

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΦΟΡΕΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥΣ ΔΙΚΤΥΩΤΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ PUSH-OVER ΑΝΑΛΥΣΗΣ (Η/Υ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΣΕΙΣΜΟ

ΑΛΕΞΑΚΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται και εξετάζεται η μέθοδος ενίσχυσης κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικούς δικτυωτούς συνδέσμους. Αρχικά γίνεται καταγραφή των χαρακτηριστικών της (πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα) και της σημαντικότητας της χρήσης της. Περιγράφονται τα είδη των δικτυωτών συνδέσμων και η συνδεσμολογία τους ενώ παράλληλα εξετάζεται σε στατικό πρόγραμμα η συμπεριφορά τους σε πλευρικές ωθήσεις (σεισμός). Ακολουθούν στατικές αναλύσεις σε επίπεδο πλαισιακό φορέα για την διερεύνηση της επίδρασης του τρόπου τοποθέτησής τους στα φατνώματα. Τέλος γίνεται αναφορά σε τεχνικές για εξωτερική ενίσχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με την χρήση στοιχείων δομικού χάλυβα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια από τις πιο αποτελεσματικές τεχνικές για την ενίσχυση και ειδικότερα την αντισεισμική θωράκιση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος είναι αυτή της χρήσης μεταλλικών δικτυωτών συνδέσμων. Η διάδοση, η εφαρμογή και η εξέλιξη της μεθόδου σε χώρες όπως η Ιαπωνία, οι Η.Π.Α. (Καλιφόρνια) είναι ευρύτατη και ακολουθούν αρκετές χώρες σε όλο τον κόσμο, καθώς συγκεντρώνει πολλά πλεονεκτήματα:

- α) Ο χάλυβας είναι όλκιμο υλικό και μπορεί να αναλάβει σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις. Συνεπώς οι μεταλλικοί σύνδεσμοι μπορούν να απορροφήσουν το μεγαλύτερο μέρος της σεισμικής ενέργειας.
- β) Αύξηση δυσκαμψίας, αντοχής και πλαστιμότητας της κατασκευής.
- γ) Δεν αλλοιώνεται η φυσιογνωμία του κτιρίου.
- δ) Δεν επηρεάζεται σημαντικά ο φυσικός φωτισμός και αερισμός του εσωτερικού χώρου.
- ε) Αμελητέα αύξηση των μόνιμων φορτίων οπότε και μηδενίζεται το κόστος θεμελίωσης.
- στ) Μεγάλο μέρος της εφαρμογής μπορεί να γίνει με προκατασκευασμένα στοιχεία με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείται η φθορά της ιδιοκτησίας.
- ζ) Εύκολη επισκευή ή αντικατάσταση των στοιχείων ενίσχυσης σε περίπτωση βλάβης.
- η) Αν ο υπάρχον φορέας αστοχήσει, κατάλληλη διάταξη δικτυωτών συνδέσμων μπορεί να παραλάβει τα μόνιμα φορτία, μειώνοντας παράλληλα τον κίνδυνο κατάρρευσης.
- θ) Εύκολη τοποθέτηση, ταχύτατη εφαρμογή.
- ι) Μεγάλη ευελιξία στην διαμόρφωση των χώρων.

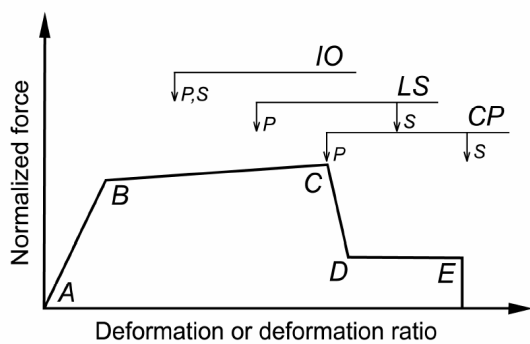
Υπάρχουν όμως και ορισμένα μειονεκτήματα στα οποία απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή:

- α) Δύσκολα μια ελαστική ανάλυση στον Η/Υ μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη γιατί τα δύο υλικά (Ο/Σ και χάλυβας) έχουν διαφορετική μετελαστική συμπεριφορά.
- β) Ο έλεγχος για τον λυγισμό των διαγωνίων ράβδων καθώς και της επάρκειας των συνδέσεων είναι ιδιαίτερα κρίσιμος.
- γ) Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η χρήση δικτυωτών συνδέσμων μεταβάλλει την σεισμική συμπεριφορά του αρχικού φορέα και οπότε κρίνεται, η ενίσχυση πρέπει να συνοδεύεται από επιπρόσθετες επεμβάσεις λόγω της ανακατανομής των δυνάμεων.

2. PUSH-OVER ANALYSIS

Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των μεταλλικών δικτυωτών συνδέσμων εφαρμόστηκε η μη γραμμική ανάλυση τύπου πλευρικών ωθήσεων (Non-linear static push-over analysis) στο στατικό πρόγραμμα επίλυσης SAP2000 σε πλαισιακή κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος. Κατά την ανάλυση αυτή, θεωρούμε πλευρική φόρτιση η οποία εφαρμόζεται με αυξανόμενη ένταση στον επιλεγμένο φορέα. Η ανάλυση τερματίζεται όταν δημιουργείται τέτοιος αριθμός πλαστικών αρθρώσεων ώστε να υπάρξει μηχανισμός. Το SAP2000 υποστηρίζει τέσσερις διαφορετικές μεθόδους εφαρμογής της πλευρικής φόρτισης. Επιλέχθηκε ο πρώτος από αυτούς, δηλαδή η κατανομή της φόρτισης στους κόμβους της κατασκευής κατά αναλογία των μαζών της.

Στην push-over ανάλυση τα μέλη του φορέα δεν συμπεριφέρονται ελαστικά αλλά υπακούουν σε συγκεκριμένα μοντέλα πλαστικής παραμόρφωσης. Ο μελετητής μπορεί να επιλέξει συγκεκριμένα σημεία στον φορέα, τα “hinges” (πλαστικές αρθρώσεις), ελέγχοντας την συμπεριφορά των υλικών στις καταπονήσεις. Τα μοντέλα πλαστικής παραμόρφωσης περιγράφονται μέσα από διαγράμματα συμπεριφοράς υλικών όπως αυτό στο σχήμα 2.1 (FEMA 356).



σχήμα 2.1

Ο κάθετος άξονας είναι η δύναμη (αξονική, διατμητική ή ροπή) και ο οριζόντιος η παραμόρφωση (μετατόπιση ή στροφή). Η AB είναι περιοχή ελαστικής συμπεριφοράς. Το B είναι το σημείο διαρροής, το οριακό δηλαδή σημείο πριν ξεκινήσει η πλαστικοποίηση φτάνοντας στην τελική αντοχή, σημείο C. Ακολουθεί μείωση της αντοχής, σημείο D, μέχρι το σημείο μέγιστης παραμόρφωσης χωρίς όμως ουσιαστικά ικανότητας παραλαβής φορτίων, σημείο E.

Μέσα από το διάγραμμα γίνεται έλεγχος για το αν παραβιάζονται οι απαιτούμενες στάθμες επιτελεστικότητας. Συγκεκριμένα IO (Immediate Occupancy) είναι η στάθμη «Α. Άμεση χρήση μετά τον σεισμό», LS (Life safety) είναι η στάθμη «B. Προστασία ζωής ενοίκων» και CP (Collapse Prevention) είναι η στάθμη «Γ. Αποφυγή οίονει κατάρρευσης».

Για τις ανάγκες της ανάλυσης στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα διαγράμματα συμπεριφοράς του προγράμματος SAP2000. Τα σημεία ελέγχου της πλαστικής παραμόρφωσης επιλέχθηκαν ως εξής:

α) Στα υποστυλώματα επιλέχθηκε hinge P-M-M (αλληλεπίδραση αξονικής δύναμης με ροπές ως προς τους δύο εγκάρσιους άξονες) στις δύο παρειές του, ακριβώς κάτω από την άνω δοκό και ακριβώς πάνω από την κάτω δοκό.

β) Στα δοκάρια επιλέχθηκε hinge M_3 και V_2 όπου αυτή ήταν κρίσιμη (ροπή-στροφή και διάτμηση-παραμόρφωση) στις δύο παρειές.

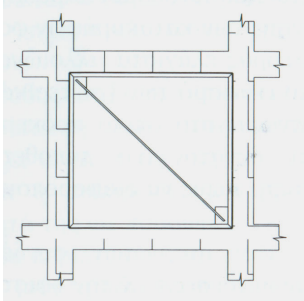
γ) Στους δικτυωτούς συνδέσμους επιλέχθηκε hinge P (αξονική καταπόνηση-παραμόρφωση) στην αρχή και το πέρας τους.

Το σκυρόδεμα είναι C16/20, ο δομικός χάλυβας των δικτυακών συνδέσμων είναι Fe360 και οι ράβδοι οπλισμού σκυροδέματος είναι S400. Τα υποστυλώματα είναι 30cm x 30cm και ο

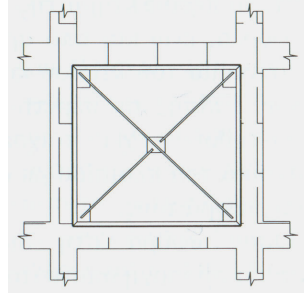
οπλισμός τους είναι 8Φ20 περιμετρικά. Τα οριζόντια στοιχεία είναι πλακοδοκοί με κρέμαση 60cm, $b_{eff} = 90\text{cm}$, πλάτος κάτω πέλματος 25cm, πάχος πλάκας 15cm, οπλισμός πλάκας Φ8/150 και οπλισμός δοκού άνω και κάτω είναι 2Φ16 και 3Φ16 αντίστοιχα. Η επικάλυψη των οπλισμών είναι 3cm. Οι διαστάσεις του πλαισίου που χρησιμοποιήθηκε ως μοντέλο για την ανάλυση είναι 3m ύψος και 5m το άνοιγμα. Οι δικτυακοί σύνδεσμοι είναι πλατύπελα HE-A300. Τα παραπάνω ισχύουν για όλες τις αναλύσεις που θα ακολουθήσουν. Στόχος της ανάλυσης είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων μέσα από τα διαγράμματα τέμνουσας βάσης-μετατόπισης.

3. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ. PUSH-OVER ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΦΑΤΝΩΜΑ Ο.Σ.

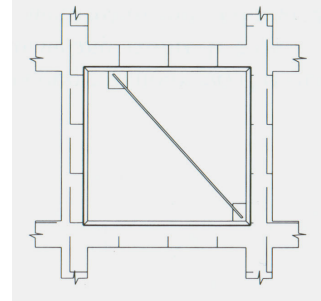
Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των διαγώνιων μελών τους με το ζύγωμα του φατνώματος στο οποίο τοποθετούνται, οι δικτυωτοί σύνδεσμοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, σε αυτούς χωρίς εκκεντρότητα και σε αυτούς με εκκεντρότητα.



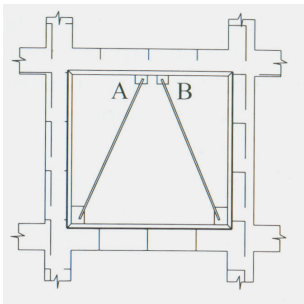
σχήμα 3.1



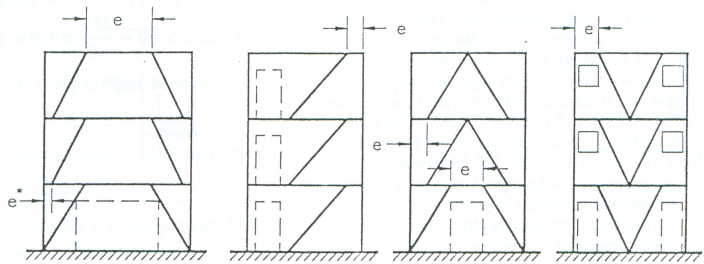
σχήμα 3.2



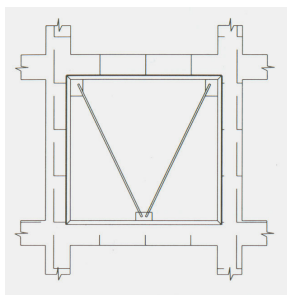
σχήμα 3.3



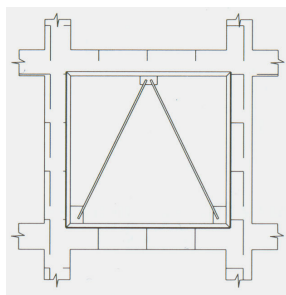
σχήμα 3.4



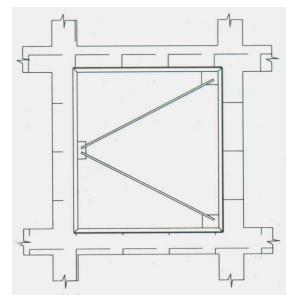
σχήμα 3.5



σχήμα 3.6

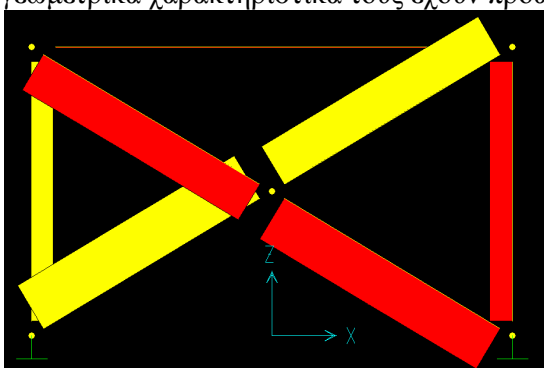


σχήμα 3.7

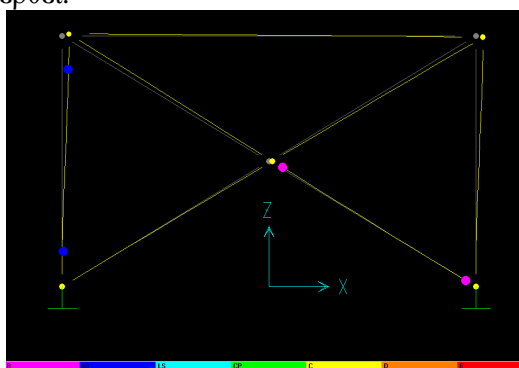


σχήμα 3.8

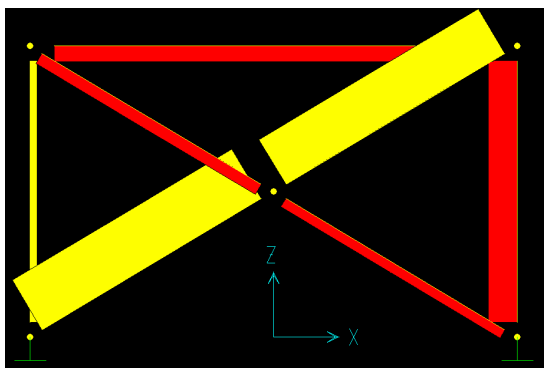
Χωρίς εκκεντρότητα είναι οι **απλοί** και οι **χιαστί διαγώνιοι** σύνδεσμοι (σχήματα 3.1, 3.2). Οι απλοί έχουν στοιχεία μονάχα στην μία διεύθυνση της διαγωνίου του φανώματος ενώ οι χιαστί έχουν και στις δύο. Για την ανάλυση και την διαστασιολόγηση τους στις πλευρικές ωθήσεις, θεωρείται ότι καταπονούνται μονάχα αξονικά. Πιο συγκεκριμένα, οι εναλλασσόμενης φοράς οριζόντιες σεισμικές δυνάμεις αναλαμβάνονται από τις εκάστοτε εφελκόμενες διαγωνίους και η συνεισφορά των θλιβόμενων θεωρείται αμελητέα. Πριν συνεχιστεί η κατηγοριοποίηση των δικτυωτών συνδέσμων παρουσιάζεται πειραματικός έλεγχος της τελευταίας αυτής παραδοχής σε ένα πλαίσιο αποτελούμενο από δύο υποστυλώματα πακτωμένα στην βάση τους και μία πλακοδοκό. Οι ιδιότητες και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους έχουν προαναφερθεί.



