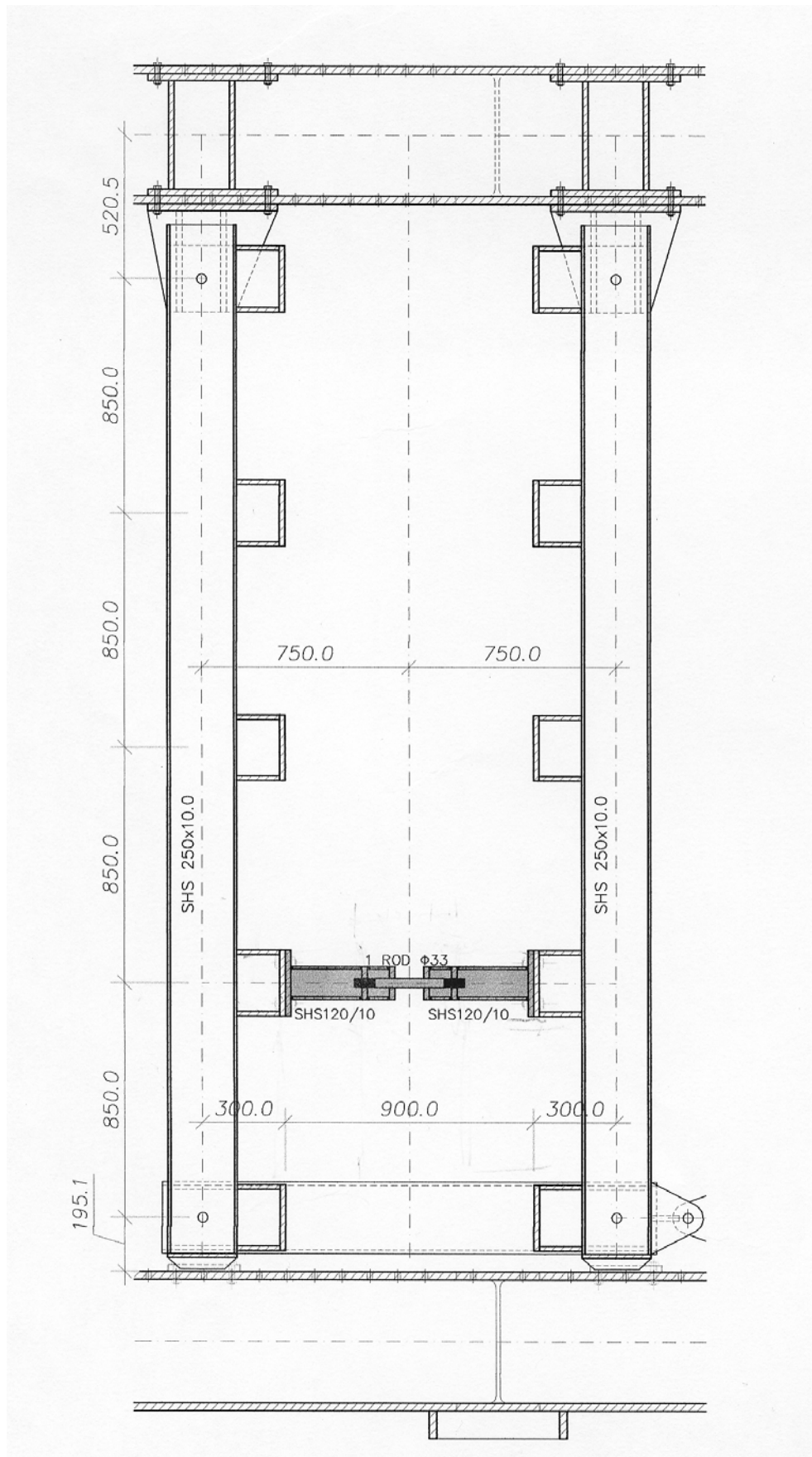
Σχ.5.11.1. Αξονομετρικό σχέδιο της πειραματικής διάταξης με 1 ROD Single screw..



Σχ.5.11.2. Συνολική όψη της πειραματικής διάταξης 1 ROD Single screw

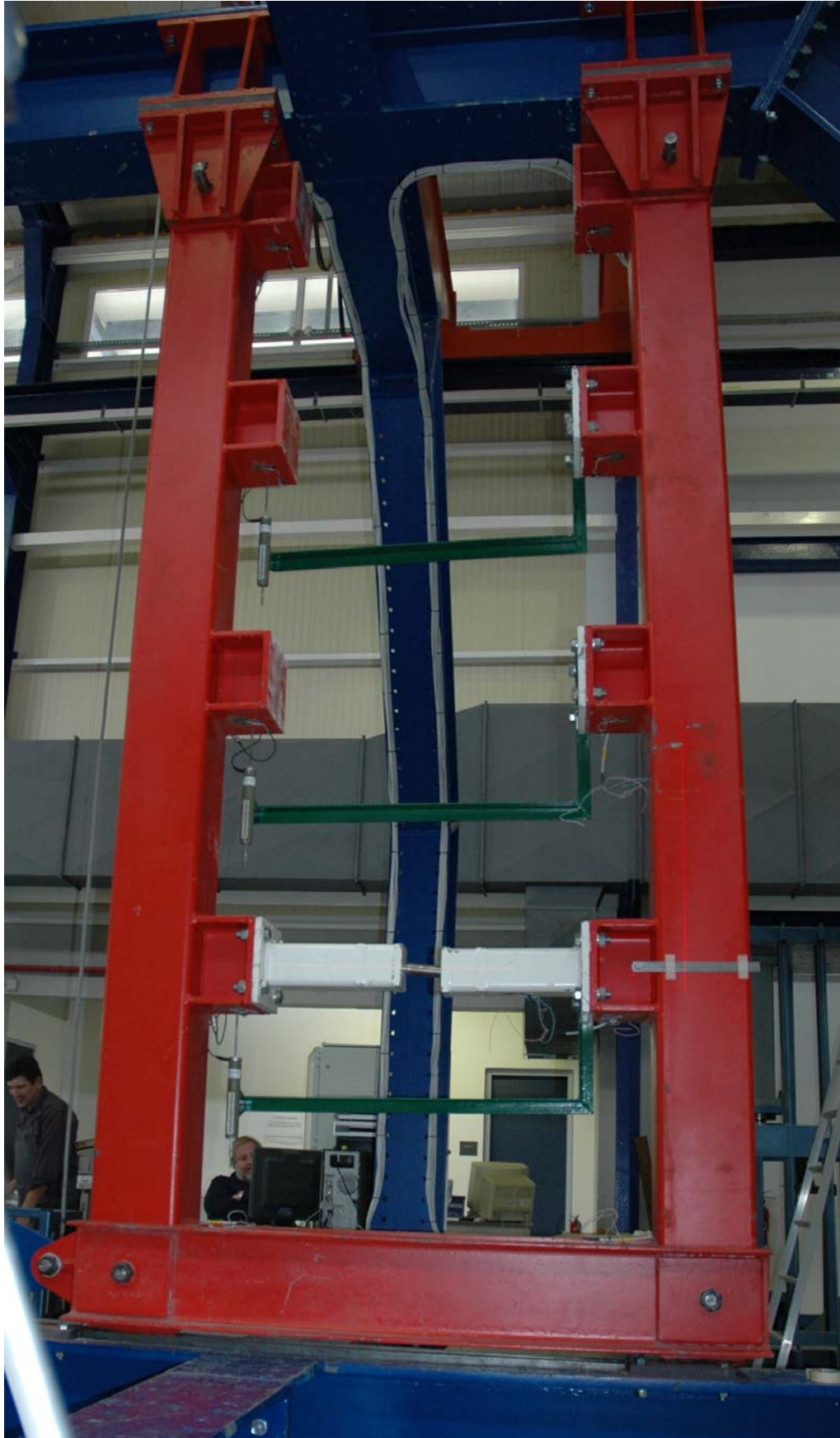


Σχ.5.11.3. Τα δοκίμια του πειράματος 1 ROD Single screw

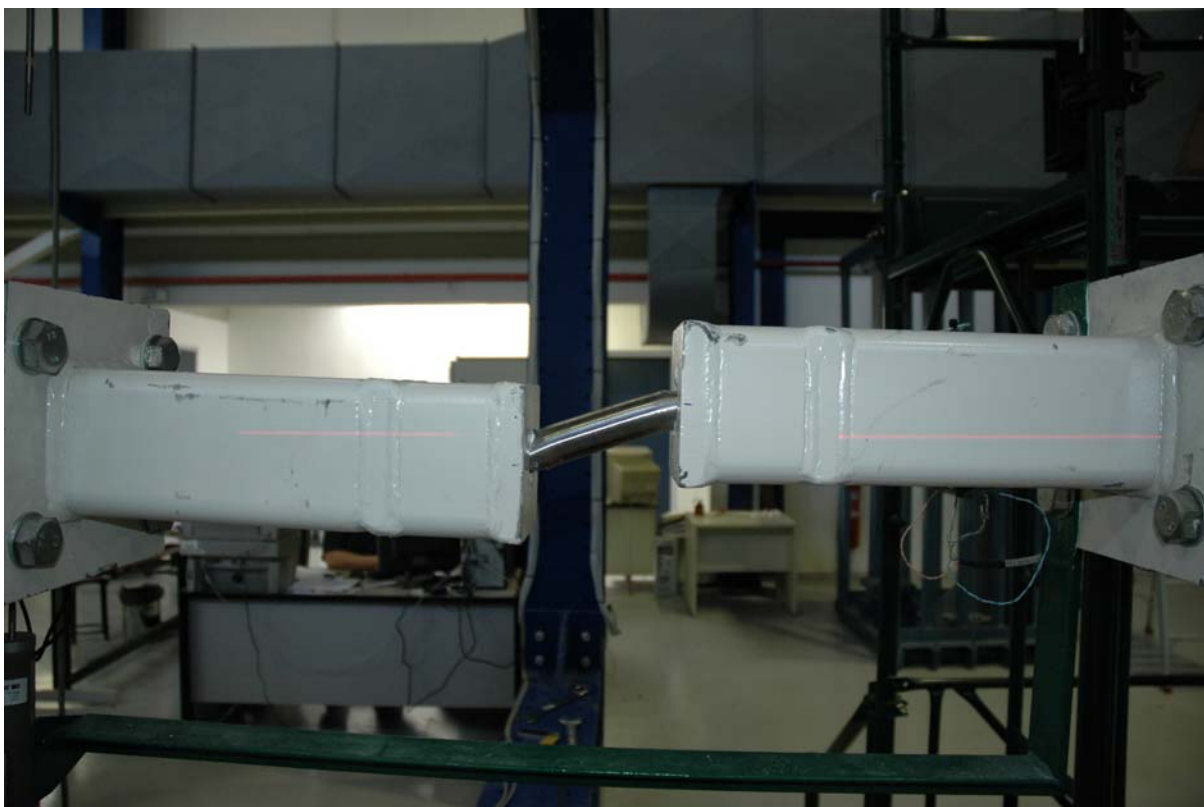


Σχ.5.114. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 1 ROD Single screw

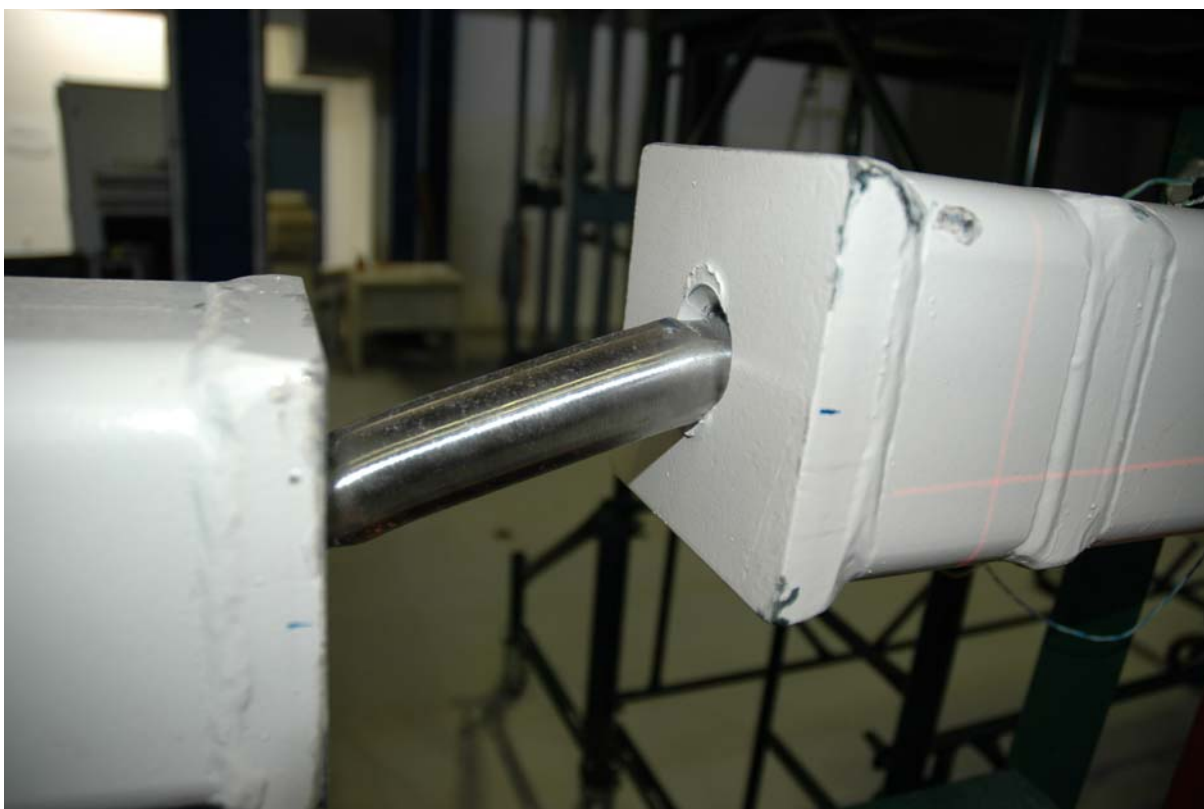
IN ST E D - Καινοτόμα συστήματα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας, σε πολύροφα αντισεισμικά μεταλλικά κτίρια.
Φαίδων Καρυδάκης



Φωτ.5.11.1. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 1 ROD single screw



Φωτ. 5.11.3. Όψη του δοκιμίου 1 ROD Φ33 single screw σε προχωρημένη παραμόρφωση.



Φωτ. 5.11.4. Όψη του δοκιμίου 1 ROD Φ33 single screw σε προχωρημένη παραμόρφωση. Η τοπική κάκωση στην επιφάνεια επαφής είναι εμφανής.



Φωτ. 5.11.5. Όψη του δοκιμίου 1 ROD $\Phi 33$ single screw σε προχωρημένη παραμόρφωση



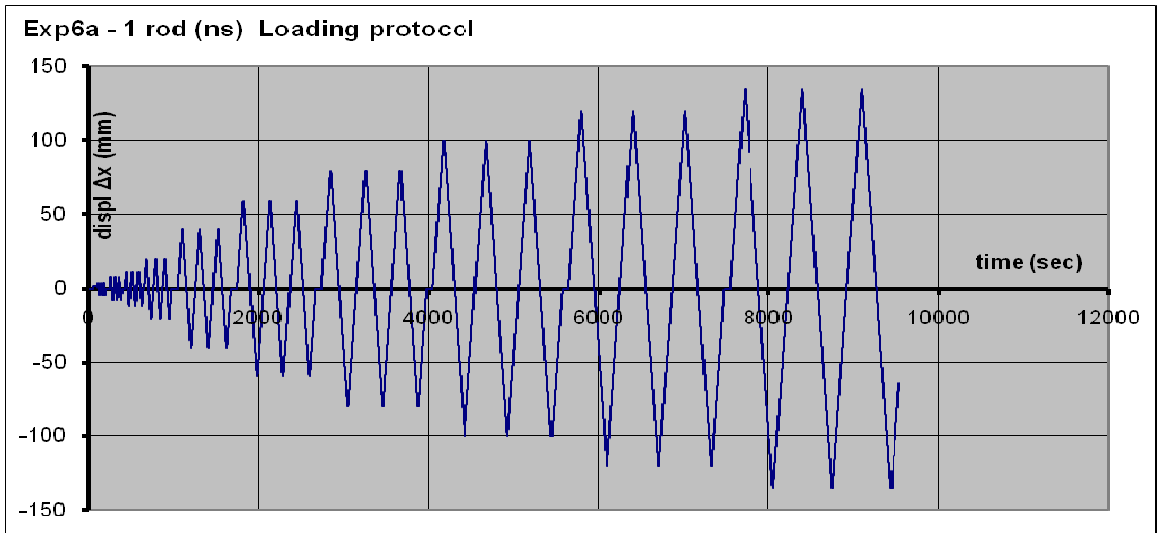
Φωτ. 5.11.6. . Όψη του δοκιμίου 1 ROD $\Phi 33$ single screw μετά την ολοκλήρωση του πειράματος



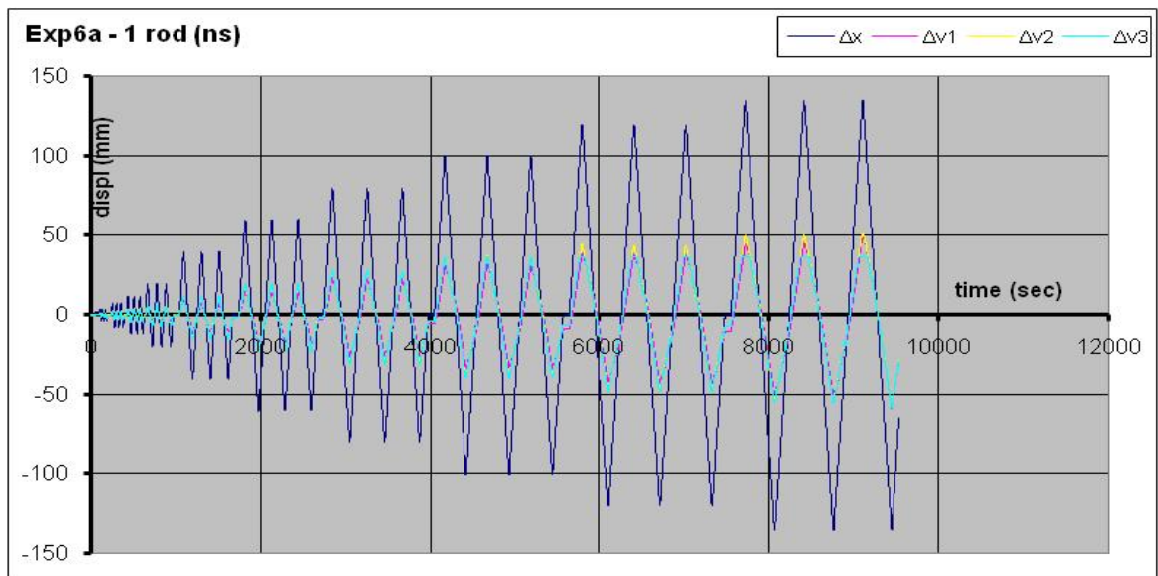
Φωτ. 5.11.7. Όψη του δοκιμίου 1 ROD $\Phi 33$ single screw προ της αστοχίας.



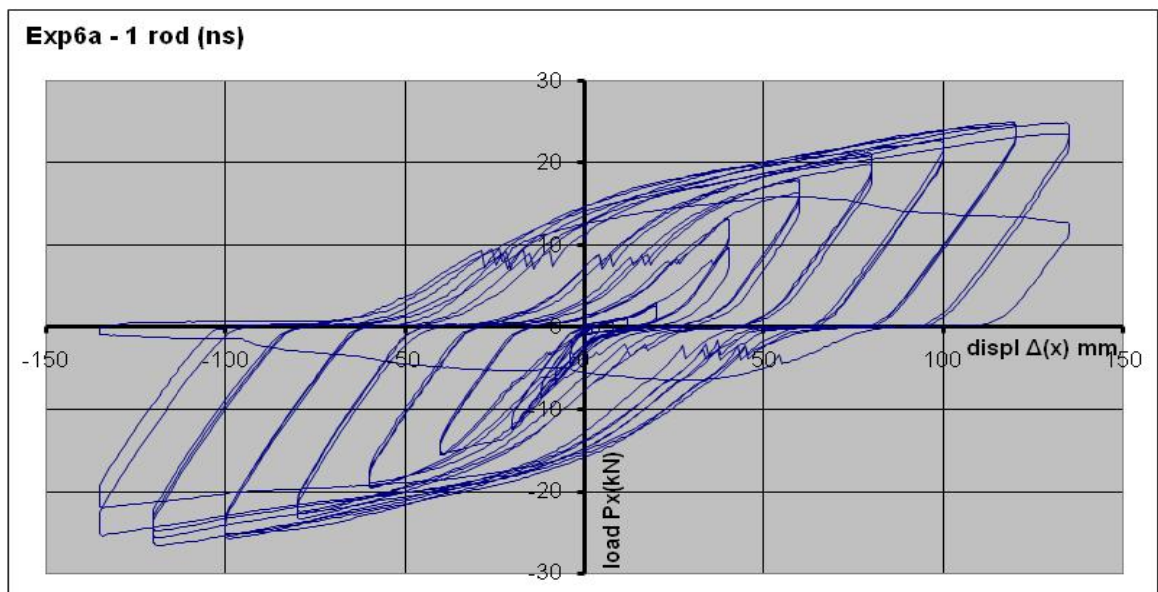
Φωτ. 5.11.8. Όψη του δοκιμίου 1 ROD $\Phi 33$ single screw προ της αστοχίας. Είναι εμφανής η επίδραση του τοπικού τραυματισμού από την επιφάνεια έδρασης.



Διαγρ. 5.11.1. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (1 ROD $\Phi 33$) έως $\Delta x = 135$ mm



Διαγρ. 5.11.2. Διάγραμμα οριζοντίων και διαμηθικών μετακινήσεων (1 ROD $\Phi 33$) single screw



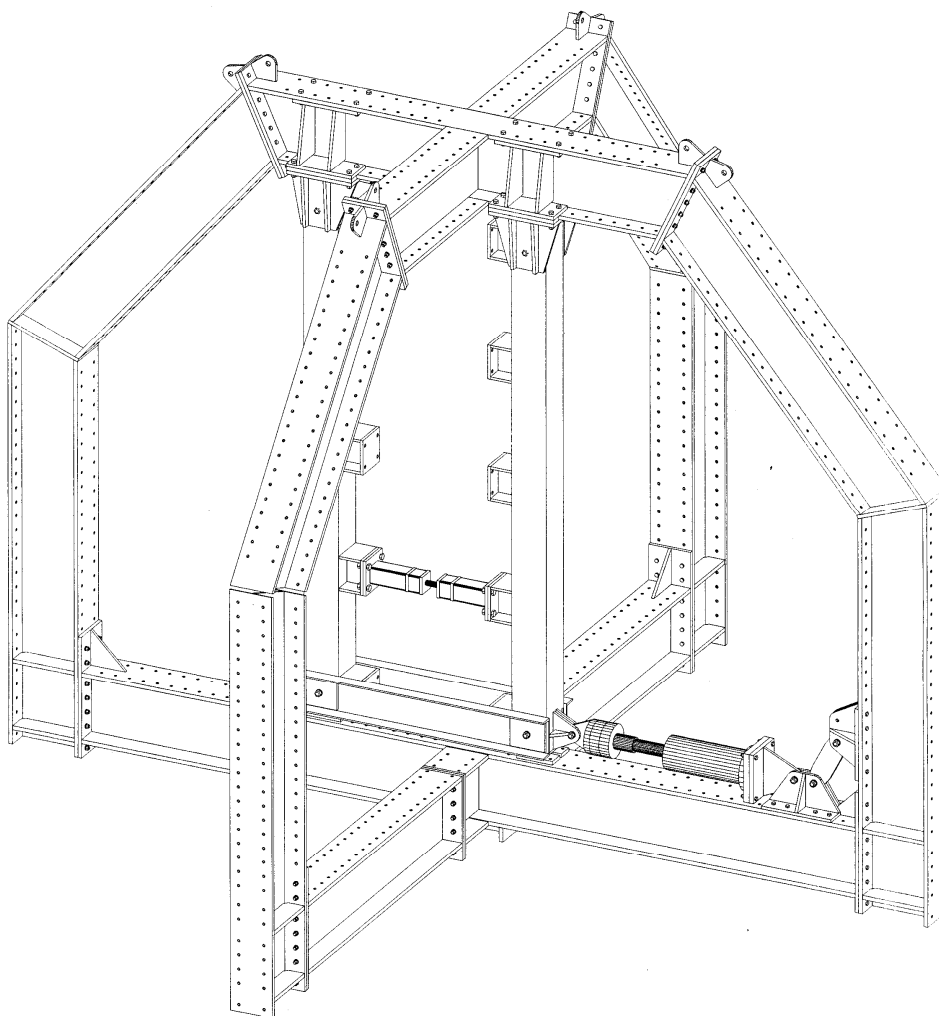
Διαγρ. 5.11.3. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (1 ROD $\Phi 33$) single screw

5.12 Πείραμα 12 – 1 rod $\Phi 33$ με αμφίπλευρο σπείρωμα (double screw).

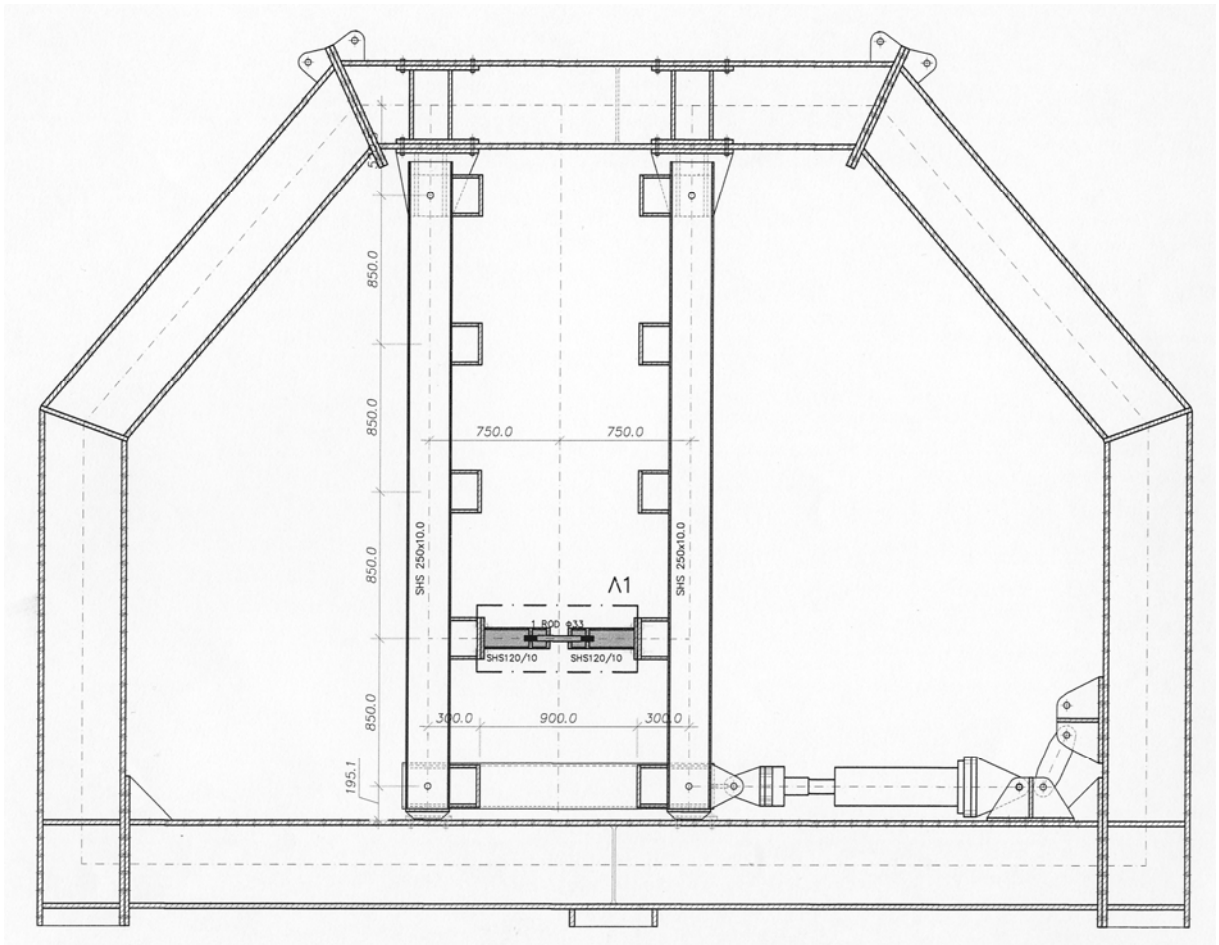
	#	Τύπος δοκιμίου	Ημερομ.	displ Δx	Σχόλια
12	6b	1 rod $\Phi 33$ (2screw)	30-10-2007	0-135 mm	

Η διαφοροποίηση από το προηγούμενο πείραμα, είναι η χρήση κυκλικού δοκιμίου τύπου INERD, με διπλή κοχλίωση, αντίθετη στα δύο άκρα, ώστε να είναι δυνατή η ρύθμιση του μήκους του δοκιμίου και η εύκολη προσαρμογή του στις κατασκευαστικές ατέλειες. Η ύπαρξη της διπλής κοχλίωσης με σταθερό, αλλά σχετικά μικρό, μήκος δοκιμίου, οδηγεί στην ανάπτυξη σημαντικών αξονικών δυνάμεων, σε μεγάλες μετακινήσεις. Το πείραμα ακολούθησε το αρχικό πρωτόκολλο φόρτισης, και ολοκληρώθηκε με τις μέγιστες μετακινήσεις στο 4%, 135 mm.

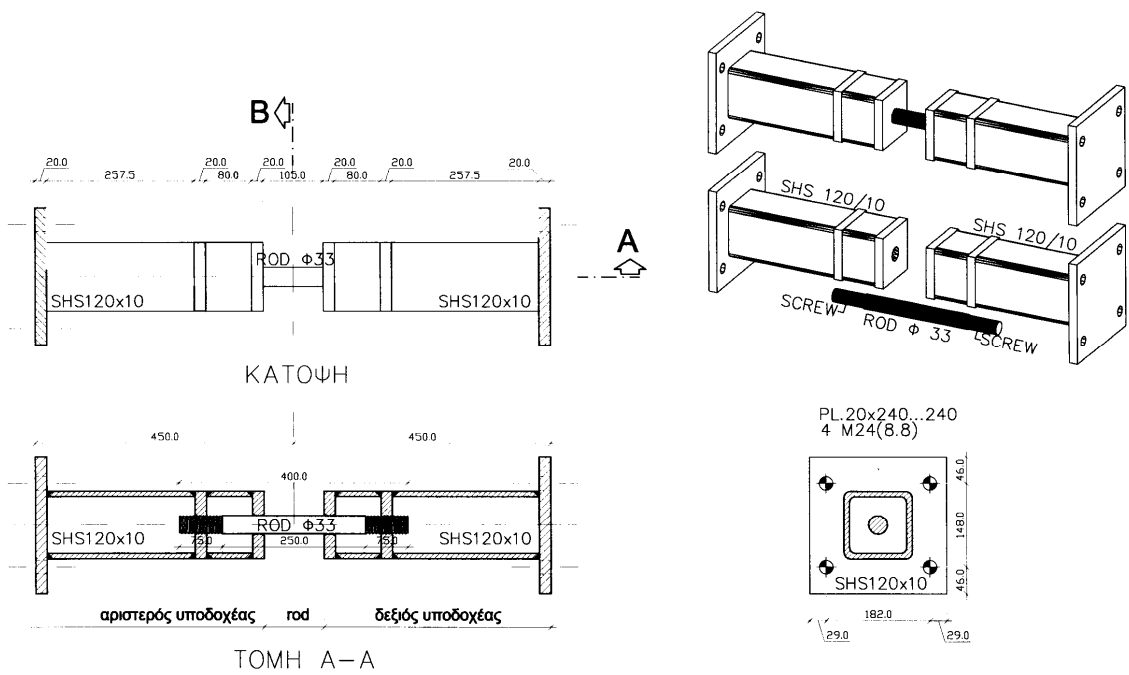
Το πείραμα ολοκληρώθηκε με μεγάλη επιτυχία, με πλήρη αστοχία όλων των ράβδων, στην οποία επέδρασε καθοριστικά η καταπόνηση επαφής.



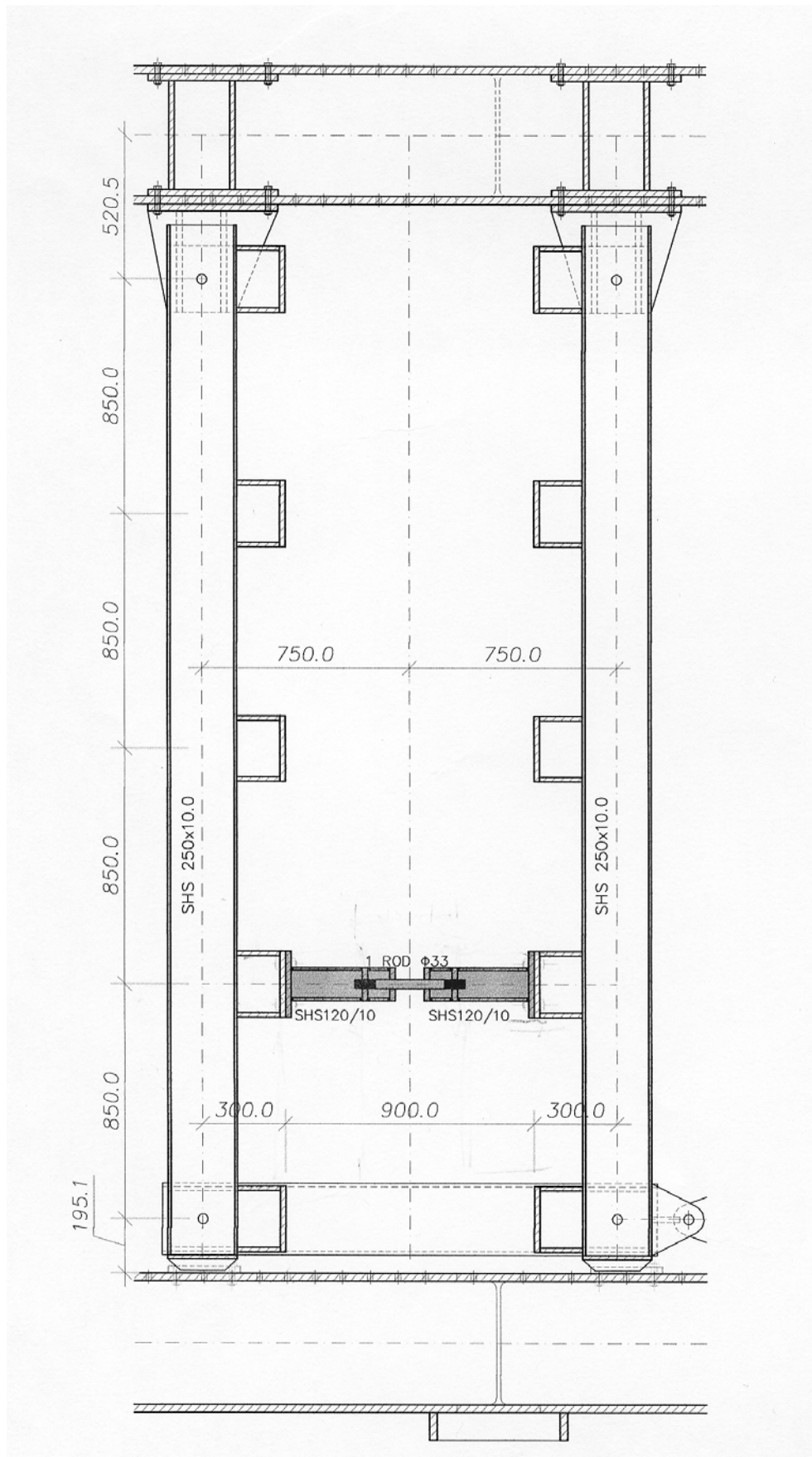
Σχ.5.12.1. Αξονομετρικό σχέδιο της πειραματικής διάταξης με 1 ROD double screw..



Σχ.5.12.2. Συνολική όψη της πειραματικής διάταξης 1 ROD double screw

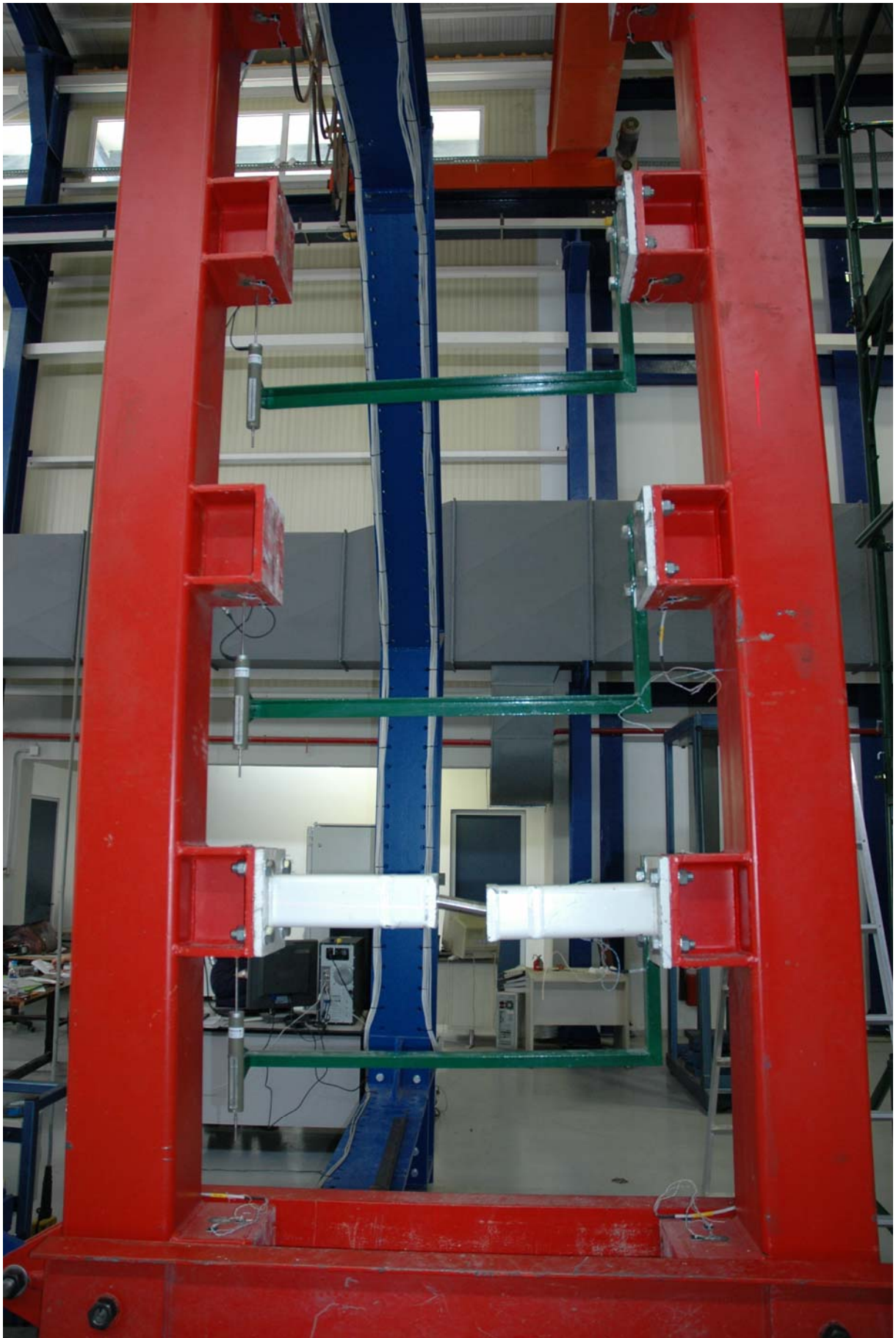


Σχ.5.12.3. Τα δοκίμια του πειράματος 1 ROD double screw



Σχ.5.12.4. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 1 ROD double screw

IN ST E D - Καινοτόμα συστήματα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας, σε πολύροφα αντισεισμικά μεταλλικά κτίρια.
Φαίδων Καρυδάκης



Φωτ. 5.12.1. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 1 ROD double screw



Φωτ. 5.12.2. Όψη του δοκιμίου 1 ROD Φ33 double screw σε προχωρημένη παραμόρφωση.



Φωτ. 5.12.3. Όψη του δοκιμίου 1 ROD Φ33 double screw σε προχωρημένη παραμόρφωση.



Φωτ. 5.12.4. Όψη του δοκιμίου 1 ROD $\Phi 33$ double screw σε αστοχία



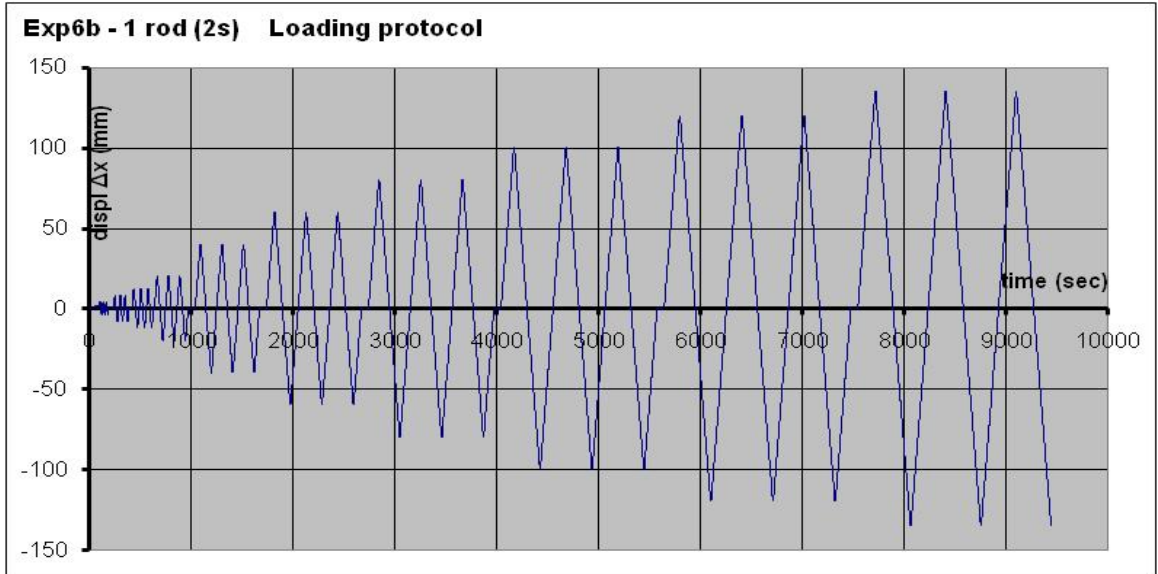
Φωτ. 5.12.5. Όψη του δοκιμίου 1 ROD $\Phi 33$ single screw σε προχωρημένη παραμόρφωση



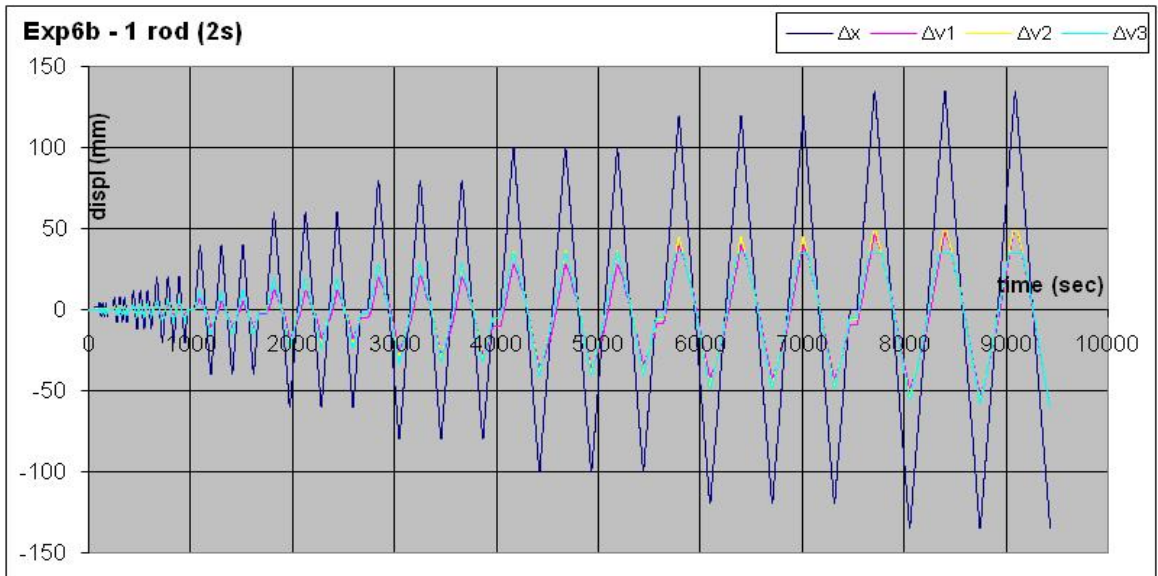
Φωτ. 5.12.6. . Όψη του δοκιμίου 1 ROD $\Phi 33$ double screw μετά την αστοχία



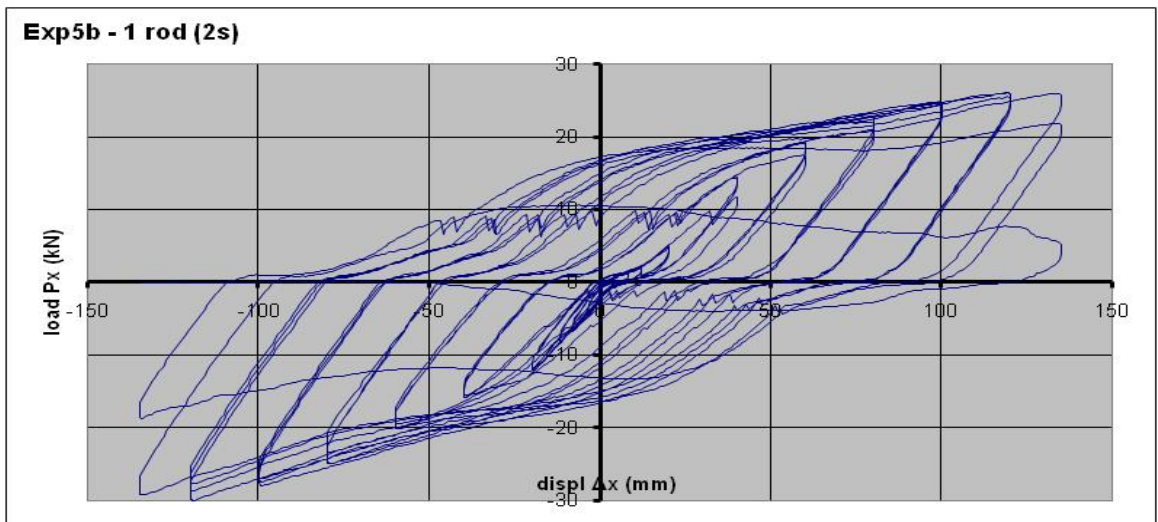
Φωτ. 5.12.7. . Όψη του δοκιμίου 1 ROD $\Phi 33$ double screw μετά την αστοχία.



Διαγρ. 5.11.1. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (1 ROD Φ3) έως $\Delta\chi=135$ mm double screw



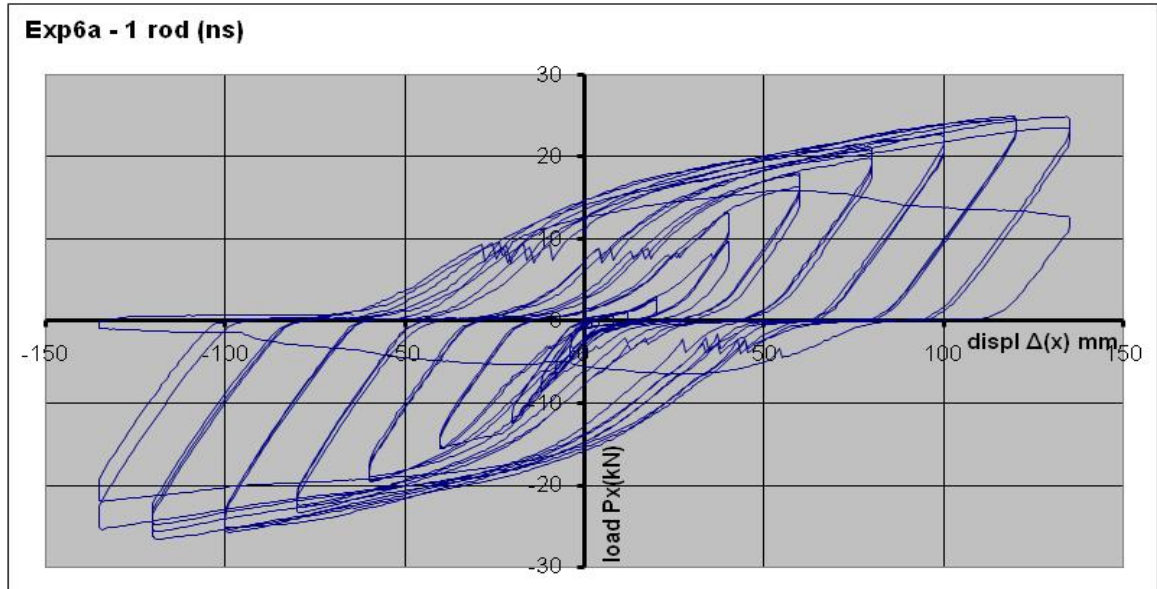
Διαγρ. 5.12.2. Διάγραμμα οριζοντίων και διατμητικών μετακινήσεων (1 ROD Φ33) double screw



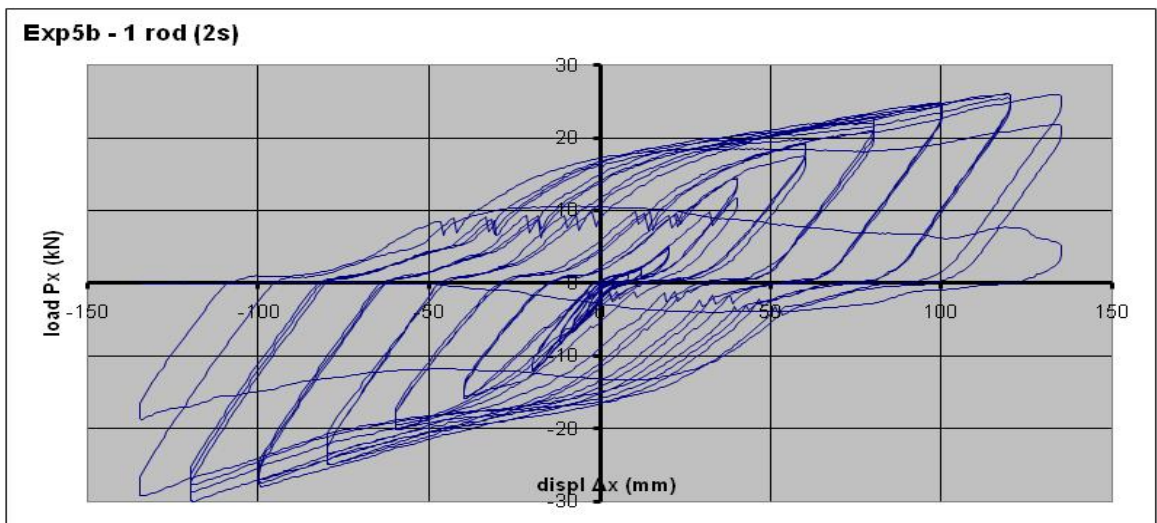
Διαγρ. 5.12.3. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (1 ROD Φ33) double screw

Συγκριτική παρουσίαση των βρόγχων υστέρησης των δύο πειραμάτων με μονόπλευρο η αμφίπλευρο σπείρωμα στα άκρα των ράβδων.

Διακρίνεται μια μικρή αύξηση στην ακαμψία και αντοχή στις οριακές καταστάσεις των μεγάλων παραμορφώσεων, στην περίπτωση της διπλής κοχλίωσης.



Διαγρ. 5.11.3. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (1 ROD Φ33) single screw



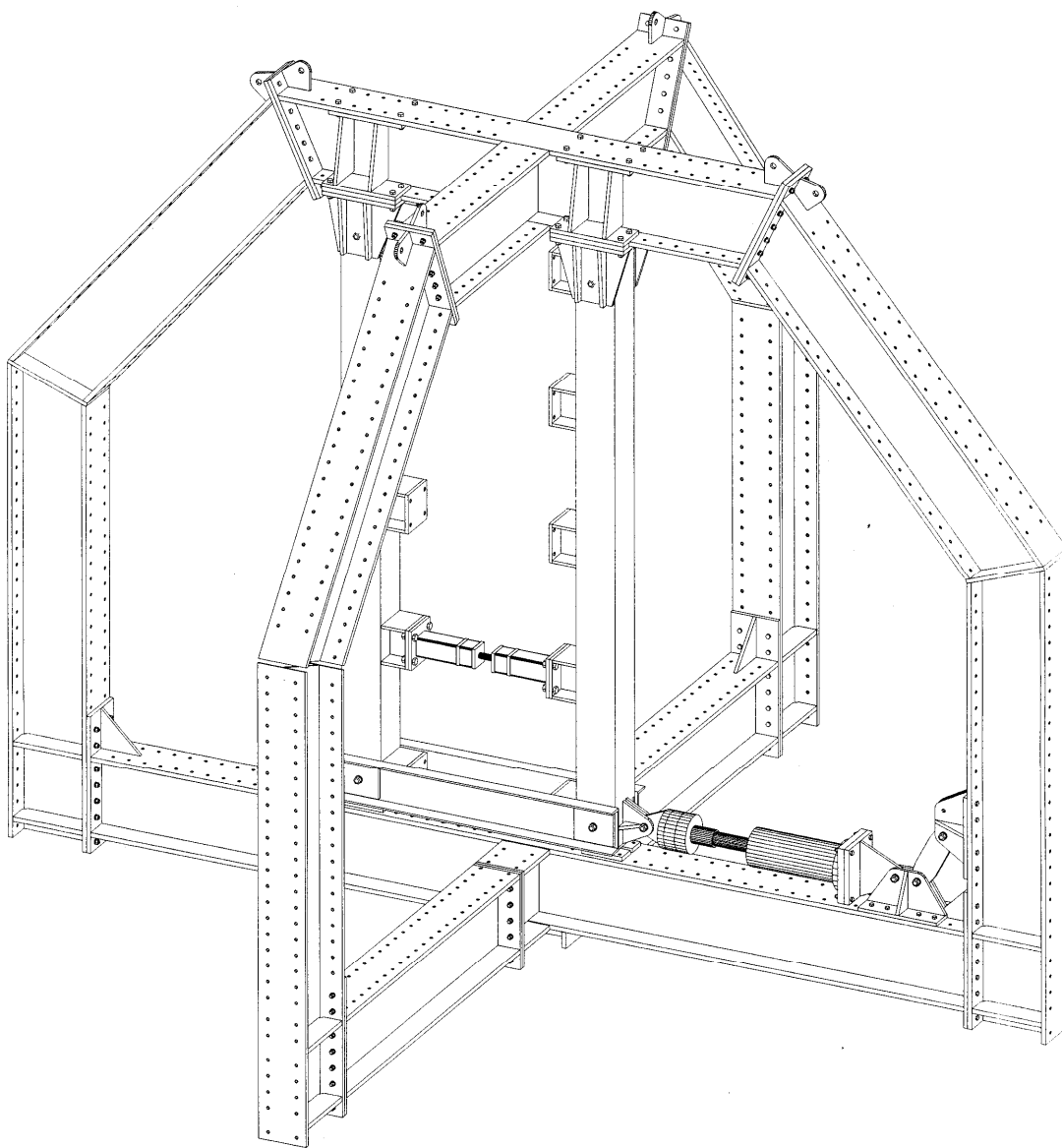
Διαγρ. 5.12.3. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (1 ROD Φ33) double screw

5.13 Πείραμα 13 – Δοκίμιο 1 rod $\Phi 33$ με αμφίπλευρο σπείρωμα (double screw).

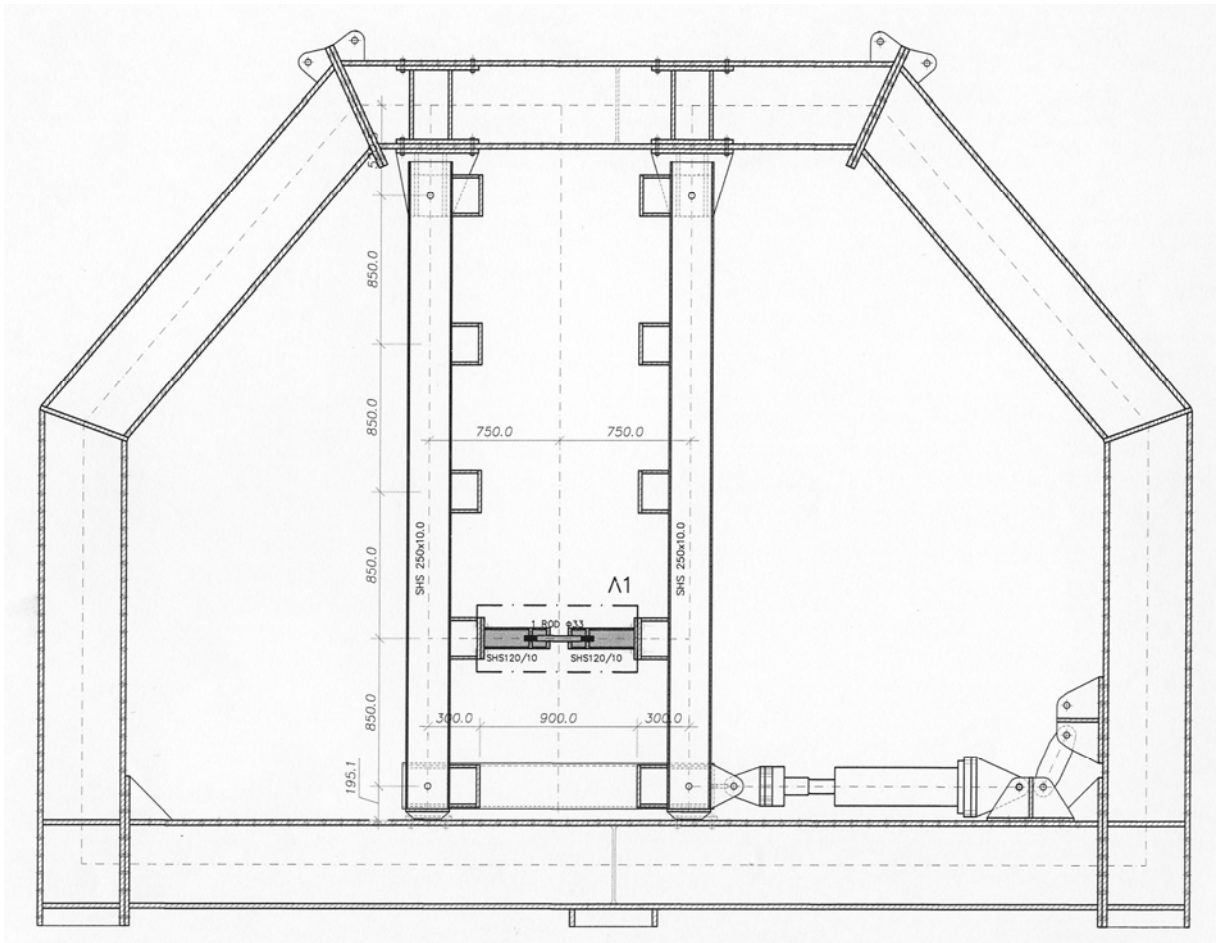
	#	Τύπος δοκιμίου	Ημερομ.	displ Δx	Σχόλια
13	6c	1 rod $\Phi 33$ (2screw)	30-10-2007	0-150 mm	Impact cycles

Μετά την επιτυχία των προηγούμενων πειραμάτων, με χρήση κυκλικού δοκιμίου τύπου INERD, με απλή και διπλή κοχλίωση, έγινε ένα πρόσθετο πείραμα, με ανακυκλιζόμενη φόρτιση, σε λίγους (3) κύκλους μεγάλων μετακινήσεων. Το πείραμα ακολούθησε ειδικό πρωτόκολλο φόρτισης, και ολοκληρώθηκε με τρεις κύκλους με τις μέγιστες δυνατές μετακινήσεις, 150 mm.

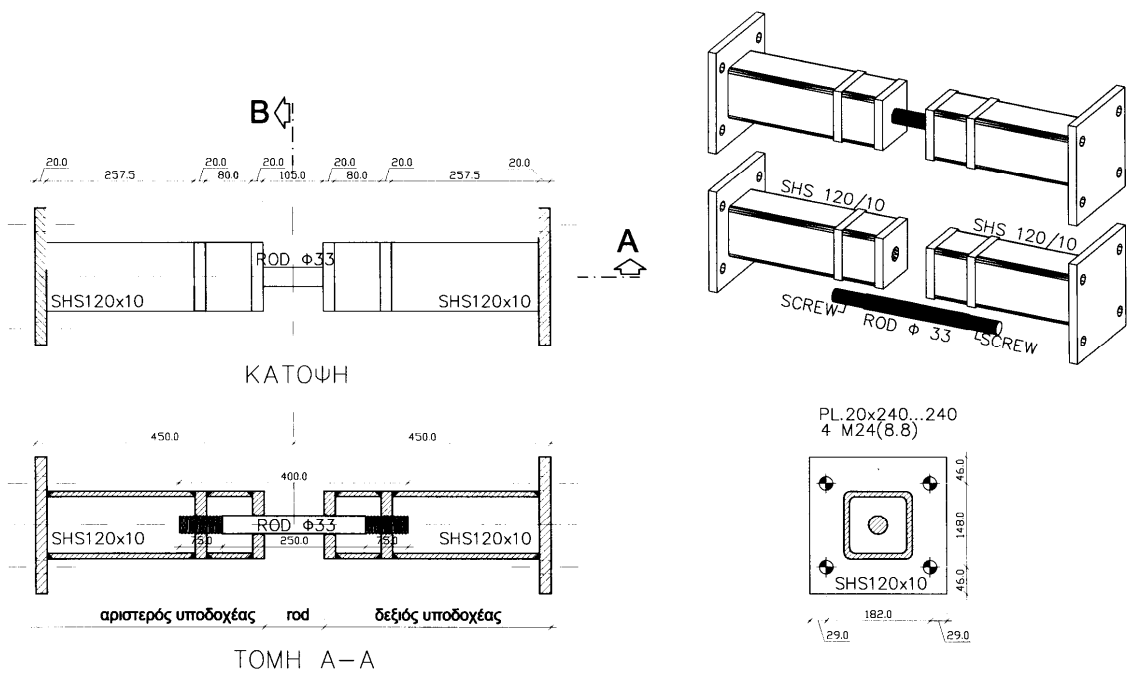
Το πείραμα ολοκληρώθηκε με μεγάλη επιτυχία, χωρίς αστοχία των ράβδων, με μικρή επιρροή της καταπόνησης επαφής.



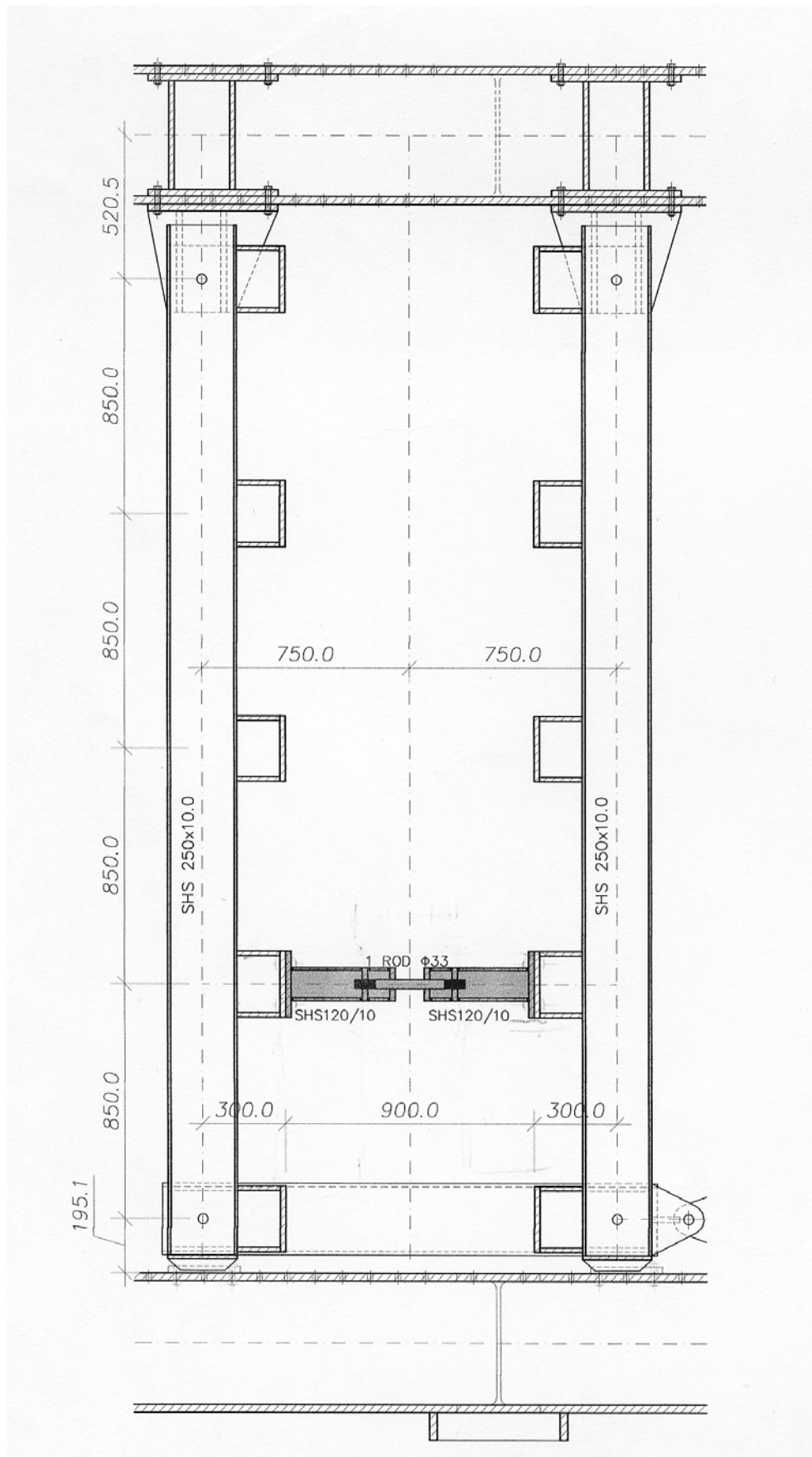
Σχ.5.13.1. Αξονομετρικό σχέδιο της πειραματικής διάταξης με 1 ROD $\Phi 33$ double screw - impact.



Σχ.5.13.2. Συνολική όψη της πειραματικής διάταξης 1 ROD Φ33 double screw-impact

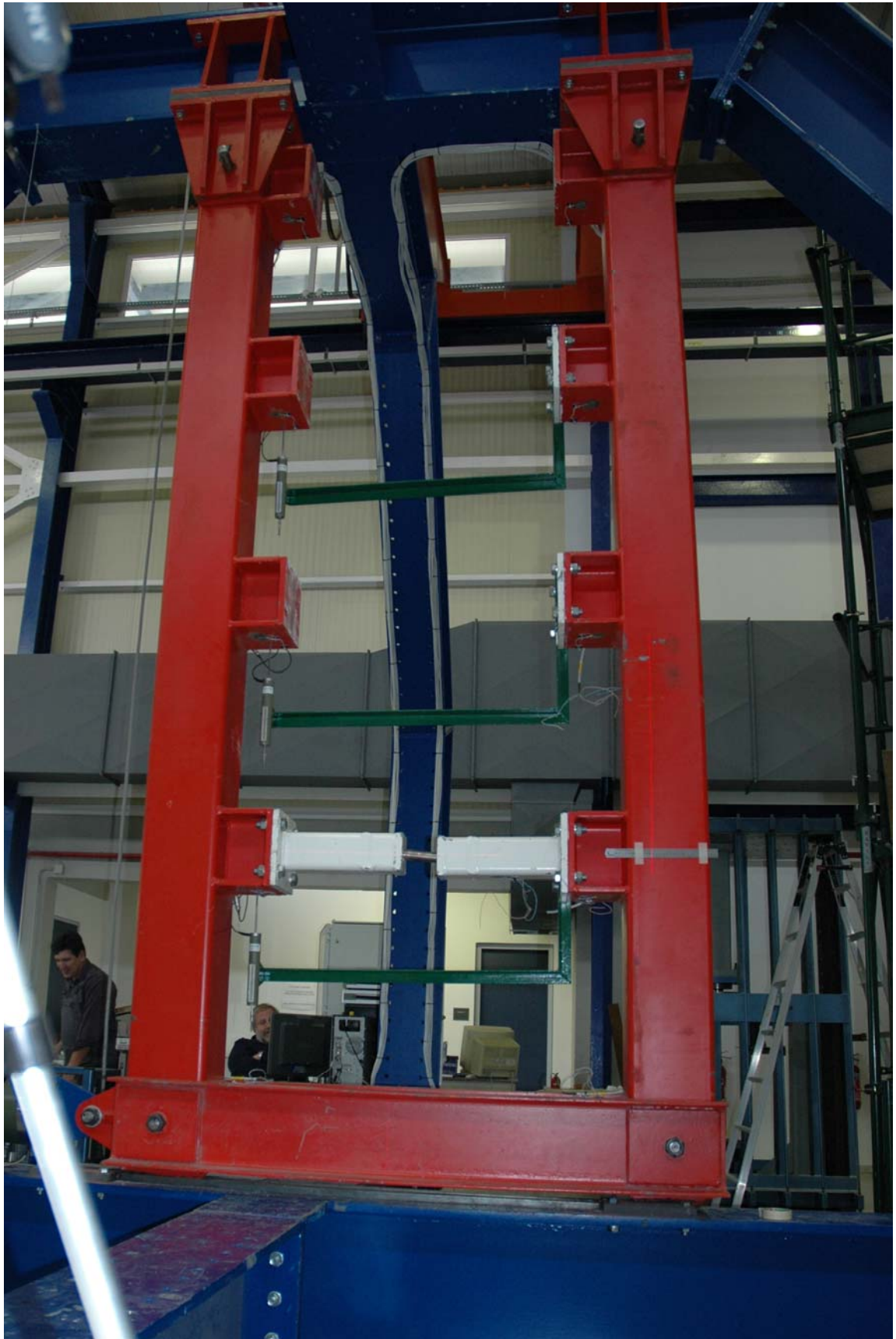


Σχ.5.13.3. Τα δοκίμια του πειράματος 1 ROD Φ33 double screw-impact



Σχ.5.13.4. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 1 ROD Φ33 double screw-impact

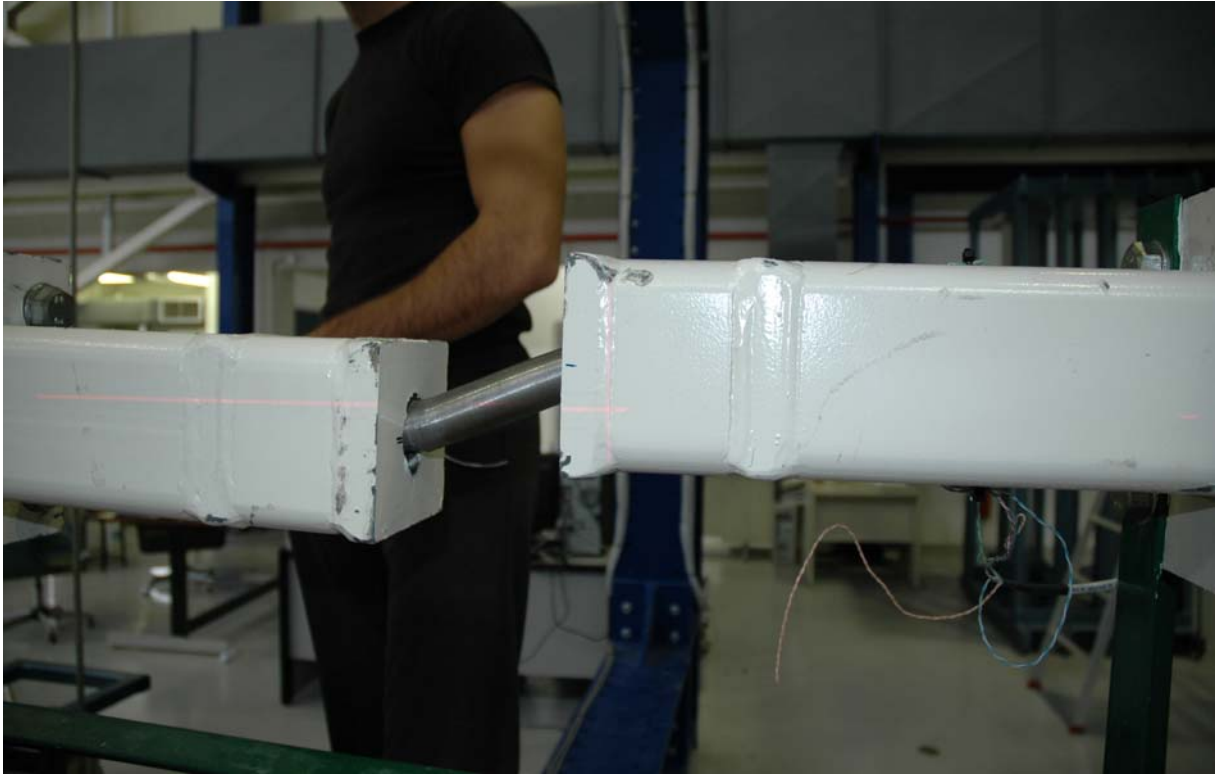
IN ST E D - Καινοτόμα συστήματα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας, σε πολυώροφα αντισεισμικά μεταλλικά κτίρια.
Φαίδων Καρυδάκης



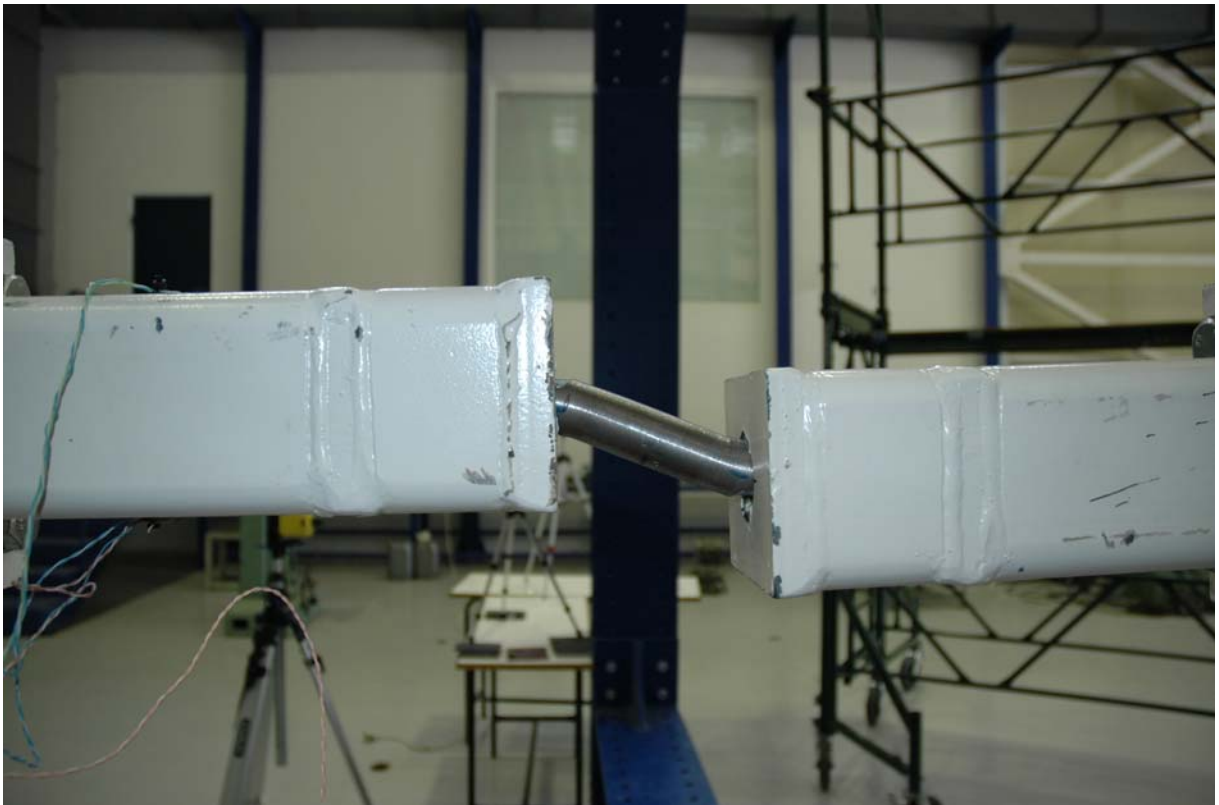
Φωτ.5.13.1. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED)1 ROD $\Phi 33$ double screw - impact



Φωτ. 5.13.2. Όψη του δοκιμίου 1 ROD $\Phi 33$ double screw impact σε προχωρημένη παραμόρφωση.



Φωτ. 5.13.3. Όψη του δοκιμίου 1 ROD $\Phi 33$ double screw impact σε προχωρημένη παραμόρφωση.



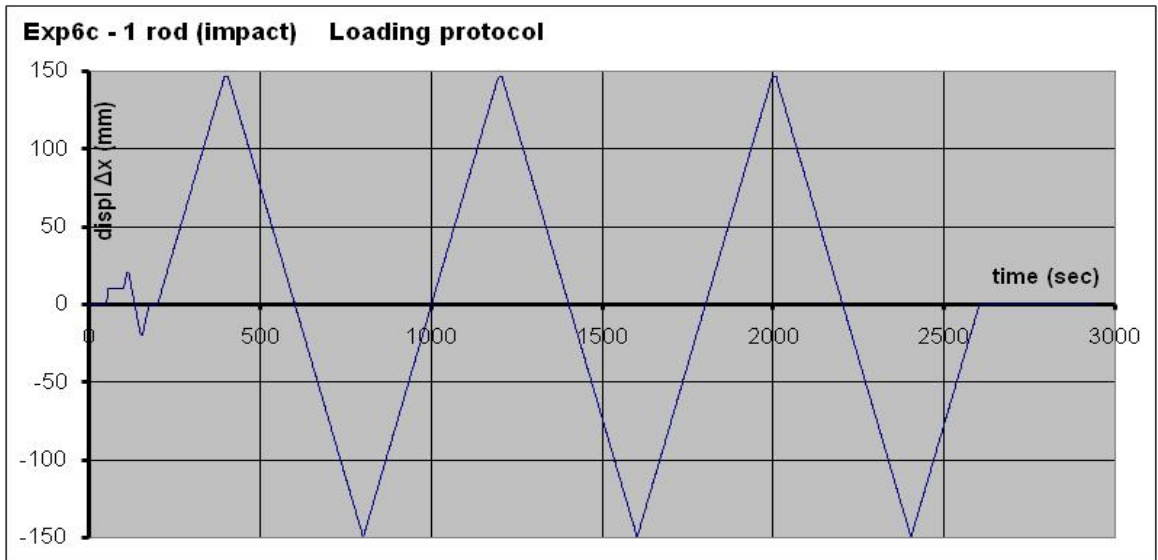
Φωτ. 5.13.4. Όψη του δοκιμίου 1 ROD $\Phi 33$ double screw σε μεγάλη παραμόρφωση



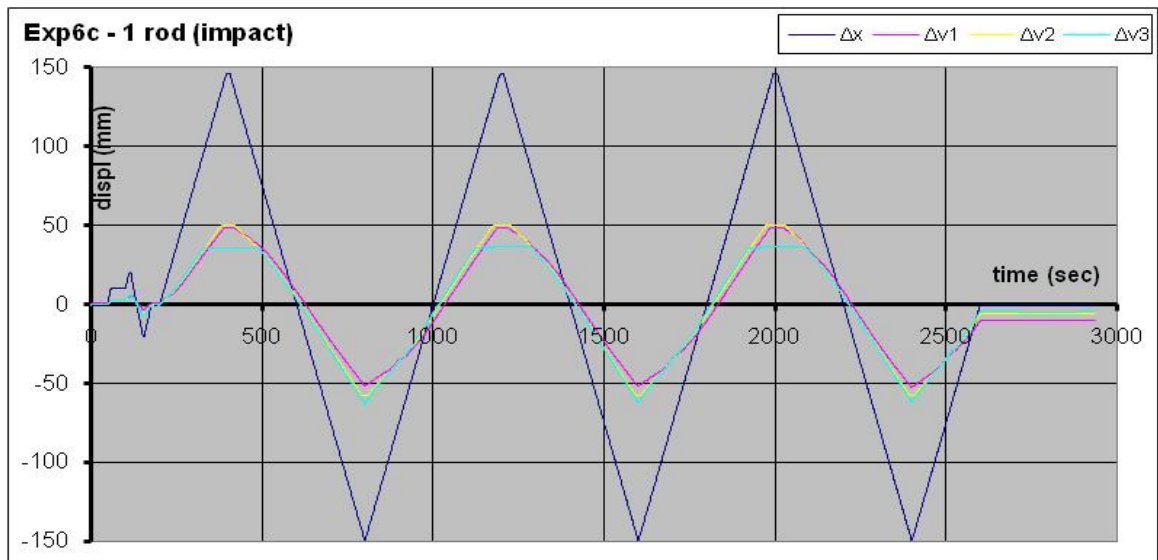
Φωτ. 5.13.5. Όψη του δοκιμίου 1 ROD Φ33 single screw impact σε τελική παραμόρφωση



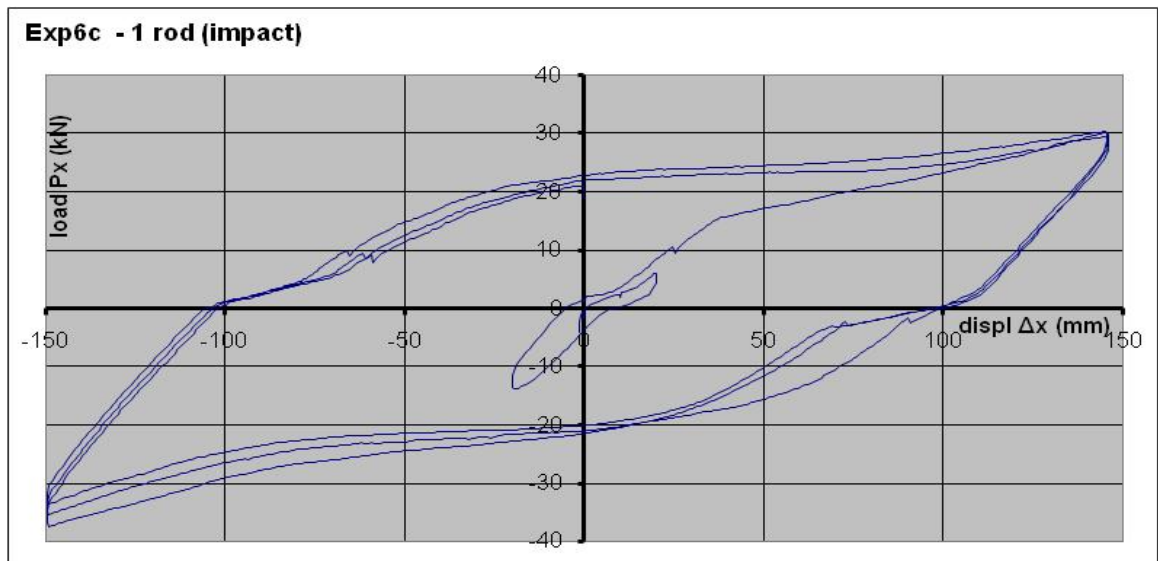
Φωτ. 5.13.6. . Όψη του δοκιμίου 1 ROD Φ33 double screw σε τελική παραμόρφωση



Διαγρ.5.13.1. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (1 ROD Φ33) double screw-impact



Διαγρ.5.13.2. Διάγραμμα οριζοντίων και διαμηθικών μετακινήσεων (1 ROD Φ33) double screw-impact



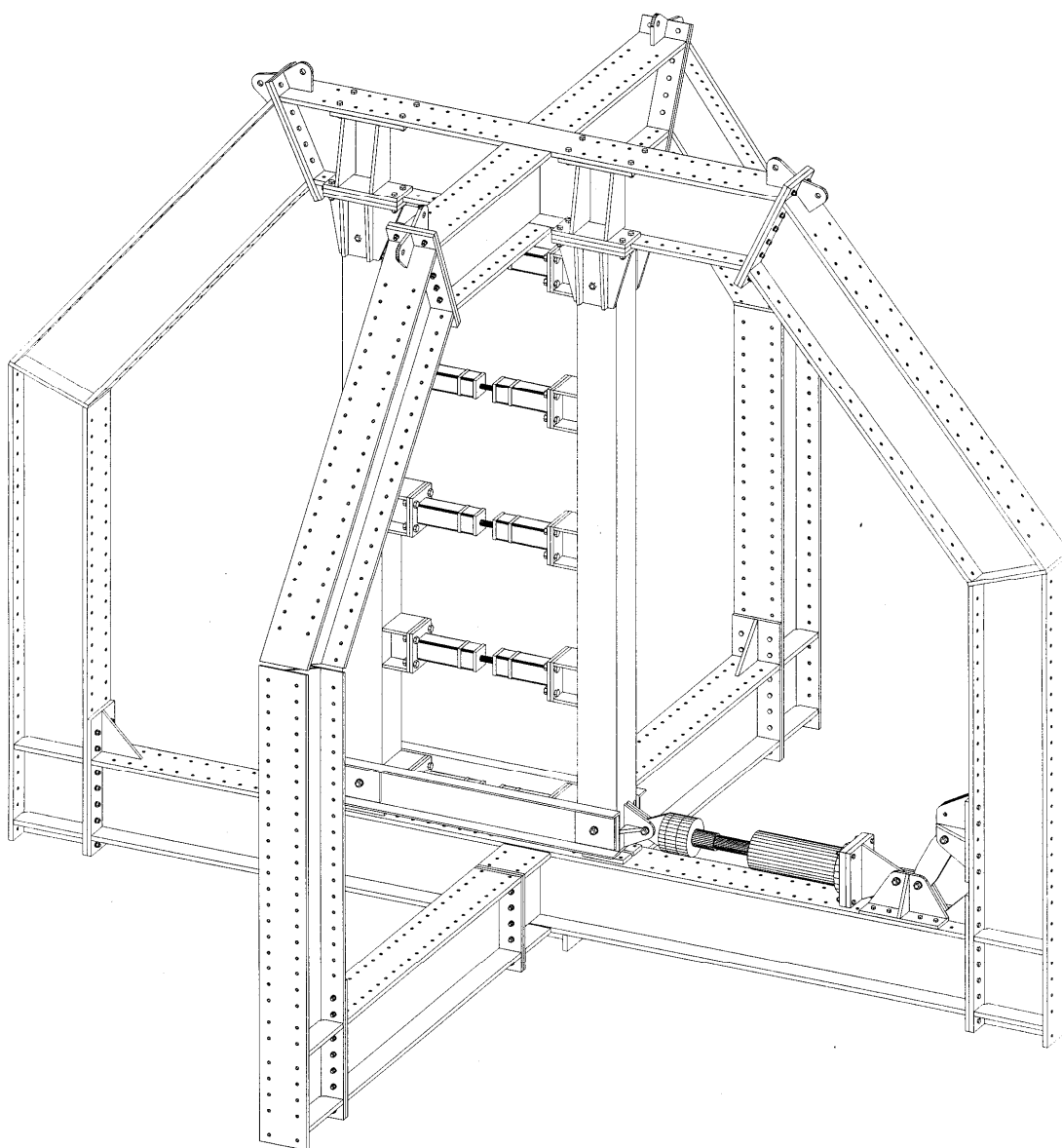
Διαγρ 5.13.3. Βρόχοι υστέρησης-διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (1 ROD Φ33) double screw-impact

5.14 Πείραμα 14 – 5 rod $\Phi 33$ με μονόπλευρο σπείρωμα (single screw).

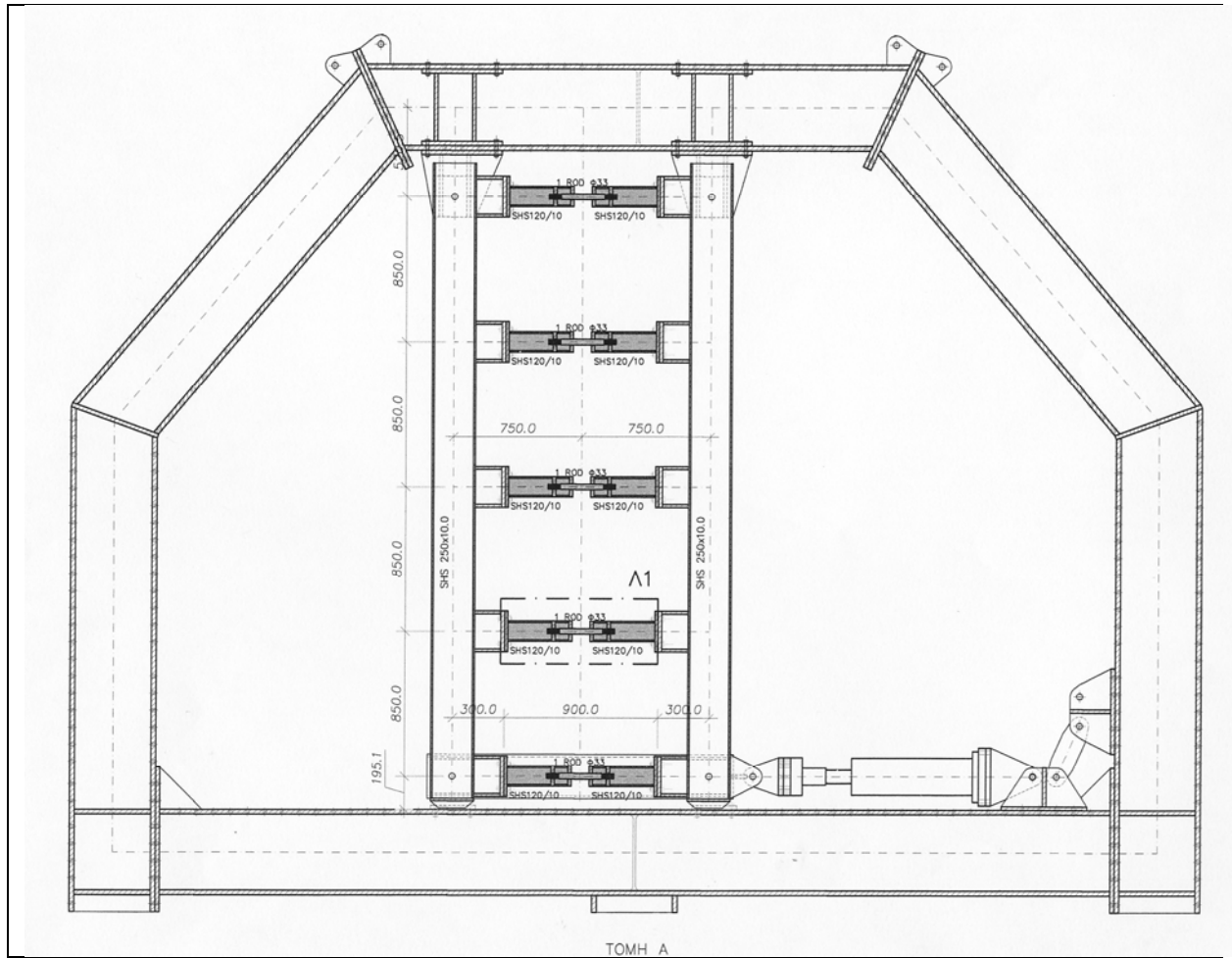
	#	Τύπος δοκιμίου	Ημερομ.	displ Δx	Σχόλια
4	6d	5 rod $\Phi 33$ (1screw)	1-11-2007	0-150 mm	

Ακολούθησε το πείραμα με πέντε όμοιες ράβδους κυκλικής διατομής, τύπου INERD. Το πείραμα ακολούθησε το αρχικό πρωτόκολλο φόρτισης, και ολοκληρώθηκε με τις μέγιστες μετακινήσεις 150 mm.

