



**ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ - ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ
ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ**

**ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕ
ΤΙΤΛΟ:**

**“ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ Ο/Σ ΜΕΤΑ
ΑΠΟ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΑΝΕΠΑΡΚΩΝ ΑΝΑΜΟΝΩΝ”**

ΦΟΡΕΑΣ ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗΣ:

ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ (Ο.Α.Σ.Π.)

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΩΣ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ :

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ – ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΤΣΩΝΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Α.Π.Θ.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ – ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΗ ΕΡΕΥΝΑ	7
2. ΚΑΤΑΣΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	29
2.1 Εισαγωγή – Στόχος της Έρευνας.....	29
2.2 Προσέγγιση του Προβλήματος.....	30
2.3 Περιγραφή δοκιμών υποστυλωμάτων.....	33
2.4 Κατασκευή δοκιμών σε αρχική μορφή.....	40
2.5 Επεμβάσεις για τη θεραπεία των ανεπαρκών μηκών παράθεσης....	43
2.5.1 Σειρά δοκιμών I.....	44
2.5.2 Σειρά δοκιμών II.....	51
2.5.3 Σειρά δοκιμών III.....	52
2.6 Διάταξη επιβολής σεισμικής φόρτισης – Όργανα μέτρησης.....	61
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	67
3.1 Ιστορία φόρτισης των δοκιμών υποστυλωμάτων.....	67
3.2 Απόκριση δοκιμών σε σεισμό.....	68
3.2.1 Σειρά δοκιμών I.....	68
3.2.1.1 Δοκίμιο C_1	68
3.2.1.2 Δοκίμιο S_1L_1	75
3.2.1.3 Δοκίμιο S_2L_1	82
3.2.1.4 Δοκίμιο S_1L_2	86
3.2.1.5 Δοκίμιο S_2L_2	93
3.2.2 Σειρά δοκιμών II.....	100
3.2.2.1 Δοκίμιο M_1	100
3.2.2.2 Δοκίμιο W_1	103
3.2.2.3 Δοκίμιο W_2	114
3.2.2.4 Δοκίμιο W_3	123
3.2.3 Σειρά δοκιμών III.....	132
3.2.3.1 Δοκίμιο RC_2	132
3.2.3.2 Δοκίμιο RHL_1	143
3.2.3.3 Δοκίμιο RWL_1	150
3.2.3.4 Δοκίμιο RHL_2	159
3.2.3.5 Δοκίμιο RWL_2	169
4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	
ΣΧΕΣΕΩΝ ΚΑΝ.ΕΠΕ ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	181
4.1 Γενικά.....	181
4.2 Σύγκριση σεισμικής συμπεριφοράς των δοκιμών της Σειράς I.....	182
4.3 Σύγκριση σεισμικής συμπεριφοράς των δοκιμών της Σειράς II.....	190
4.4 Σύγκριση σεισμικής συμπεριφοράς των δοκιμών της Σειράς III.....	198
4.5 Βαθμονόμηση των σχέσεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ.....	207
4.6 Συμπεράσματα.....	208
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	213
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	217
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	225

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1 ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ - ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΗ ΕΡΕΥΝΑ

Μία από τις σημαντικότερες αδυναμίες των παλαιών κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (της δεκαετίας του 1970 και παλαιότερων) είναι η ανεπαρκής παράθεση των διαμήκων οπλισμών των υποστυλωμάτων, η οποία μάλιστα πραγματοποιείται τις περισσότερες φορές στη βάση των στύλων αμέσως επάνω από τη στάθμη του ορόφου. Τα ανεπαρκή μήκη παράθεσης των διαμήκων οπλισμών των υποστυλωμάτων σε παλαιές κατασκευές είναι ένα θέμα εξαιρετικά γνωστό και σύνηθες. Μικρό μήκος αναμονών (μερικές φορές ιδιαίτερα μικρό) και συνεπώς λόγω αυτού μικρό και ανεπαρκές μήκος παράθεσης διαμήκων ράβδων οπλισμού υποστυλωμάτων οδηγεί αφενός στην ανάπτυξη μικρότερων ροπών από τις υπολογιζόμενες στα άκρα των στύλων (επιβαρύνοντας άλλα στοιχεία που δεν έχουν σχεδιαστεί για τέτοια εντατικά μεγέθη) και αφετέρου σε υπερβολικές παραμορφώσεις λόγω μεγάλης εξόλκευσης των ανεπαρκώς αγκυρωμένων ράβδων οπλισμού. Ο σχεδιασμός των παραθέσεων ως θλιπτικές, μόνο έναντι φορτίων βαρύτητας και με σχεδόν πλήρη απουσία οπλισμού συνδετήρων δεν επιτρέπει την ανάπτυξη της ονομαστικής καμπτικής αντοχής στα υποστυλώματα των παλαιών οικοδομών, τα οποία αστοχούν πρόωρα. Επιπλέον, η πραγματοποίηση παραθέσεων οπλισμών εντός της περιοχής πιθανής πλαστικής άρθρωσης στη βάση του υποστυλώματος επηρεάζει δυσμενώς τη συμπεριφορά του σε σεισμό, με κίνδυνο να προκληθεί μερική ή και ολική κατάρρευση της κατασκευής λόγω απώλειας της ικανότητας παραλαβής τόσο των σεισμικών ροπών όσο κυρίως αξονικού φορτίου.