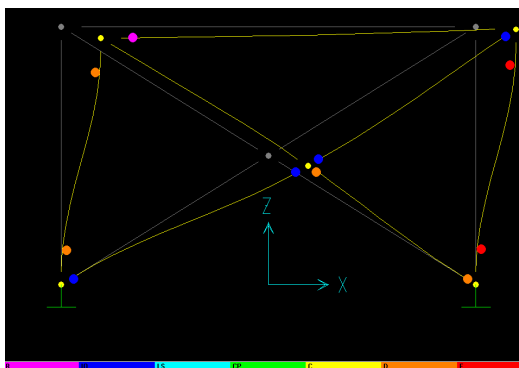
σχήμα 3.9



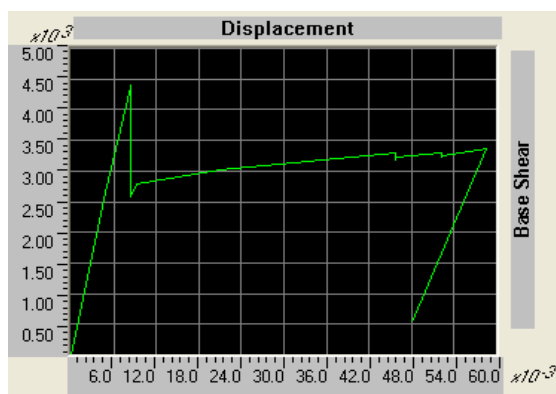
σχήμα 3.10



σχήμα 3.11



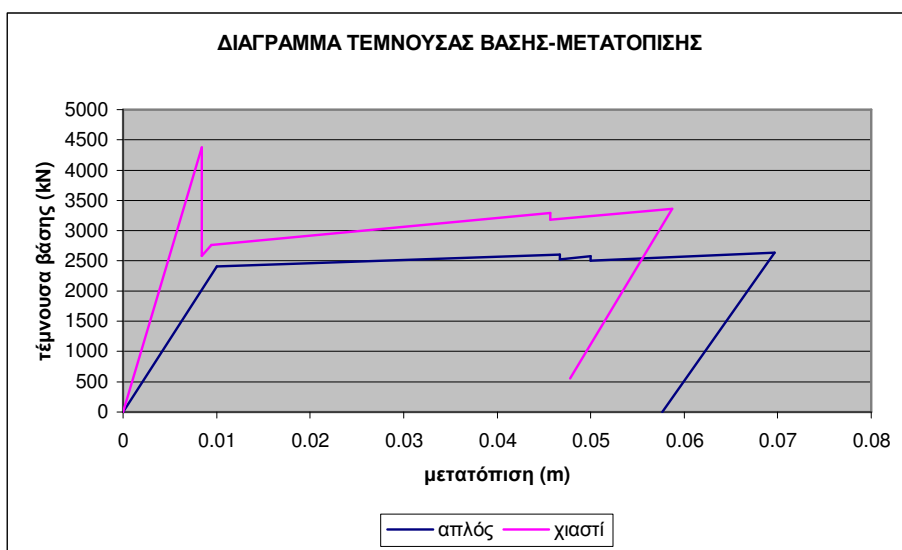
σχήμα 3.12



σχήμα 3.13

Η push-over ανάλυση ολοκληρώθηκε σε 14 βήματα. Στα δύο πρώτα όλα τα μέλη συμπεριφέρονται ελαστικά. Το διάγραμμα αξονικών δυνάμεων είναι αυτό του σχήματος 3.9. Αμέσως μετά διαρρέει θλιπτικά το αντίστοιχο στοιχείο της διαγωνίου. Ενώ αρχικά οι θλιπτικές (κόκκινο χρώμα) και οι εφελκυστικές τάσεις (κίτρινο χρώμα) παραλαμβάνονται εξίσου από τα δύο μέλη, σε όλα τα επόμενα βήματα, μέχρι την δημιουργία μηχανισμού, μονάχα το στοιχείο στην διάγωνιο που εφελκύεται λειτουργεί («απορροφά» ενέργεια), ενώ στο άλλο που θλίβεται, οι τάσεις παραμένουν σταθερά πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες εφελκυστικές, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11. Στα σχήματα 3.10 και 3.12 απεικονίζεται ο παραμορφωμένος φορέας για το δεύτερο και το τελευταίο βήμα αντίστοιχα. Η ενεργοποίηση των hinges στις κρίσιμες επιλεγμένες θέσεις δίνουν την εικόνα του τρόπου καταπόνησης, ανάλογα με την χρωματική τους διαβάθμιση. Παρατηρώντας το διάγραμμα τέμνουσας βάσης-μετατόπισης σχήμα 3.13, καταλήγουμε στο παρακάτω συμπέρασμα: το θλιβόμενο μέλος αύξησε την αντοχή του πλαισίου σε αρχικό στάδιο αλλά για μεγαλύτερη μετακίνηση (αφού διέρρευσε) δεν έπαιξε ουσιαστικό ρόλο στην διατήρηση αυτής της αντοχής και κυρίως της πλαστιμότητας του πλαισίου. Η παραδοχή λοιπόν που γίνεται από τους αναλυτές φαίνεται, αν και συντηρητική, να επαληθεύεται.

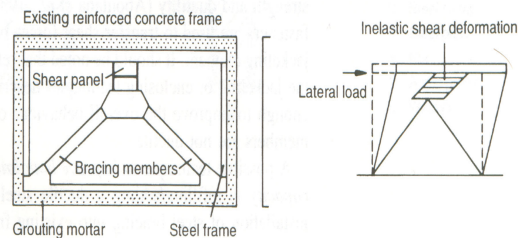
Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθήθηκε για το ίδιο πλαίσιο το οποίο όμως είχε μονάχα έναν δικτυωτό σύνδεσμο στην εφελκυόμενη διαγώνιο. Στο σχήμα 3.14 δίνεται το διάγραμμα τέμνουσας βάσης-μετατόπισης και για τις δύο αναλύσεις. Παρατηρείται αισθητή αλλά όχι καταλυτική προσφορά του θλιβόμενου μέλους στην δυσκαμψία και την αντοχή του πλαισίου, αφού πέρα από υψηλή αντοχή σε αρχικό στάδιο, η συμπεριφορά του φορέα από άποψη πλαστιμότητας και τρόπου αστοχίας δεν διαφέρει σημαντικά.



σχήμα 3.14

Συνεχίζοντας την περιγραφή των κατηγοριών, οι δικτυωτοί σύνδεσμοι με εκκεντρότητα έχουν μέλη στα οποία το ένα (ή και στα δύο σε πιο σύνθετες μορφές) άκρα της διαγωνίου συνδέεται με το ζύγωμα έκκεντρα ως προς τον αντίστοιχο κόμβο του υποστυλώματος (σχήματα 3.3, 3.4, 3.5). Το τμήμα του ζυγώματος (“AB”, σχήμα 3.4) λέγεται δοκός σύζευξης και καταπονείται έντονα σε κάμψη και διάτμηση.

Άλλος τύπος έχει την μορφή ορθού ή ανεστραμμένου Υ. Η ανάληψη των πλευρικών ωθήσεων γίνεται μονάχα από το κατακόρυφο μέλος, το οποίο καλείται σεισμικός σύνδεσμος. Αυτός μπορεί να είναι δύσκαμπτος ή και εύκαμπτος. Μια τέτοια διάταξη φαίνεται και στο σχήμα 3.15 (Nakano et al., 1992) όπου ο σεισμικός σύνδεσμος είναι ιδιαίτερα πλάστιμος και με μικρή δυσκαμψία, καταναλώνοντας μέρος της σεισμικής ενέργειας στην προοδευτική πλαστικοποίησή του.



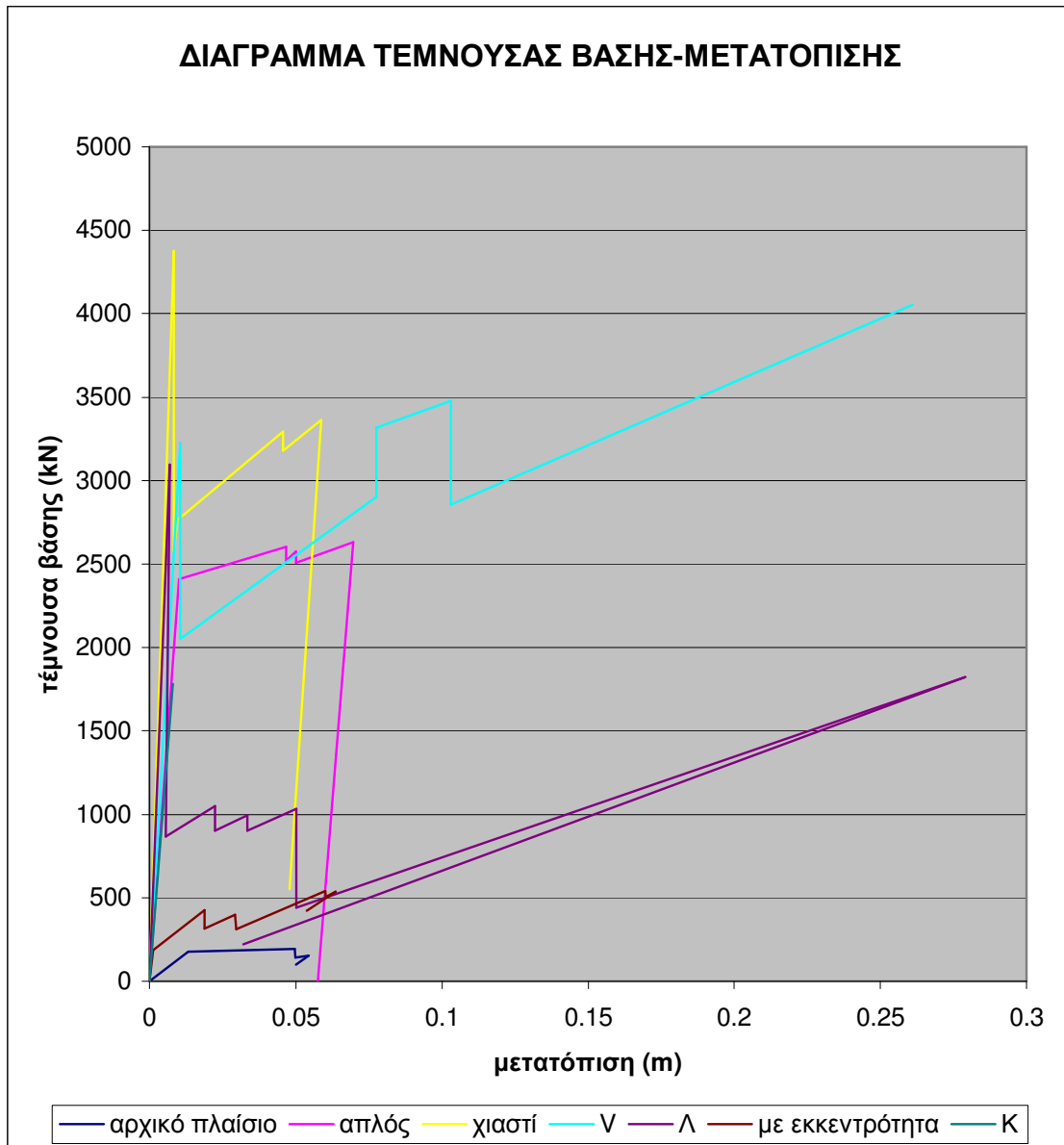
σχήμα 3.15

Μια τρίτη κατηγορία δικτυωτών συνδέσμων είναι η χρήση δύο στοιχείων ανά φάτνωμα, τα οποία συντρέχουν σε ένα κοινό ενδιάμεσο σημείο των οριζόντιων ή των κατακόρυφων μελών του φαντώματος. Στα σχήματα 3.6 και 3.7 φαίνονται οι δικτυωτοί σύνδεσμοι τύπου V και Λ. Για την ανάλυση και διαστασιολόγηση τους θεωρούμε (σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες) ότι οι σεισμικές δυνάμεις αναλαμβάνονται τόσο από τα εφελκόμενα όσα και από τα θλιβόμενα μέλη. Επίσης υπάρχει και η διάταξη K (σχήμα 3.8), η οποία όμως θεωρείται ακατάλληλη για ανάληψη σεισμικών δυνάμεων διότι απαιτεί τη συμμετοχή του υποστηλώματος στην ανάπτυξη του μηχανισμού διαρροής ενώ ταυτόχρονα προκαλεί δυσμενείς επιρροές 2ας τάξεως, με αποτέλεσμα να περιορίζει την πλαστιμότητα του συστήματος.

Όλες οι παραπάνω περιπτώσεις εφαρμόστηκαν στο γνωστό πλαίσιο και ύστερα από push-over ανάλυση προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα τέμνουσας βάσης-μετατόπισης (σχήμα 3.16).

