

**ΚΑΙΝΟΤΟΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΚΑΜΨΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΚΤΙΡΙΑ****Φαίδων Καρυδάκης**

Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, MSc, DIC
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: karmad44@otenet.gr

Γεώργιος Ιωαννίδης

Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, Καθηγητής
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: gioanid@central.ntua.gr

Ιωάννης Βάγιας

Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, Καθηγητής
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: vastal@central.ntua.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις αναλυτικές και πειραματικές διερευνήσεις για ένα νέο σύστημα παραλαβής οριζοντίων φορτίων σε μεταλλικά κτίρια, που έγιναν στο εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών του ΕΜΠ.

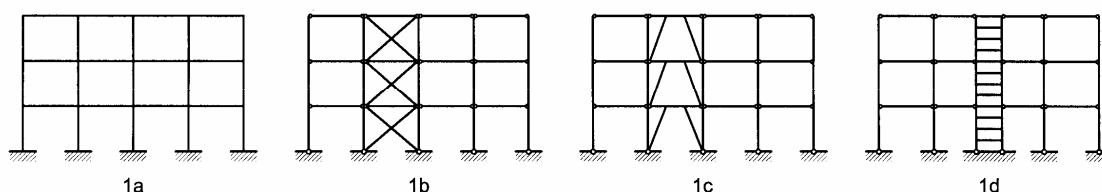
Το σύστημα βασίζεται σε μία κατακόρυφη σύνθετη δοκό τύπου Vierendeel, που αποτελείται από δύο ισχυρούς στύλους από κοίλη διατομή, σε μικρή μεταξύ τους απόσταση, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με οριζόντιες δοκούς σε σχετικά πυκνή διάταξη. Σε οριζόντια φόρτιση, οι δοκοί εντείνονται καμπτικά, δημιουργούν πλαστικές αρθρώσεις και απορροφούν μεγάλη ποσότητα ενέργειας, με μεγάλη πλαστιμότητα, επιδεικνύοντας εξαιρετική αντισεισμική συμπεριφορά.

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

Τα πειραματικά αποτελέσματα και οι αναλύσεις με μη γραμμικές 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.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε πολυώροφα μεταλλικά κτίρια η οριζόντια αντίσταση και ακαμψία συνήθως εξασφαλίζεται είτε από πλαίσια ικανά να παραλάβουν ροπή, (Σχ. 1a), είτε από συστήματα αντιδιαγωνίων, με ή χωρίς εκκεντρότητα (Σχ. 1 b-c). Κάθε ένα από αυτά τα συστήματα έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του, σε σχέση με την ολική ακαμψία την πλαστιμότητα, την αντοχή, την απορρόφηση ενέργειας, την λειτουργικότητα και την ευχέρεια επισκευής ή και ολικής αντικατάστασης εφ' όσον απαιτηθεί. Με βάση αυτά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, προτείνεται ένας άλλος τύπος συστήματος οριζόντιας ακαμψίας και απορρόφησης ενέργειας που αντικαθιστά τους αντιδιαγωνίους συνδέσμους σε ένα φάτνωμα με μία σύνθετη δοκό, αποτελούμενη από δύο ισχυρούς κατακόρυφους στύλους ορθογωνικής κοίλης διατομής, συνδεδεμένες με οριζόντιες δοκούς σε σχετικά πυκνή διάταξη, μια κατακόρυφη δοκό vierendeel (Σχ. 1d)



Σχ. 1. Διάφοροι τύποι συστημάτων ακαμψίας και το προτεινόμενο σύστημα “INSTED”.

Το καινοτόμο αυτό σύστημα ακαμψίας και απορρόφησης ενέργειας (**innovative stiffness and energy dissipation system for short “INSTED”**) προσομοιάζει με τοίχωμα, αλλά με το πρόσθετο πλεονέκτημα την ικανότητα απορρόφησης μεγάλης ποσότητας ενέργειας μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης των δοκών, και εφ' όσον απαιτηθεί μετά από μία μεγάλη σεισμική καταπόνηση την ευκολία επισκευής ακόμη και 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.