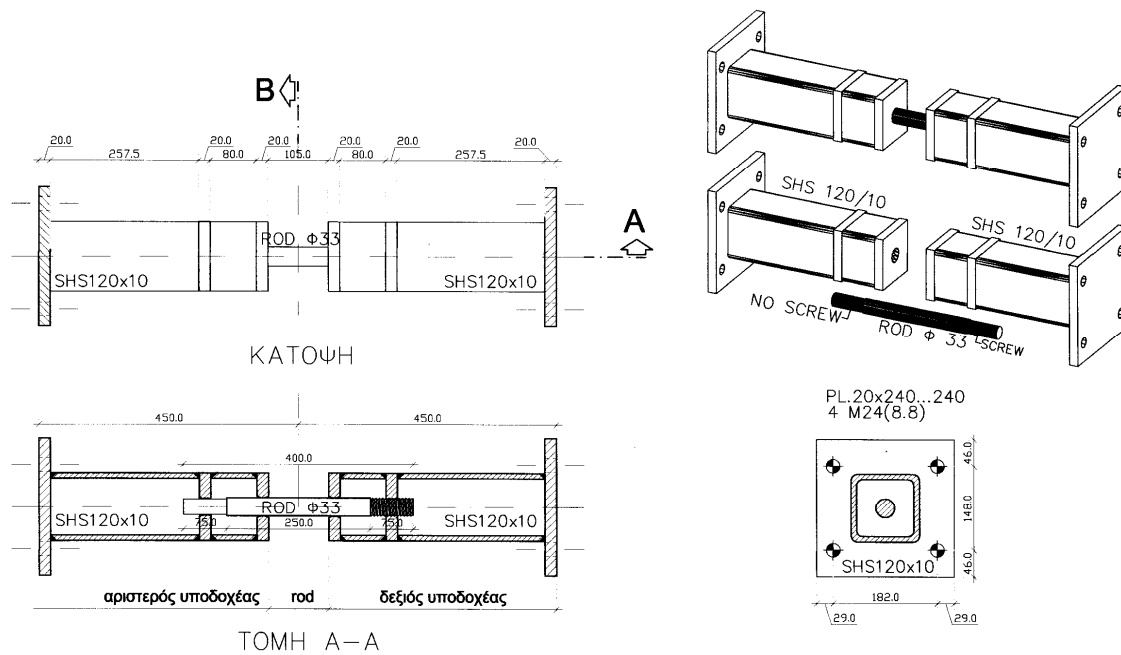
Τα δοκίμια είχαν μονόπλευρο σπείρωμα κοχλίωσης, που επέτρεπε την σχετική μικρή ολίσθηση στις δοκούς υποδοχής χωρίς αρχικά τουλάχιστον ανάπτυξη εφελκυστικών δυνάμεων. Στις μεγάλες παραμορφώσεις, η έντονη γωνιακή παραμόρφωση, δημιουργεί συνθήκες παγίωσης και υπάρχει ανάπτυξη σημαντικών αξονικών δυνάμεων. Το πείραμα ολοκληρώθηκε με μεγάλη επιτυχία, με αστοχία των ράβδων στο τελευταίο κύκλο.



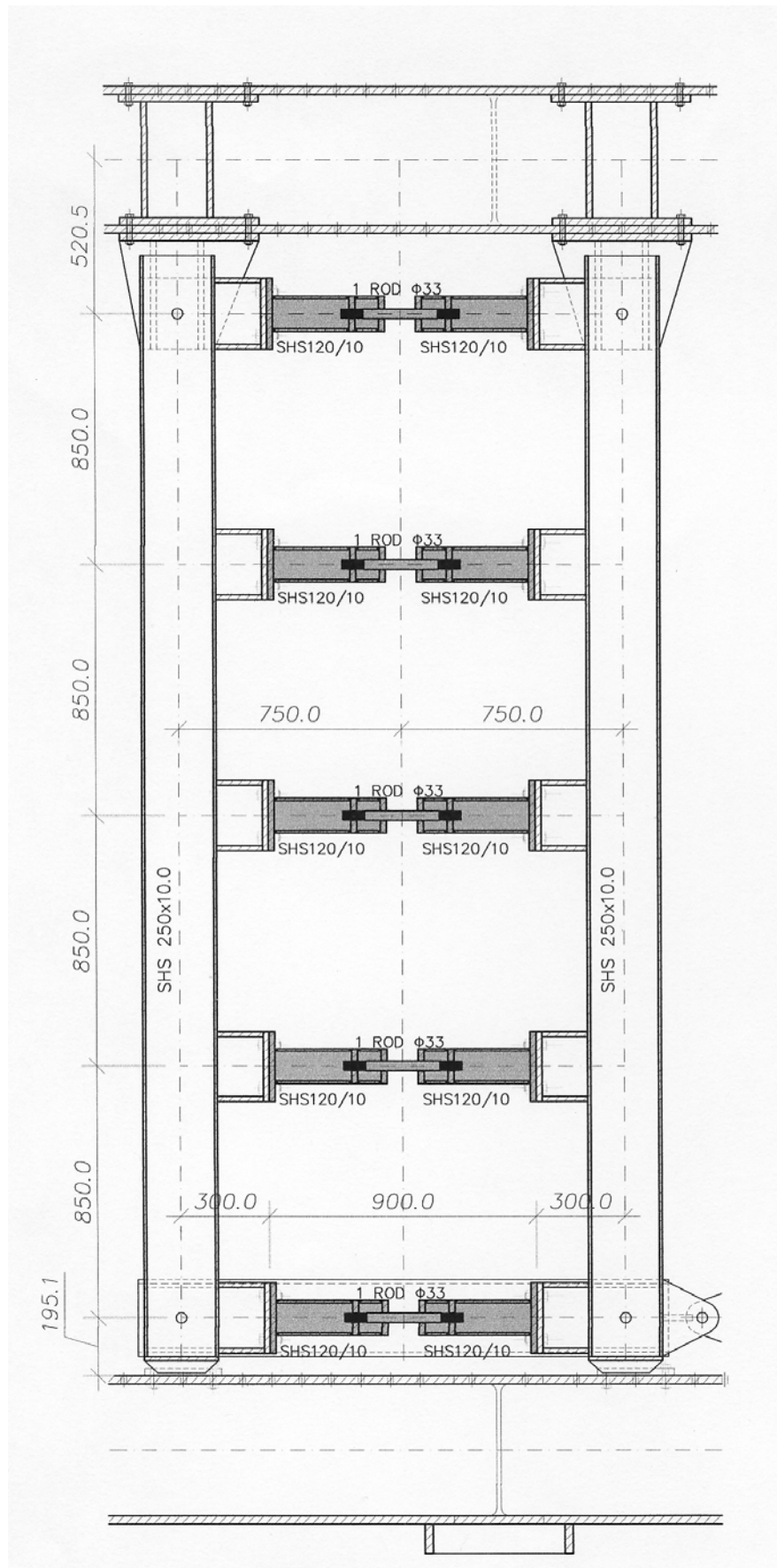
Σχ.5.14.1. Αξονομετρικό σχέδιο της πειραματικής διάταξης με 5 ROD Single screw..



Σχ.5.14.2. Συνολική όψη της πειραματικής διάταξης 5 ROD Single screw

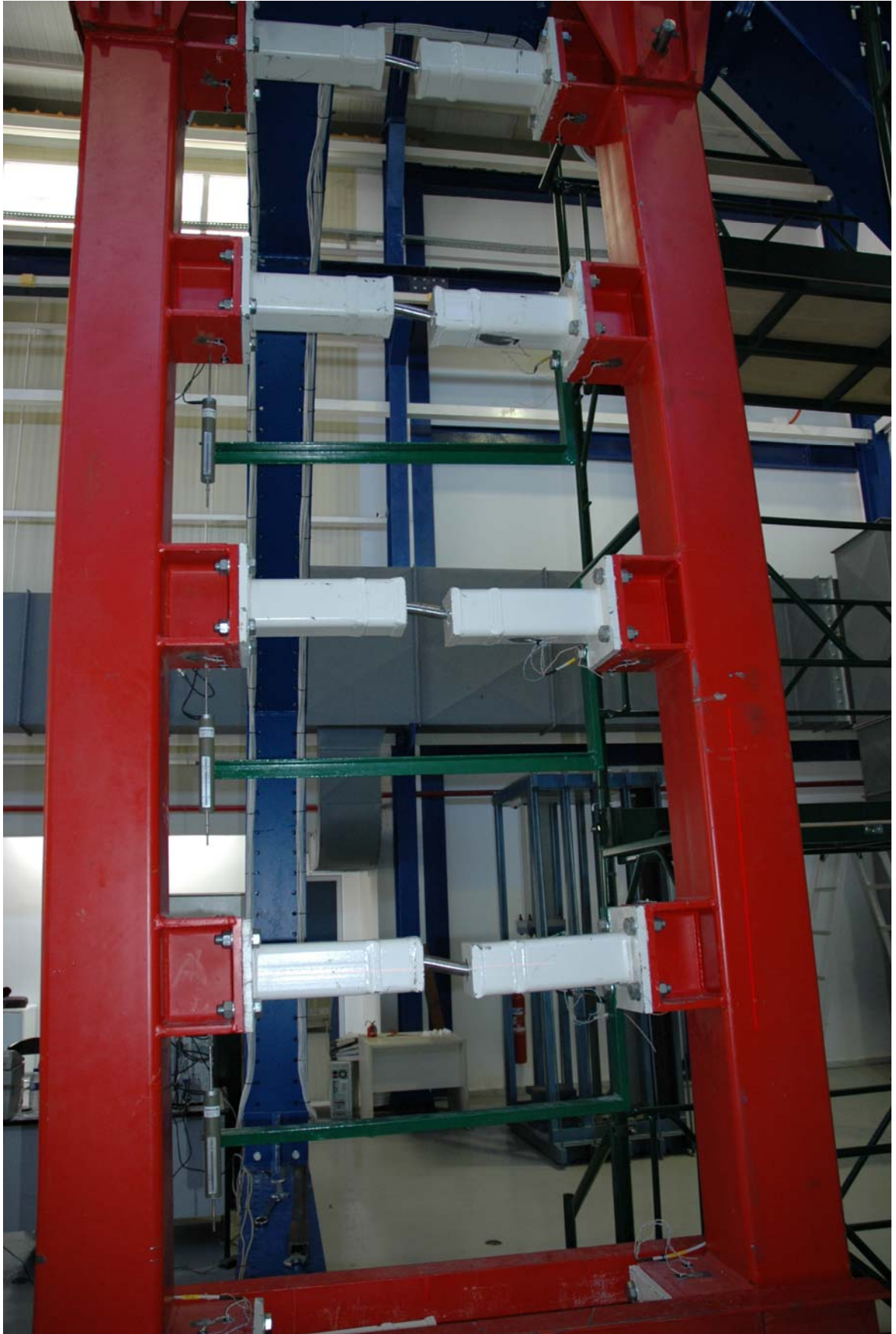


Σχ.5.14.3. Τα δοκίμια του πειράματος 5 ROD Single screw

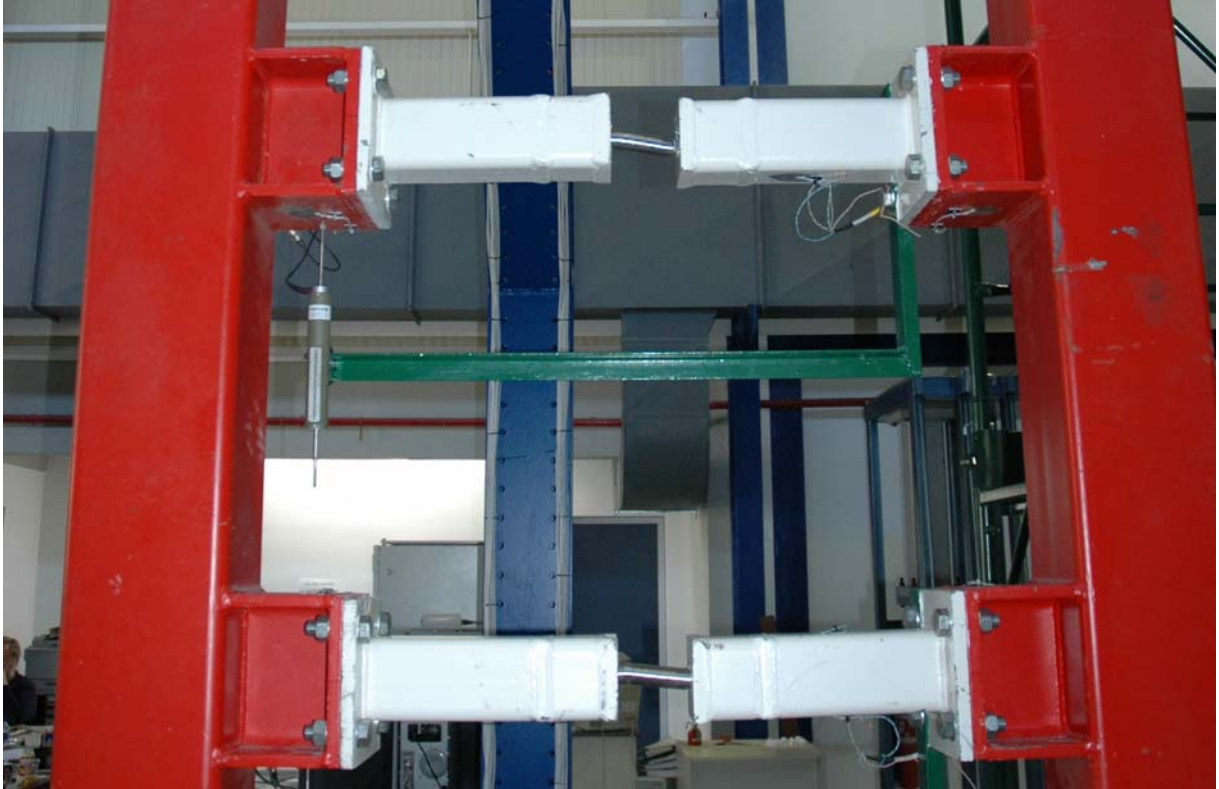


Σχ.5.14.4. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTE D) 5 ROD Single screw

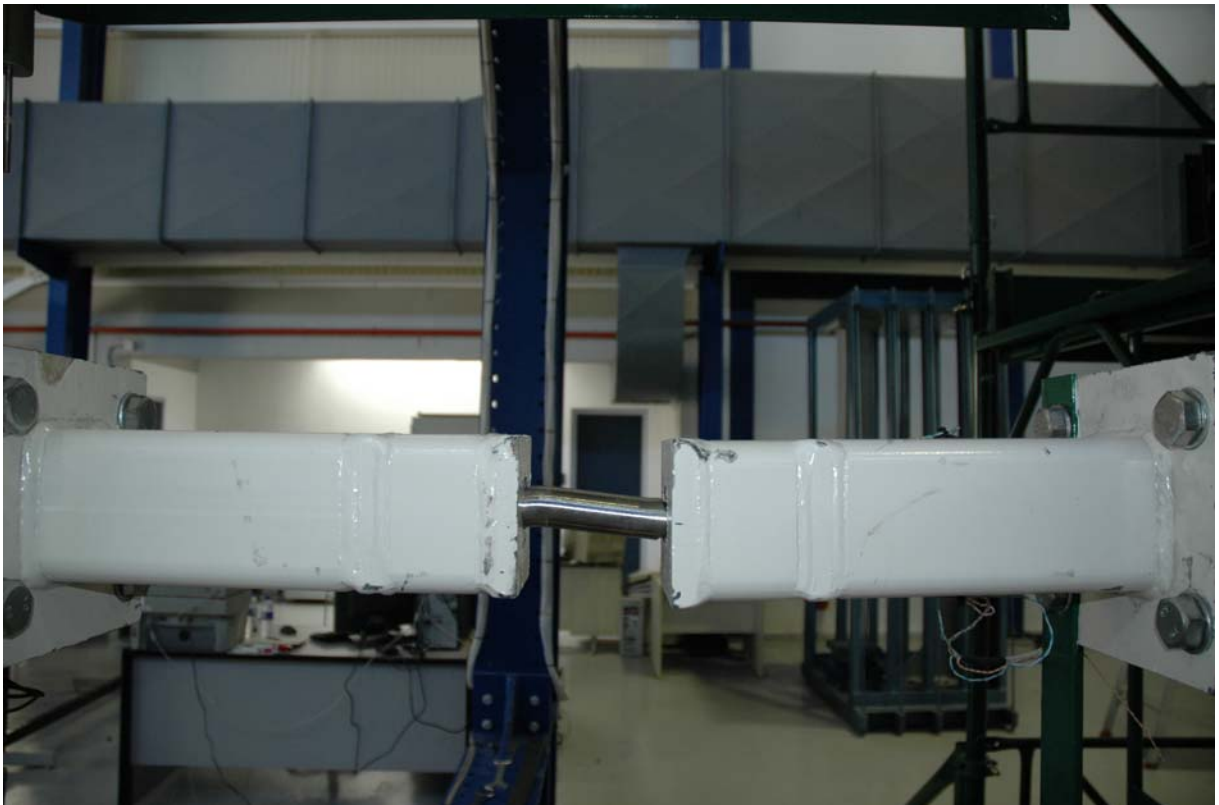
INSTE D - Καινοτόμα συστήματα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας, σε πολυώροφα αντισεισμικά μεταλλικά κτίρια.
Φαίδων Καρυδάκης



Φωτ.5.14.1. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 5 ROD single screw



Φωτ. 5.14.2. Όψη του δοκιμίου 1 ROD $\Phi 33$ single screw σε προχωρημένη παραμόρφωση.



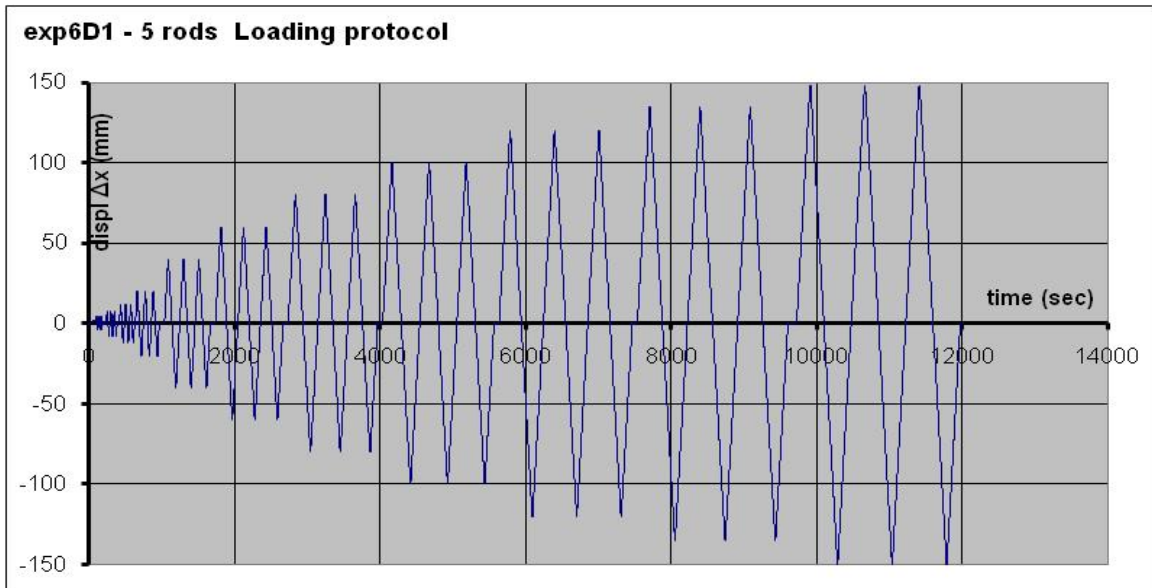
Φωτ. 5.11.3. Όψη του δοκιμίου 1 ROD $\Phi 33$ single screw σε προχωρημένη παραμόρφωση.



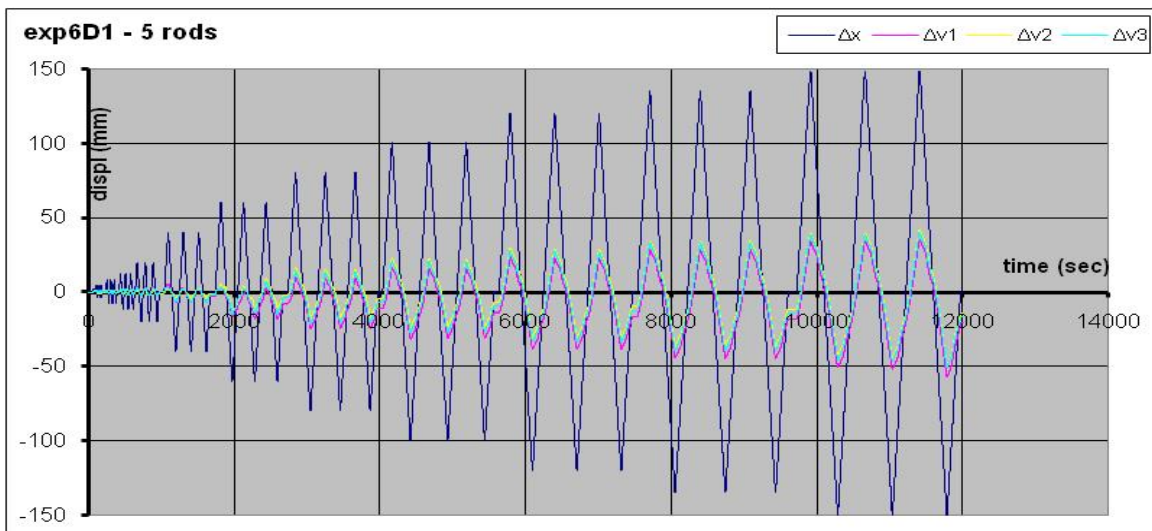
Φωτ. 5.14.4. Όψη του δοκιμίου 1 ROD Φ33 single screw σε προχωρημένη παραμόρφωση



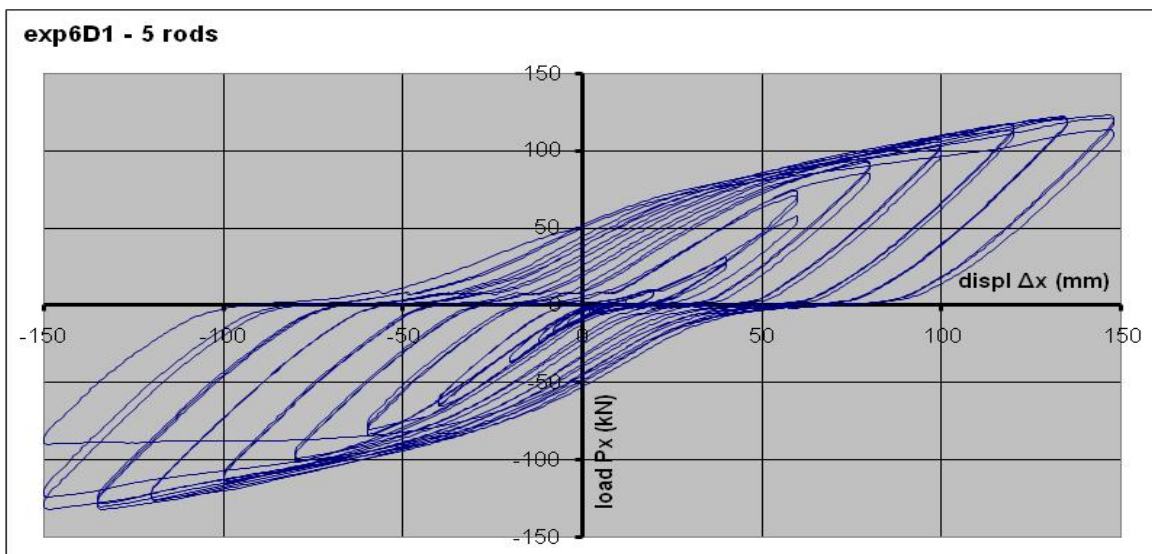
Φωτ. 5.11.5. Όψη του δοκιμίου 1 ROD Φ33 single screw σε αστοχία



Διαγρ. 5.14.1. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (5 ROD $\Phi 33$) έως $\Delta x = 150$ mm



Διαγρ. 5.14.2. Διάγραμμα οριζοντίων και διαμηθικών μετακινήσεων (5 ROD $\Phi 33$) single screw



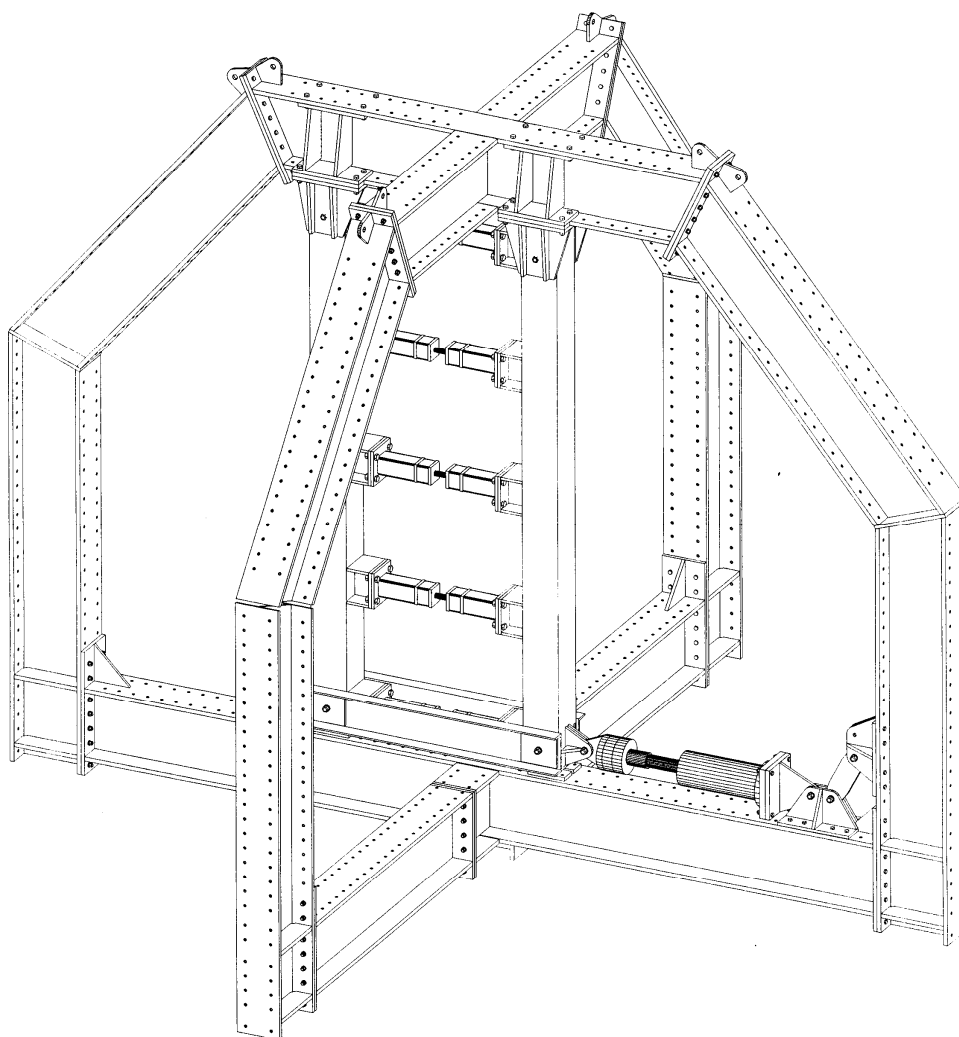
Διαγρ. 5.14.3. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (5 ROD $\Phi 33$) single screw

5.15 Πείραμα 15 – 5 rod Φ33 με μονόπλευρο σπείρωμα (single screw) και δακτυλιοειδείς εγκοπές (ringslots).

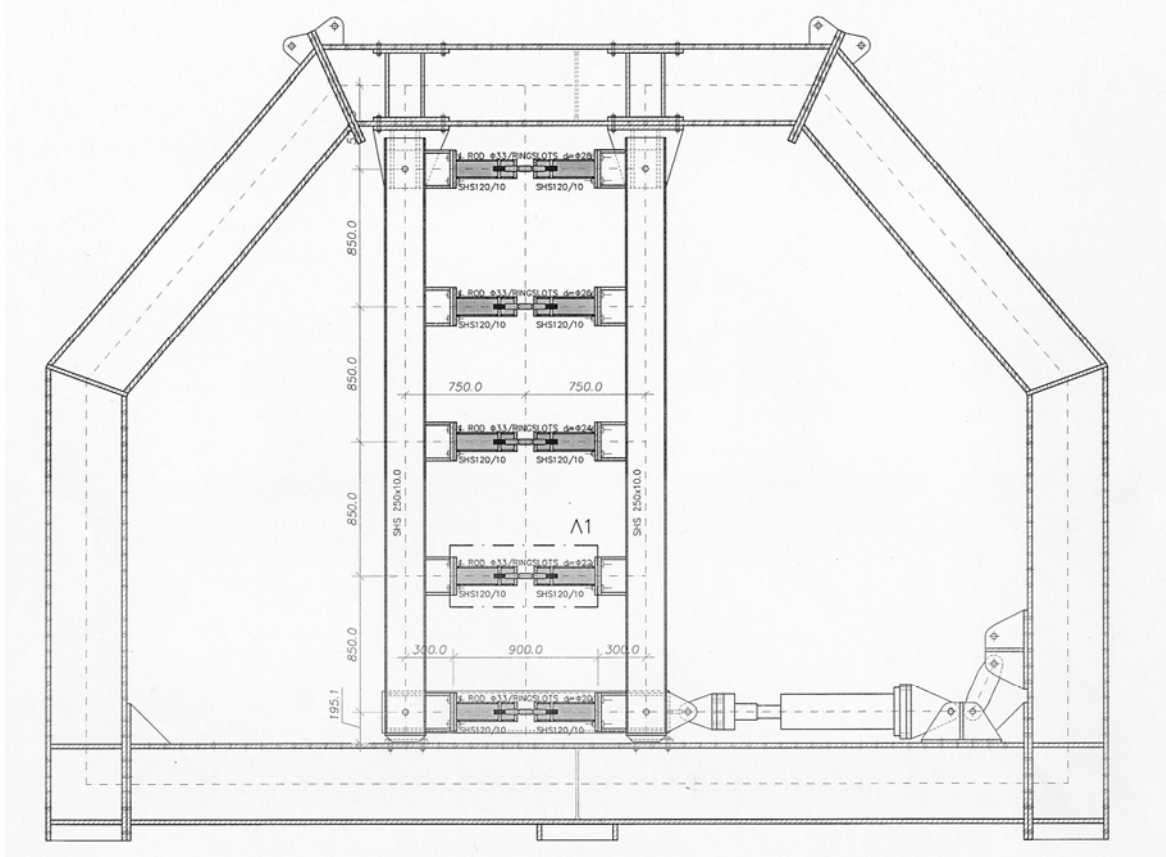
	#	Τύπος δοκιμίου	Ημερομ.	displ Δx	Σχόλια
15	6e	5 rod Φ33 (1screw)	5-12-2007	0-135 mm	Δακτυλιοειδείς εγκοπές

Το τελευταίο πείραμα ήταν ένας συνδυασμός δοκιμίων τύπου INERD, σχεδιασμένες για προοδευτική αστοχία. Οι κυκλικής διατομής ράβδοι, με μονόπλευρο σπείρωμα, έφεραν δακτυλιοειδείς εγκοπές διαφορετικού βάθους, ώστε να οδηγούνται σε προοδευτική αστοχία. Το πείραμα ακολούθησε το αρχικό πρωτόκολλο φόρτισης, και ολοκληρώθηκε με αστοχία των ράβδων σε σχετικά μικρές μετακινήσεις (100 mm), λόγω μικρού μήκους των δακτυλιοειδών εγκοπών, που οδήγησαν σε συγκέντρωση τάσεων, μικρό μήκος πλαστικής ζώνης και σχετικά γρήγορη εξάντληση της αντοχής (κόπωση;).

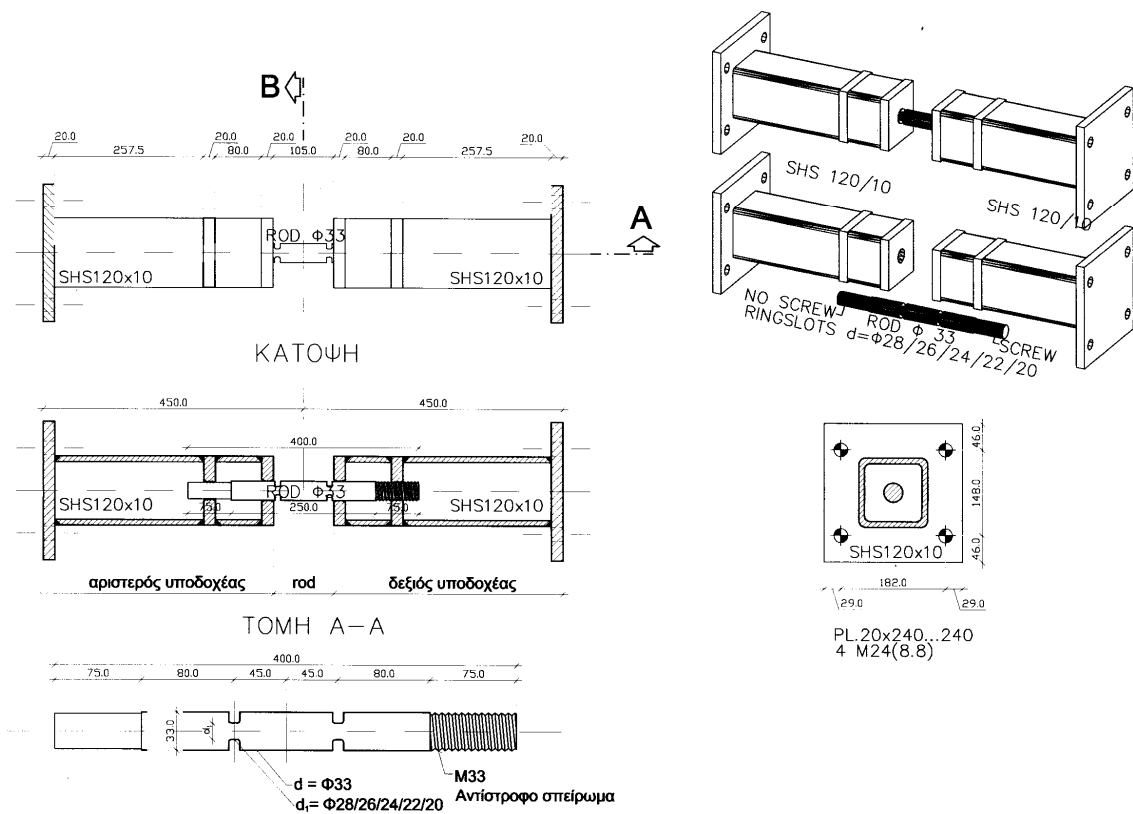
Τα δοκίμια είχαν μονόπλευρο σπείρωμα κοχλίωσης και το πείραμα ολοκληρώθηκε με επιτυχία, με συνολική προοδευτική αστοχία των ράβδων.

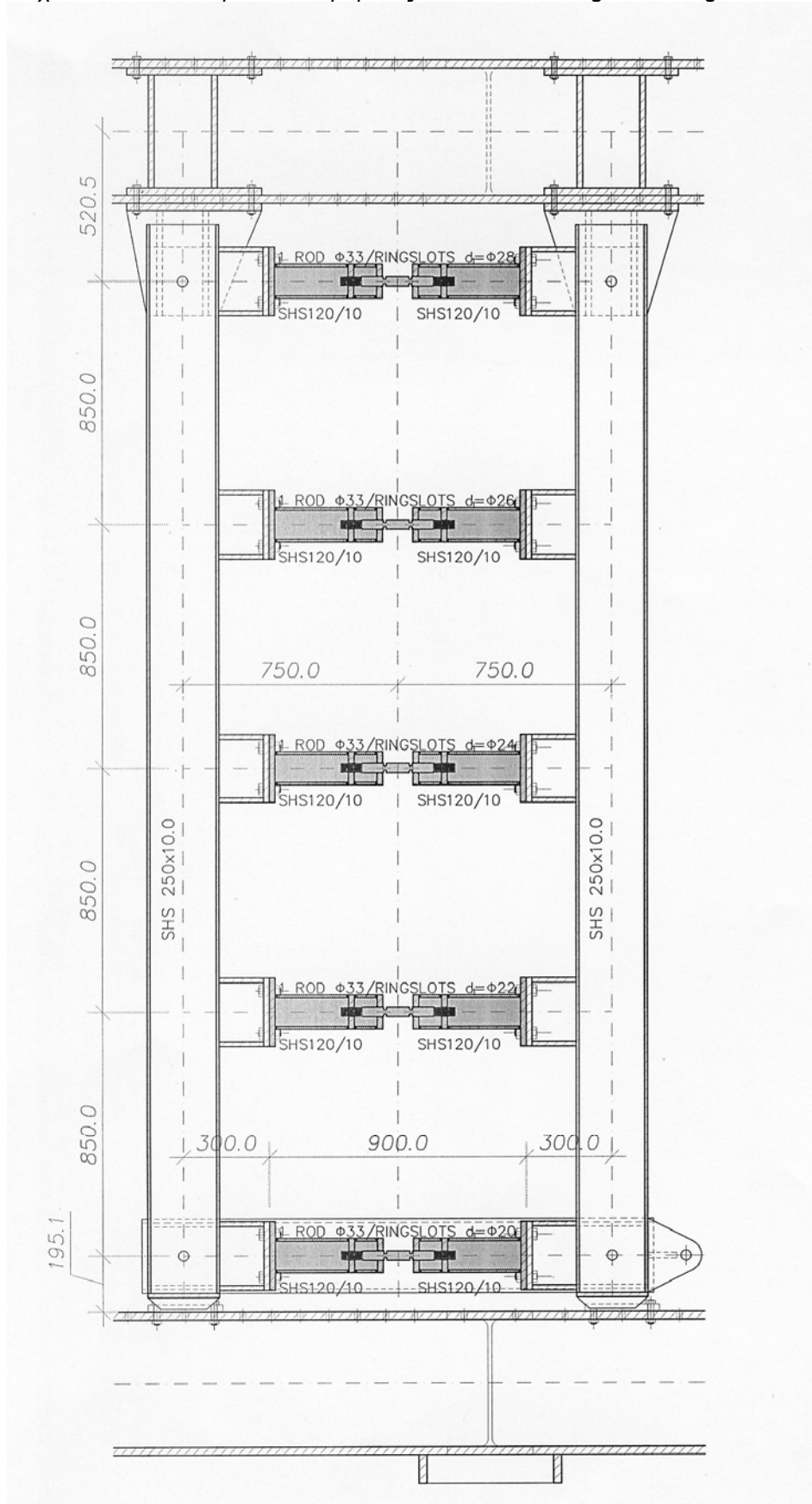


Σχ.5.15.1. Αξονομετρικό σχέδιο της πειραματικής διάταξης με 5 ROD Φ33 single screw - Ringslots.



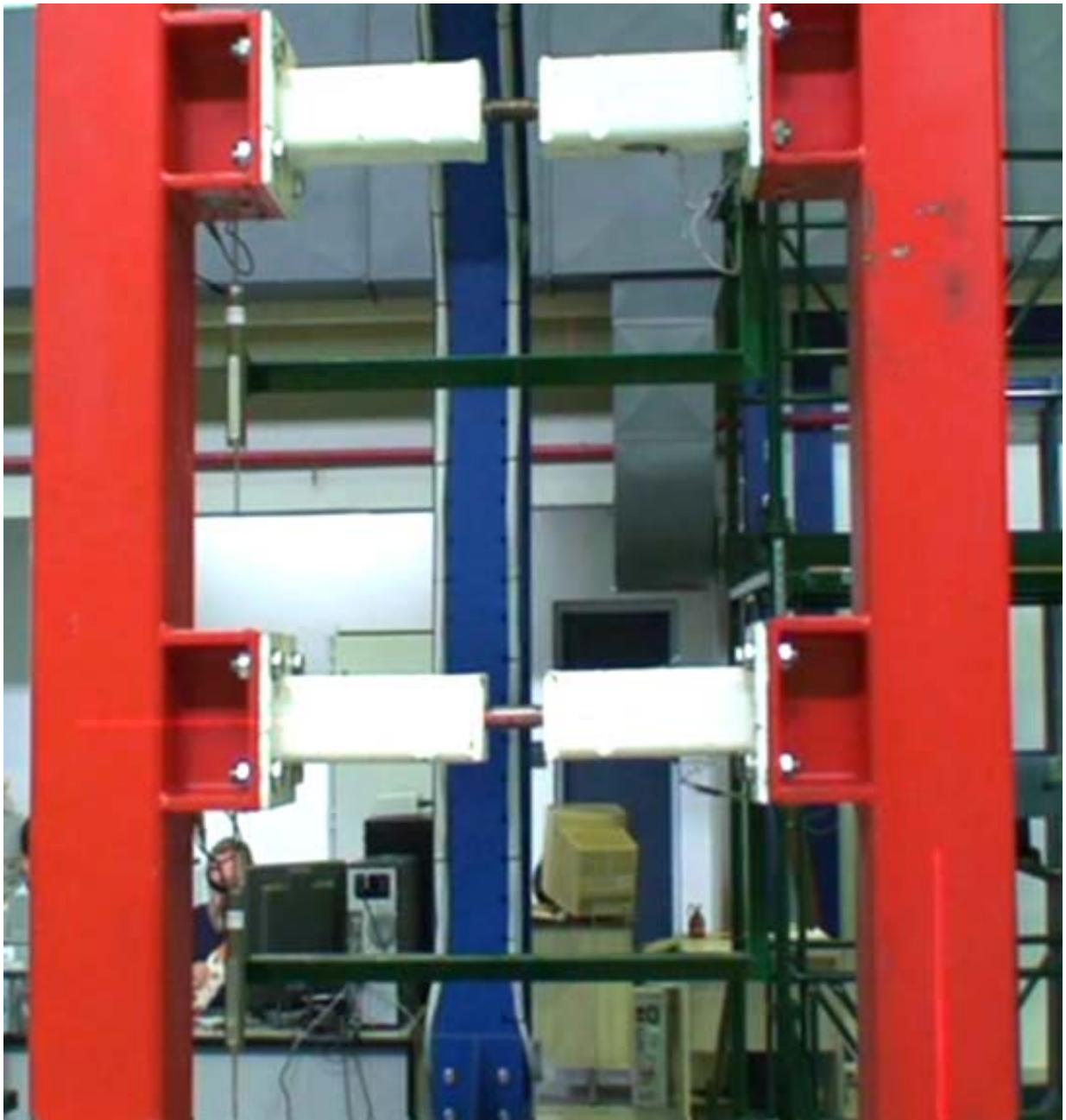
Σχ.5.15.2. Συνολική όψη της πειραματικής διάταξης 5 ROD Φ33 Ringslots - Single screw



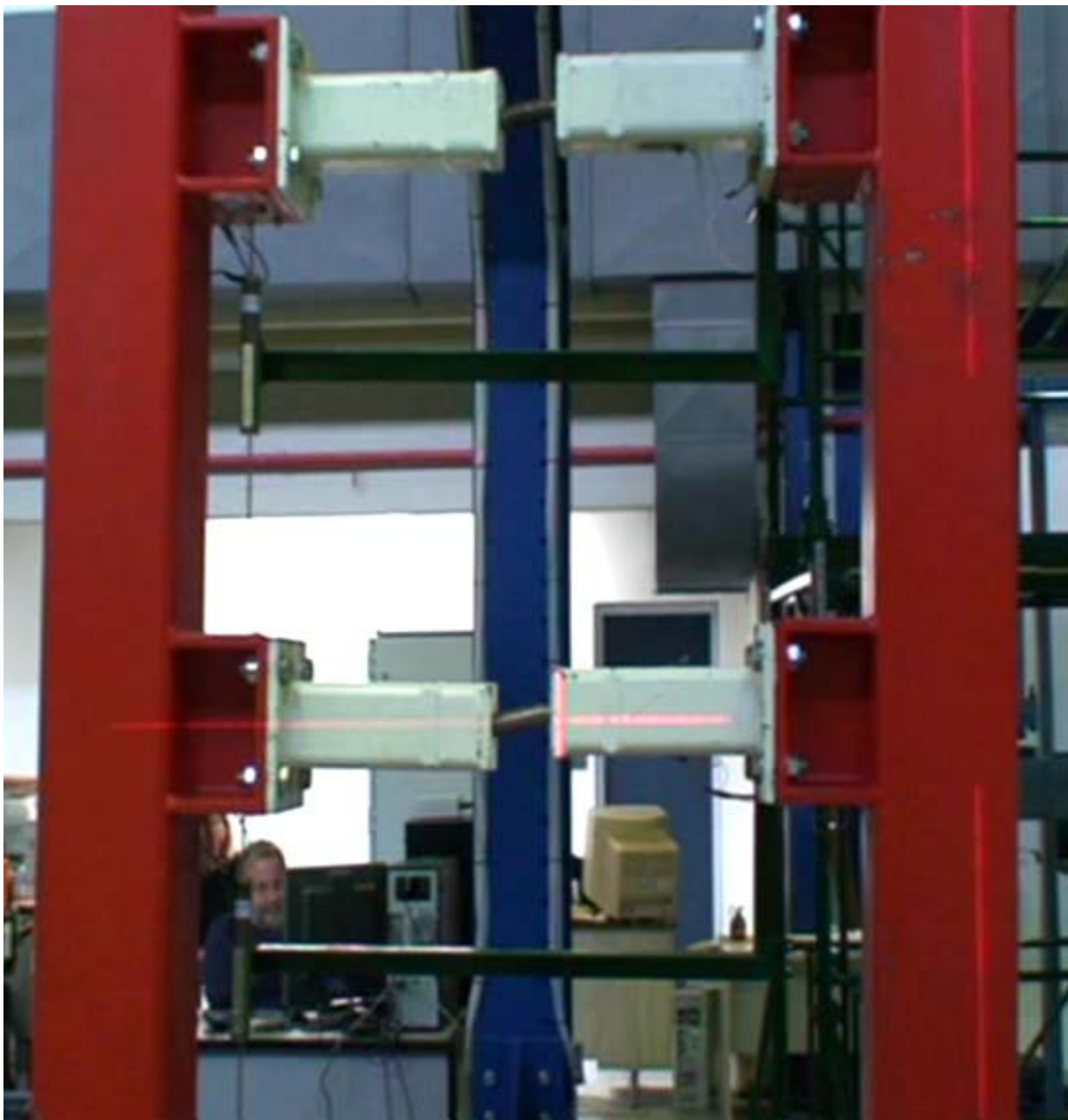
Σχ.5.15.3. Τα δοκίμια του πειράματος 5 ROD $\Phi 33$ Ringslots - Single screwΣχ.5.15.4. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 5 ROD $\Phi 33$

IN ST E D - Καινοτόμα συστήματα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας, σε πολώροφα αντισεισμικά μεταλλικά κτίρια.
Φαίδων Καρυδάκης

Ringslots - Single screw



Φωτ.5.15.1. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 5 ROD single screw - Ringslots



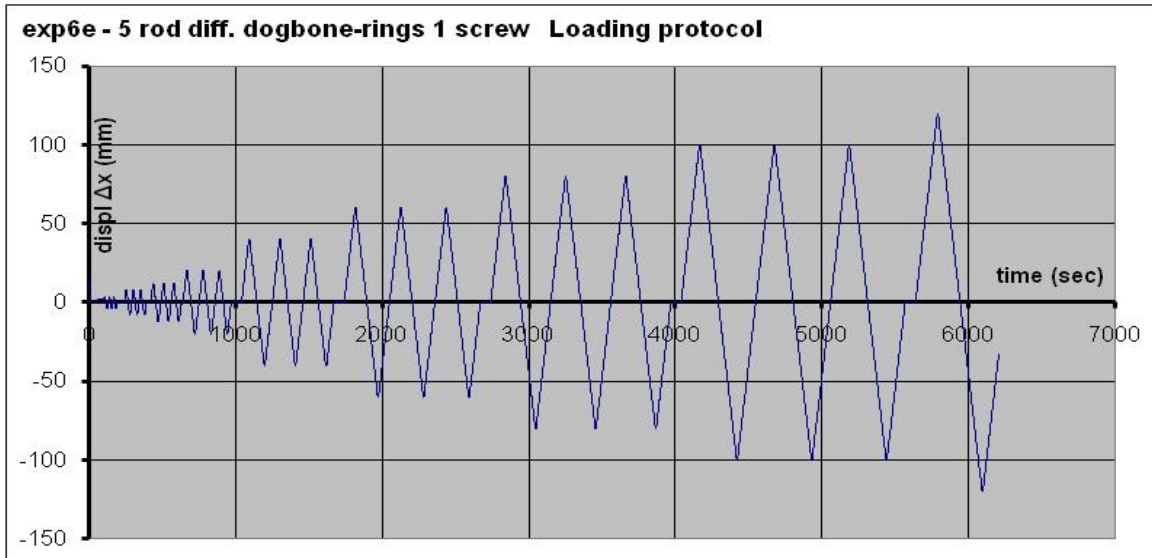
Φωτ. 5.15.2. Όψη του δοκιμίου 1 ROD $\Phi 33$ single screw Ringslots σε προχωρημένη παραμόρφωση.



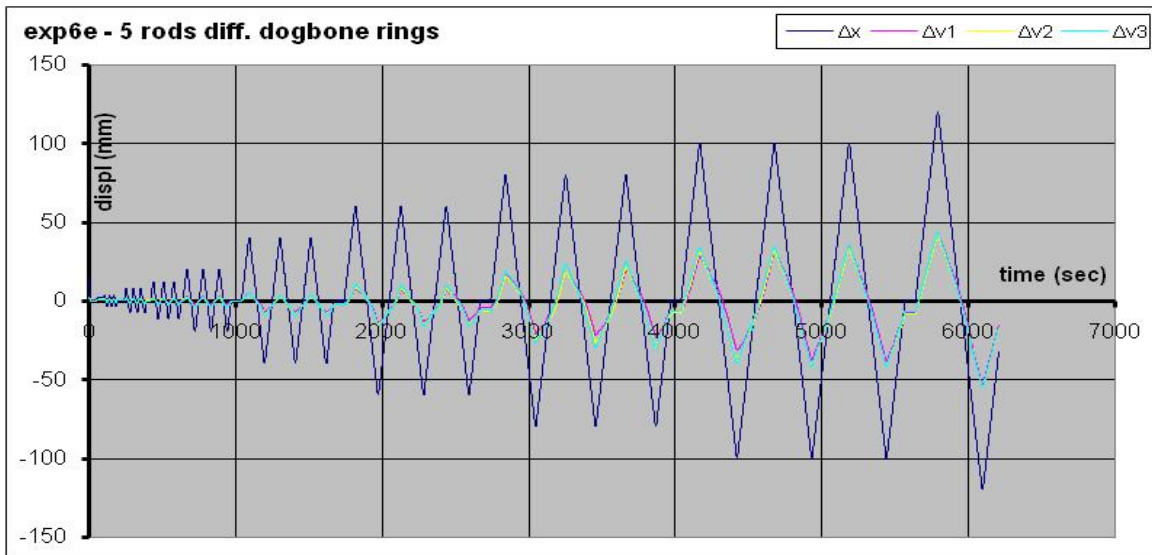
Φωτ. 5.15.3. Όψη του δοκιμίου 1 ROD $\Phi 33$ single screw - Ringslots σε προχωρημένη παραμόρφωση.



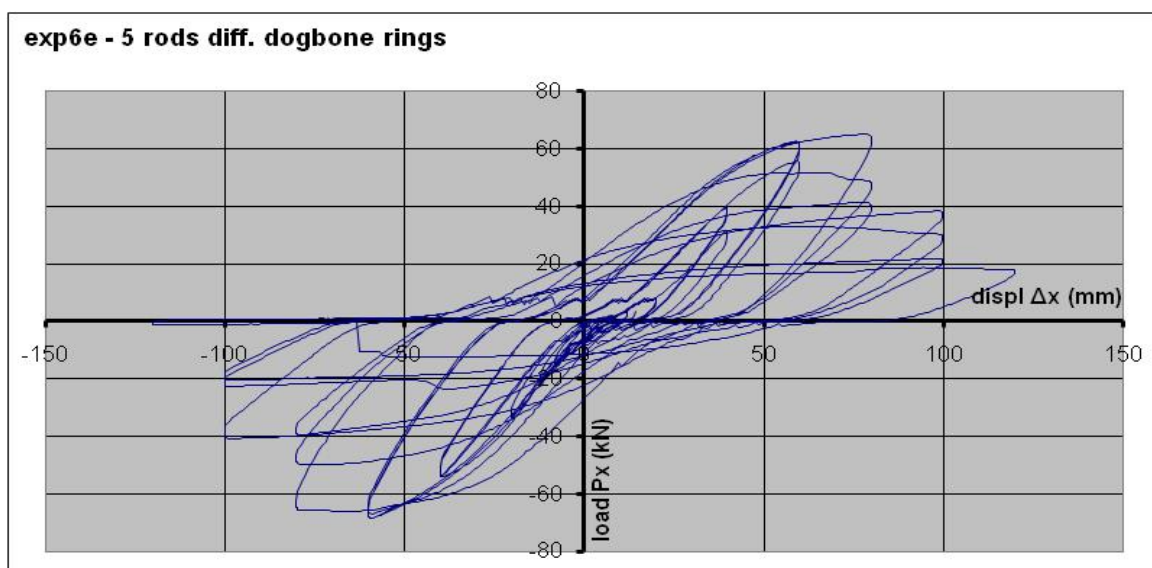
Φωτ. 5.15.4. Όψη του δοκιμίου 1 ROD $\Phi 33$ single screw - Ringslots σε προχωρημένη παραμόρφωση



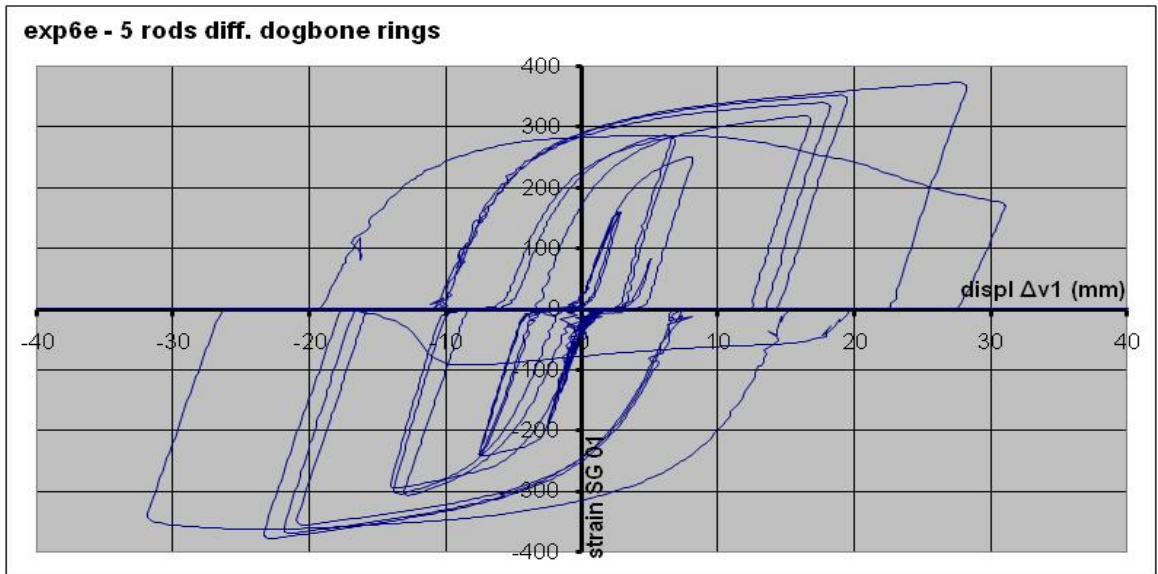
Διαγρ. 5.15.1. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (5 ROD $\Phi 33$ Ringslots) έως $\Delta x=120$ mm



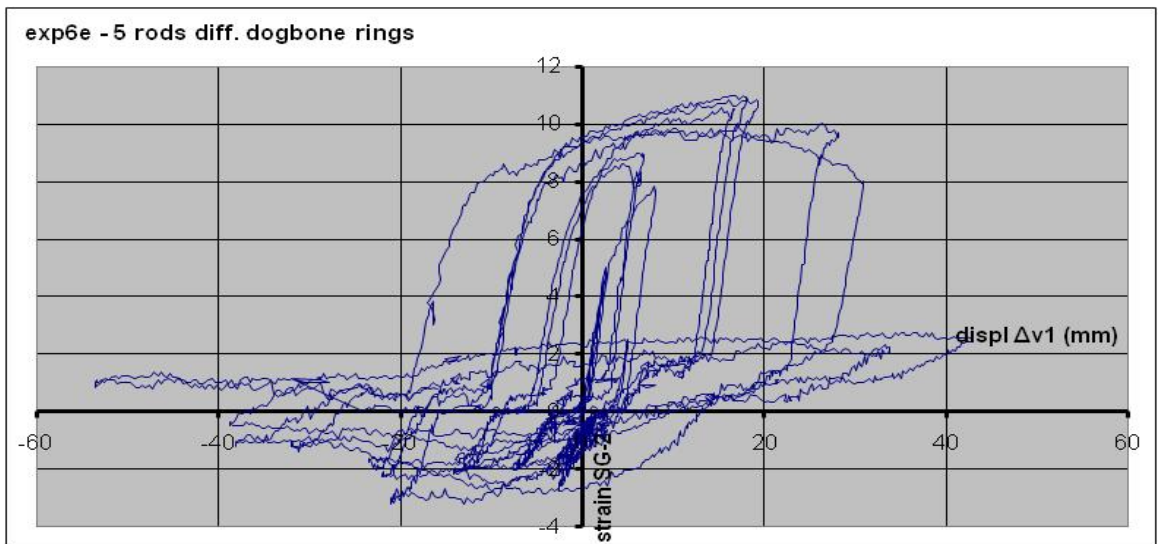
Διαγρ. 5.15.2. Διάγραμμα οριζοντίων και διαμηθικών μετακινήσεων (5 ROD $\Phi 33$) Ringslots



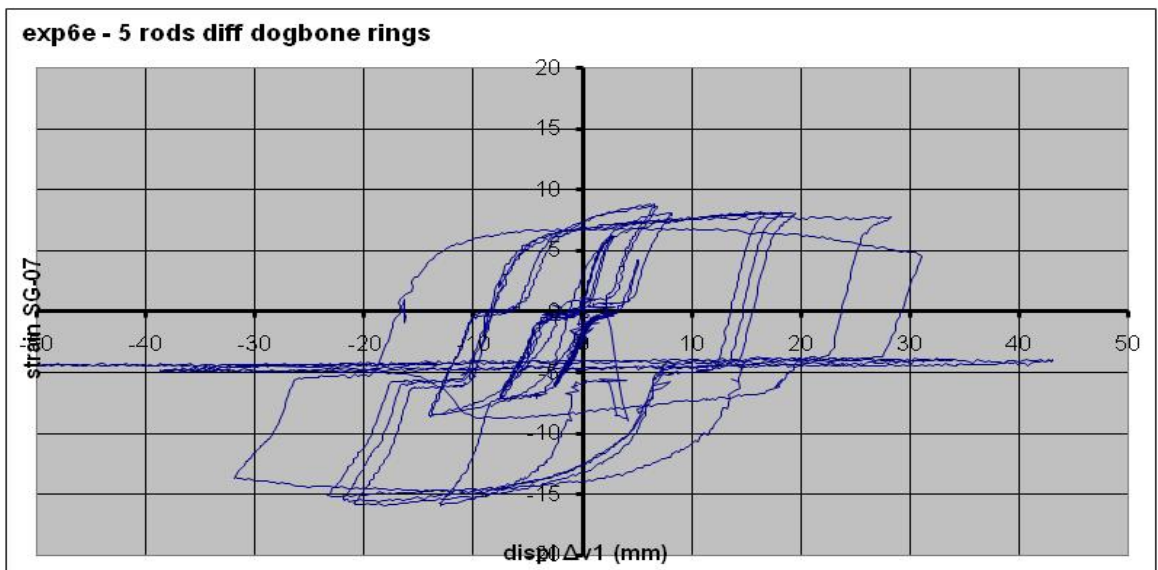
Διαγρ. 5.15.3. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (5 ROD $\Phi 33$) Ringslots
IN ST E D - Καινοτόμα συστήματα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας, σε πολύροφα αντισεισμικά μεταλλικά κτίρια.
Φαίδων Καρυδάκης



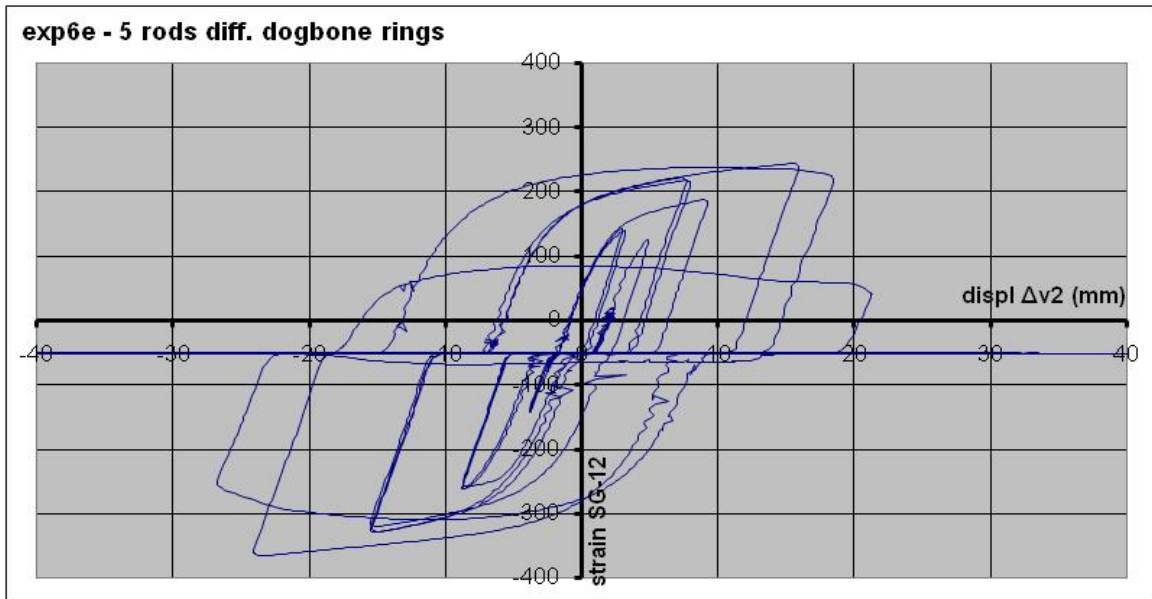
Διαγρ. 5.15.4. Βρόχοι υστέρησης-διατμητική μετακίνηση-τάση ακραίας ίνας (5 ROD Φ33) Ringslots



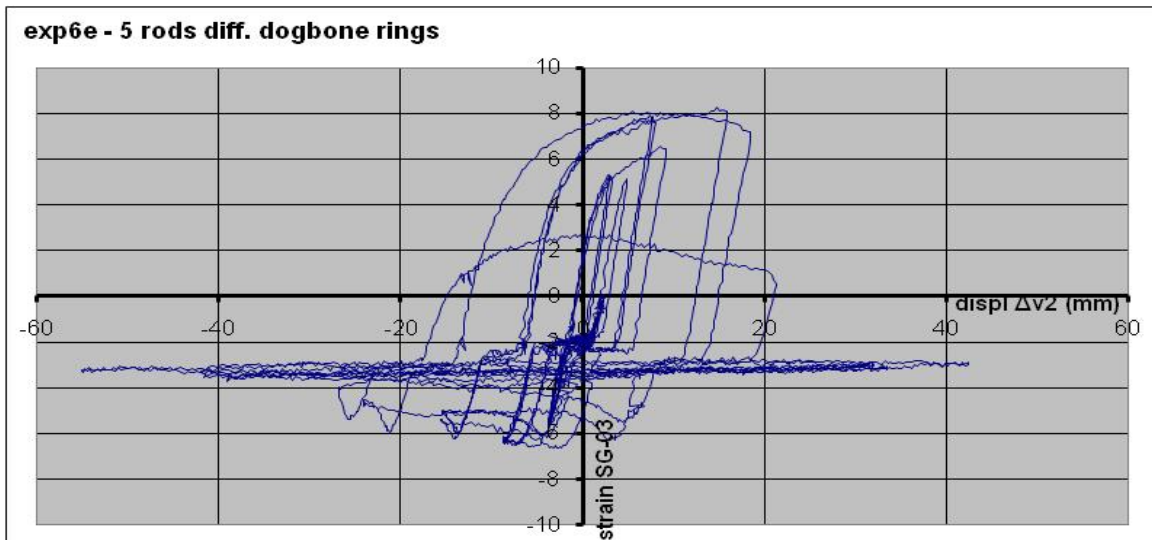
Διαγρ. 5.15.5. Βρόχοι υστέρησης-διατμητική μετακίνηση-τάση ακραίας ίνας (5 ROD Φ33) Ringslots



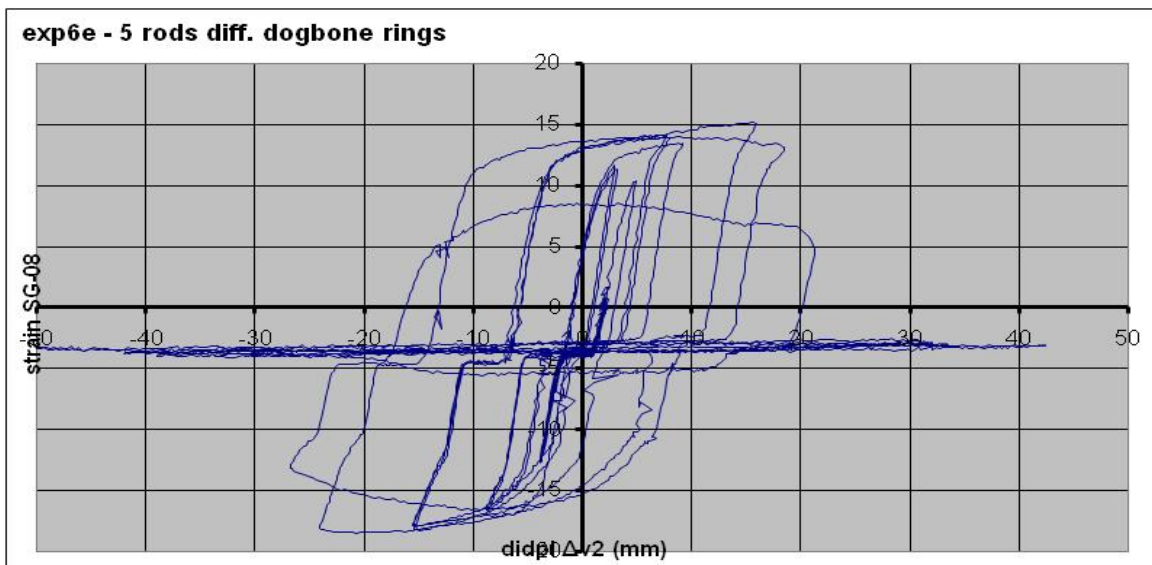
Διαγρ. 5.15.6. Βρόχοι υστέρησης-διατμητική μετακίνηση-τάση ακραίας ίνας (5 ROD Φ33) Ringslots



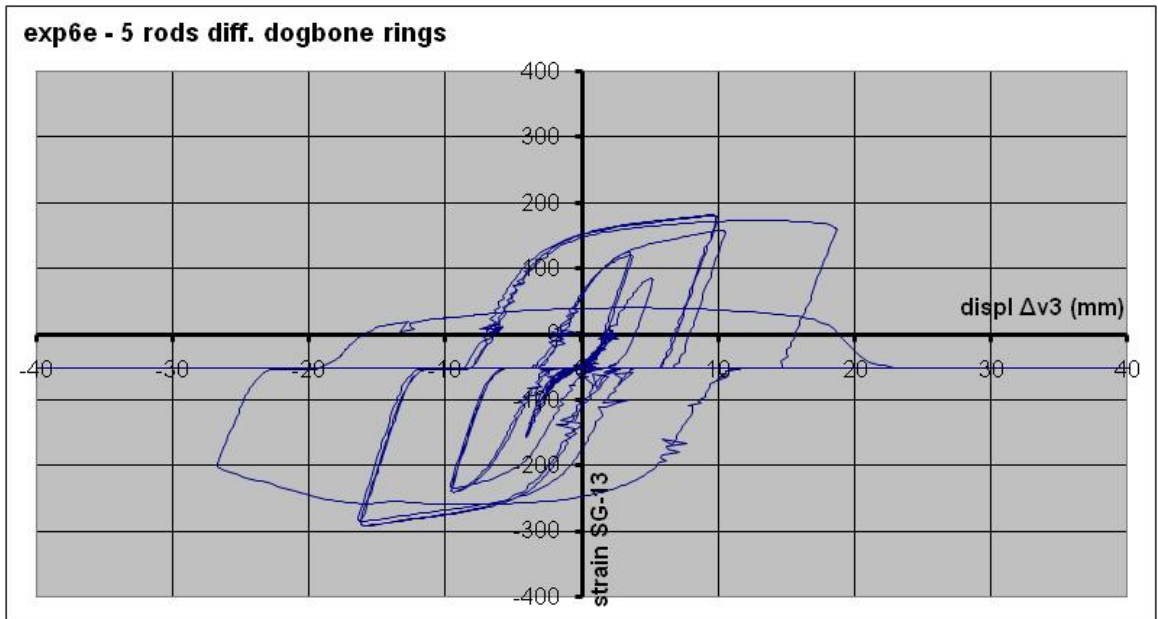
Διαγρ. 5.15.7. Βρόχοι υστέρησης–διατμητική μετακίνηση–τάση ακραίας ίνας (5 ROD $\Phi 33$) Ringslots



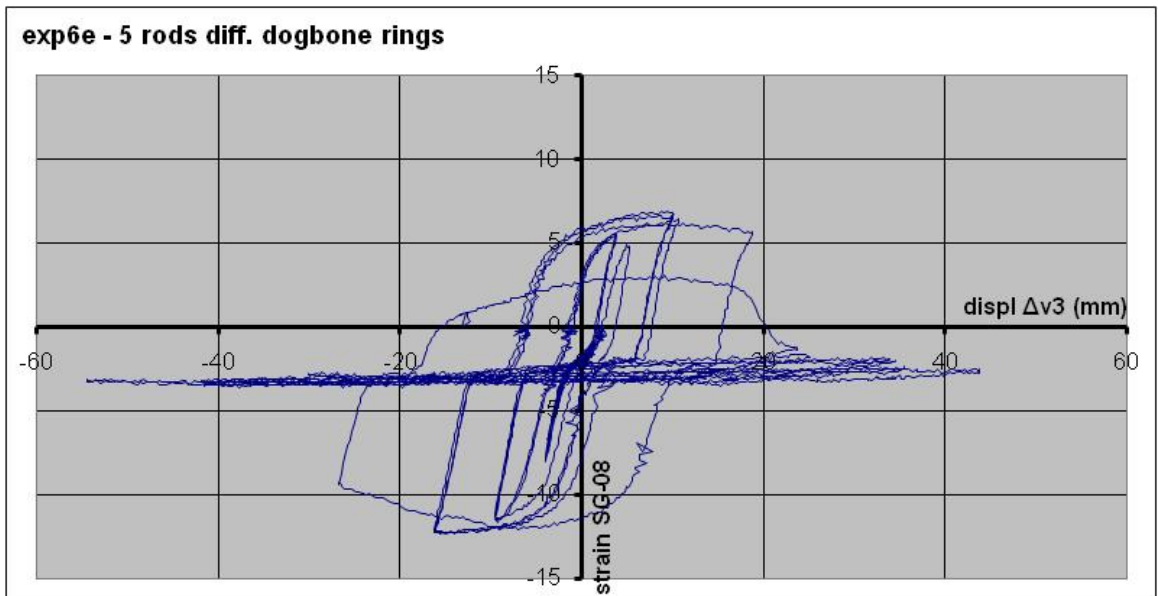
Διαγρ. 5.15.8. Βρόχοι υστέρησης–διατμητική μετακίνηση–τάση ακραίας ίνας (5 ROD $\Phi 33$) Ringslots



Διαγρ. 5.15.9. Βρόχοι υστέρησης–διατμητική μετακίνηση–τάση ακραίας ίνας (5 ROD $\Phi 33$) Ringslots



Διαγρ. 5.15.10. Βρόχοι υστέρησης–διατμητική μετακίνηση–τάση ακραίας ίνας (5 ROD Φ33) Ringslots



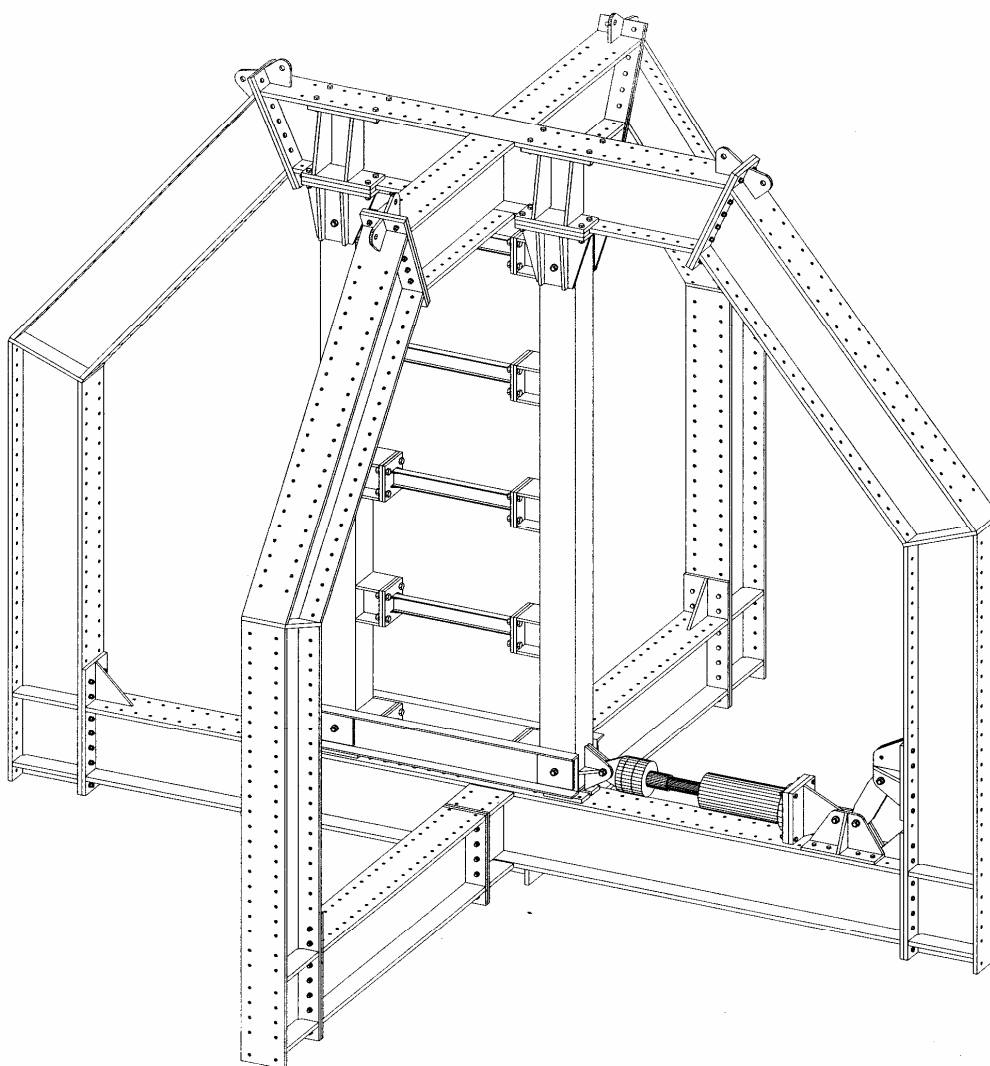
Διαγρ. 5.15.11. Βρόχοι υστέρησης–διατμητική μετακίνηση–τάση ακραίας ίνας (5 ROD Φ33) Ringslots

5.2 Πείραμα 2 - 5 IPE 100

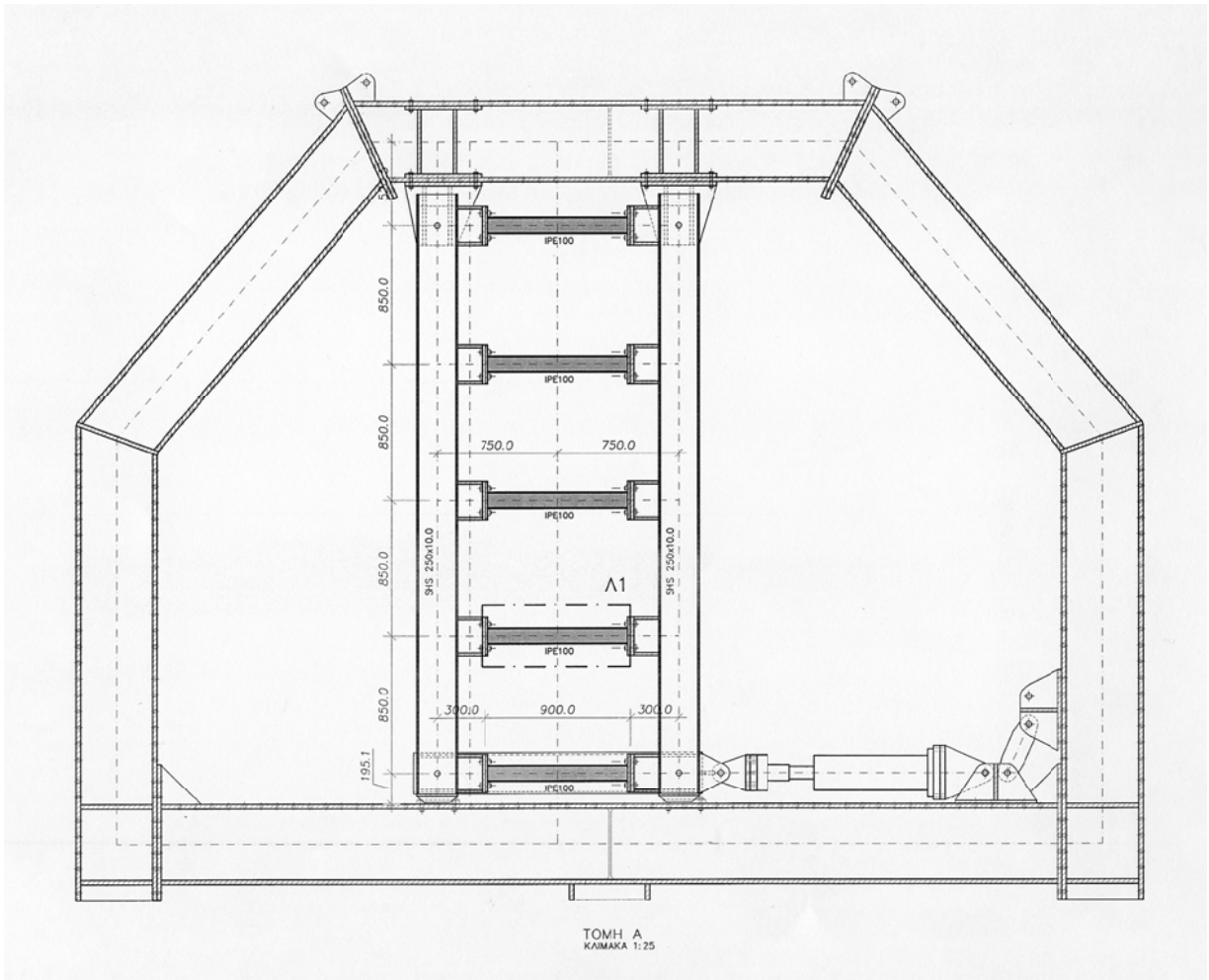
	#	Τύπος δοκιμίου	Ημερομ.	displ Δx	Σχόλια
2	1b	5 IPE 100	12-7-2007	0-135 mm	
	1c	5 IPE 100	17-7-2007	135-150 mm	συνέχεια του 1b

Το πρώτο πείραμα σε πλήρη διάταξη, έγινε με πέντε συνδετήριες δοκούς, IPE 100. Το πείραμα ακολούθησε το αρχικό πρωτόκολλο φόρτισης και ολοκληρώθηκε με μετακίνηση 135 mm. Στην συνέχεια σε δεύτερη φάση, αφού δεν είχε παρουσιαστεί αστοχία, συμπληρώθηκαν οι μετακινήσεις μέχρι τις μέγιστες δυνατές, 150 mm.

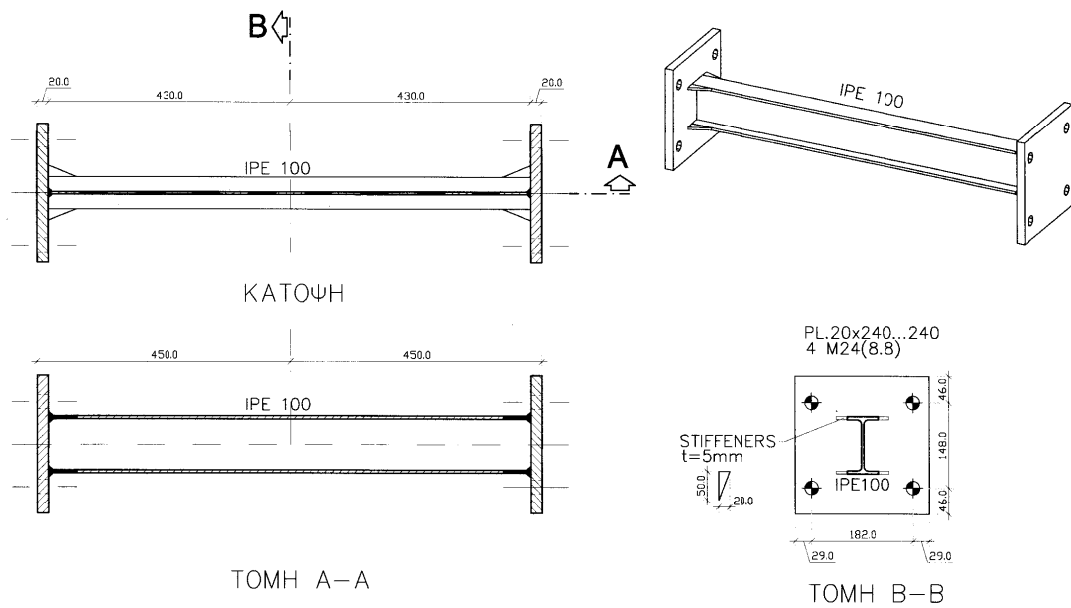
Στη μετακίνηση αυτή, 150 mm, παρουσιάστηκαν αστοχίες, με συνολικές κατακόρυφες ρωγμές στο άκρο των δοκών, στο τέλος του μη ενισχυμένου τμήματος.