Παρατηρήσεις:

- Το αρχικό πλαίσιο διακρίνεται με μπλε χρώμα στο διάγραμμα. Υστερεί σε αντοχή και πλαστιμότητα.
- Με την χιαστί διάταξη επιτυγχάνεται η μέγιστη αντοχή, σημειώνεται σημαντική δυσκαμψία, αν και βέβαια το πλαίσιο έχασε σε πλαστιμότητα. Τα ίδια ισχύουν και για την διάταξη με τον ένα διαγώνιο δικτυωτό σύνδεσμο με μικρότερη όμως αντοχή (όπως σχολιάστηκε αναλυτικά παραπάνω).
- Επιβεβαιώθηκε πως η διάταξη K είναι ακατάλληλη για ανάληψη πλευρικής φόρτισης. Αν και αρχικά υπάρχει αύξηση της αντοχής, η αστοχία σε κάμψη και διάτμηση, που προέρχεται από το άνω τμήμα του υποστηλώματος στο οποίο συντρέχουν σε κοινό σημείο οι δύο σύνδεσμοι, είναι άμεση, ψαθυρή και κρίσιμη αφού ήταν ο λόγος τερματισμού της ανάλυσης (δημιουργία μηχανισμού). Επομένως για να μπορέσει να εφαρμοστεί σε υπάρχον κτίριο, η ενίσχυση του υποστηλώματος αυτού κρίνεται απαραίτητη.
- Όχι τόσο κατάλληλη αποδείχθηκε η διάταξη με τα δύο στοιχεία συνδεδεμένα έκκεντρα στο οριζόντιο ζύγωμα του φαντώματος. Η αστοχία προκλήθηκε αρχικά από την ανεπάρκεια της δοκού σύζευξης να παραλάβει πρώτα μεγάλες διατμητικές και αμέσως μετά καμπτικές τάσεις. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μικρή αύξηση αντοχής και ασήμαντη αύξηση της πλαστιμότητας σε σχέση με το αρχικό πλαίσιο. Για εφαρμογή σε υπάρχον κτίριο, θα πρέπει να εξασφαλιστεί η αντοχή της να είναι τέτοια ώστε σε κάθε περίπτωση η αστοχία να προέλθει από την πλαστικοποίηση των δικτυωτών συνδέσμων.



- Πολύ καλές αποδείχθηκαν οι λύσεις των διατάξεων V και Λ, οι οποίες παρουσίασαν εντυπωσιακή αύξηση της απόδοσης του φορέα σε πλαστιμότητα. Ο λόγος είναι ότι αυτή την φορά τα θλιβόμενα μέλη συμμετείχαν σε σημαντικό βαθμό στην απορρόφηση ενέργειας μέσω της σταδιακής πλαστικοποίησής τους (αρχικά εξίσου και μετά λιγότερο ως προς τα εφελκόμενα μέλη), οπότε επιβεβαιώθηκε και η θεωρητική παραδοχή πως σε αυτού του τύπου τις διατάξεις, οι σεισμικές δυνάμεις αναλαμβάνονται τόσο από τα εφελκόμενα όσο και από τα θλιβόμενα μέλη. Ιδιαίτερα κρίσιμος είναι ο έλεγχος της σύνδεσης του κόμβου στον οποίο συντρέχουν οι ράβδοι, αφού μεταβάλλει την εντατική κατάσταση της αντίστοιχης δοκού κατά την διάρκεια πλευρικής ώθησης.

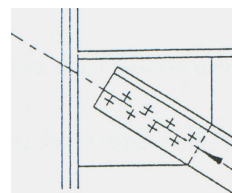
Γενικά σχόλια: Οι μεγάλες διαφορές στην αντοχή, την δυσκαμψία και την πλαστιμότητα, δεν πρέπει να οδηγήσουν σε συμπέρασμα για το ποια κατηγορία είναι καλύτερη. Είναι μονάχα ενδεικτικές για το πώς μπορεί να μεταβληθεί η συμπεριφορά του φορέα. Όλες μπορούν να συνεισφέρουν, αρκεί να χρησιμοποιούνται κατάλληλα. Αυτό προϋποθέτει επέμβαση που θα εξασφαλίζει αφενός την επάρκεια του αρχικού φέροντα οργανισμού λόγω της ανακατανομής των τάσεων σε σεισμό, αφετέρου η πιθανή αστοχία να προέρχεται υποχρεωτικά από διαρροή των δικτυωτών συνδέσμων. Για την επίτευξη του τελευταίου θα πρέπει:

- α) οι δικτυωτοί σύνδεσμοι να μην είναι πιο δύσκαμπτοι από όσο μπορεί να αντέξει ο αρχικός φορέας
 - β) οι συνδέσεις να είναι πολύ ισχυρές ώστε η αστοχία να μην μπορεί να προκύψει από αυτές (διότι θα ήταν ψαθυρή) αλλά από τους συνδέσμους
 - γ) η επιλογή διατομών να εξασφαλίζει διαρροή του χάλυβα για τα σεισμικά φορτία σχεδιασμού χωρίς την πιθανότητα λυγισμού (που θα τα καθιστούσε ανενεργά).
- Κατασκευαστικές διατάξεις μπορούν να αναζητηθούν στην βιβλιογραφία.

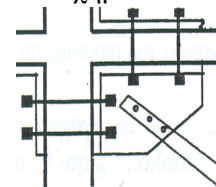
4. ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΔΙΚΤΥΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΜΕ ΤΟ ΦΑΤΝΩΜΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Υπάρχουν πολλοί τρόποι σύνδεσης μεταλλικών δικτυωτών συνδέσμων στο φάτνωμα που σκοπό έχουν την επίτευξη μονολιθικής συμπεριφοράς του συστήματος.

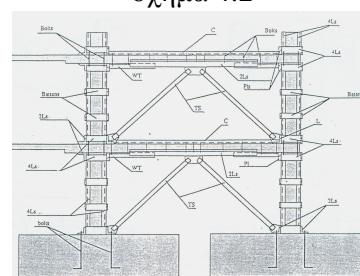
Όπως και στις μεταλλικές κατασκευές, έτσι και εδώ, η χρήση του γωνιακού μεταλλικού πιάτου είναι η πιο συνηθισμένη για την σύνδεση διαγώνιας ράβδου σε οριζόντιο (ζύγωμα) ή κατακόρυφο στοιχείο (υποστύλωμα). Η σύνδεσή του με την ράβδο γίνεται με συγκόλληση ή συνηθέστερα με κοχλίωση (σχήμα 4.1). Με τον ίδιο τρόπο το μεταλλικό πιάτο συνδέεται με γωνιακά μεταλλικά ελάσματα τα οποία μπορεί να είναι επικολλητά, αγκυρωμένα ή και τα δύο, ενισχύοντας με αυτόν τον τρόπο και τον κόμβο ο οποίος δέχεται έντονη καταπόνηση όταν καλείται να παραλάβει πλευρικές ωθήσεις (σχήμα 4.2). Αντί για μεταλλικά ελάσματα μπορεί να χρησιμοποιηθούν μεταλλικοί μανδύες όπως στο σχήμα 4.3 όπου δεν έχουν περιοριστεί στα σημεία σύνδεσης αλλά έχουν τοποθετηθεί σε όλο το φάτνωμα. Συνηθέστερη και πιο αποτελεσματική είναι η έμμεση σύνδεση δικτυωτών συνδέσμων με χαλύβδινα στοιχεία τα οποία σχηματίζουν ένα περιμετρικό μεταλλικό πλαίσιο. Η διατμητική σύνδεση των χαλύβδινων στοιχείων με τις δοκούς και τα υποστυλώματα του φαντώματος εξασφαλίζεται μέσω της χρήσης χαλύβδινων βλήτρων, τα οποία αγκυρώνονται εντός οπών ανά αποστάσεις στο σκυρόδεμα μέσω εποξειδικής ρητίνης με αποτέλεσμα να λειτουργούν ως σύμμικτα στοιχεία με τον αρχικό φορέα οπλισμένου σκυροδέματος.



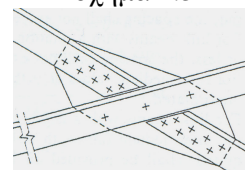
σχήμα 4.1



σχήμα 4.2



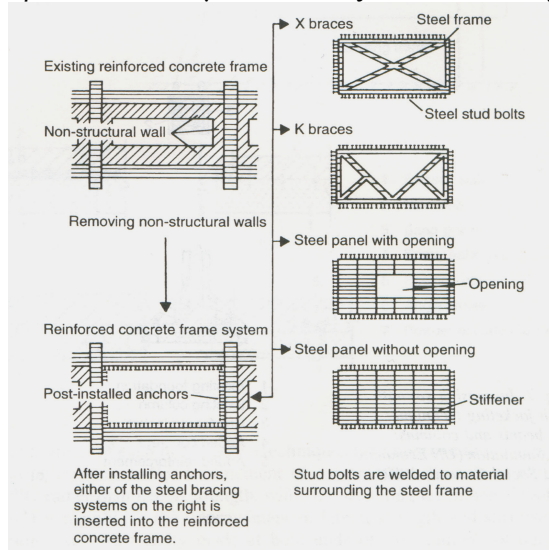
σχήμα 4.3



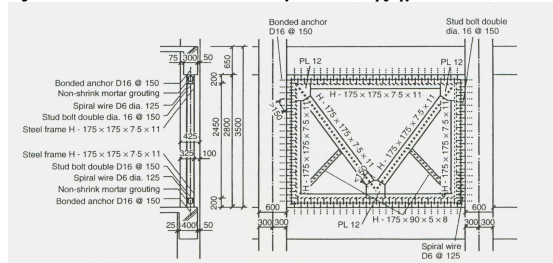
σχήμα 4.4

Στο σχήμα 4.4 φαίνεται λεπτομέρεια σύνδεσης στην μέση χιαστί δικτυωτών συνδέσμων. Αν βρίσκονται και οι δύο διαγώνιοι ράβδοι στο ίδιο επίπεδο, θα πρέπει ο ένας να διακόπτεται από τον άλλον και να κοχλιώνονται ή να συγκολλούνται. Η σύνδεση αυτή μπορεί να αποφευχθεί αν τοποθετηθούν σε διαφορετικό επίπεδο μέσα στο φάτνωμα.