3. ΤΟ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

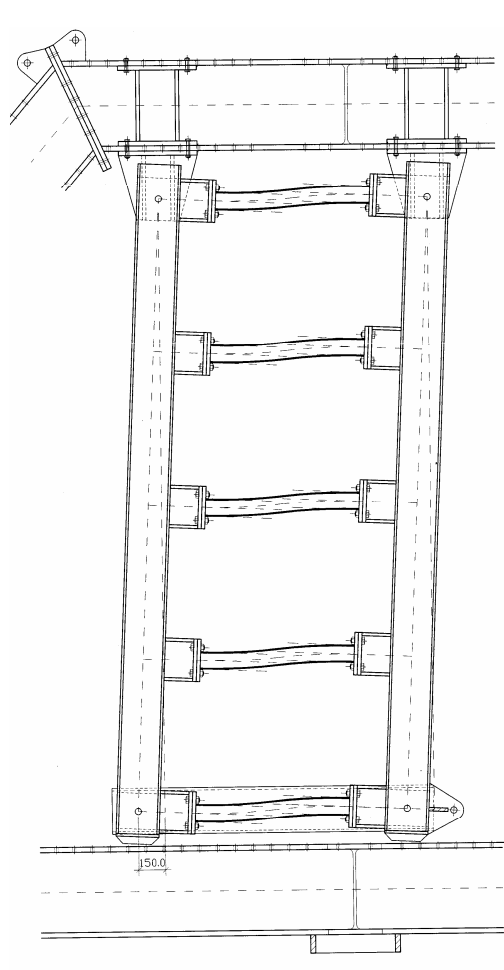
Το νέο σύστημα βασίζεται σε ένα ισχυρό ζεύγος κατακόρυφων υποστλωμάτων, που συνδέονται μεταξύ τους με ικανό αριθμό οριζοντίων δοκών ακαμψίας σε κάθε όροφο. Οι δοκοί ακαμψίας συνδέονται μέσω μετωπικών πλακών σε ισχυρές δοκούς υποδοχείς που είναι ηλεκτροσυγκολλημένες στα υποστώματα. Με την συνδεσμολογία αυτή η αντοχή και ακαμψία του συστήματος, καθορίζεται από το μήκος και την διατομή των δοκών ακαμψίας. Ακόμη για να εξασφαλιστεί η δημιουργία των πλαστικών αρθρώσεων εκτός της περιοχής της σύνδεσης (μετωπικές πλάκες, κοχλίες, ηλεκτροσυγκολλήσεις) τα άκρα των δοκών σύνδεσης έχουν ενισχυθεί με πρόσθετα ελάσματα. Εναλλακτικά δημιουργούνται σημεία δημιουργίας πλαστικής άρθρωσης, με εξασθένηση της δοκού στα άκρα της με εγκοπές ή σχισμές (dog bones-slots) σε απόσταση από την σύνδεση.

Η αντοχή των δοκών, που είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές των στύλων, και που κύρια καθορίζει και την συνολική ακαμψία του συστήματος, επιλέγονται να λειτουργούν

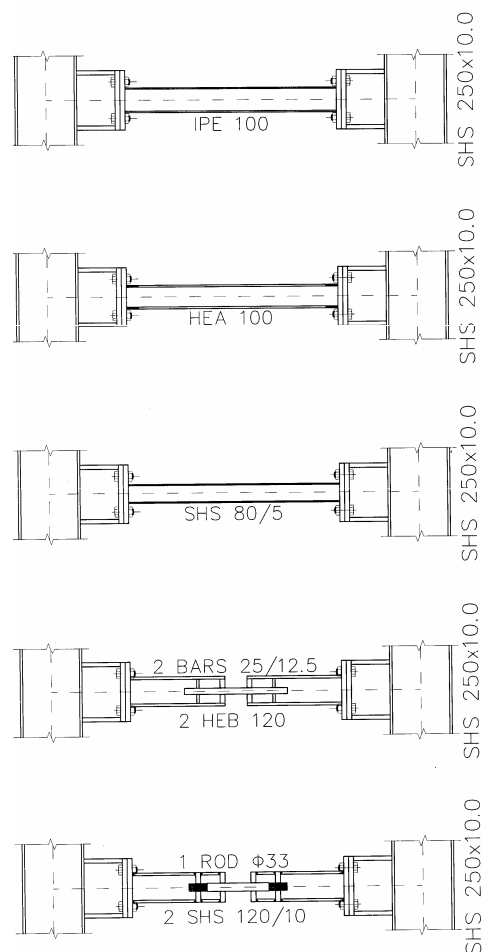
ελαστικά μέσα στα απαιτούμενα λειτουργικά πλαίσια, για σεισμικές φορτίσεις μικρότερες από τον σεισμό σχεδιασμού, και με τον σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων και απορρόφηση ενέργειας για μεγαλύτερες σεισμικές καταπονήσεις.