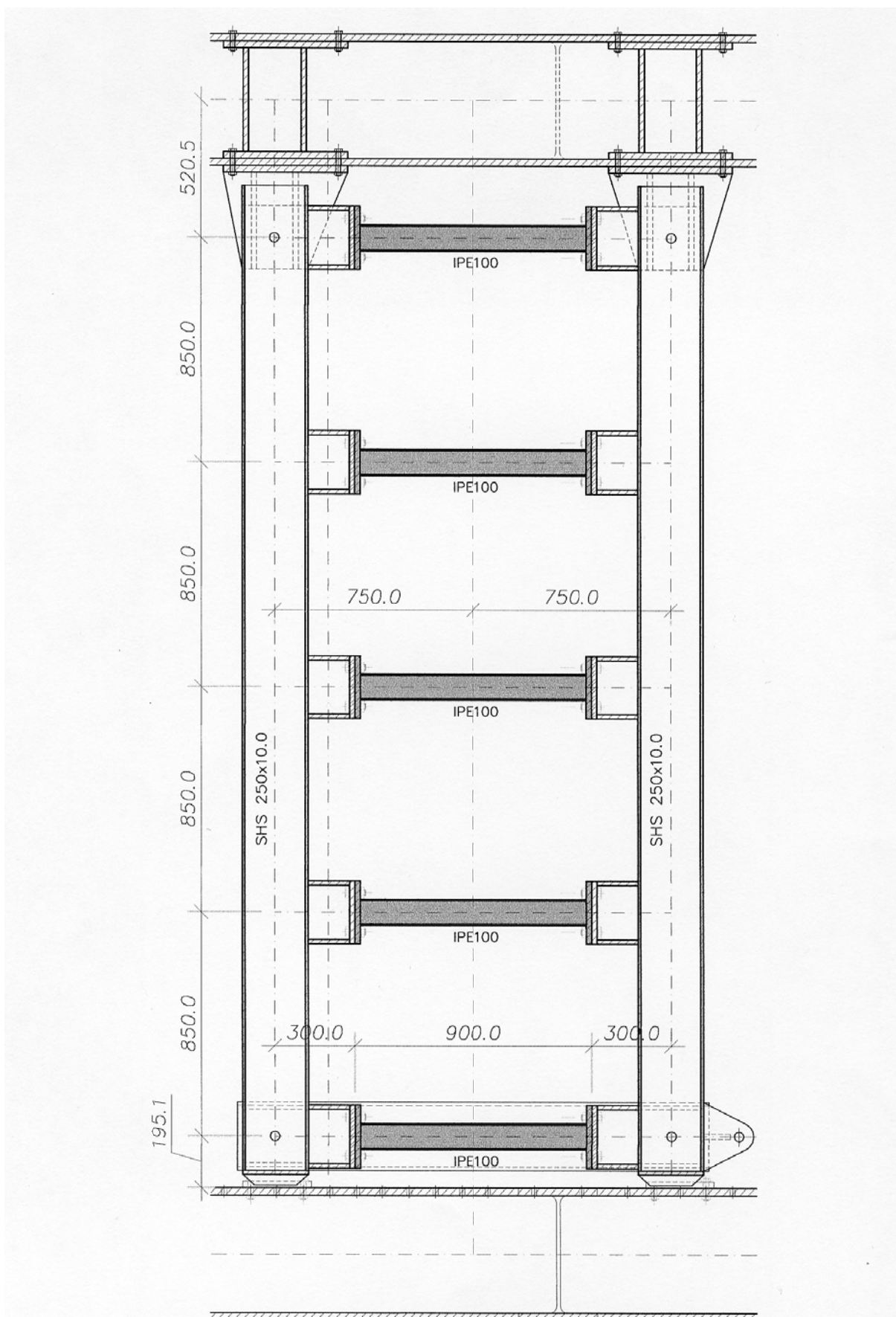
Σχ.5.2.1. Αξονομετρικό σχέδιο της πειραματικής διάταξης με 5 IPE 100



Σχ.5.2.2. Συνολική όψη της πειραματικής διάταξης (5 IPE 100)

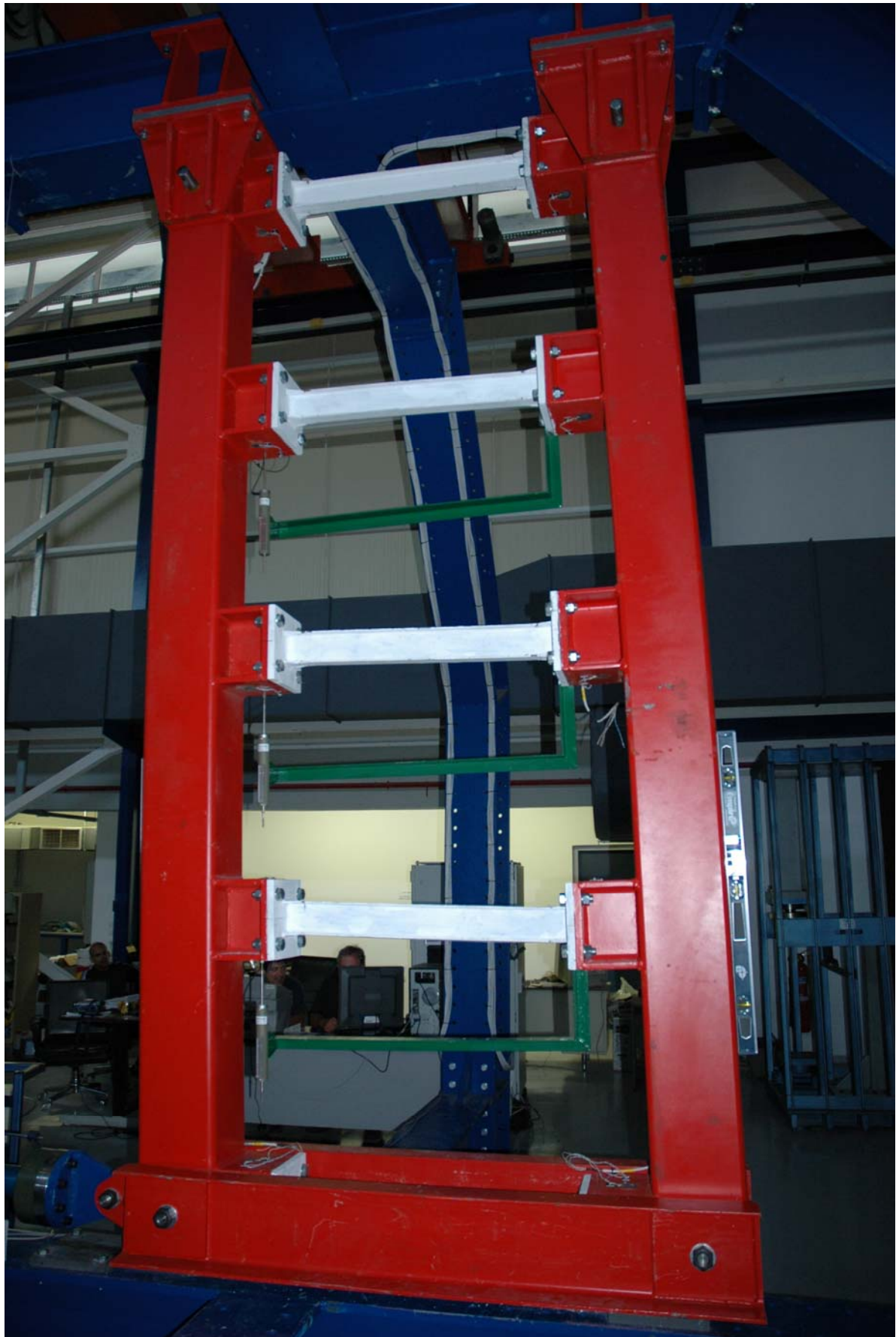


Σχ.5.2.3. Το δοκίμιο του πειράματος 5 IPE 100 με ενίσχυση στα άκρα

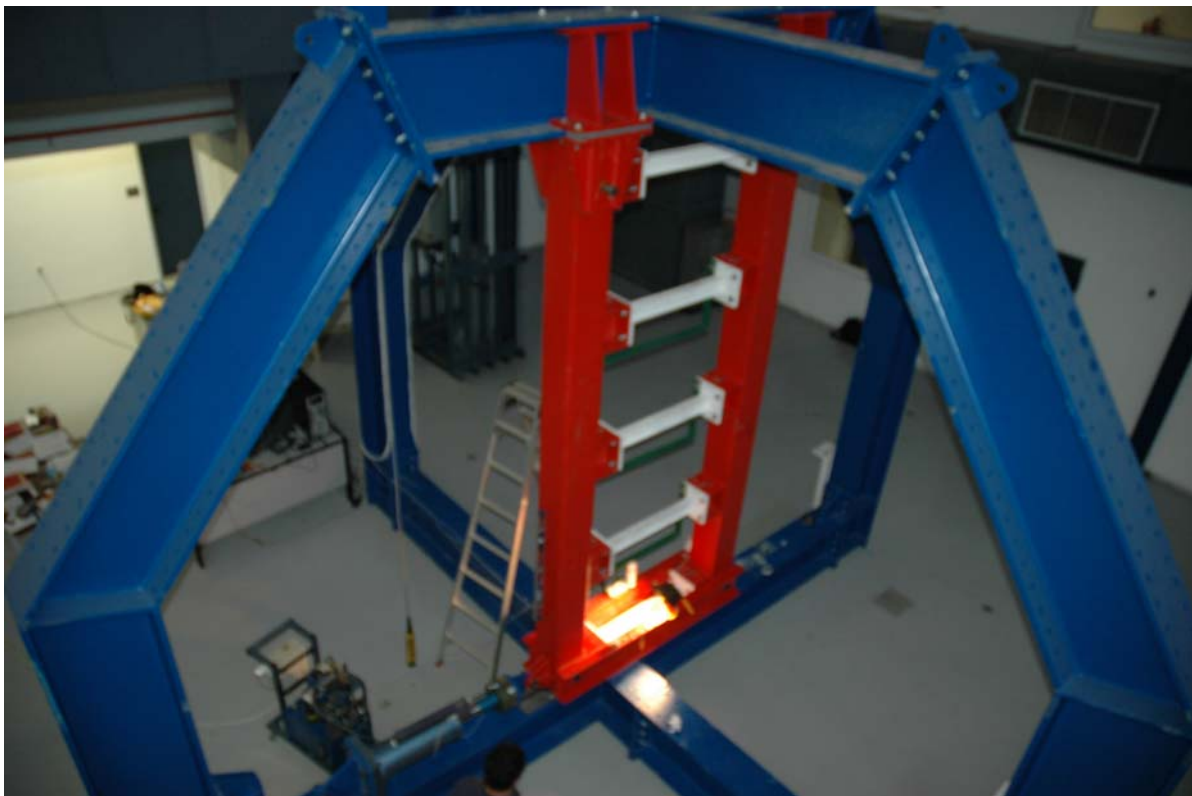


Σχ.5.2.4. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 5 IPE 100

IN ST E D - Καινοτόμα συστήματα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας, σε πολυώροφα αντισεισμικά μεταλλικά κτίρια.
Φαίδων Καρυδάκης



Φωτ. 5.2.1. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 5 IPE 100



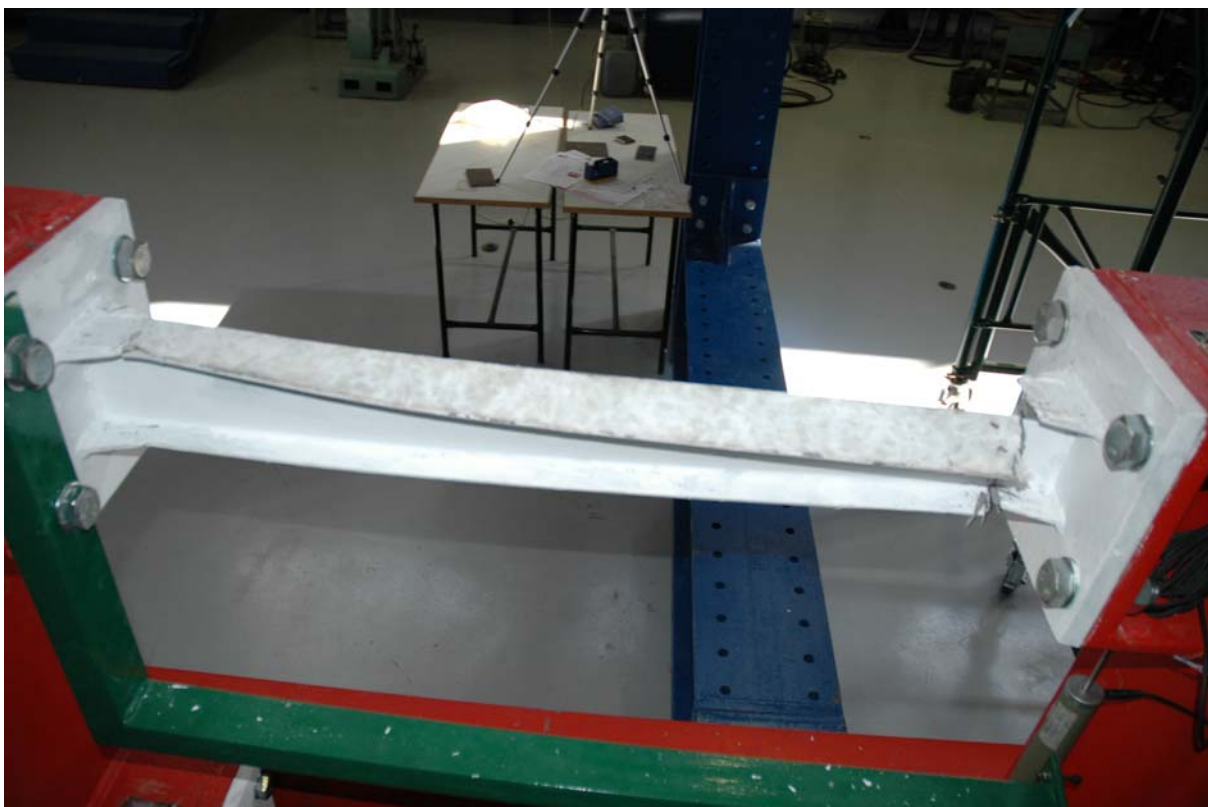
Φωτ. 5.2.2. Γενική διάταξη του πειράματος (πλαίσιο δοκιμών, συσκευή INSTED), δοκίμια 5 IPE



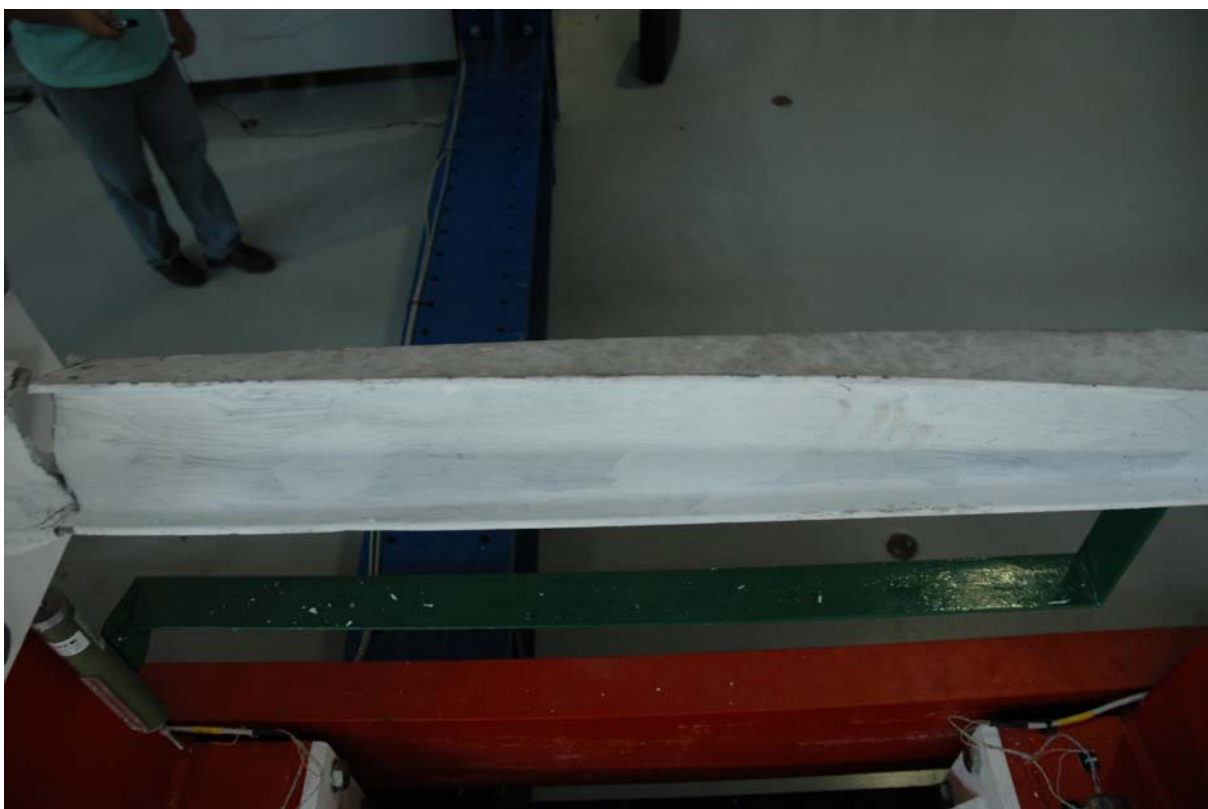
Φωτ. 5.2.3. Όψη δοκιμίου 1 IPE 100, με συνολική αστοχία (Πείραμα 5 IPE)



Φωτ. 5.2.4. . Όψη της κατακόρυφης Vierendeel σε συνθήκες πλήρους αστοχίας (πείραμα 5 IPE 100)



Φωτ. 5.2.5. Δοκίμιο (λεπτομέρεια) σε συνθήκες πλήρους αστοχίας (πείραμα 5 IPE 100)



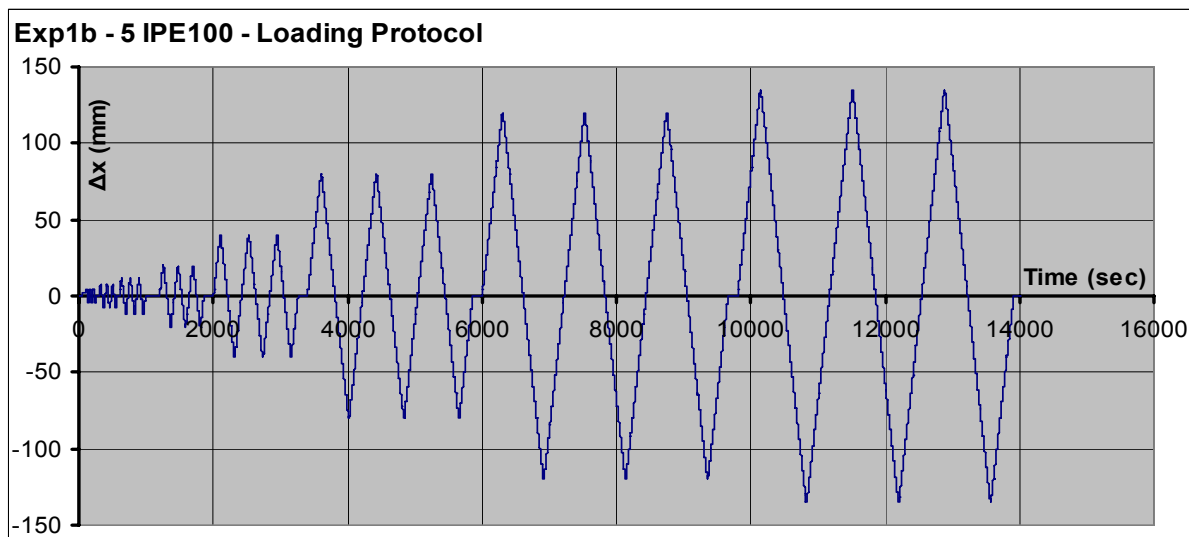
Φωτ. 5.2.6. Δοκίμιο (λεπτομέρεια) σε συνθήκες πλήρους αστοχίας (πείραμα 5 IPE 100)



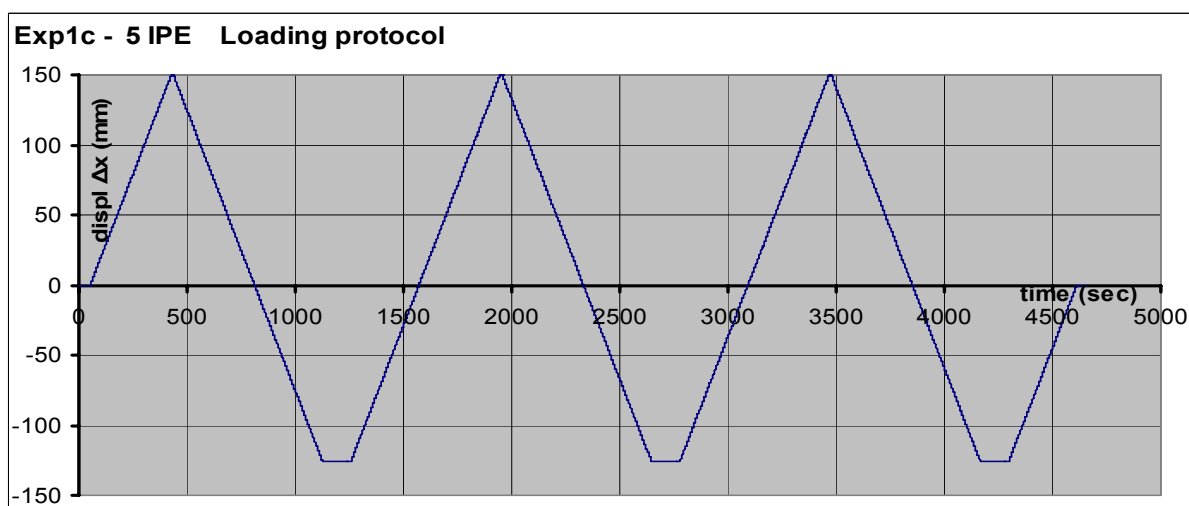
Φωτ. 5.2.7. Όψη του δοκιμίου (λεπτομέρεια) σε συνθήκες πλήρους αστοχίας (πείραμα 5 IPE 100)



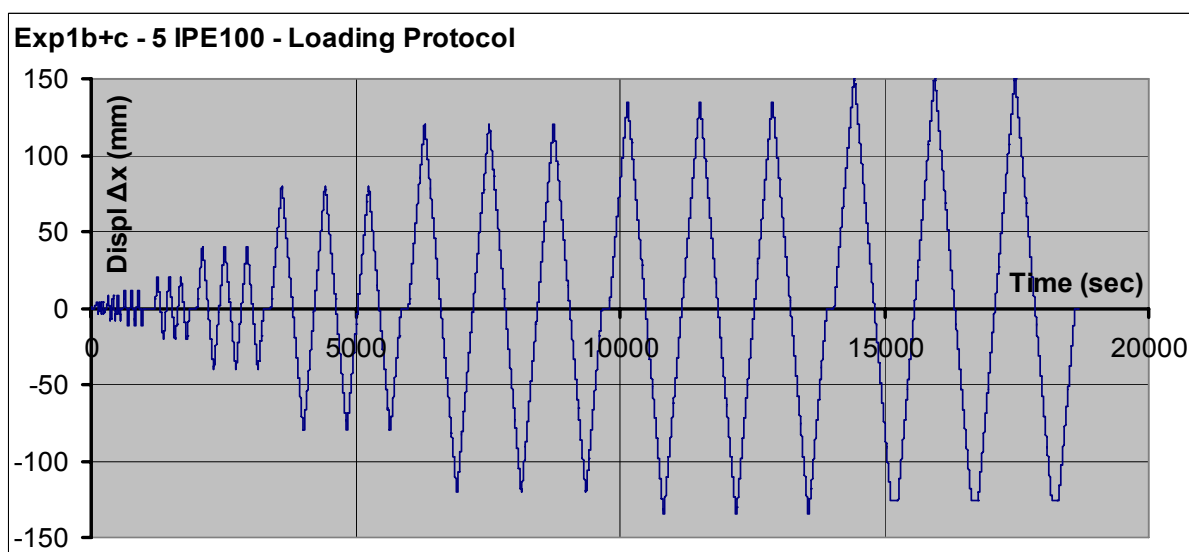
Φωτ. 5.2.8. Κάτοψη δοκιμίου σε συνθήκες πλήρους αστοχίας (πείραμα 5 IPE 100)



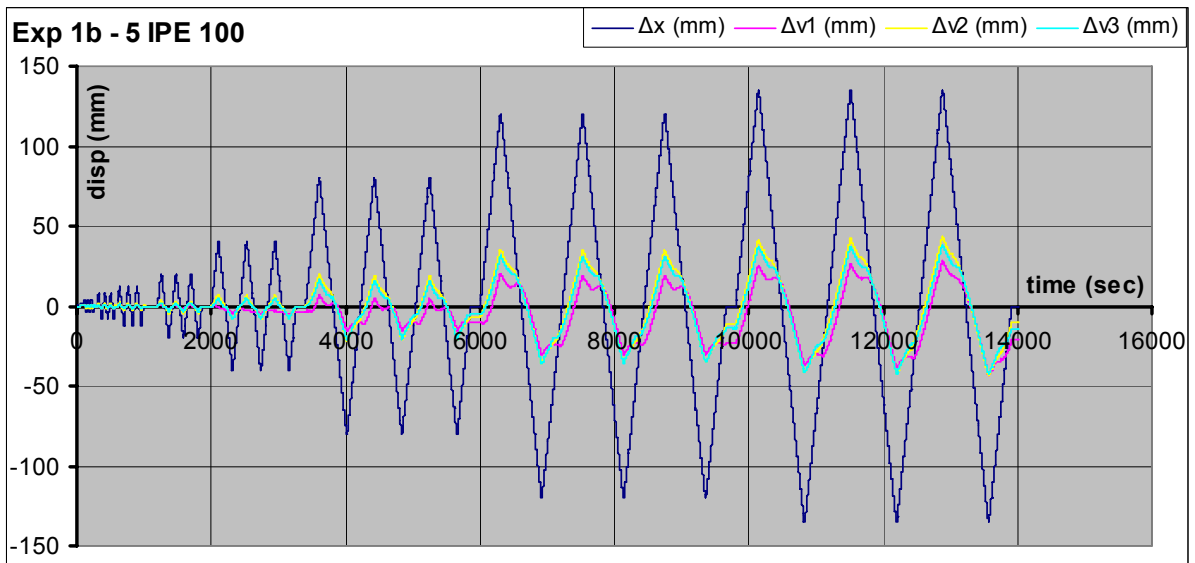
Διαγρ. 5.2.1. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (5 IPE) έως $\Delta\chi=135$ mm



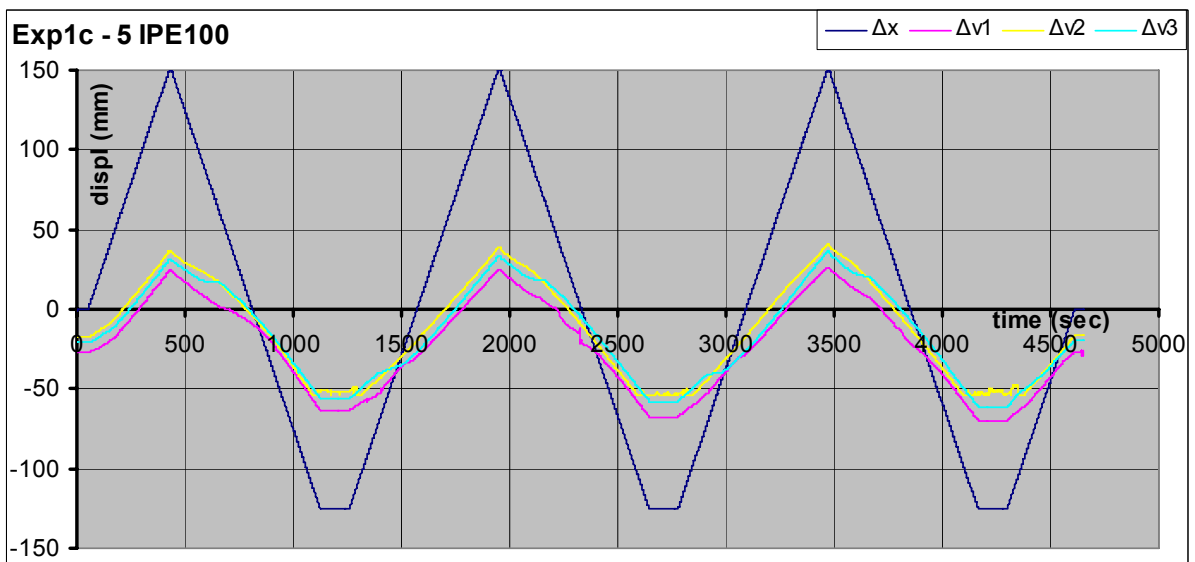
Διαγρ. 5.2.2. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (5 IPE) $\Delta\chi=135-150$ mm



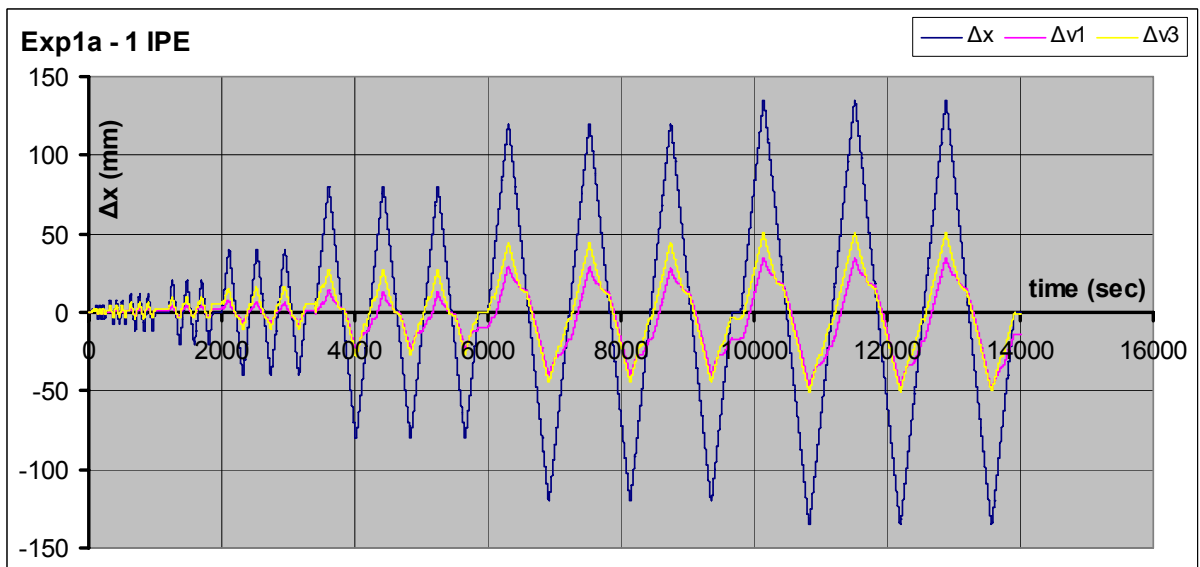
Διαγρ. 5.2.3. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (5 IPE) $\Delta\chi=0-135-150$ mm



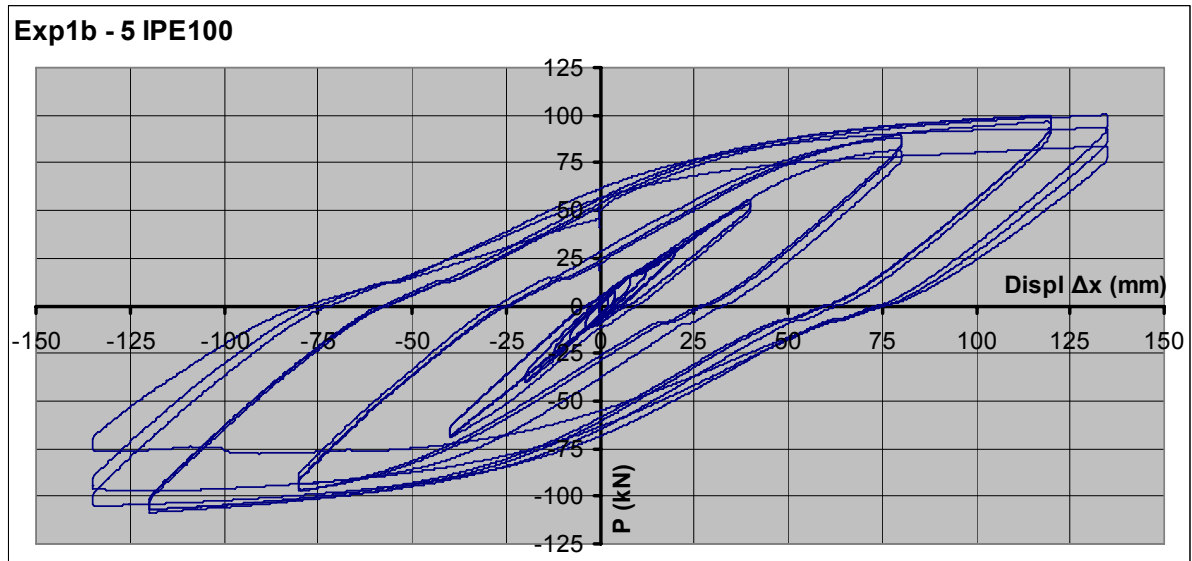
Διαγρ. 5.2.4. Διάγραμμα οριζοντίων και διατμητικών μετακινήσεων $\Delta x = 0-135$ mm (5 IPE)



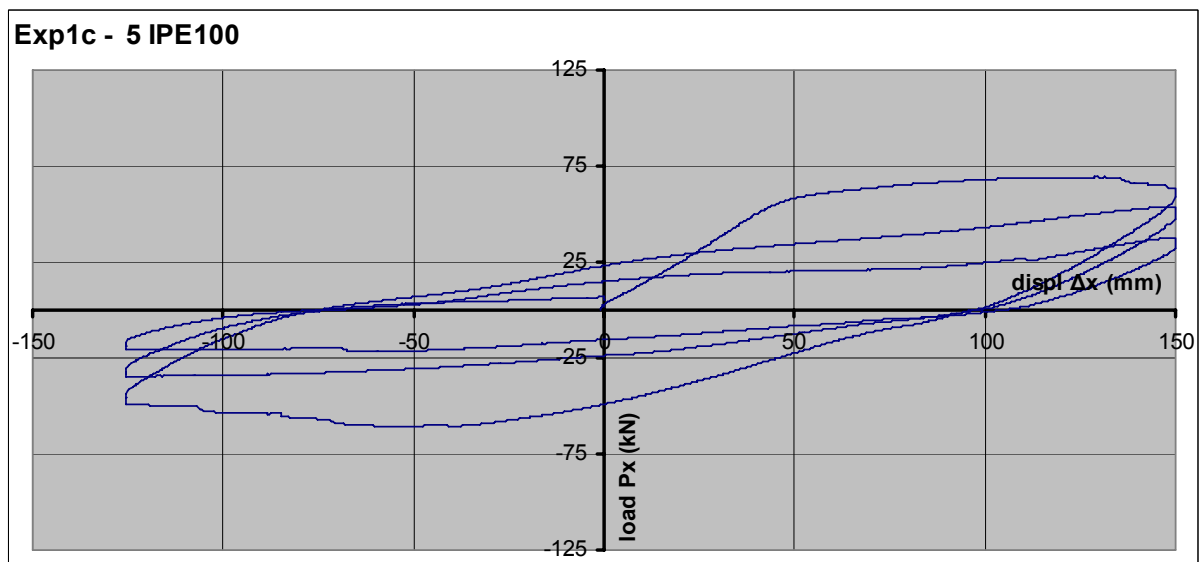
Διαγρ. 5.2.5. Διάγραμμα οριζοντίων και διατμητικών μετακινήσεων $\Delta x = 135-150$ mm (5 IPE)



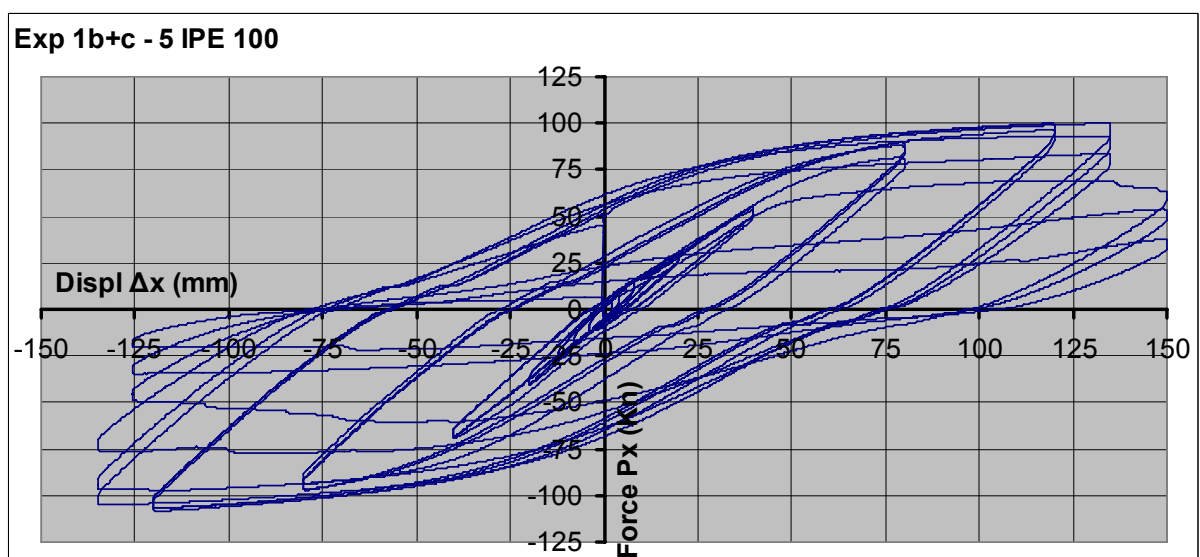
Διαγρ. 5.2.6. Διάγραμμα οριζοντίων και διατμητικών μετακινήσεων $\Delta x = 135-150$ mm (5 IPE)



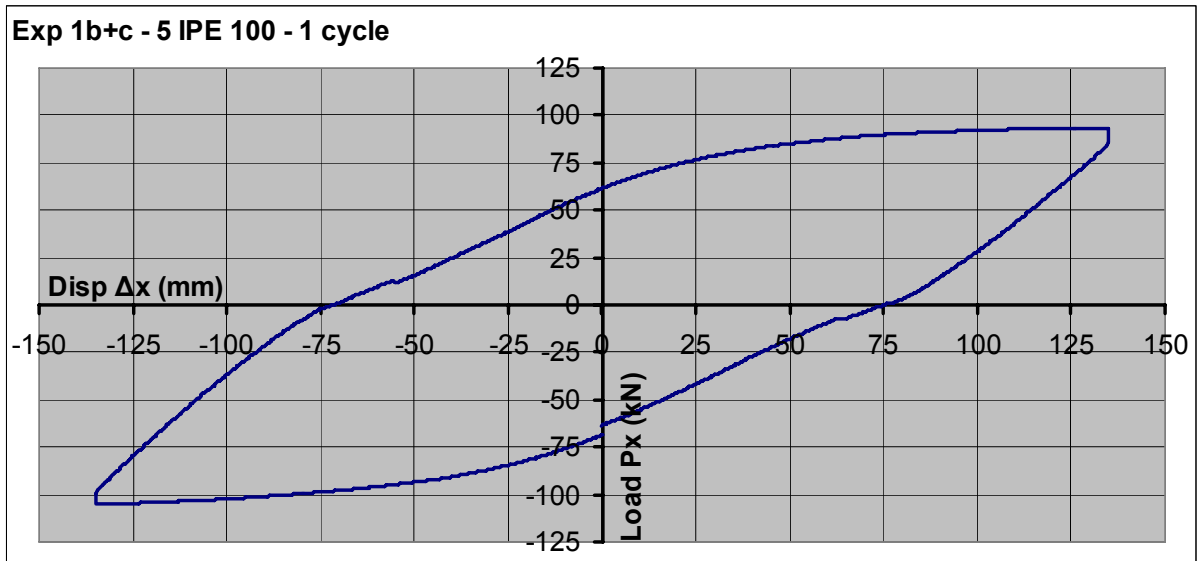
Διαγρ. 5.2.7. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (5 IPE) $\Delta x=0-135$ mm



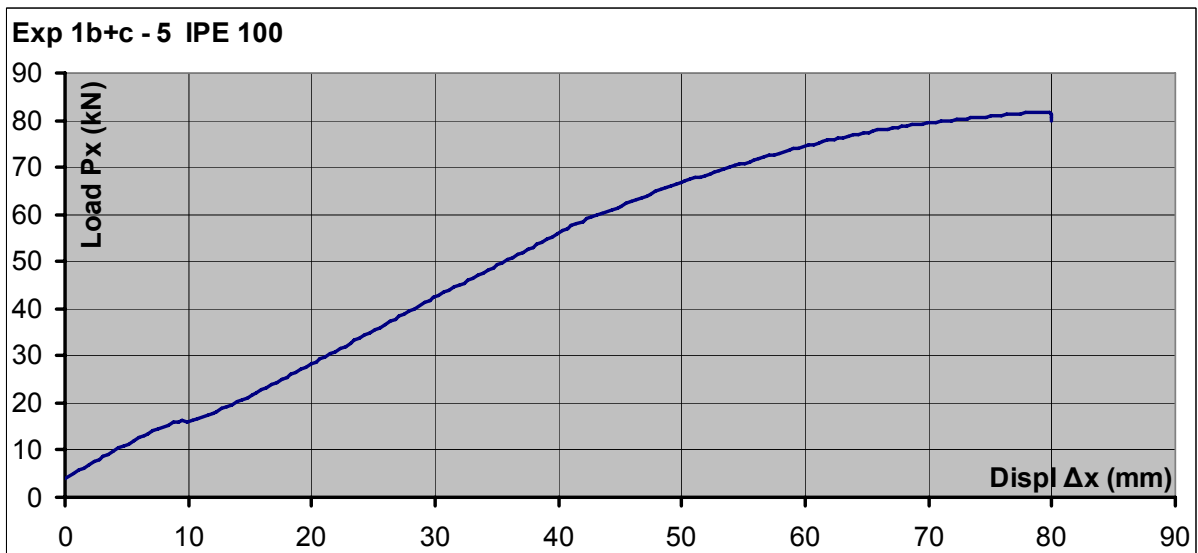
Διαγρ. 5.2.8. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (5 IPE) $\Delta x=-135-150$ mm



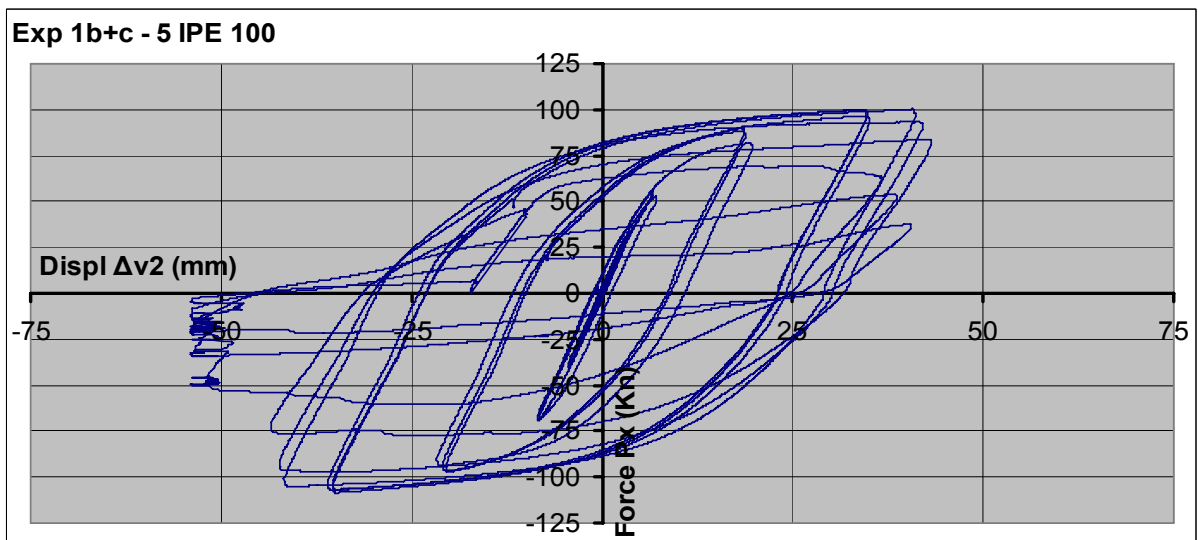
Διαγρ. 5.2.9. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (5 IPE) $\Delta x=0-150$ mm



Διαγρ. 5.2.10. Τυπικός βρόχος υστέρησης σε μετακινήσεις 4% (5 IPE)



Διαγρ. 5.2.11. Διάγραμμα φορτίου μετακίνησης σε κύκλο με $\Delta x = 135$ (4%) (5 IPE)



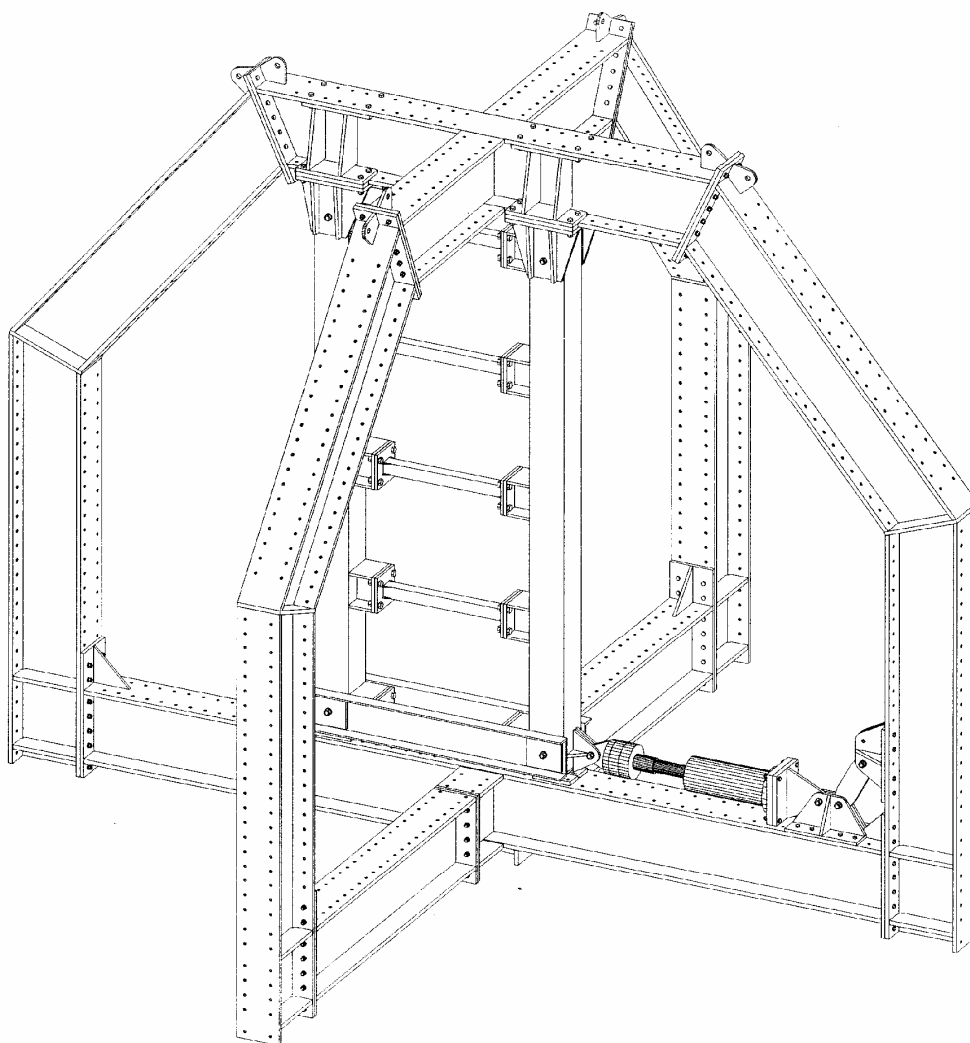
Διαγρ. 5.2.12. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου διατμητικών μετακινήσεων (5 IPE)

5.3 Πείραμα 2 – 5 SHS 80/5

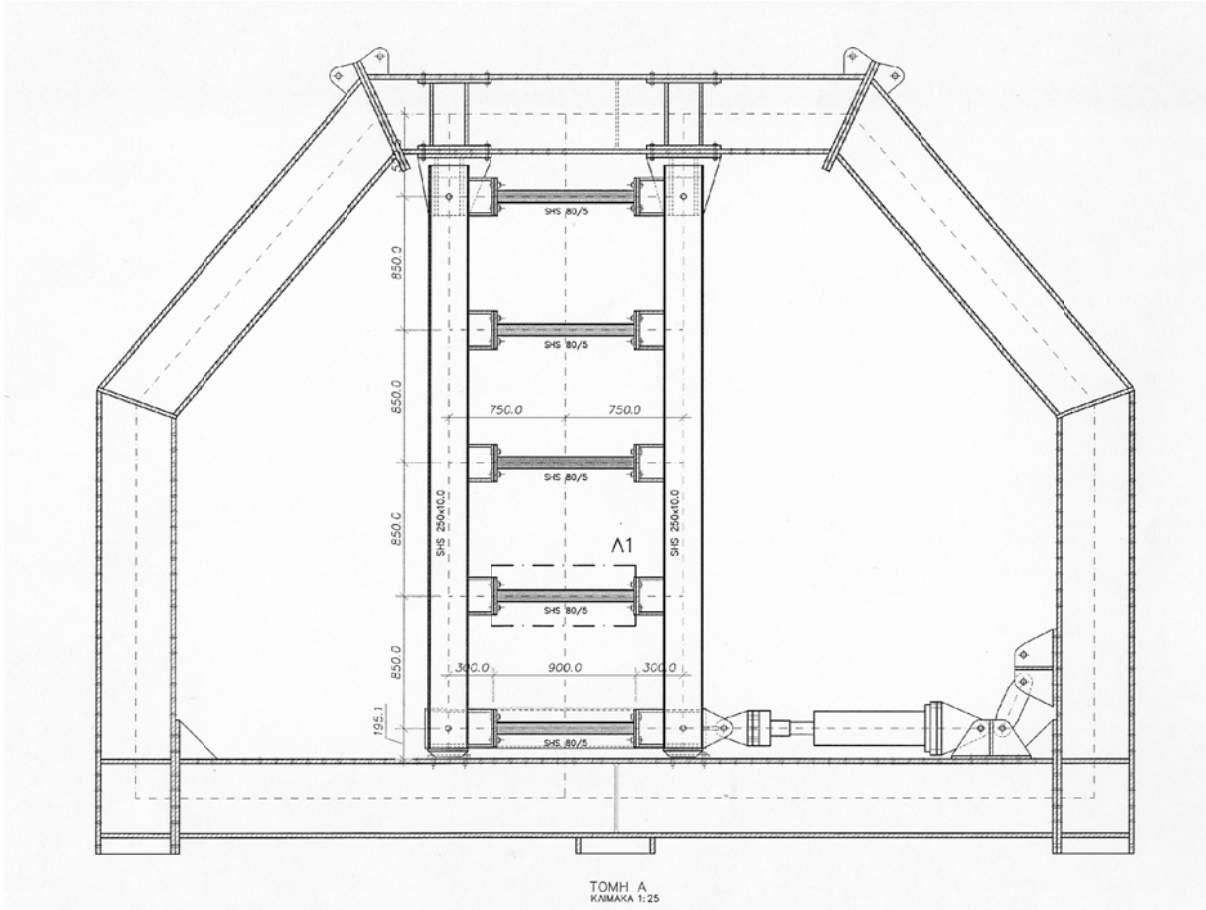
	#	Τύπος δοκιμίου	Ημερομ.	displ Δx	Σχόλια
3	2a	5 SHS 80/5	19-7-2007	0 - 135 mm	
	2b	5 SHS 80/5	19-7-2007	135-150 mm	συνέχεια του 2a

Το δεύτερο πείραμα σε πλήρη διάταξη, με πέντε συνδετήριες κοιλοδοκούς, έγινε με SHS 80/5. Το πείραμα ακολούθησε το αρχικό πρωτόκολλο φόρτισης και ολοκληρώθηκε με μετακίνηση 135 mm, παρουσία κοινού. Στην συνέχεια σε δεύτερη φάση, αφού δεν είχε παρουσιαστεί πλήρης αστοχία, συμπληρώθηκαν οι μετακινήσεις μέχρι τις μέγιστες δυνατές, 150 mm.

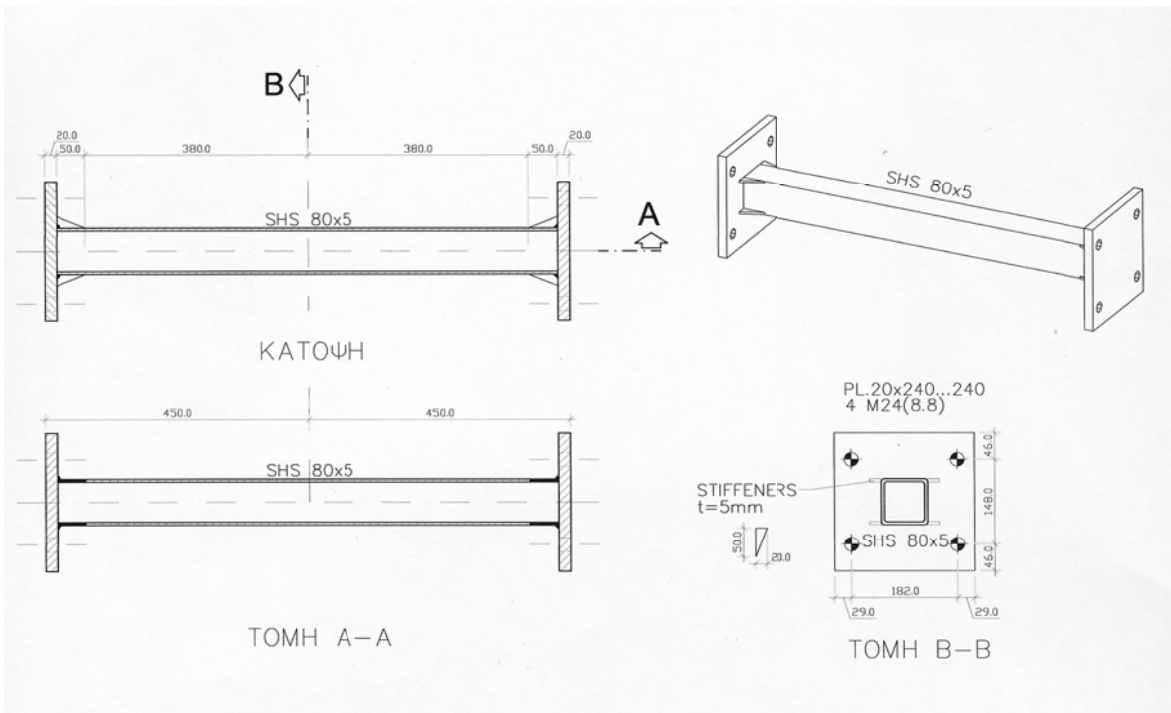
Στη μετακίνηση αυτή, 150 mm, παρουσιάστηκαν αστοχίες, με συνολικές κατακόρυφες ρωγμές στο άκρο των δοκών, στο τέλος του μη ενισχυμένου τμήματος.



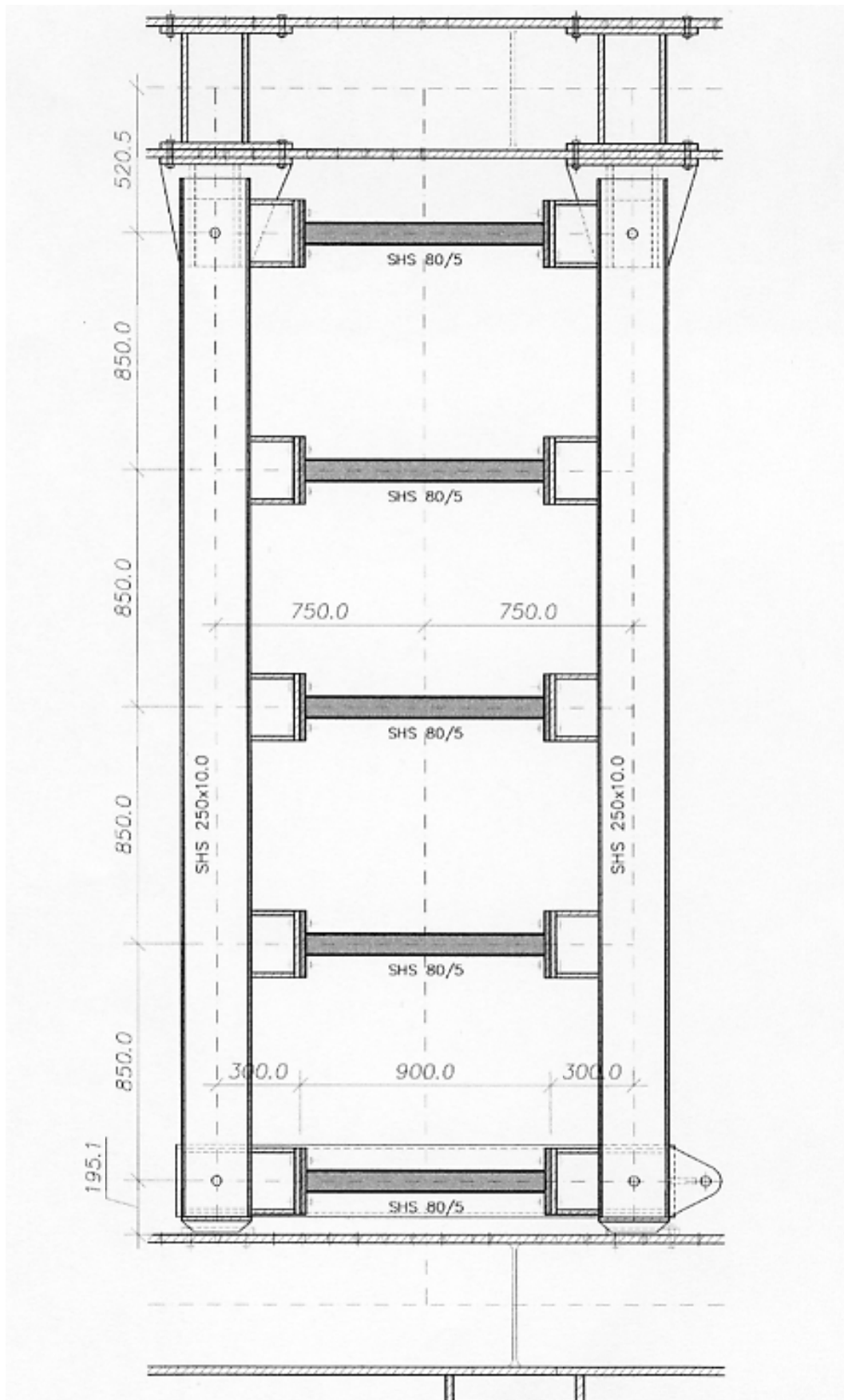
Σχ. 5.3.1. Αξονομετρικό σχέδιο της πειραματικής διάταξης με 5 SHS 80/5



Σχ.5.3.2. Συνολική όψη της πειραματικής διάταξης (5 SHS 80/5)



Σχ.5.3.3. Το δοκίμιο του πειράματος SHS 80/5 με ενίσχυση στα άκρα



Σχ.5.3.4. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 5 SHS 80/5

IN ST E D - Καινοτόμα συστήματα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας, σε πολυώροφα αντισεισμικά μεταλλικά κτίρια.
Φαίδων Καρυδάκης



Φωτ. 5.3.1. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 5 SHS 80/5



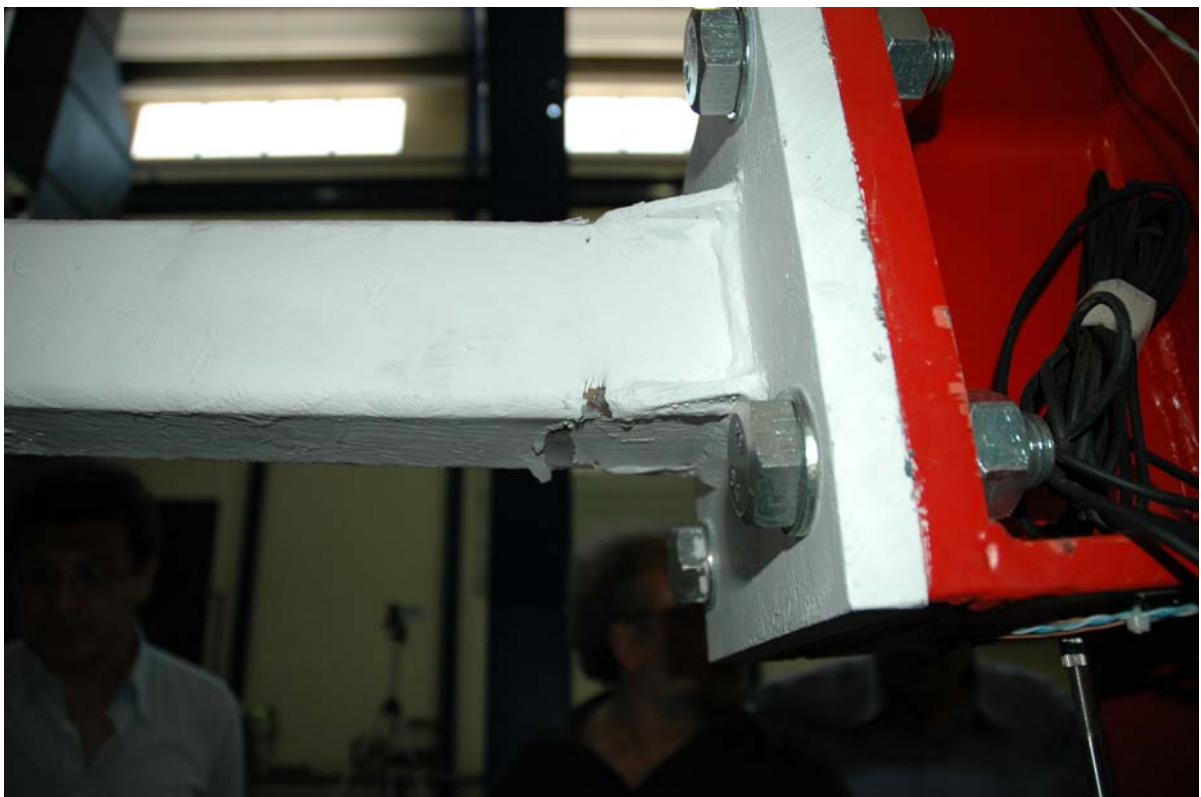
Φωτ. 5.3.2. Γενική διάταξη του πειράματος (πλαίσιο δοκιμών, συσκευή INSTED, δοκίμια 5 SHS 80/5)



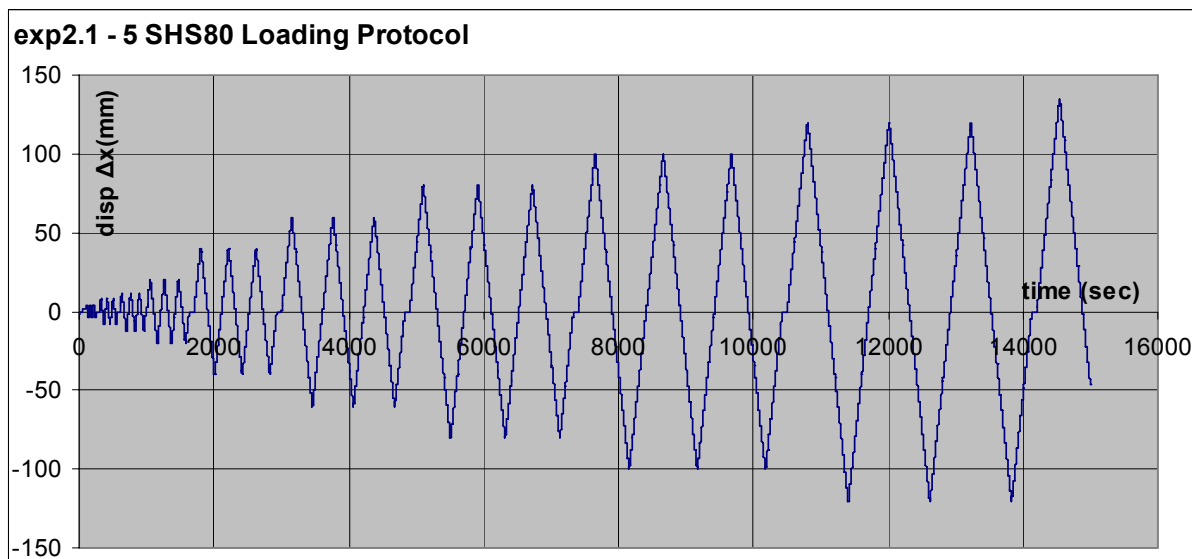
Φωτ. 5.3.3. Όψη του δοκιμίου 1 SHS 80/5, με συνολική αστοχία (Πείραμα 5 SHS 80/5)



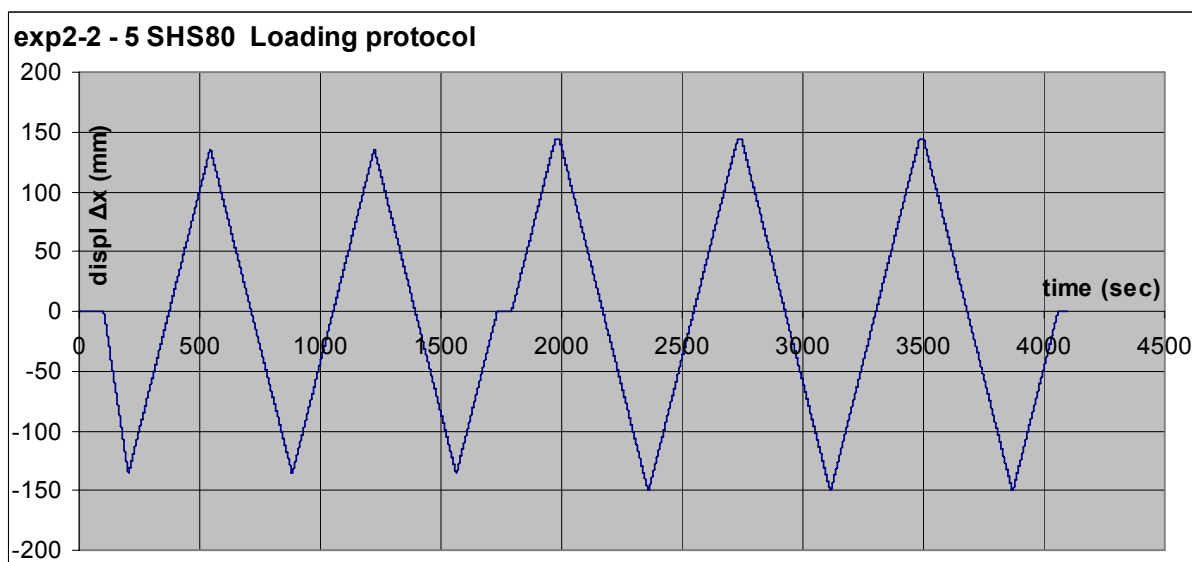
Φωτ. 5.3.4. Άνοψη δοκιμίου σε συνθήκες πλήρους αστοχίας (πείραμα 5 SHS 80/5)



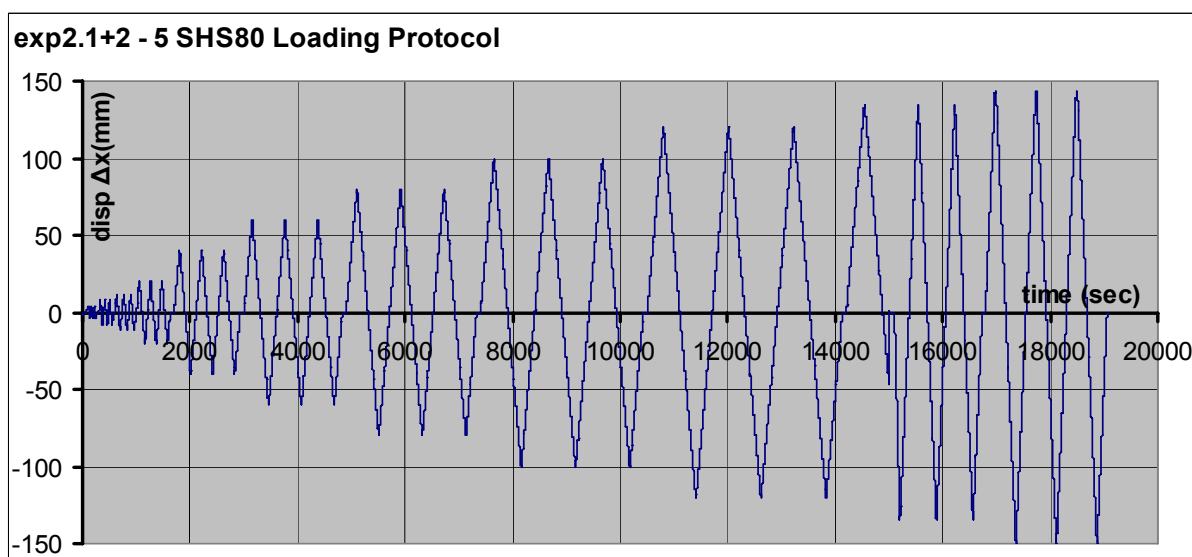
Φωτ. 5.3.5. Όψη του δοκιμίου (λεπτομέρεια) σε συνθήκες πλήρους αστοχίας (πείραμα 5 SHS 80/5)



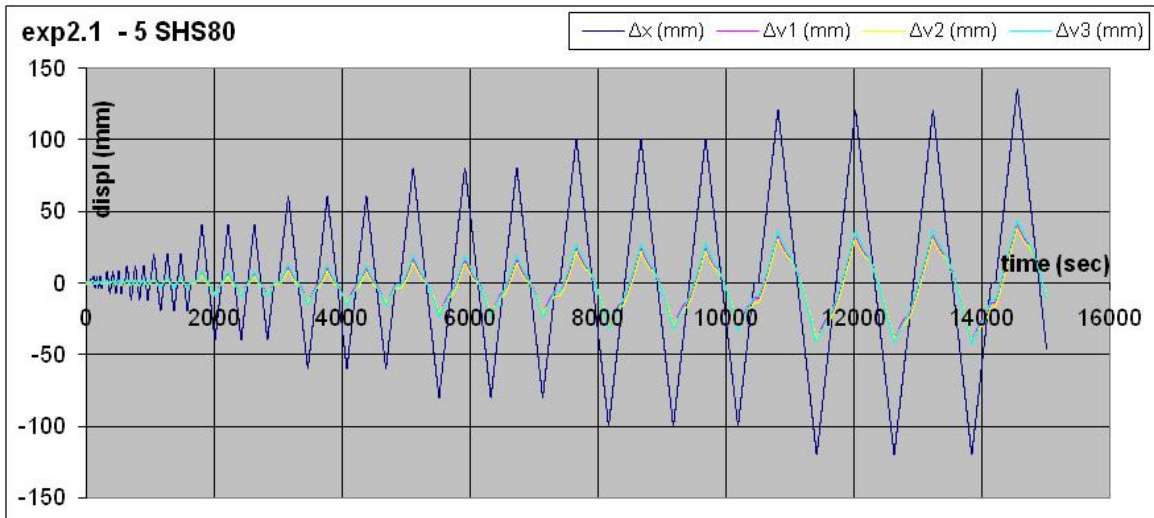
Διαγρ. 5.3.1. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (5 SHS 80/5) έως $\Delta x=135$ mm



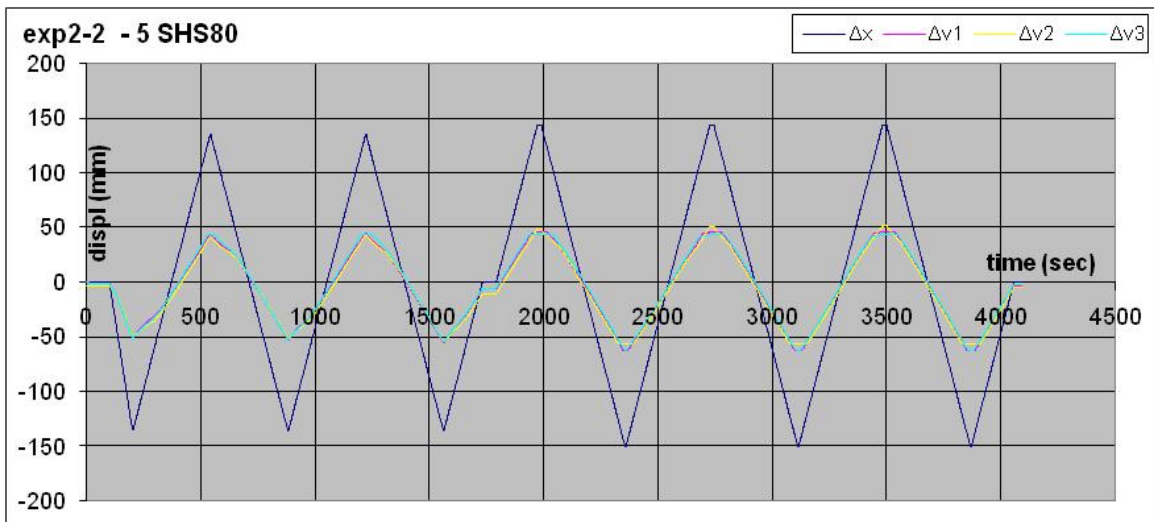
Διαγρ. 5.3.2. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (5 SHS 80/5) $\Delta x=135-150$ mm



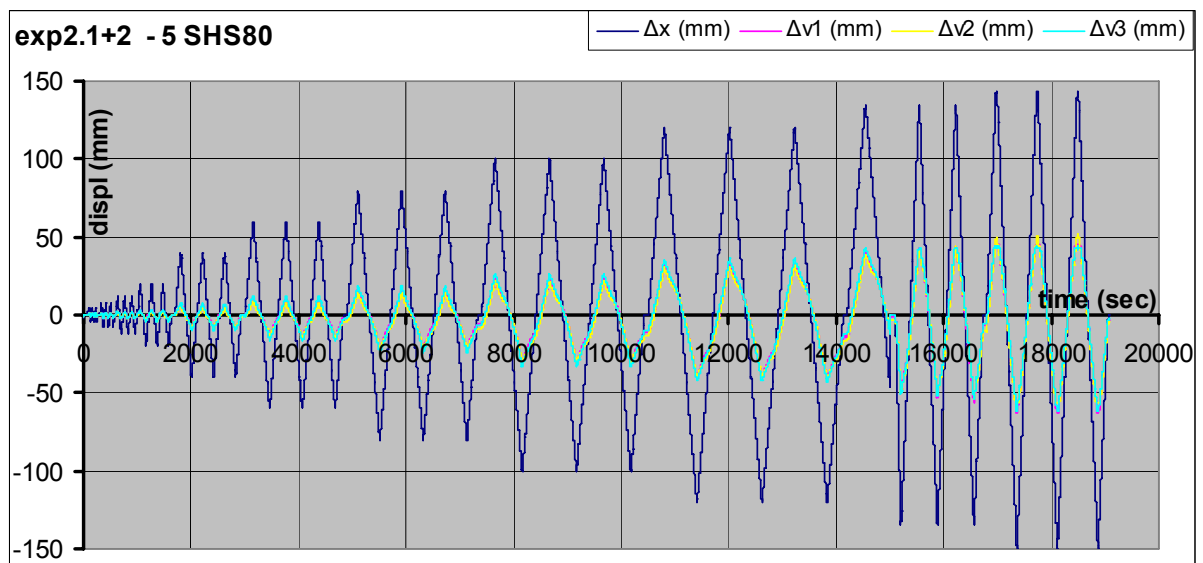
Διαγρ. 5.3.3. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (5 SHS 80/5) $\Delta x=0-135-150$ mm



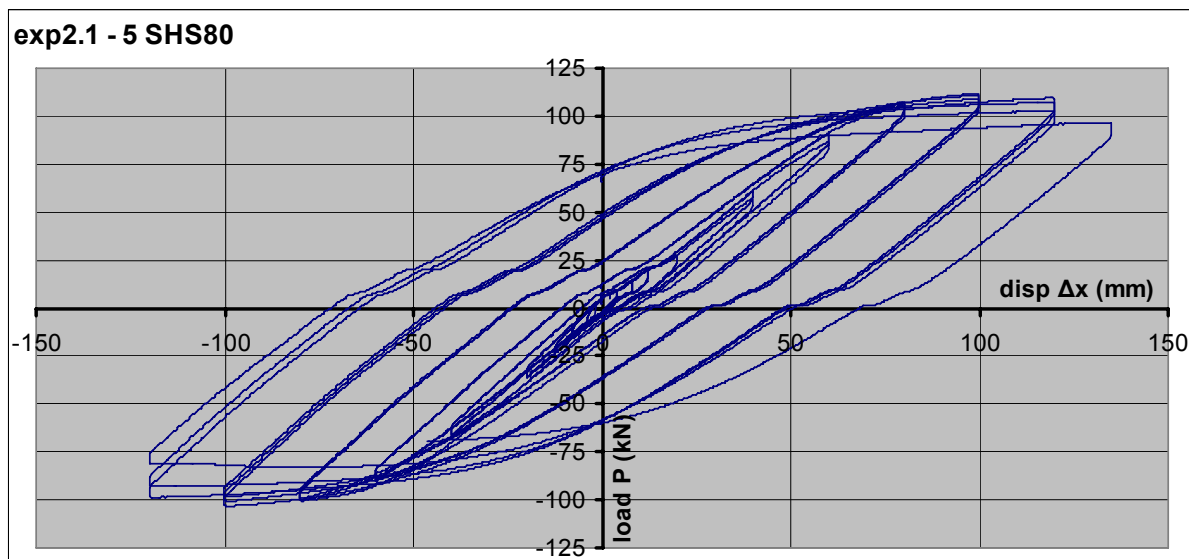
Διαγρ. 5.3.4. Διάγραμμα οριζοντίων και διατμητικών μετακινήσεων $\Delta\chi= 0-135$ mm (5 SHS 80/5)



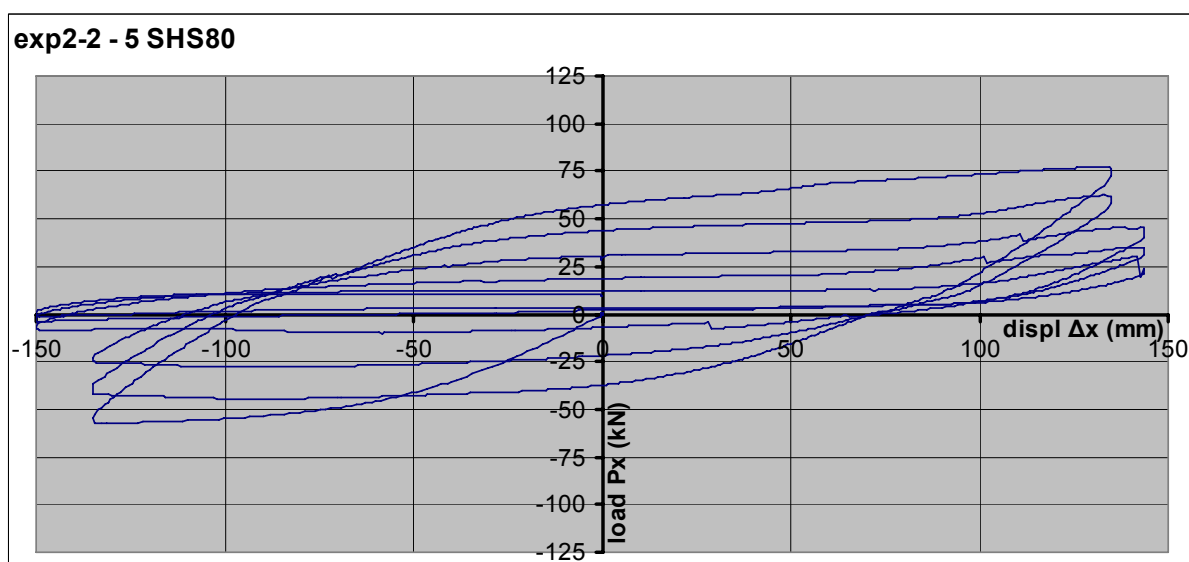
Διαγρ. 5.3.5. Διάγραμμα οριζοντίων και διατμητικών μετακινήσεων $\Delta\chi= 135-150$ mm (5 SHS 80/5)



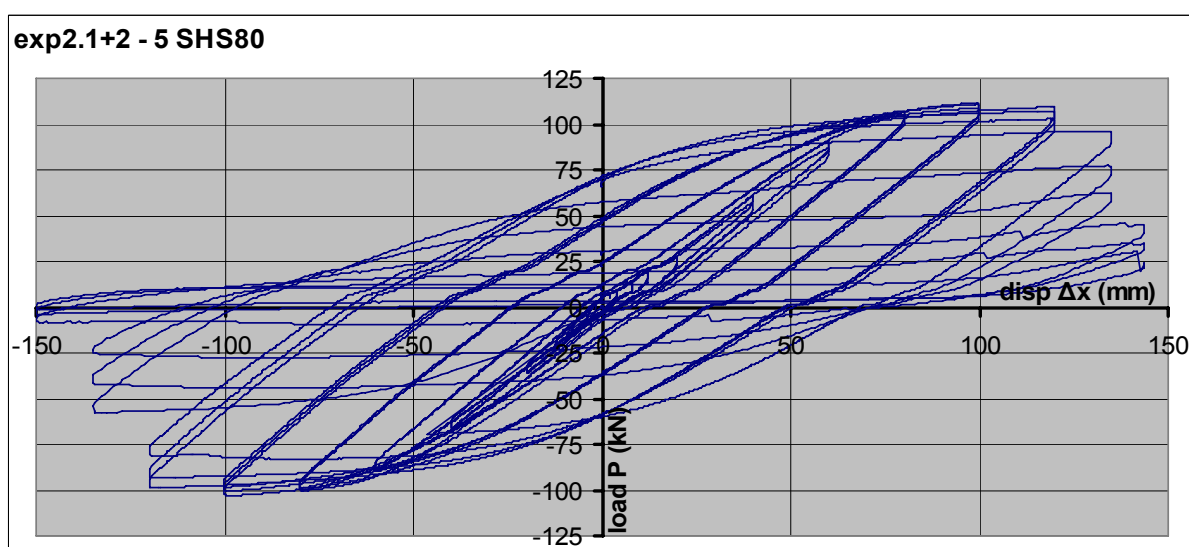
Διαγρ. 5.3.6. Διάγραμμα οριζοντίων και διατμητικών μετακινήσεων $\Delta\chi= 0-150$ mm (5 SHS 80/5)



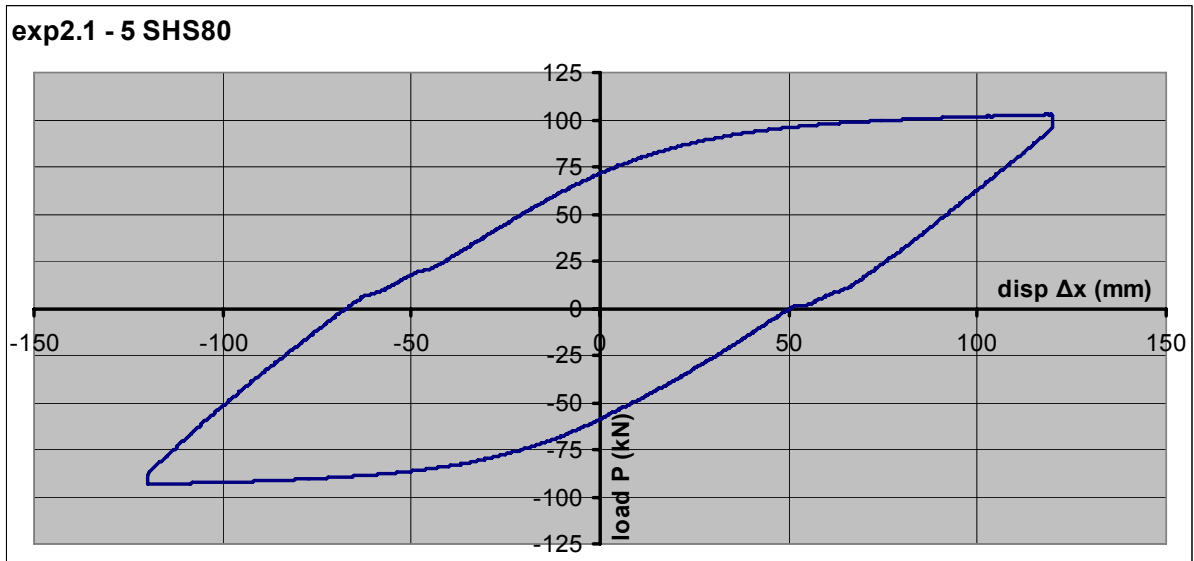
Διαγρ. 5.3.7. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (5 SHS 80/5) $\Delta x=0-135$ mm



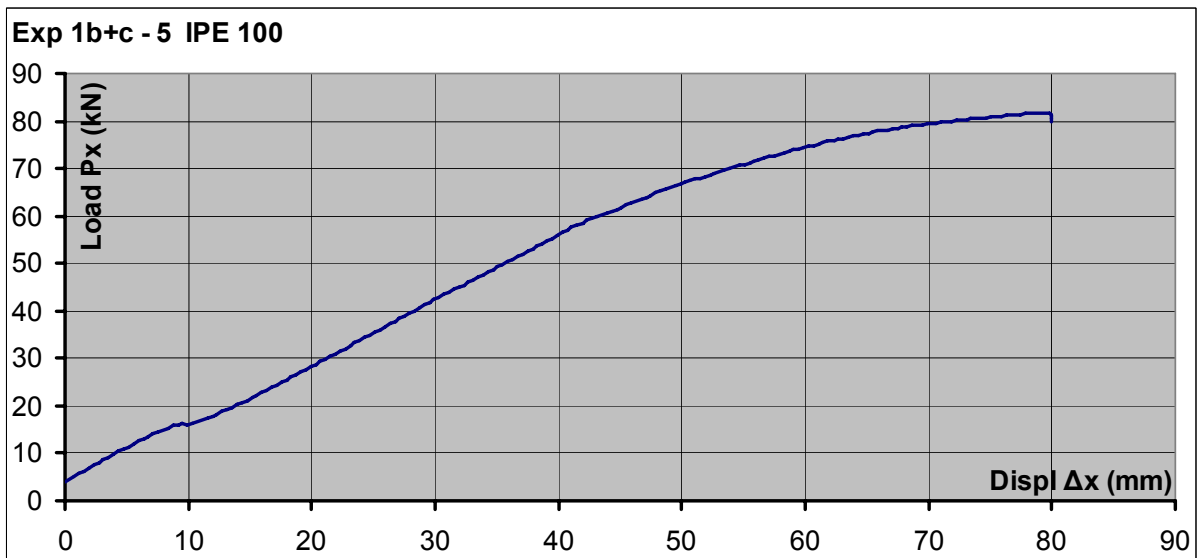
Διαγρ. 5.3.8. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (5 SHS 80/5) $\Delta x=-135-150$ mm



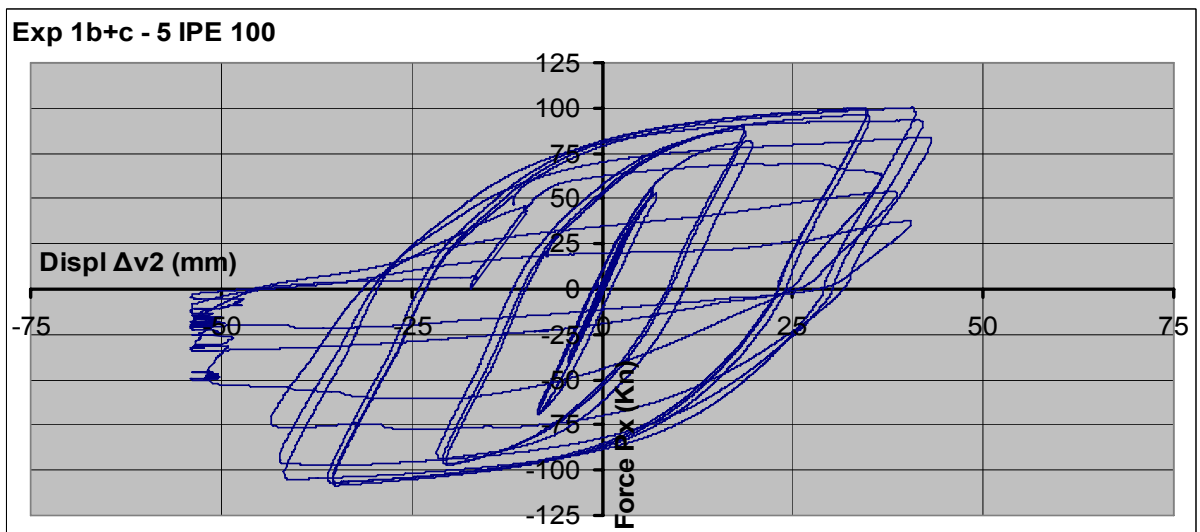
Διαγρ. 5.3.9. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (5 SHS 80/5) $\Delta x=0-150$ mm



Διαγρ. 5.3.10. Τυπικός βρόχος υστέρησης σε μετακινήσεις 4% (5 SHS 80/5)



Διαγρ. 5.2.11. Διάγραμμα φορτίου μετακίνησης σε κύκλο με $\Delta\chi=135$ (4%) (5 SHS 80/5)



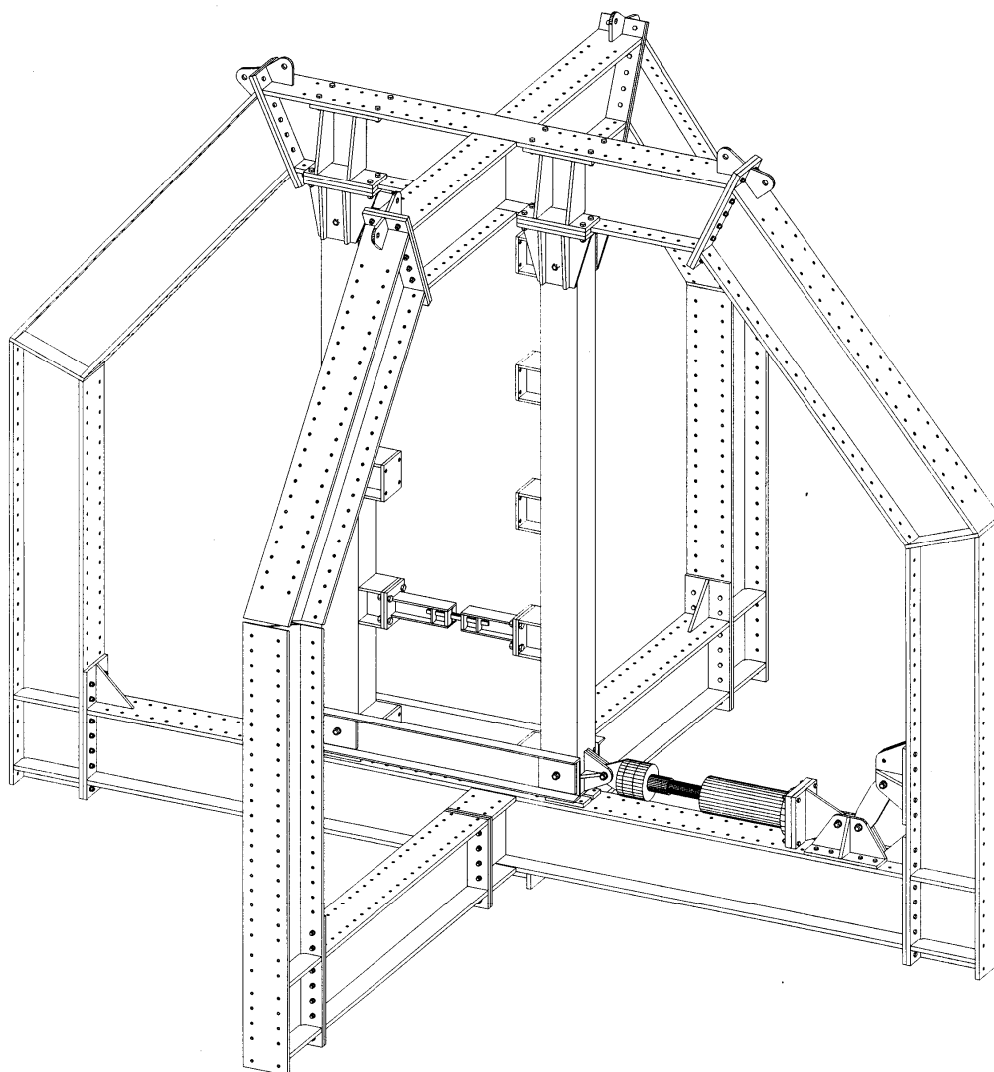
Διαγρ. 5.3.12. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου διαμηκτικών μετακινήσεων (5 SHS 80/5)

5.4 Πείραμα 4 –1 Δίδυμη ορθογωνική ράβδος τύπου INERD 2*12/30

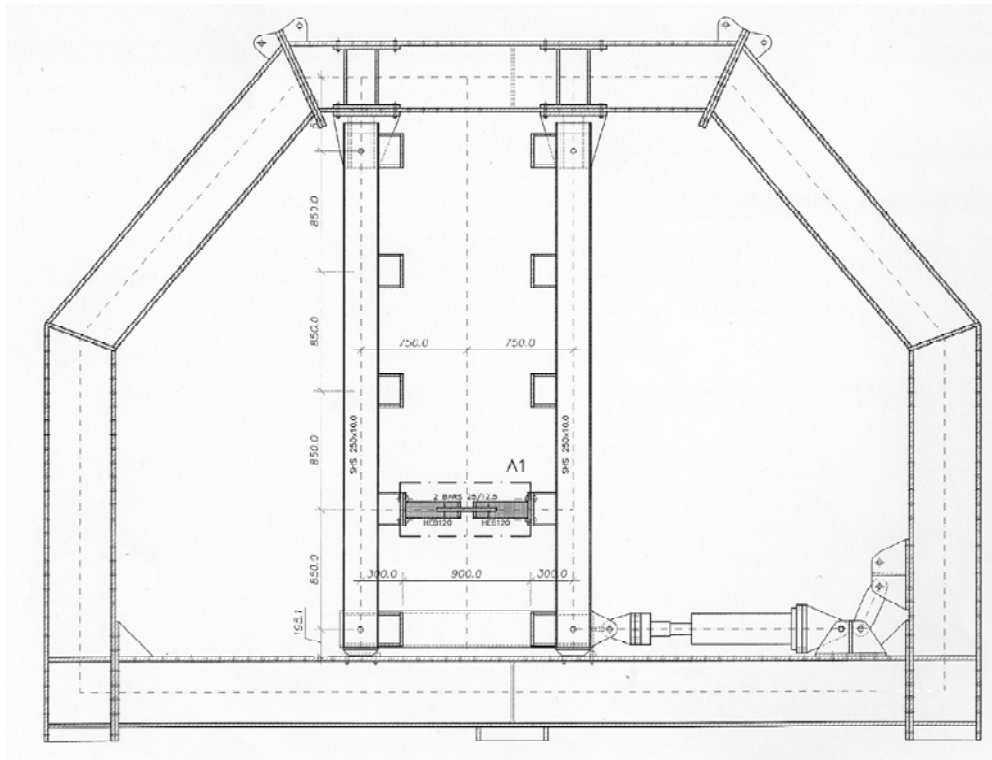
	#	Τύπος δοκιμίου	Ημερομ.	displ Δx	Σχόλια
4	3a	1 bar (2*12/30)	24-7-2007	0-135 mm	
4	3c	1 bar (2*12/30)	10-10-2007	0-135 mm	Επανάληψη του 3a

Το πρώτο πείραμα σε δοκίμιο τύπου INERD έγινε με δύο δίδυμες ράβδους ορθογωνικής διατομής 12/30 mm, που αντιστοιχούσαν σε μία ορθογωνική διατομή 24/30 mm. Το πείραμα ακολούθησε το αρχικό πρωτόκολλο φόρτισης, και ολοκληρώθηκε με αστοχία, θραύση δοκιμίου στην στήριξη και λόγω τραυματισμού στην αιχμή του υποδοχέα, σε μετακίνηση 135 mm.

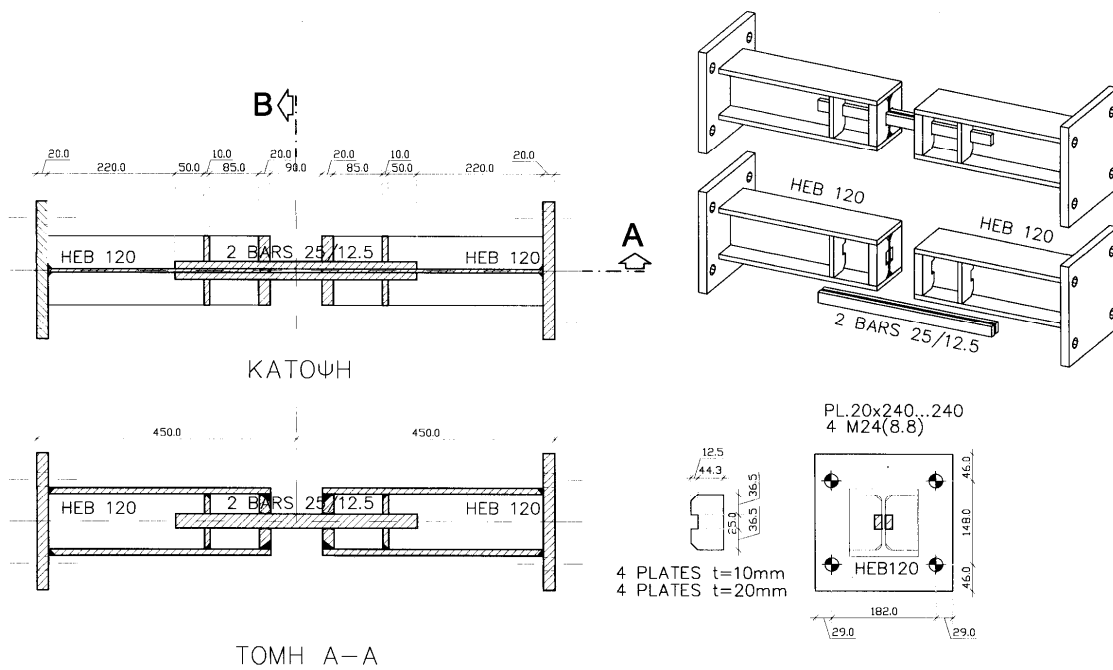
Το πείραμα επαναλήφθηκε τον Οκτώβριο, για να εξεταστεί τυχόν επιρροής πλευρικής εκτροπής, που παρατηρήθηκε αρχικά.