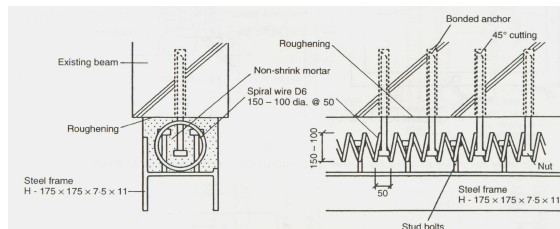
Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει σε μια εναλλακτική τεχνική έμμεσης σύνδεσης δικτυωτών συνδέσμων στο φάτνωμα μέσω μεταλλικού πλαισίου. Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε και εφαρμόζεται στην Ιαπωνία όπου αντί τα πλαίσια να συντίθενται και μετά να γίνεται η σύνδεσή τους με τους δικτυωτούς συνδέσμους και με το φάτνωμα, είναι προκατασκευασμένα. Εκτός από συνδυασμούς δικτυωτών συνδέσμων (σχήμα 4.5), το



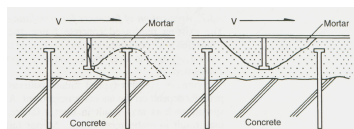
σχήμα 4.5



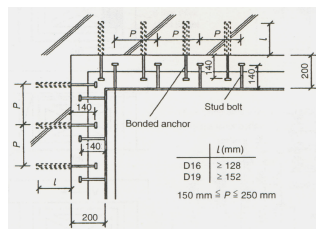
σχήμα 4.6



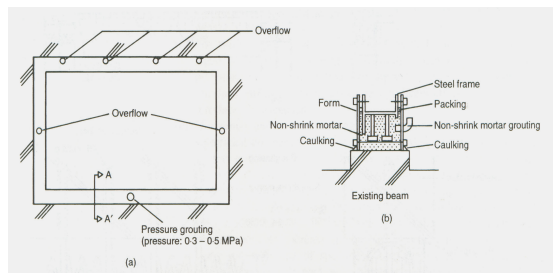
σχήμα 4.7



σχήμα 4.8



σχήμα 4.9



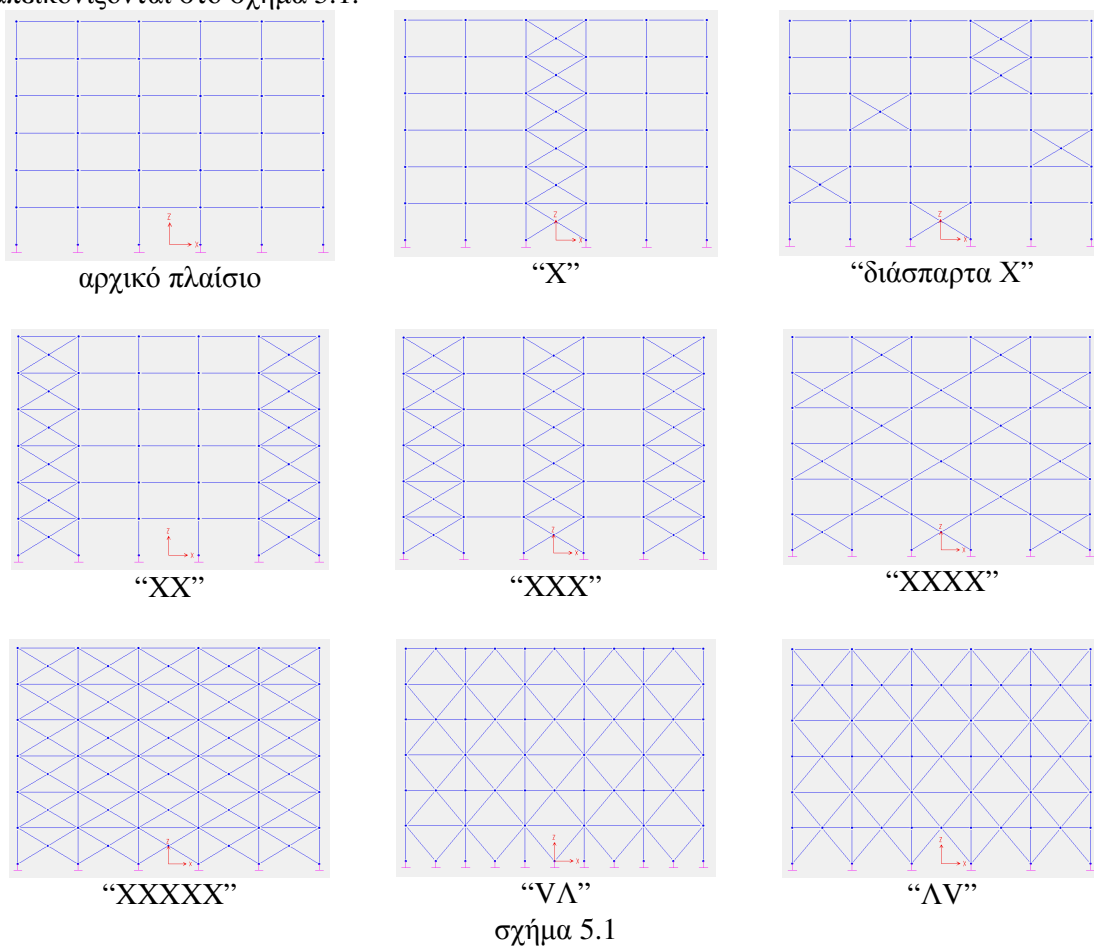
σχήμα 4.10

πλαίσιο μπορεί να ενισχυθεί με μεταλλικά panels (με ή χωρίς ανοίγματα). Στα επόμενα σχήματα απεικονίζονται κατασκευαστικές λεπτομέρειες της μεθόδου. Οι διατηρητικοί σύνδεσμοι έχουν ηλεκτροσυγκολληθεί περιμετρικά στο πλαίσιο. Μια δεύτερη σειρά διατηρητικών συνδέσμων αγκυρώνονται περιμετρικά μέσω εποξειδικής ρητίνης στο υπάρχον φάτνωμα οπλισμένου σκυροδέματος. Ένα έλασμα τοποθετείται κατά μήκος της διάταξης των

διατμητικών συνδέσμων, δημιουργώντας ένα συνεχόμενο «δοχείο». Το δοχείο αυτό έχει συγκεκριμένες οπές από τις οποίες εισέρχεται με πίεση ασυμπίεστο κονιάμα (σχήμα 4.10). Για να αποφευχθεί αστοχία του κονιάματος (σχήμα 4.8), το κονιάμα οπλίζεται με ένα σπειροειδές καλώδιο, το οποίο εισάγεται περιμετρικά πριν την έγχυση του (σχήμα 4.7). Η μέθοδος αυτή έχει τα πλεονεκτήματα της μεγάλης οικονομίας και ταχύτητας και παράλληλα με κατάλληλο αριθμό βλήτρων μπορεί να επιτευχθούν συνθήκες πλήρους διατμητικής σύνδεσης.

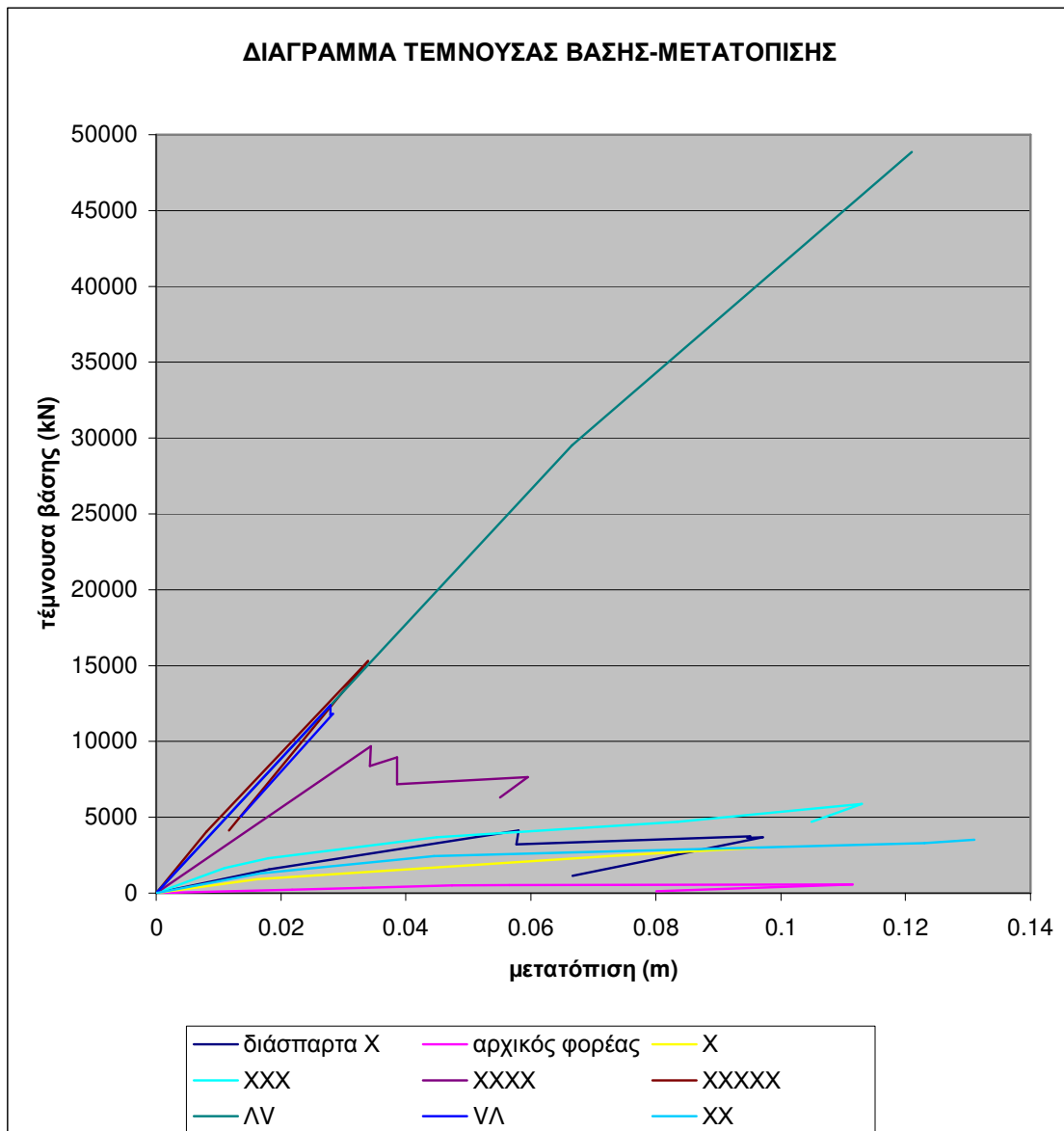
5. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΔΙΚΤΥΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΣΩ PUSH-OVER ΑΝΑΛΥΣΗΣ.