4. ΟΙ ΜΟΡΦΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΣΤΗΚΑΝ

Διάφοροι τύποι συνδετηρίων δοκών ακαμψίας εξετάστηκαν, όπως φαίνεται στα σχήματα 2 και 3.



Σχ. 2. Η διάταξη του προτεινόμενου συστήματος



Σχ. 3. Διάφοροι τύποι δοκών ακαμψίας

- 5 IPE 100 - 5 HEA 100 - 5 SHS 80/5
- 5 IPE μεταβλητοί από 80 to 160- 5 HEA 100, με αποτμήσεις (dog bones) διάφορου βάθους
- 5 SHS 80/5 με μεταβλητές επιμήκειες σχισμές στα πέλματα
- 5 διπλές ορθογωνικές ράβδοι τύπου "INERD"
- 5 κυκλικές ράβδοι τύπου "INERD"
- 5 κυκλικές ράβδοι τύπου "INERD" με διαφορετικού βάθους εντορμίες.

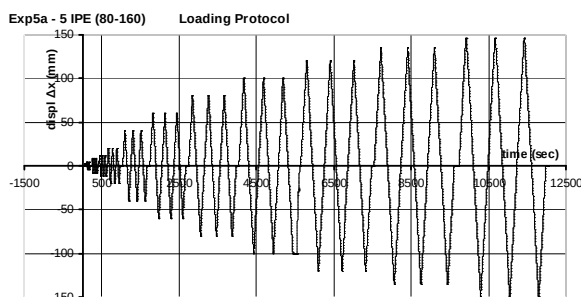
5. ΣΤΑΤΙΚΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η αναλυτική διερεύνηση του συστήματος έγινε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με προσομοιώματα αντίστοιχα με την πειραματική διάταξη του ενός ορόφου. Τα υποστύλωματα ήταν αμφιαρθρωτά και συνδέονται με τις δοκούς σε πέντε ίσες αποστάσεις. Οι μετακινήσεις στα άκρα των στύλων είχαν κινηματική εξάρτηση, που να προσομοιάζει την διαφραγματική λειτουργία των πλακών.

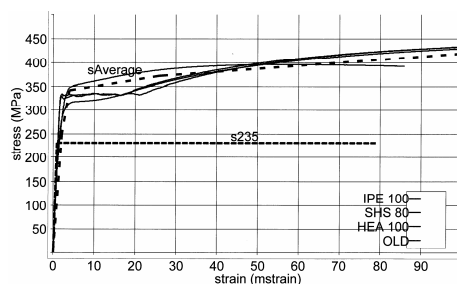
Οι στηρίξεις στον πόδα, υπόκεινται σε οριζόντιες μετακινήσεις, προσομοιάζοντας την σεισμική καταπόνηση.

Η φορτική ακολουθία έγινε με δύο διαφορετικά πρωτόκολλα:

- Αρχικά εξετάστηκε μια μονότονη αύξηση της μετακίνησης στον πόδα, μέχρι να φτάσει τον πειραματικό στόχο των 135 mm που αντιστοιχούν στο 4% της σχετικής μετακίνησης του ορόφου (inter storey drift). ($\Delta l = H \cdot 4\%$, για ύψος ορόφου 3.40 m, $\Delta l = 3400 \cdot 0.04 = 135$ mm)
- Στην συνέχεια εξετάστηκε μία κυκλικά αυξανόμενη μετακίνηση, σε ομάδες τριών ομοίων κύκλων, (όπως προτείνεται από την ECCS), πάλι μέχρι την μετακίνηση του πειραματικού στόχου των 135 mm, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.