Ο κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των πλευρικών παραθέσεων οπλισμών υπό σεισμική καταπόνηση είναι το ποσοστό και η απόσταση του εγκάρσιου οπλισμού στην περιοχή των παραθέσεων (Paulay 1982). Το πάχος του σκυροδέματος επικάλυψης των οπλισμών, η απόσταση μεταξύ των παρατιθέμενων ράβδων και η αντοχή του σκυροδέματος είναι και αυτοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των παραθέσεων, κυρίως σε μονότονη φόρτιση και κατά δεύτερο λόγο σε ανακυκλιζόμενη σεισμική φόρτιση. Μικρό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού στην περιοχή της παράθεσης οδηγεί πολύ σύντομα σε ρηγμάτωση και απώλεια της επικάλυψης του οπλισμού και καταλήγει σε έντονη μείωση της αντοχής και αστοχία της παράθεσης. Ακόμα όμως και στην περίπτωση που υπάρχει σημαντικός αριθμός συνδετήρων στην περιοχή όπου πραγματοποιούνται πλευρικές παραθέσεις διαμήκων ράβδων στύλων, η είσοδος της διαρροής του οπλισμού εντός της περιοχής των παραθέσεων μειώνει σημαντικά το ύψος της πλαστικής άρθρωσης. Ως συνέπεια των προηγούμενων, η απαίτηση πλαστιμότητας καμπυλοτήτων στο περιορισμένο αυτό ύψος πλαστικής άρθρωσης, για να παραχθεί η απαραίτητη συνολική πλαστιμότητα μετακινήσεων, αυξάνεται σημαντικά με αποτέλεσμα έντονο τον λυγισμό και ενδεχομένως τη θραύση των ράβδων, (Paulay 1982, Priestley, Seible, Calvi 1996). Αυτός είναι ο λόγος που πολλοί κανονισμοί συνιστούν την αποφυγή πλευρικών παραθέσεων ράβδων οπλισμού εντός των περιοχών όπου είναι πιθανό να σχηματιστούν πλαστικές αρθρώσεις.

Το πρόβλημα του ανεπαρκούς μήκους πλευρικής παράθεσης ράβδων εμφανίζεται και στη περίπτωση καθ' ύψους επέκτασης υφιστάμενων παλαιών αλλά ενίοτε και πιο σύγχρονων κατασκευών όταν υφίστανται ανεπαρκείς αναμονές, οι οποίες οδηγούν αν δε ληφθούν κατάλληλα μέτρα θεραπείας, σε ανεπαρκή μήκη παράθεσης με τα γνωστά επακόλουθα. Επίσης, η καμπτική αντοχή προσεισμικά ενισχυμένων στύλων με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος ή από άλλο υλικό τίθεται εν αμφιβόλω εξαιτίας των ανεπαρκών παραθέσεων των υφιστάμενων διαμήκων οπλισμών υποστυλωμάτων, ιδίως μάλιστα όταν ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς η συμβολή τους στην καμπτική λειτουργία των ενισχυμένων στύλων, ενώ είναι ιδιαίτερα ευάλωτοι στις επικείμενες ολισθήσεις κατά τη διάρκεια σεισμού. Σε μελέτη του Gaynor (1988) μάλιστα, πλαίσια της δεκαετίας του '50 ενισχύθηκαν με εμφαννόμενα τοιχώματα και υποβλήθηκαν σε εντός επιπέδου πλευρική φόρτιση. Τα ενισχυμένα πλαίσια αστόχησαν στις ανεπαρκείς παραθέσεις των υποστυλωμάτων εντός των οποίων πραγματοποιήθηκαν οι εμφαννώσεις των τοιχωμάτων. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι η θεραπεία των ανεπαρκών παραθέσεων ράβδων σε υφιστάμενες κατασκευές είναι απαραίτητη και πρέπει να αντιμετωπίζεται σε κάθε περίπτωση με μεγάλη προσοχή.