Σε ένα επίπεδο πλαισιακό φορέα οπλισμένου σκυροδέματος έγιναν 9 push-over αναλύσεις. Ο φορέας είναι δόροφος με 5 ανοίγματα. Τα υποστυλώματα, οι πλακοδοκοί και οι μεταλλικοί δικτυωτοί σύνδεσμοι έχουν διαστάσεις και ιδιότητες ίδιες με το πλαίσιο που χρησιμοποιήθηκε παραπάνω. Ο φορέας, καθώς και οι διαφόρων ειδών προσθήκες ενίσχυσης απεικονίζονται στο σχήμα 5.1.



Πρώτα η ανάλυση έγινε στο **αρχικό πλαίσιο**. Το επόμενο βήμα ήταν η προσθήκη μίας σειράς από 6 **χιαστί** (“X”) δικτυωτούς συνδέσμους στο μεσαίο άνοιγμα. Ακολούθησε ανάλυση για την προσθήκη ίδιου αριθμού συνδέσμων με την διαφορά ότι τοποθετήθηκαν σε

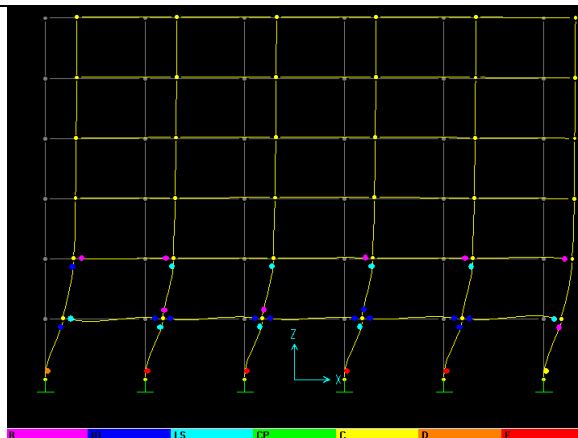
τυχαίες θέσεις (“διάσπαρτα X”). Επόμενες αναλύσεις ήταν για την τοποθέτηση δύο σειρών συνδέσμων στα ακραία ανοίγματα (“XX”) και τριών σειρών συνδέσμων (“XXX”) στο μεσαίο και τα ακραία. Η 6^η ανάλυση ήταν για την «εναλλάξ» τοποθέτηση συνδέσμων σε όλο τον φορέα (“XXXX”), με τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπάρχουν δύο γειτονικά χιαστί στην ίδια κατακόρυφο και στον ίδιο όροφο. Η 7^η ανάλυση ήταν για την τοποθέτηση χιαστί σε όλα τα φατνώματα (“XXXXX”), δηλαδή ο διπλάσιος αριθμός από την προηγούμενη. Οι δύο τελευταίες αναλύσεις (8^η και 9^η) έγιναν για συνδυασμό των V και Λ δικτυωτών συνδέσμων. Στην πρώτη (“VL”) τα φατνώματα του πρώτου ορόφου έχουν ενισχυθεί με σύνδεσμο V, ο επόμενος όροφος με Λ και οι άλλοι ακολουθούν εναλλάξ. Το αντίστροφο συνέβη στην δεύτερη περίπτωση (“LV”). Τα διαγράμματα τέμνουσας βάσης-μετατόπισης δίνονται συγκεντρωτικά στο σχήμα 5.2.



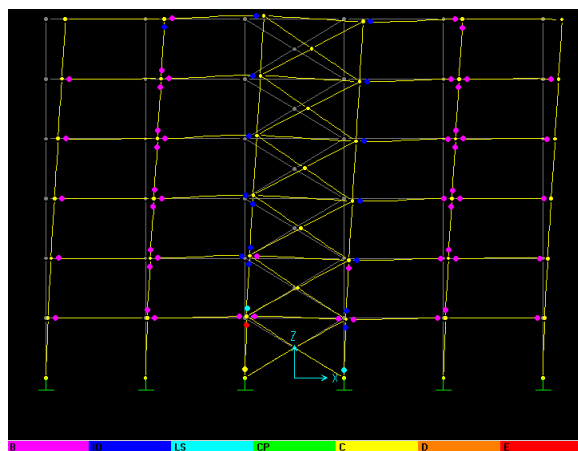
σχήμα 5.2

Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα:

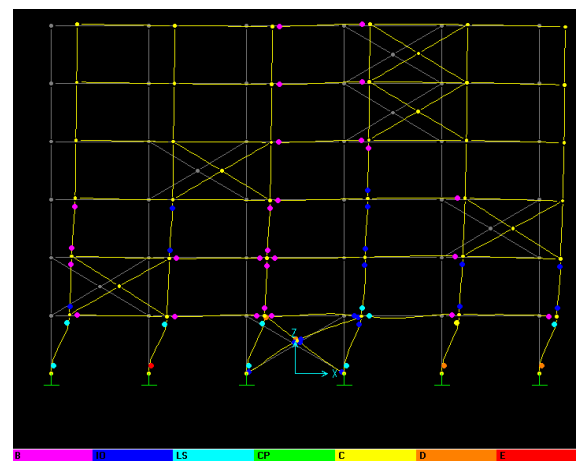
- Ο αρχικός φορέας αστόχησε σε μικρή τιμή της τέμνουσας βάσης από κάμψη στην αρχή των υποστρωμάτων του πρώτου ορόφου (στις πακτώσεις), χωρίς τα υπόλοιπα μέλη να καταπονηθούν. Διαπιστώνεται ότι είναι ακατάλληλος για σεισμό αφού αστοχία υποστρωμάτων στην βάση σημαίνει ολική κατάρρευση.



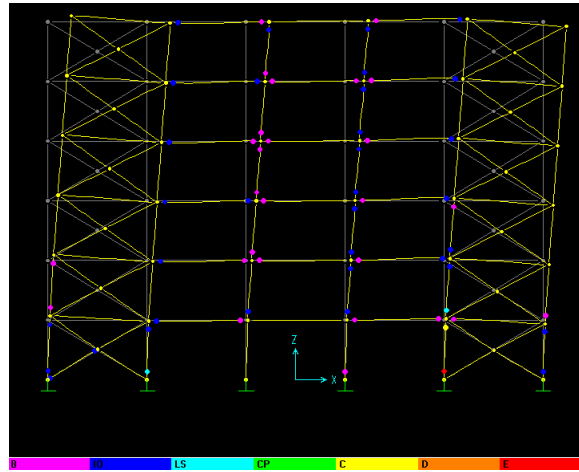
- Στην περίπτωση “X”, σημειώνεται αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας. Η πλαστιμότητα παραμένει στα ίδια επίπεδα με το αρχικό πλαίσιο. Διαγράμματα αξονικών δυνάμεων έδειξαν πως η μεσαία «δύσκαμπτη» στήλη παραλαμβάνει εξολοκλήρου την πλευρική φόρτιση. Η αξονική καταπόνηση αυξάνει διαδοχικά από μικρή στον τελευταίο όροφο σε μεγάλη στον πρώτο. Ομοίως καταπονούνται και οι κόμβοι στους οποίους συντρέχουν. Παρατηρείται έντονη καταπόνηση από συγκέντρωση ροπών κάμψης στις παρειές των δοκών που συνορεύουν με την μεσαία στήλη σε όλο το ύψος του φορέα. Η τελική αστοχία οφείλεται σε εφελκυσμό υποστρωμάτων βάσης της δύσκαμπτης στήλης.



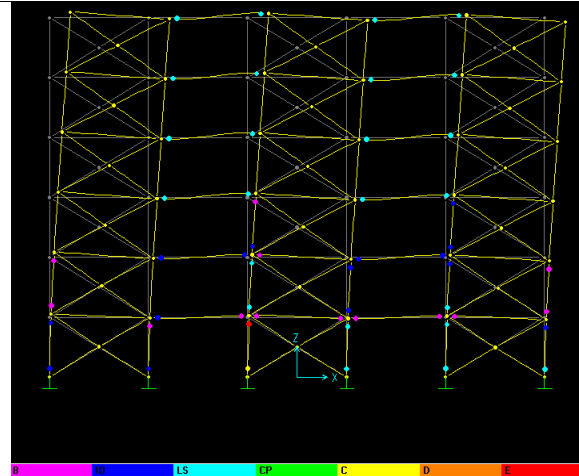
- Στην περίπτωση “διάσπαρτα X”, η αντοχή διπλασιάζεται σε σχέση με την περίπτωση “X” αν και χρησιμοποιείται ο ίδιος αριθμός συνδέσμων. Το εντυπωσιακό αυτό γεγονός οφείλεται στο ότι η ροπή του σεισμού δεν συγκεντρώνεται σε μία δύσκαμπτη στήλη αλλά διασπείρεται στον φορέα. Έτσι όλα τα χιαστί καταπονούνται σχετικά στον ίδιο βαθμό με αποτέλεσμα την δυνατότητα απορρόφησης μεγαλύτερης ενέργειας μέσω της πλαστικοποίησής τους (Φ.Βασιλείου, Α.Μαριδάκης). Η τελική αστοχία προέκυψε και εδώ από κάμψη σε υποστυλώμα βάσης.