Σχ. 4. Πρωτόκολλο αυξανόμενης κυκλικής φόρτισης

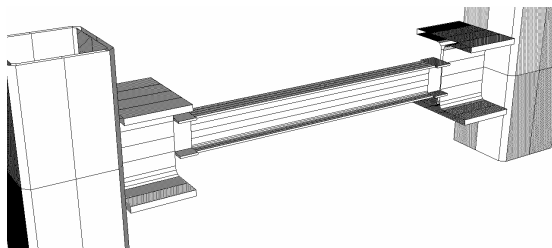


Σχ. 5. Ελαστικές ιδιότητες του χάλυβα

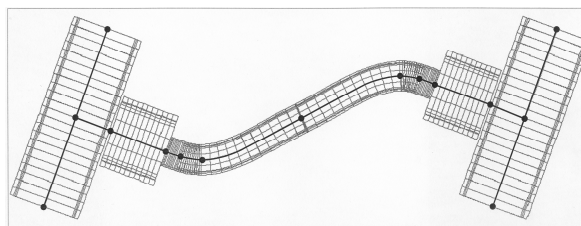
Η μη γραμμική ανάλυση έγινε με προσομοιώματα διάφορης πολυπλοκότητας, όπως φαίνεται στα σχήματα 6-11, με χρήση του λογισμικού της SOFISTIK.

Για τις ιδιότητες του χάλυβα χρησιμοποιήθηκαν δύο καμπύλες. Μία βασισμένη στον EC3, και μία βασισμένη σε πειράματα πάνω στο υλικό των δοκιμίων (Σχ. 5)

Για τις διατάξεις των δοκών (IPE, HEA, SHS, με όμοιες η διαφορετικές διατομές) χρησιμοποιήθηκε απλό προσομοίωμα γραμμικών επιπέδων δοκών, Οι δοκοί υποδοχείς, και οι ενισχύσεις στα άκρα έχουν περιληφθεί.

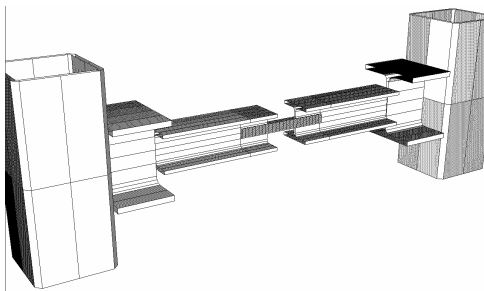


Σχ. 6. Το προσομοίωμα ανάλυσης για απλές δοκούς IPE

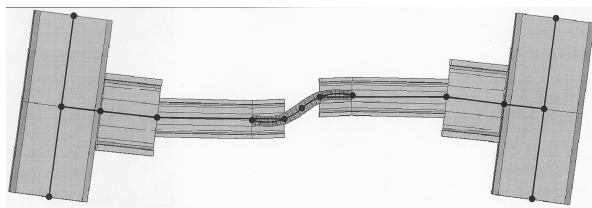


Σχ. 7. Το προσομοίωμα ανάλυσης για απλές δοκούς IPE

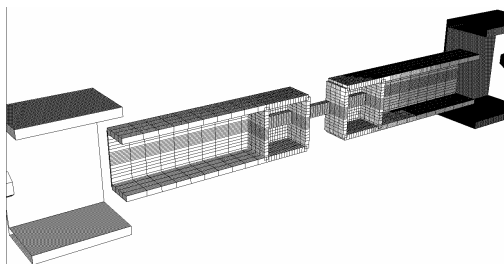
Για τις δοκούς τύπου “inerd” με κυκλικές ή ορθογωνικές ράβδους η ανάλυση έγινε και με απλό γραμμικό προσομοίωμα αλλά και με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων.



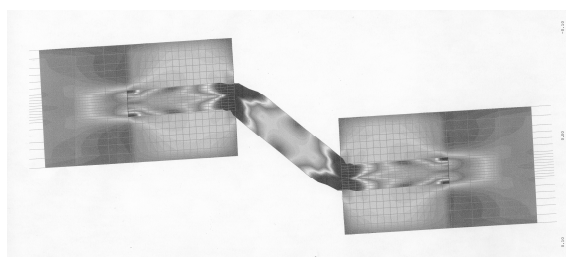
Σχ. 8. Το ραβδωτό προσομοίωμα για τις δίδυμες ορθογωνικές ράβδους



Σχ. 9. Το ραβδωτό προσομοίωμα (αποτελέσματα)



Σχ. 10. Το προσομοίωμα FE για τις δίδυμες ορθογωνικές ράβδους



Σχ. 11. Το προσομοίωμα FE (αποτελέσματα)