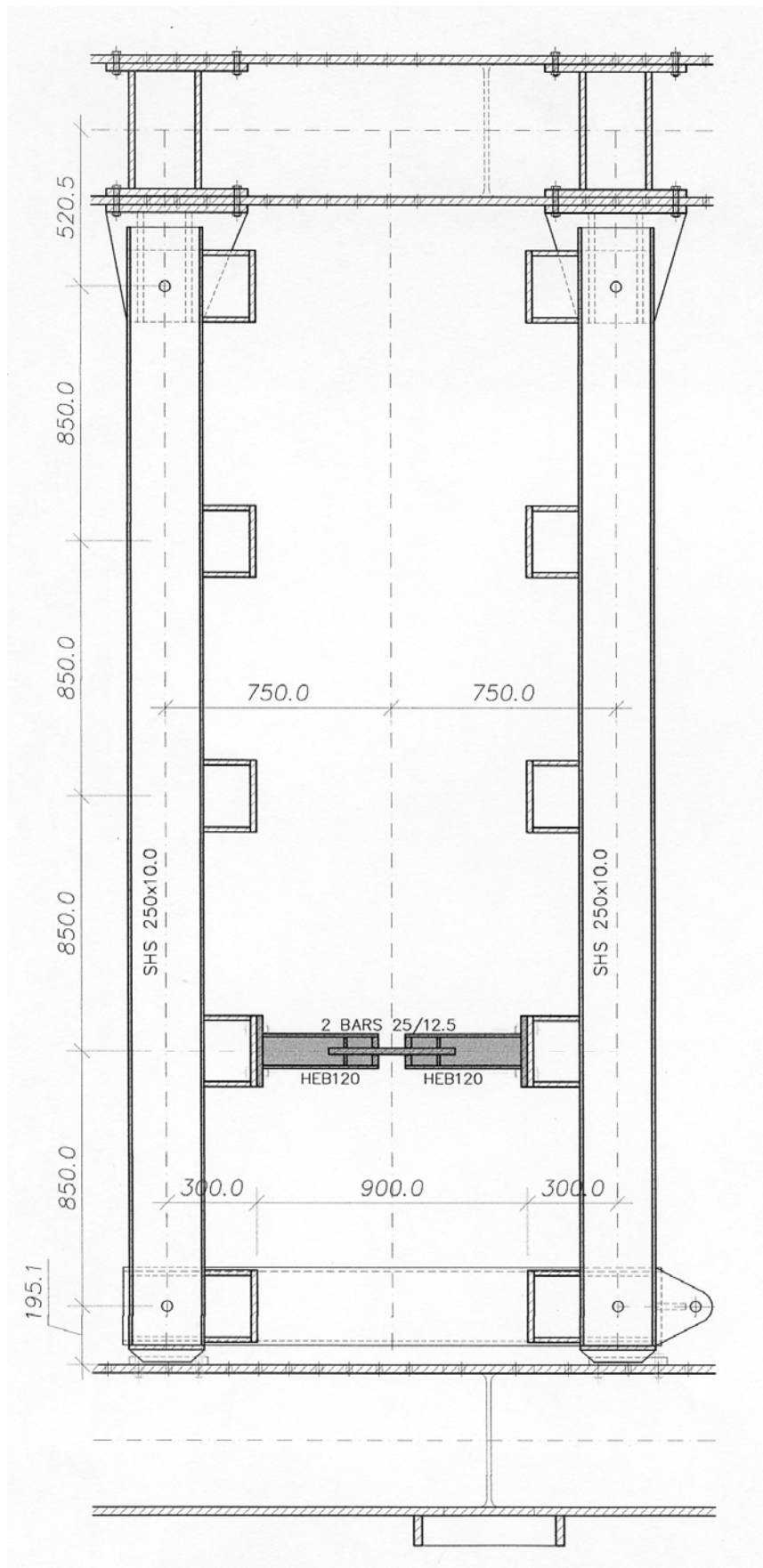
Σχ.5.4.1. Αξονομετρικό σχέδιο της πειραματικής διάταξης με 2 BAR 12/30



Σχ.5.4.2. Συνολική όψη της πειραματικής διάταξης 2 BAR 12/30



Σχ.5.4.3. Το δοκίμιο του πειράματος 2 BAR 12/30



Σχ.5.4.4. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 2 BAR 12/30



Φωτ. 5.4.1. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 1 bar 2*12/30



Φωτ. 5.4.2. Όψη του δοκιμίου (λεπτομέρεια) 1 bar 2*12/3080/5)



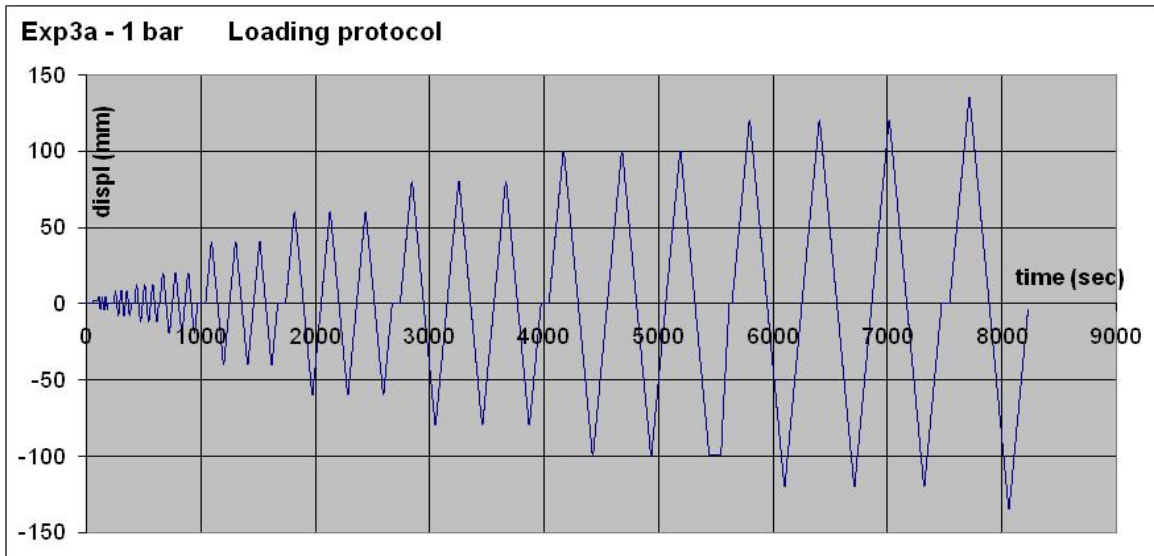
Φωτ. 5.4.3. Όψη του δοκιμίου σε προχωρημένη παραμόρφωση 1 bar 2*12/3080/5)



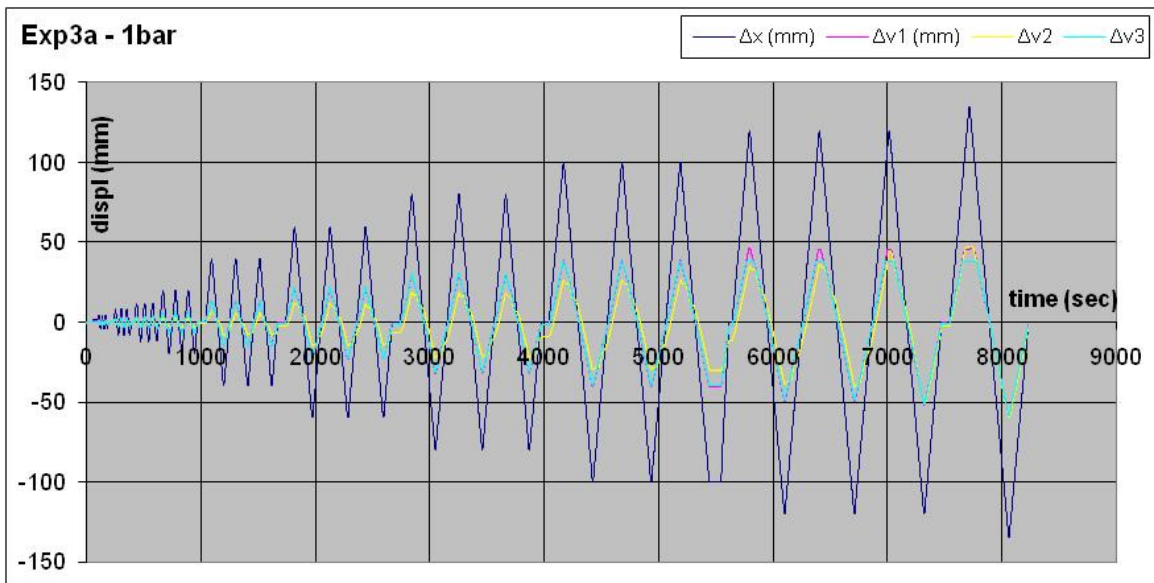
Φωτ. 5.4.4. Όψη του δοκιμίου στην έναρξη της αστοχίας 1 bar 2*12/3080/5)



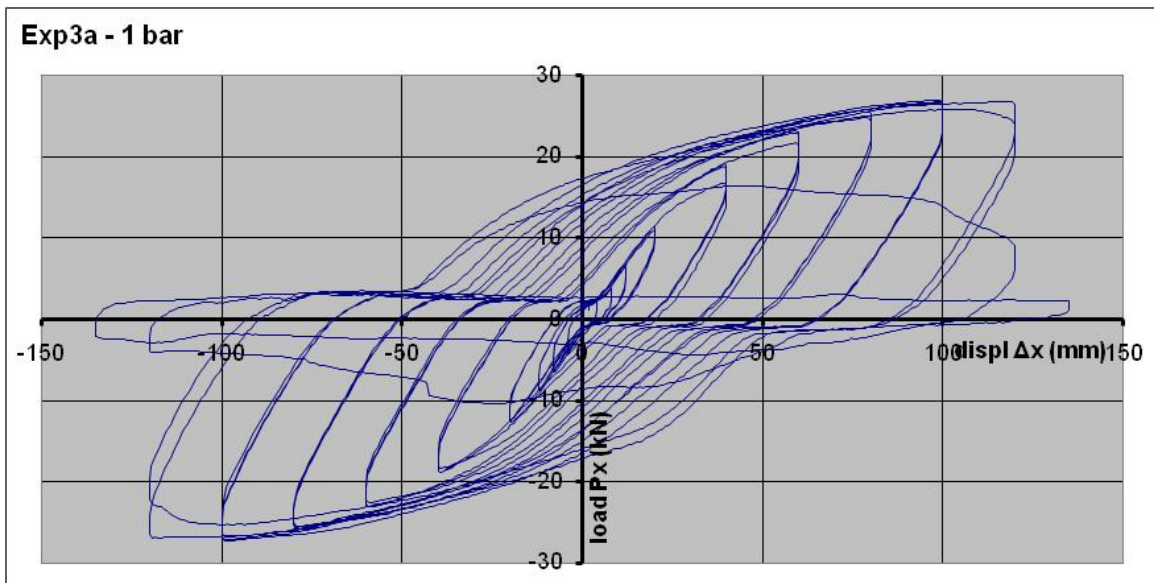
Φωτ. 5.4.5. . Όψη του δοκιμίου σε αστοχία 1 bar 2*12/3080/5)



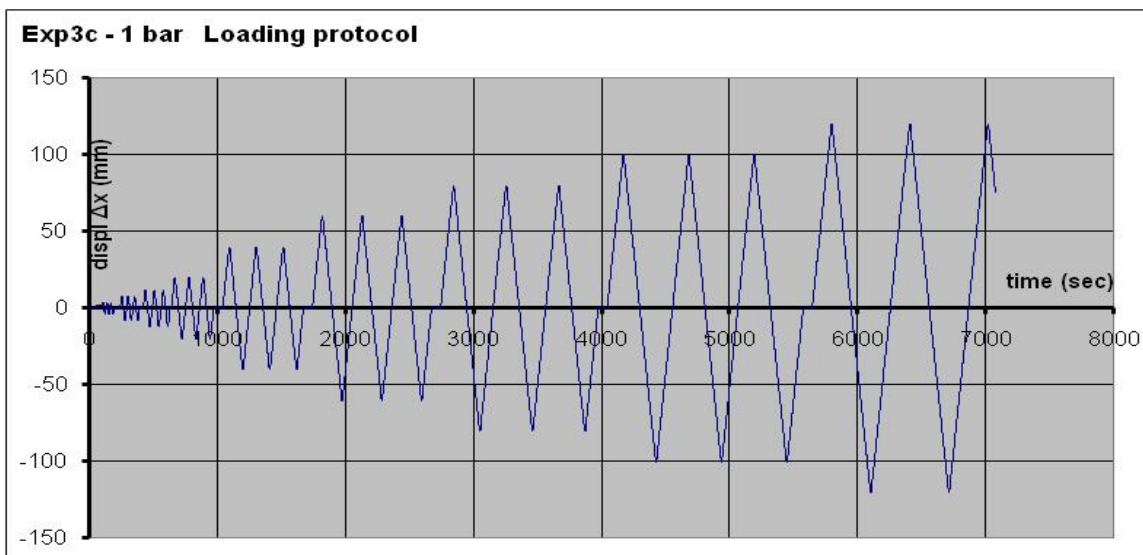
Διαγρ. 5.4.1. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (2 BAR 12/30) έως $\Delta\chi=135$ mm



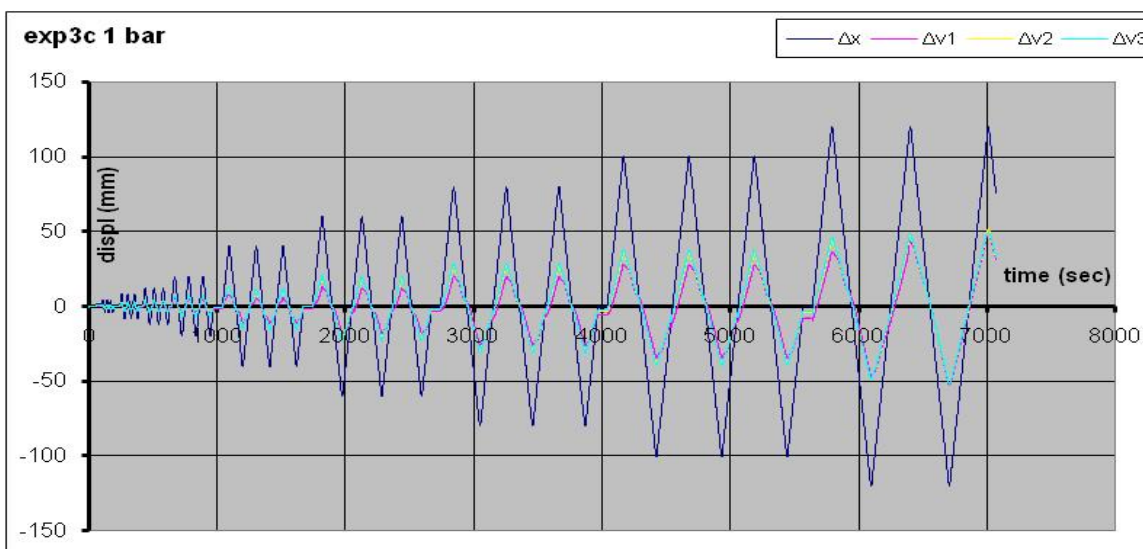
Διαγρ. 5.4.2 Διάγραμμα οριζοντίων και διατμητικών μετακινήσεων $\Delta\chi=0-135$ mm (2 BAR 12/30)



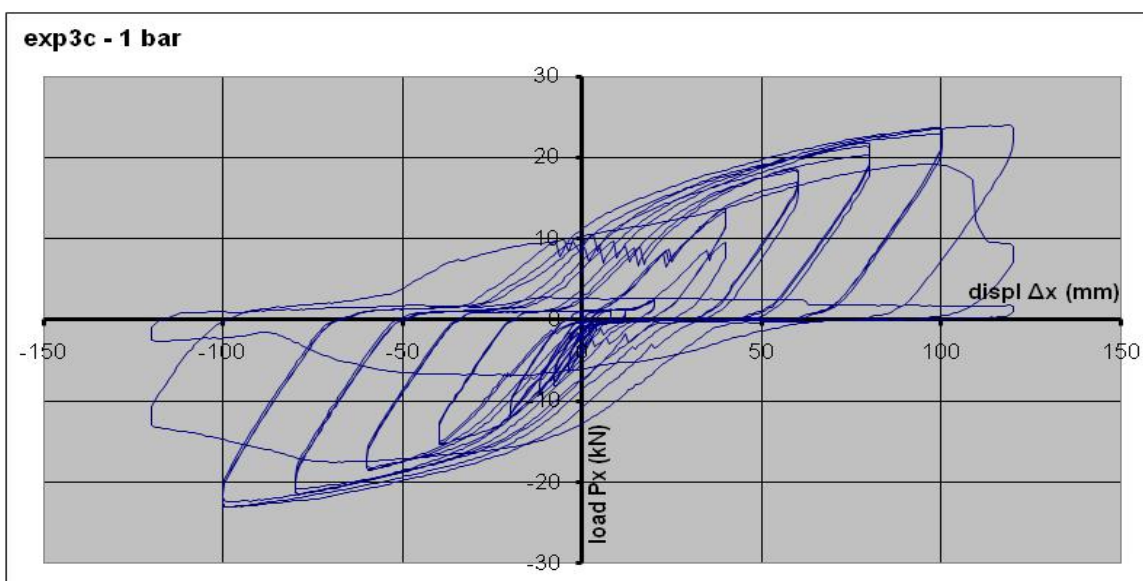
Διαγρ. 5.4.3. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (2 BAR 12/30) $\Delta\chi=0-135$ mm



Διαγρ. 5.4c.1. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (2 BAR 12/30) έως $\Delta x=135$ mm



Διαγρ. 5.4c.2 Διάγραμμα οριζοντίων και διατημητικών μετακινήσεων $\Delta x=0-135$ mm (2 BAR 12/30)



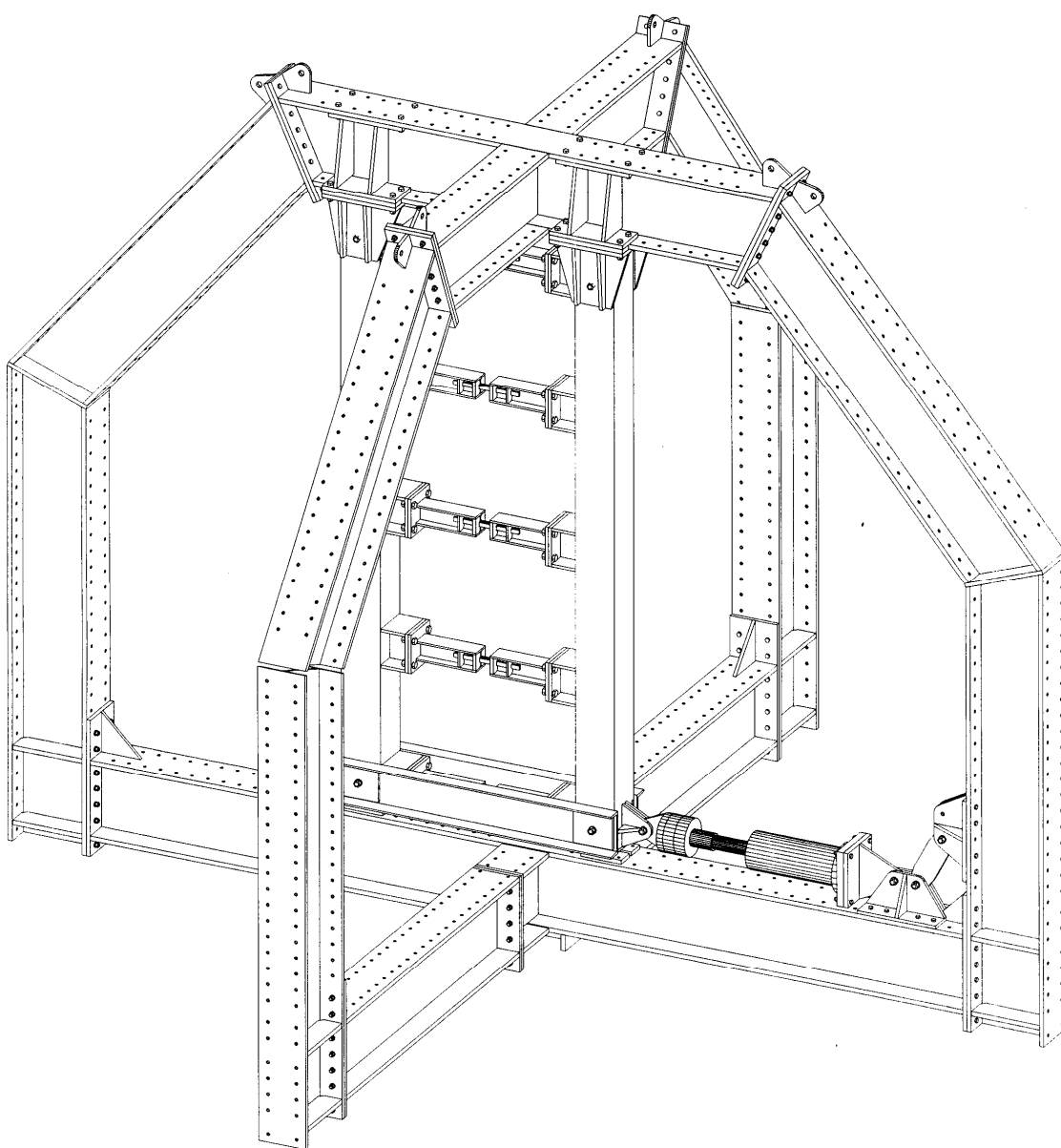
Διαγρ. 5.4c.3. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (2 BAR 12/30) $\Delta x=0-135$ mm

5.5 Πείραμα 5 – 5 Δοκίμια δίδυμων ορθογωνικών ράβδων τύπου INERD 2*12/30

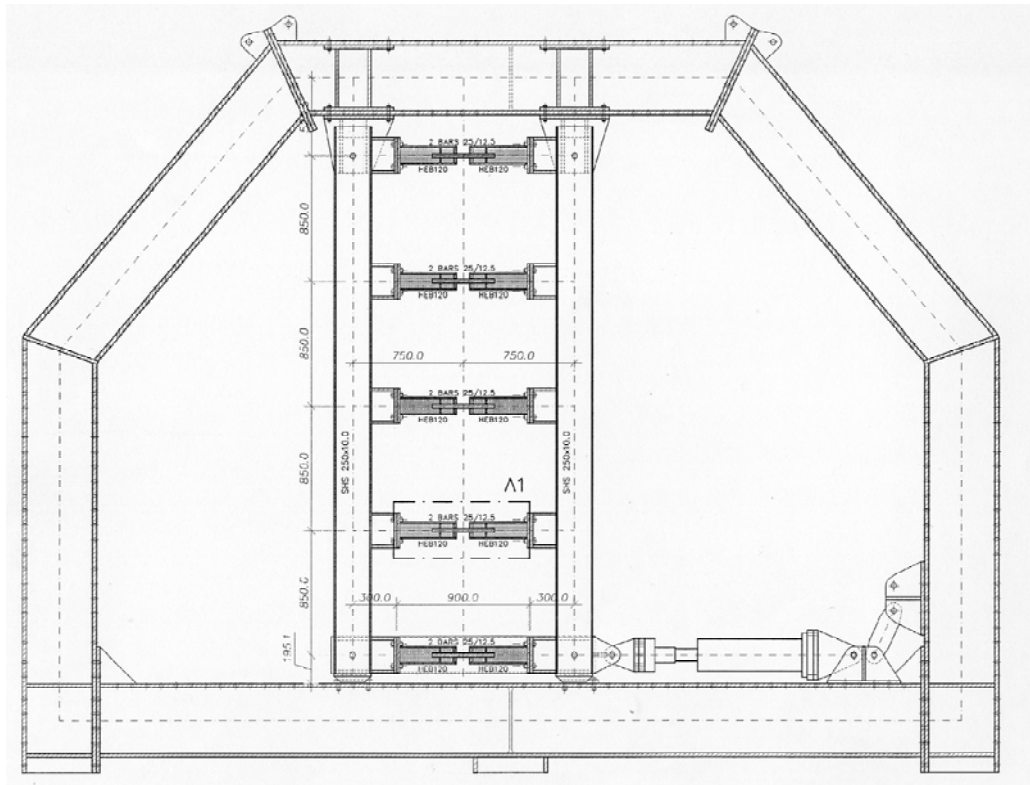
#	Τύπος δοκιμίου	Ημερομ.	displ Δx	Σχόλια
5	3b	4-10-2007	0-150 mm	
5	3d	23-10-2007	0-150 mm	Επανάληψη του 3b

Το πρώτο συνολικό πείραμα σε δοκίμιο τύπου INERD έγινε με πέντε δίδυμες ράβδους ορθογωνικής διατομής 12/30 mm, που η κάθε μία αντιστοιχούσε σε μία ορθογωνική διατομή 24/30 mm. Το πείραμα ακολούθησε το αρχικό πρωτόκολλο φόρτισης και ολοκληρώθηκε με αστοχία, θραύση δοκιμίου στην στήριξη και λόγω τραυματισμού στην αιχμή του υποδοχέα, σε μετακίνηση 135 mm.

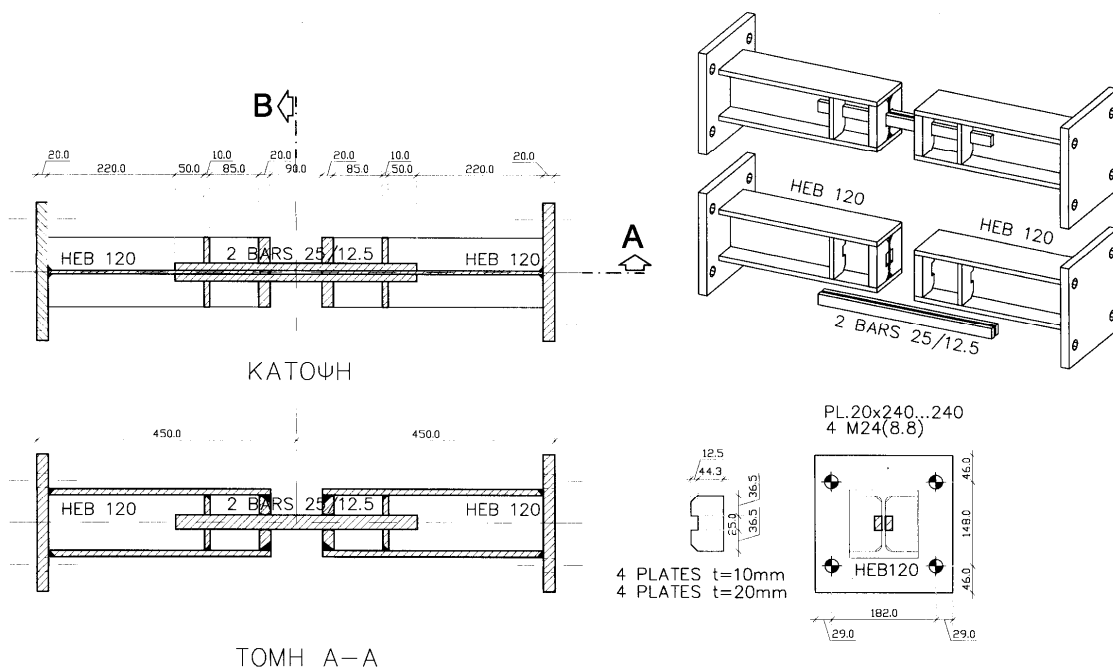
Το πείραμα επαναλήφθηκε, όπως και το πείραμα # 4, τον Οκτώβριο, για να εξεταστεί τυχόν επιρροή πλευρικής εκτροπής, που παρατηρήθηκε αρχικά.



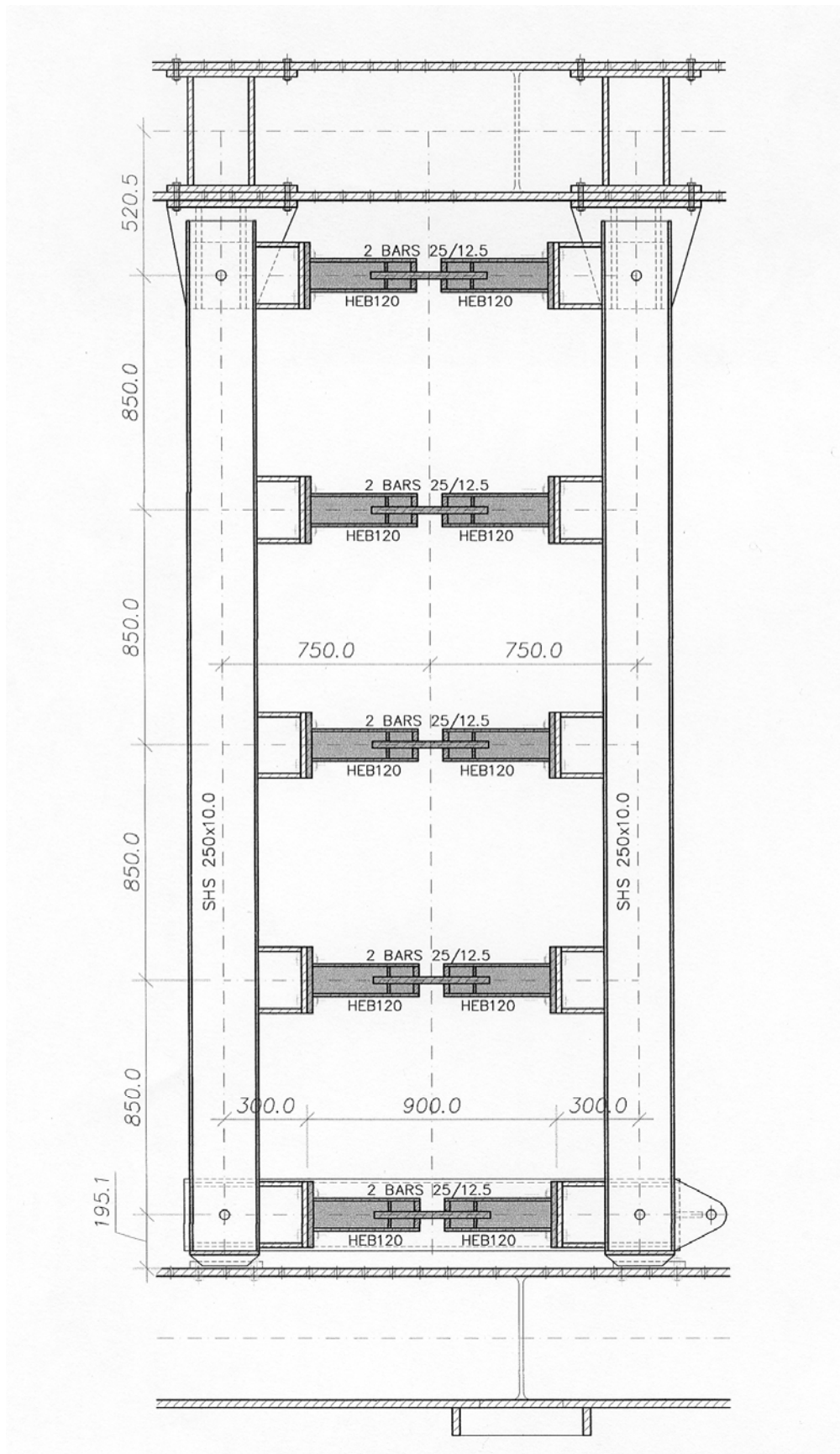
Σχ.5.5.1. Αξονομετρικό σχέδιο της πειραματικής διάταξης με 5*2 BAR 12/30



Σχ.5.5.2. Συνολική όψη της πειραματικής διάταξης 5*2 BAR 12/30



Σχ.5.5.3. Το δοκίμιο του πειράματος 5*2 BAR 12/30



Σχ.5.5.4. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 2 BAR 12/30



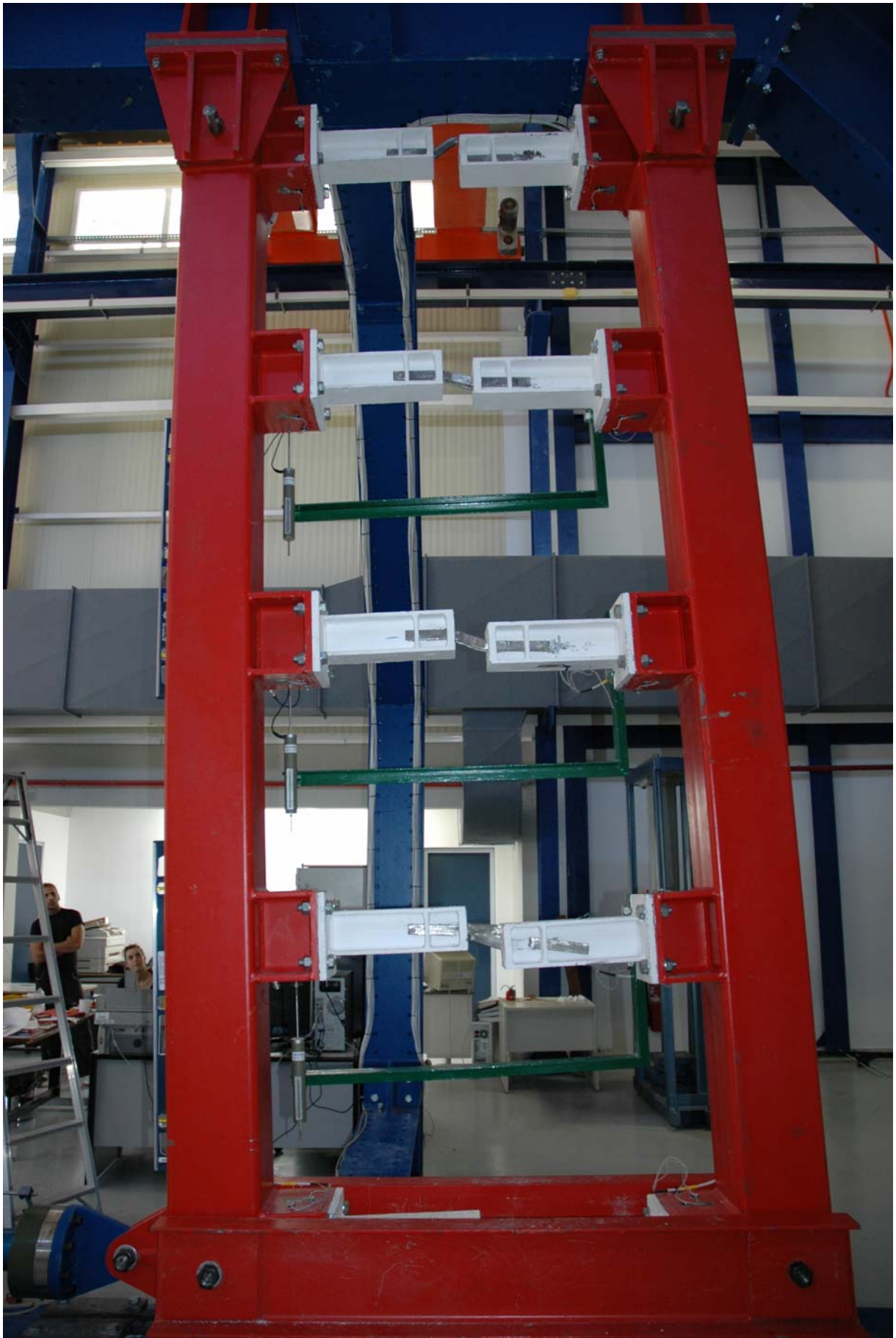
Φωτ. 5.5.1. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 5 * 2 bars 12/30



Φωτ. 5.5.2. Τυπικό δοκίμιο (διάταξη του συστήματος INSTED) 5 * 2 bars 12/30



Φωτ. 5.5.3. Όψη του δοκιμίου 5 * 2 bars 12/30 (Πείραμα 5 * 2 bars 12/30)



Φωτ. 5.5.4. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel 5 * 2 bars 12/30 σε κατάσταση πλήρους αστοχίας



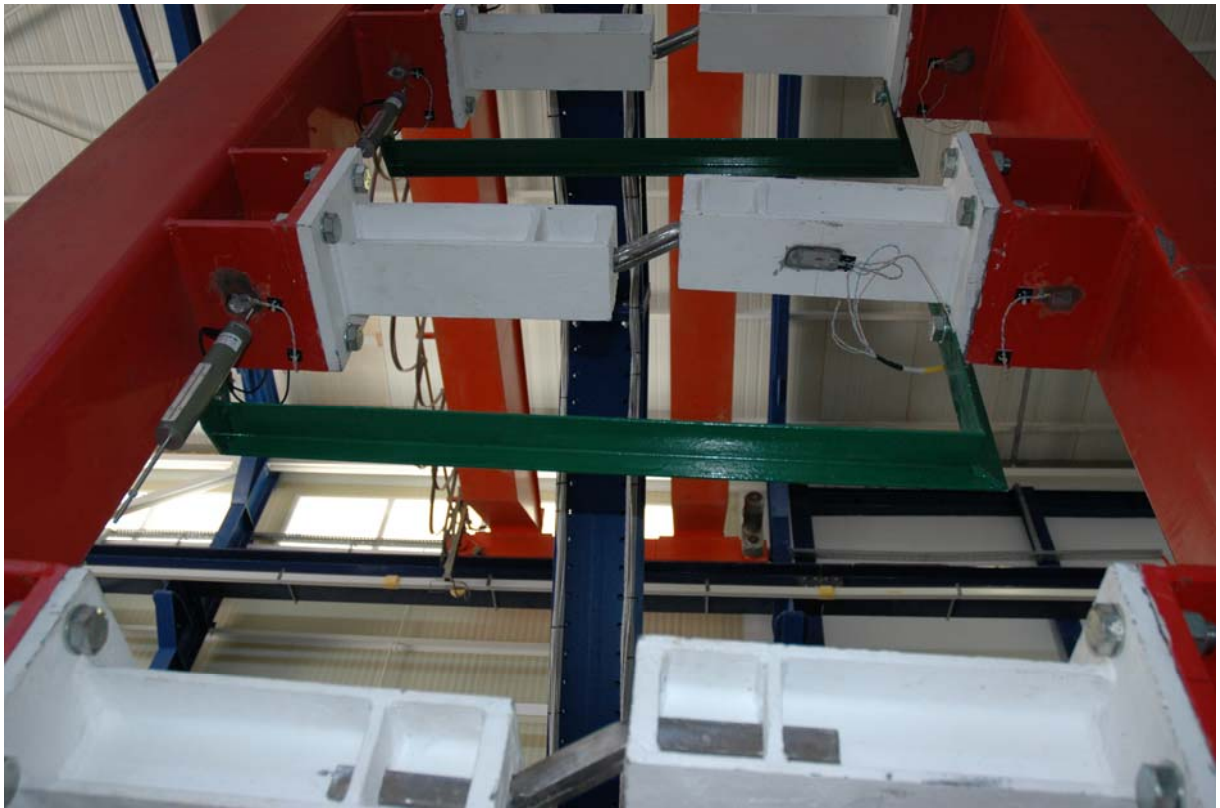
Φωτ. 5.5.5 Δοκίμιο (λεπτομέρεια) σε συνθήκες πλήρους αστοχίας (πείραμα 5 * 2 bars 12/30)



Φωτ. 5.5.6. Όψη του δοκιμίου (λεπτομέρεια) σε συνθήκες πλήρους αστοχίας (πείραμα 5* 2 bars 12/30)



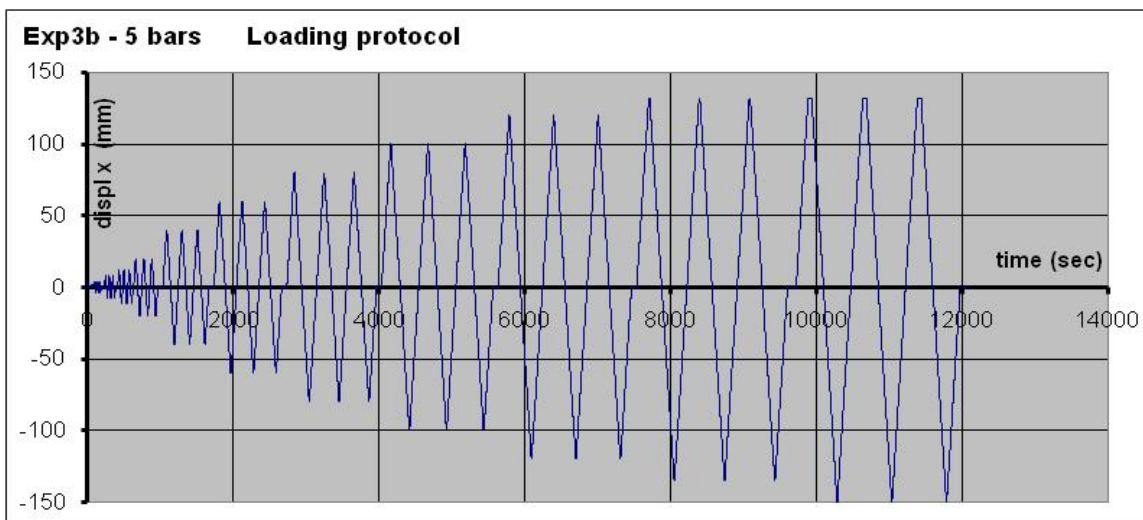
Φωτ. 5.5.7. Οι ράβδοι τύπου INERD μετά την πλήρη αστοχία (πείραμα 5* 2 bars 12/30)



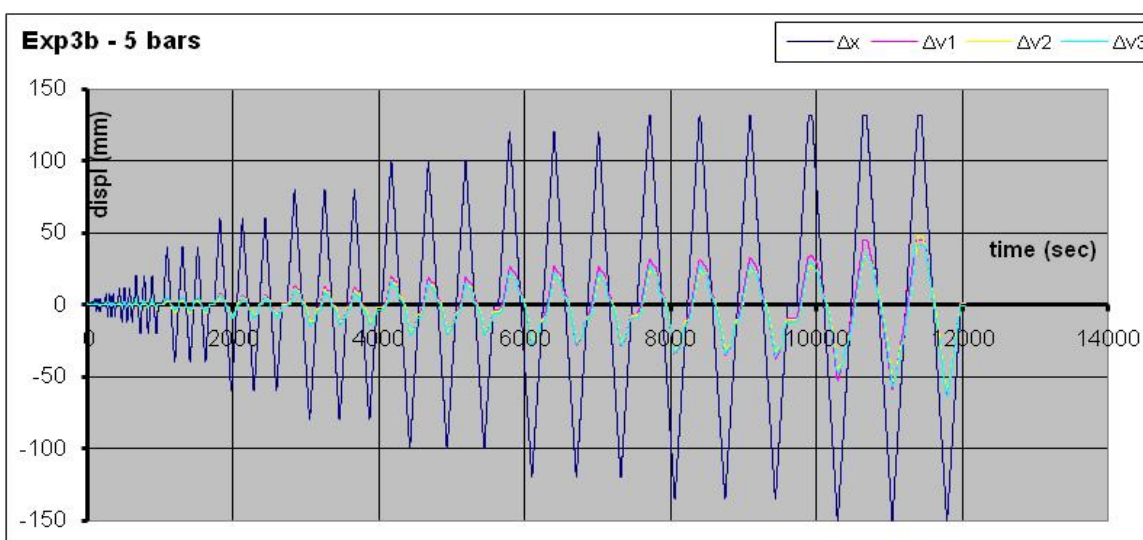
Φωτ. 5.5.8. Τα δοκίμια τύπου INERD σε συνθήκες πλήρους αστοχίας (πείραμα 5* 2 bars 12/30)



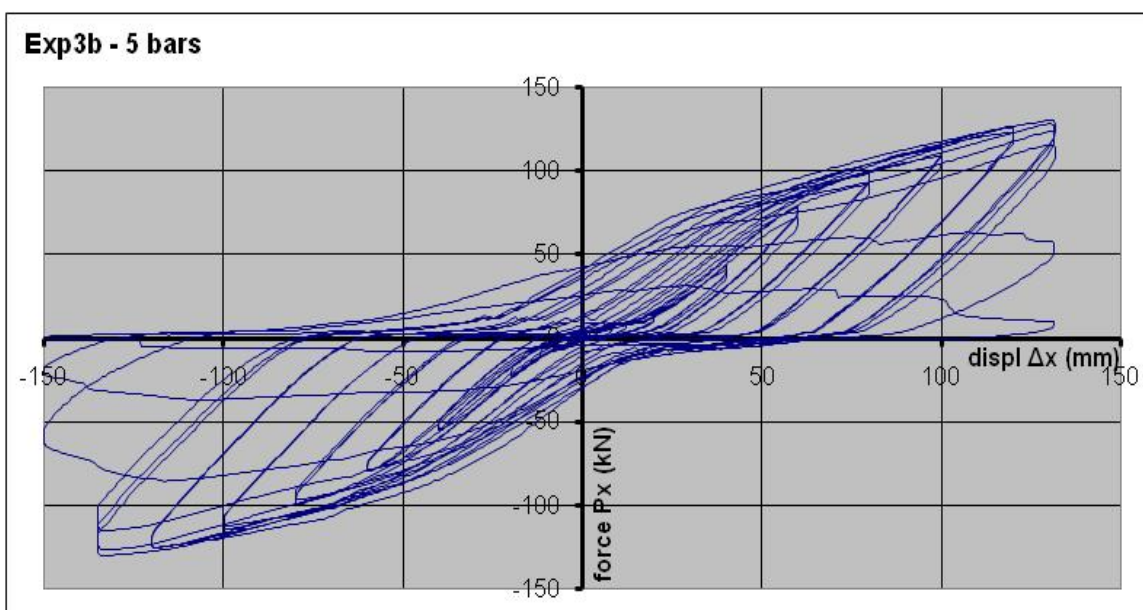
Φωτ. 5.5.9. Δοκίμιο τύπου INERD, κάτοψη, σε συνθήκες πλήρους αστοχίας (πείραμα 5* 2 bars 12/30)



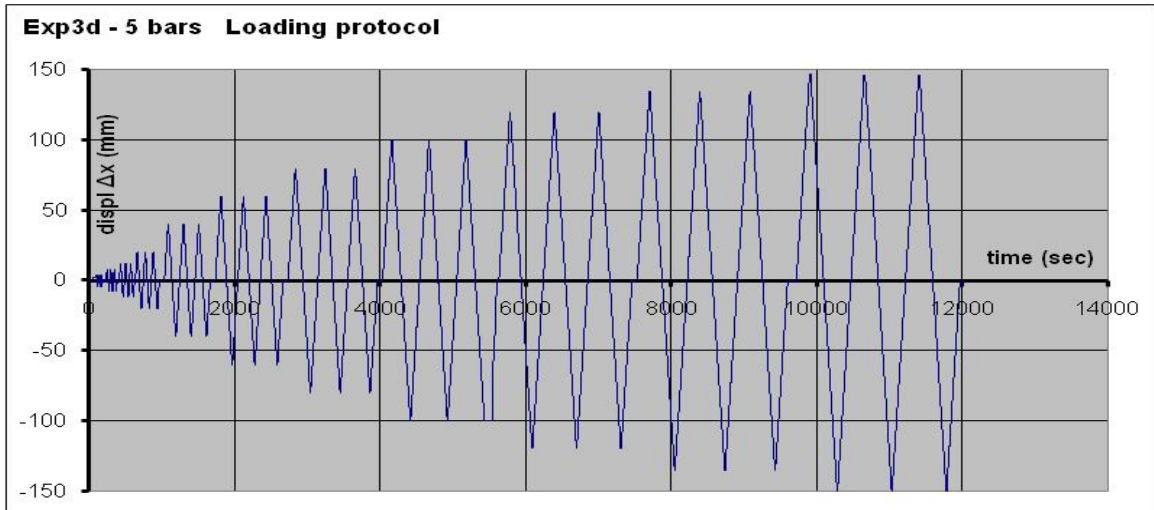
Διαγρ. 5.4.1. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (2 BAR 12/30) έως $\Delta x = 135$ mm



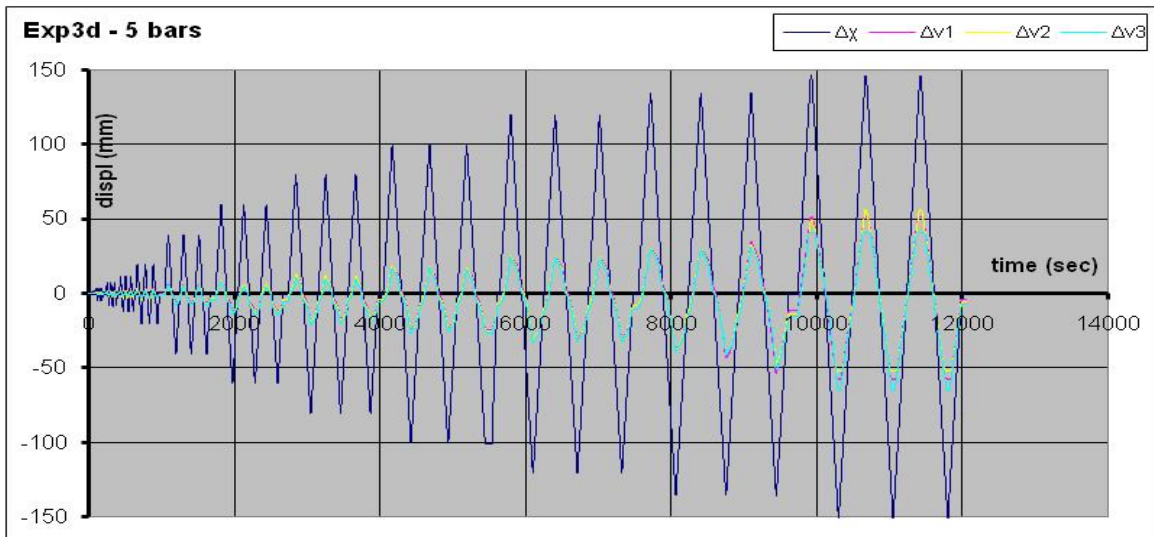
Διαγρ. 5.4.2 Διάγραμμα οριζοντίων και διαμηθικών μετακινήσεων $\Delta x = 0-135$ mm (2 BAR 12/30)



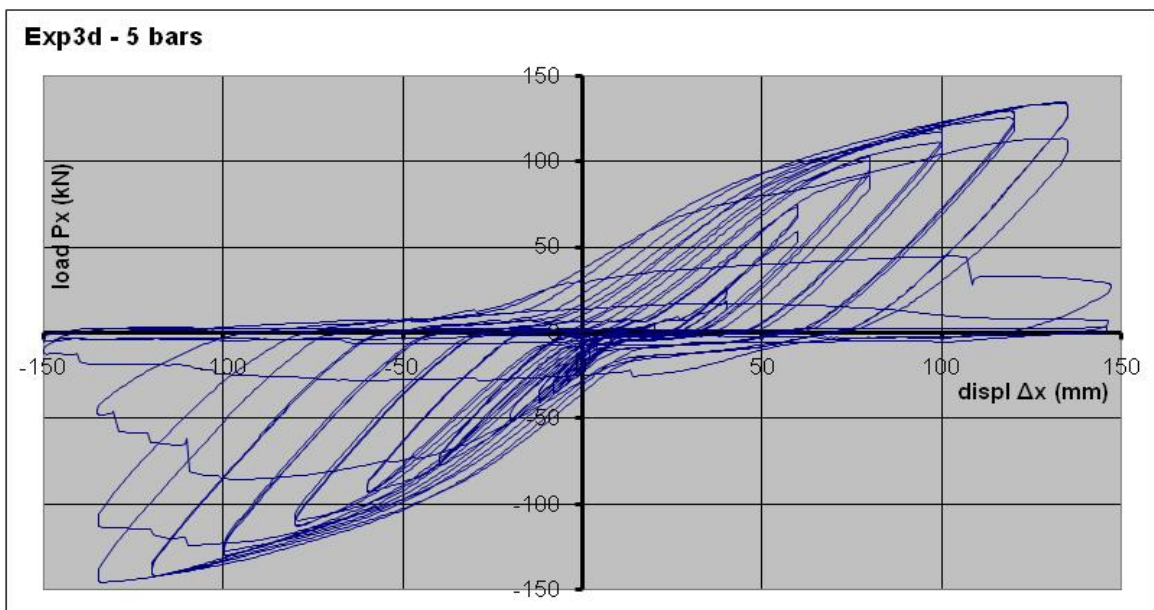
Διαγρ. 5.4.3. Βρόχοι ιστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (2 BAR 12/30) $\Delta x = 0-135$ mm



Διαγρ. 5.4c.1. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (2 BAR 12/30) έως $\Delta x=135$ mm



Διαγρ. 5.4c.2 Διάγραμμα οριζοντίων και διατμητικών μετακινήσεων $\Delta x=0-135$ mm (2 BAR 12/30)



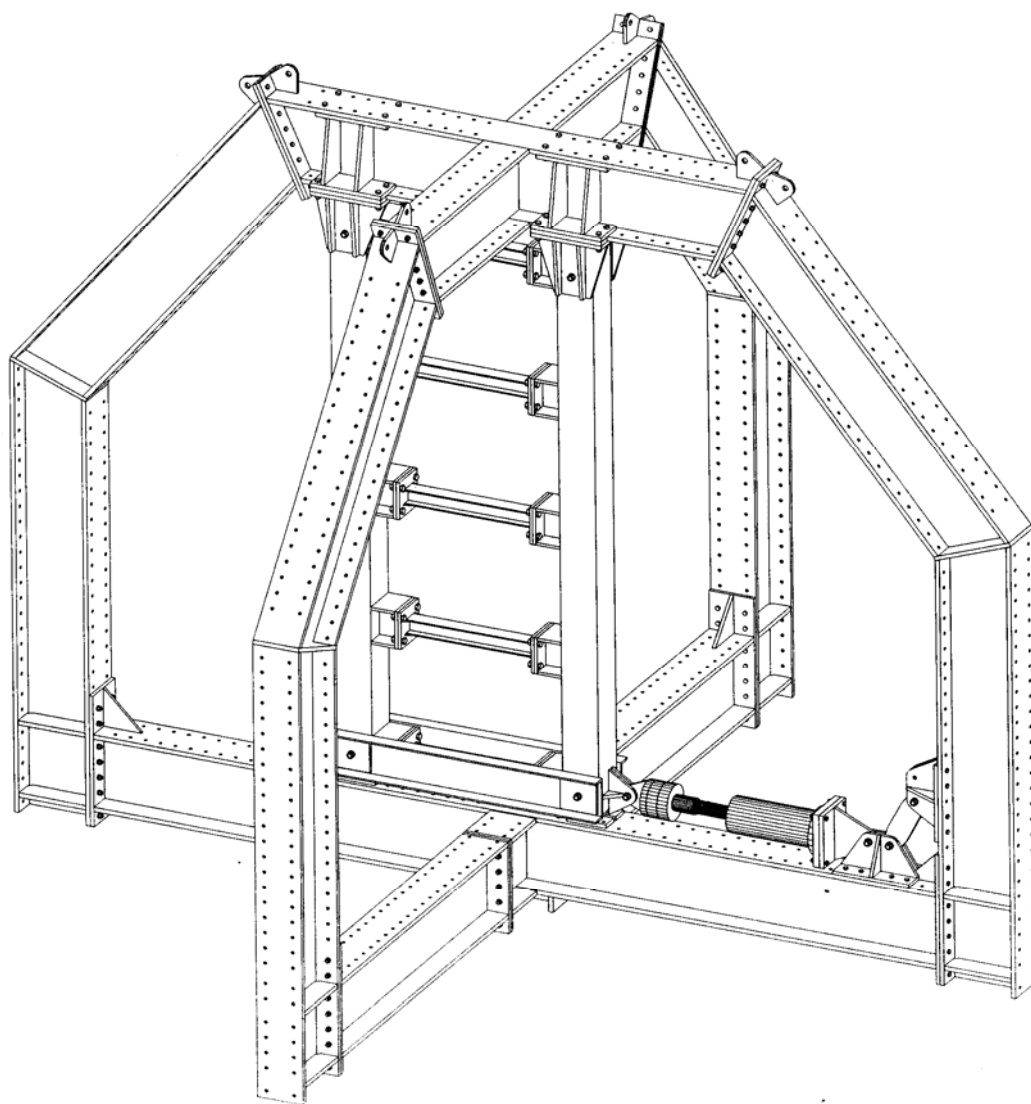
Διαγρ. 5.4c.3. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (2 BAR 12/30) $\Delta x=0-135$ mm

5.6 Πείραμα 6 - 5 HE-A 100

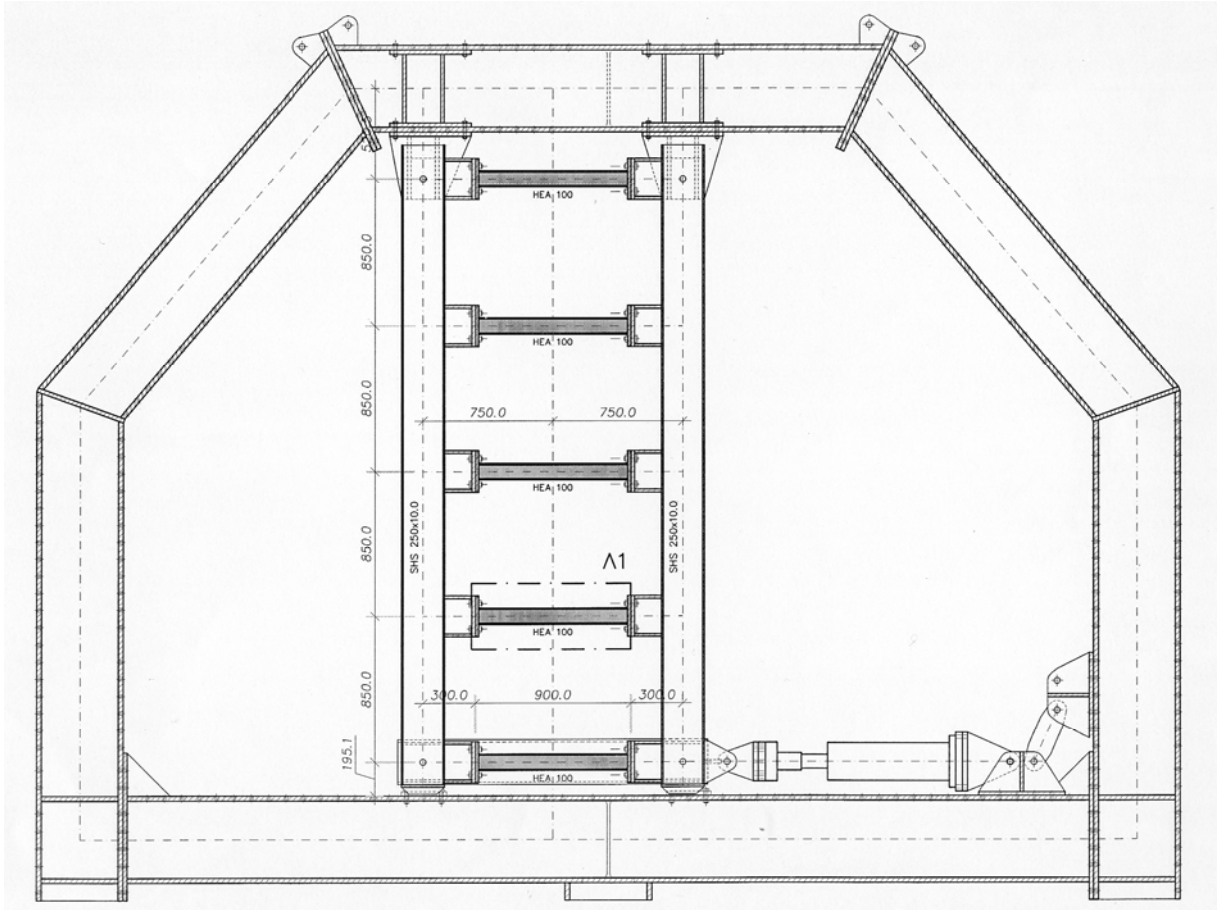
	#	Τύπος δοκιμίου	Ημερομ.	displ Δx	Σχόλια
6	4a	5 HE-A 100	11-9-2007	0-150 mm	

Το πείραμα έγινε αρχικά σε πλήρη διάταξη, με πέντε συνδετήριες δοκούς, HE-A 100. Το πείραμα ακολούθησε το αρχικό πρωτόκολλο φόρτισης και ολοκληρώθηκε με τις μέγιστες δυνατές επιβεβλημένες μετακινήσεις 150 mm.

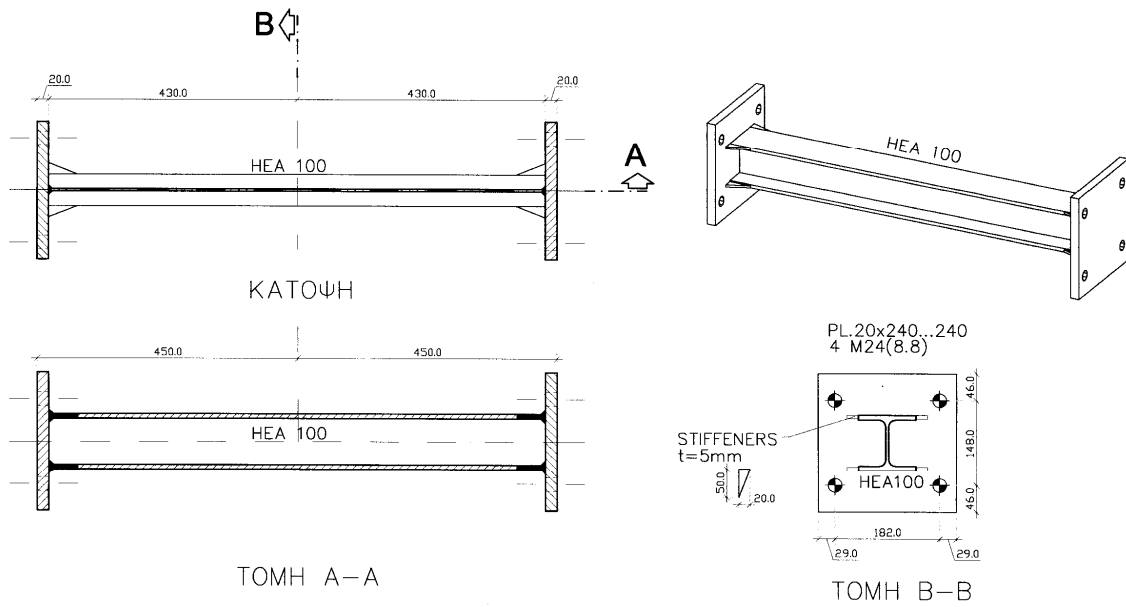
Η μεγάλη δυσκαμψία των συνδετήριων δοκών HE-A 100, με ροπή αδρανείας διπλάσια αυτής της IPE 100 (349 cm^4 αντί 171 cm^4) και αντίστοιχη αναλογία στην ροπή αντιστάσεως, οδήγησε σε σχετικά μεγάλες μετακινήσεις του πλαισίου δοκιμών και αυξημένες καμπτικές παραμορφώσεις των υποστυλωμάτων, με αποτέλεσμα την σημαντική απομείωση των πραγματικών παραμορφώσεων των δοκών. Τα δοκίμια δεν δημιούργησαν πλαστικές αρθρώσεις με αποτέλεσμα την επανάληψη του πειράματος αντίστροφα, η δοκιμή με μία συνδετήρια δοκό, να ακολουθήσει αυτή του πλήρους πειράματος των πέντε δοκών.



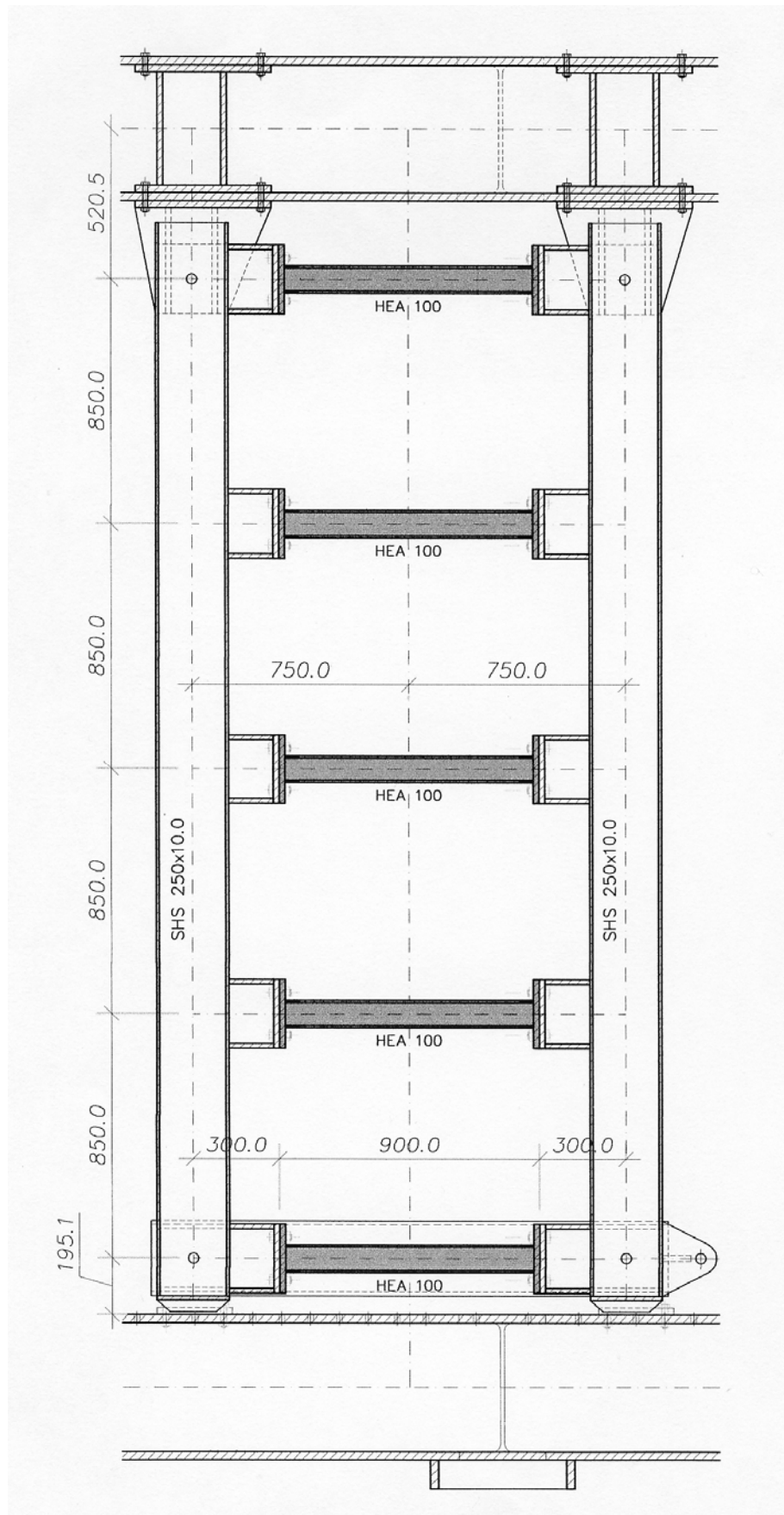
Σχ.5.6.1. Αξονομετρικό σχέδιο της πειραματικής διάταξης με 5 HE-A 100



Σχ.5.6.2. Συνολική όψη της πειραματικής διάταξης (5 HE-A 100)

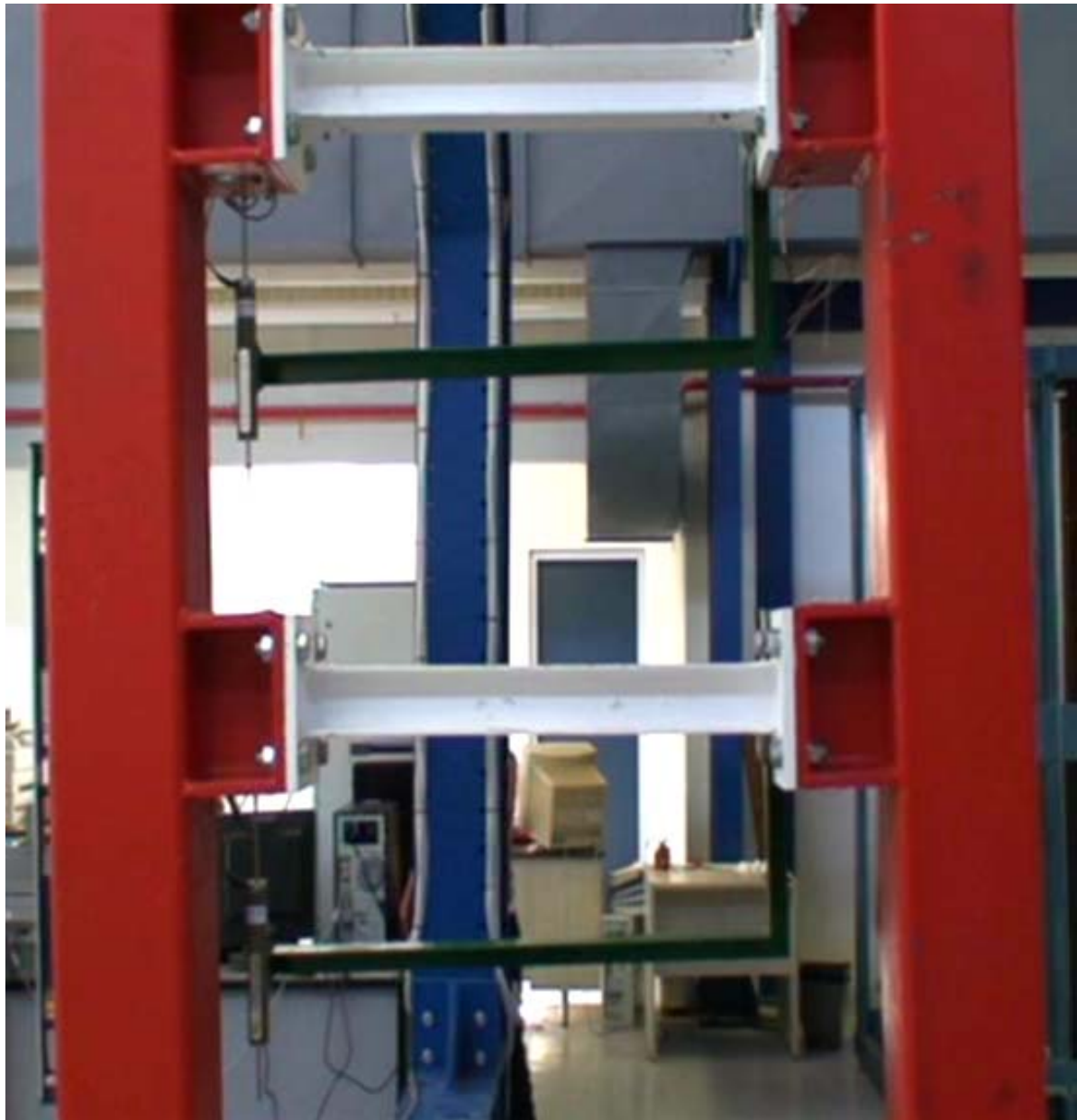


Σχ.5.6.3. Το δοκίμιο του πειράματος 5 HE-A 100 με ενίσχυση στα άκρα



Σχ.5.6.4. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 5 HE-A 100

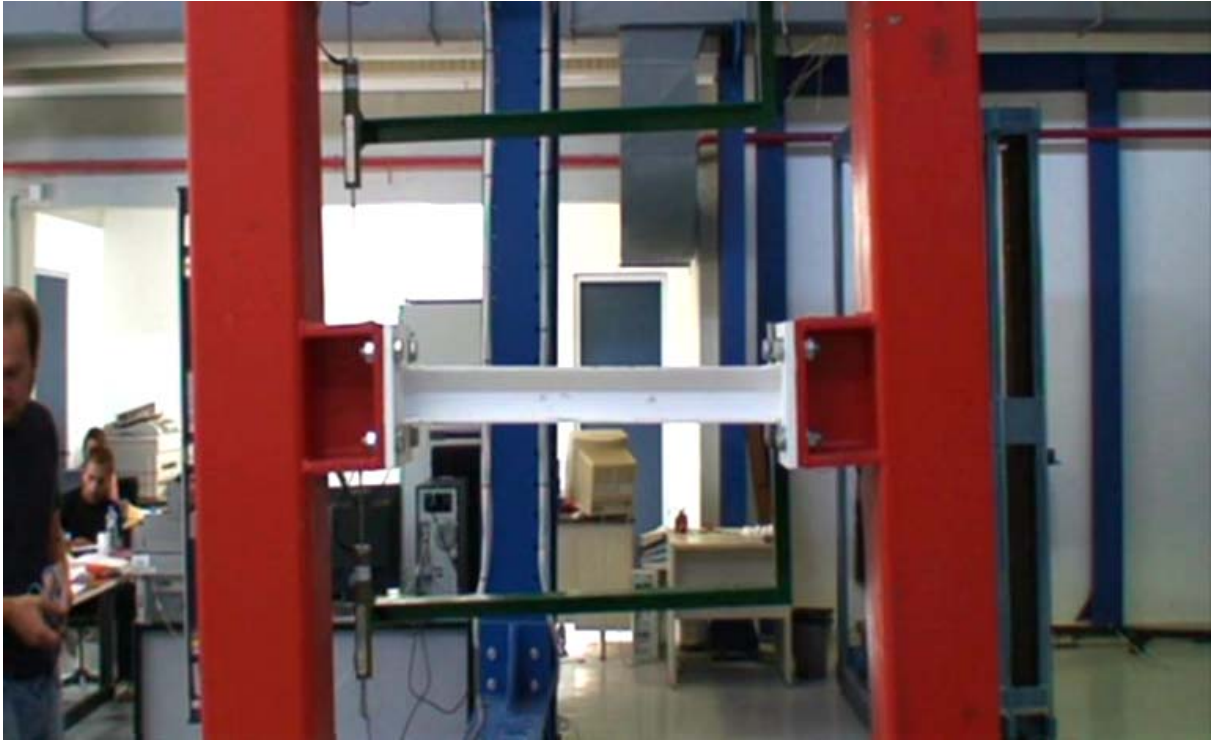
IN ST E D - Καινοτόμα συστήματα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας, σε πολυώροφα αντισεισμικά μεταλλικά κτίρια.
Φαίδων Καρυδάκης



Φωτ. 5.6.1. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 5 HE-A 100



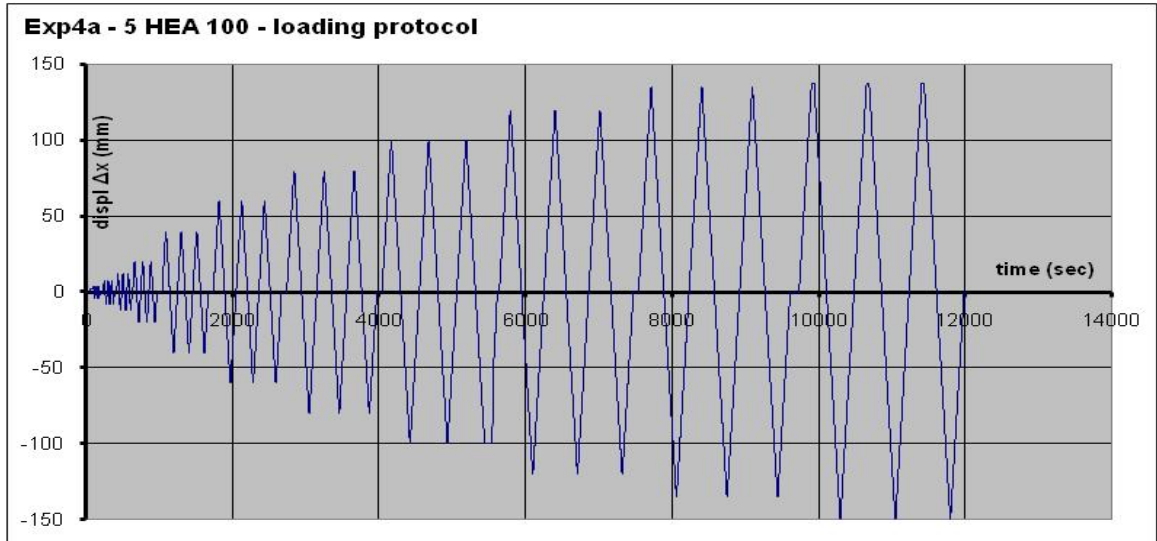
Φωτ. 5.6.2. Όψη του δοκιμίου 1 HE-A 100, σε παραμορφωμένη κατάσταση (Πείραμα 5 HE-A 100)



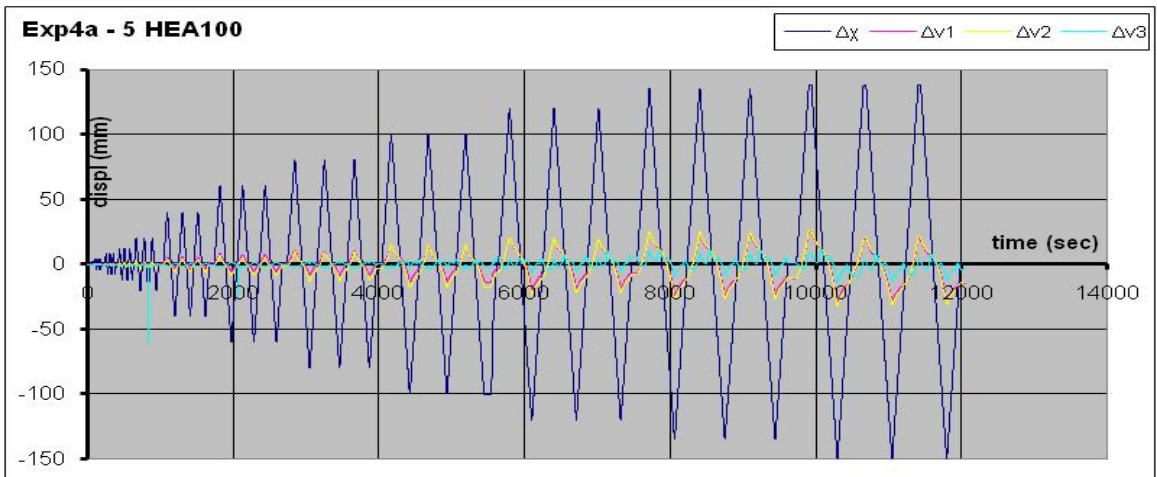
Φωτ. 5.6.3. Όψη του δοκιμίου 1 HE-A 100, (Πείραμα 5 HE-A 100)



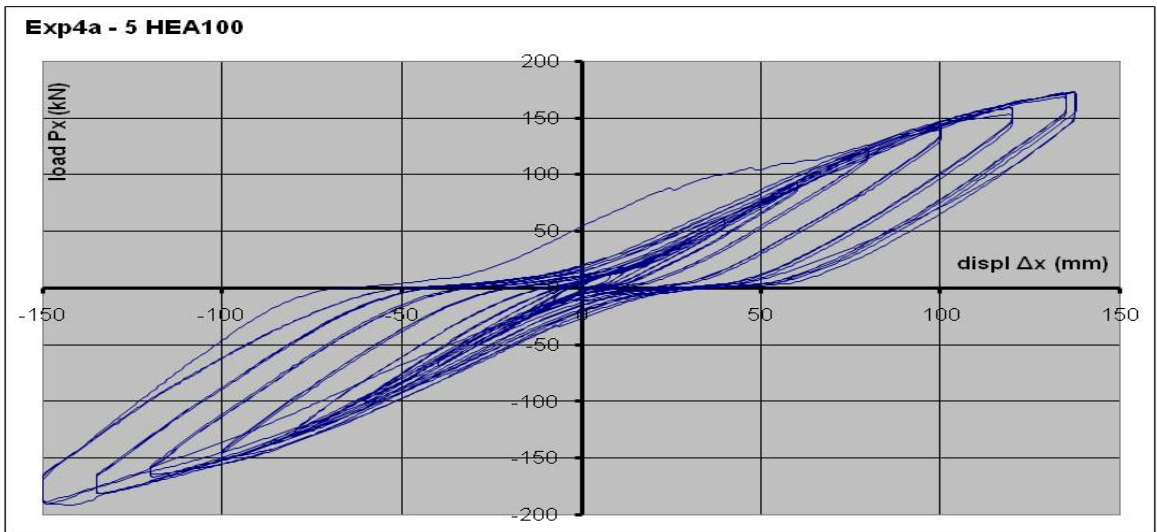
Φωτ. 5.6.4. Όψη δοκιμίου σε προχωρημένη παραμόρφωση (πείραμα 5 HE-A 100)



Διαγρ. 5.2.1. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (5 HE-A 100) έως $\Delta x=150\text{ mm}$



Διαγρ. 5.6.2. Διάγραμμα οριζοντίων και διαμηθικών μετακινήσεων $\Delta x=0-150\text{ mm}$ (5 HE-A 100)



Διαγρ. 5.6.3. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (5 HE-A 100) $\Delta x=0-150\text{ mm}$

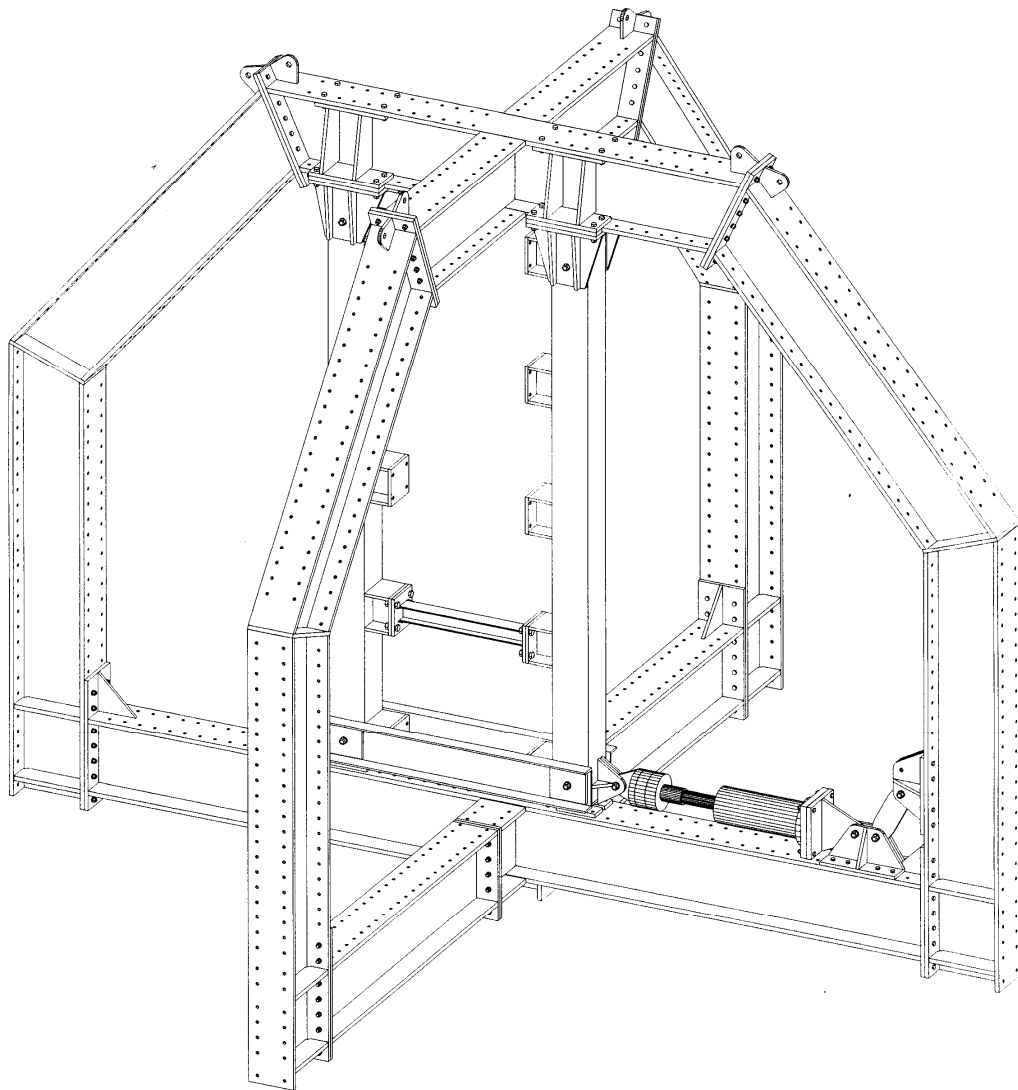
5.7 Πείραμα 7 - Δοκίμιο 1 HE-A 100

	#	Τύπος δοκιμίου	Ημερομ.	displ Δx	Σχόλια
7	4b	1 HEA 100	18-9-2007	0-150 mm	

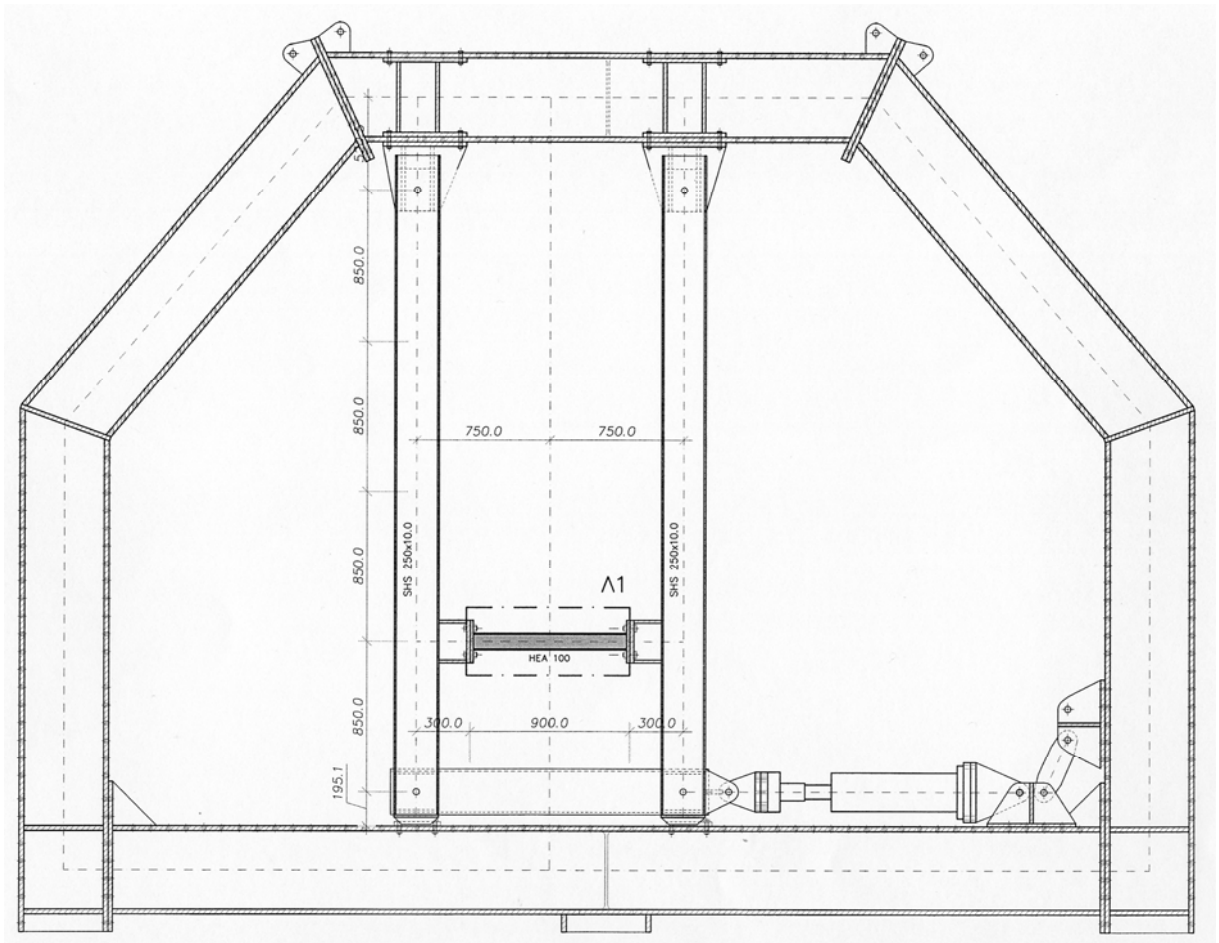
Το πείραμα έγινε σε συνέχεια του αντίστοιχου με την πλήρη διάταξη, με μία συνδετήρια δοκό, HE-A 100. Το πείραμα ακολούθησε το αρχικό πρωτόκολλο φόρτισης και ολοκληρώθηκε με τις μέγιστες δυνατές, 150 mm.

Σκοπός αυτής της επανάληψης ήταν να τεκμηριωθεί η ουσιαστική επιρροή της σχετικής ευκαμψίας του πλαισίου δοκιμών και της αντίστοιχης ευκαμψίας των στύλων και να διερευνηθεί η συμπεριφορά των συνδετήριων δοκών με πλατύπελμες διατομές.

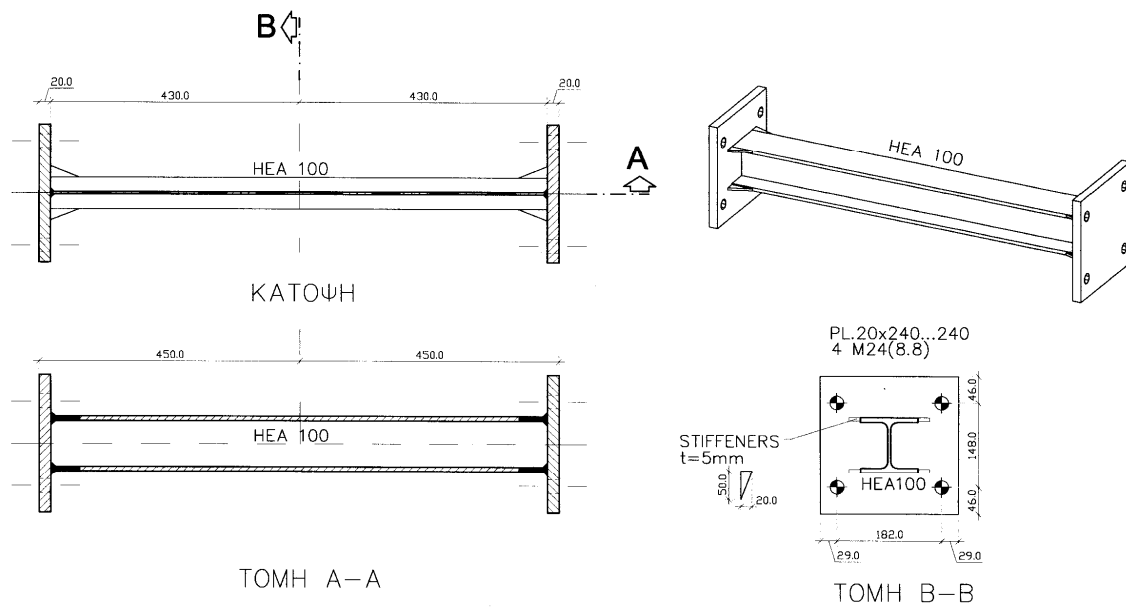
Η είσοδος στην πλαστική περιοχή έγινε κανονικά, εφ' όσον η δυσκαμψία της μίας μόνον συνδετήριας δοκού δεν επηρέασε σημαντικά την κινητικότητα του συνολικού πλαισίου και αντίστοιχα την ελαστική παραμόρφωση των στύλων.