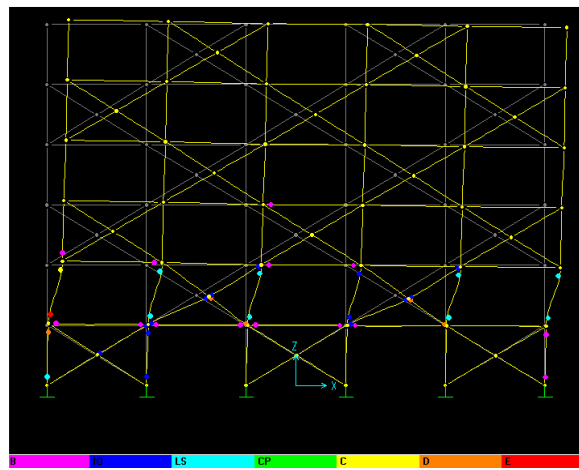
- Η περίπτωση “XX” αποδείχθηκε μία από τις καλύτερες λύσεις από άποψη πλαστιμότητας. Ο λόγος είναι ότι οι δύο ακραίες δύσκαμπτες στήλες προστατεύουν τα εσωτερικά μη ενισχυμένα στοιχεία από έντονες τοπικές παραμορφώσεις και διανέμουν ομοιόμορφα τις τάσεις. Η αντοχή είναι λίγο αυξημένη σε σχέση με την περίπτωση “X” όμως παραμένει αισθητά μικρότερη από την περίπτωση “διάσπαρτα X” (για τους λόγους που προαναφέρθηκαν), παρόλο που είχε τον μισό ακριβώς αριθμό χιαστί. Η αστοχία προήλθε από εφελκυσμό υποστυλώματος βάσης μιας δύσκαμπτης στήλης.



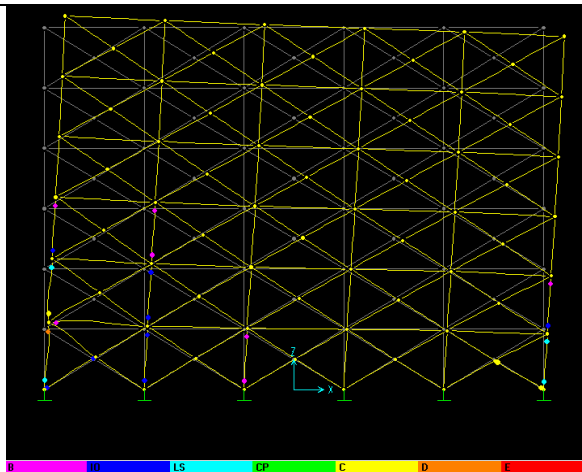
- Στην περίπτωση “XXX” η αντοχή και η δυσκαμψία είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την περίπτωση “X”, “XX”, και λίγο μεγαλύτερη από την “διάσπαρτα X”. Η πλαστιμότητα είναι σε καλύτερα επίπεδα, δεν ξεπερνά όμως αυτήν της “XX”. Το αδύναμό της σημείο είναι η συγκέντρωση τάσεων στις δοκούς που βρίσκονται στις δύο εύκαμπτες στήλες και στα αδύναμα υποστυλώματα βάσης από όπου προήλθε και η τελική αστοχία του φορέα.



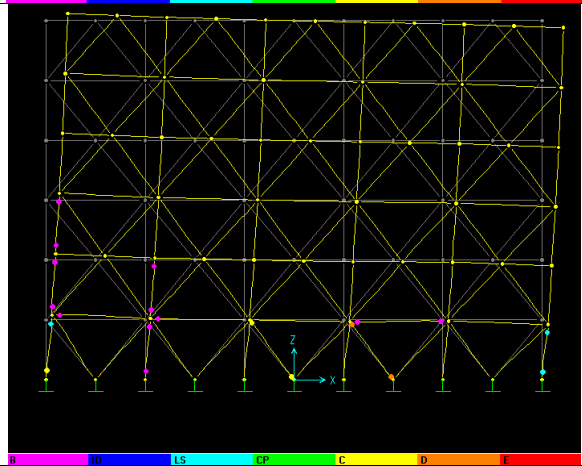
- Στην περίπτωση “XXXX” παρόλο που έχουν τοποθετηθεί στον φορέα 15 χιαστί, 3 λιγότερα δηλαδή από την “XXX”, η αντοχή είναι σχεδόν διπλάσια. Η διασπορά των χιαστί (που εδώ έγινε οργανωμένα) έπαιξε σημαντικό ρόλο στην ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Παρατηρείται έντονη καταπόνηση των κόμβων (ιδιαίτερα των πρώτων ορόφων). Η τελική αστοχία προκλήθηκε από κάμψη υποστυλώματος δεύτερου ορόφου, διότι ο όροφος αυτός έχει μόνο δύο χιαστί, ενώ ο πρώτος και ο τρίτος είναι πιο δύσκαμπτοι, με όλα τα υποστυλώματά τους μέσα σε φαντώματα, τα οποία έχουν ενισχυθεί με χιαστί δικτυωτούς συνδέσμους (αυτό που αστόχησε δεν ανήκει σε τέτοιο φάντωμα).



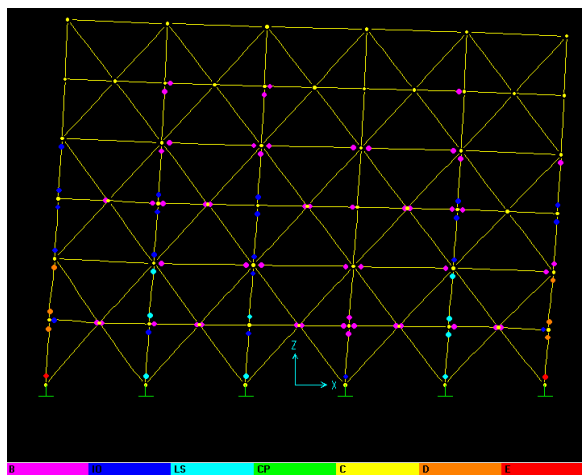
- Στην περίπτωση “XXXXX” όλα τα φαντώματα είναι ενισχυμένα. Η αντοχή και κυρίως η δυσκαμψία είναι πολύ μεγάλες. Η πρόωρη αστοχία ενός από τα αδύναμα υποστυλώματα βάσης (από εκεί προήλθε και η τελική αστοχία του φορέα) δεν άφησε τους υπόλοιπους ορόφους να παραλάβουν σημαντικές τάσεις.



- Εξίσου δύσκαμπτος, με ελαφρώς μικρότερη την αντοχή προέκυψε ο φορέας στην περίπτωση “VΛ”, σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Τα θεωρητικά αδύναμα σημεία που είναι οι κόμβοι στα μέσα των δοκών δεν καταπονήθηκαν λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας του συνόλου και της πρόωρης αστοχίας υποστυλώματος βάσης.



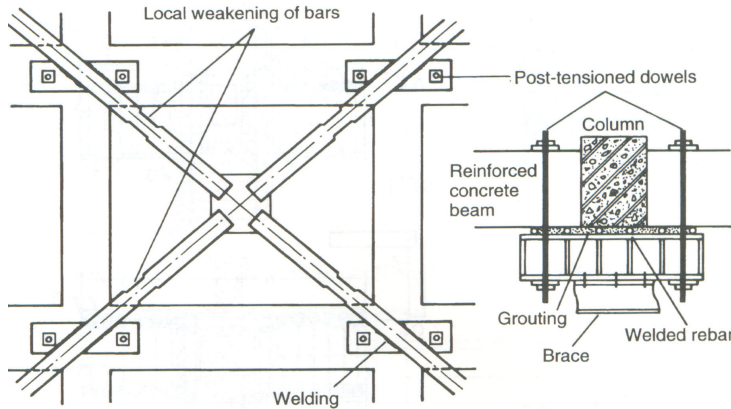
- Η διάταξη της περίπτωσης “ΛV”, παρόμοιας δυσκαμψίας με τις δύο προηγούμενες, είχε εντυπωσιακή τιμή αντοχής, τουλάχιστον τριπλάσια. Ο λόγος για τον οποίο συνέβη αυτό είναι γιατί σε αντίθεση με την “VΛ”, στα αδύναμα στην βάση τους υποστυλώματα του πρώτου ορόφου καταλήγουν οι δικτυωτοί σύνδεσμοι. Έτσι, η αστοχία που προκλήθηκε στις περισσότερες από τις παραπάνω περιπτώσεις από τα υποστυλώματα, εδώ καθυστέρησε αρκετά, αφήνοντας το σύνολο του φορέα να παραλάβει την πλευρική ώθηση. Αυτό παρατηρείται και από το διπλανό διάγραμμα που δείχνει πως ο φορέας καταπονήθηκε σχεδόν ομοιόμορφα σε όλους τους ορόφους.



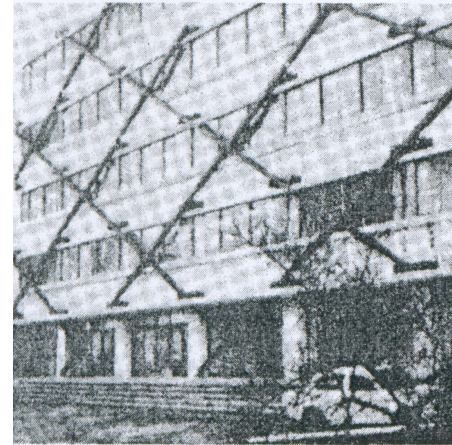
6. ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΠΟ ΣΕΙΣΜΟ.