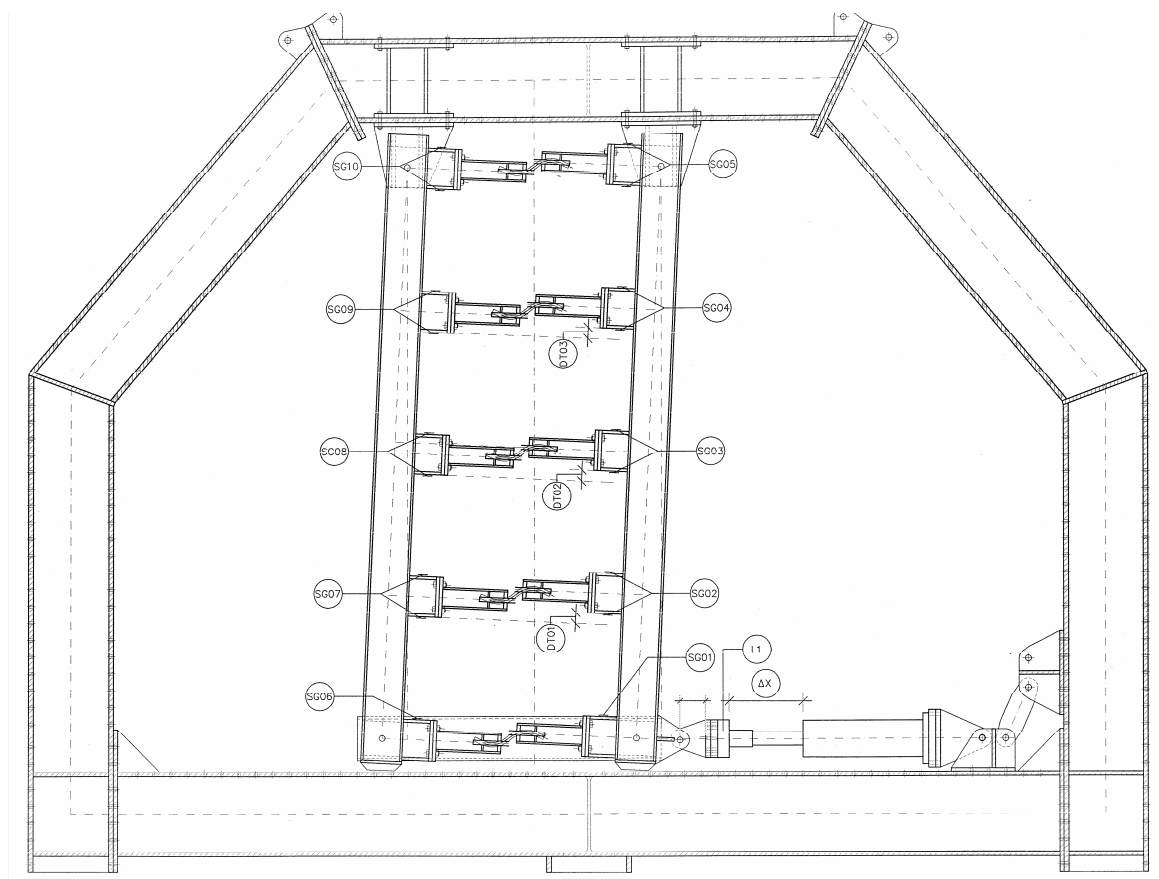
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Για την πειραματική διερεύνηση σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μία διάταξη με ένα πλαίσιο δοκιμών, ικανή να υλοποιήσει πειράματα σε φυσική κλίμακα, για το τυπικό ύψος ενός ορόφου 3.40 m. Τις μετακινήσεις στον πόδα του δοκιμίου επέβαλε ένας ηλεκτρονικά ελεγχόμενος μέσω υπολογιστή υδραυλικός κύλινδρος, με μέγιστη ικανότητα μετακίνησης +150 mm.