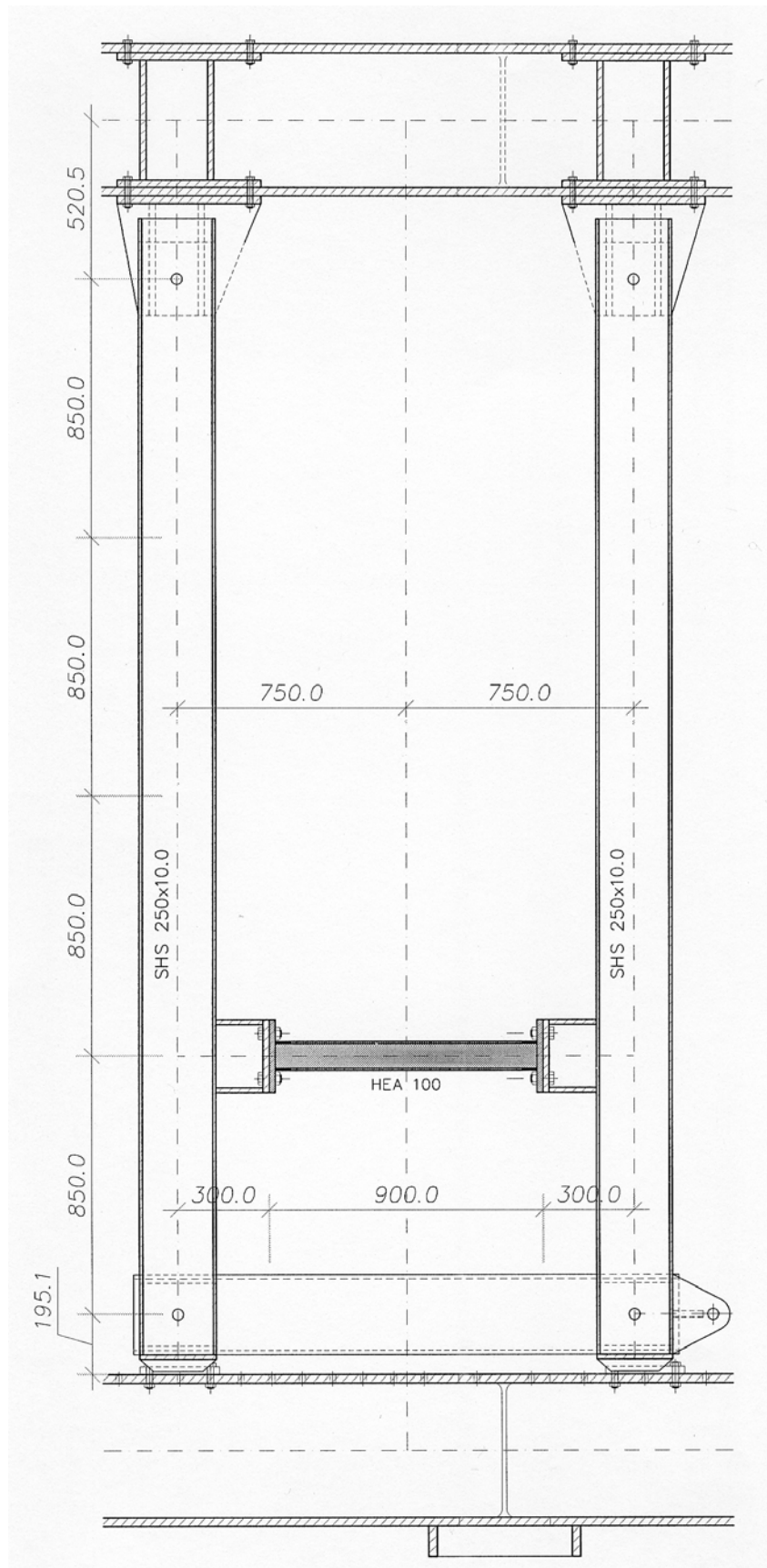
Σχ.5.6.1. Αξονομετρικό σχέδιο της πειραματικής διάταξης με 1 HE-A 100



Σχ.5.7.2. Συνολική όψη της πειραματικής διάταξης (1 HE-A 100)



Σχ.5.7.3. Το δοκίμιο του πειράματος 1 HE-A 100 με ενίσχυση στα άκρα



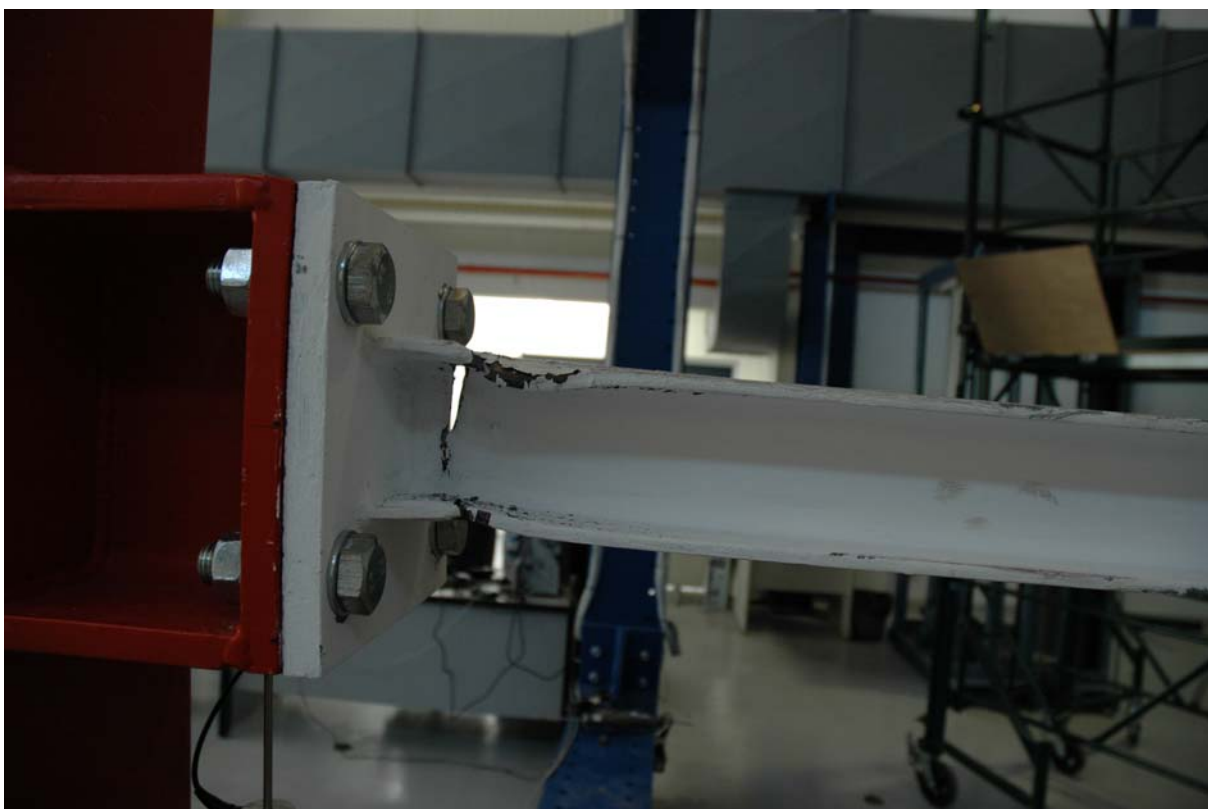
Σχ.5.7.4. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTE) 1 HE-A 100



Φωτ. 5.7.1. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 1 HE-A 100



Φωτ. 5.7.2. Όψη του δοκιμίου 1 HE-A 100, σε προχωρημένη παραμόρφωση(Πείραμα 1 HE-A 100)



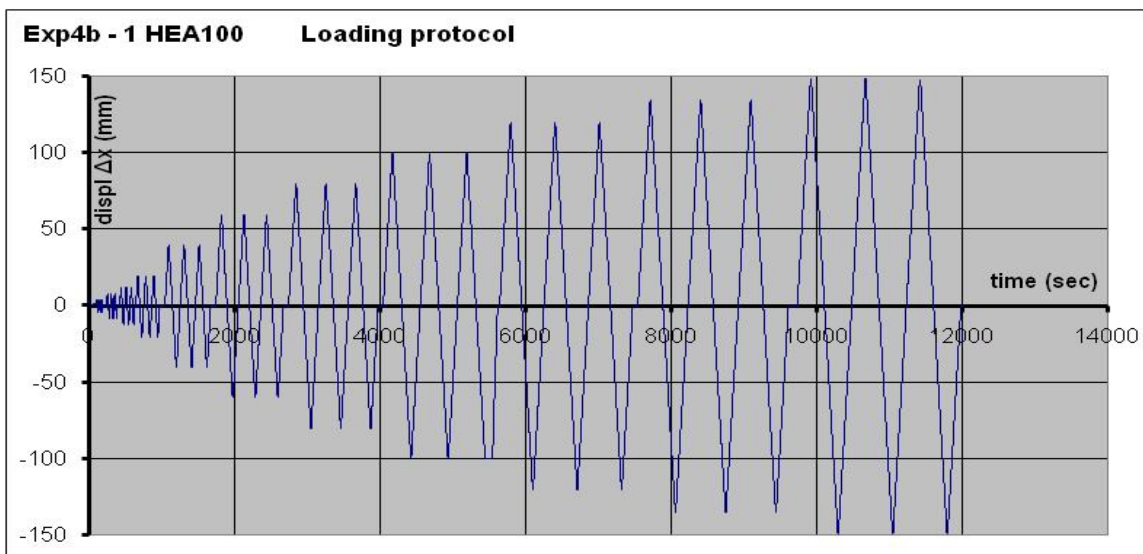
Φωτ. 5.7.3. Όψη του δοκιμίου 1 HE-A 100, με συνολική αστοχία (Πείραμα 1 HE-A 100)



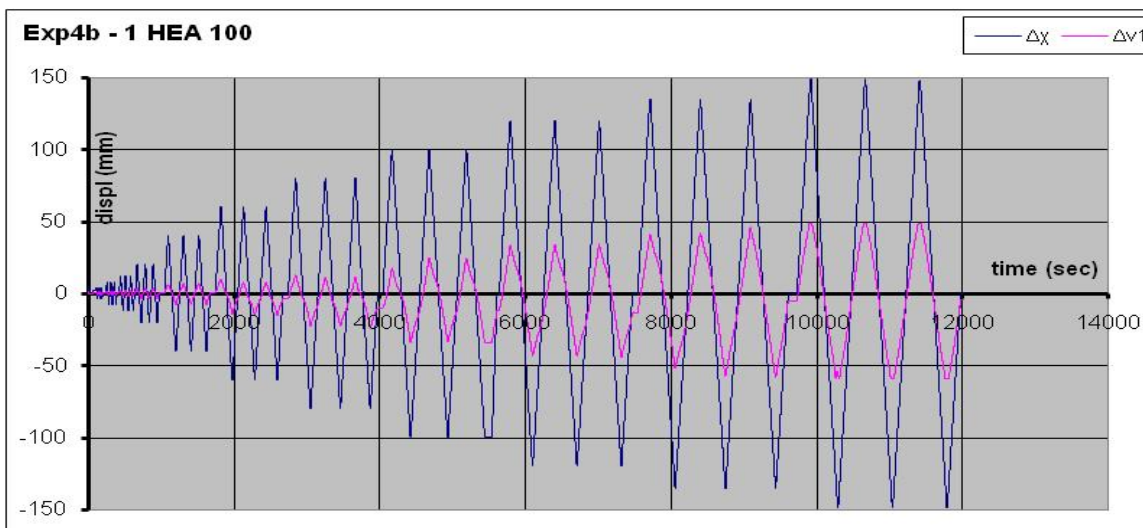
Φωτ. 5.7.4. Όψη δοκιμίου σε συνθήκες πλήρους αστοχίας (πείραμα 1 HE-A 100)



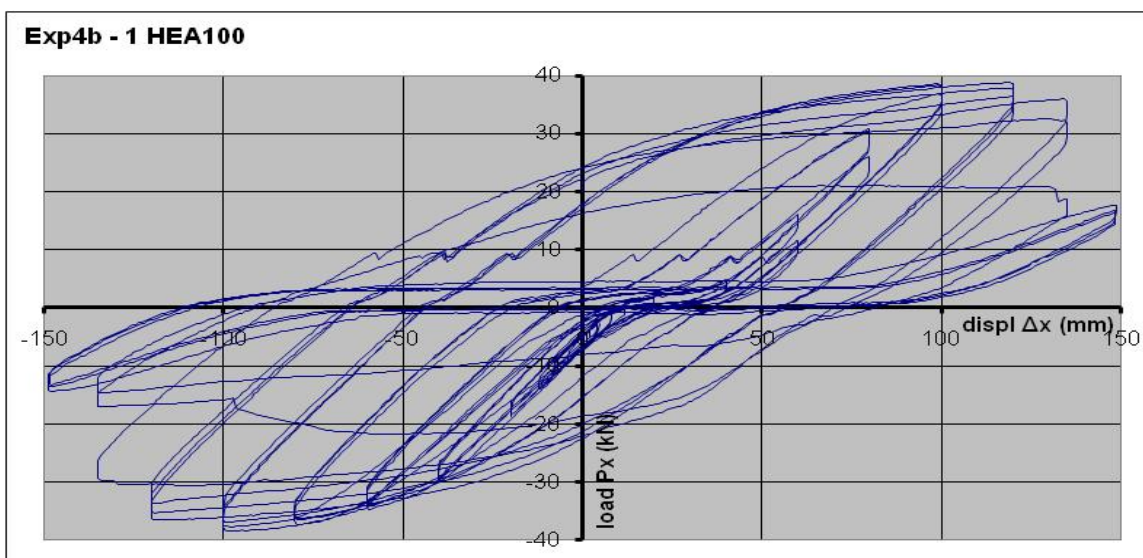
Φωτ. 5.7.5. Κάτοψη του δοκιμίου (λεπτομέρεια) σε συνθήκες πλήρους αστοχίας (πείραμα 1 HE-A 100)



Διαγρ. 5.7.1. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (1 HE-A 100) έως $\Delta x=150$ mm



Διαγρ. 5.7.2. Διάγραμμα οριζοντίων και διατμητικών μετακινήσεων $\Delta x=0-150$ mm (1 HE-A 100)



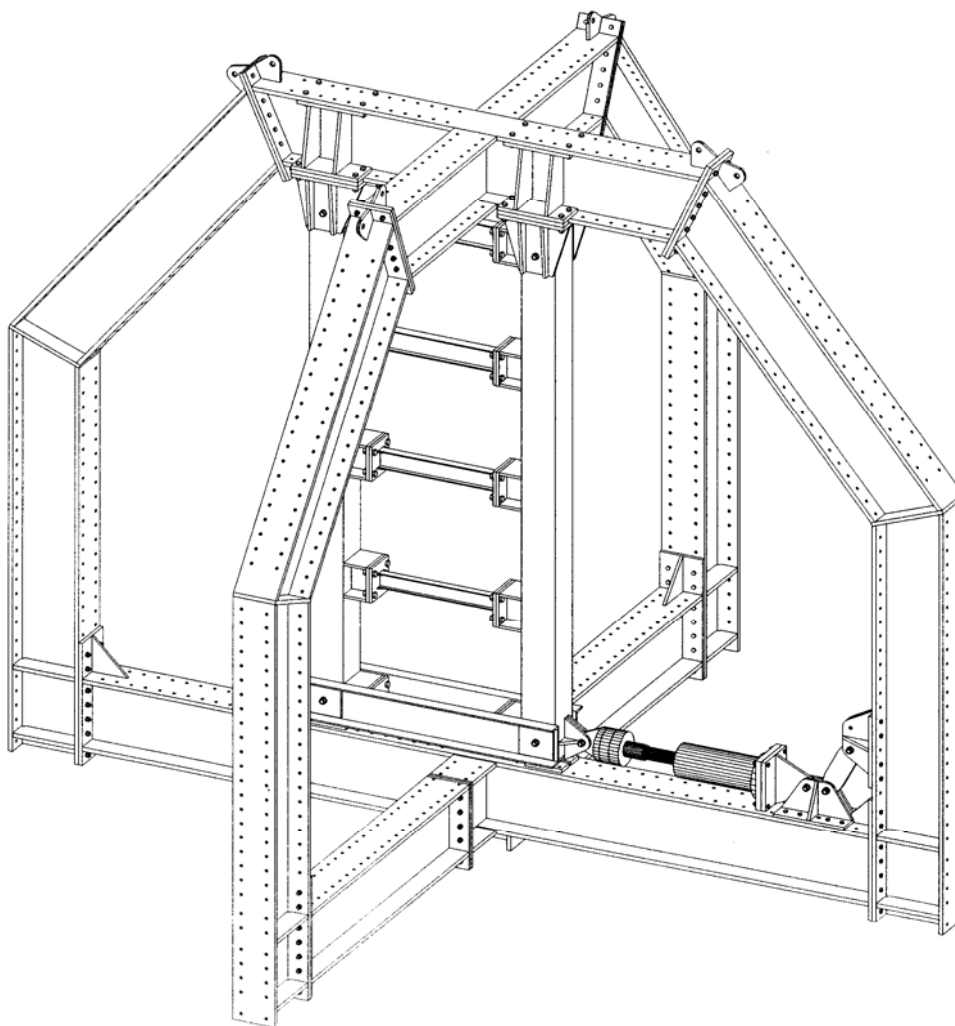
Διαγρ. 5.7.3. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (1 HE-A 100) $\Delta x=0-150$ mm

5.8 Πείραμα 8 - 5 IPE 80-160

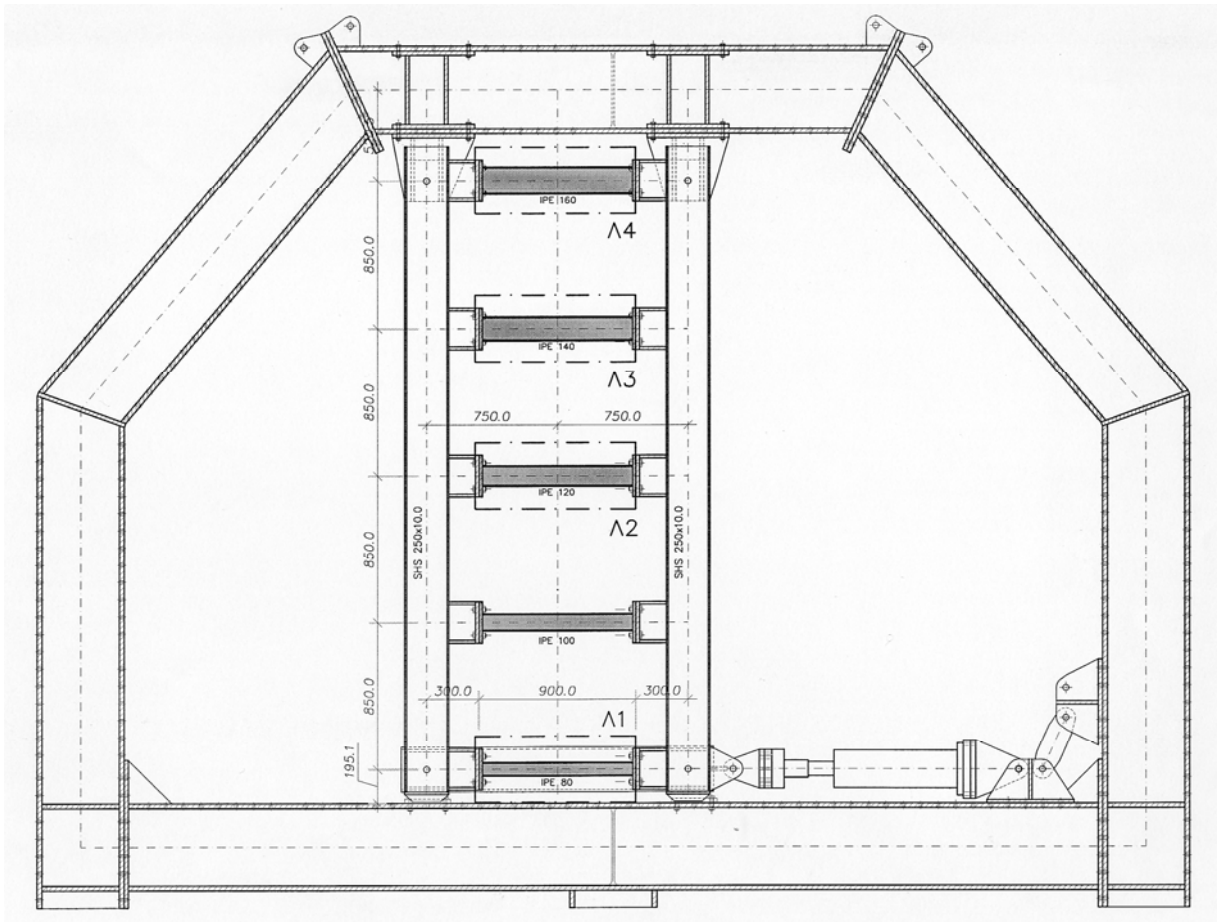
	#	Τύπος δοκιμίου	Ημερομ.	displ Δx	Σχόλια
8	5a	5 IPE 80-160	20-9-2007	0-150 mm	

Το πρώτο πείραμα με αναμενόμενη προοδευτική αστοχία μεταξύ των συνδετήριων δοκών, έγινε προφανώς με πλήρη διάταξη και μεταβλητής διατομής συνδετήριες δοκούς από IPE 80 έως IPE 160. Το πείραμα ακολούθησε το αρχικό πρωτόκολλο φόρτισης, και ολοκληρώθηκε με τις μέγιστες δυνατές, 150 mm.

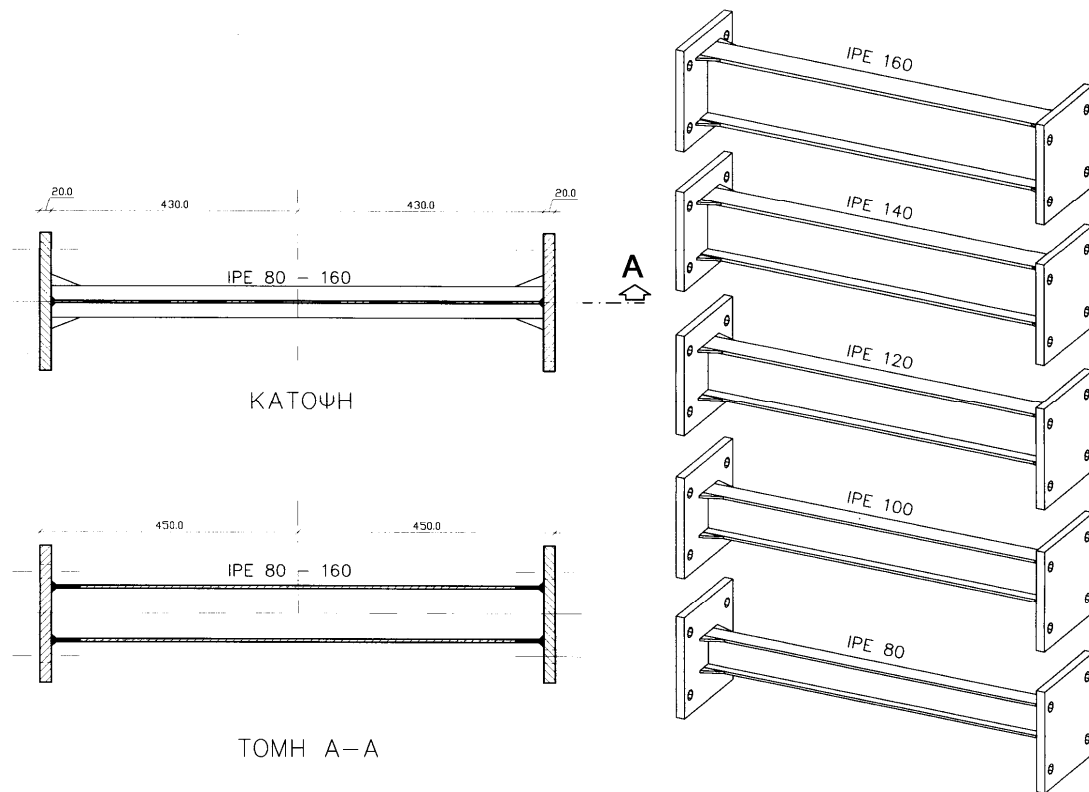
Εδώ περισσότερο από όποιο άλλο πείραμα, η δυσκαμψία των συνδετήριων δοκών IPE 80-160, με ροπή αδρανείας έως και πενταπλάσια αυτής της IPE 100 (869 cm^4 αντί 171 cm^4) οδήγησε σε σχετικά μεγάλες μετακινήσεις του πλαισίου δοκιμών και αυξημένες καμπτικές παραμορφώσεις των υποστυλωμάτων, με αποτέλεσμα την σημαντική απομείωση των πραγματικών παραμορφώσεων των δοκών. Η είσοδος στην πλαστική περιοχή και περισσότερο η τελική αστοχία περιορίστηκε στις συνδετήριες δοκούς με σχετικά μικρή διατομή, εφ' όσον οι μεγαλύτερες συμπαρασύρουν σε στροφή τα υποστυλώματα.



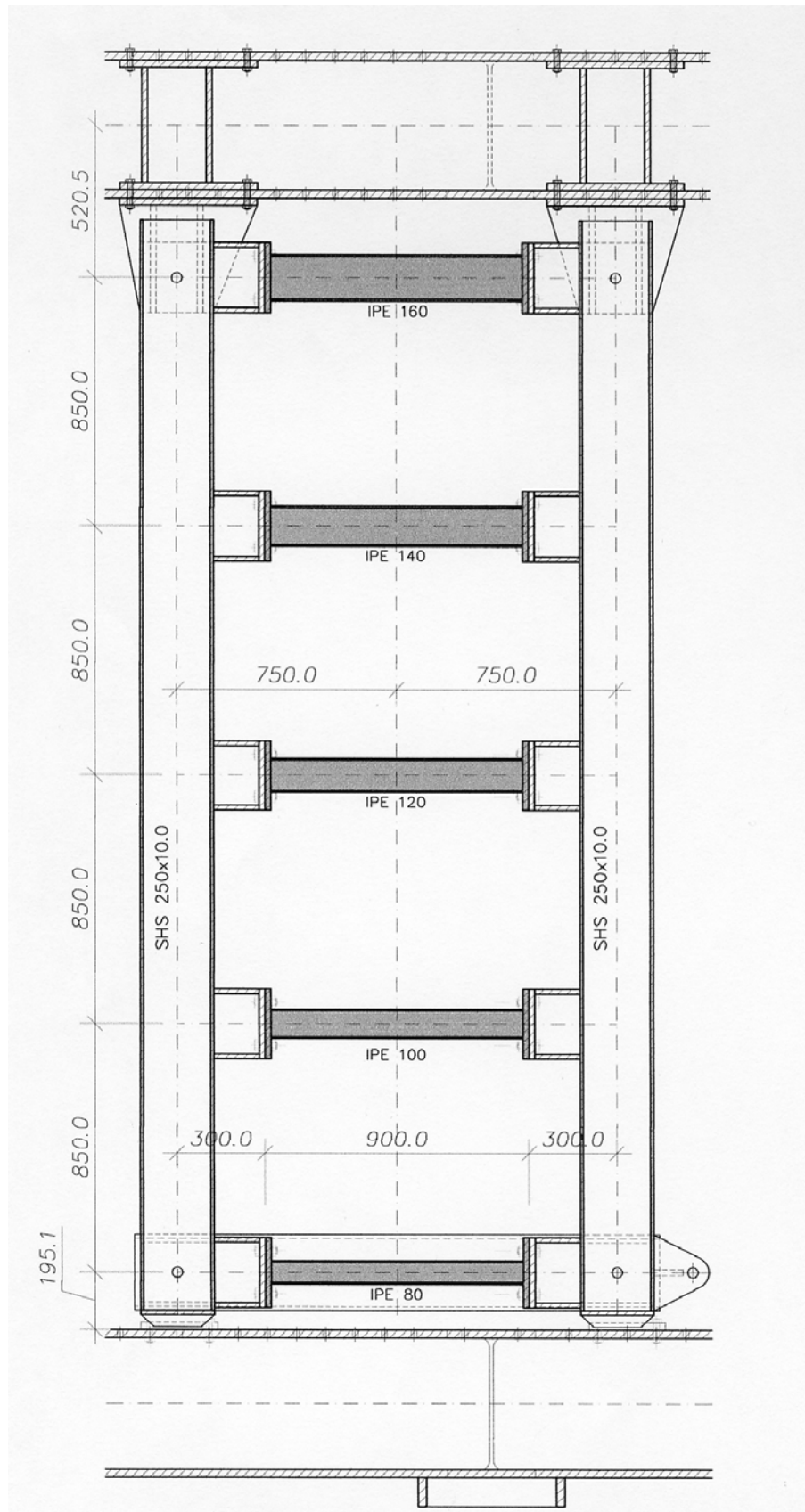
Σχ.5.8.1. Αξονομετρικό σχέδιο της πειραματικής διάταξης με 5 IPE 80-160



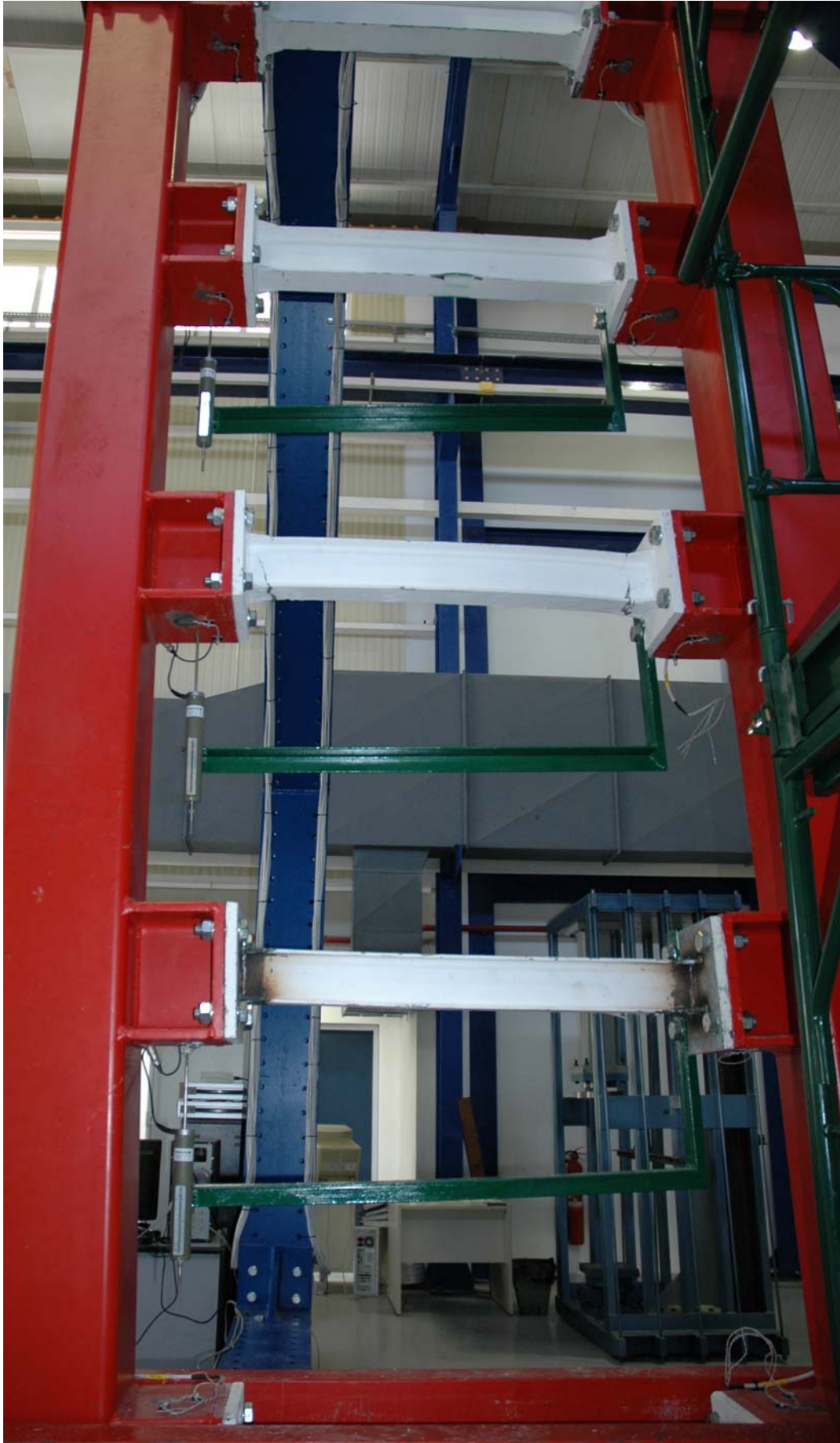
Σχ.5.8.2. Συνολική όψη της πειραματικής διάταξης (5 IPE 80-160)



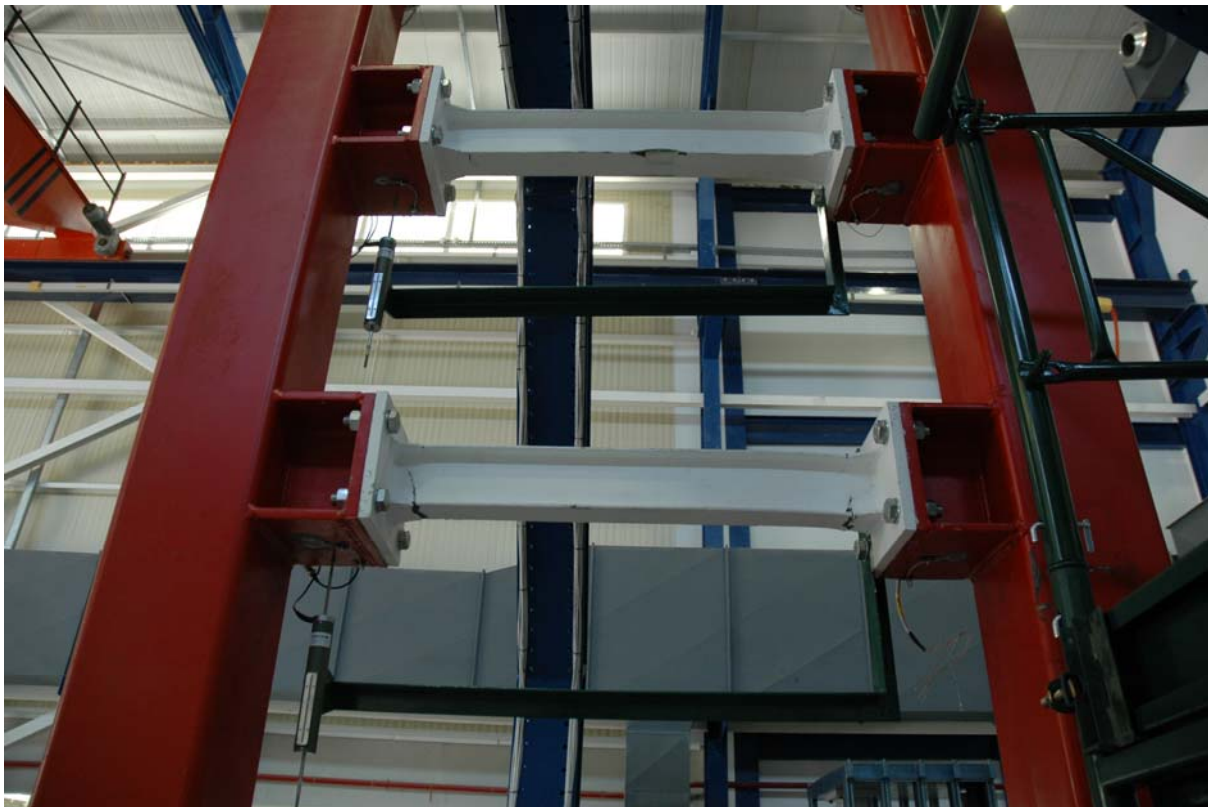
Σχ.5.8.3. Τα δοκίμια του πειράματος 5 IPE 80-160 με ενίσχυση στα άκρα



Σχ.5.8.4. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 5 IPE 80-160



Φωτ. 5.8.1. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 5 IPE 80-160



Φωτ. 5.7.2. Όψη δοκιμίων 5 IPE 80-160, με συνολική αστοχία των διατομών 80-120



Φωτ. 5.8.3. Κάτοψη του δοκιμίου 1 IPE 80, με συνολική αστοχία (Πείραμα 5 IPE 80-160)

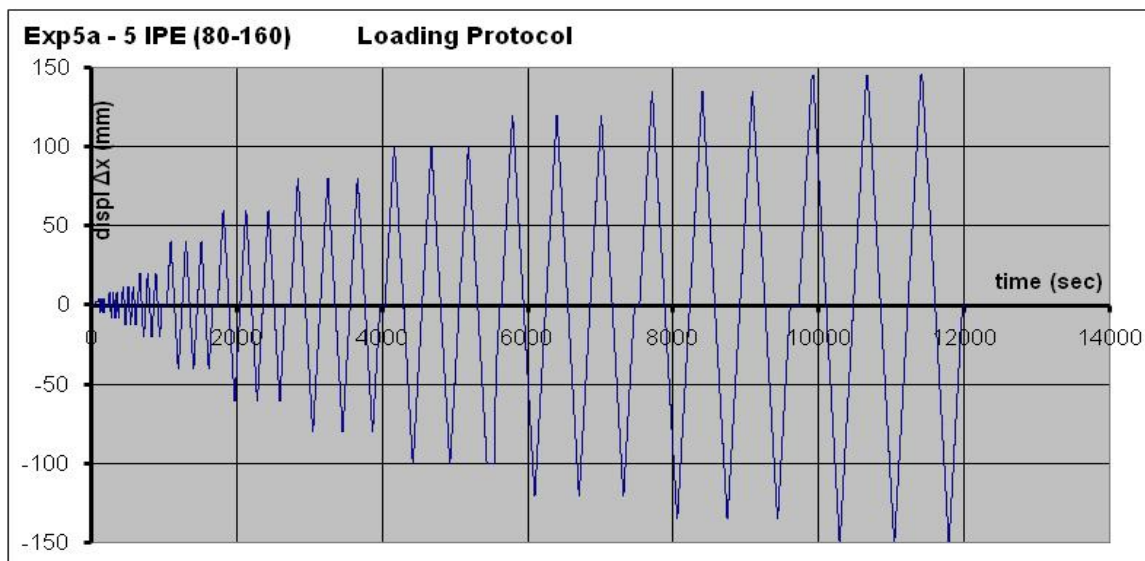
IN ST E D - Καινοτόμα συστήματα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας, σε πολυώροφα αντισεισμικά μεταλλικά κτίρια.
Φαίδων Καρυδάκης



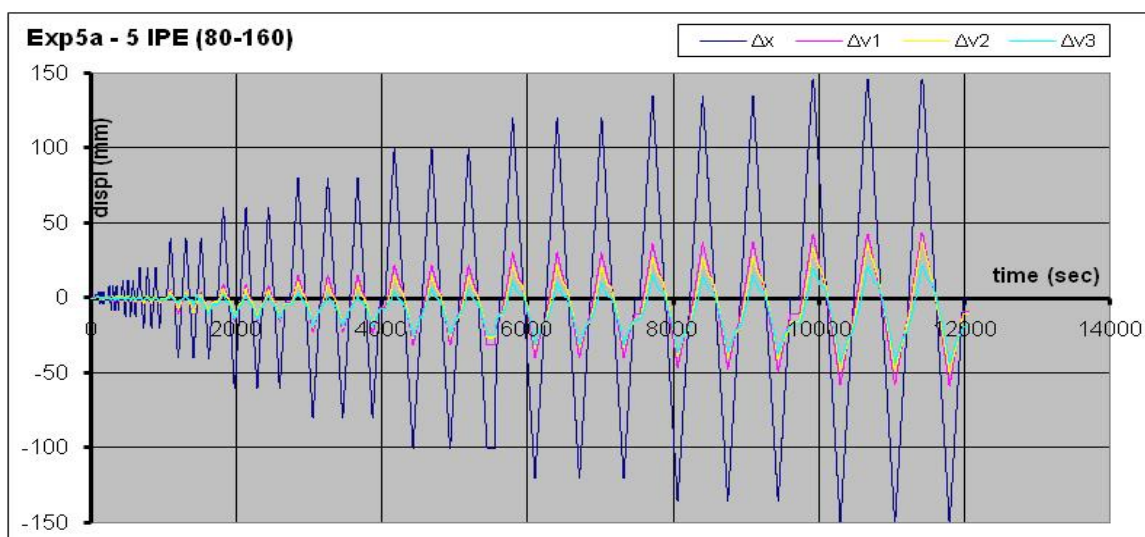
Φωτ. 5.8.4. Όψη του δοκίμιου 1 IPE 120, με συνολική αστοχία (Πείραμα 5 IPE 80-160)



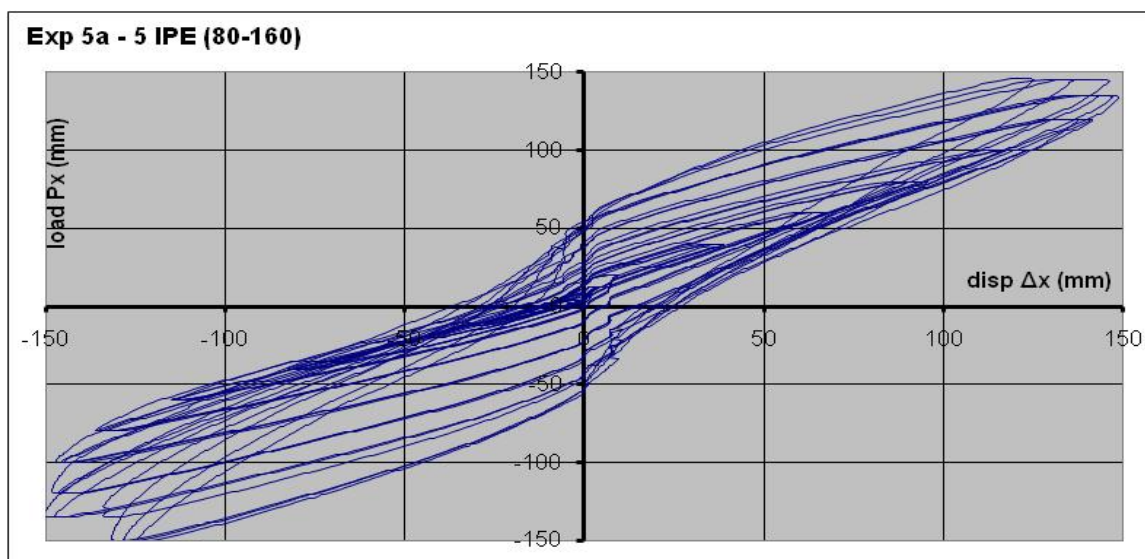
Φωτ. 5.8.5. Όψη του δοκίμιου 1 IPE 100, με συνολική αστοχία (Πείραμα 5 IPE 80-160))



Διαγρ. 5.7.1. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (1 HE-A 100) έως $\Delta x=150$ mm



Διαγρ. 5.7.2. Διάγραμμα οριζοντίων και διαμηθικών μετακινήσεων $\Delta x=0-150$ mm (1 HE-A 100)



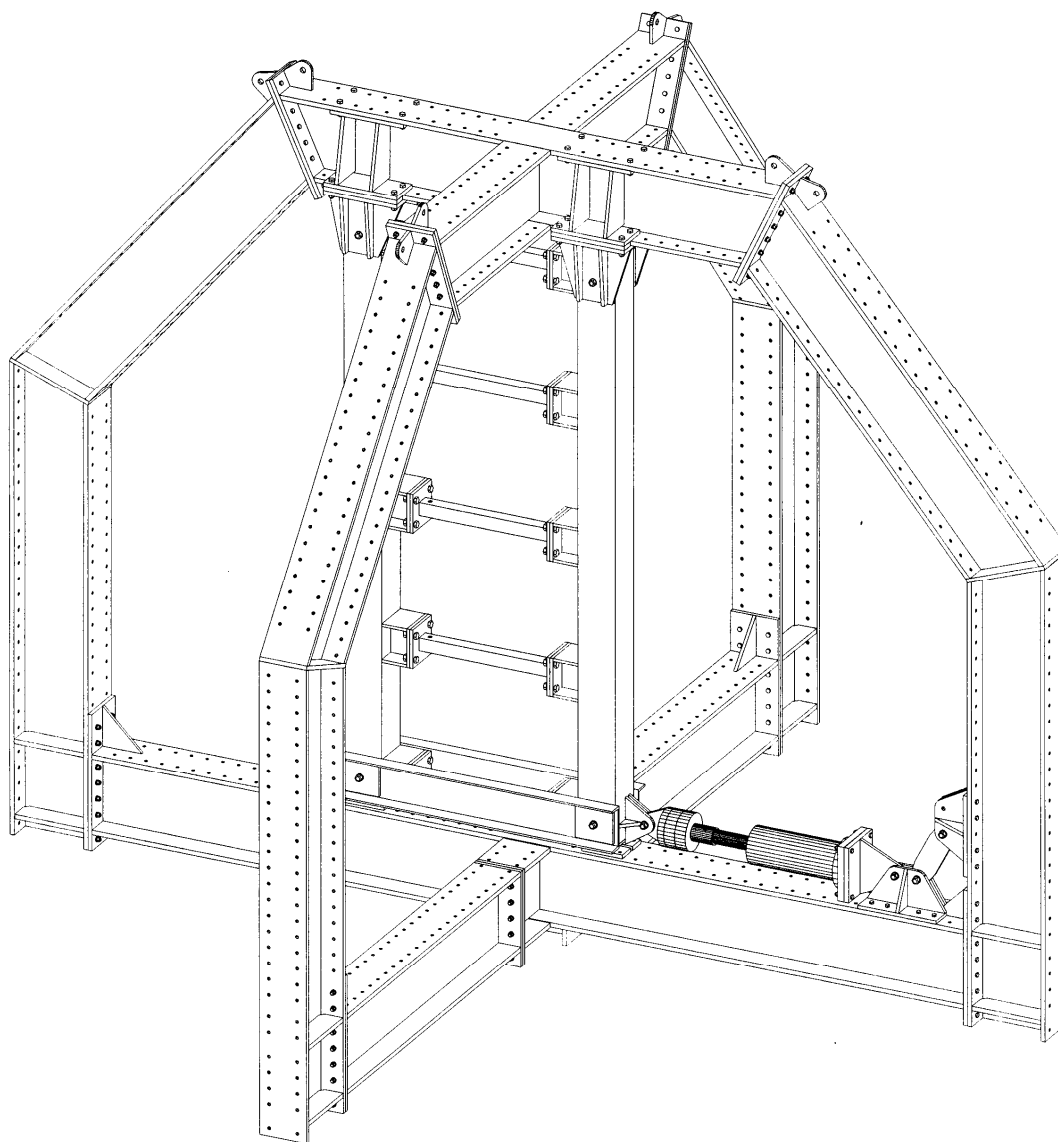
Διαγρ. 5.7.3. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (1 HE-A 100) $\Delta x=0-150$ mm

5.9 Πείραμα 9 - 5 SHS 80/5 με επιμήκεις σκισμές (holes).

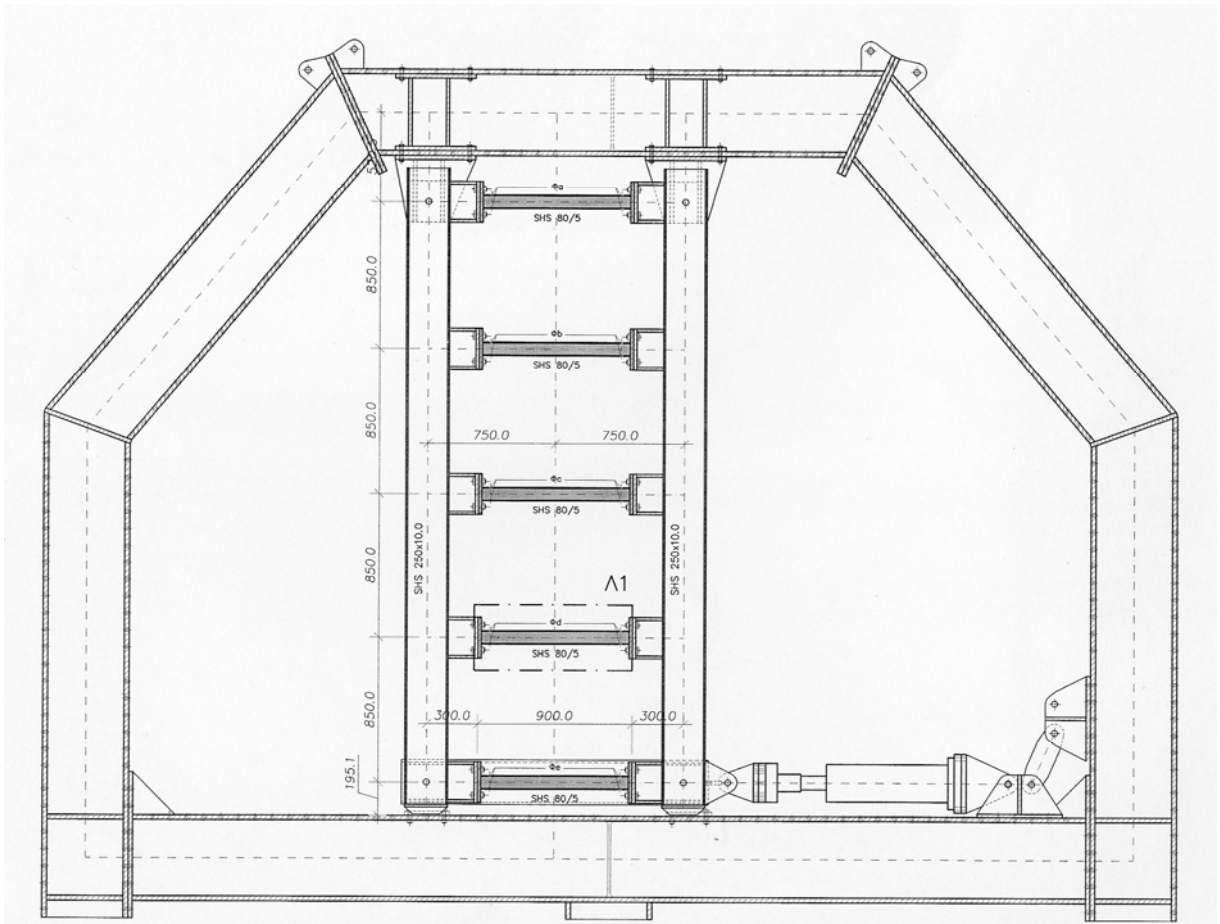
	#	Τύπος δοκιμίου	Ημερομ.	displ Δx	Σχόλια
9	5b	5 SHS 80/5 (holes)	20-11-2007	0-150 mm	Οπές διαφορετικής διαμέτρου

Δεύτερο πείραμα με αναμενόμενη προοδευτική αστοχία μεταξύ των συνδετήριων δοκών, έγινε πάλι προφανώς με πλήρη διάταξη και μεταβλητής διατομής συνδετήριες δοκούς από τετραγωνικές κοιλοδοκούς SHS 80/5 με επιμήκεις εγκάρσιας σχισμές διαφορετικού πλάτους. Το πείραμα ακολούθησε το αρχικό πρωτόκολλο φόρτισης, και ολοκληρώθηκε με τις μέγιστες δυνατές μετακινήσεις του συστήματος, 150 mm.

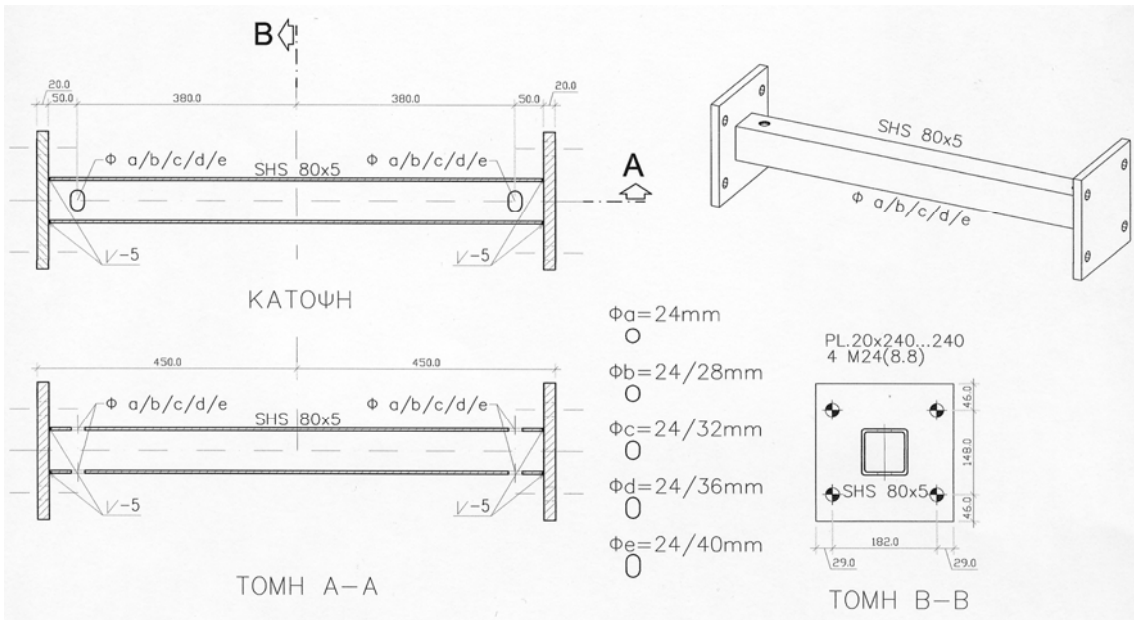
Το πείραμα ολοκληρώθηκε με σχετική επιτυχία, εφ' όσον (όπως αναφέρεται αναλυτικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο) η αναλογία της μεταβολής ροπής αδρανείας και ροπής αντιστάσεως ήταν η ίδια, με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη είσοδο στην πλαστική περιοχή όλων των δοκιμίων. Επομένως ελάχιστα διέφερε από το πείραμα # 3.



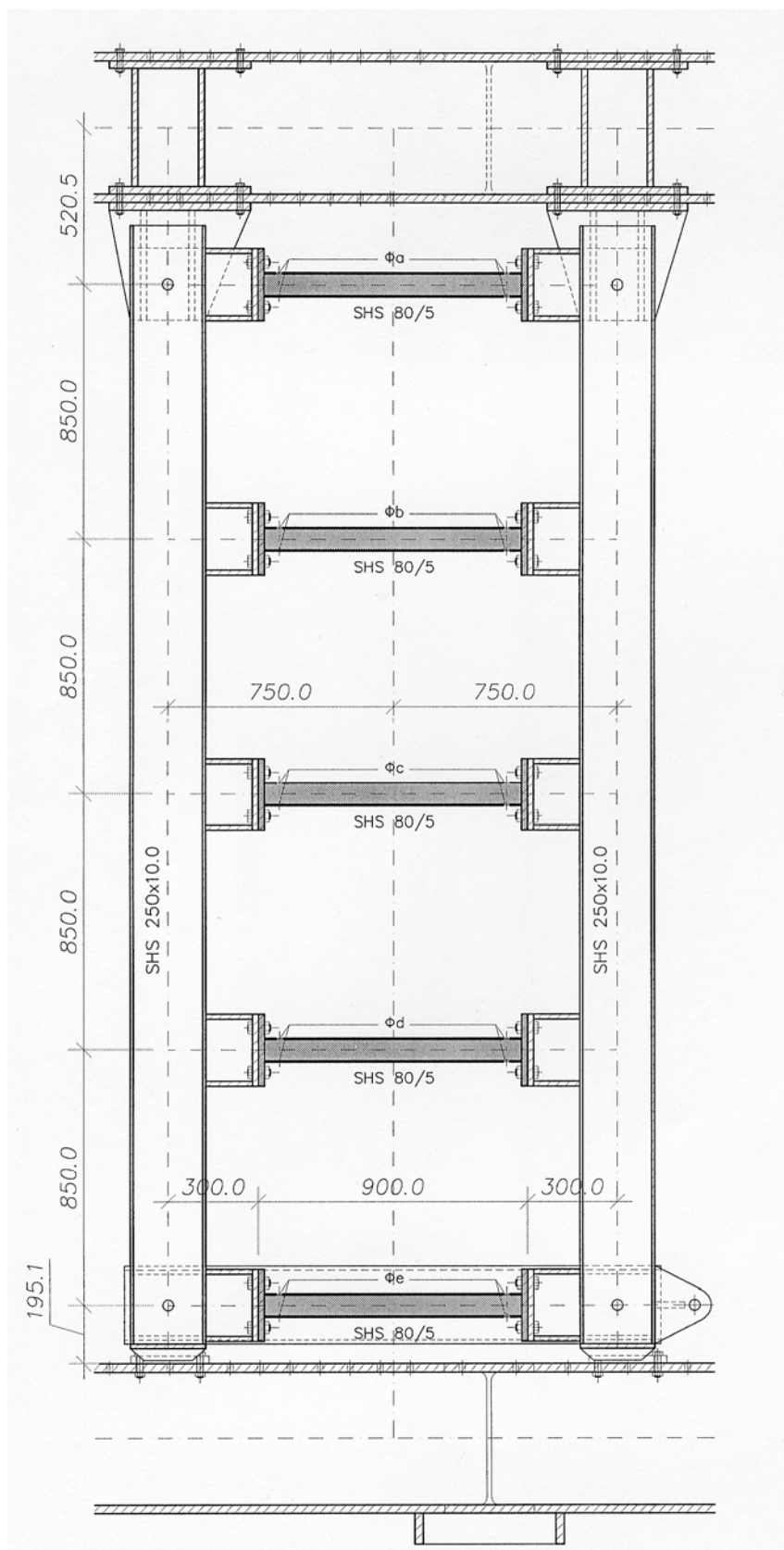
Σχ.5.9.1. Αξονομετρικό σχέδιο της πειραματικής διάταξης με 5 SHS 80/5 holes.



Σχ.5.9.2. Συνολική όψη της πειραματικής διάταξης (5 SHS 80/5 holes)



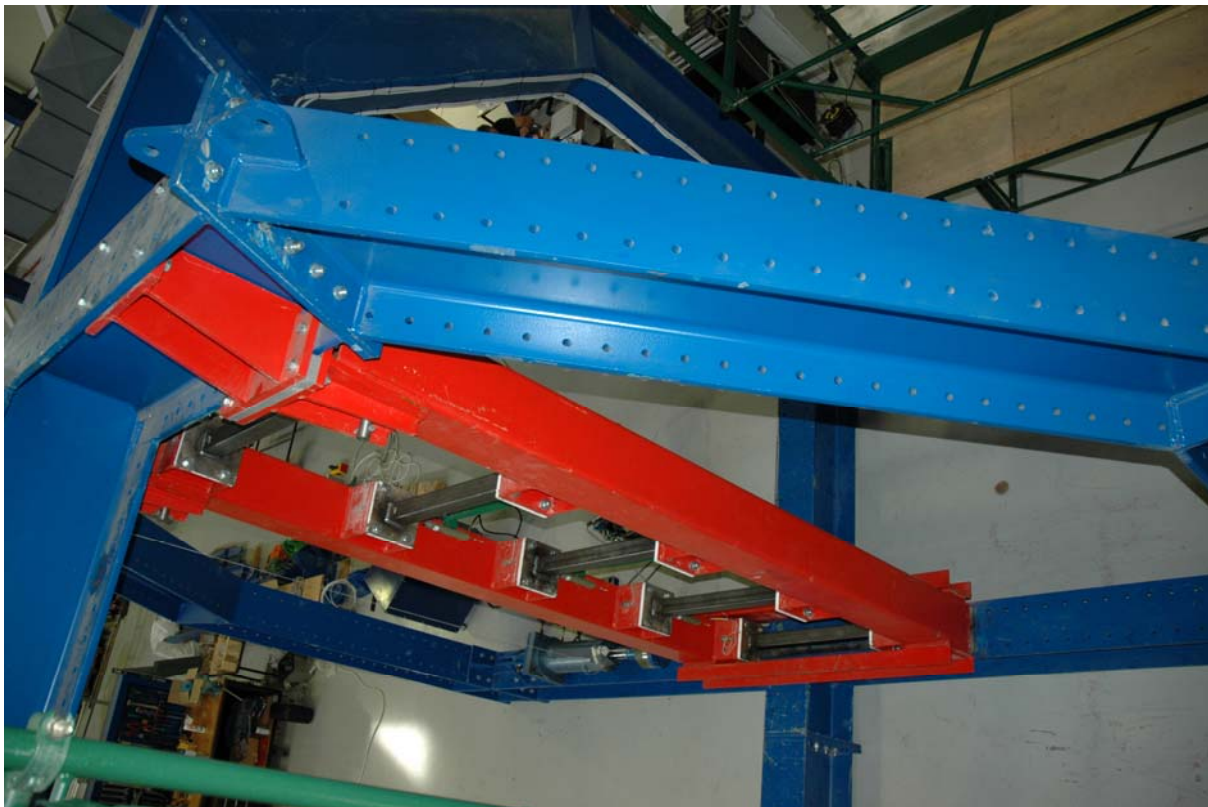
Σχ.5.9.3. Τα δοκίμια του πειράματος 5 SHS 80/5 holes



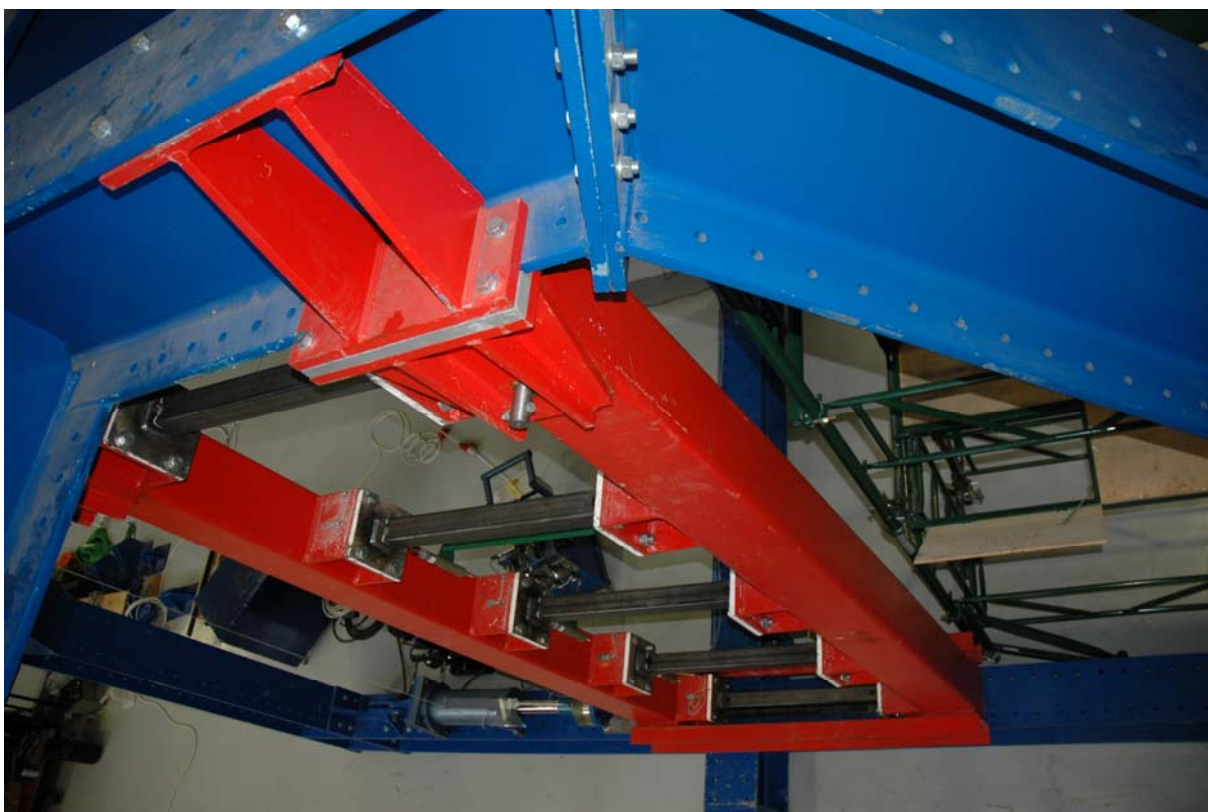
Σχ.5.9.4. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 5 SHS 80/5



Φωτ. 5.9.1. Όψη της κατακόρυφης Vierendeel (διάταξη του συστήματος INSTED) 5 SHS 80/5 holes

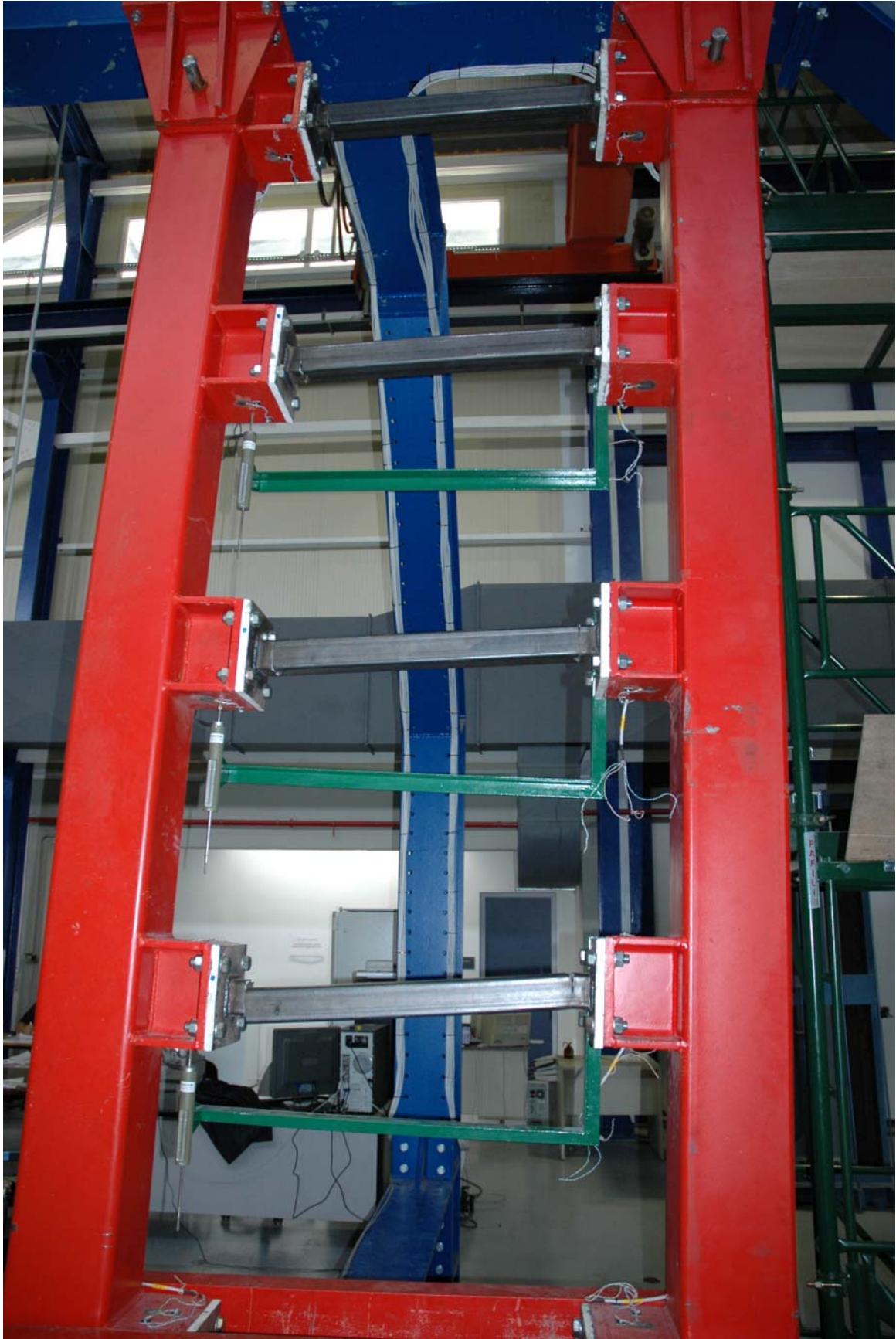


Φωτ. 5.9.2. Γενική διάταξη του πλαισίου δοκιμών του συστήματος INSTED (5 SHS 80/5 holes)



Φωτ. 5.9.3. Γενική διάταξη του πλαισίου δοκιμών του συστήματος INSTED (5 SHS 80/5 holes)

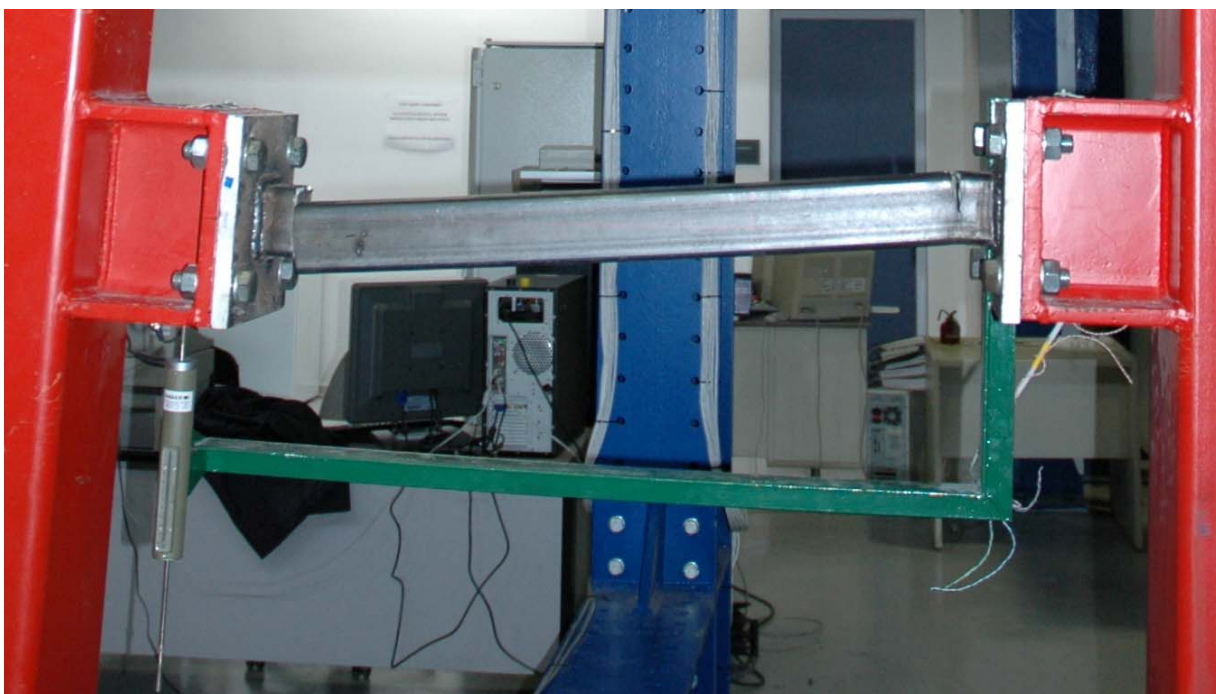
INSTED - Καινοτόμα συστήματα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας, σε πολυώροφα αντισεισμικά μεταλλικά κτίρια.
Φαίδων Καρυδάκης



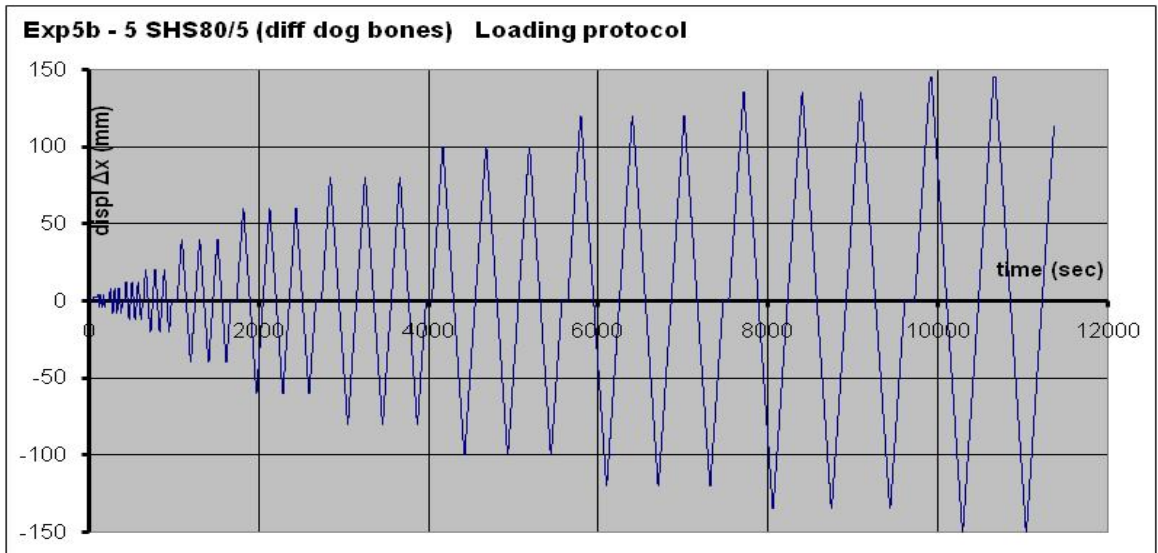
Φωτ. 5.9.4. Συνολική όψη του συστήματος INSTED (5 SHS 80/5 holes) σε τελική αστοχία



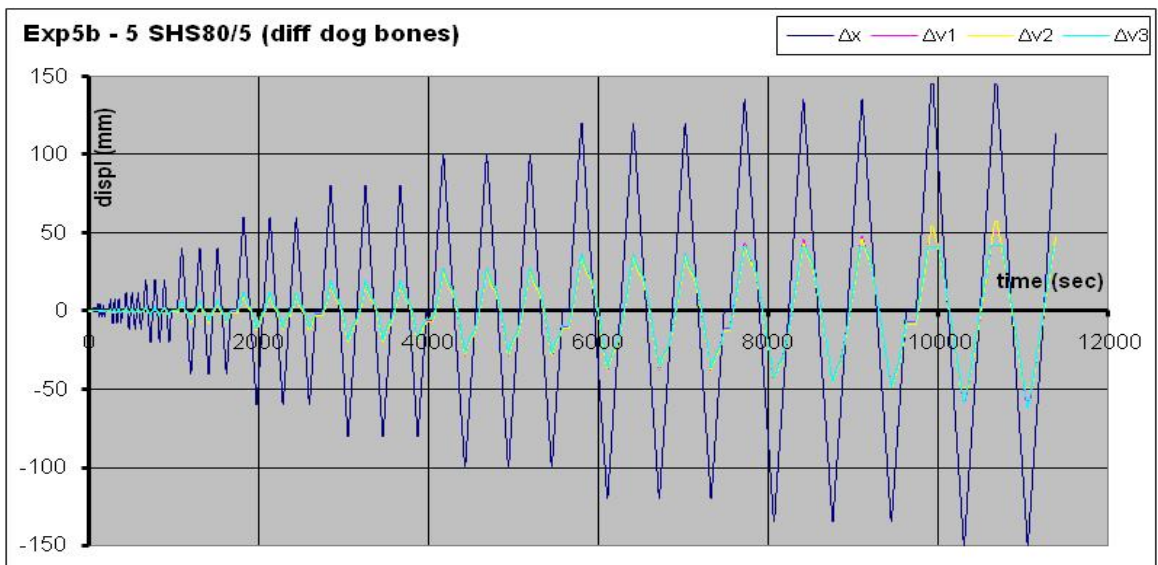
Φωτ. 5.9.5. Άνοψη του δοκιμίου 1SHS 80/5 με σχισμή χωρίς ενίσχυση (Πείραμα 5 SHS 80/5 holes)



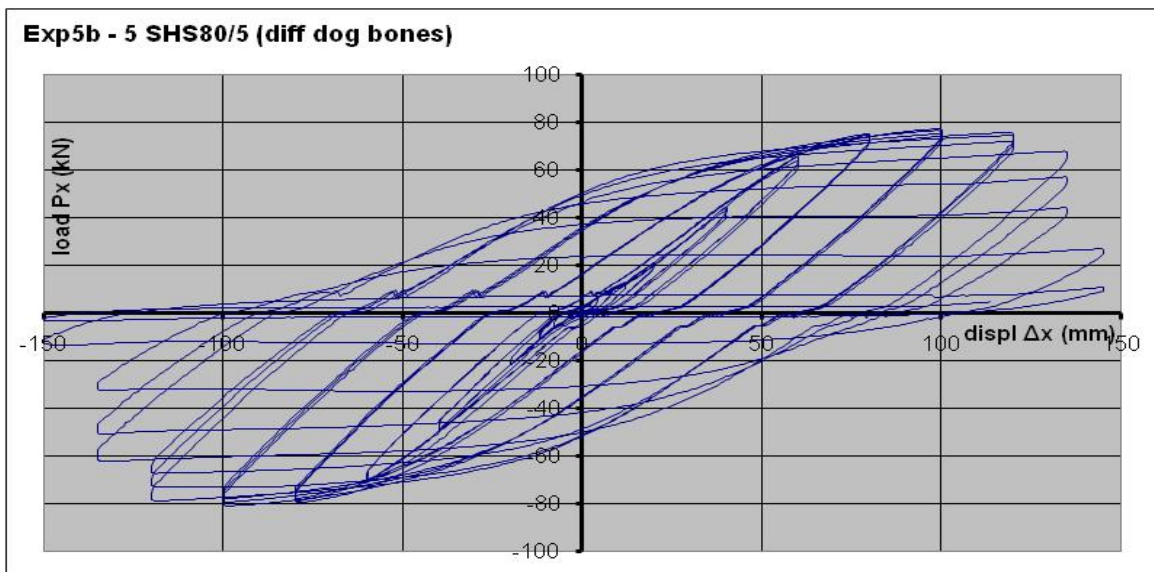
Φωτ. 5.9.5. Όψη του δοκιμίου 1SHS 80/5 σε τελική αστοχία (Πείραμα 5 SHS 80/5 holes)



Διαγρ. 5.9.1. Πρωτόκολλο επιβαλλόμενων μετακινήσεων (5 SHS 80/5 holes) έως $\Delta x=150$ mm



Διαγρ. 5.9.2. Διάγραμμα οριζοντίων και διατμητικών μετακινήσεων $\Delta x=0-150$ mm (5 SHS 80/5 holes)



Διαγρ. 5.9.3. Βρόχοι υστέρησης – διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης (5 SHS 80/5 holes) $\Delta x=0-150$ mm

6. Κριτική στην πειραματική διαδικασία.

6.1. Γενικά.

Τα πειράματα διεξήχθησαν στο εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών του ΕΜΠ, από τον Ιούλιο, μέχρι τον Νοέμβριο του 2007, με ικανοποιητική επιτυχία.

Το προτεινόμενο σύστημα λειτούργησε όπως αναμενόταν και τα αποτελέσματα ικανοποιούν απόλυτα τις βασικές απαιτήσεις σχεδιασμού που είναι:

- ο περιορισμός των αστοχιών στις αναλώσιμες συνδετήριες δοκούς δυσκαμψίας,
- η σημαντική απορρόφηση ενέργειας, όπως αυτή προκύπτει από την μορφή των υστερητικών βρόχων
- η διατήρηση της δομικής ακεραιότητας του συστήματος σε μεγάλες παραμορφώσεις, μετά την εξάντληση της ελαστικής αντοχής και την είσοδο του συστήματος στην πλαστική περιοχή.

Όλα τα πειράματα περιγράφονται αναλυτικά στο αντίστοιχο ειδικό κεφάλαιο, όπου περιλαμβάνονται σχέδια, φωτογραφίες, και διαγράμματα. Υπάρχουν ακόμη διαθέσιμα video από όλα τα πειράματα και καταγραφές από όλες τις μετρήσεις.

Τα στοιχεία που παρουσίασαν μικροπροβλήματα στον αρχικό σχεδιασμό της πειραματικής διαδικασίας ή και στον επί μέρους σχεδιασμό του συστήματος και που αναλύονται ξεχωριστά σε διάφορα σημεία της εργασίας, συγκεντρωτικά ήταν:

- Η δυσκολία συναρμολόγησης του πλαισίου δοκιμών και ιδιαίτερα της σταυροειδούς κεφαλής του, κύρια λόγω των κεκλιμένων συνδέσεων, μεταξύ των στύλων και του ζυγώματος.
- Η σχετική ευκαμψία του πλαισίου, σε σχέση πάντα με την ανάγκη δοκιμών συστημάτων συνδετήριων δοκών μεγαλύτερης δυσκαμψίας και αντοχής. Σημαντικό ποσοστό της ευκαμψίας οφείλεται στην όχι ικανοποιητική συναρμογή του παραπάνω αναφερόμενου κόμβου και στην περιορισμένη αντοχή των κοχλιών σύνδεσης.
- Η ανοχές στην κατασκευή, ειδικά στους πείρους και τις συνδέσεις του εμβόλου, όπου λειτουργούσαν αθροιστικά.
- Η κατασκευαστικές ατέλειες στους στύλους και τα δοκίμια, που κατέληγαν σε αποκλίσεις στις επαφές των μετωπικών πλακών των συνδετηρίων δοκών και των δοκών υποδοχέων, είτε λόγω μικροδιαφορών στο μήκος των δοκών, είτε λόγω αποκλίσεων μεταξύ των μετωπικών πλακών. Οι αποκλίσεις αυτές αυξάνονται με την επανάληψη των πειραμάτων.
- Οι κατακόρυφες μετακινήσεις στις κοχλιώσεις των συνδετηρίων δοκών, λόγω σχετικής ολίσθησης των μετωπικών πλακών, στις κατασκευαστικές ανοχές των οπών.
- Η χαλάρωση, και η δημιουργία διάκενου, στα σημεία στήριξης των ράβδων τύπου INERD, λόγω τραυματισμού των δοκιμίων.
- Η ασαφής θέση της πλαστικής ζώνης, από την τριγωνική μορφή των ενισχύσεων στα άκρα των συνδετηρίων δοκών.

- Η συγκέντρωση τάσεων στις εγκοπές και σχισμές, λόγω μικρού σχετικά μήκους της διαμορφωμένης εγκοπής και του αντίστοιχα μικρού αναπτυσσόμενου μήκους της πλαστική ζώνης, που οδηγούσε σε πρόωρη αστοχία.

6.2 Παρατηρήσεις - Βελτιώσεις - Σχεδιασμός νέων πειραμάτων

Με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε, από την πρώτη σειρά των 15 πειραμάτων, έχουν σχεδιαστεί οι ακόλουθες βελτιώσεις στο βασικό σχεδιασμό αλλά και στην πειραματική διάταξη, που αποτελούν και τη βάση του νέου βελτιωμένου συστήματος στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος Fuseis.

6.2.1 Βασικός σχεδιασμός του συστήματος INSTED.

Καθορισμός περιοχής της δημιουργίας της πλαστικής ζώνης.

Από τη διαμόρφωση ενισχύσεων με τριγωνικά ελάσματα στα άκρα των δοκών, είναι προτιμότερη η δημιουργία εγκοπών τύπου dogbones, που επιτρέπει σαφέστερο καθορισμό της περιοχής ανάπτυξης της πλαστικής ζώνης, απλούστερη διαμόρφωση των δοκών, πρόσθετο καθορισμό διαφορετικών αντοχών και προοδευτικής πλαστικοποίησης του συστήματος, με τη χρήση διαφορετικού βάθους εγκοπής στη δημιουργία των dog-bones. Το μήκος των εγκοπών καθορίζεται από την επιθυμητή έκταση ανάπτυξης της πλαστικής ζώνης και θα μπορούσε εύκολα να εκτείνεται σε όλο το μήκος της δοκού, ξεκινώντας από μια μικρή απόσταση από τη στήριξη, είτε αυτή είναι η μετωπική πλάκα σε περιπτώσεις ολόσωμων δοκών, είτε είναι τα σημεία στήριξης σε περιπτώσεις κεντρικών συνδετηρίων ράβδων τύπου INERD.

Στα συστήματα αυτά, με κεντρική ράβδο, η δημιουργία εγκοπών επιτρέπει τη δημιουργία της πλαστικής ζώνης μακριά από την περιοχή των στηρίξεων, όπου παρατηρούνται τραυματισμοί από το συνδυασμό της μέγιστης κάμψης και τοπικής εγκάρσιας θλίψης.

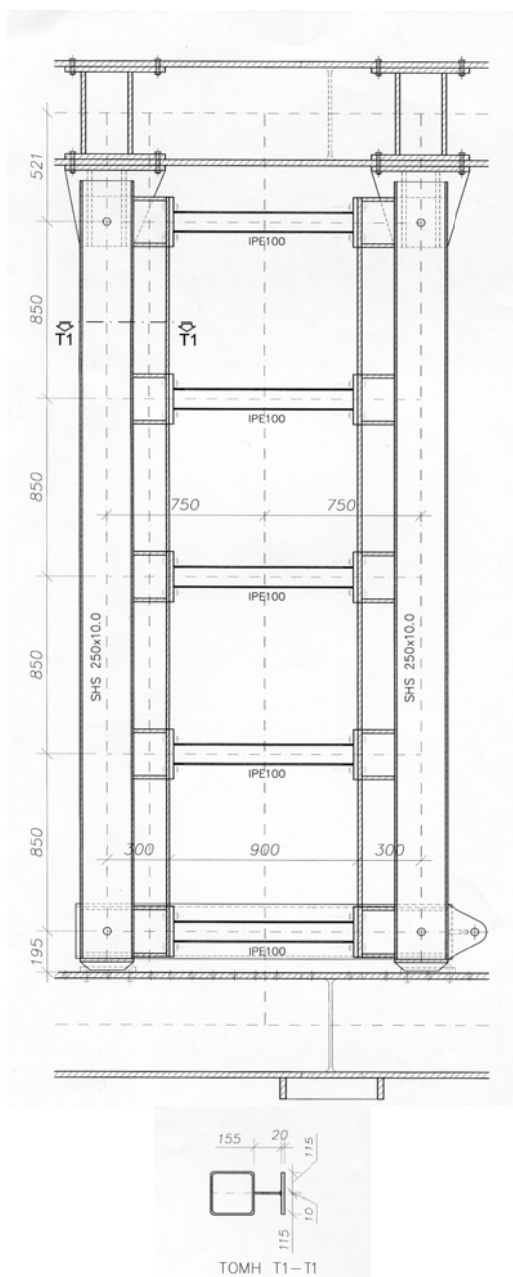
Το πρόβλημα αυτό παρουσιάστηκε τόσο στις ορθογωνικές ράβδους που είχαν σημειακή αιχμηρή στήριξη, για λόγους μηχανουργικής κατεργασίας, όσο και στις κυκλικές, όπου η στήριξη είχε καμπύλη απόληξη χωρίς αιχμή, λόγω της μεγαλύτερης δυνατότητας κατεργασίας του κυκλικού υποδοχέα σε τόρνο.

Ακρίβεια στο μήκος των δοκιμίων και μικροαποκλίσεις στις μετωπικές πλάκες.

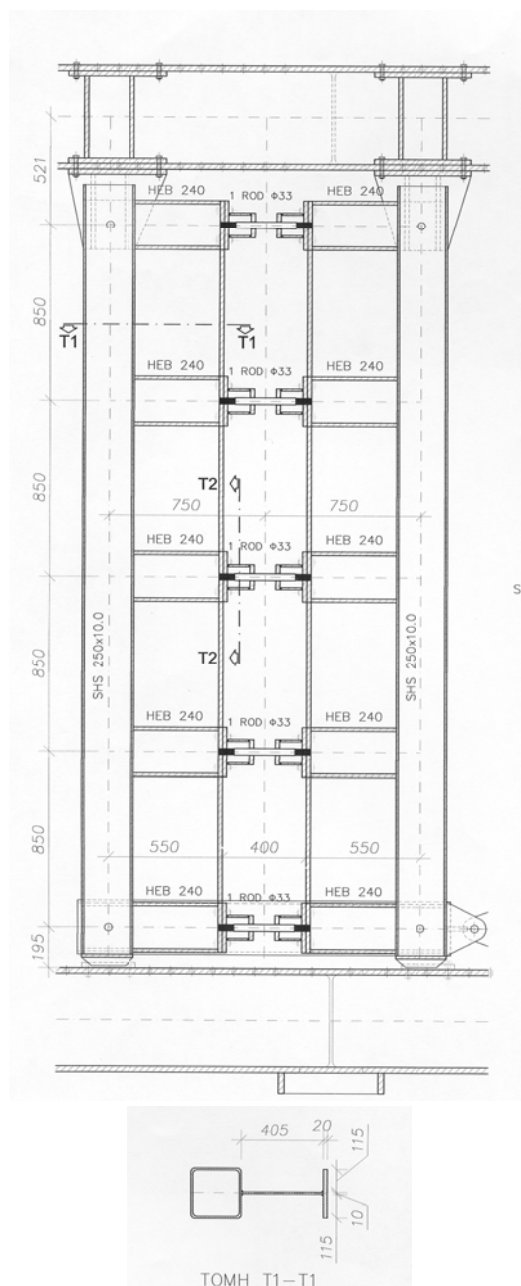
Οι μικροδιαφορές από τις κατασκευαστικές ατέλειες στα μήκη των συνδετηρίων δοκών, μπορεί να ξεπεραστεί με το σχεδιασμό δοκών με κατασκευαστικά περιθώρια και χρήση προσθηκών. Δεν λύνεται όμως εύκολα, το πρόβλημα των γωνιακών μικροαποκλίσεων στις συνδέσεις των μετωπικών πλακών, χωρίς όμως να δημιουργείται κάποιο ουσιαστικό πρόβλημα στην συμπεριφορά του συνδέσμου, παρά η αίσθηση της κακοτεχνίας.

Το πέρασμα πάντως, από τις απλές δοκούς, στα συστήματα με τις κεντρικές ράβδους, λύνει αυτόματα το σημαντικό πρόβλημα της ακρίβειας της κατασκευής και αντίστοιχα της ανέγερσης-συναρμολόγησης, που οφείλεται στις κατασκευαστικές ατέλειες μήκους αλλά και επιπεδότητας των μετωπικών πλακών.

Το πρόβλημα αυτό, σύνθηες στις κατασκευές, εντείνεται περισσότερο στην περίπτωση επισκευής ή αντικατάστασης, που τυχόν παραμένουσες πλαστικές παραμορφώσεις δημιουργούν πρόσθετες δυσκολίες στην απομάκρυνση του παραμορφωμένου τμήματος αλλά κύρια στην τοποθέτηση του νέου.



Σχ.6.1. Νέα διάταξη και ενισχύσεις στύλων για ολόσωμες συνδετήριες δοκούς



Σχ.6.2. Νέα διάταξη και ενισχύσεις στύλων για κεντρικές συνδετήριες ράβδους τύπου INERD

Η χρήση των συστημάτων με κεντρικές ράβδους απλοποιεί κατά πολύ την τοποθέτηση, την αφαίρεση και την αντικατάστασή τους, λόγω της δυνατότητας των κεντρικών αναλώσιμων στοιχείων να προσαρμόζουν με απλές ρυθμίσεις το μήκος τους.

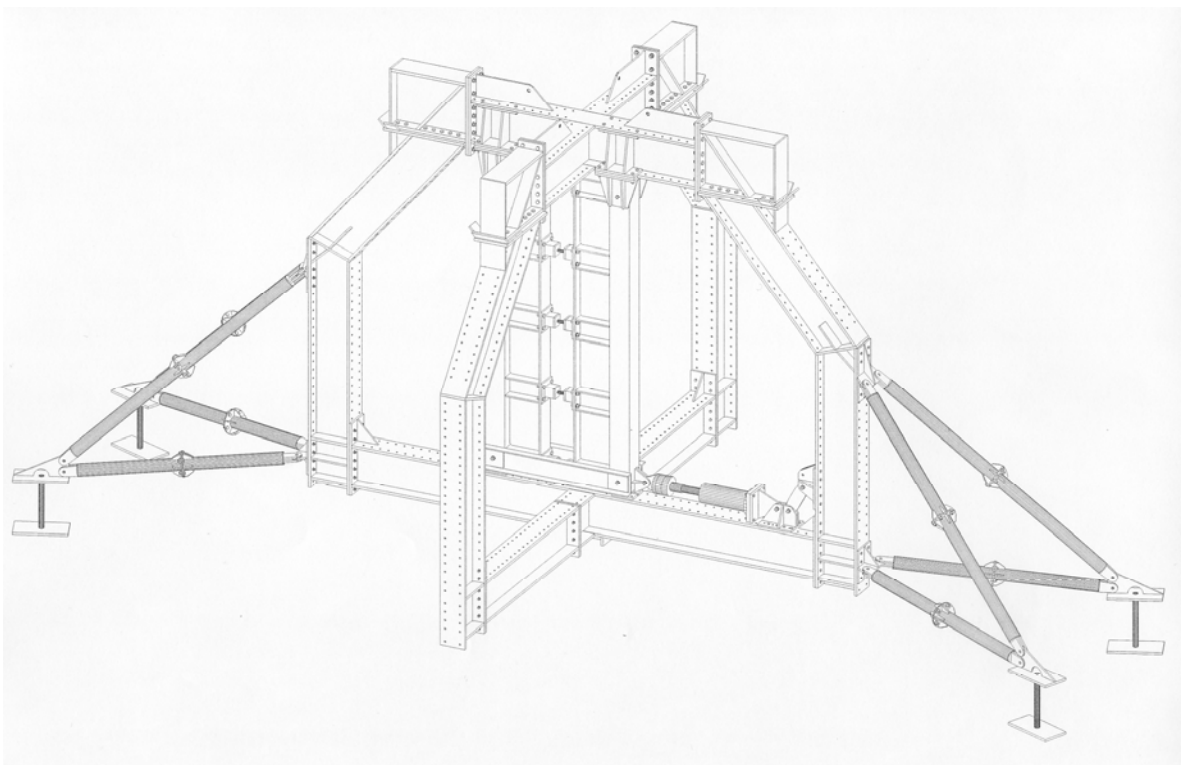
Ακόμη το αναλώσιμο τμήμα είναι ιδιαίτερα χαμηλού κόστους, στην κατασκευή, την τοποθέτηση του αλλά και την αντικατάστασή του εφ' όσον απαιτηθεί.

Η δυνατότητα καθορισμού των παραμέτρων δυσκαμψίας, αντοχής και απορροφούμενης ενέργειας, όπως και η επίτευξη προοδευτικής πλαστικής αστοχίας είναι ιδιαίτερα απλές.

Ακόμη η χρήση μιας μικρής καμπτόμενης ράβδου, μόνον στο κέντρο του συστήματος, δίνει τη δυνατότητα να ενισχυθεί κατά πολύ το υποστύλωμα, περιορίζοντας την οριζόντια καμπτόμενη δοκό μόνον στο μέσον της διάταξης ενώ ο ενισχυμένος στύλος καταλαμβάνει όλο το μήκος και των δοκών υποδοχέων.

Η νέα αυτή διάταξη προτείνεται στα αντίστοιχα σχήματα, (Σχ. 6.1 και 6.2) είτε για ολόσωμες δοκούς, είτε καλύτερα για κεντρικές κυκλικές ράβδους, χωρίς δοκούς υποδοχείς, αλλά με απλά κιβώτια υποδοχείς, στο άκρο των ενισχυμένων στύλων.

6.2.2 Βελτιώσεις στην πειραματική διάταξη του συστήματος INSTED.



Σχ.6.3. Νέα διάταξη κεφαλής και πρόσθετες ενισχύσεις του συνολικού πλαισίου δοκιμών (εδώ για κεντρικές συνδετήριες δοκούς τύπου INERD)

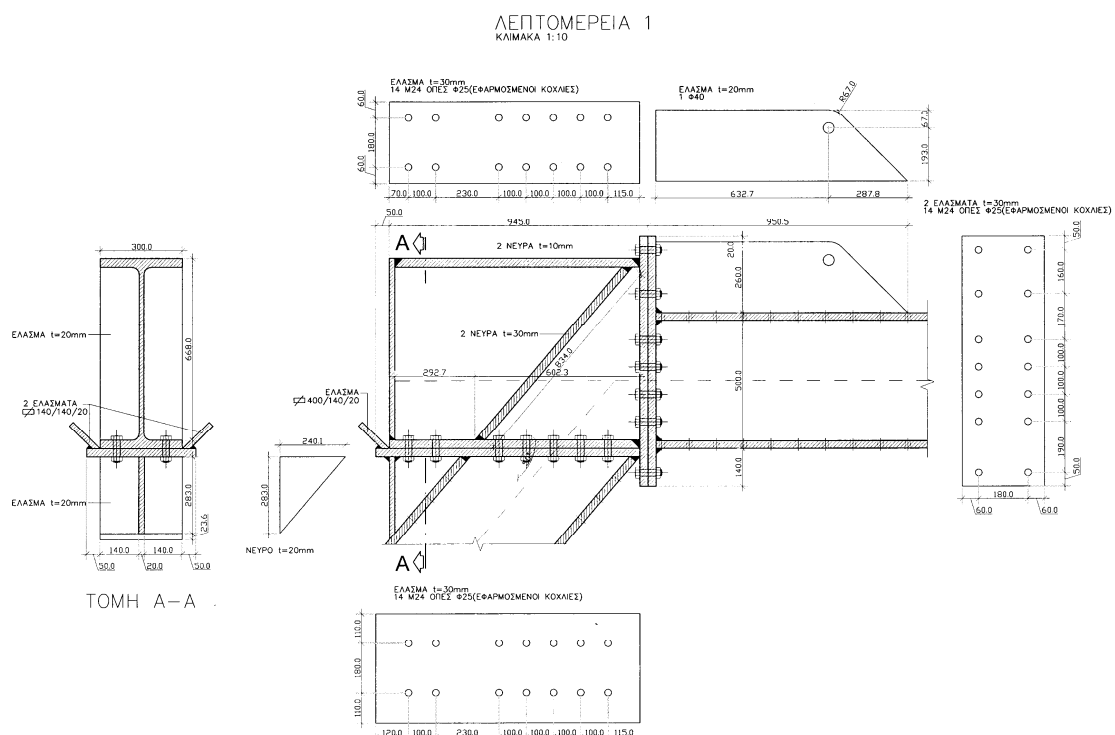
Οι βελτιώσεις στην πειραματική διάταξη αναφέρονται κύρια στην αύξηση της συνολικής δυσκαμψίας του πλαισίου δοκιμών, στον περιορισμό των ατελειών,

ιδιαίτερα των αθροιστικών και τέλος στην ευκολία αντικατάστασης των στοιχείων της διάταξης.

Για την αύξηση της δυσκαμψίας, το πλαίσιο ενισχύεται με δεσμικές ράβδους, που στηρίζονται στο ειδικά ενισχυμένο δάπεδο του εργαστηρίου (strong floor), με τη διάταξη που φαίνεται στα αντίστοιχα σχήματα (Σχ. 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8)

Οι δεσμικές ράβδοι διατάσσονται κατ' επέκταση των κεκλιμένων τμημάτων των στύλων του πλαισίου, ώστε να εξασφαλίζουν το αμετακίνητο στην οριζόντια διεύθυνση του άνω ζυγώματος και κατ' επέκταση του κάτω, ώστε να μην υπάρχουν μετακινήσεις στον πόδα του στύλου από τις δυνάμεις που επιβάλλει το έμβολο η πρόσθετες καμπτικές καταπονήσεις στο στύλο.

Ενισχύθηκε ο κόμβος της στέψης του πλαισίου, και ανασχεδιάστηκε ώστε να είναι παράλληλα εύκολη η αποσυναρμολόγηση του πλαισίου, η αντικατάσταση της σταυροειδούς κεφαλής, και η προσθήκη πρόσθετων στοιχείων δυσκαμψίας εφ' όσον αυτό απαιτηθεί.

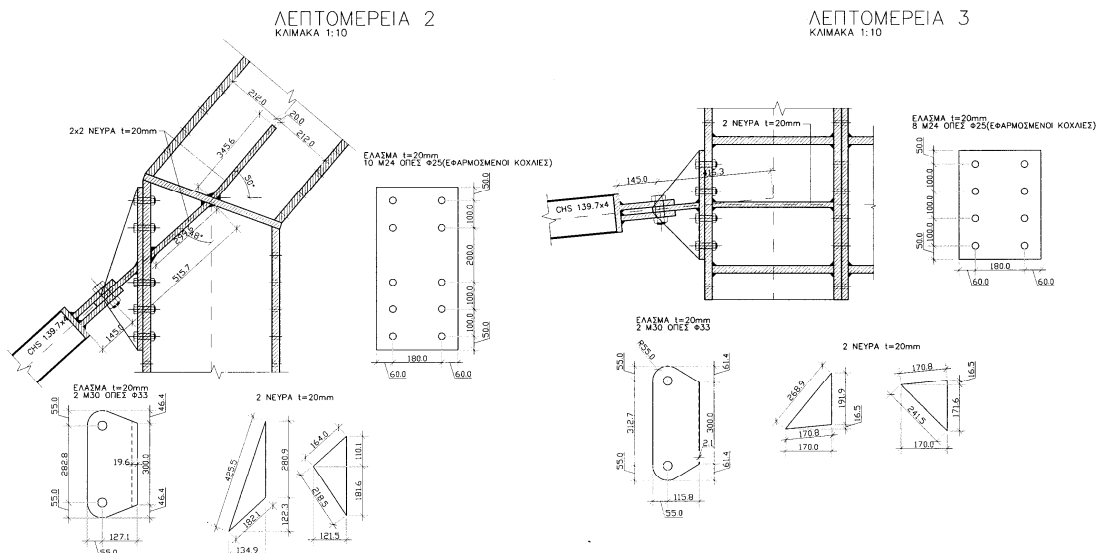


Σχ.6.4. Ο νέος ενισχυμένος κόμβος κεκλιμένων στύλων-ζυγώματος του πλαισίου δοκιμών

Ο κόμβος ενισχύεται με μεγαλύτερο στατικό ύψος, ισχυρότερες κοχλιωτές συνδέσεις και διάταξη ενισχυτικών ελασμάτων που εξασφαλίζουν την ομαλή τροχιά των δυνάμεων, και την ομαλή μεταφορά τους στο έδαφος, χωρίς έντονες καμπτικές καταπονήσεις των στύλων του πλαισίου.