Η εξωτερική χρήση μεταλλικών στοιχείων για την αντισεισμική θωράκιση των κατασκευών αποκτά ξεχωριστό ενδιαφέρον για τον μελετητή. Η φθορά στο κτίριο είναι μικρή και δεν επηρεάζεται η εσωτερική του λειτουργία. Το πλεονέκτημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για δημόσια κτίρια (δημόσιες υπηρεσίες, νοσοκομεία, σχολεία κλπ) όπου μία διακοπή της λειτουργίας τους, έστω και σύντομη, μπορεί να έχει σοβαρό κοινωνικοοικονομικό αντίκτυπο. Σε μία χώρα όπως η Ελλάδα, με έντονη σεισμική δραστηριότητα και με πολλά δημόσια κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα ηλικίας αρκετών δεκαετιών, ο συγκεκριμένος τρόπος ενίσχυσης είναι μια άμεση, οικονομική και κυρίως αποτελεσματική λύση.

Μία ειδική κατηγορία μεταλλικών δικτυωτών συνδέσμων αποτελεί και αυτή που απεικονίζεται στο σχήμα 6.1 (Kawamata, 1980). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μονάχα για συμμετρικούς φορείς με ίδιου μήκους ανοίγματα πλαισίων. Μεταλλικό έλασμα κιβώτοειδούς



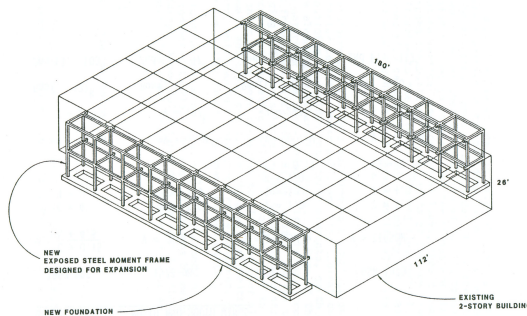
σχήμα 6.1



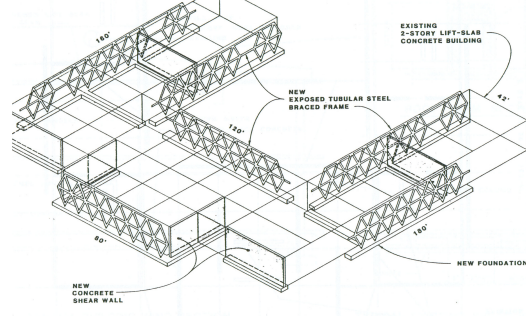
σχήμα 6.2

μορφής συνδέεται με τους κόμβους μέσω ρητίνης και αγκύρωσης με προεντεταμένες μεταλλικές ντίζες, κοχλιούμενες στα δύο άκρα. Πάνω σε αυτό συνδέεται ο δικτυωτός συνδετήρας. Στο σχήμα 6.2 απεικονίζεται μια εφαρμογή του από ένα κτίριο στην Καλιφόρνια.

Μεταλλικά συστήματα για την ενίσχυση της δυσκαμψίας σε πλευρική φόρτιση με δικιά τους θεμελίωση, μπορεί να είναι διαφόρων μορφών ανάλογα με τις ανάγκες του κτιρίου. Στα σχήματα 6.3 και 6.4 δίνονται παραδείγματα από δύο τέτοιες εφαρμογές.



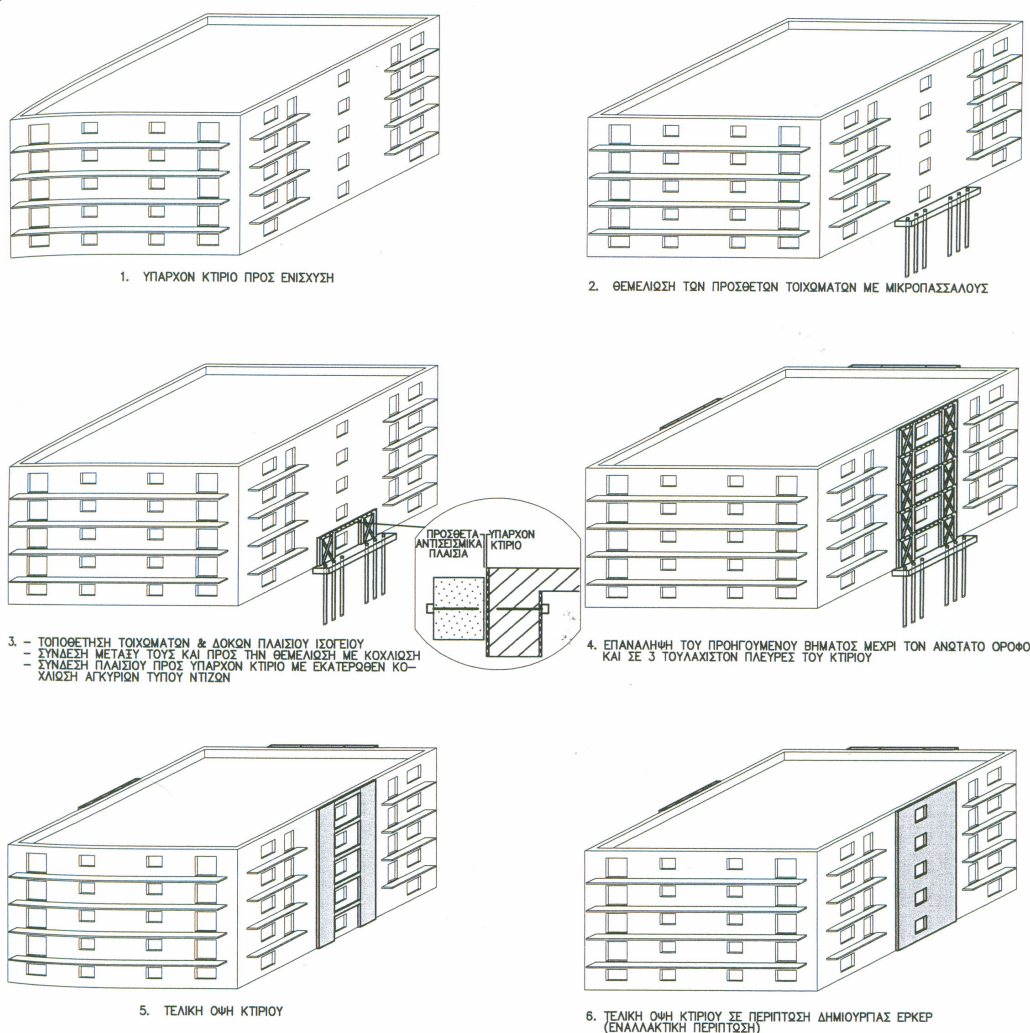
σχήμα 6.3



SCHEMATIC VIEW OF SEISMIC BRACING
U.S.G.S. BUILDING 2

σχήμα 6.4

Απλή αναφορά (αν και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον) γίνεται για μια καινούργια πρόταση η οποία διαφέρει ως προς τον τρόπο σύνδεσης των συστημάτων ενίσχυσης με το υπάρχον φέρον σύστημα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η πρόταση είναι πρόσθετα αρθρωτά συνδεδεμένα αντισεισμικά τοιχώματα (σύμμεικτα ή μεταλλικά πλαίσια) (Γιάννης Μαρνέρης – Πολιτικός Μηχανικός M.Sc. (dist), Δίπλωμα Ευρεσιτεχνείας αρ.1004531). Ο αρθρωτός αυτός τρόπος σύνδεσης «απλά μεταφέρει τις οριζόντιες σεισμικές δυνάμεις των διαφραγμάτων κάθε ορόφου στα νέα πλαίσια, μέσω διατμητικών δυνάμεων αναπτυσσομένων στους μεταλλικούς συνδέσμους. Με τον τρόπο αυτό δεν αναπτύσσονται ροπές στην σύνδεση, που θα είχαν σαν αποτέλεσμα την επιβάρυνση των συνορευόντων υπάρχοντων φερόντων στοιχείων και κατά συνέπεια την ανάγκη ενίσχυσής τους». Η μέθοδος απεικονίζεται στο σχήμα 6.5.



ΣΧΕΔΙΟ 5: ΦΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
 (ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΥΜΜΕΙΚΤΩΝ ή ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ)

σχήμα 6.5

Βιβλιογραφία:

1. **Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία.**
Κωνσταντίνος Σπυράκος, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π., Τ.Ε.Ε. 2004
2. **Fastenings for seismic retrofitting.** Comite Euto-International Du Beton, State of art report, Thomas Services Ltd 1997
3. **Σύμμικτες Κατασκευές.** Αθ.Χ. Τριανταφύλλου, Αναπλ. Καθηγητής, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών 2004
4. **Structural fault and repair, Rehabilitation of buildings in seismic zones.** J.O. Jirsa (volume 2) 1993
5. **Seismic design of steel structures**
6. **Χωροδικτυωτή στατική λειτουργία πολυόροφων κτιρίων σε σεισμό.** Φ. Βασιλείου, Α. Μαριδάκης
7. **Earthquake bracing program, United States geologic survey.** Menlo Park, California
8. **Studies regarding repair and retrofitting of the imperial county services building.** V. Bertero, California
9. **Σύστημα αντισεισμικής ενίσχυσης υπαρχόντων κτιρίων “Π.ΑΡ.Σ.ΑΝ.Τ.” (πρόσθετα αντισεισμικά τοιχώματα).** Γ. Μαρνέρης, Πολιτικός Μηχανικός M.Sc. (dist.)
10. **Sap2000 manual**
11. **FEMA 356 chapter 2**