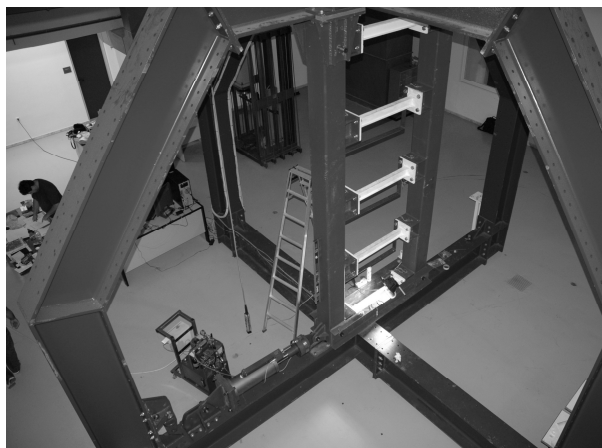
Τα στοιχεία που καταγράφονταν στην διάρκεια των πειραμάτων ήταν:

- Η μετακίνηση της κεφαλής του υδραυλικού κυλίνδρου, συνδεδεμένης με τον πόδα της δοκού vierendeel, με ηλεκτρονικό μηχανισμόμετρο. Δx στο σχέδιο 12.
- Το φορτίο στην κεφαλή του υδραυλικού κυλίνδρου, με ηλεκτρονικό στοιχείο μέτρησης φορτίου (load cell), L1 στο σχέδιο 12.
- Διαφορικές μετακινήσεις στα άκρα των δοκών ακαμψίας, διατμητικές μετακινήσεις κάθετες στον άξονα της δοκού, με ηλεκτρονικά μηχανισμόμετρα, σε ειδικές βάσεις, DT01, DT02, DT03 στο σχέδιο 12.
- Καμπτικές ροπές στους δοκούς υποδοχείς, με strain gauges, SG01-SG10 στο σχέδιο 12.
- Καμπτικές ροπές στους πρόσθετους δοκούς υποδοχείς, στην περίπτωση των δοκών τύπου “inerd”, με strain gauges, SG11-SG13 στο σχέδιο 12.

Πραγματοποιήθηκαν 15 πειράματα από τον Ιούλιο μέχρι τον Δεκέμβριο του 2007. Στην διάρκεια των πειραμάτων η όλη διάταξη ήταν υπό συνεχή παρακολούθηση και βελτίωση. .



Σχ. 12. Η πειραματική διάταξη και τα μετρούμενα αποτελέσματα.



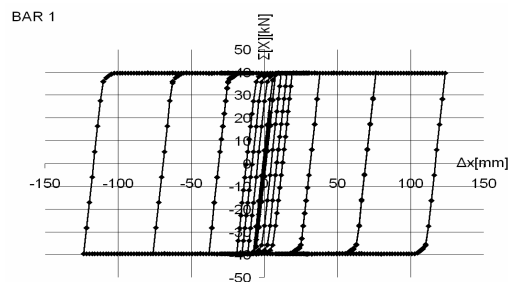
Φωτ. 1. Η πειραματική διάταξη με 5 IPE100



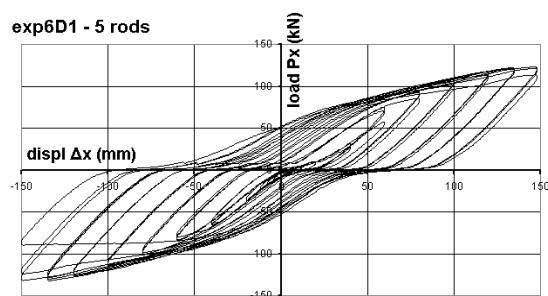
Φωτ. 2. Παραμορφωμένες δοκοί ακαμψίας
(IPE100 – 2 Bars 12.5/25mm)

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα πειραματικά αποτελέσματα το σύστημα εμφανίζεται «πολλά υποσχόμενο», με πολύ ευρείς κύκλους υστέρησης, πραγματοποιώντας μεγάλη απορρόφηση ενέργειας, σε μικρό απόλυτα ελεγχόμενο τμήμα της κατασκευής, το οποίο μπορεί πολύ εύκολα να επισκευαστεί ή να αντικατασταθεί.