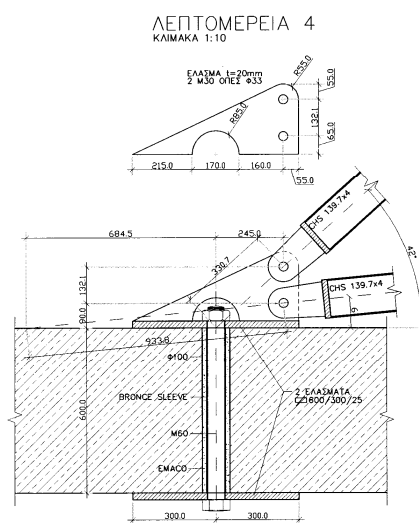
Με την ενίσχυση του πλαισίου και των στύλων, δίνεται η δυνατότητα τοποθέτησης του νέου μεγαλύτερου και ισχυρότερου εμβόλου του εργαστηρίου και η διενέργεια πειραμάτων με ισχυρότερες διατομές, που αντίστοιχα επιτρέπει την τοποθέτηση ολόσωμων μεταβλητών διατομών.

Ακόμη συνδέονται με ειδική διάταξη, οι δοκοί που συνδέουν τους πόδες των στύλων, μεταξύ τους, με κατάλληλο κομβόελασμα ώστε να παρέχουν και στρεπτική σύνδεση στους στύλους.

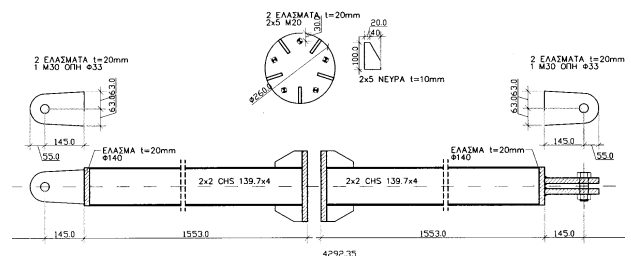


Σχ.6.5. Οι συνδέσεις του πλαισίου δοκιμών με τις εξωτερικές ενισχυτικές ράβδους

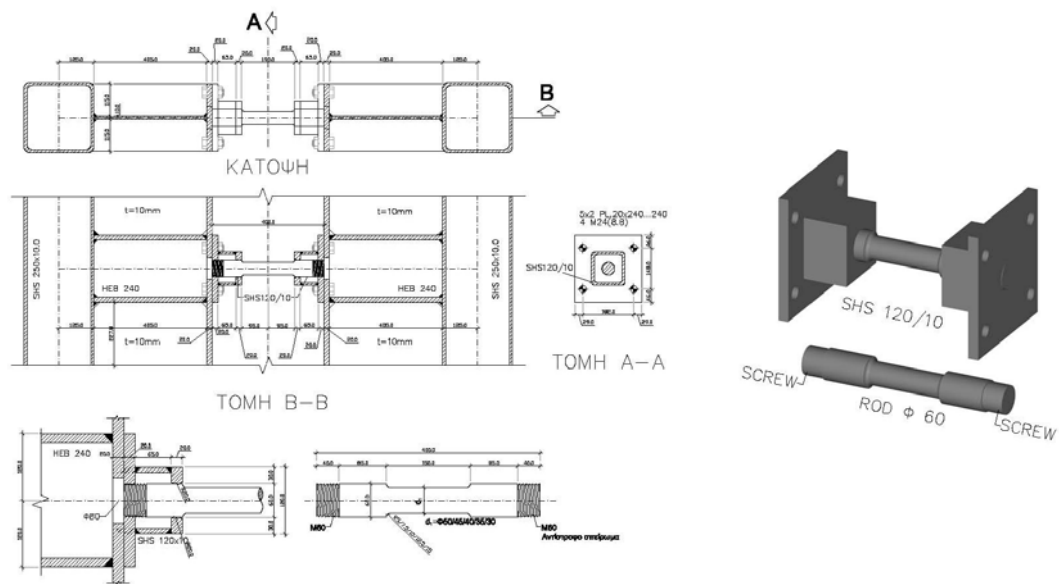
Οι ενισχυτικές συνδετήριες ράβδοι, καταλήγουν στο δάπεδο του εργαστηρίου, σε κατάλληλες οπές, και κοχλιώνονται με διαμερείς κοχλίες και μετωπικές πλάκες. Το διάκενο της οπής γεμίζει με μη συρρικνούμενο επισκευαστικό κονίαμα.



Σχ.6.6. Οι συνδέσεις του δαπέδου με τις εξωτερικές ενισχυτικές ράβδους



Σχ.6.7. Οι νέες εξωτερικές ενισχυτικές ράβδοι του πλαισίου δοκιμών



Σχ.6.8. Η τελική προτεινόμενη διάταξη της κατακόρυφης Vierendeel του συστήματος INSTED με τον ενισχυμένο στύλο και τη κεντρική συνδετήρια ράβδο τύπου INERD, με κεντρική απομείωση της διατομής

7. Αναλυτική υπολογιστική προσέγγιση.

7.0.1. Προσομοιώματα ανάλυσης.

Παράλληλα με το σχεδιασμό του καινοτόμου συστήματος INSTED στο σύνολο του, αλλά και τον επιμέρους σχεδιασμό της πειραματικής διαδικασίας, την επιμέλεια της κατασκευής της συσκευής και των δοκιμίων, την ανέγερση της εγκατάστασης και τη διεξαγωγή των πειραμάτων, που αποτελούν και την ουσιαστική συμβολή στην επιστήμη, μέσα στα πλαίσια αυτής της διατριβής, έγιναν και αναλυτικές διερευνήσεις με αντίστοιχα προσομοιώματα ανάλυσης, ώστε να μελετηθεί τόσο η συμπεριφορά του συστήματος INSTED, όσο και κύρια η δυνατότητα προσέγγισης της συμπεριφοράς του με απλά προσομοιώματα, που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πρακτική καθημερινή υλοποίηση του συστήματος.

Οι αναλύσεις αυτές έγιναν με χρήση του λογισμικού SOFISTIK, λογισμικό που χρησιμοποιείται κύρια για επαγγελματικές εφαρμογές, με προσομοιώματα διαφόρου βαθμού ακρίβειας.

Έγινε προσπάθεια να γίνουν πρόσθετες αναλύσεις με τα λογισμικά ABACUS και SAP, στα πλαίσια των δυνατοτήτων του εργαστηρίου μεταλλικών κατασκευών του ΕΜΠ.

Ομολογώ στο σημείο αυτό, ότι η βοήθεια από τους χρήστες του ABACUS στο εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών, δεν ήταν ιδιαίτερα αποδοτική και αναλύσεις που ήταν και έγιναν ρουτίνα σε επόμενες φάσεις του ερευνητικού προγράμματος, δεν κατέστη δυνατόν να υλοποιηθούν στα πλαίσια αυτής της αρχικής διερεύνησης.

Οι αναλύσεις έγιναν σε διάφορα επίπεδα.

Αρχικά έγιναν αναλύσεις σε ένα τμήμα συνολικού κτιριακού φορέα, που περιελάμβανε το ανάλογο σύστημα INSTED.

Για να είναι δυνατή η σύγκριση αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων, μορφώθηκε ένα πλαίσιο κανονικού κτιρίου, στο οποίο τα κατακόρυφα φορτία και τα αδρανειακά μεγέθη να αντιστοιχούν στο οριζόντιο φορτίο σχεδιασμού που υλοποιήθηκε στις πειραματικές διατάξεις και ήταν σε κάθε σύστημα INSTED 50 kN οριζόντιο φορτίο.

Ένα τριώροφο κτίριο διαστάσεων 10*10 m, έχει ένα συνολικό κατακόρυφο φορτίο, για το σεισμικό συνδυασμό δράσεων, της τάξης του $\Sigma P_v = 10 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 10 = 3000$ kN, που αντιστοιχεί σε οριζόντια σεισμική τέμνουσα βάσης $\Sigma P_h = 3000 \cdot 0,16 = 480$ kN.

Με αντοχή σχεδιασμού κάθε κατακόρυφης σύνθετης δοκού, 50 kN, θα απαιτούντο τουλάχιστον 9-10 αντίστοιχες κατακόρυφες σύνθετες δοκοί ανά διεύθυνση (για ένα τριώροφο κτίριο 10*10 m). Για να φτάσει κανείς σε διάταξη ολιγότερων συστημάτων, θα έπρεπε να αυξήσει τον αριθμό των δοκών ή την δυσκαμψία τους ή και τα δύο.

Τελικά κάθε κατακόρυφη δοκός Vierendeel, σαν αυτή που δοκιμάστηκε πειραματικά, αντιστοιχεί, για τριώροφο κτίριο, σε μία επιφάνεια 12.5 m^2 , που με τη σειρά του αποτελείται από δύο κανάβους $8*8 \text{ m}$.

Οι ελαστικές αναλύσεις αυτού του ισοδύναμου πλαισίου με αρθρωτές συνδέσεις μεταξύ δοκών και υποστυλωμάτων, υπάρχουν στη συνέχεια (κεφάλαιο 7.1), απ' όπου προκύπτουν για τη μέγιστη δύναμη σχεδιασμού, οι ροπές και τέμνουσες δυνάμεις, που αντιστοιχούν στα πειράματα που διεξήχθησαν.

Οι αναλύσεις που έγιναν, αφορούν σε κατακόρυφες δοκούς Vierendeel οι οποίες είναι είτε αμφιαρθρωτές σε ύψος ενός ορόφου, είτε αμφιαρθρωτές στο συνολικό ύψος του κτιρίου (τριών ορόφων), με συνέχεια ανάμεσα στους ορόφους.

Πρέπει πάντως να τονιστεί ότι το όλο προτεινόμενο σύστημα, δεν είναι παρά ένα επίπεδο πλαίσιο, με ενδιάμεσους ορόφους, που μπορεί εύκολα να προσομοιωθεί σε όλα τα λογισμικά που αντιμετωπίζουν πλαισιακούς φορείς. Χρειάζεται λίγη προσοχή στα ημιαυτόματα λογισμικά όπου η διαφραγματική λειτουργία των πλακών εκτείνεται σε όλο το σχετικό επίπεδο, ενώ αυτή η κινηματική δέσμευση δεν υπάρχει στους ενδιάμεσους κόμβους της κατακόρυφης δοκού Vierendeel, εκτός του επιπέδου των πλακών.

Σε επίπεδο απλών αναλύσεων και διαστασιολόγησης, δεν απαιτείται τίποτε ιδιαίτερο. Αρκεί να μην υπάρχει υπερδιαστασιολόγηση στις συνδετήριες δοκούς της κατακόρυφης Vierendeel, ώστε να εξασφαλίζεται η έναρξη της πλαστικής αστοχίας από εκεί. Ακόμη σε επίπεδο επιλογής του αριθμού των απαιτούμενων στοιχείων δυσκαμψίας, αυτό προκύπτει από τη συνολική σεισμική τέμνουσα του κάθε ορόφου και τις αντίστοιχες αντοχές, για την είσοδο του συστήματος στην πλαστική περιοχή.

Ο επιδιωκόμενος σχεδιασμός είναι αυτός που οι συνδετήριες δοκοί φτάνουν την πλαστική ροπή αντοχής για το σεισμό σχεδιασμού και το ζητούμενο είναι η διατήρηση της δομικής ακεραιότητας, με μεγάλες πρόσθετες πλαστικές παραμορφώσεις και με απορρόφηση ενέργειας, που σε τελική ανάλυση θα επιτρέπει τη χρήση μεγάλων συντελεστών σεισμικής συμπεριφοράς (q), οι οποίοι αντίστοιχα οδηγούν σε μικρότερα σεισμικά φορτία σχεδιασμού.

Αναλύσεις με το λογισμικό SAP και τη μέθοδο της ανελαστικής ωθητικής ανάλυσης (PUSH OVER) για ανάλογους φορείς, έγιναν παράλληλα με την εκπόνηση των πειραμάτων, σε συνεργασία με άλλους συναδέλφους, έχουν αποτελέσει αντικείμενο ξεχωριστών ανακοινώσεων.

Αντίστοιχα έγιναν αναλύσεις με χρονοϊστορία και διάφορα επιταχυνσιογραφήματα στα πλαίσια και αυτής της διατριβής και οι οποίες παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 7.6.

Στη συνέχεια έγιναν αναλύσεις σε προσομοιώματα αντίστοιχα με το υπό δοκιμή σύστημα INSTED, που περιλαμβάνουν μόνο την κατακόρυφη Vierendeel, είτε ολόκληρη, είτε σε μερικές περιπτώσεις, σύνθετων προσομοιωμάτων, μόνο την εκάστοτε συνδετήρια ράβδο.

Οι αναλύσεις αυτές ήταν μη γραμμικές, με διγραμμικά διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων και ελαστικών και μετελαστικών ιδιοτήτων των υλικού και χρήση πάντα του λογισμικού της SOFISTIK GMBH.

Η αδυναμία του συγκεκριμένου λογισμικού για αναλύσεις αυτού του είδους είναι προφανής, αφού ούτε η προοδευτική είσοδος στην πλαστική περιοχή, ούτε η κράτωση και ακόμη περισσότερο η θραύση και η ολιγοκυκλική κόπωση, δεν μπορούν να προσομοιωθούν, επομένως η όλη προσπάθεια έχει ενδεικτική μόνον σημασία και βάζει τις κατευθύνσεις μελλοντικών διερευνήσεων. Έγιναν όμως στα πλαίσια της διερεύνησης χρήσης ενός από τα καλύτερα και πλέον διαδεδομένα στους επαγγελματικούς κύκλους, για ειδικές αναλύσεις λογισμικά, ώστε να συγκριθούν τα πειραματικά αποτελέσματα με σύνθετες αλλά εφαρμόσιμες στη καθημερινή πρακτική από εξειδικευμένους επαγγελματικούς οίκους, αναλύσεις.

Τα διαγράμματα που προκύπτουν, από τις αναλύσεις, έχουν ενδεικτική μόνον σημασία και αποσκοπούν στην εξασφάλιση της επιθυμητής λειτουργίας του συστήματος INSTED, με περιορισμό της αστοχίας της Vierendeel στις προκαθορισμένες θέσεις των συνδετηρίων δοκών και στην αναμενόμενη δύναμη αρχικής αστοχίας.

Όπως έχει και στο πειραματικό τμήμα σχολιαστεί, η προσομοίωση ενός ή περισσοτέρων δοκών διαφέρει μόνον ως προς το μέγεθος της αντίστασης που προσφέρει το προτεινόμενο σύστημα, σε οριζόντιες επιβεβλημένες μετακινήσεις.

Τυχόν διαφοροποιήσεις μεταξύ των αναλύσεων για μία η πέντε ενδιάμεσες δοκούς προκύπτει μόνον από την ελαστικότητα των κατακόρυφων υποστυλωμάτων, που οδηγεί σε ελαστικό επίπεδο σε μικρή διαφοροποίηση των αντιστάσεων κεφαλής των ενδιάμεσων δοκών, λόγω ελαστικής καμπτικής παραμόρφωσης του στύλου.

Με δεδομένη την επιθυμία ό στύλος να είναι κατά το δυνατόν δύσκαμπτος, η ανάλυση και στις δύο περιπτώσεις είναι παραπλήσια, με αναλογικά πολλαπλάσιο μέγεθος δρώσας οριζόντιας αντίστασης.

Η ανάλυση και αντίστοιχα η πειραματική διερεύνηση με περισσότερες της μιας δοκούς αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον μόνον όταν οι δοκοί διαφέρουν με τρόπο ώστε να υπάρχει προοδευτική αστοχία από δοκό σε δοκό.

Αυτό προϋποθέτει τη διαφορετική σχέση μεταξύ δυσκαμψίας και αντοχής των δοκών, έτσι ώστε η ροπή που κατανέμεται ανάλογα με τη δυσκαμψία και να οδηγεί σε προοδευτική πλαστικοποίηση των κρίσιμων διατομών των δοκών.

Με αυτή τη λογική σχεδιασμού αναλύθηκε η περίπτωση με μεταβαλλόμενη δοκό IPE, ύψους διατομής από 80 έως 160 mm, σε αναλυτική και πειραματική διερεύνηση. Δεδομένου ότι στα μεταβαλλόμενα IPE από 80 σε 160, η ροπή αδρανείας της διατομής αυξάνεται έως 10.8 φορές, με αντίστοιχη αύξηση της σχετικής αναλαμβανόμενης ροπής, ενώ αντίστοιχα η πλαστική ροπή αντίστασης αυξάνεται έως

5.33 φορές, αναμένεται η σταδιακή πλαστικοποίηση από τη μεγαλύτερη προς τη μικρότερη διατομή.

Δυστυχώς σε πειραματικό επίπεδο, το πείραμα με τη διάταξη αυτή δεν είχε μεγάλη επιτυχία, λόγω της σχετικά μεγάλης δυσκαμψίας και αντοχής του συστήματος των δοκών, σε σχέση με τη δυσκαμψία του συνολικού πλαισίου και των υποστυλωμάτων.

Οι ενεργές παραμορφώσεις ήταν πολύ μικρότερες των επιβαλλομένων και η διάταξη δεν έφτασε κοντά στο επίπεδο αστοχίας για τις μεγάλες δοκούς.

Αντίθετα στις περιπτώσεις που δοκιμάστηκαν διατομές είτε διπλού «T», (HEA 100) με αποτμήσεις στα άκρα των πελμάτων (dog bones), είτε τετραγωνικές δοκοί (SHS80/5) με οπές διαφορετικής διαμέτρου, η μείωση της ροπής αδρανείας των απομειωμένων διατομών ήταν ακριβώς ανάλογη, με τη μείωση των ροπών αντίστασης, με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη είσοδο όλων των δοκών στην πλαστική περιοχή, χωρίς προοδευτική αστοχία.

Στο τελευταίο όμως πείραμα, με τη χρήση δοκιμίων τύπου INERD, με συνδεδημένες ράβδους κυκλικής διατομής, στις οποίες είχαν χαραχθεί δακτύλιοι απομείωσης της διατομής, σε διαφορετικό κατά περίπτωση βάθος, η προοδευτική αστοχία ήταν άμεση και χαρακτηριστική.

Για όλες τις πειραματικές διατάξεις, έγιναν οι αντίστοιχες αριθμητικές αναλύσεις, με τα προβλήματα που αναλύθηκαν προηγούμενα.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στα γραφήματα που ακολουθούν.

7.0.2. Γραμμικοί φορείς (φορείς με ραβδόμορφα στοιχεία).

Αρχικά οι αναλύσεις έγιναν για επίπεδους ραβδωτούς φορείς, όπου προσομοιώνονται με ακρίβεια, οι στύλοι, οι δοκοί υποδοχείς και οι ενισχύσεις κεφαλής, όπου αυτές υπάρχουν η αντίστοιχα οι απομειώσεις της διατομής με τη μορφή dog bones η οπών.

Οι αναλύσεις με απλούς γραμμικούς φορείς στο συγκεκριμένο λογισμικό, ακολουθούν για το υλικό, ένα διγραμμικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων, βασισμένο στη λογική της εντοπισμένης πλαστικοποίησης της δοκού, όταν αυτή φτάσει την ονομαστική πλαστική της αντοχή.

Η παραδοχή αυτή δεν απέχει πολύ της πραγματικότητας σε διατομές διπλού T, όπου η συμμετοχή του κορμού είναι μικρή (της τάξης του 12%) και η απόσταση από τη διαρροή της ακραίας ίνας μέχρι τη διαρροή ολόκληρου του πέλματος και στη συνέχεια ολόκληρης της διατομής είναι μικρή.

Άλλου τύπου διατομές, όπως οι κοιλοδοκοί και περισσότερο οι ολόσωμες διατομές ορθογωνικές και ιδιαίτερα οι κυκλικές παρουσιάζουν μία σαφή προοδευτική είσοδο

στην πλαστική περιοχή, που διαφέρει σημαντικά από τη διγραμμική συμπεριφορά της δοκού, στο σύνολο της.

Για το λόγο αυτό, έγιναν αναλυτικές προσεγγίσεις με διάφορες προσομοιώσεις των δοκών με πεπερασμένα στοιχεία.

7.0.3 Φορείς με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία.

Μετά τις αρχικές αναλύσεις με προσομοιώματα ραβδωτών φορέων, για όλες τις διατάξεις που υλοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία, έγιναν πρόσθετες αναλύσεις με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων, σε μία προσπάθεια να προσεγγιστεί πληρέστερα η προοδευτική είσοδος της διατομής στην πλαστική περιοχή.

Στα πλαίσια αυτά, αρχικά αναλύθηκε η διάταξη με συνδετήριες δοκούς μέσου πλάτους IPE 100. Η μισή, λόγω συμμετρίας δοκός IPE 100 (πέλματα και κορμός), προσομοιώθηκε με επιφανειακά ορθογωνικά πεπερασμένα στοιχεία,. Με αυτό τον τρόπο, προσεγγίστηκε καλύτερα η προοδευτική αστοχία της διατομής, με τη σταδιακή είσοδο των ινών στην πλαστική περιοχή, ανάλογα με την απόσταση τους από το κέντρο βάρους.

Αντίστοιχη προσομοίωση έγινε για την περίπτωση της ορθογωνικής ράβδου τύπου INERD, με διατομή 12.5/30 mm, και διπλή σημειακή στήριξη σε κάθε πλευρά σε δοκούς υποδοχείς. Και εδώ η σταδιακή είσοδος της ράβδου στην πλαστική περιοχή επιτυγχάνεται με τη διαφοροποίηση της εντατικής κατάστασης των στοιχείων, ανάλογα με την απόσταση τους από τον πλαστικό άξονα της διατομής.

Φορείς με επάλληλα ραβδόμορφα στοιχεία

Στην προσπάθεια προσέγγισης της σταδιακής εισόδου στην πλαστική περιοχή με γραμμικά στοιχεία, για τις συμπαγείς ράβδους, ορθογωνικές και κυκλικές, χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός προσομοίωσης μιας κεντρικής ράβδου, με καμπτική και διατμητική λειτουργία και επάλληλων ορθογωνικών ραβδωτών στοιχείων, που προσομοίαζαν την αξονική λειτουργία των θλιβομένων και εφελκυσόμενων ινών, σε προοδευτική απόσταση από το κέντρο βάρους. Η ανάλυση αυτή έχει ιδιαίτερες προοπτικές και αξίζει κάποιας μελλοντικής συμπληρωματικής διερεύνησης.

7.0.4 Ωθητική ανάλυση (Push over).

Αναλύσεις του συστήματος INSTED με τη μέθοδο της ανελαστικής ωθητικής ανάλυσης έγιναν στο εργαστήριο των Μεταλλικών Κατασκευών από άλλους συναδέλφους, παρουσιάστηκαν σε διεθνή συνέδρια, σε κοινές με τον υπογράφοινα ανακοινώσεις και περιλαμβάνονται στον πίνακα σχετικών δημοσιεύσεων.

Όλες όμως οι αναλύσεις που παρουσιάζονται για το σύστημα σε αυτό το κεφάλαιο, με τη μονοτονική αύξηση του φορτίου, στην ουσία αποτελούν αναλύσεις με τη μέθοδο της ανελαστικής ωθητικής ανάλυσης, εφ' όσον ο όλος σχεδιασμός του συστήματος στοχεύει στον περιορισμό της δημιουργίας των πλαστικών ζωνών μόνον στις συνδετήριες δοκούς της κατακόρυφης Vierendeel, αφήνοντας τις υπόλοιπες διατομές να λειτουργούν ελαστικά χωρίς να αστοχούν.

7.0.5 Ανακυκλιζόμενη αυξανόμενη φόρτιση (ECCS) Ανακυκλιζόμενη φόρτιση σταθερών κύκλων.

Οι φορτίσεις στις αναλυτικές διερευνήσεις ήταν, η μονότονα αυξανόμενη φόρτιση, μέχρι την είσοδο στην πλαστική περιοχή και τη δημιουργία μηχανισμού και η ανακυκλιζόμενη κατά ECCS φόρτιση, όπου η φόρτιση αυξάνεται σταδιακά σε τριάδες όμοιων κυκλικών φορτίσεων, μέχρι την τελική αστοχία.

Τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις για τις δύο περιπτώσεις φορτίσεων, περιλαμβάνονται στα γραφικά αποτελέσματα που ακολουθούν.

7.0.6 Δυναμικές αναλύσεις, χρονοϊστορία (επιταχυνσιογραφήματα).

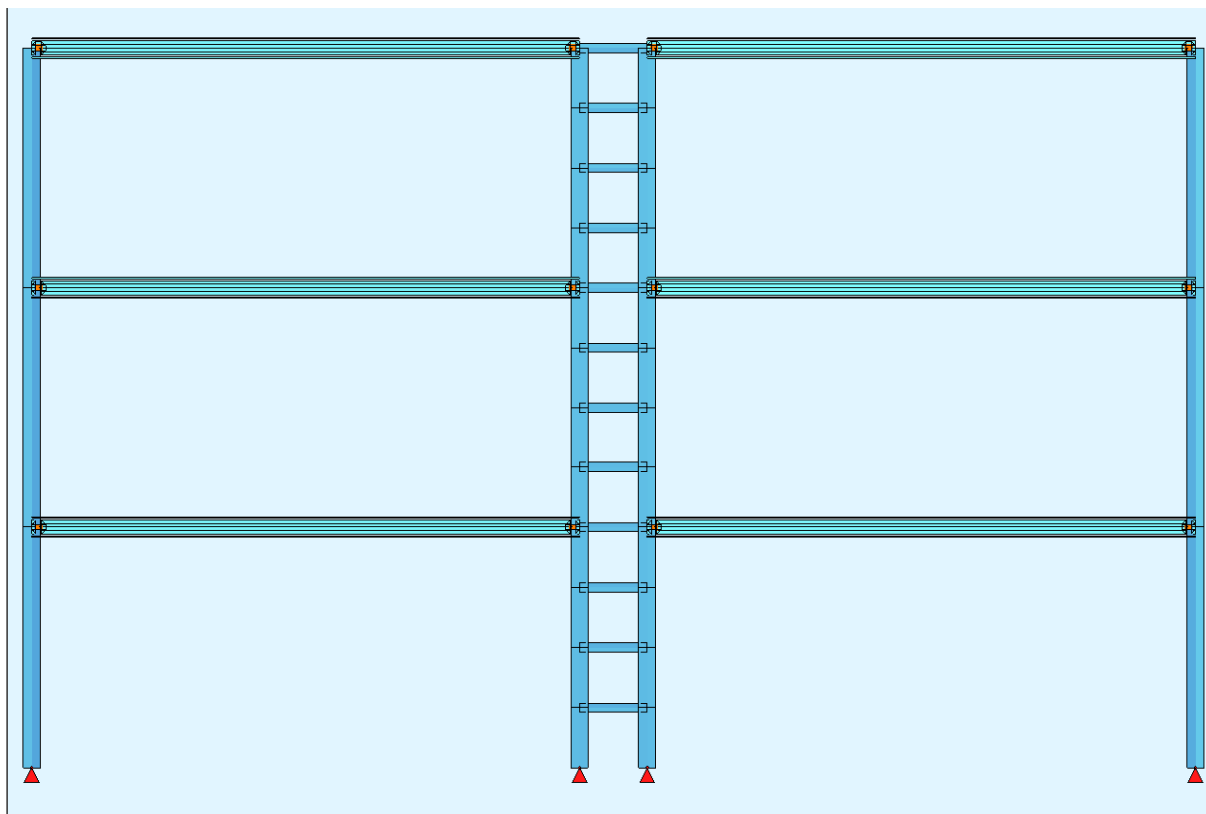
Στα πλαίσια αυτής της διατριβής έγινε ενδεικτικά μία μη γραμμική ανάλυση με χρονοϊστορία, με χρήση του επιταχυνσιογραφήματος του σεισμού της Καλαμάτας, για διάταξη τύπου INSTED με πέντε οριζόντιες συνδετήριες δοκούς IPE 100.

Η ανάλυση αυτή έγινε σε επίπεδο μίας δοκού Vierendeel, με αδρανειακή μάζα αυτή που αντιστοιχούσε στην αντοχή σχεδιασμού για ισοδύναμη στατική φόρτιση, όπως αυτή αναλύεται στο σχετικό κεφάλαιο.

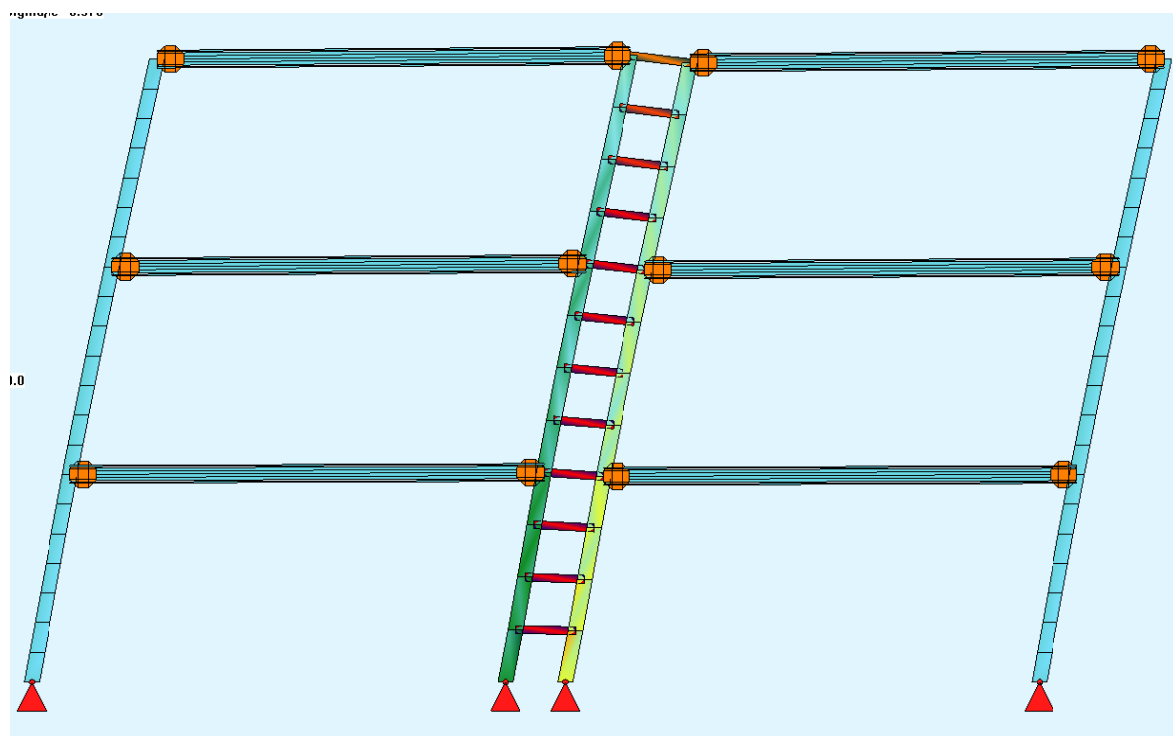
Στην πορεία της ανάλυσης έγιναν διαδοχικές αυξήσεις των τιμών του επιταχυνσιογραφήματος, μέχρι οι μέγιστες τιμές των μετακινήσεων να φτάσουν τις αντίστοιχες τιμές αστοχίας σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, που αντιστοιχούν στην πειραματική αντοχή σχεδιασμού του συστήματος.

Τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά, με την έννοια ότι για να προκληθεί αστοχία στο φορέα, δηλαδή οι μετακινήσεις κεφαλής να φτάσουν στιγμιαία στη θεωρητική τιμή 4% για το inter story drift, η 135 mm, χρησιμοποιήθηκε το επιταχυνσιογράφημα του σεισμού της Καλαμάτας, προσαυξημένο κατά 5.49 φορές.

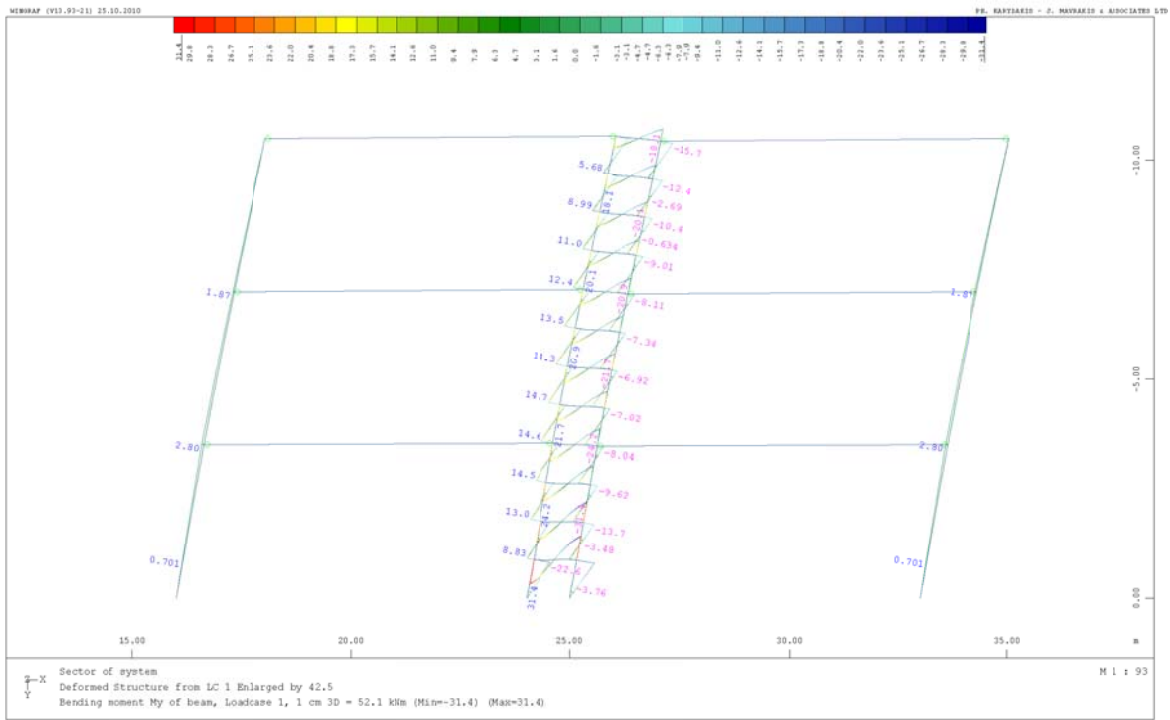
7.1. **Ισοδύναμο πλαίσιο, διάταξη συστήματος INSTED, συνολικός φορέας επίπεδου προσομοιωμένος πλαισίου με ραβδόμορφα στοιχεία.**



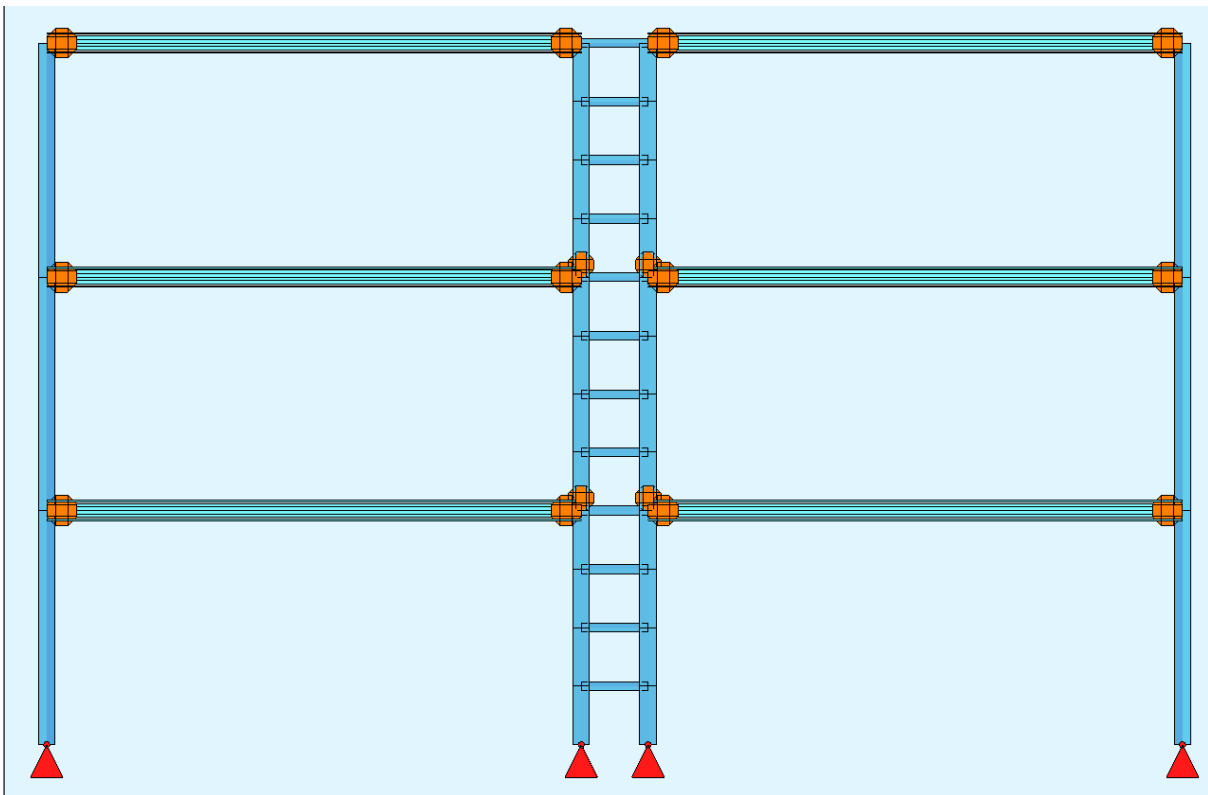
Σχήμα 7.1.1. Ισοδύναμο πλαίσιο, συνεχόμενη καθ ύψος διάταξη συστήματος INSTED



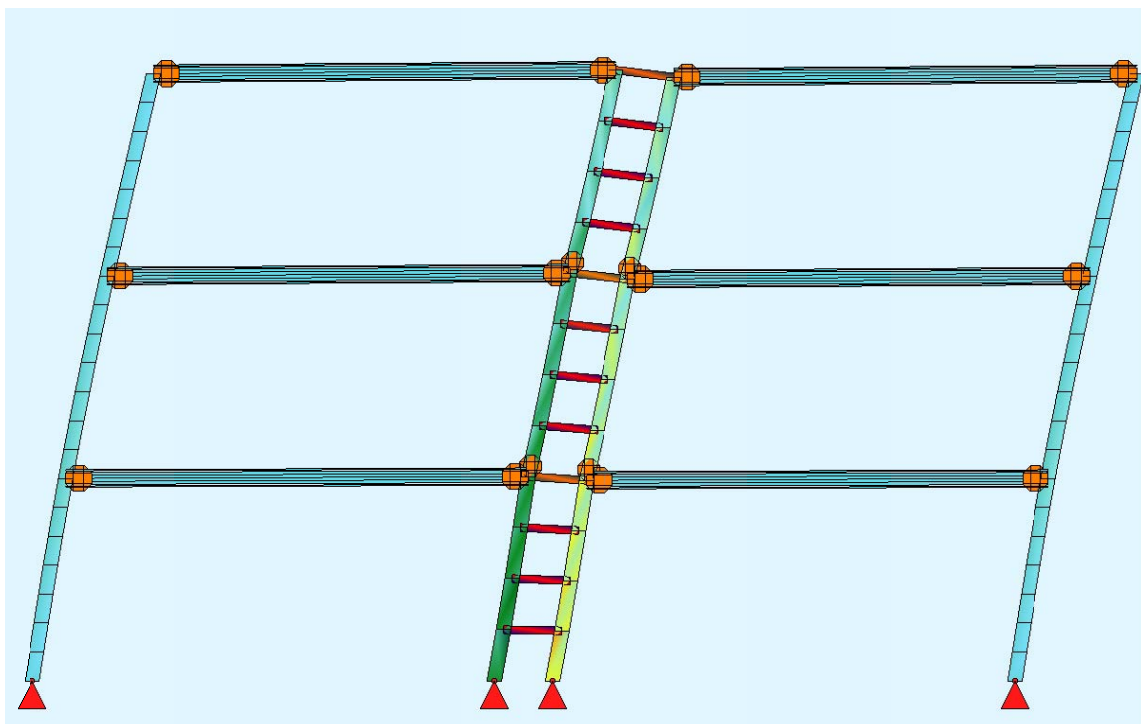
Σχήμα 7.1.2. Ισοδύναμο πλαίσιο, συνεχόμενη καθ ύψος διάταξη συστήματος INSTED παραμορφωμένος φορέας



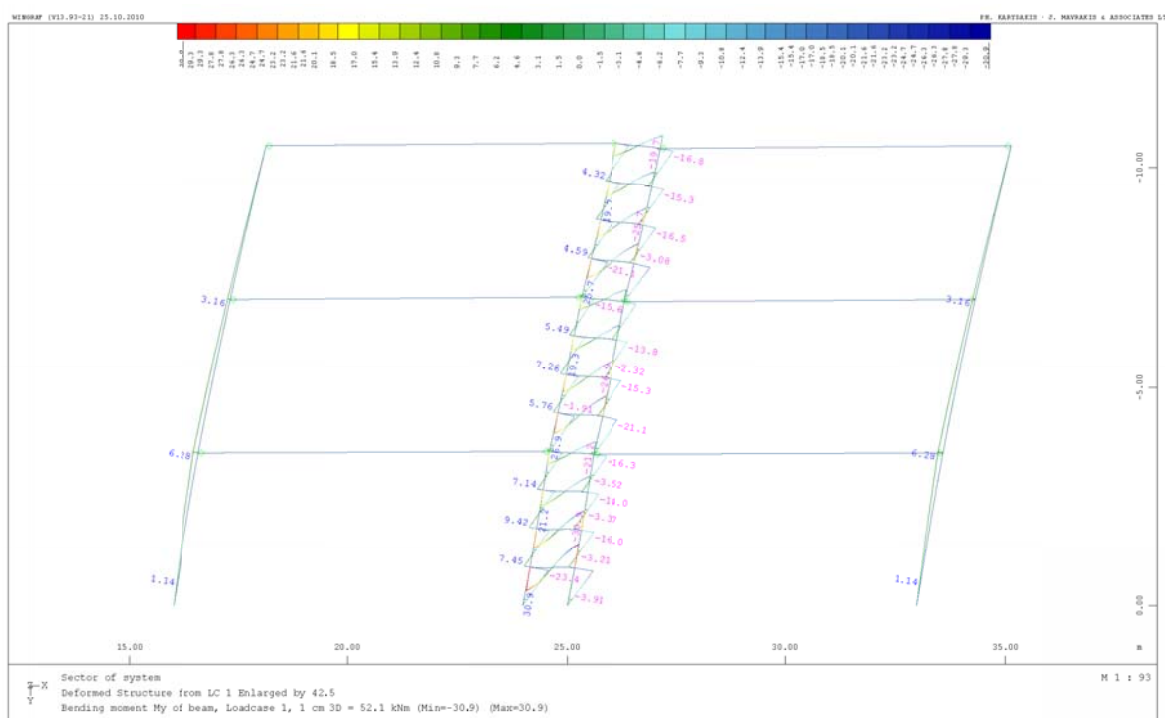
Σχήμα 7.1.3. Ισοδύναμο πλαίσιο, συνεχόμενη καθ ύψος διάταξη συστήματος INSTED διάγραμμα καμπτικών ροπών



Σχήμα 7.1.4. Ισοδύναμο πλαίσιο, αρθρωτή καθ ύψος διάταξη συστήματος INSTED

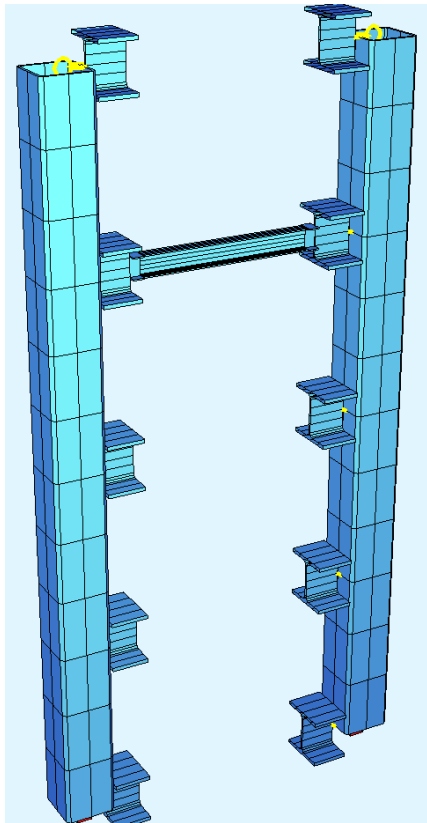


Σχήμα 7.1.5. Ισοδύναμο πλαίσιο, αρθρωτή καθ ύψος διάταξη συστήματος INSTED παραμορφωμένος φορέας

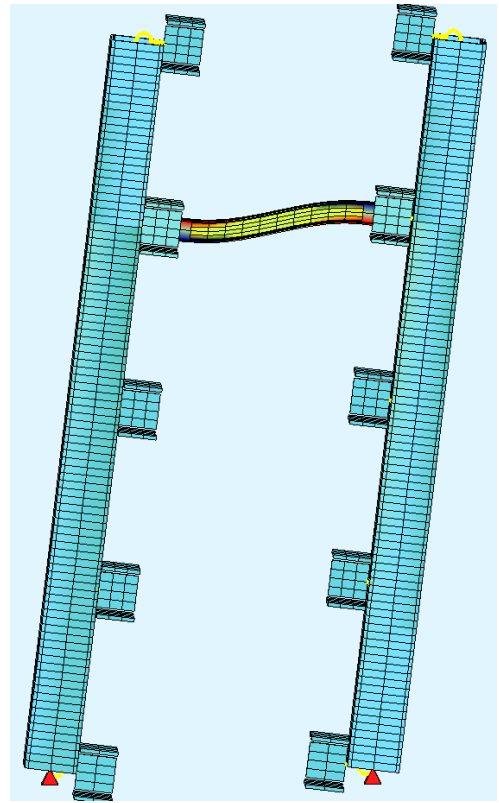


Σχήμα 7.1.6. Ισοδύναμο πλαίσιο, αρθρωτή καθ ύψος διάταξη συστήματος INSTED διάγραμμα καμπτικών ροπών

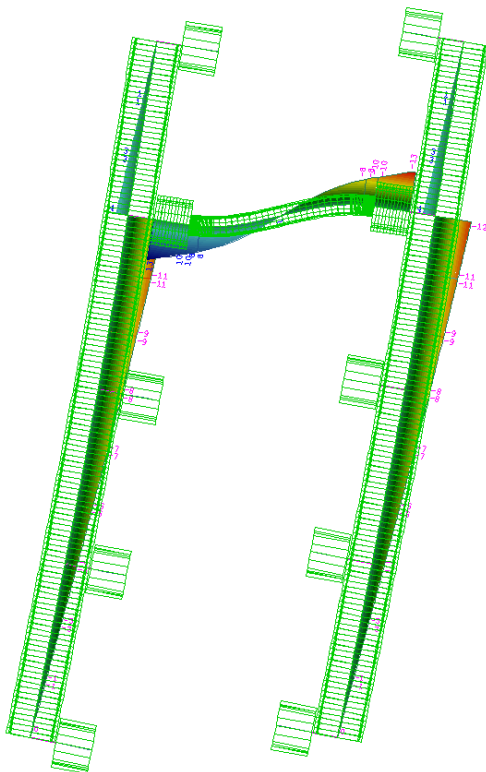
7.2.1. 1 IPE 100 (Πείραμα #1) – Φορείς προσομοιωμένοι με ραβδόμορφα στοιχεία



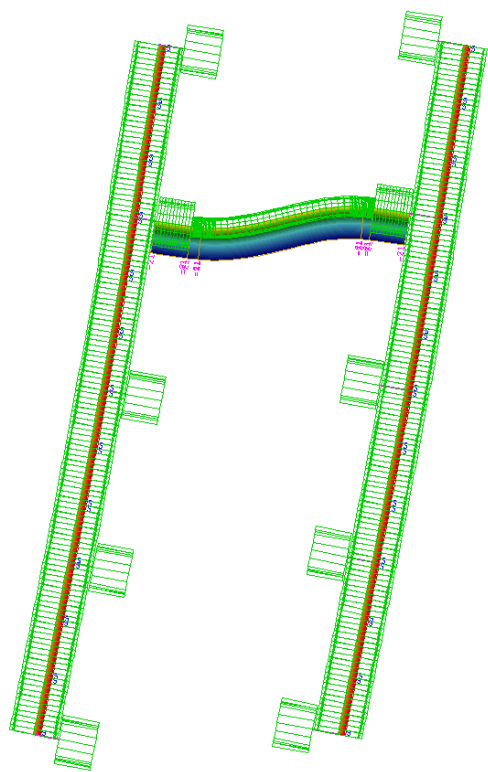
Σχήμα 7.2.1.1. προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



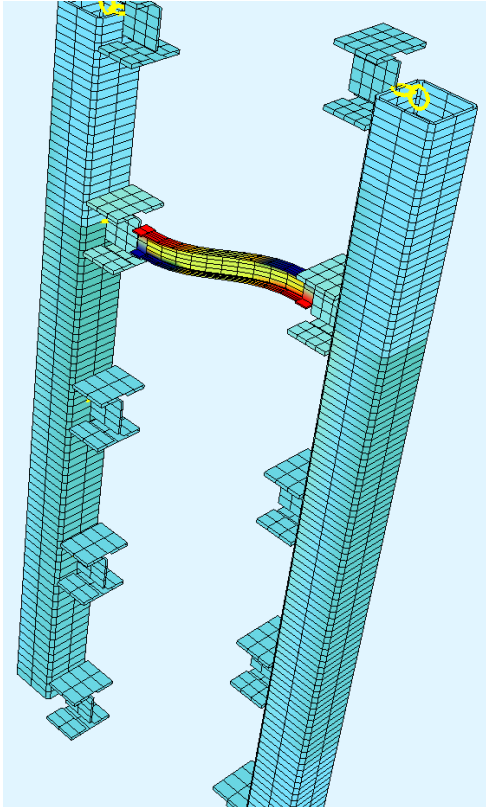
Σχήμα 7.2.1.2. όψη διάταξης στοιχείων φορέα



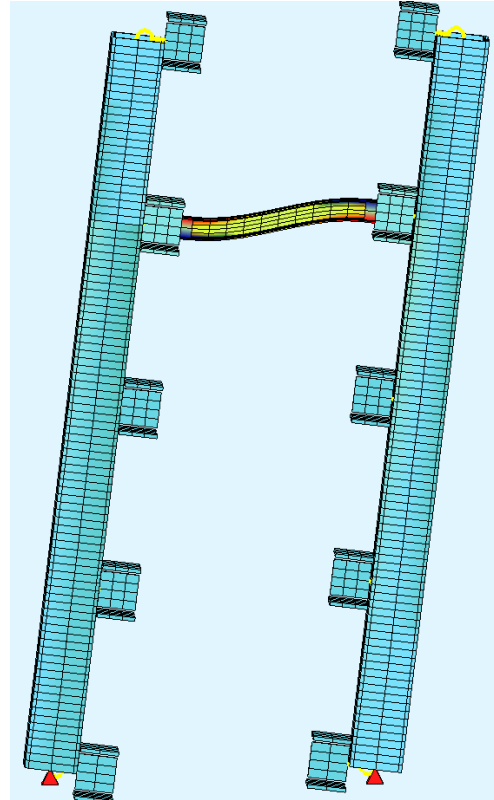
Σχήμα 7.2.1.3. διάγραμμα καμπτικών ροπών



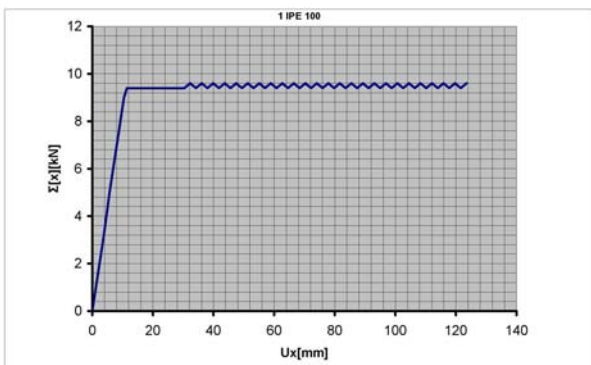
Σχήμα 7.2.1.4. διάγραμμα τεμνουσών



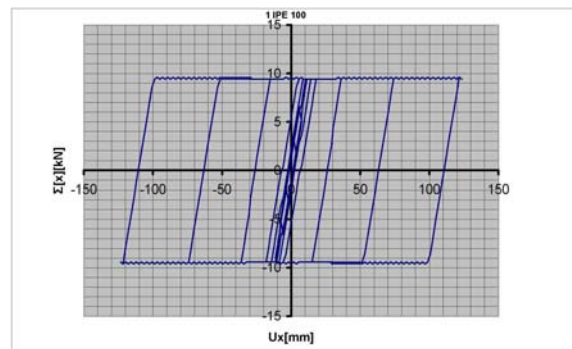
Σχήμα 7.2.1.5. προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



Σχήμα 7.2.1.6. όψη παραμορφωμένου φορέα

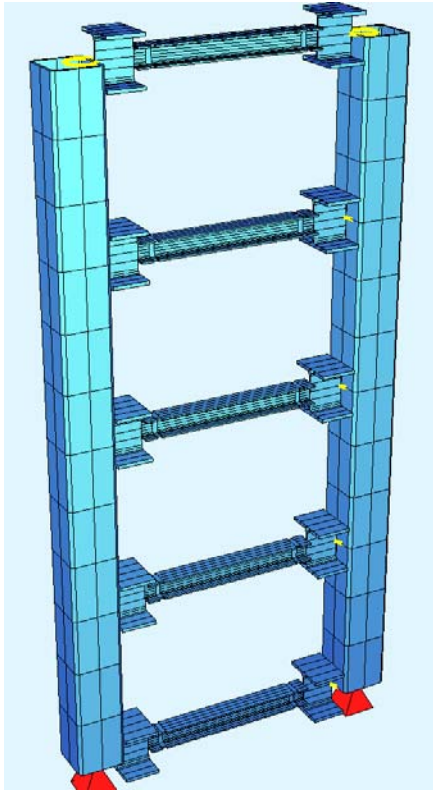


Σχήμα 7.2.1.7. διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης

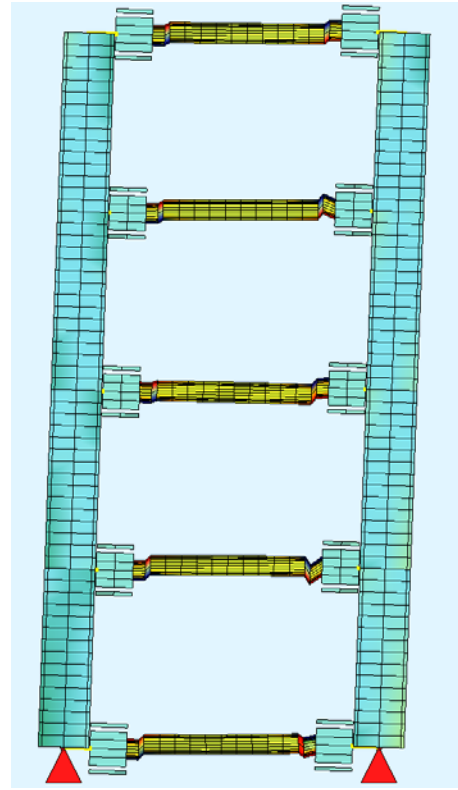


Σχήμα 7.2.1.8. διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης

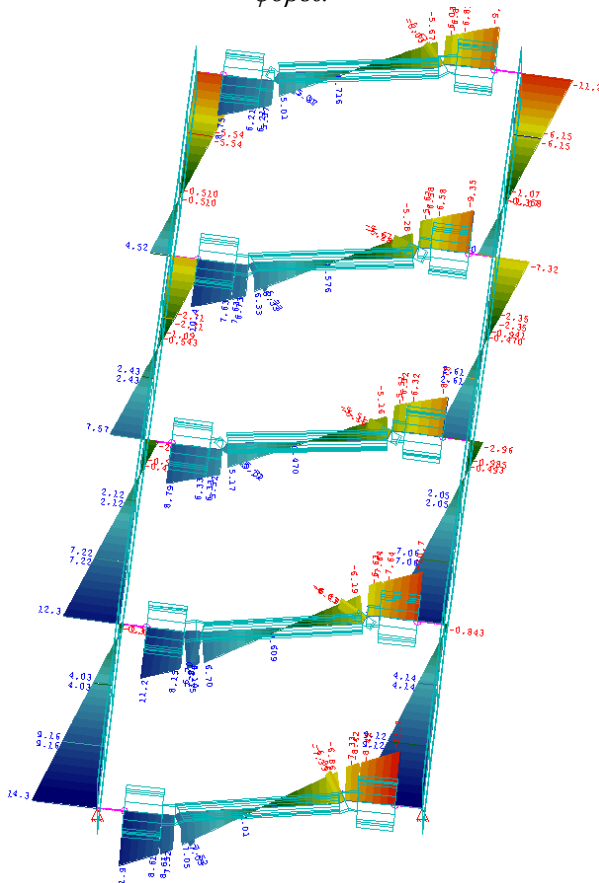
7.2.10 5 HE-A 100 (slots) (Πείραμα #10) – Φορείς προσομοιωμένοι με ραβδόμορφα στοιχεία



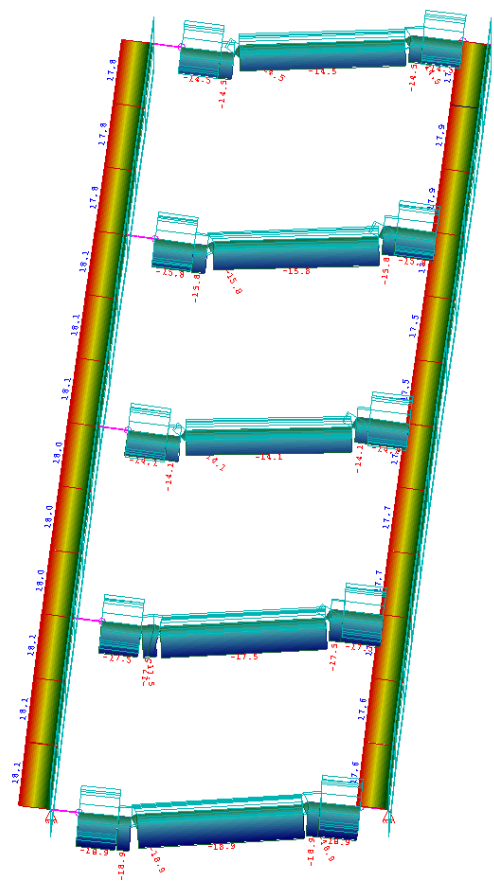
Σχήμα 7.2.10.1. προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



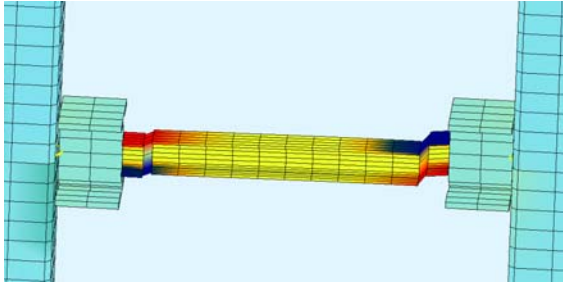
Σχήμα 7.2.10.2. όψη διάταξης στοιχείων φορέα



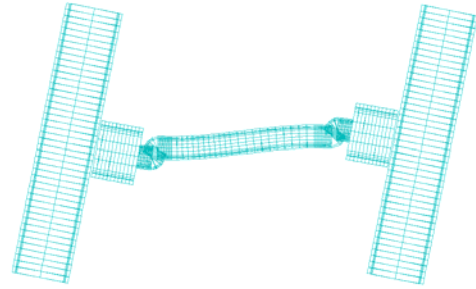
Σχήμα 7.2.10.3. διάγραμμα καμπτικών ροπών



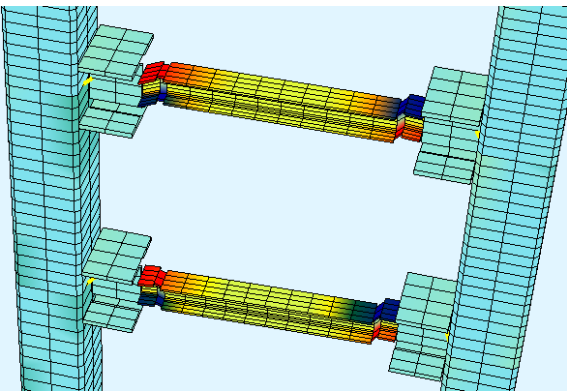
Σχήμα 7.2.10.4. διάγραμμα τεμνουσών



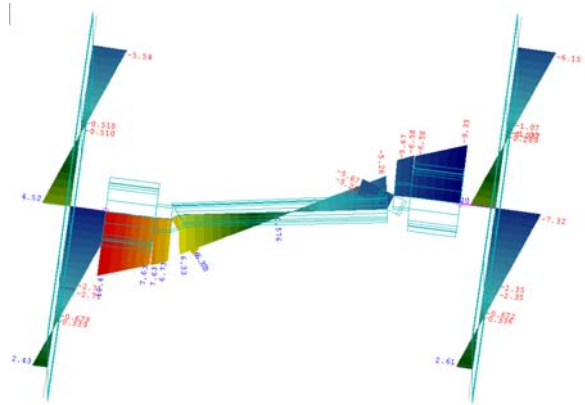
Σχήμα 7.2.10.5. προοπτικό φορέα



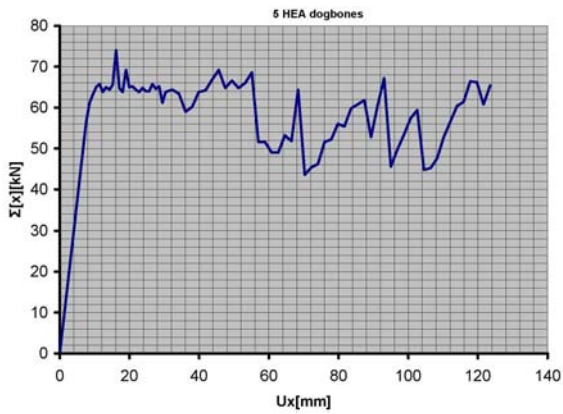
Σχήμα 7.2.10.6. όψη παραμορφωμένου φορέα



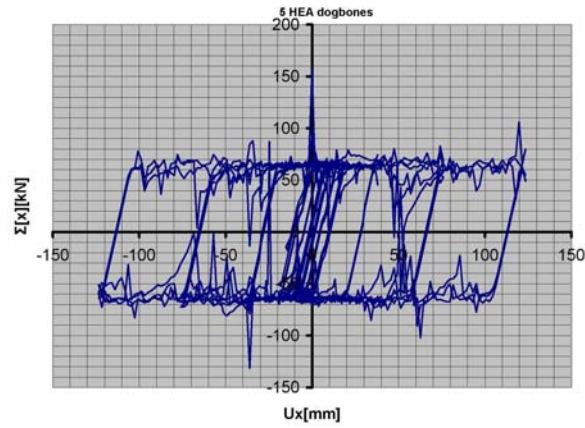
Σχήμα 7.2.10.7. προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



Σχήμα 7.2.10.8. διάγραμμα καμπτικών ροπών τυπικής συνδετήριας δοκού

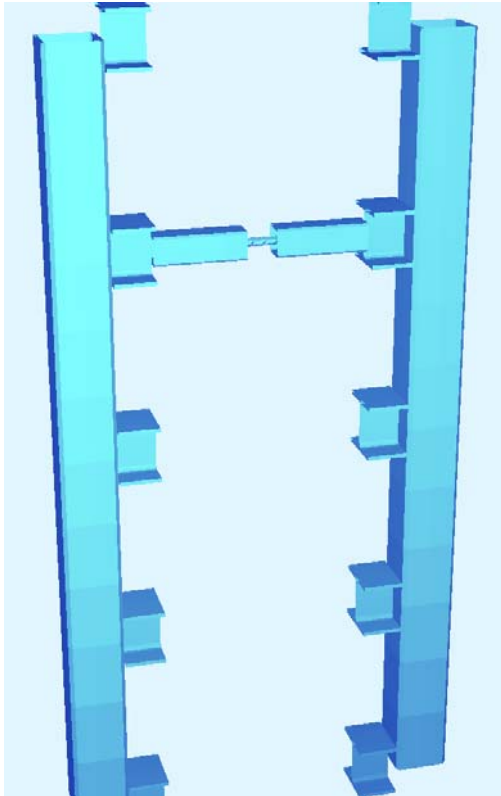


Σχήμα 7.2.10.9. διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης

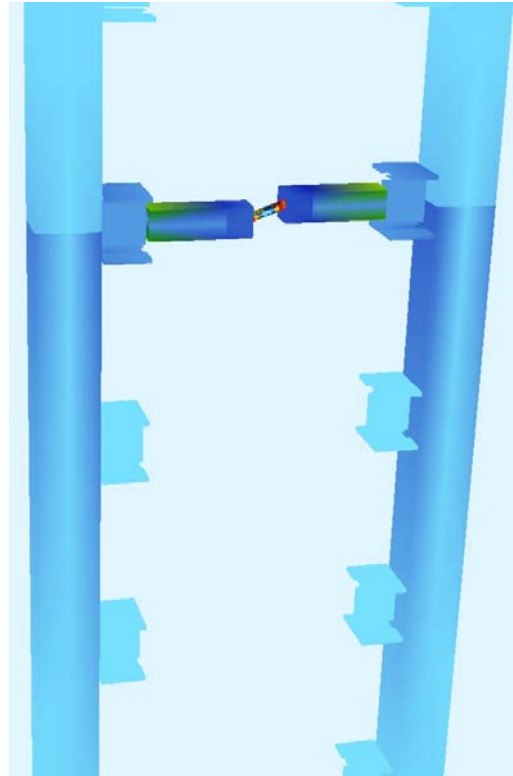


Σχήμα 7.2.10.10. διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης

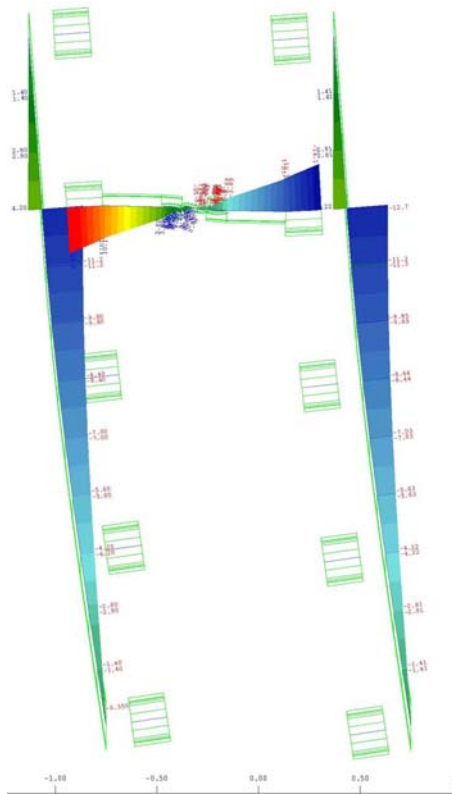
7.2.11 1 rod $\Phi 33$ (Πείραμα #11-12) – Φορείς προσομοιωμένοι με ραβδόμορφα στοιχεία



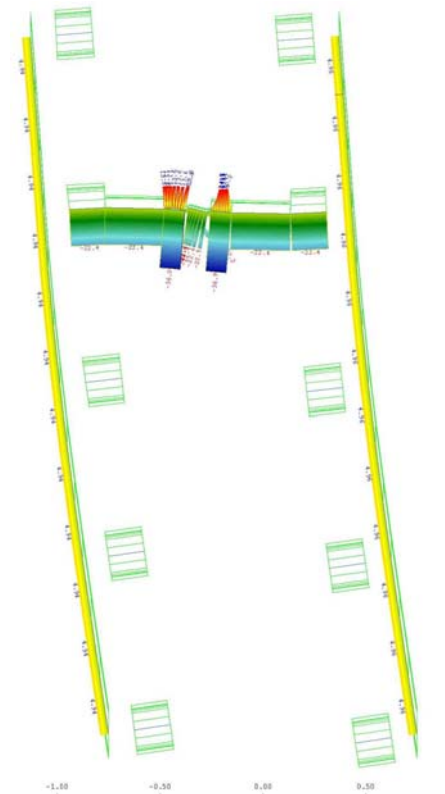
Σχήμα 7.2.11.1. προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



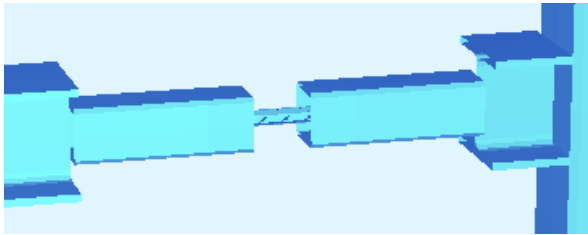
Σχήμα 7.2.11.2. όψη διάταξης στοιχείων φορέα



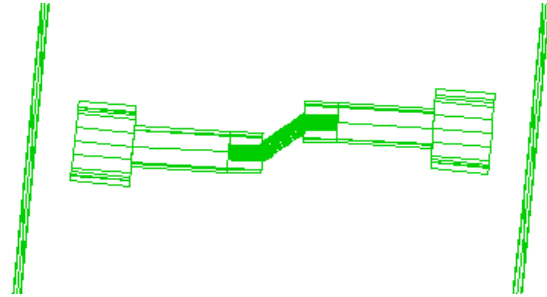
Σχήμα 7.2.11.3. διάγραμμα καμπτικών ροπών



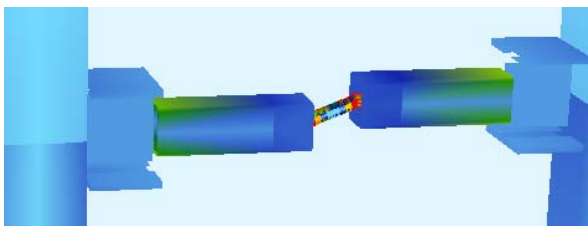
Σχήμα 7.2.11.4. διάγραμμα τενουσών



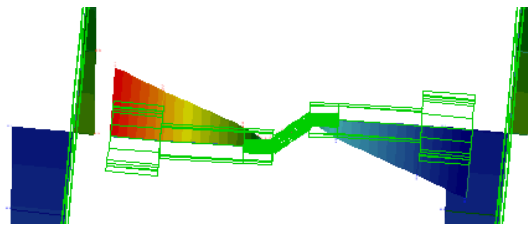
Σχήμα 7.2.11.5. προοπτικό φορέα



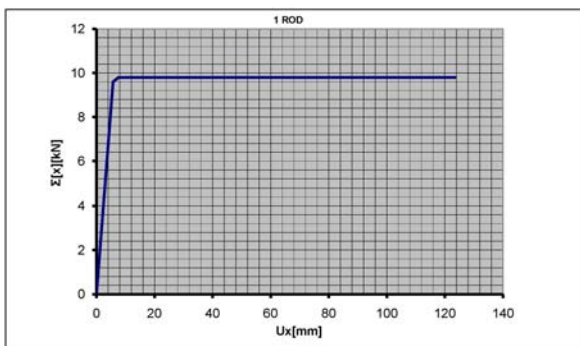
Σχήμα 7.2.11.6. όψη παραμορφωμένου φορέα



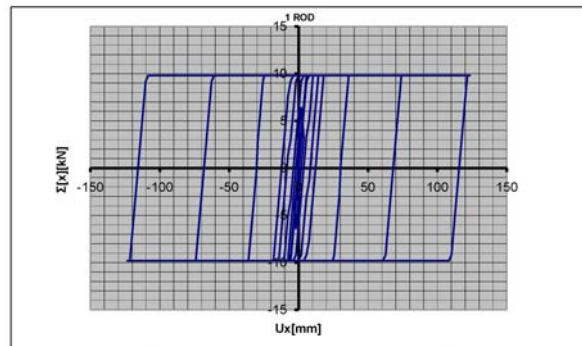
Σχήμα 7.2.11.7. προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



Σχήμα 7.2.11.8. διάγραμμα καμπτικών ροπών τυπικής συνδετήριας δοκού

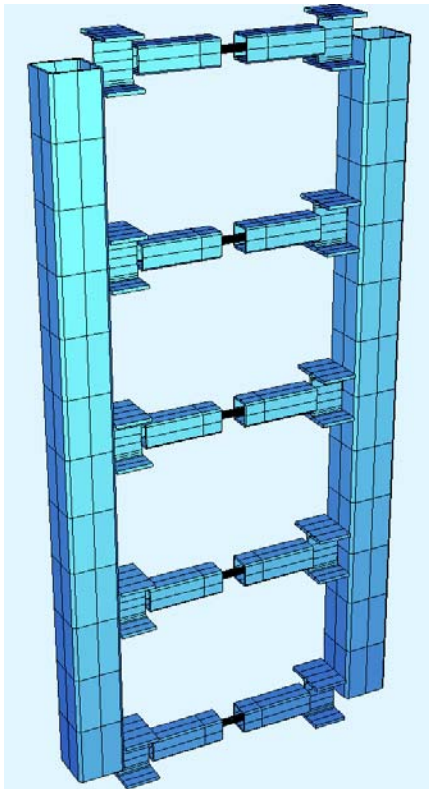


Σχήμα 7.2.11.9. διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης

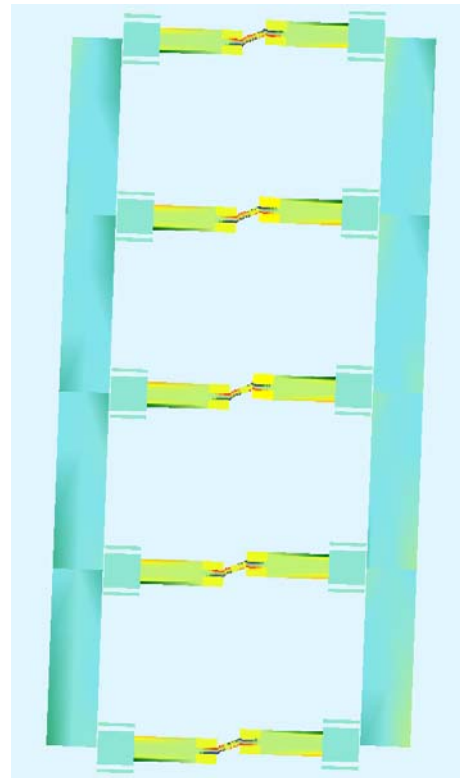


Σχήμα 7.2.11.10. διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης

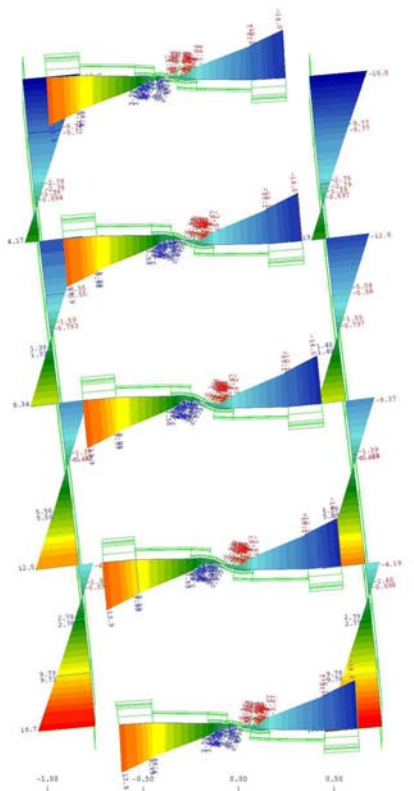
7.2.12 5 rod $\Phi 33$ (Πείραμα #14) – Φορείς προσομοιωμένοι με ραβδόμορφα στοιχεία



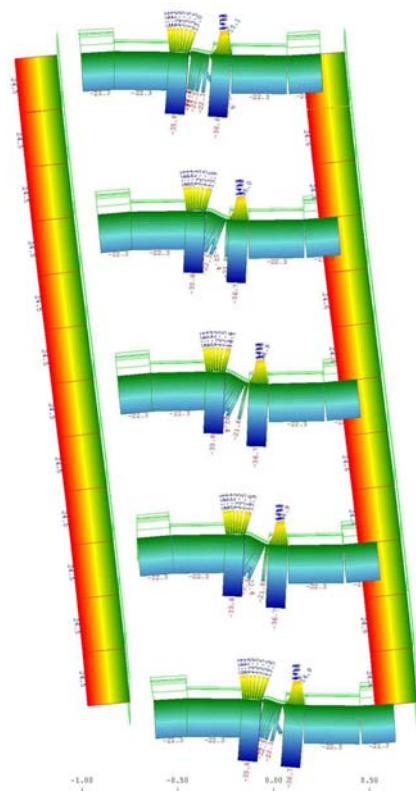
Σχήμα 7.2.12.1. προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



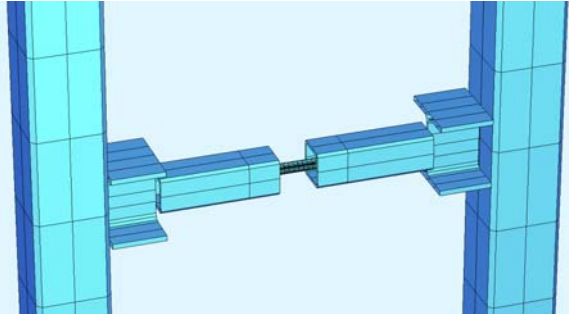
Σχήμα 7.2.12.2. όψη διάταξης στοιχείων φορέα



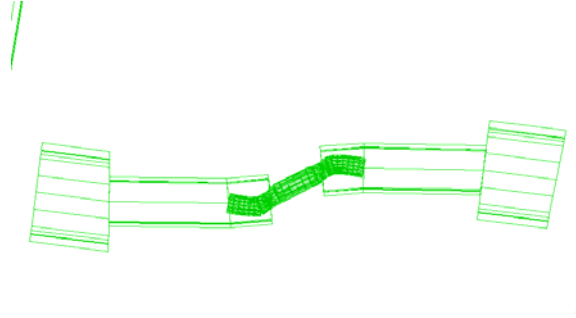
Σχήμα 7.2.12.3. διάγραμμα καμπτικών ροπών



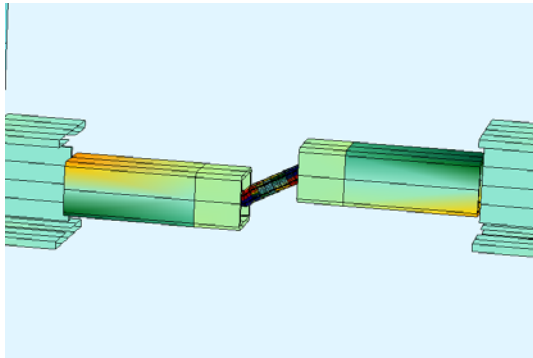
Σχήμα 7.2.12.4. διάγραμμα τεμνουσών



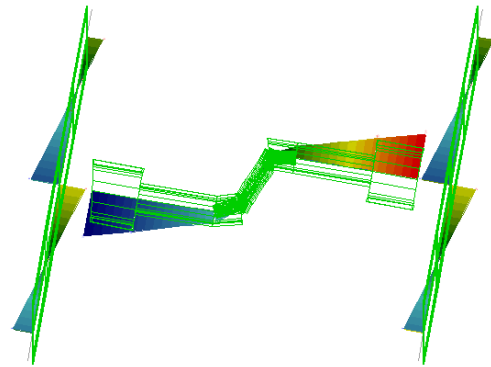
Σχήμα 7.2.12.5. προοπτικό φορέα



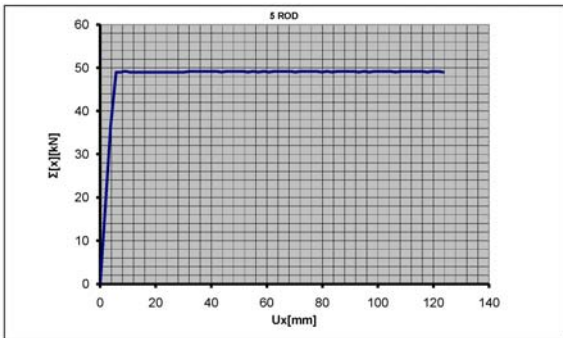
Σχήμα 7.2.12.6. όψη παραμορφωμένου φορέα



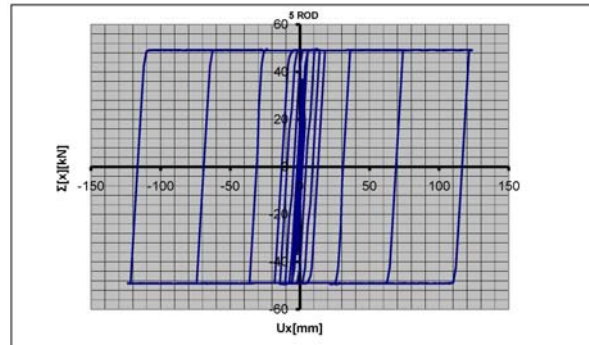
Σχήμα 7.2.12.7. προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



Σχήμα 7.2.12.8. διάγραμμα καμπτικών ροπών τυπικής συνδετήριας δοκού

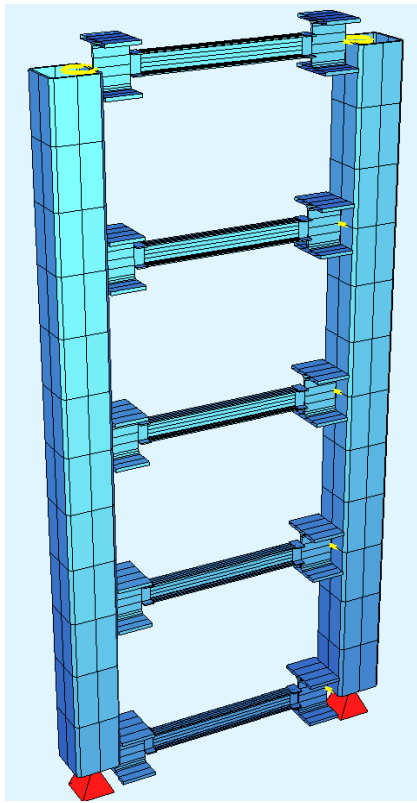


Σχήμα 7.2.12.9. διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης

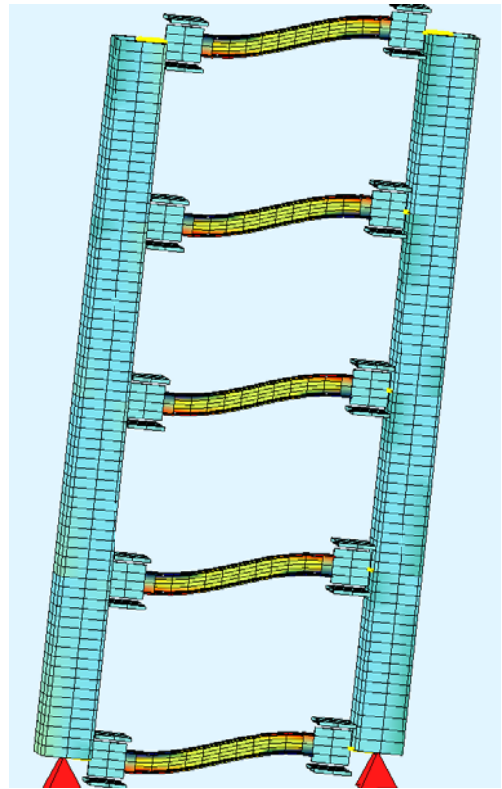


Σχήμα 7.2.12.10. διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης

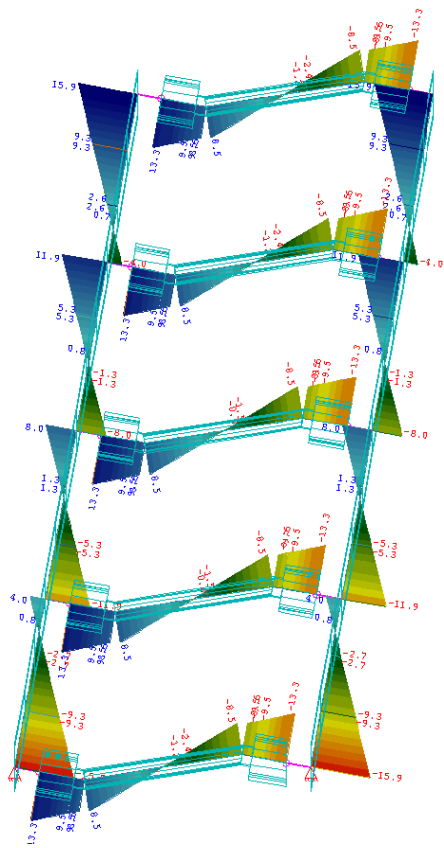
7.2.2 5 IPE 100 (Πείραμα #2) – Φορείς προσομοιωμένοι με ραβδόμορφα στοιχεία



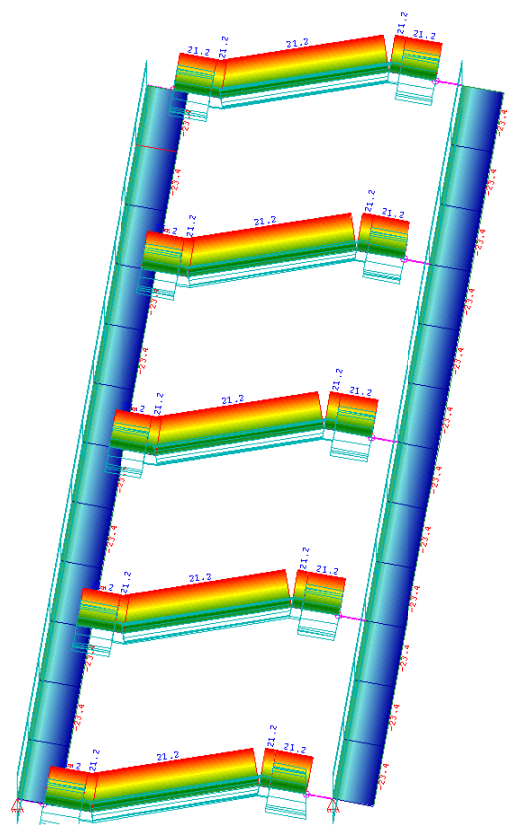
Σχήμα 7.2.2.1. προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



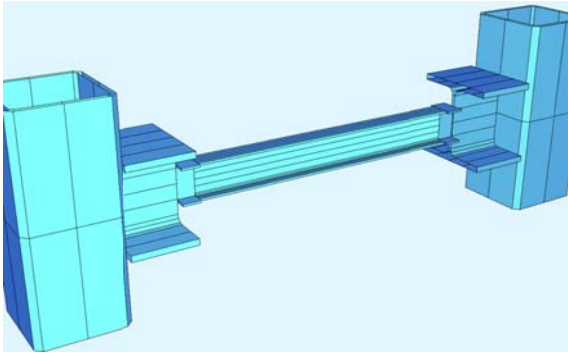
Σχήμα 7.2.2.2. όψη διάταξης στοιχείων φορέα



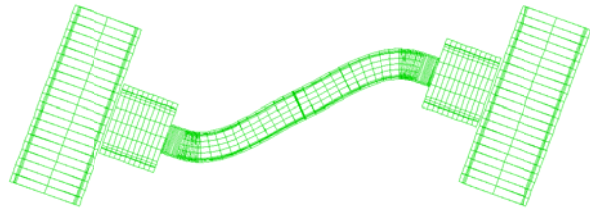
Σχήμα 7.2.2.3. διάγραμμα καμπτικών ροπών



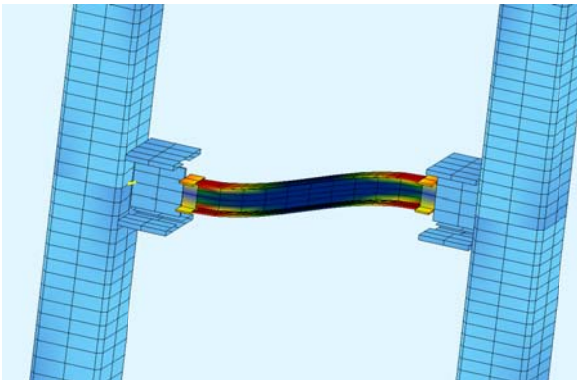
Σχήμα 7.2.2.4. διάγραμμα τεμνουσών



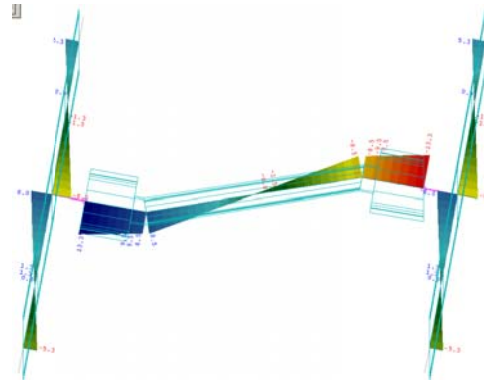
Σχήμα 7.2.2.5. προοπτικό φορέα



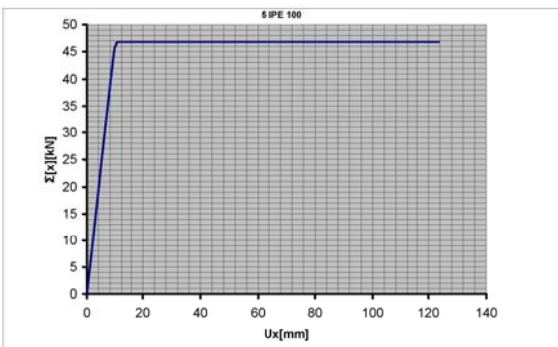
Σχήμα 7.2.2.6. όψη παραμορφωμένου φορέα



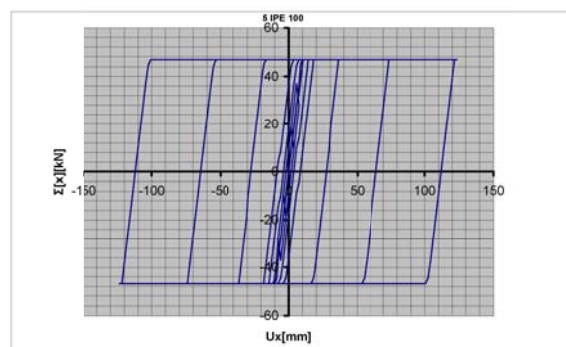
Σχήμα 7.2.2.7. προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



Σχήμα 7.2.2.8. διάγραμμα καμπτικών ροπών τυπικής συνδετήριας δοκού

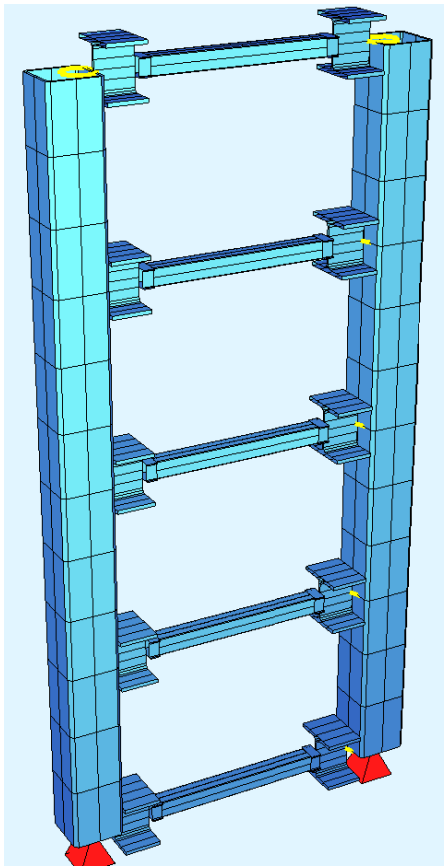


Σχήμα 7.2.2.9. διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης

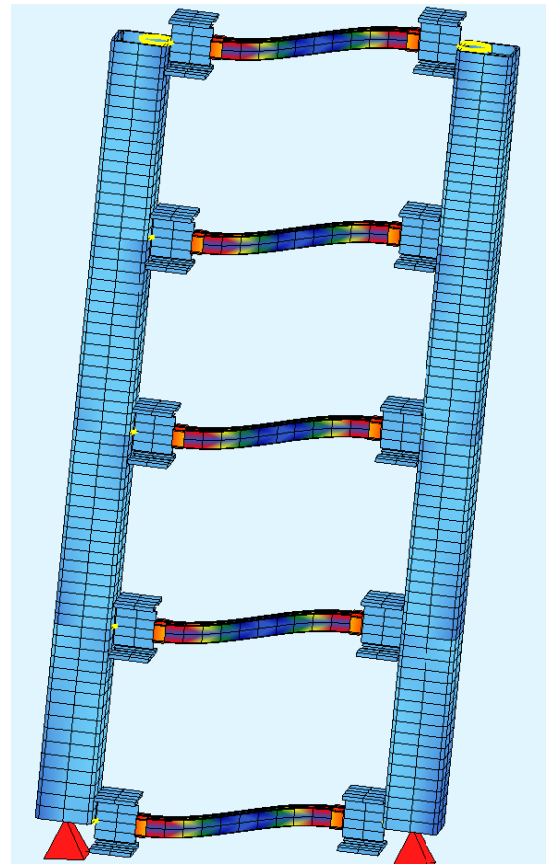


Σχήμα 7.2.2.10. διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης

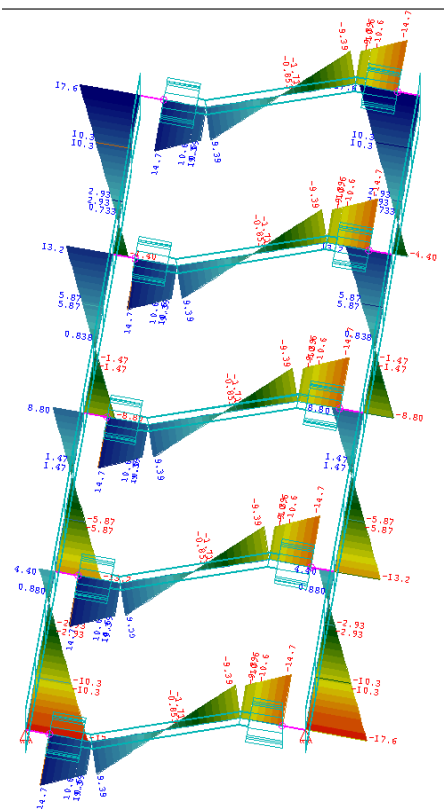
7.2.3 5 SHS 80/5 (Πείραμα #3) – Φορείς προσομοιωμένοι με γραμμικά στοιχεία



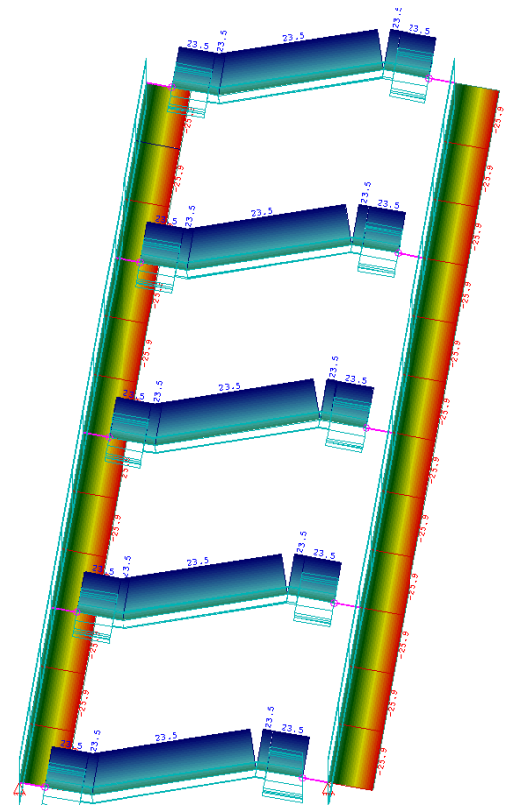
Σχήμα 7.2.3.1. προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



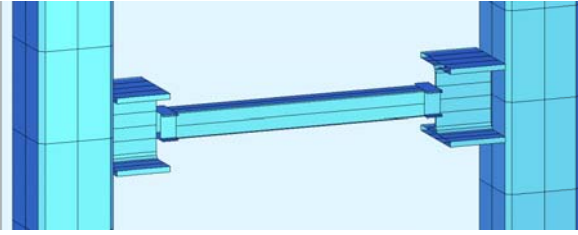
Σχήμα 7.2.3.2. όψη διάταξης στοιχείων φορέα



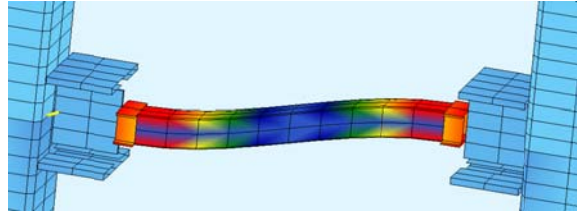
Σχήμα 7.2.3.3. διάγραμμα καμπτικών ροπών



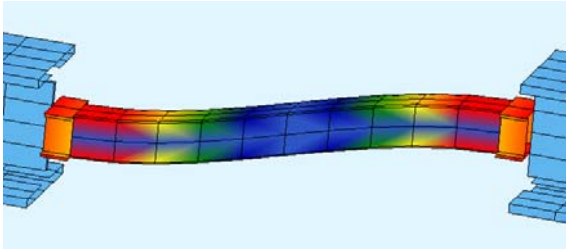
Σχήμα 7.2.3.4. διάγραμμα τεμνουσών



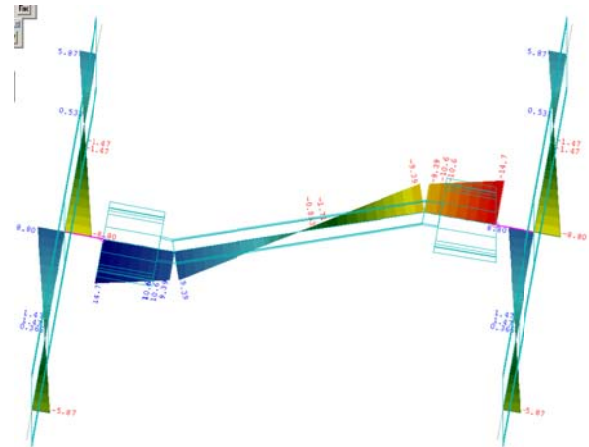
Σχήμα 7.2.3.5. προοπτικό φορέα



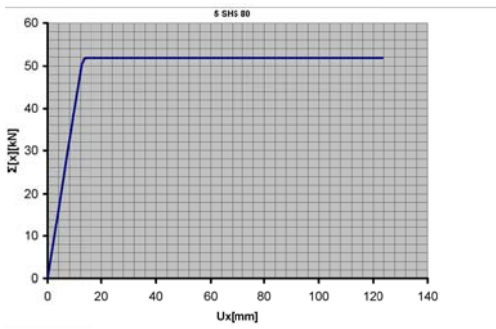
Σχήμα 7.2.3.6. όψη παραμορφωμένου φορέα



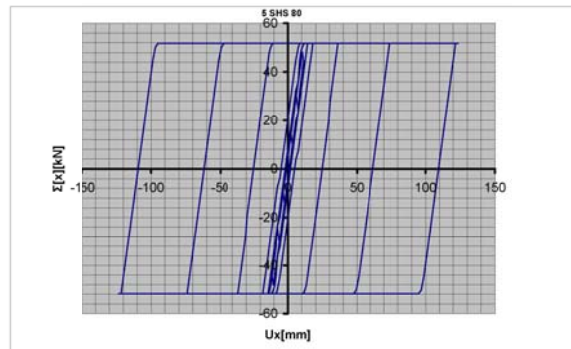
Σχήμα 7.2.3.7. προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



Σχήμα 7.2.3.8. διάγραμμα καμπτικών ροπών τυπικής συνδετήριας δοκού

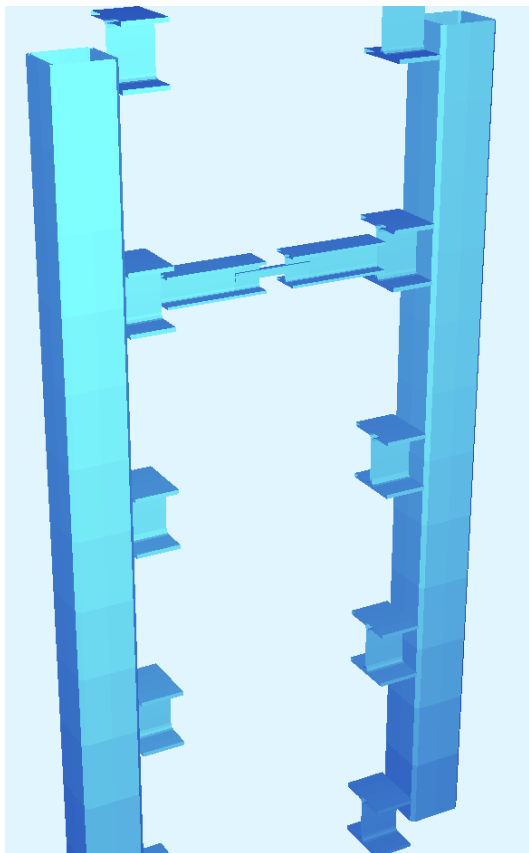


Σχήμα 7.2.3.9. διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης

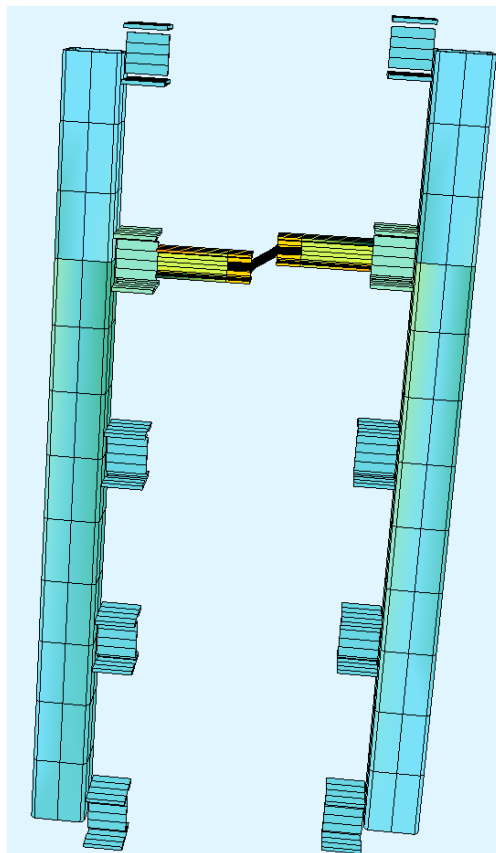


Σχήμα 7.2.3.10. διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης

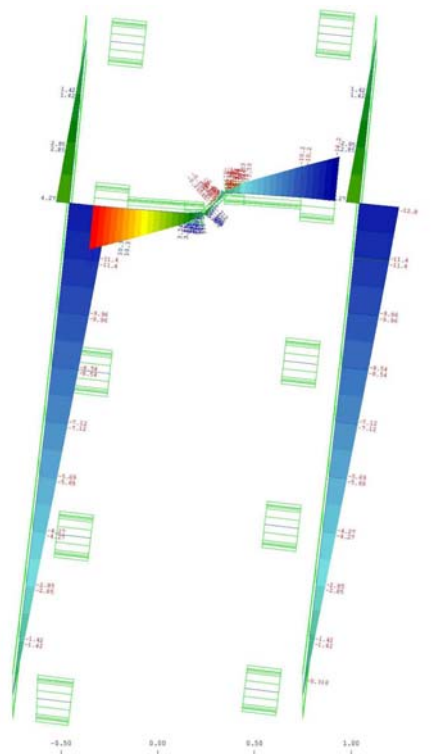
7.2.4 1 BAR 2*12/30 (Πείραμα #4) -- Φορείς προσομοιωμένοι με ραβδόμορφα στοιχεία



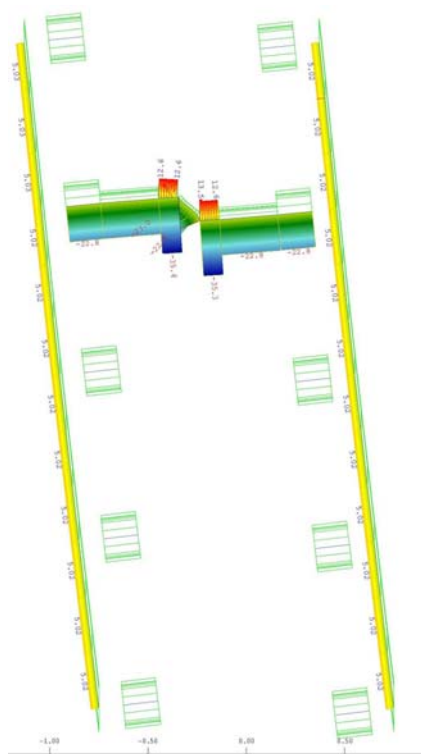
Σχήμα 7.2.4.1. προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



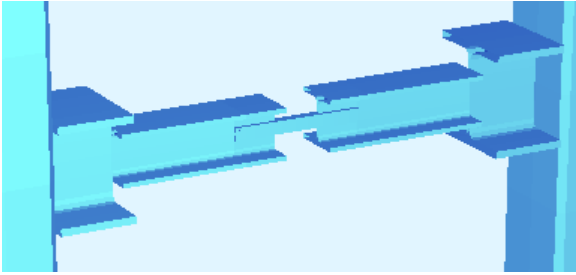
Σχήμα 7.2.4.2. όψη διάταξης στοιχείων φορέα



Σχήμα 7.2.4.3. διάγραμμα καμπτικών ροπών



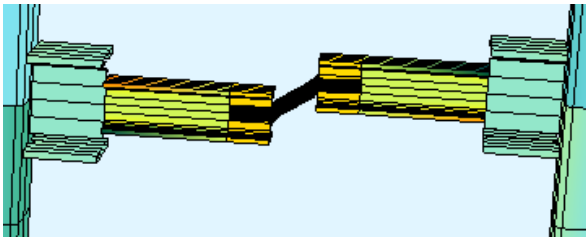
Σχήμα 7.2.4.4. διάγραμμα τεινουσών



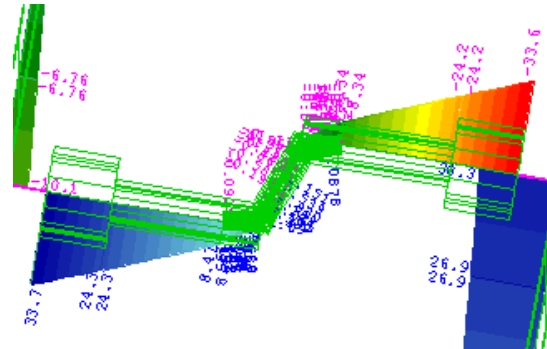
Σχήμα 7.2.4.5. προοπτικό φορέα



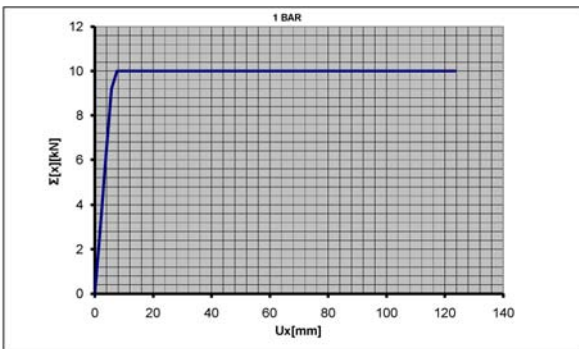
Σχήμα 7.2.4.6. όψη παραμορφωμένου φορέα



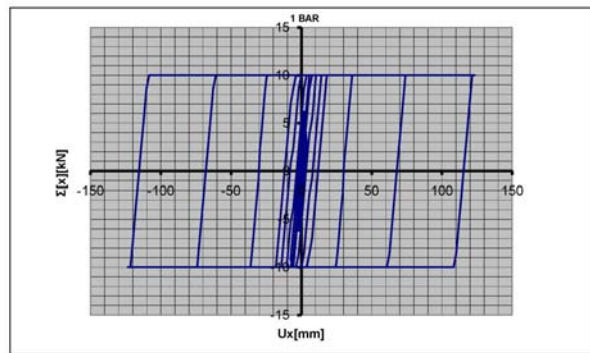
Σχήμα 7.2.4.7. προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



Σχήμα 7.2.4.8. διάγραμμα καμπτικών ροπών τυπικής συνδετήριας δοκού

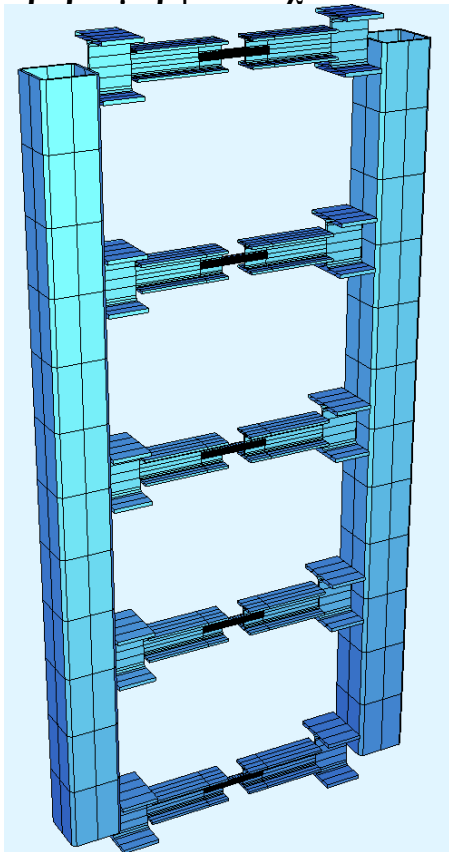


Σχήμα 7.2.4.9. διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης

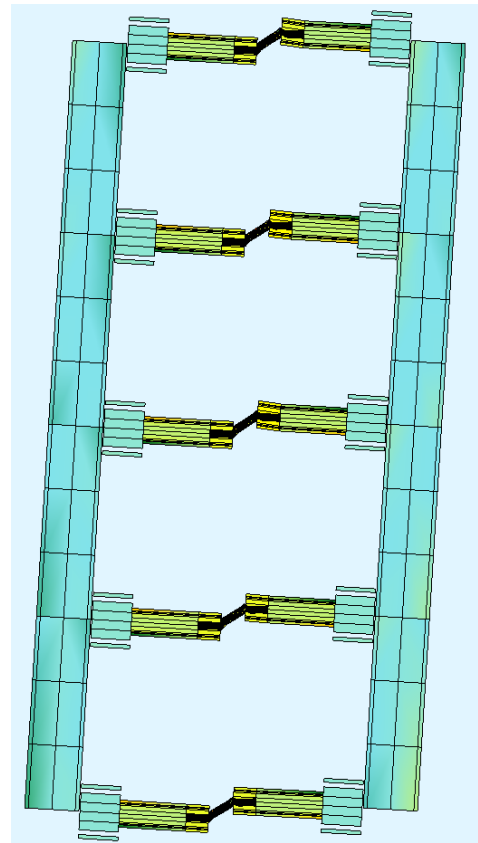


Σχήμα 7.2.4.10. διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης

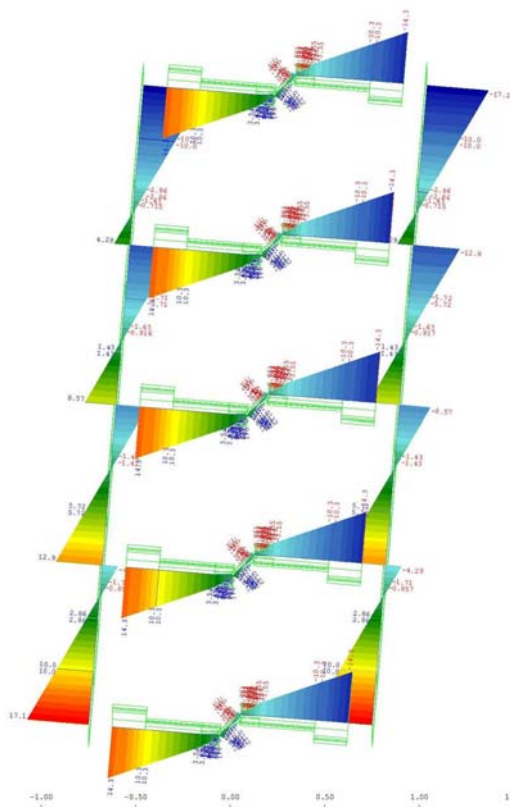
7.2.5 5 BAR (2*12/30) (Πείραμα #5) – – Φορείς προσομοιωμένοι με ραβδόμορφα στοιχεία



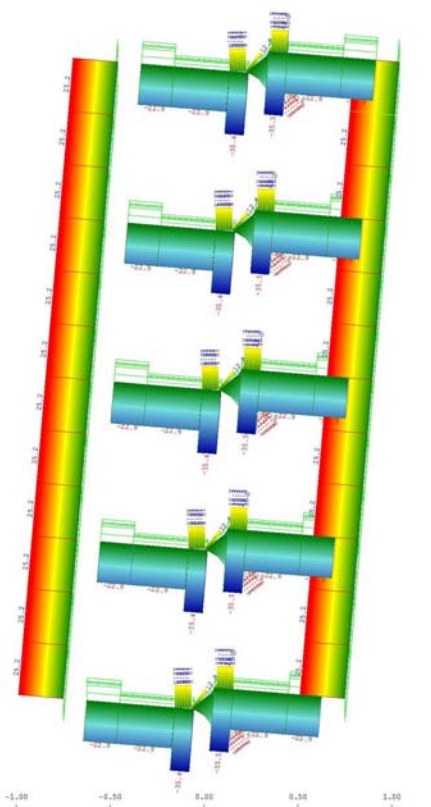
Σχήμα 7.2.5.1. προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



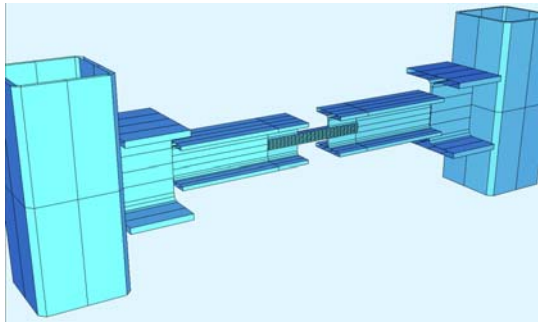
Σχήμα 7.2.5.2. όψη διάταξης στοιχείων φορέα



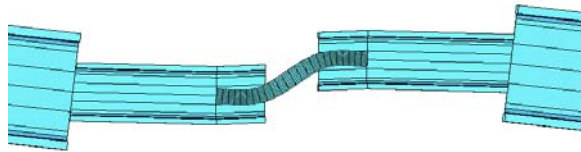
Σχήμα 7.2.5.3. διάγραμμα καμπτικών ροπών



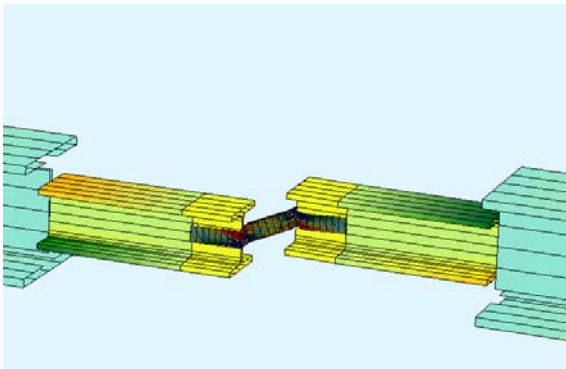
Σχήμα 7.2.5.4. διάγραμμα τεμνουσών



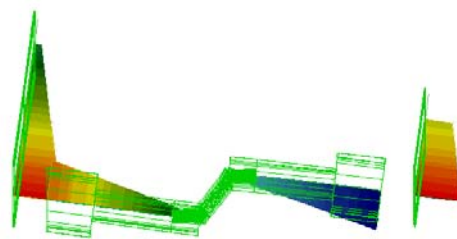
Σχήμα 7.2.5.5. προοπτικό φορέα



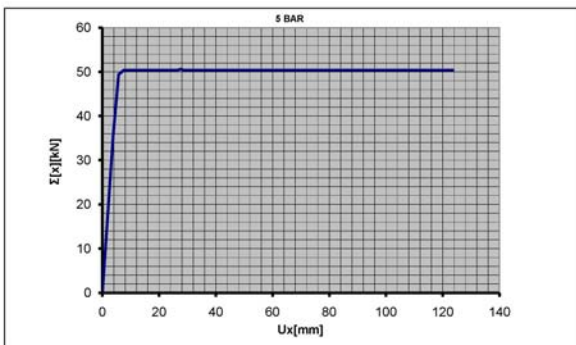
Σχήμα 7.2.5.6. όψη παραμορφωμένου φορέα



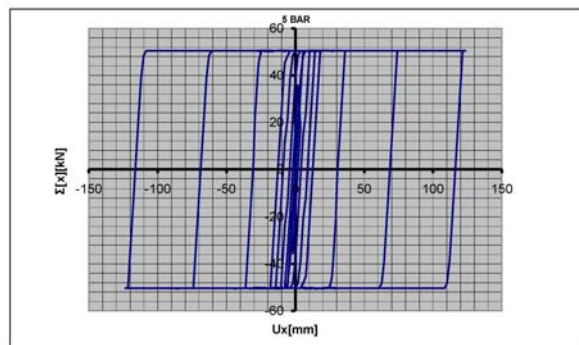
Σχήμα 7.2.5.7. προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



Σχήμα 7.2.5.8. διάγραμμα καμπτικών ροπών τυπικής συνδετήριας δοκού

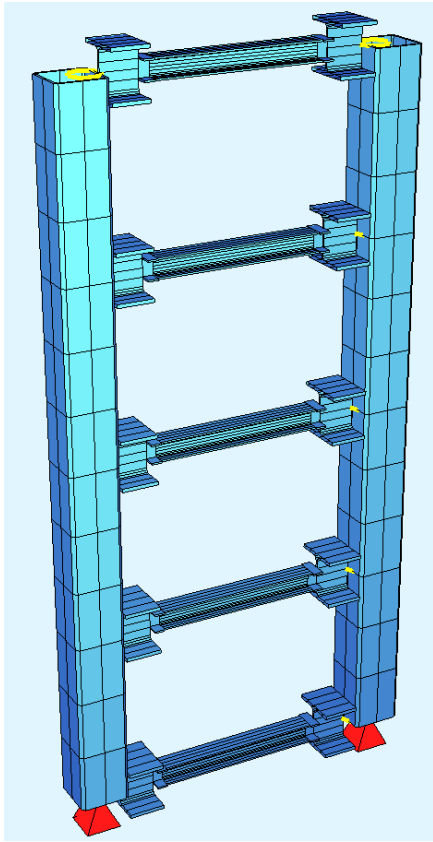


Σχήμα 7.2.5.9. διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης

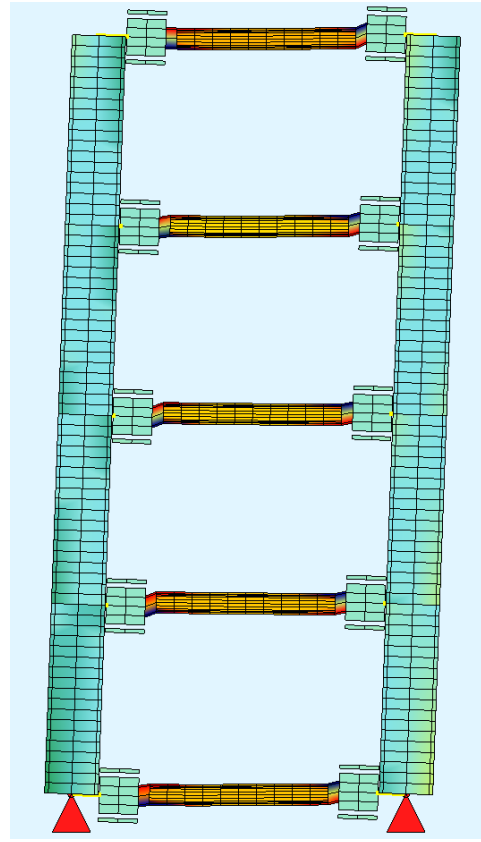


Σχήμα 7.2.5.10. διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης

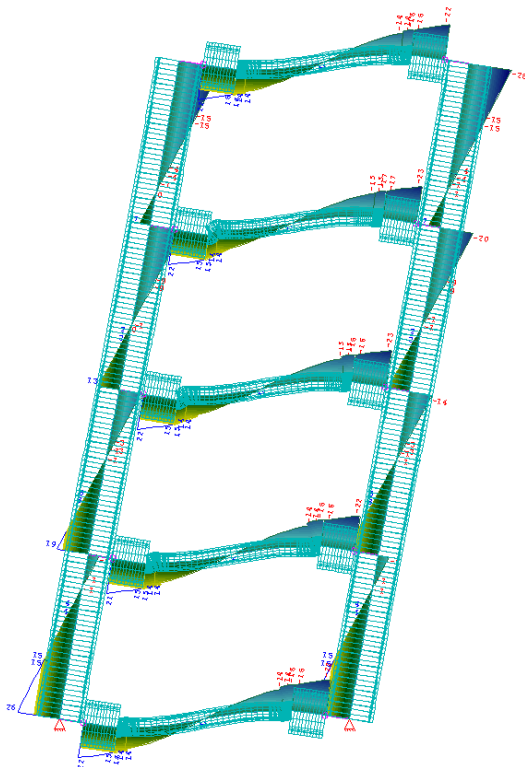
7.2.6 5 HE-A 100 (Πείραμα #6) – Φορείς προσομοιωμένοι με ραβδόμορφα στοιχεία



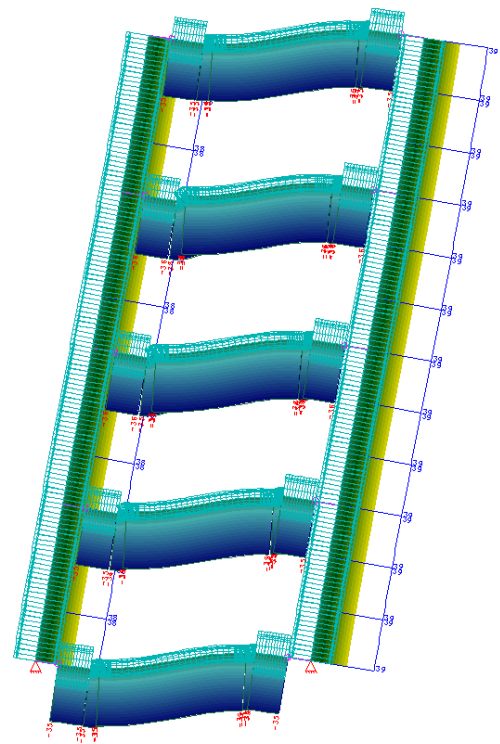
Σχήμα 7.2.6.1. προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



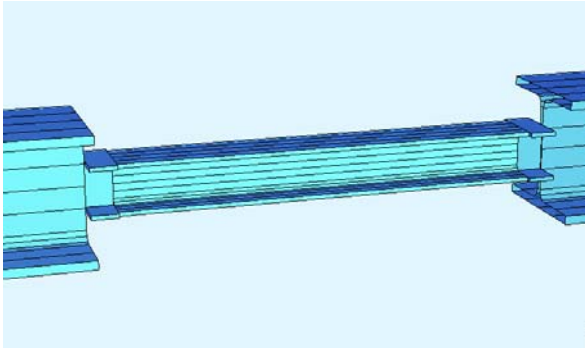
Σχήμα 7.2.6.2. όψη διάταξης στοιχείων φορέα



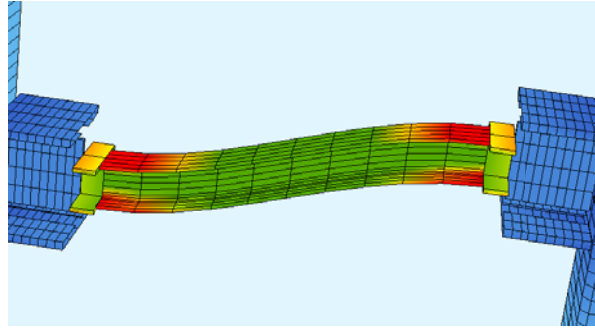
Σχήμα 7.2.6.3. διάγραμμα καμπτικών ροπών



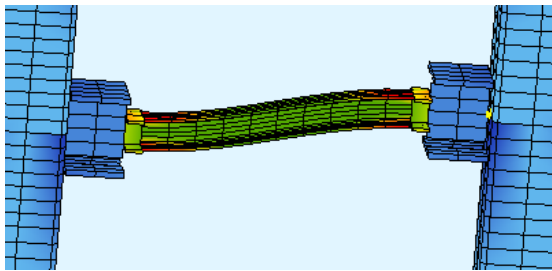
Σχήμα 7.2.6.4. διάγραμμα τεμνουσών



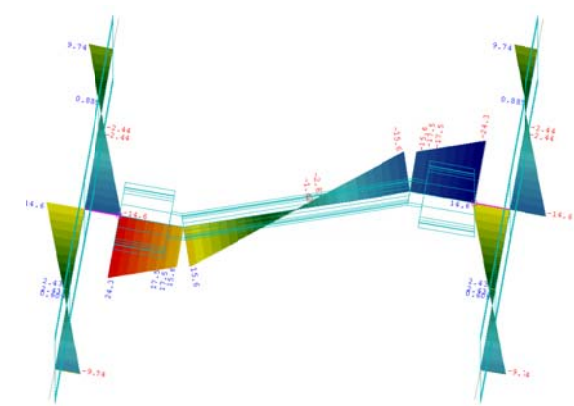
Σχήμα 7.2.6.5. προοπτικό φορέα



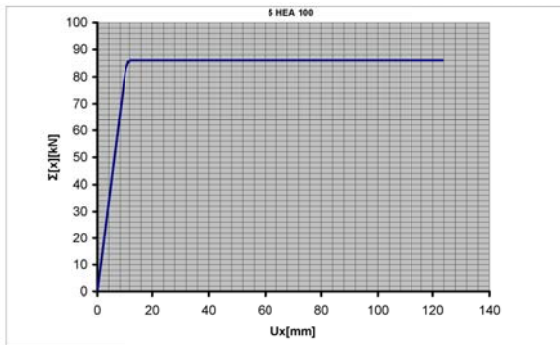
Σχήμα 7.2.6.6. όψη παραμορφωμένου φορέα



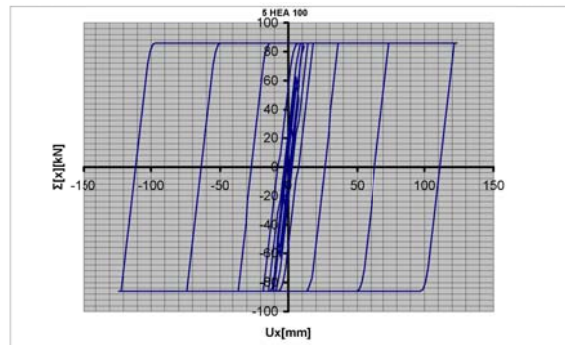
Σχήμα 7.2.6.7. προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



Σχήμα 7.2.6.8. διάγραμμα καμπτικών ροπών τυπικής συνδετήριας δοκού

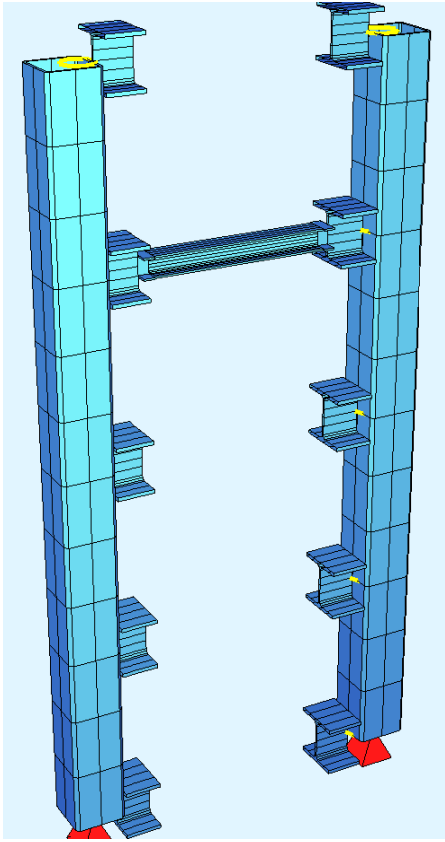


Σχήμα 7.2.6.9. διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης

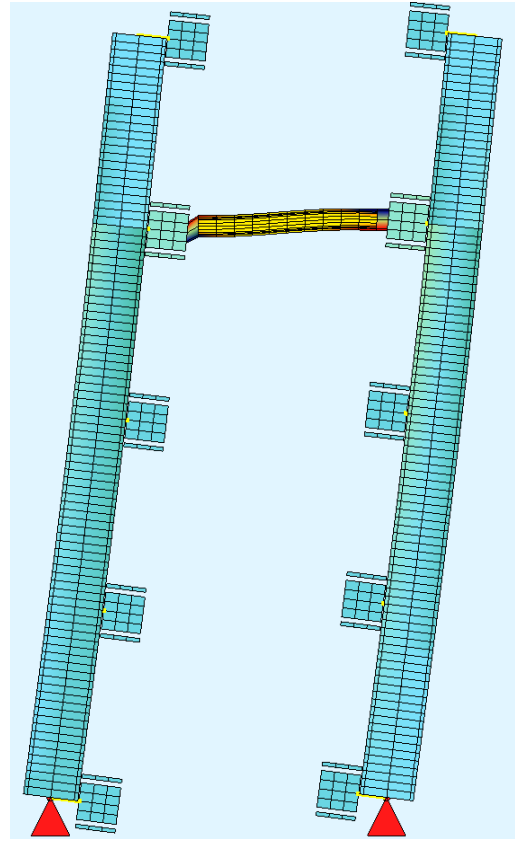


Σχήμα 7.2.6.10. διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης

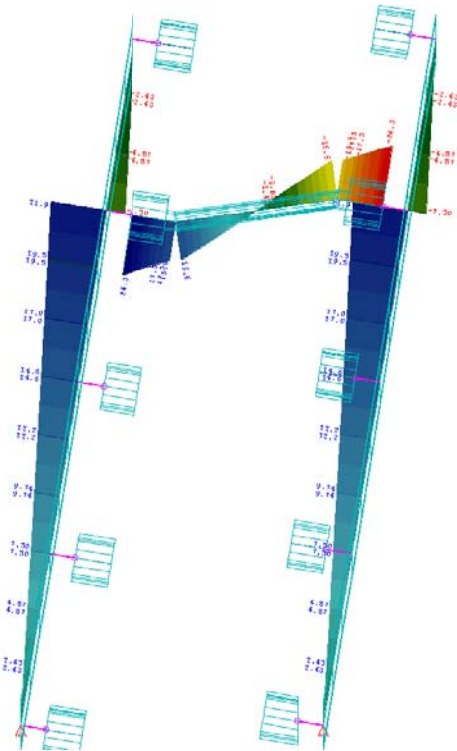
7.2.7 1 HE-A 100 (Πείραμα #7) -- Φορείς προσομοιωμένοι με ραβδόμορφα στοιχεία



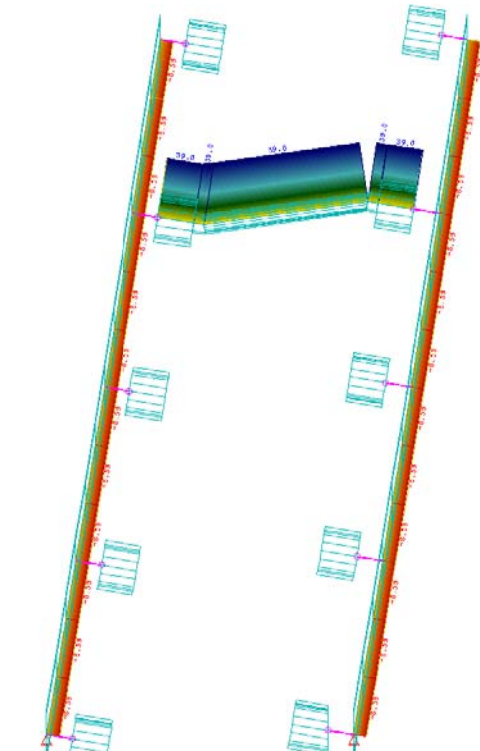
Σχήμα 7.2.7.1. προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



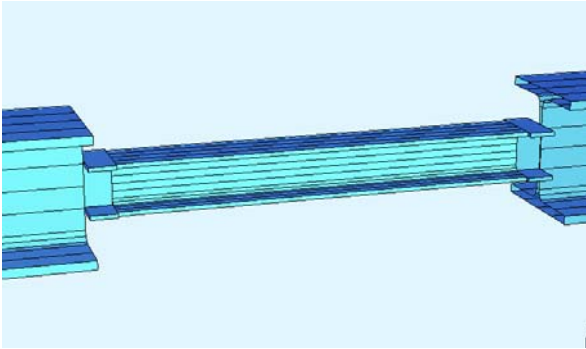
Σχήμα 7.2.7.2. όψη διάταξης στοιχείων φορέα



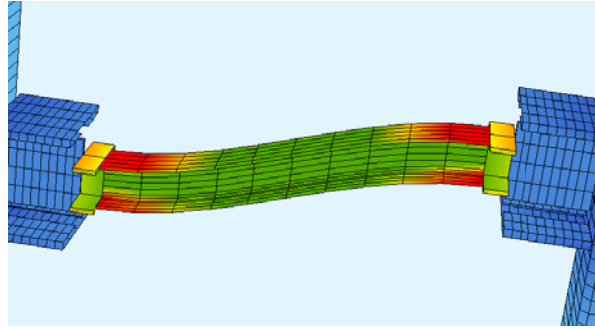
Σχήμα 7.2.7.3. διάγραμμα καμπτικών ροπών



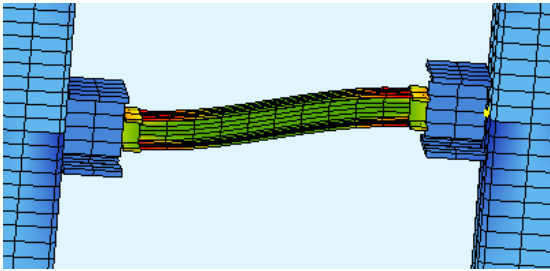
Σχήμα 7.2.7.4. διάγραμμα τεμνουσών



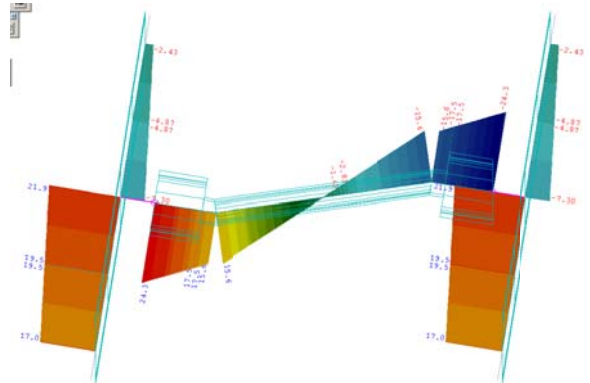
Σχήμα 7.2.7.5. προοπτικό φορέα



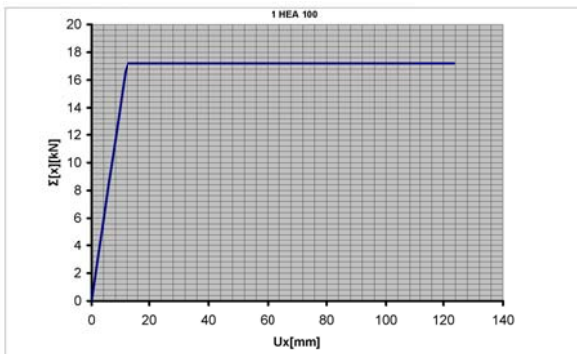
Σχήμα 7.2.7.6. όψη παραμορφωμένου φορέα



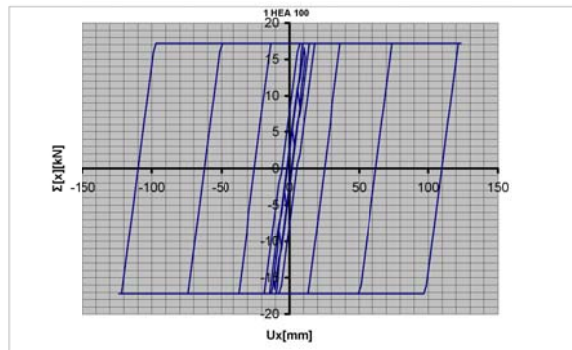
Σχήμα 7.2.7.7. προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



Σχήμα 7.2.7.8. διάγραμμα καμπτικών ροπών τυπικής συνδετήριας δοκού

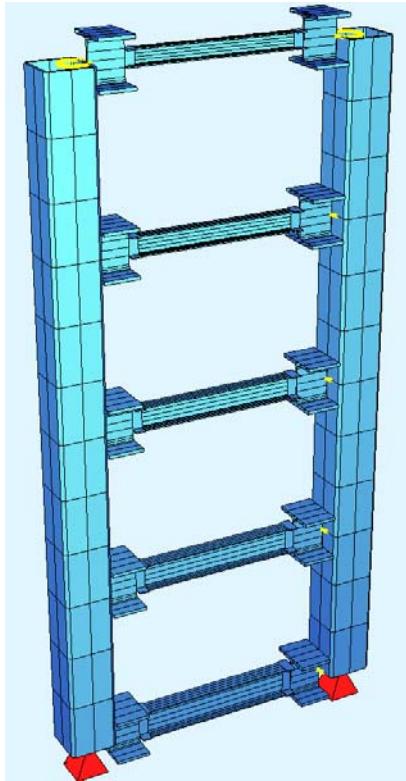


Σχήμα 7.2.7.9. διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης

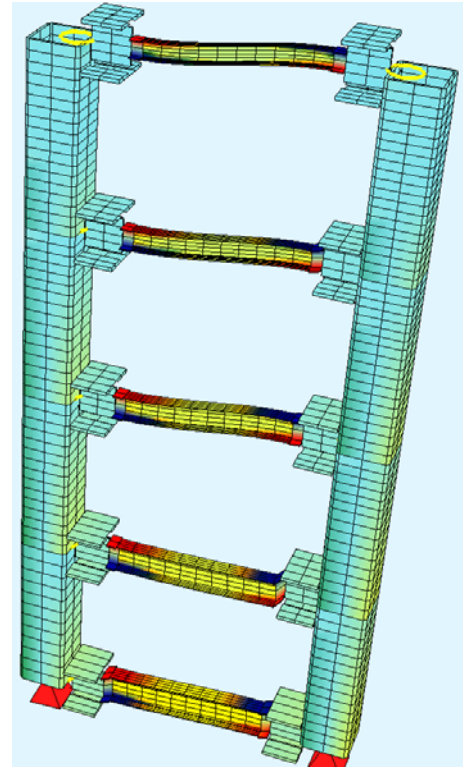


Σχήμα 7.2.7.10. διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης

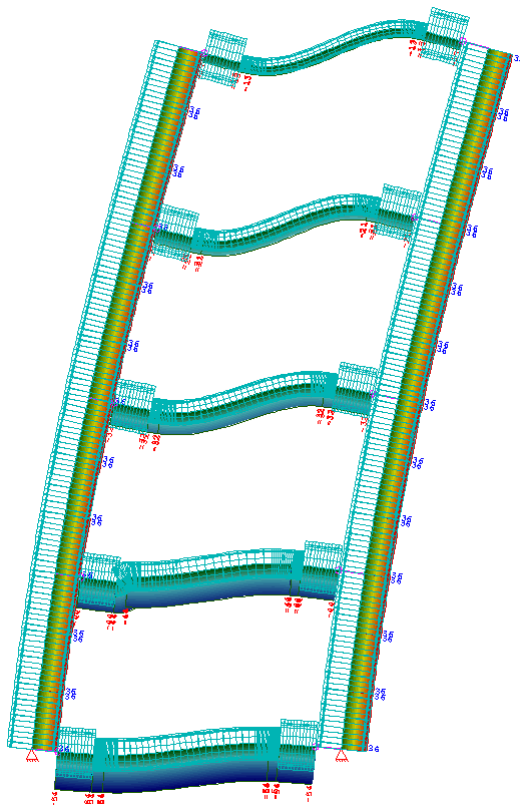
7.2.8 5 ΙΡΕ 80-160 (Πείραμα #8) – Φορείς προσομοιωμένοι με ραβδόμορφα στοιχεία



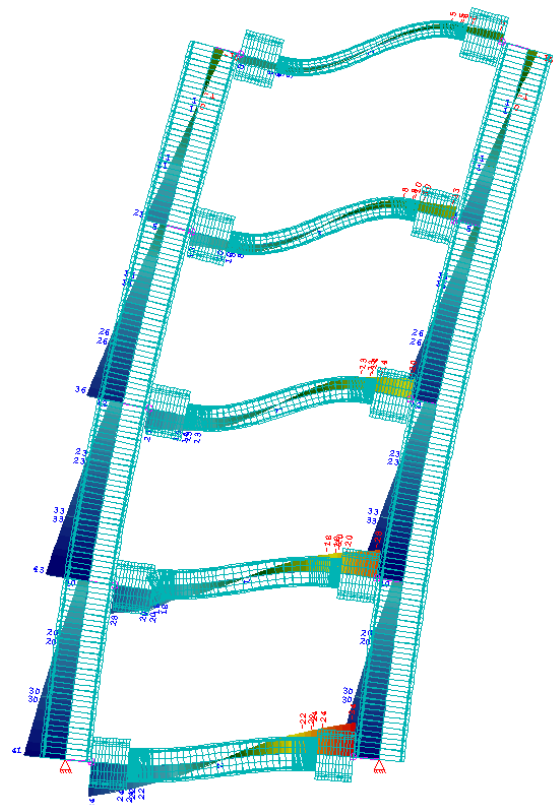
Σχήμα 7.2.8.1. προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



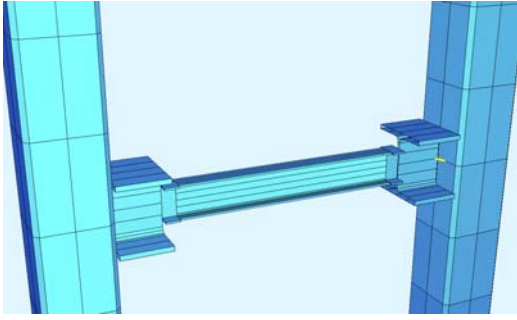
Σχήμα 7.2.8.2. όψη διάταξης στοιχείων φορέα



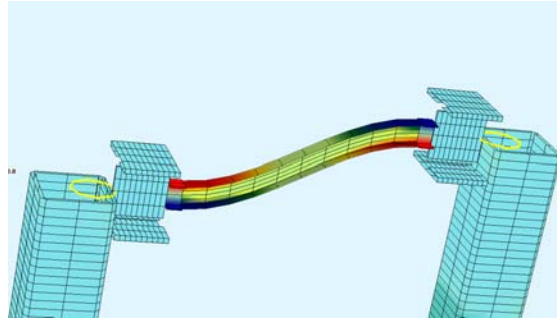
Σχήμα 7.2.8.3. διάγραμμα τεμνουσών



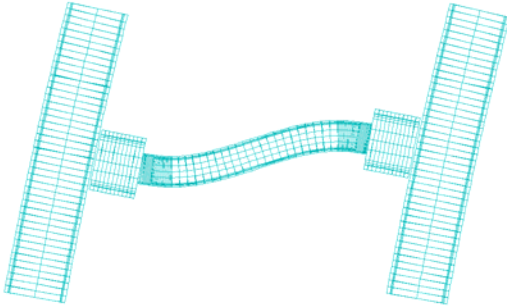
Σχήμα 7.2.8.4. διάγραμμα καμπτικών ροπών



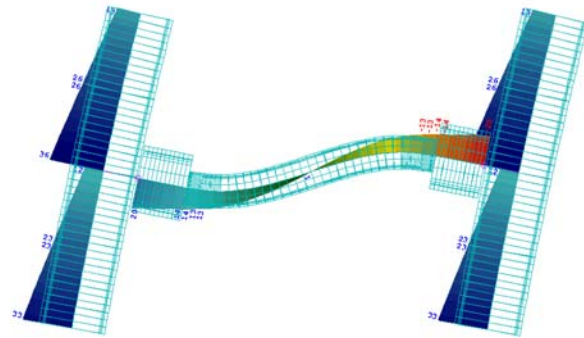
Σχήμα 7.2.8.5. προοπτικό φορέα



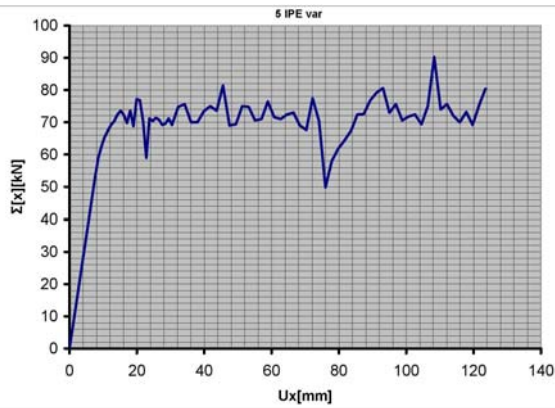
Σχήμα 7.2.7.6. όψη παραμορφωμένου φορέα



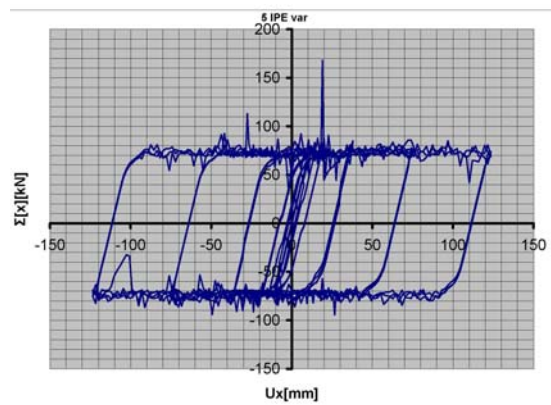
Σχήμα 7.2.8.7. προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



Σχήμα 7.2.8.8. διάγραμμα καμπτικών ροπών τυπικής συνδετήριας δοκού

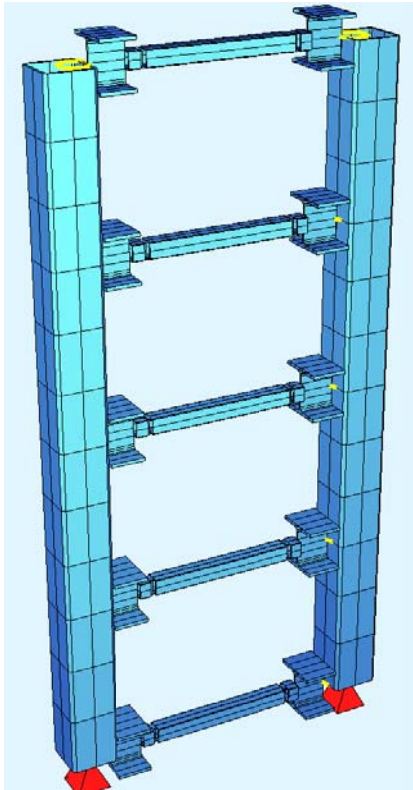


Σχήμα 7.2.8.9. διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης

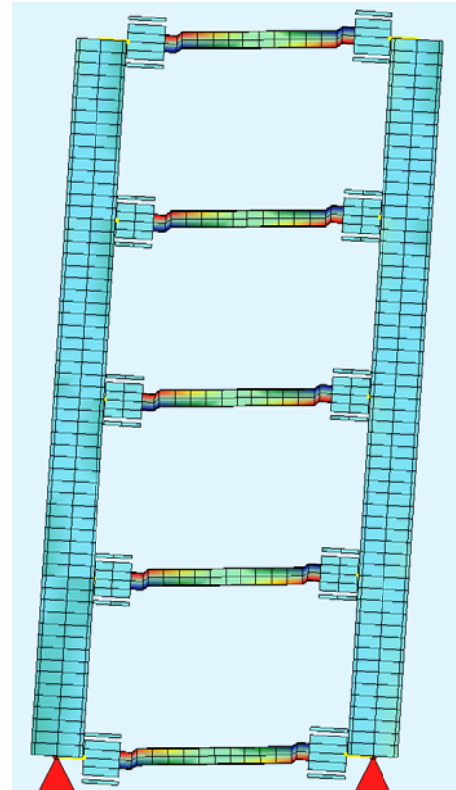


Σχήμα 7.2.8.10. διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης

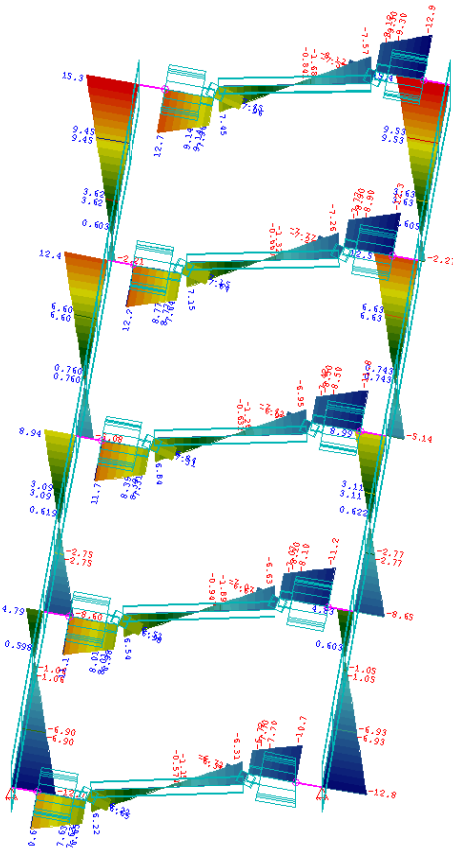
7.2.9 5 SHS 80/5 (holes) (Πείραμα #9) – Φορείς προσομοιωμένοι με ραβδόμορφα στοιχεία



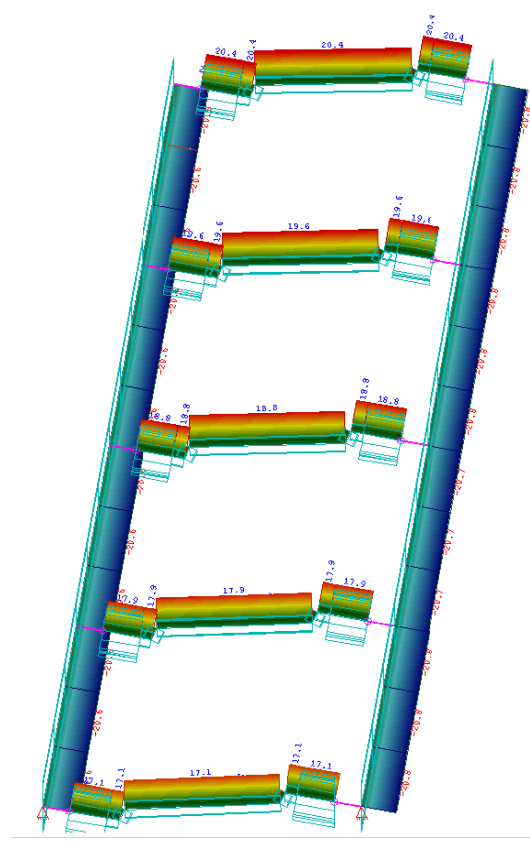
Σχήμα 7.2.9.1. προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



Σχήμα 7.2.9.2. όψη διάταξης στοιχείων φορέα

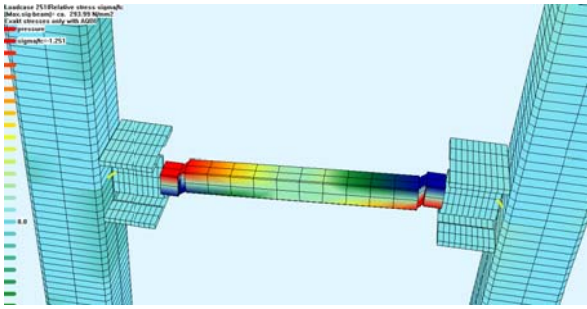


Σχήμα 7.2.9.3. διάγραμμα καμπτικών ροπών

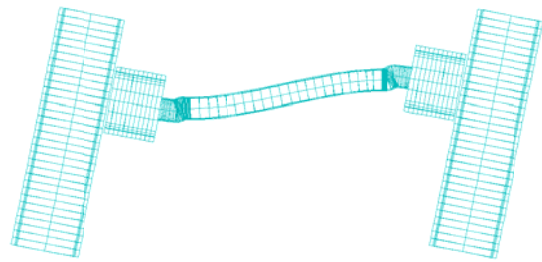


Σχήμα 7.2.9.4. διάγραμμα τενουσιών

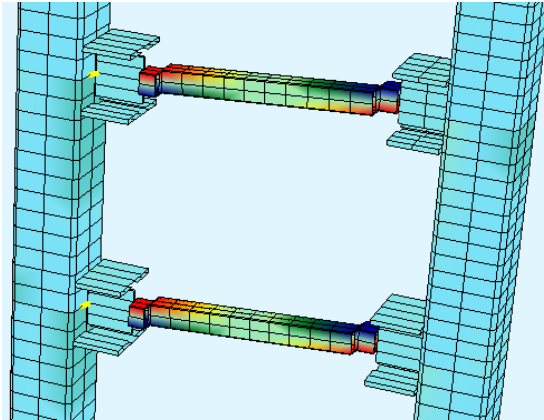
7.2.9 - 2



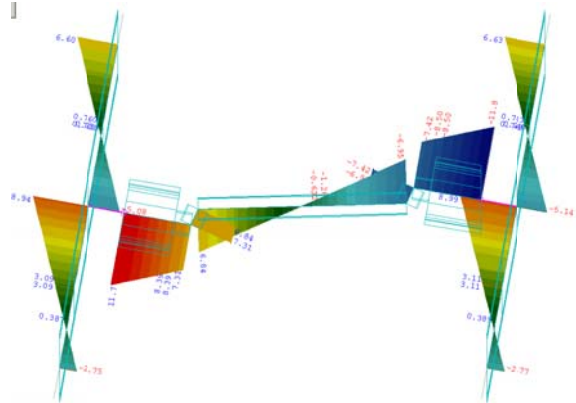
Σχήμα 7.2.9.5. προοπτικό φορέα



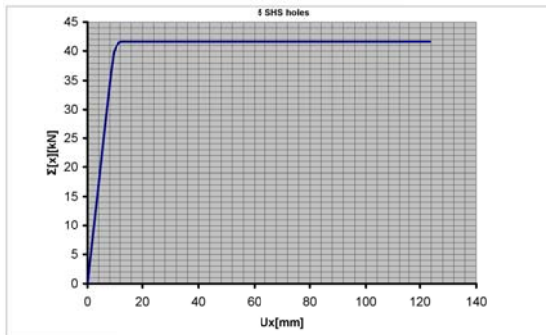
Σχήμα 7.2.9.6. όψη παραμορφωμένου φορέα



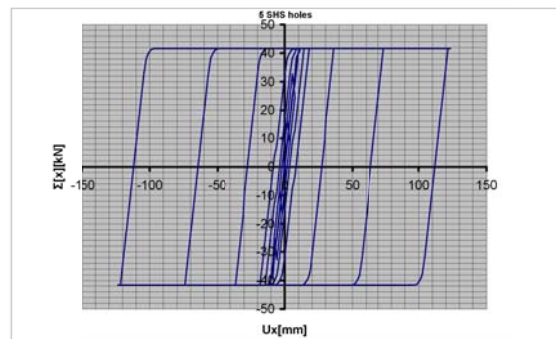
Σχήμα 7.2.9.7. προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



Σχήμα 7.2.9.8. διάγραμμα καμπτικών ροπών τυπικής συνδετήριας δοκού

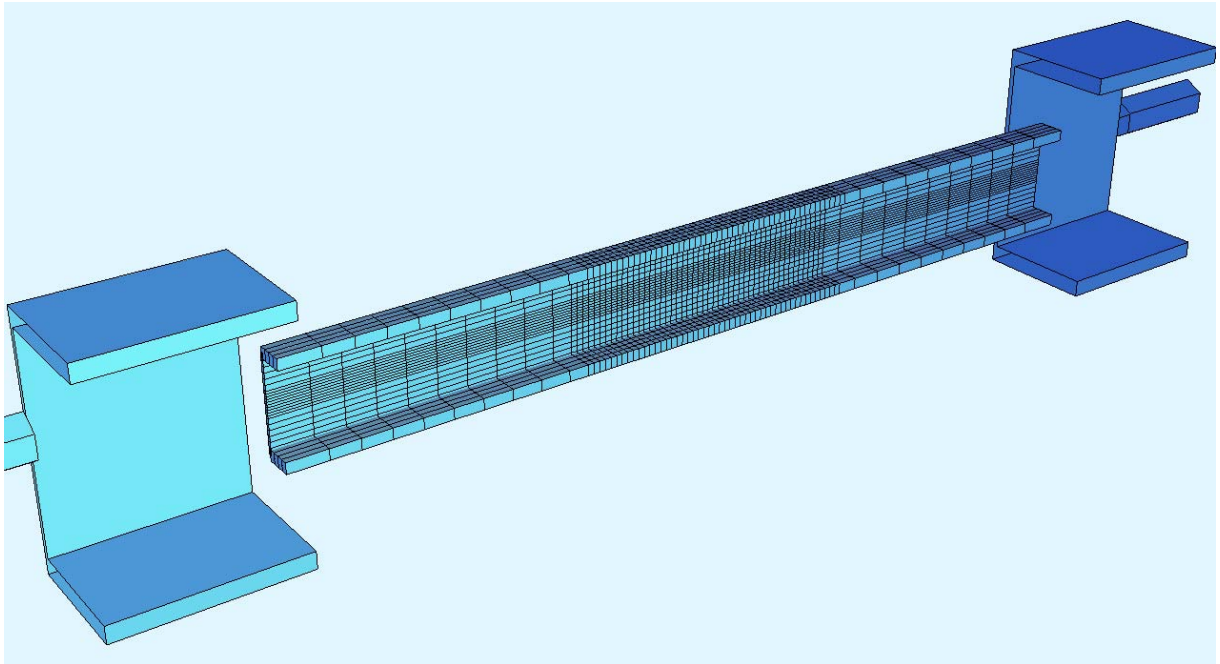


Σχήμα 7.2.9.9. διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης

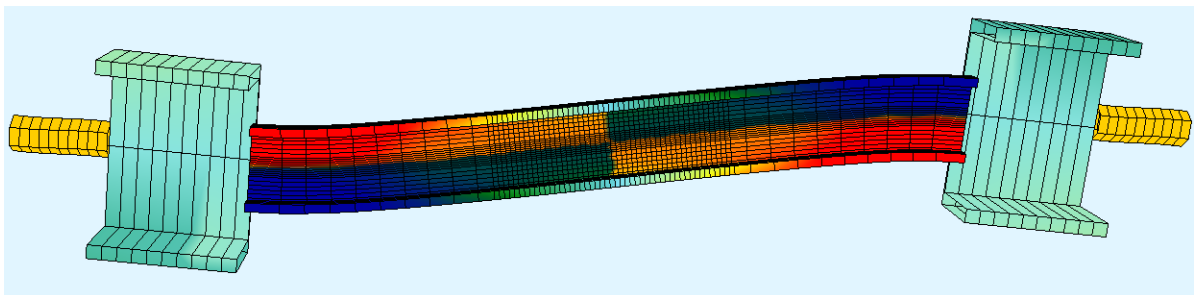


Σχήμα 7.2.9.10. διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης

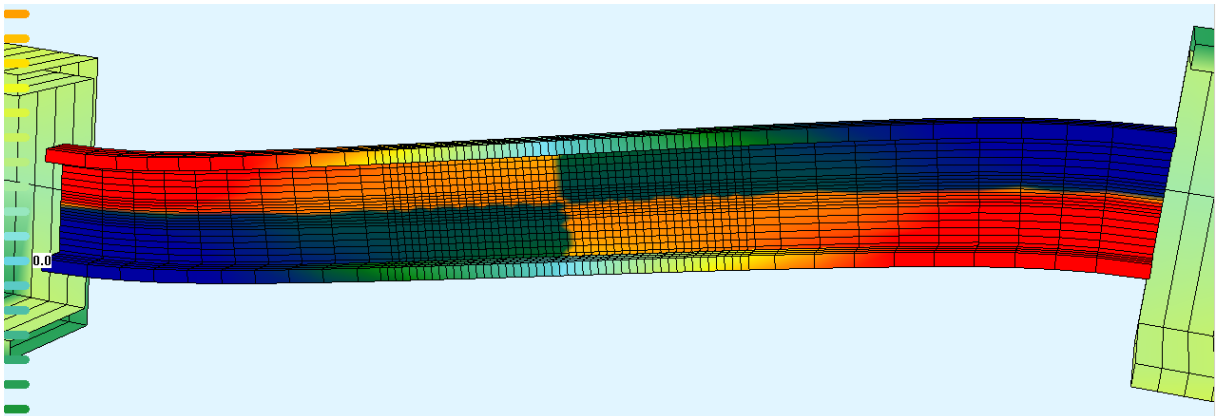
7.3.1 IPE 100 – Finite element model (Πείραμα #1) Φορείς προσομοιωμένοι με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία.



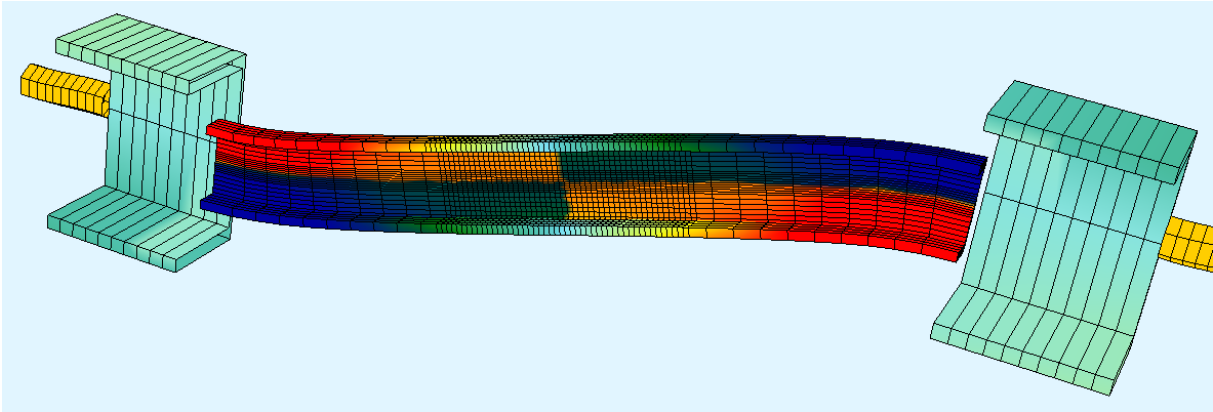
Σχήμα 7.3.1.1. Προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



Σχήμα 7.3.1.2. Όψη διάταξης στοιχείων φορέα



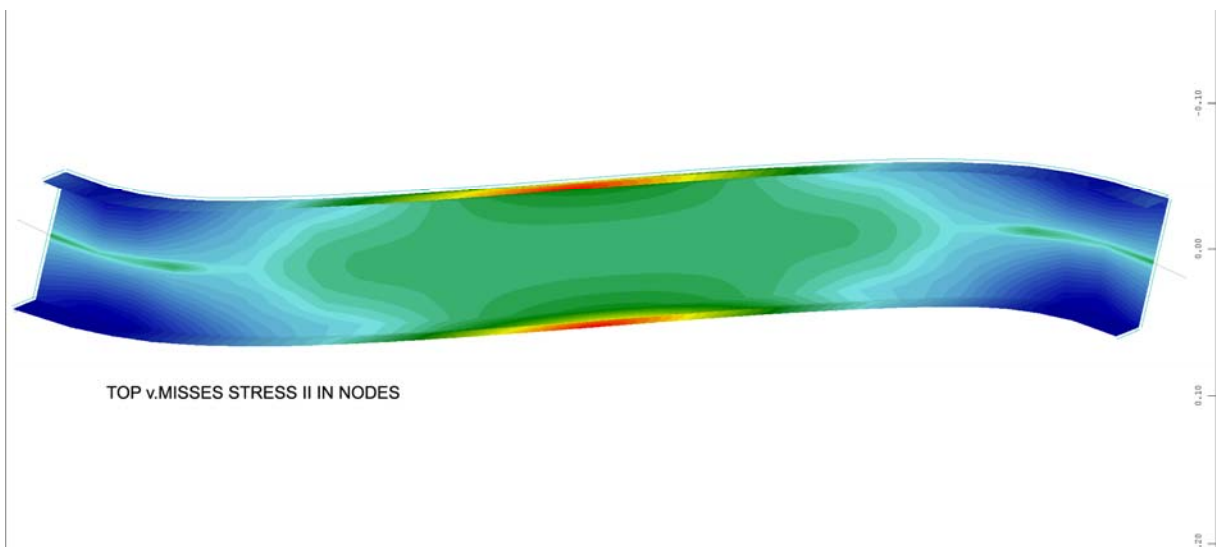
Σχήμα 7.3.1.3. Όψη διάταξης στοιχείων φορέα



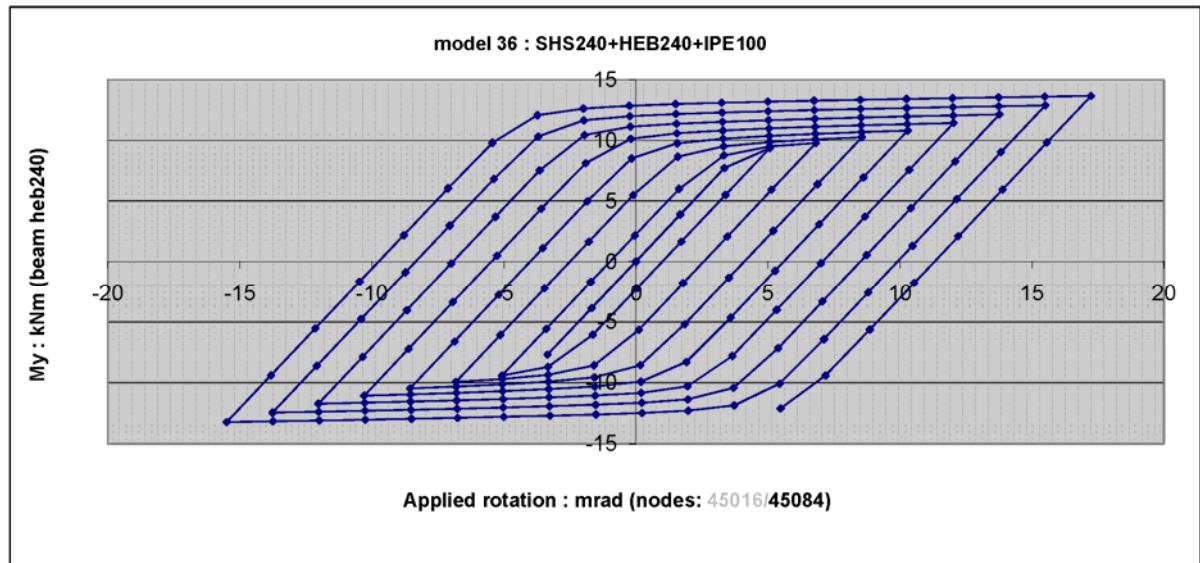
Σχήμα 7.3.1.4. Προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



Σχήμα 7.3.1.5. Διάγραμμα κυριών τάσεων στους κόμβους

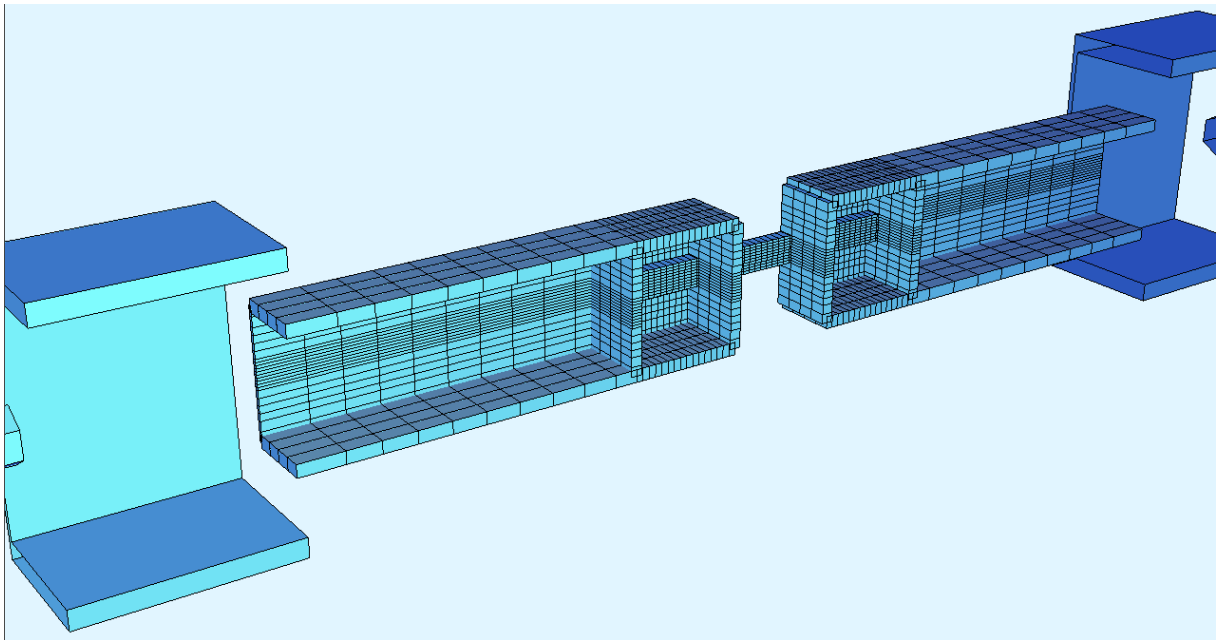


Σχήμα 7.3.1.6. Διάγραμμα τάσεων v. Misses στους κόμβους

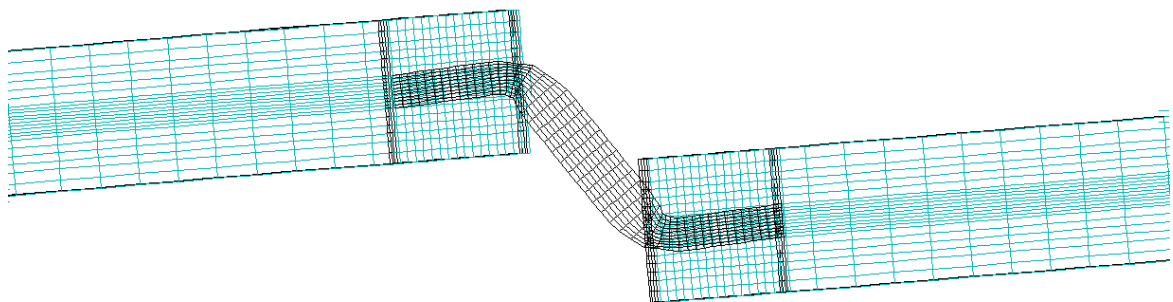


Σχήμα 7.2.1.7. Διάγραμμα ανακυκλιζόμενης αυξανόμενης φόρτισης

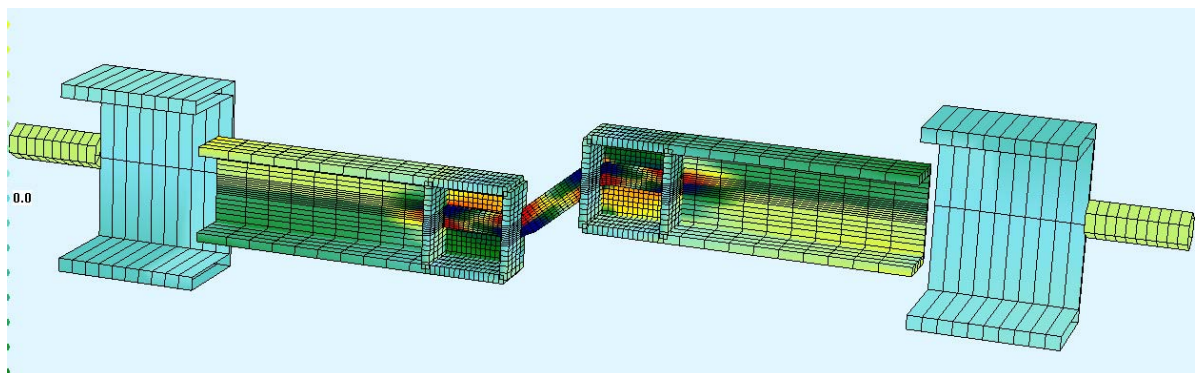
7.3.2 1 Bar 12/30 –Finite element model (Πείραμα #5) – Φορείς προσομοιωμένοι με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία.



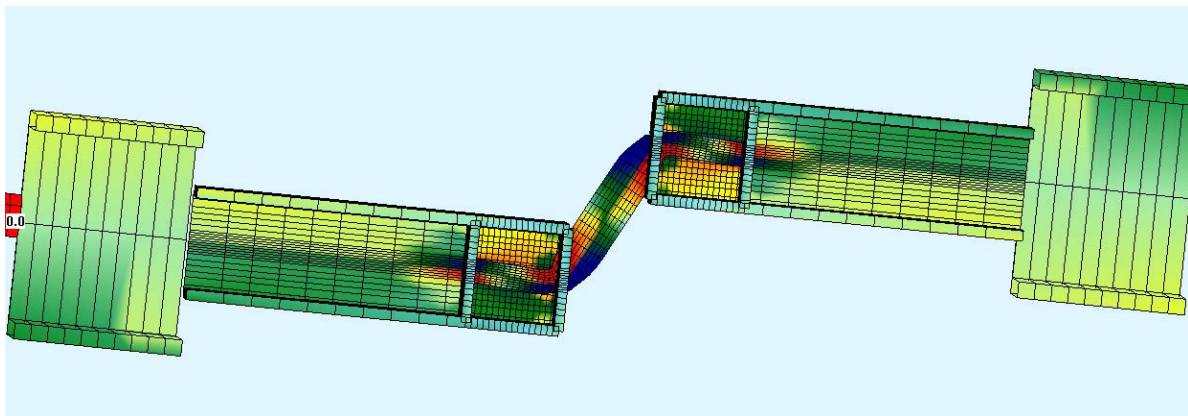
Σχήμα 7.3.2.1. Προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



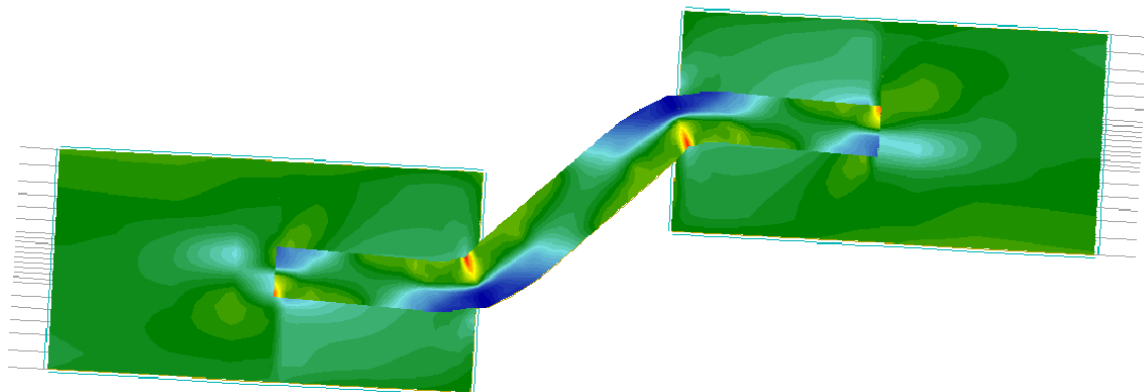
Σχήμα 7.3.2.2. Όψη διάταξης στοιχείων φορέα



Σχήμα 7.3.2.3. Προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα

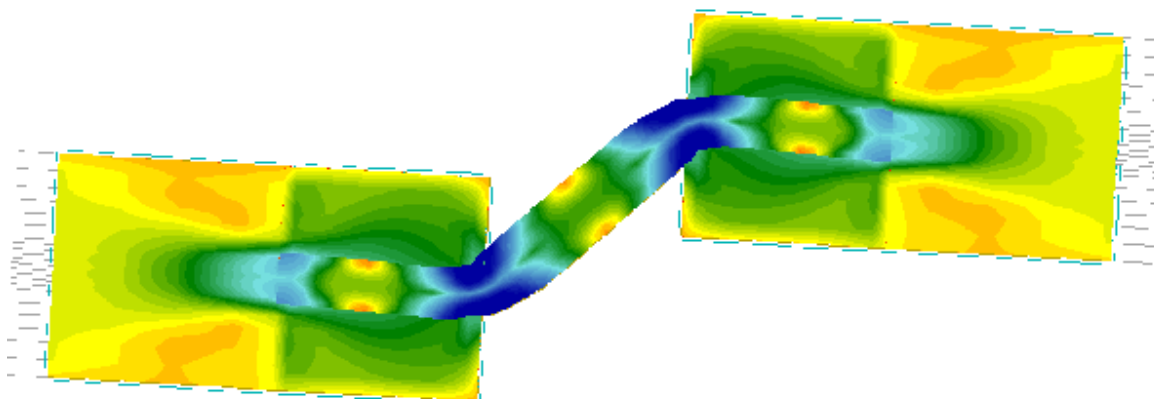


Σχήμα 7.3.2.4. Όψη παραμορφωμένου φορέα



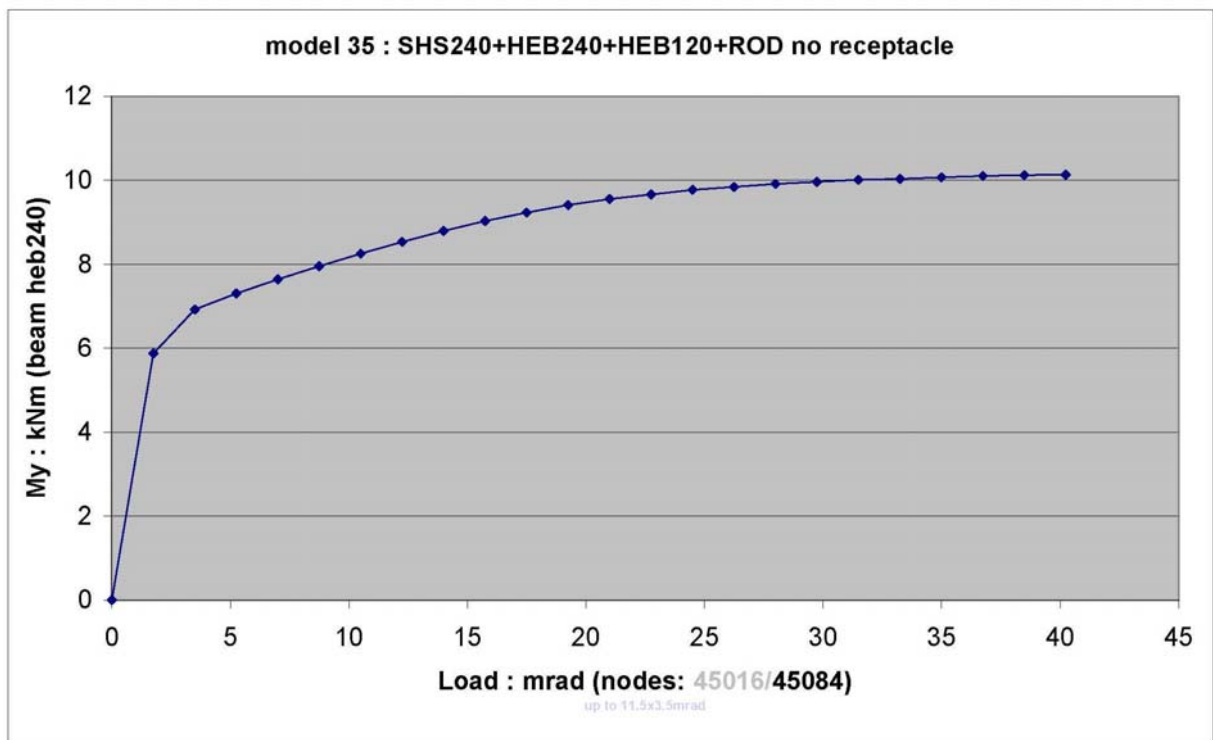
TOP PRINCIPAL STRESS II DIRECTION I IN NODES

Σχήμα 7.3.2.5. Διάγραμμα κυριών τάσεων στους κόμβους

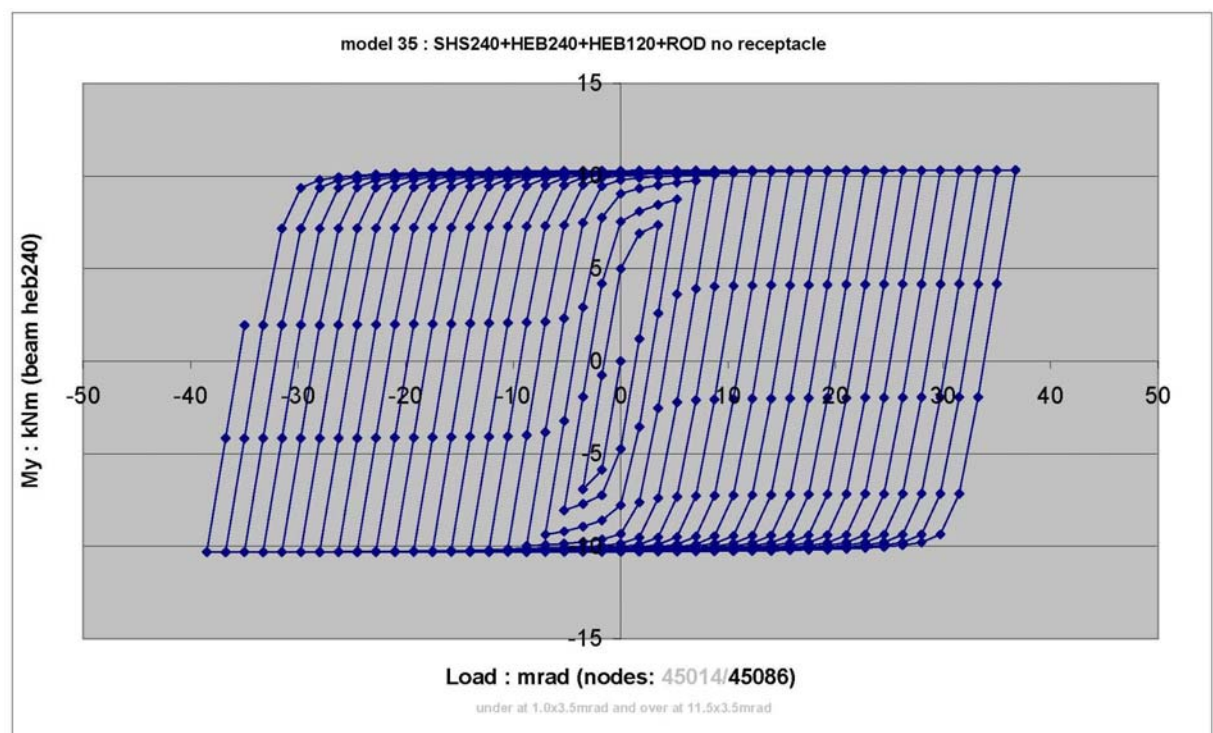


TOP v.MISSES STRESS II IN NODES

Σχήμα 7.3.2.6. Διάγραμμα τάσεων v. Misses στους κόμβους

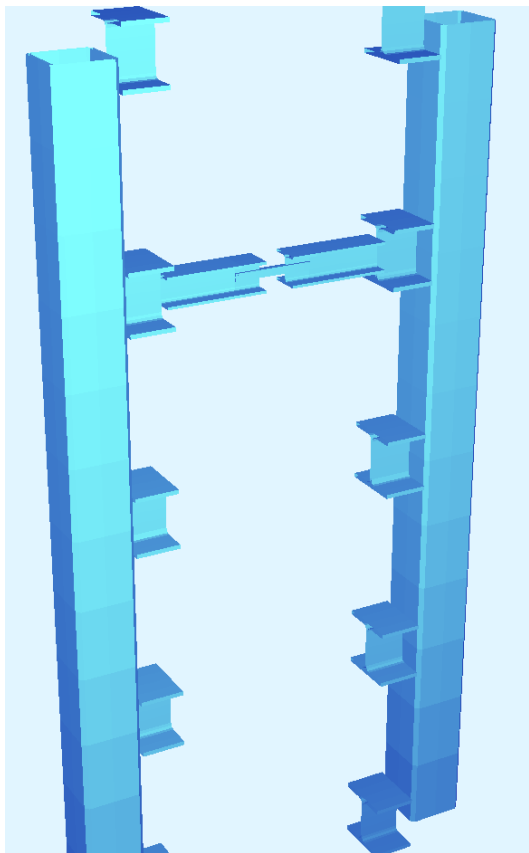


Σχήμα 7.3.2.7 Διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης

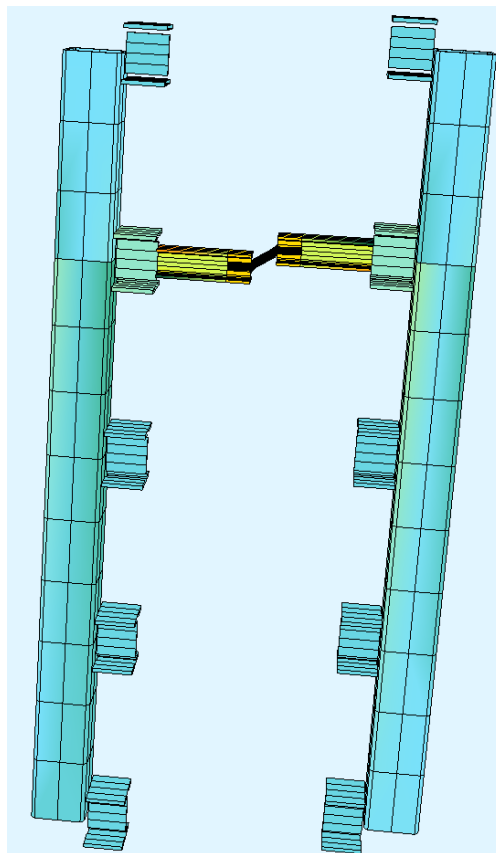


Σχήμα 7.3.2.8. Διάγραμμα ανακυκλιζόμενης αυξανόμενης φόρτισης

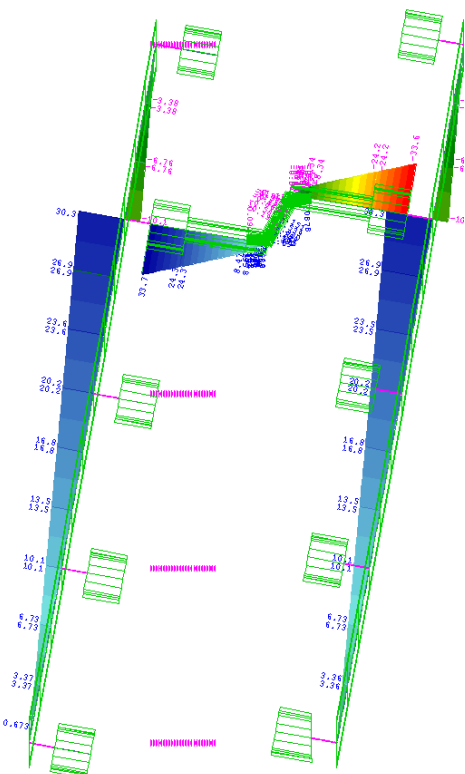
7.4.1 1 BAR (2*12/30) (Πείραμα #4) – φορείς προσομοιωμένοι με επάλληλα ραβδόμορφα στοιχεία.