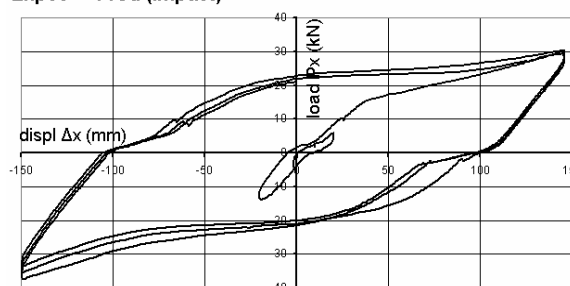


Σχ. 13. Αναλυτικά αποτελέσματα ραβδωτού προσομοιώματος για 5 ράβδους τύπου "inerd"



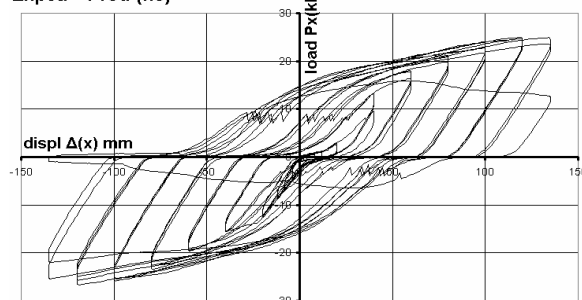
Σχ. 14. Πειραματικά αποτελέσματα για 5 ράβδους τύπου "inerd"

Exp6c - 1 rod (impact)



Σχ. 15. Πειραματικά αποτελέσματα για μία ράβδο τύπου "inerd", για τρεις κύκλους μέγιστης μετακίνησης (impact loading)

Exp6a - 1 rod (ns)



Σχ. 16 Πειραματικά αποτελέσματα για μία ράβδο τύπου "inerd", για αυξανόμενους κύκλους μετακίνησης

Τα αποτελέσματα μεταξύ των πειραματικών και των πρώτων αναλυτικών διερευνήσεων, ήταν ικανοποιητικά κοντά.

Συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αναλυτικά, βασισμένα στις διατάξεις του EC3, υπάρχει στα αναλυτικά μία συντηρητική υποτίμηση του συστήματος (της τάξης του 85%).

Σε σχέση με την εφαρμογή κύκλων μέγιστης μετακίνησης η συνεχών κύκλων αυξανόμενης μετακίνησης, στην δεύτερη περίπτωση το σύστημα αστοχούσε για μικρότερες μετακινήσεις, όχι όμως μικρότερες της σχετικής μετακίνησης ορόφων (inter storey drift) του 3.68%.

Από τις πειραματικές διερευνήσεις το σύστημα παρουσιάζει συντελεστή μετασεισμικής συμπεριφοράς μεγαλύτερο του 4, που αντιστοιχεί σε πλαίσια με καμπτική αντοχή που μπορεί να θεωρηθεί συντηρητικό, σε σημαντικό βαθμό υπέρ της ασφαλείας

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] European Committee for Standardisation (CEN): EN 1990-1993-1998 Eurocode 1- Eurocode 3 – Eurocode 8
- [2] Vayas I. and Thannopoulos P.: INERD Project, Final Report, NTUA, 2004

Phaedon Karydakis

Civil Engineer NTUA, MSc, DIC
Steel structures laboratory
e-mail: karmad44@otenet.gr

George Ioannides

Civil Engineer NTUA, Professor
Steel structures laboratory
e-mail: gioanid@central.ntua.gr

Ioannis Vayas

Civil Engineer NTUA, Professor
Steel structures laboratory
e-mail: vastal@central.ntua.gr

SUMMARY

This paper presents the results of the analytical and experimental investigation of a new structural system for resisting seismic horizontal loads in multi-storey steel buildings. This research is part of a project carried in the Steel Structures Laboratory of the National Technical University of Athens.

The structural system consists of a vertical composite beam, made up from two strong columns of square hollow sections, closely positioned, jointed together with horizontal beams in a relatively tight arrangement (5 beams per storey).

For a horizontal load the beams are subject to bending, form plastic hinges and dissipate large amounts of energy, showing excellent aseismic behavior.

The system can withstand loads with controlled elastoplastic behavior of the beams that are jointed to the columns with bolted connections, in such way that the plastic hinges are formed within the beam, away from the columns and the connections

In this way, in design earthquakes, the energy deforms only the minor beams, which makes the replacement of the damaged section, relatively easy.

A special experimental device was constructed in the Steel Laboratory of the NTUA, and 15 set of experiments were conducted in full scale of one storie, where the beams were IPE, HEA, SHS or a combination of SHS connected with bending circular or rectangular rods.

The experimental results are compared and correlated with non linear numerical analysis, with finite element models.

The results show very satisfactory plastic behavior with a lot of energy dissipation, for interstorie drifts in the order of 4%.