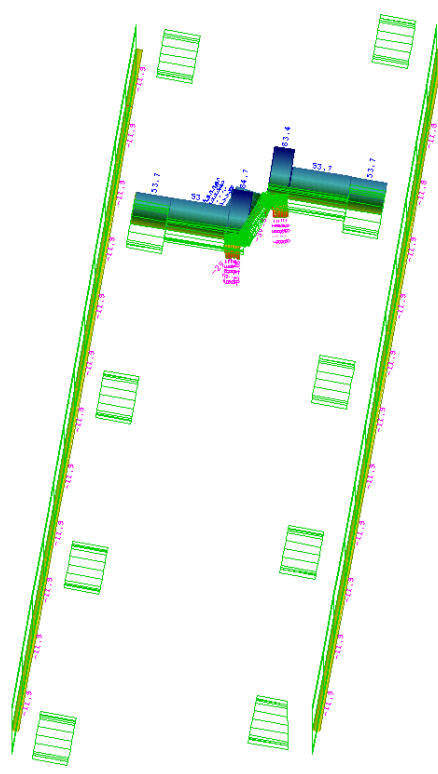
Σχήμα 7.4.1.1. προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



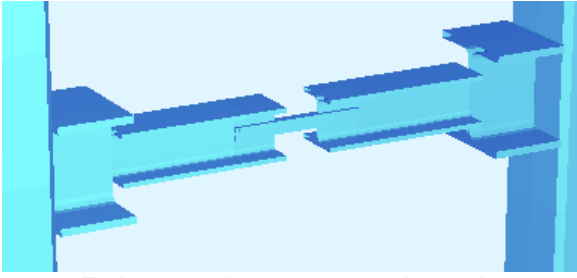
Σχήμα 7.4.1.2. όψη διάταξης στοιχείων φορέα



Σχήμα 7.4.1.3. διάγραμμα καμπτικών ροπών



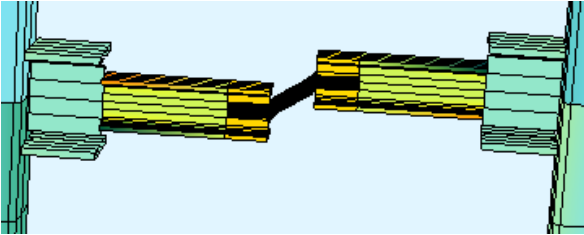
Σχήμα 7.4.1.4. διάγραμμα τενουσιών



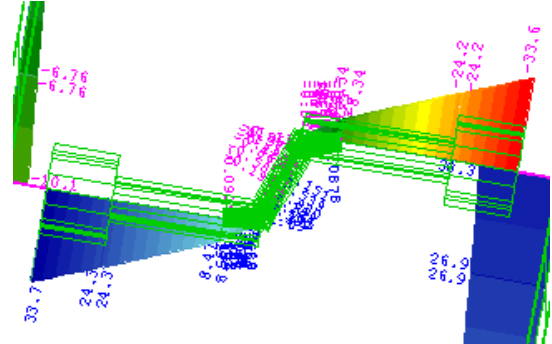
Σχήμα 7.4.1.5. προοπτικό φορέα



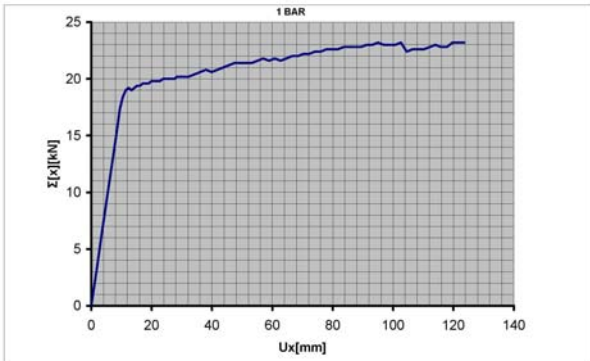
Σχήμα 7.4.1.6. όψη παραμορφωμένου φορέα



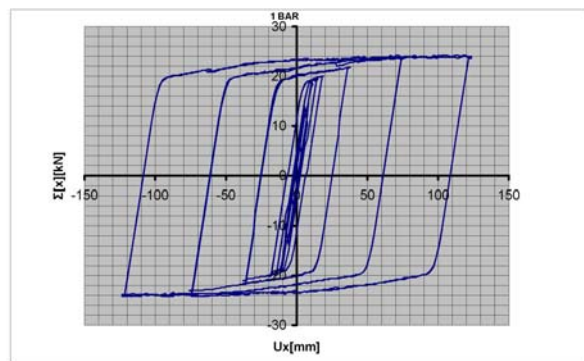
Σχήμα 7.4.1.7. προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



Σχήμα 7.4.1.8. διάγραμμα καμπτικών ροπών τυπικής συνδετήριας δοκού

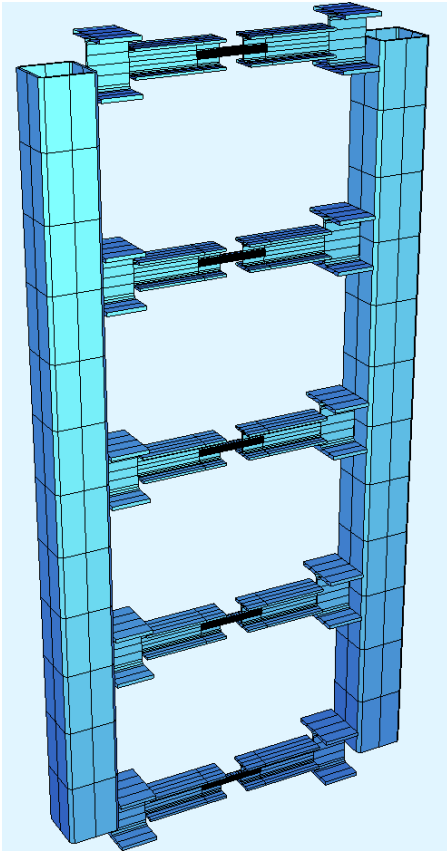


Σχήμα 7.4.1.9. διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης

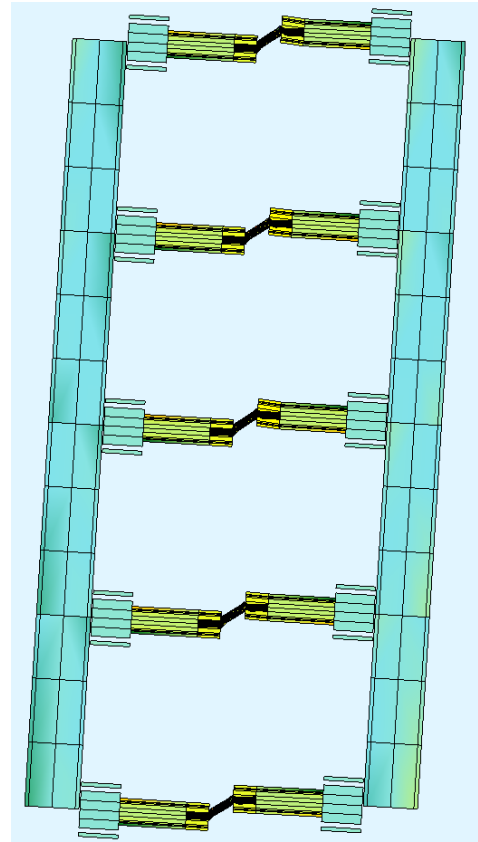


Σχήμα 7.4.1.10. διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης

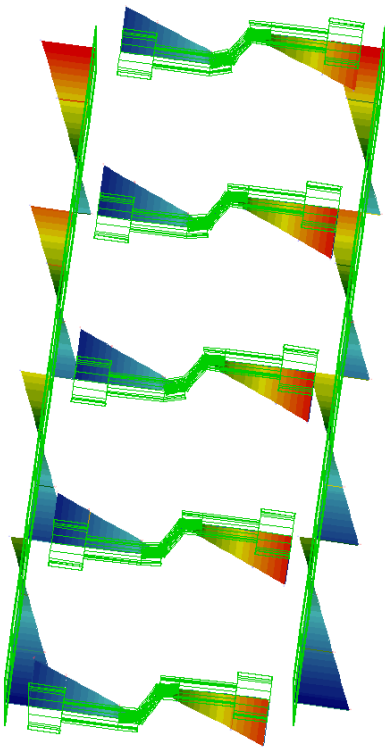
7.4.2 5 BAR (2*12/30) (Πείραμα #5) φορείς προσομοιωμένοι με επάλληλα ραβδόμορφα στοιχεία.



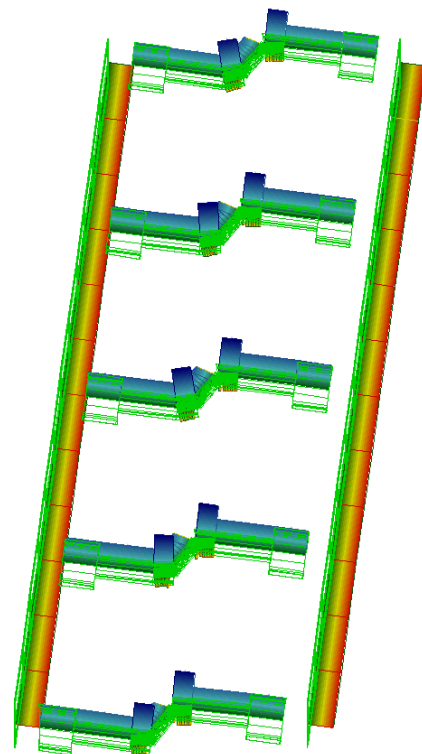
Σχήμα 7.4.2.1. προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



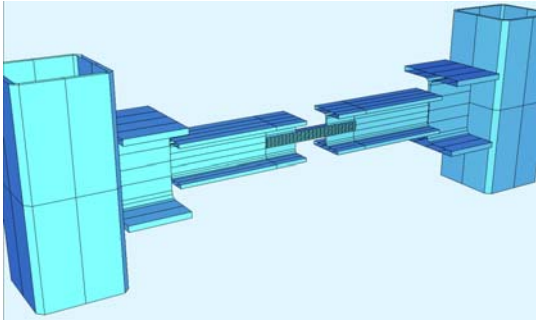
Σχήμα 7.4.2.2. όψη διάταξης στοιχείων φορέα



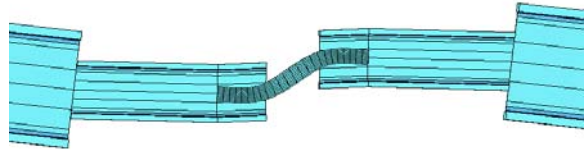
Σχήμα 7.4.2.3. διάγραμμα καμπτικών ροπών



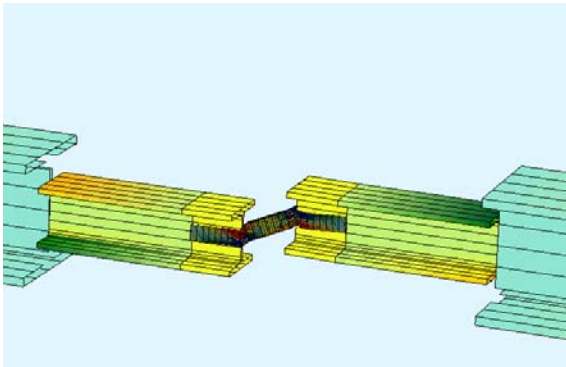
Σχήμα 7.4.2.4. διάγραμμα τεμνουσών



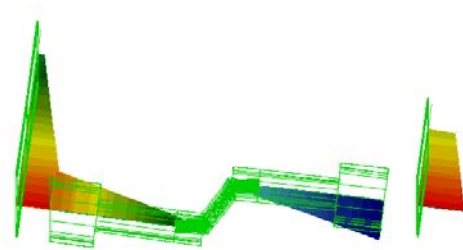
Σχήμα 7.4.2.5. προοπτικό φορέα



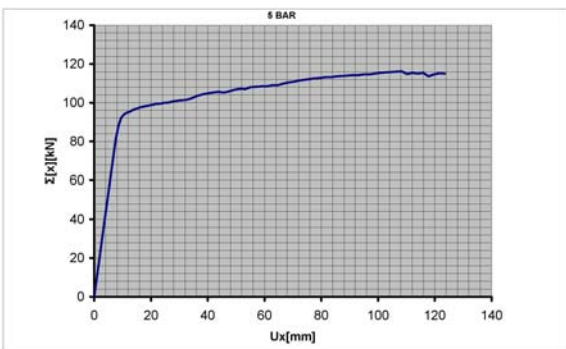
Σχήμα 7.4.2.6. όψη παραμορφωμένου φορέα



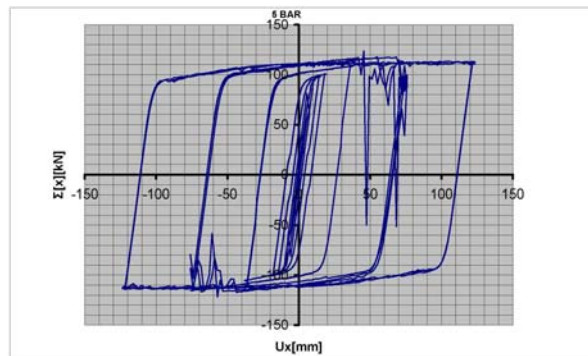
Σχήμα 7.4.2.7. προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



Σχήμα 7.4.2.8. διάγραμμα καμπτικών ροπών τυπικής συνδετήριας δοκού

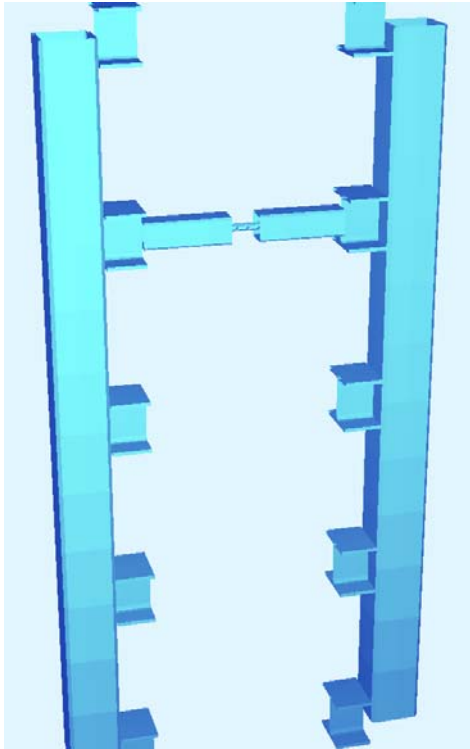


Σχήμα 7.4.2.9. διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης

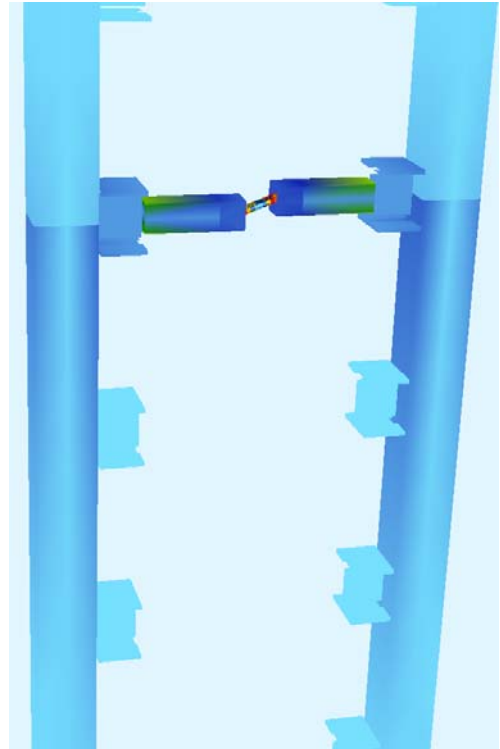


Σχήμα 7.4.2.10. διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης

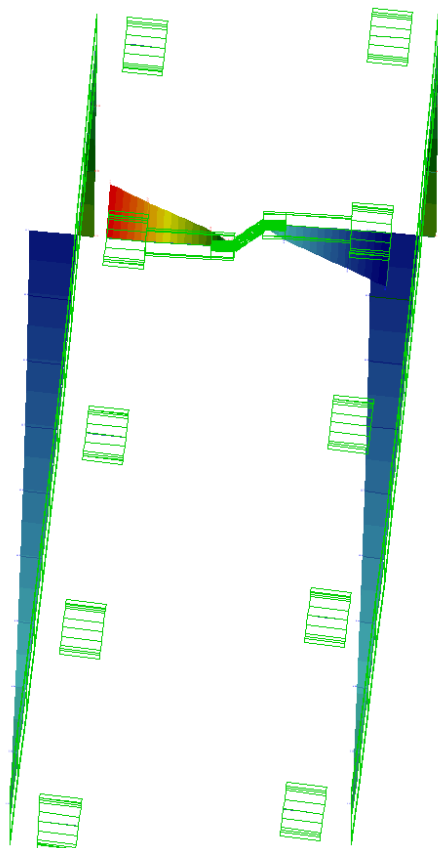
7.4.3 1 rod $\Phi 33$ (Πείραμα #11-12) - φορείς προσομοιωμένοι με επάλληλα ραβδόμορφα στοιχεία.



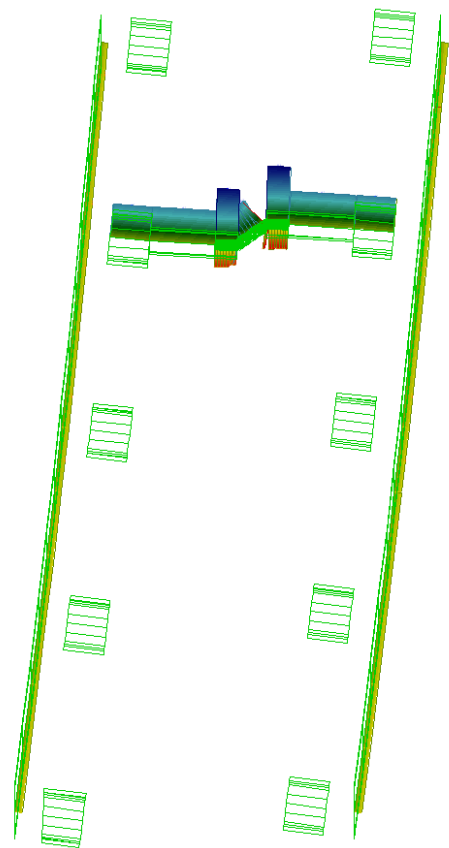
Σχήμα 7.4.3.1. προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



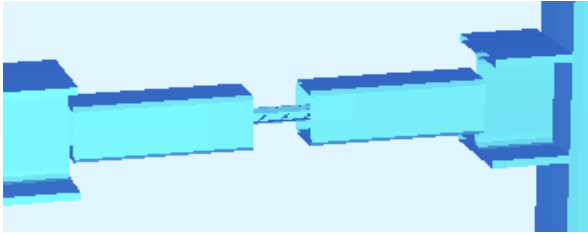
Σχήμα 7.4.3..2. όψη διάταξης στοιχείων φορέα



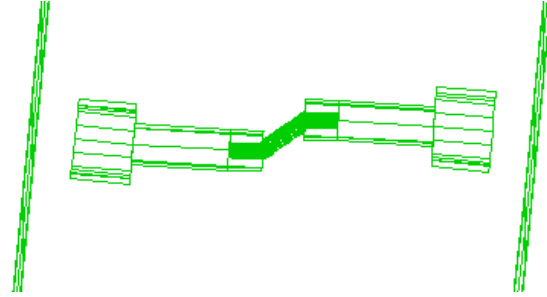
Σχήμα 7.4.3.4. διάγραμμα καμπτικών ροπών



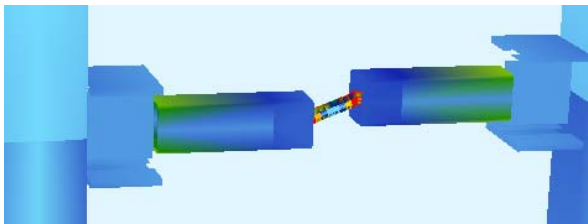
Σχήμα 7.4.3.4. διάγραμμα τενουσιών



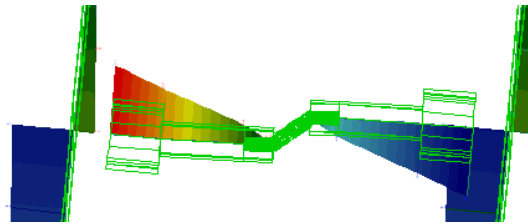
Σχήμα 7.4.3.5. προοπτικό φορέα



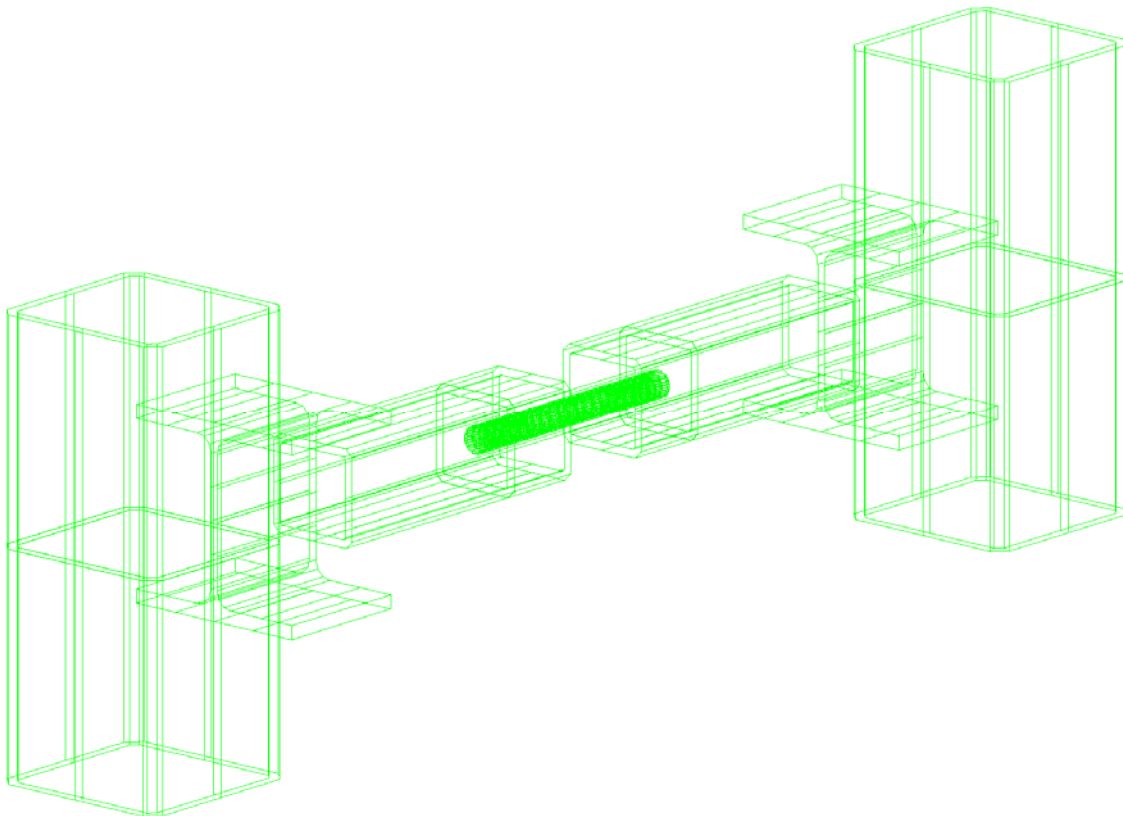
Σχήμα 7.4.3.6. όψη παραμορφωμένου φορέα



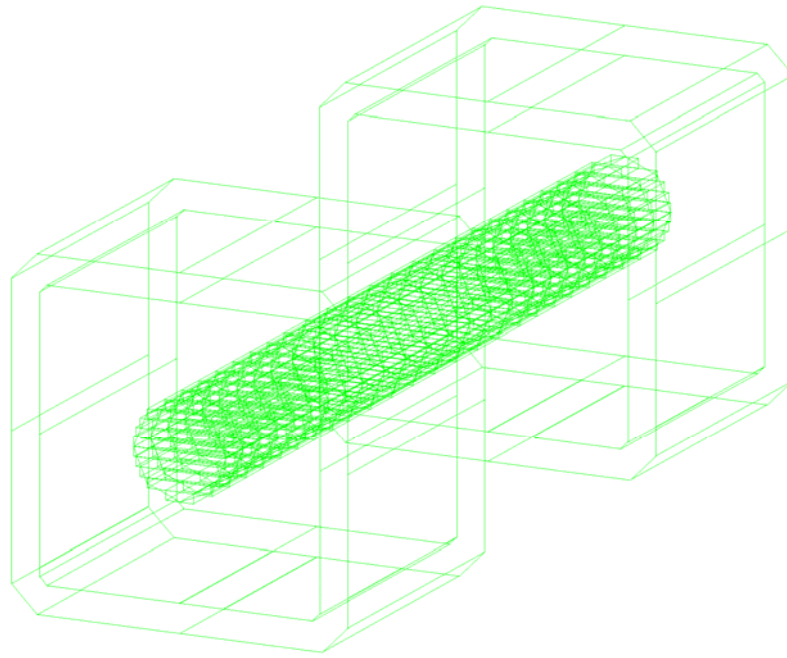
Σχήμα 7.4.3.7. προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



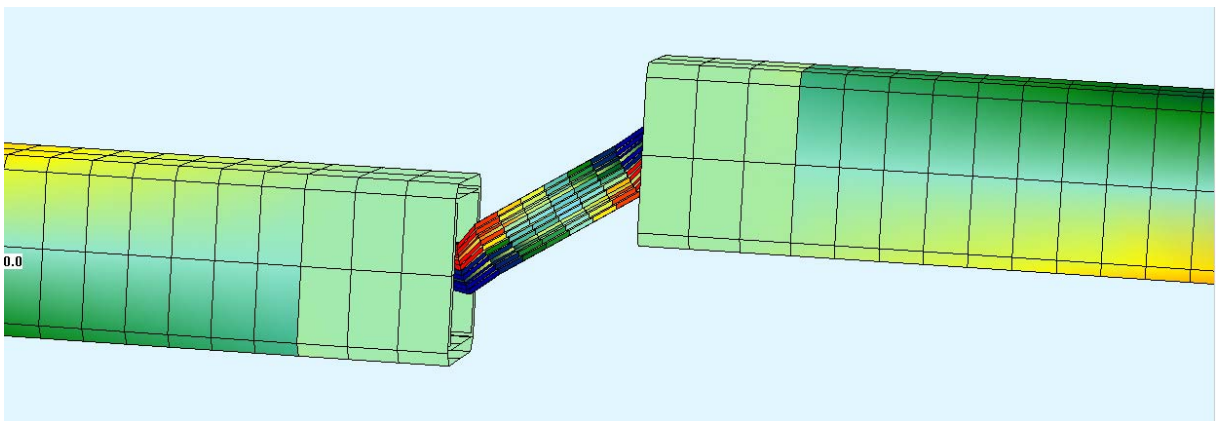
Σχήμα 7.4.3.8. διάγραμμα καμπτικών ροπών τυπικής συνδετήριας δοκού



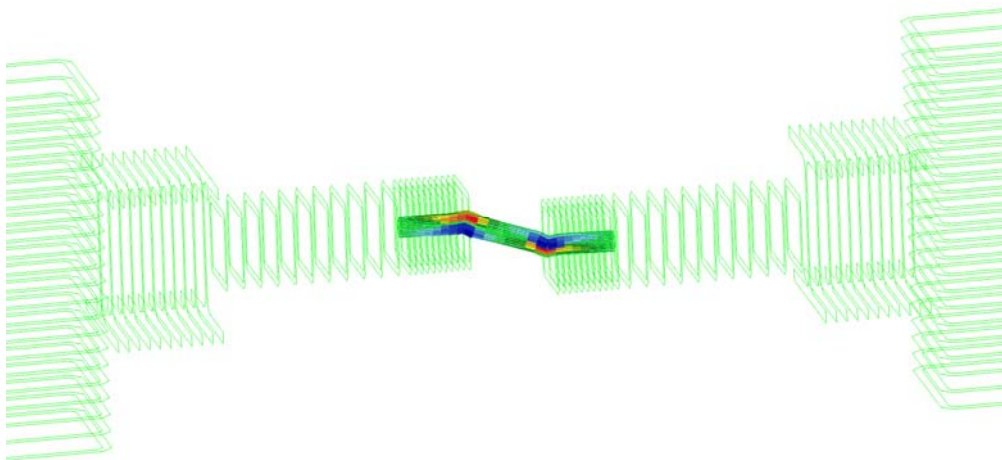
Σχήμα 7.4.3.9. Προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



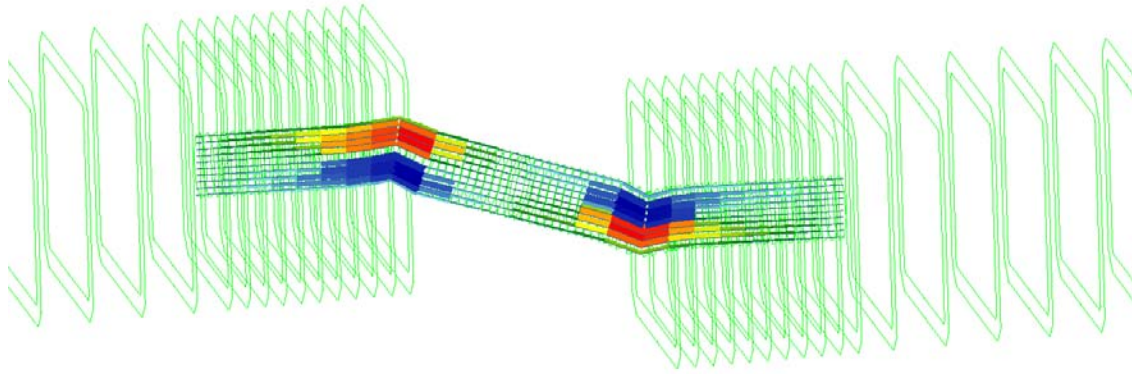
Σχήμα 7.4..3.10. Προοπτικό διάταξης στοιχείων πύρου



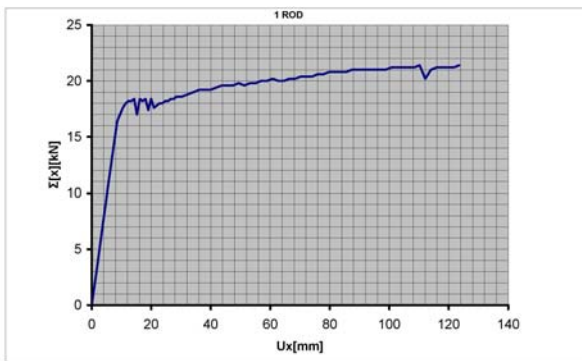
Σχήμα 7.4.3.11. Προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



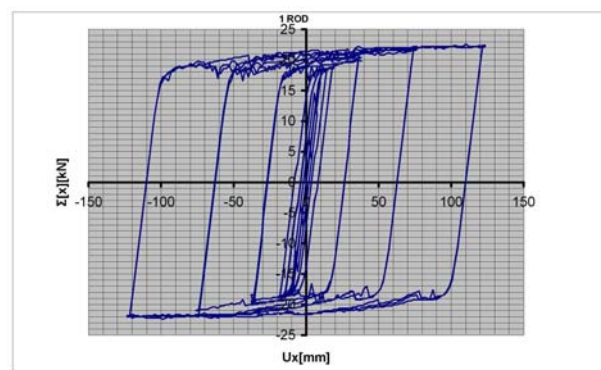
Σχήμα 7.4.3.12. Όψη παραμορφωμένου φορέα



Σχήμα 7.4.3.13. Διάγραμμα τάσεων

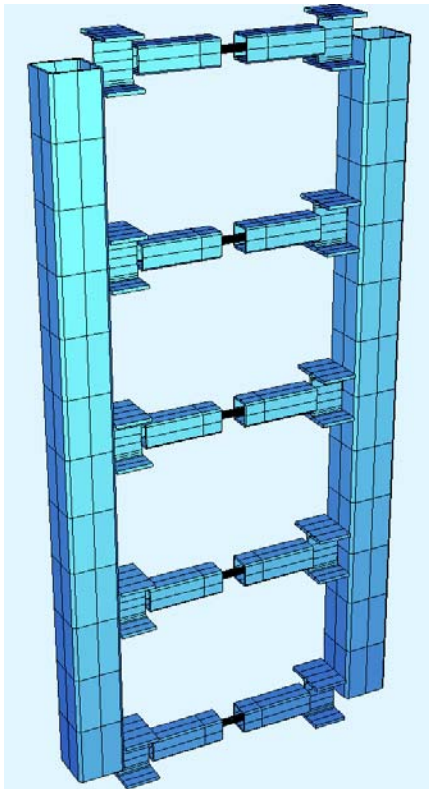


Σχήμα 7.4.3.14. διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης

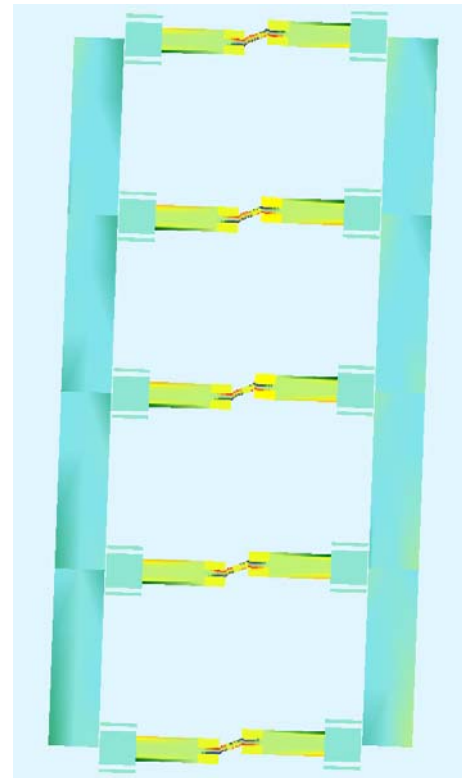


Σχήμα 7.4.3.15. διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης

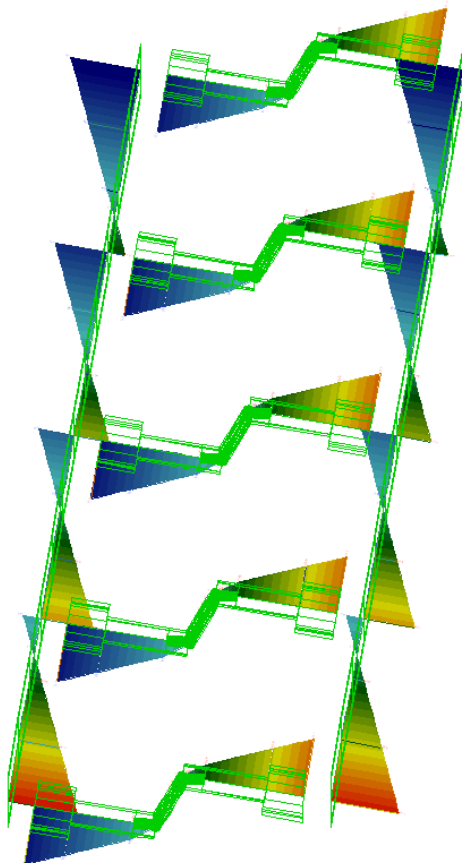
7.4.4 5 rod $\Phi 33$ (Πείραμα #14) - φορείς προσομοιωμένοι με επάλληλα ραβδόμορφα στοιχεία.



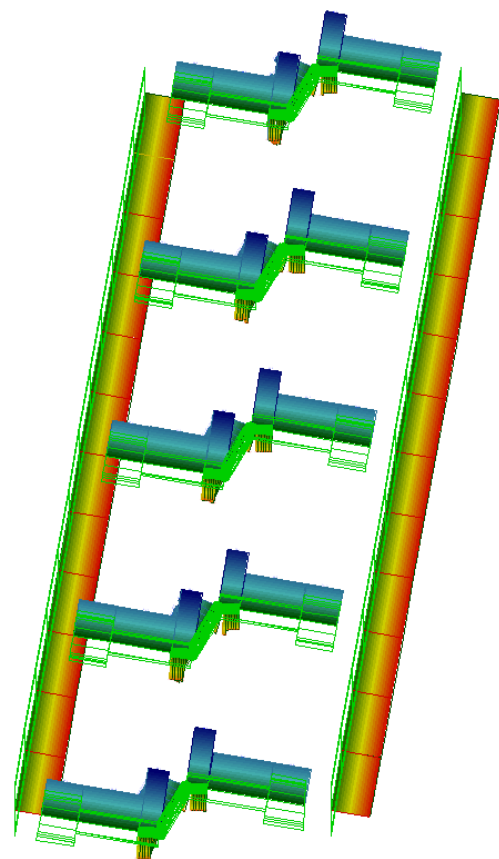
Σχήμα 7.4.4.1. προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



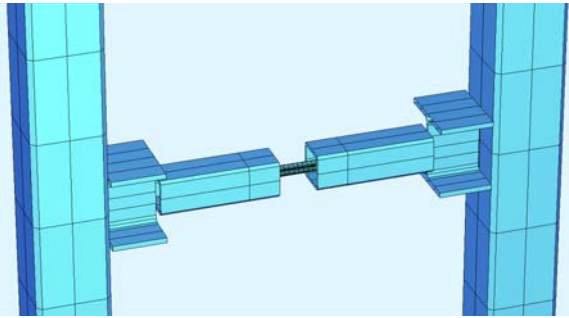
Σχήμα 7.4.4.2. όψη διάταξης στοιχείων φορέα



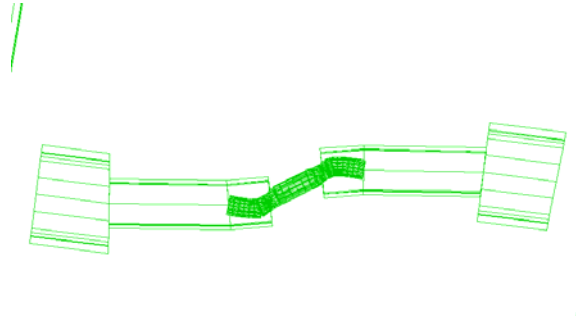
Σχήμα 7.4.4.3. διάγραμμα καμπτικών ροπών



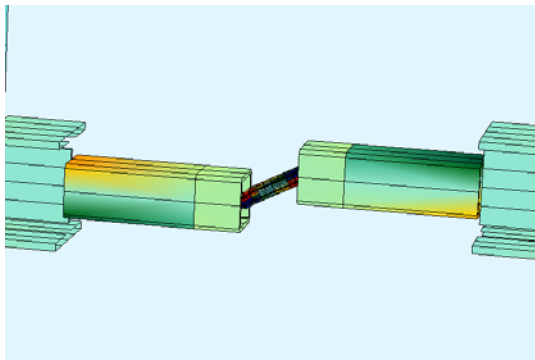
Σχήμα 7.4.4.4. διάγραμμα τεμνουσών



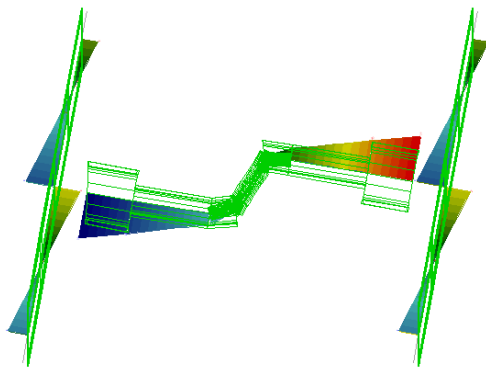
Σχήμα 7.4.4.5. προοπτικό φορέα



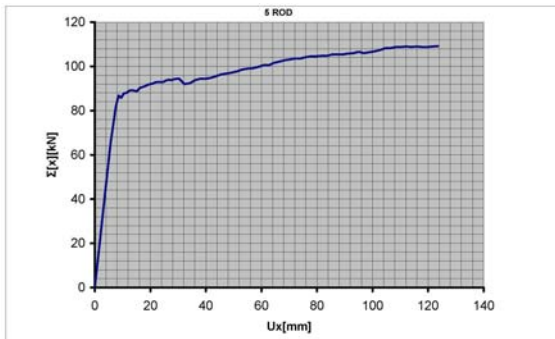
Σχήμα 7.4.4.6. όψη παραμορφωμένου φορέα



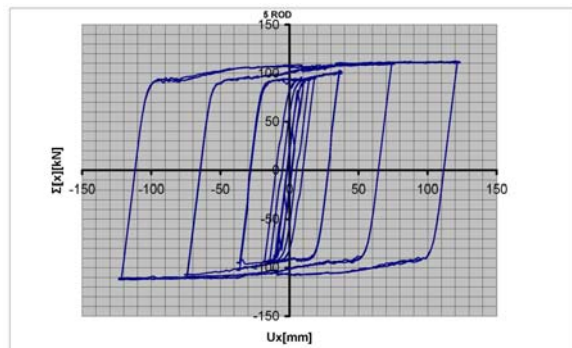
Σχήμα 7.4.4.7. προοπτικό παραμορφωμένου φορέα



Σχήμα 7.4.4.8. διάγραμμα καμπτικών ροπών τυπικής συνδετήριας δοκού

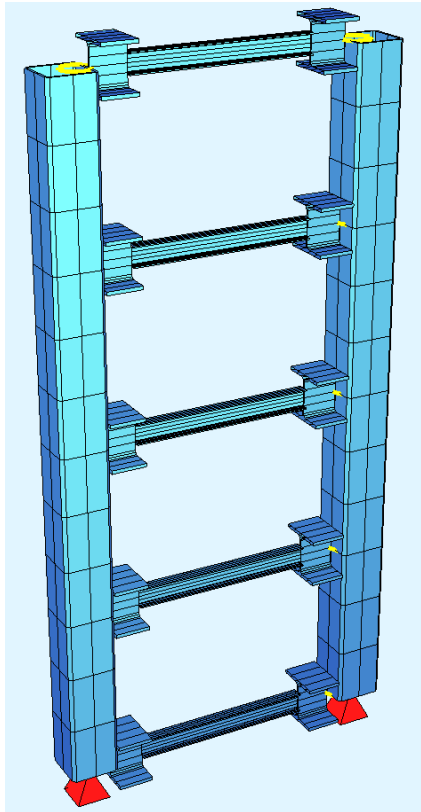


Σχήμα 7.4.4.9. διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης

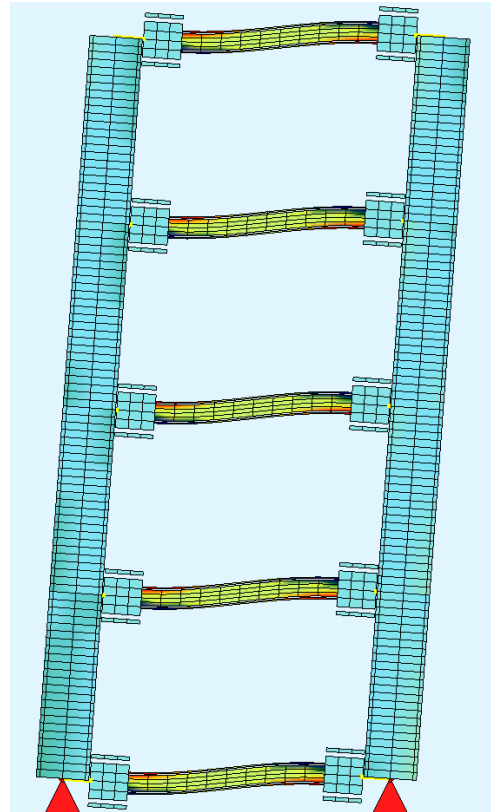


Σχήμα 7.4.4.10. διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης

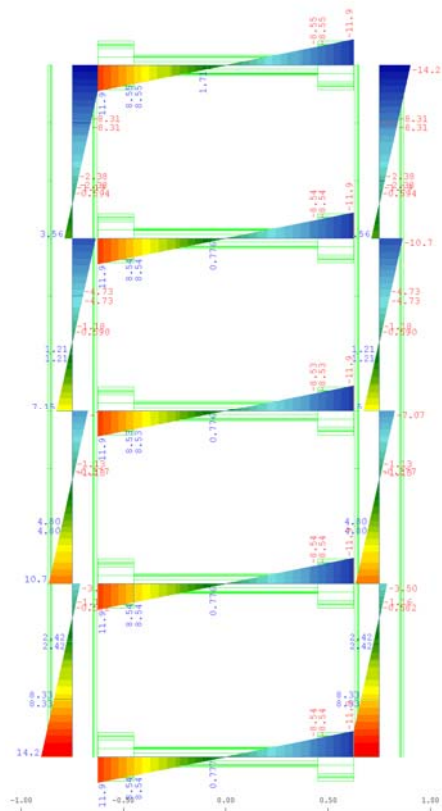
7.5.1 5 IPE 100 – Ανάλυση με χρονοϊστορία διέγερσης - Time history analysis
(Πείραμα #2) – φορείς με ραβδόμορφα στοιχεία



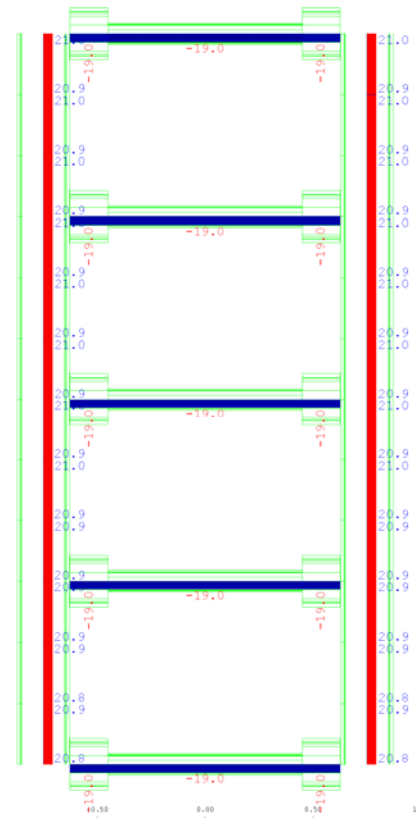
Σχήμα 7.5.1.1. προοπτικό διάταξης στοιχείων φορέα



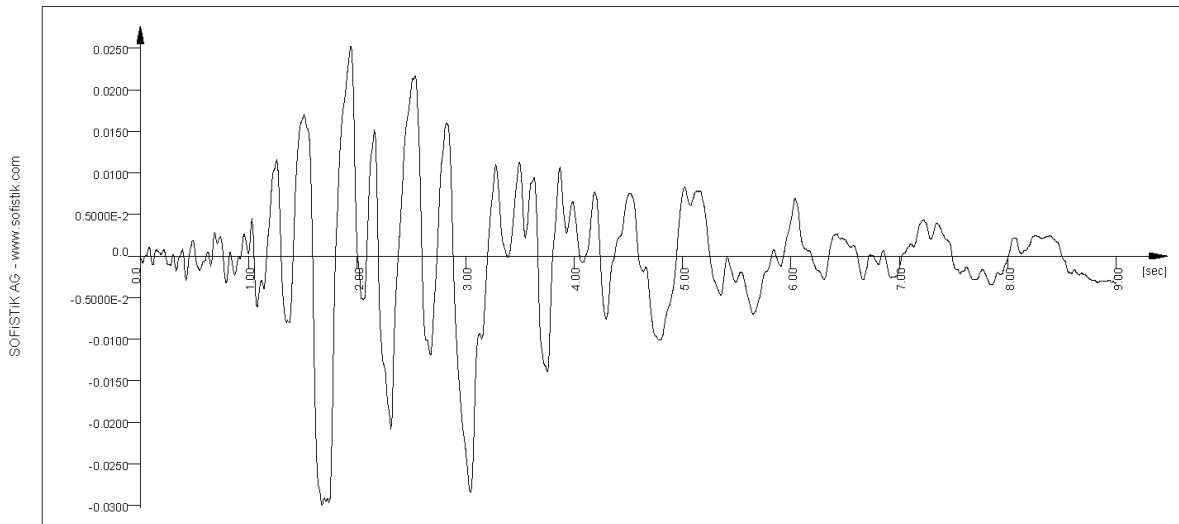
Σχήμα 7.5.1.2. όψη διάταξης στοιχείων φορέα



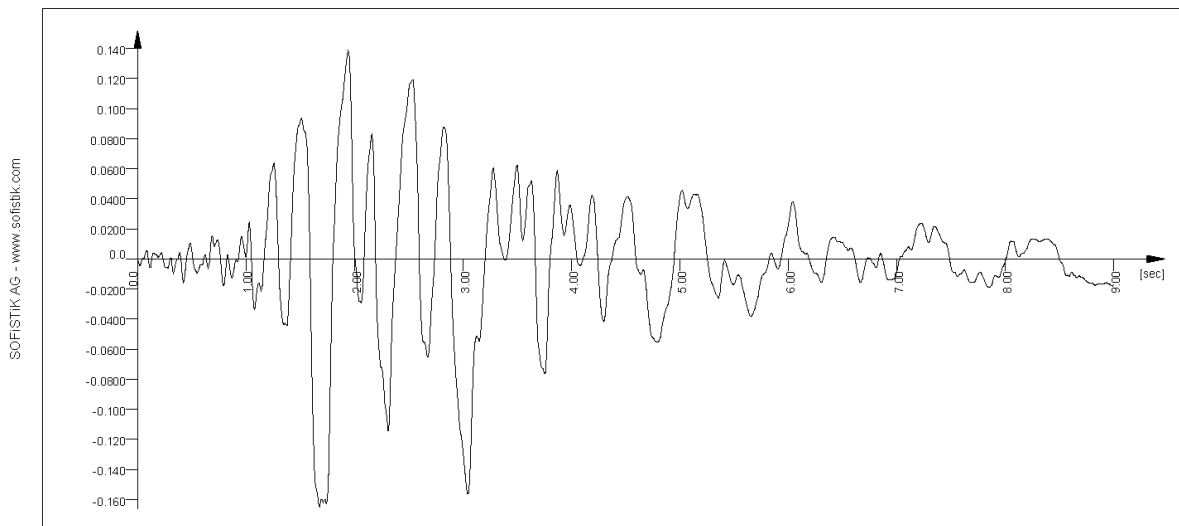
Σχήμα 7.5.1.3. διάγραμμα καμπτικών ροπών



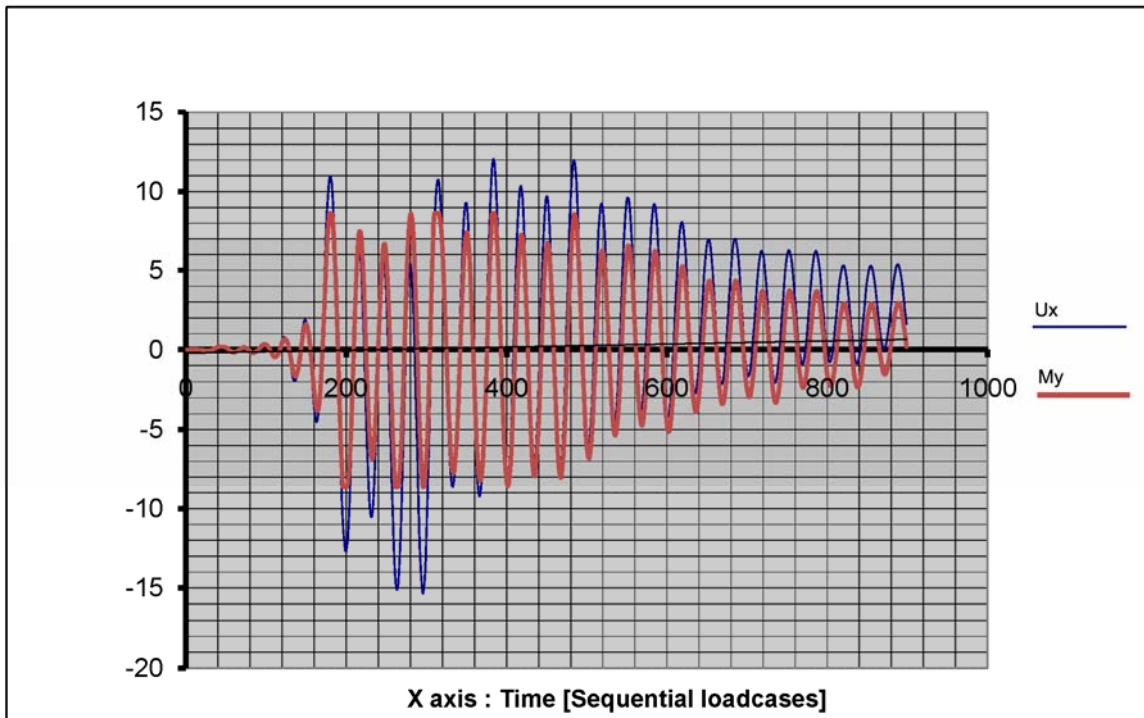
Σχήμα 7.5.1.4. διάγραμμα τεμνουσών



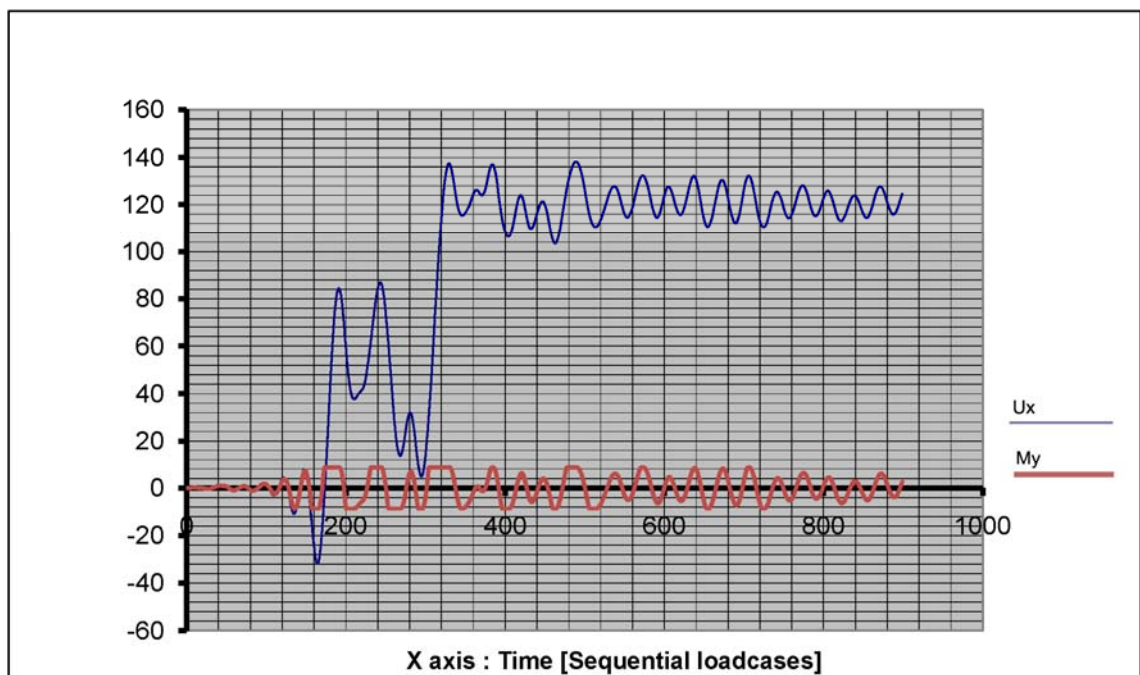
Σχήμα 7.5.1.5. Επιταχυνσιογράφημα σεισμού Καλαμάτας (αρχικό)



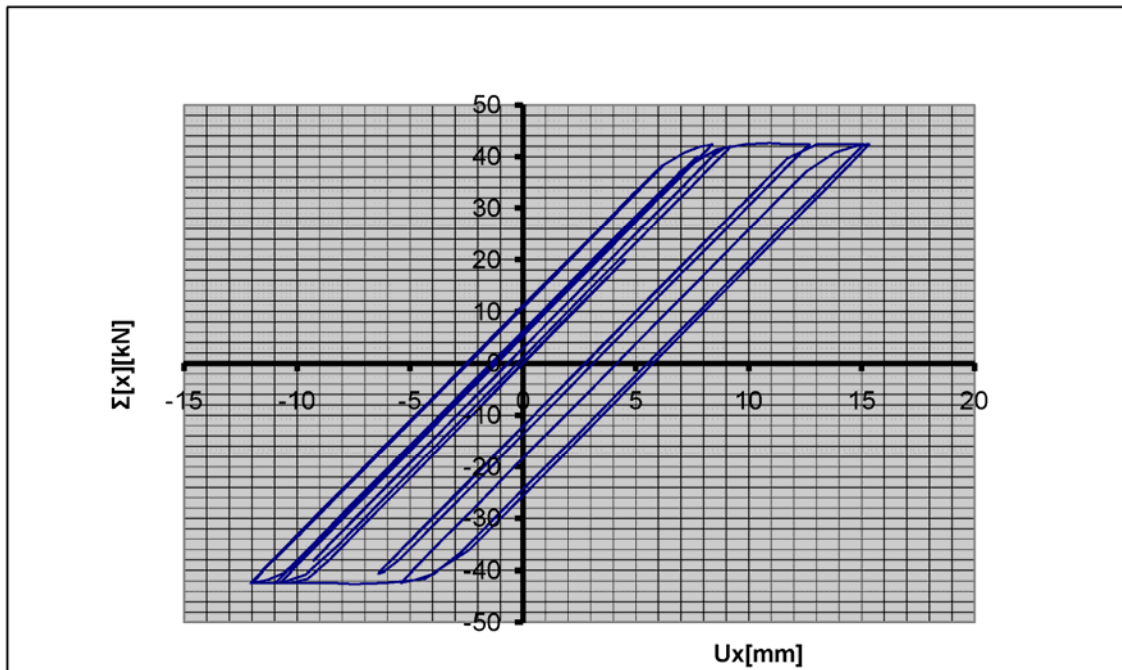
Σχήμα 7.5.1.6. Επιταχυνσιογράφημα σεισμού Καλαμάτας (μεγεθυμένο 5.49 φορές)



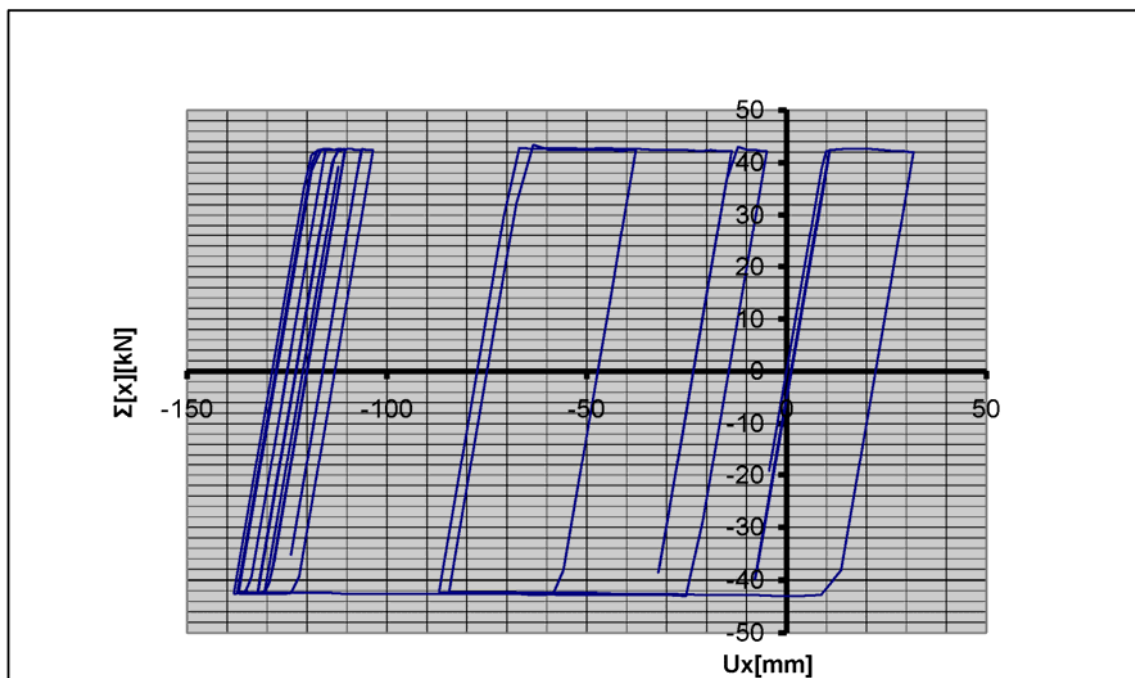
Σχήμα 7.5.1.7. Διάγραμμα χρονοιστορίας μετακινήσεων και ροπών Επιταχυνσιογράφημα σεισμού Καλαμάτας (αρχικό)



Σχήμα 7.5.1.8. Διάγραμμα χρονοιστορίας μετακινήσεων και ροπών Επιταχυνσιογράφημα σεισμού Καλαμάτας (μεγεθυμένο 5.49 φορές)



Σχήμα 7.5.1.9. Διάγραμμα χρονοϊστορίας μετακινήσεων δυνάμεων
Επιταχυνσιογράφημα σεισμού Καλαμάτας (αρχικό)

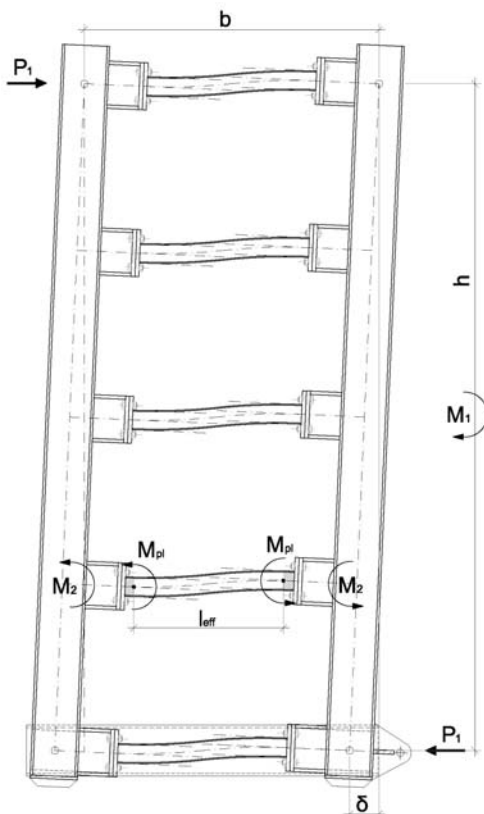


Σχήμα 7.5.1.10. Διάγραμμα χρονοϊστορίας μετακινήσεων δυνάμεων
Επιταχυνσιογράφημα σεισμού Καλαμάτας (μεγεθυμένο 5.49 φορές)

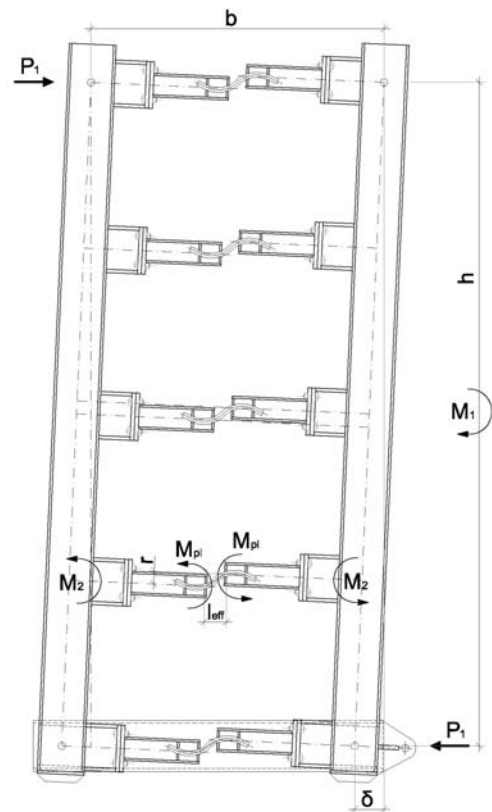
8. Συγκριτική παρουσίαση πειραματικών και αναλυτικών διερευνήσεων.

Το σύστημα INSTED, βασίζεται στη μόρφωση μίας κατακόρυφης δοκού Vierendeel, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά στοιχεία που παρουσιάζονται στα σχήματα 8.1 & 8.2:

- ύψος h , το ύψος ενός ορόφου, η απόσταση μεταξύ δύο οριζοντίων διαφραγμάτων
- πλάτος b , η αξονική απόσταση μεταξύ των κατακορύφων υποστυλωμάτων - πελμάτων της Vierendeel
- δ η επιβεβλημένη οριζόντια (σεισμική) μετακίνηση, που αντιστοιχεί στη μεταξύ των διαφραγμάτων οριζόντια σχετική μετακίνηση (infer storey drift)
- P_1 οριζόντια αντίσταση της κατακόρυφης Vierendeel και M_1 η συνολική ροπή
- M_2 οι ροπές που αναπτύσσονται στους κόμβους στις συνδεδεμένες δοκούς και M_{pl} οι ροπές στις θέσεις που επιλέγονται και μορφώνονται κατάλληλα για τη δημιουργία των πλαστικών αρθρώσεων
- l_{eff} η απόσταση μεταξύ των πλαστικών αρθρώσεων



Σχήμα 8.1. Η γεωμετρία, τα επιβαλλόμενα μεγέθη και οι ροπές στο σύστημα INSTED με ολόσωμες συνδεδεμένες δοκούς.

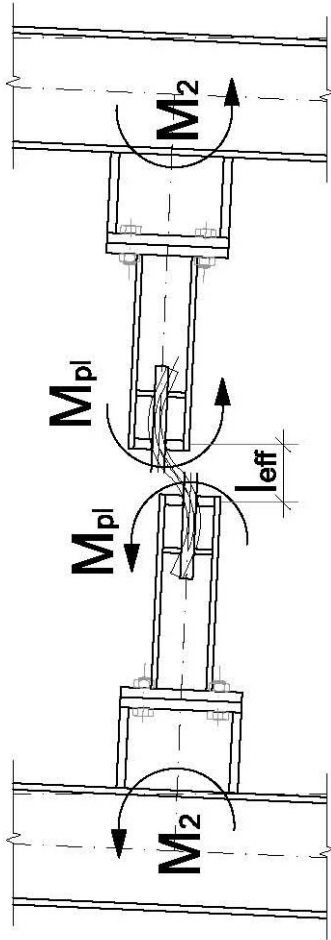


Σχήμα 8.2. Η γεωμετρία, τα επιβαλλόμενα μεγέθη και οι ροπές στο σύστημα INSTED με κεντρικές ράβδους τύπου INERD.

Η σχέση που δίνει τη συνολική οριζόντια αντίσταση της κατακόρυφης Vierendeel του συστήματος INSTED είναι:

$$P_1 = \sum_{n=1}^N M_{pl} \frac{2 \times b}{h \times l_{eff}}$$

Με βάση τα παραπάνω γεωμετρικά στοιχεία, την ισορροπία του φορέα και τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτουν τα συγκεντρωτικά στοιχεία του πίνακα:



ΚΑΙΝΟΤΟΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
(INSTED)

ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΥΨΟΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΣΤΥΛΩΝ

$h = 3.40$ m

$f_{y(s235)} = 23,5$ kN/cm²

$b = 1.50$ m

$f_{y(stest)} = 33,5$ kN/cm²

$f_{u(stest)} = 42$ kN/cm²

ΔΙΑΤΟΜΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	Ενεργό μήκος	Wel	MeI(s235)	MeI(stest)	Wpl	Mpl(s235)	Mpl(stest)	Mu(stest)	P1y ^{s235}	P1y ^{stest}	P1u ^{stest}	P1y ^{exp}	P1u ^{exp}	P1y ^{cal}
	cm	cm ³	kNcm	kNcm	cm ³	kNcm	kNcm	kNcm	kN	kN	kN	kN	kN	kN
1 IPE100	76,0	34,2	803,7	1.145,7	39,4	925,9	1319,9	1654,8	10,7	15,3	19,2	14,2	20,5	10,0
2 IPE100	76,0	34,2	803,7	1.145,7	39,4	925,9	1319,9	1654,8	53,7	76,6	96,1	75,0	100,0	47,0
3 SHS 80/5	76,0	34,7	815,5	1.162,5	41,7	980,0	1397,0	1751,4	56,9	81,1	101,7	78,0	108,0	52,0
4 bar 2*12/30	11,0	3,6	84,6	120,6	5,4	126,9	180,9	226,8	10,2	14,5	18,2	20,0	24,0	10,0
5 bar 2*12/30	11,0	3,6	84,6	120,6	5,4	126,9	180,9	226,8	50,9	72,6	91,0	75,0	126,0	4,0
6 HE-A 100	76,0	72,8	1.709,9	2.437,5	83,0	1950,7	2780,8	3486,4	113,2	161,4	202,4	150,0	150,0	86,0
7 HE-A 100	76,0	72,8	1.709,9	2.437,5	83,0	1950,7	2780,8	3486,4	22,6	32,3	40,5	30,0	38,0	17,0
8 IPE80-160	76,0								91,6	130,5	163,6	150,0	150,0	86,0
9 SHS 80/5 H	76,0								40,5	57,8	72,4	60,0	76,0	42,0
10 HE-A 100 DB	76,0								84,5	120,4	151,0	120,0	150,0	65,0
11 rod Φ33 1s	12,5	3,5	83,0	118,3	6,0	140,8	200,7	251,6	9,9	14,2	17,8	15,0	23,0	9,8
12 rod Φ33 2s	12,5	3,5	83,0	118,3	6,0	140,8	200,7	251,6	9,9	14,2	17,8	15,0	23,0	
13 rod Φ33 2s	12,5	3,5	83,0	118,3	6,0	140,8	200,7	251,6	9,9	14,2	17,8	15,0	30,0	
14 rod Φ33 1s	12,5	3,5	83,0	118,3	6,0	140,8	200,7	251,6	49,7	70,8	88,8	78,0	120,0	48,0
15 rod Φ33 1s	9,0								27,6	39,3	49,3	40,0	63,0	

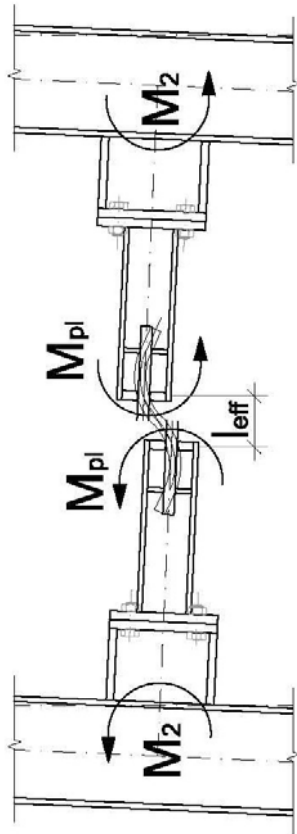
Σχήμα 8.3. Η γεωμετρία, τα επιβαλλόμενα μεγέθη και οι ροπές στο σύστημα INSTED με κεντρικές ράβδους τύπου INERD.

Πίνακας 8.1. Πειραματικά και αναλυτικά αποτελέσματα δυνάμεις και ροπές στις διάφορες διατάξεις του συστήματος INSTED για ολόσωμες δοκούς και κεντρικές ράβδους τύπου INERD.

Στον παραπάνω πίνακα 8.1, η θεωρητική αντίσταση της δοκού Vierendeel, η οποία αντιστοιχεί στις 15 διατάξεις του συστήματος INSTED που εξετάστηκαν είναι:

P_{1y}^{S235}	για τη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των δοκών με τάση διαρροής του χάλυβα $f_y=23.5 \text{ kN/cm}^2$ που αντιστοιχεί στη χαρακτηριστική τιμή της τάσης διαρροής για χάλυβα ποιότητας S235, Η τιμή αυτή προέκυψε με απλή αριθμητική ανάλυση, ισορροπία των ροπών και δυνάμεων με τη θεώρηση των στύλων στερεών.
P_{1y}^{Stest}	για τη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των δοκών με τάση διαρροής του χάλυβα $f_y=33.5 \text{ kN/cm}^2$ που αντιστοιχεί στην πειραματικά μετρημένη τιμή για την τάση διαρροής του χάλυβα θεωρητικής ποιότητας S235, η οποία χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα. Η τιμή αυτή προέκυψε με απλή αριθμητική ανάλυση, ισορροπία των ροπών και δυνάμεων με τη θεώρηση των στύλων ως στερεών.
P_{1u}^{Stest}	για τη θραύση των δοκών στη θέση των πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα τους, λόγω εξάντλησης της αντοχής τους με τάση θραύσης του χάλυβα $f_u=42.0 \text{ kN/cm}^2$ που αντιστοιχεί στην πειραματικά μετρημένη τιμή για την τάση θραύσης του χάλυβα θεωρητικής ποιότητας S235, η οποία χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα, μετά την εξάντληση της κράτυνσης. με απλή αριθμητική ανάλυση, ισορροπία των ροπών και δυνάμεων με τη θεώρηση των στύλων στερεών.
P_{1y}^{exp}	για τη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των δοκών, όπως αυτή μετρήθηκε πειραματικά, και καταγράφηκε στα διαγράμματα των κύκλων υστέρησης. Αντιστοιχεί στην πειραματικά μετρημένη τιμή για την τάση διαρροής του χάλυβα θεωρητικής ποιότητας S235, η οποία χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα και ήταν $f_y=33.5 \text{ kN/cm}^2$. Η τιμή αυτή προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις.
P_{1u}^{exp}	για την αστοχία των δοκών, με εξάντληση της αντοχής τους, με θραύση στις θέσεις των πλαστικών αρθρώσεων, όπως αυτή μετρήθηκε πειραματικά και καταγράφηκε στα διαγράμματα των κύκλων υστέρησης. Αντιστοιχεί στην πειραματικά μετρημένη τιμή θραύσης του χάλυβα θεωρητικής ποιότητας S235, που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα και ήταν $f_u=42.0 \text{ kN/cm}^2$. Η τιμή αυτή προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις.
P_{1y}^{cal}	για τη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των δοκών, όπως αυτή υπολογίστηκε από τα γραμμικά προσομοιώματα με τα αντίστοιχα διαγράμματα που περιέχονται στο κεφάλαιο 7. Αντιστοιχεί στη χαρακτηριστική τιμή για την τάση διαρροής του χάλυβα θεωρητικής ποιότητας S235. Η τιμή αυτή προέκυψε από τις αναλύσεις των γραμμικών προσομοιωμάτων του κεφαλαίου 7.

Για τον υπολογισμό των τιμών του πίνακα 8.1 για τις περιπτώσεις μεταβλητών διατομών στις συνδετήριες δοκούς και συγκεκριμένα για το πείραμα #8, IPE 80 έως IPE 160, το πείραμα #9 με δοκούς SHS 80/5 με διαφορετικές επιμήκεις οπές, το πείραμα #10 με δοκούς HE-A 100 με διαφορετικού βάθους εγκοπές (dog bones) και το πείραμα #15, με διαφορετικές δακτυλοειδείς εγκοπές στις κυκλικές κεντρικές ράβδους τύπου INERD, χρησιμοποιήθηκαν συμπληρωματικοί πίνακες για κάθε τύπου ράβδου, οπότε οι συνολικές δυνάμεις P1, προέκυψαν από το άθροισμα των επί μέρους δυνάμεων για κάθε δοκό, πάλι με τη θεώρηση των στύλων απαραμόρφωτων.



Σχήμα 8.4. Η γεωμετρία, τα επιβαλλόμενα μεγέθη και οι ροπές στο σύστημα INSTED με κεντρικές ράβδους τύπου INERD.

ΔΙΑΤΟΜΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	Ενεργό μήκος	Wel	MeI(s235)	MeI(s235)	MeI(s235)	Wpl	Mpl(s235)	Mpl(s235)	Mpl(s235)	MuI(s235)	P1y ^{s235}	P1y ^{SteeI}	P1U ^{SteeI}
8	1	76,0	20,0	470,7	671,0	23,2	545,7	777,9	975,2	6,3	9,0	11,3	
	1	76,0	34,2	803,7	1.145,7	39,4	926,1	1.320,2	1.655,2	10,8	15,3	19,2	
	1	76,0	53,0	1.244,6	1.774,2	60,7	1.427,2	2.034,5	2.550,7	16,6	23,6	29,6	
	1	76,0	77,3	1.817,0	2.590,2	88,3	2.076,0	2.959,4	3.710,3	24,1	34,4	43,1	
	5	76,0	108,7	2.554,5	3.641,5	123,9	2.911,7	4.150,7	5.203,8	33,8	48,2	60,4	
9	1	76,0	19,7	463,0	660,0	26,7	627,5	894,5	1.121,4	7,3	10,4	13,0	
	1	76,0	21,2	498,2	710,2	28,2	662,7	944,7	1.184,4	7,7	11,0	13,8	
	1	76,0	22,7	533,5	760,5	29,7	698,0	995,0	1.247,4	8,1	11,6	14,5	
	1	76,0	24,2	568,7	810,7	31,2	733,2	1.045,2	1.310,4	8,5	12,1	15,2	
	5	76,0	25,7	604,0	861,0	32,7	768,5	1.095,5	1.373,4	8,9	12,7	15,9	
10	1	76,0	44,66	1.049,5	1.496,1	54,91	1.290,4	1.839,5	2.305,2	15,0	21,4	26,8	
	1	76,0	48,16	1.131,8	1.613,4	58,41	1.372,6	1.956,7	2.453,2	15,9	22,7	28,5	
	1	76,0	51,66	1.214,0	1.730,6	61,91	1.454,9	2.074,0	2.600,2	16,9	24,1	30,2	
	1	76,0	55,16	1.296,3	1.847,9	65,41	1.537,1	2.191,2	2.747,2	17,8	25,4	31,9	
	5	76,0	58,68	1.379,0	1.955,8	68,93	1.619,9	2.309,2	2.895,1	18,8	26,8	33,6	
15	1	9,0	0,78	18,3	26,1	1,33	31,3	44,6	55,9	3,1	4,4	5,5	
	1	9,0	1,04	24,4	34,8	1,77	41,6	59,3	74,3	4,1	5,8	7,3	
	1	9,0	1,35	31,7	45,2	2,3	54,1	77,1	96,6	5,3	7,6	9,5	
	1	9,0	1,72	40,4	57,6	2,92	68,6	97,8	122,6	6,7	9,6	12,0	
	5	9,0	2,15	50,5	72,0	3,65	85,8	122,3	153,3	8,4	12,0	15,0	
										27,6	39,3	49,3	

Πίνακας 8.2. Πειραματικά και αναλυτικά αποτελέσματα δυνάμεις και ροπές στις διατάξεις του συστήματος INSTED με μεταβλητές συνδετήριες δοκούς .

Από τη συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της συμπεριφοράς των διαφόρων διατάξεων του συστήματος INSTED, προκύπτει μία ικανοποιητική προσέγγιση των αναλυτικών αποτελεσμάτων, είτε των απλών προσεγγίσεων, είτε των πιο σύνθετων μοντέλων, με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Οι διαφορές καλύπτονται από την υποκατάσταση του θεωρητικού διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων του χάλυβα, με αυτό που προκύπτει από την πειραματική καμπύλη, από με βάση τα δοκίμια που αφορούν στο συγκεκριμένο χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα.

ΚΑΙΝΟΤΟΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
(INSTED)

ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΥΨΟΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ $h = 3.40$ m $f_{yA(S235)} = 23,5$ kN/cm²
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΣΤΥΛΩΝ $b = 1.50$ m $f_{yA(Stest)} = 33,5$ kN/cm²
 $f_{u(Stest)} = 42$ kN/cm²

	ΔΙΑΤΟΜΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		Ενεργό μήκος	$P_{1\gamma}^{S235}$	$P_{1\gamma}^{Stest}$	P_{1u}^{Stest}	$P_{1\gamma}^{exp}$	P_{1u}^{exp}	$P_{1\gamma}^{cal}$	$\Delta P_{1\gamma}/P_{1\gamma}$	$\Delta P_{1u}/P_{1u}$
			cm	kN	kN	kN	kN	kN	kN		
1	IPE100	1	76,0	10,7	15,3	19,2	14,2	20,5	10,0	8%	-6%
2	IPE100	5	76,0	53,7	76,6	96,1	75,0	100,0	47,0	2%	-4%
3	SHS 80/5	5	76,0	56,9	81,1	101,7	78,0	108,0	52,0	4%	-6%
4	bar 2*12/30	1	11,0	10,2	14,5	18,2	14,0	24,0	18,0	4%	-24%
5	bar 2*12/30	5	11,0	50,9	72,6	91,0	75,0	126,0	98,0	-3%	-28%
6	HE-A 100	5	76,0	113,2	161,4	202,4	150,0	150,0	86,0		
7	HE-A 100	1	76,0	22,6	32,3	40,5	30,0	38,0	17,0	8%	7%
8	IPE80-160	5	76,0	91,6	130,5	163,6	150,0	150,0	86,0		
9	SHS 80/5 H	5	76,0	40,5	57,8	72,4	60,0	76,0	42,0	-4%	-5%
10	HE-A 100 DB	5	76,0	84,5	120,4	151,0	120,0	150,0	65,0	0%	1%
11	rod Φ33 1s	1	12,5	9,9	14,2	17,8	15,0	23,0	18,0	-6%	-23%
12	rod Φ33 2s	1	12,5	9,9	14,2	17,8	15,0	23,0		-6%	-23%
13	rod Φ33 2s	1	12,5	9,9	14,2	17,8	15,0	30,0		-6%	-41%
14	rod Φ33 1s	5	12,5	49,7	70,8	88,8	78,0	120,0	87,0	-9%	-26%
15	rod Φ33 1s	5	9,0	27,6	39,3	49,3	40,0	63,0		-2%	-22%

Πίνακας 8.3. Ποσοστιαίες αποκλίσεις στα πειραματικά και αναλυτικά αποτελέσματα στις διατάξεις του συστήματος INSTED με μεταβλητές συνδετήριες δοκούς .

Παρατηρώντας τον παραπάνω συγκεντρωτικό πίνακα, στις δύο τελευταίες στήλες που παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες (%) αποκλίσεις των αναλυτικών από τα πειραματικά αποτελέσματα σε διαρροή και θραύση, είναι προφανής η ικανοποιητική σύγκληση στα επιτυχημένα πειράματα. Εξαιρούνται αυτά που ο λόγος δυσκαμψίας και αντοχής ξεπερνούσε τη δυνατότητα του πλαισίου δοκιμών (IPE 80-160 και HE-A 100).

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις δύο τελευταίες στήλες, οι αποκλίσεις στη φάση της δημιουργίας των πλαστικών αρθρώσεων είναι της τάξης του 2-8 %, και αντίστοιχες επίσης στη φάση της αστοχίας.

Παρουσιάζεται μία σημαντική αύξηση της συνολικής αντίστασης σε θραύση, της τάξης του 25%, για κεντρικές ράβδους τύπου INERD, που καταδεικνύουν τον ιδιαίτερα επιτυχή σχεδιασμό, με μεγάλα περιθώρια αντοχής σε επίπεδο αστοχίας.

Αυτό εν πολλοίς οφείλεται στην ανάπτυξη σημαντικής αντίστασης και λόγω αξονικής παραμόρφωσης και έντασης των κεντρικών ράβδων, είτε αυτές είναι κοχλιωτές, είτε ελεύθερες να ολισθήσουν.

Και στην περίπτωση της ελεύθερης μετακίνησης, με ορθογωνικές ράβδους, η κυκλική με μονόπλευρη κοχλίωση, η παγίωση δημιουργείται με την τοπική παραμόρφωση της ράβδου στα σημεία στήριξης, που εξασφαλίζει τη μεταφορά αξονικών δυνάμεων χωρίς άλλη μορφή εξασφάλισης.

Η ουσιαστική συνεισφορά της συγκεκριμένης έρευνας είναι στη διερεύνηση όχι τόσο των μηχανισμών διαρροής και δημιουργίας των πλαστικών αρθρώσεων, που είναι προφανής, αλλά της δυνατότητας του συστήματος να διατηρεί τη δομική του ακεραιότητα με την είσοδο του στην κράτυνση και την εξασφάλιση μεγάλης πλαστικής παραμόρφωσης που να αντιστοιχεί σε ικανές ποσότητες απορρόφησης ενέργειας, στη διατήρηση της υπάρχουσας σημαντικής πρόσθετης ασφάλειας του χάλυβα.

Από τα πειράματα, προέκυψε ότι, εφ' όσον δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν πλαστικές ζώνες μεγάλου σχετικά μήκους, αποφεύγοντας φαινόμενα ολιγοκυκλικής κόπωσης και τραυματισμού των δοκιμίων, το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει όλα τα δομικά πλεονεκτήματα του χάλυβα και να οδηγήσει σε αντισεισμική συμπεριφορά ασφαλούς και οικονομικού σχεδιασμού.

9. Μεθοδολογία σχεδιασμού.

9.1. Αναλυτικά προσομοιώματα.

Το σύστημα INSTED, στην απλή του μορφή, αποτελείται από μια κατακόρυφη δοκό Vierendeel, που μπορεί χωρίς δυσκολίες να προσομοιωθεί με ένα δίστυλο πολυώροφο πλαίσιο το οποίο αποτελεί τμήμα του γενικού πλαισίου ανάλυσης του κτιριακού δομήματος.

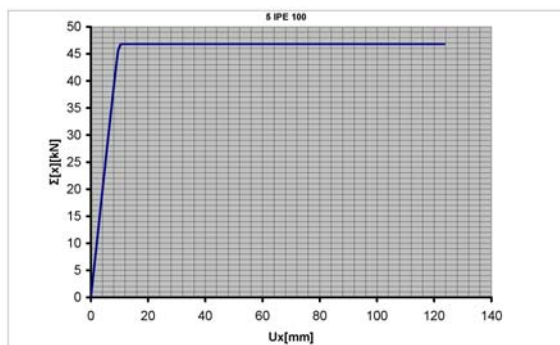
Η αντοχή του είναι απλό να υπολογιστεί με ένα φύλλο υπολογισμών όπως αυτό που βρίσκεται στο κεφάλαιο 3^α, όπου η αντοχή του συστήματος σε οριζόντια φόρτιση υπολογίζεται ως συνάρτηση των γεωμετρικών μεγεθών και της αντοχής των διατομών των συνδετηρίων δοκών.

Με βάση το μέγεθος της σεισμικής τέμνουσας βάσης κάθε ορόφου και την αντοχή σε οριζόντιο φορτίο της επιλεγμένης κατακόρυφης Vierendeel του συστήματος INSTED, όπως αυτή έχει προκύψει από τον αντίστοιχο υπολογισμό, καθορίζεται ο αριθμός των απαιτούμενων συστημάτων ανά όροφο.

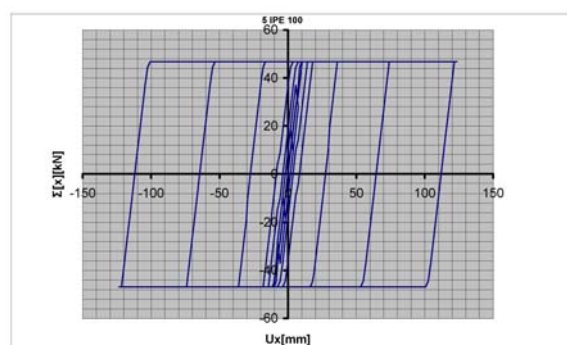
Εναλλακτικά, με βάση τις αρχιτεκτονικές λειτουργικές δυνατότητες του κτιρίου, καθορίζεται η θέση και η επιθυμητή γεωμετρία των συστημάτων INSTED. Από τη σεισμική τέμνουσα βάσης κάθε ορόφου καθορίζεται η αναλογούσα σε κάθε κατακόρυφη Vierendeel οριζόντια σεισμική δύναμη και στη συνέχεια με ένα απλό φύλλο υπολογισμού τύπου EXCEL, επιλέγεται ο αριθμός, η διατομή και το ενεργό μήκος των συνδετηρίων δοκών που εξασφαλίζουν την ικανή αντοχή σχεδιασμού.

9.2. Ισοδύναμα προσομοιώματα.

Με δεδομένο ότι η απόκριση του συστήματος INSTED, όπως αυτή προκύπτει και από τις αναλύσεις που παρουσιάζονται στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι διγραμμική, ελαστική – πλαστική, είναι δυνατή η προσομοίωση του με ένα διγραμμικό ελατήριο, που συνδέει στη θέση και τη διεύθυνση της κατακόρυφης δοκού Vierendeel τα δύο επάλληλα διαφράγματα (πλάκες) του κάθε ορόφου.

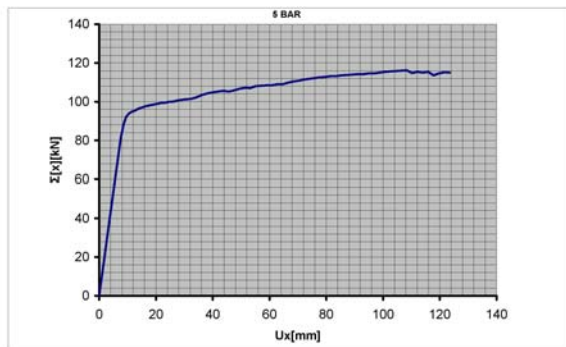


Σχήμα 8.1 Τυπικό διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης για το σύστημα INSTED με ολόσωμες δοκούς.

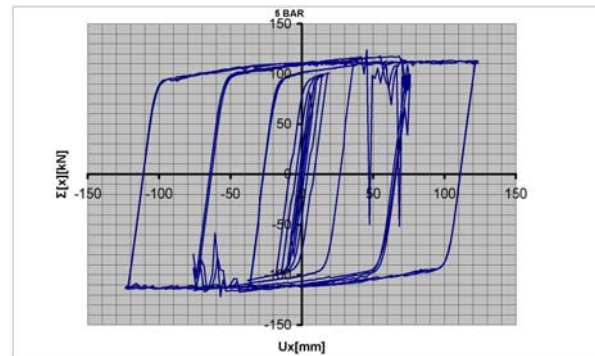


Σχήμα 8.2. Τυπικό διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης για το σύστημα INSTED με ολόσωμες δοκούς.

Σε πιο σύνθετα προσομοιώματα, σε μεγαλύτερο και ακριβέστερο επίπεδο ανάλυσης το διάγραμμα δυνάμεων μετακινήσεων του ισοδύναμου ελατηρίου, μπορεί να είναι τριγωνικό, ώστε να προσεγγίσει καλύτερα τη συμπεριφορά του υλικού.



Σχήμα 8.3. Τυπικό διάγραμμα μονότονα αυξανόμενης φόρτισης για το σύστημα INSTED με κεντρικές δοκούς τύπου INERD.



Σχήμα 8.4. Τυπικό διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης για το σύστημα INSTED με κεντρικές δοκούς τύπου INERD.

Σε επίπεδο τελικού σχεδιασμού, μετά την αρχική επιλογή των στοιχείων που απαρτίζουν το σύστημα INSTED, ακολουθεί πλήρης ανάλυση και διαστασιολόγηση με προσομοίωμα χωρικού πλαισίου. Το προσομοίωμα αυτό μορφώνεται από το σύνολο των δομικών στοιχείων του φορέα. Στη ανάλυση αυτή, πρέπει να ληφθεί υπ όψη ότι οι συνδετήριες δοκοί και όλη η κατακόρυφη δοκός Vierendeel, είναι εκτός των στοιχείων διαφραγματικής λειτουργίας και πρέπει να ελεγχθούν με ιδιαίτερη προσοχή στην ευστάθειά τους.