Το ανεπαρκές μήκος παράθεσης των ράβδων διαμήκους οπλισμού υποστυλωμάτων υπήρξε στο παρελθόν ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες πρόκλησης καταρρεύσεων στις παλαιές οικοδομές και, εφόσον δεν ληφθούν άμεσα μέτρα θεραπείας, υπάρχει ο κίνδυνος να προκληθούν και στο μέλλον καταρρεύσεις λόγω του συγκεκριμένου προβλήματος. Παρά την κρισιμότητα ωστόσο του προβλήματος η σχετική βιβλιογραφία είναι περιορισμένη, ενώ και οι πειραματικές εργασίες δεν καλύπτουν το σύνολο των ζητημάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η σοβαρότητα του αντικείμενου επομένως είναι προφανής σε μία εξαιρετικά σειсмоγενή περιοχή όπως η Ελλάδα και στην τρέχουσα χρονική περίοδο τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας μπορούν να συμβάλλουν στη διαμόρφωση των διατάξεων του Κανονισμού Επεμβάσεων ΚΑΝΕΠΕ που χρήζουν πειραματικής διερεύνησης. Η παρούσα έρευνα της συμπεριφοράς υποστυλωμάτων μετά από επεμβάσεις στις περιοχές ανεπαρκών παραθέσεων των διαμήκων οπλισμών τους αποτελεί αντικείμενο Ερευνητικού Προγράμματος που χρηματοδοτεί ο Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π) και είναι αφενός αναγκαία να πραγματοποιηθεί και αφετέρου πρωτότυπη.

Στη διεθνή βιβλιογραφία το πρόβλημα του ανεπαρκούς μήκους παραθέσεως ράβδων αντιμετωπίζεται κυρίως με την επιβολή περίσφιγξης στην περιοχή των παραθέσεων. Οι κύριες τεχνικές ενίσχυσης υποστυλωμάτων με παρατιθέμενους οπλισμούς είναι η ενίσχυση με τη χρήση μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα ή μεταλλικού μανδύα ή με χρήση υφασμάτων από σύνθετα υλικά γύρω από τον υφιστάμενο στύλο. Μία νεότερη μέθοδος, η «CS», συνδυάζει τη χρήση μεταλλικών πλακών στις πλευρές των υποστυλωμάτων και ταυτόχρονη χρήση υφασμάτων από σύνθετα υλικά. Με την επιβολή της περίσφιγξης αυξάνεται η αντοχή του σκυροδέματος ενώ εμποδίζεται η πρόωρη αποφλοίωση του σκυροδέματος επικάλυψης των οπλισμών και διευκολύνεται η απρόσκοπτη μεταφορά δυνάμεων μεταξύ των πλευρικών παρατιθέμενων ράβδων ώστε να καταστεί εφικτή η διαρροή τους. Επίσης, ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η αποκατάσταση της συνέχειας των παρατιθέμενων διαμήκων ράβδων οπλισμού των υποστυλωμάτων μέσω

συγκόλλησης. Οι δύο αυτές μέθοδοι, της επιβολής εγκάρσιας περίσφιγξης στην περιοχή της παράθεσης και της συγκόλλησης των παρατιθέμενων ράβδων, κυριαρχούν στη βιβλιογραφία αλλά αποτελούν και τη βασική φιλοσοφία αντιμετώπισης του προβλήματος στον Κανονισμό Επεμβάσεων.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν θεωρητικά-αναλυτικά μοντέλα υπολογισμού του αναγκαίου εμβαδού οπλισμού περίσφιγξης όταν πρόκειται για θεραπεία ανεπαρκώς παρατιθέμενων ράβδων με την προσθήκη εξωτερικού οπλισμού περίσφιγξης (συνδετήρες μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος, συνεχής ή μη εξωτερικός χαλύβδινος μανδύας, μανδύας από σύνθετα υλικά). Επίσης έχουν αναπτυχθεί αναλυτικά μοντέλα πρόβλεψης της σεισμικής απόκρισης υποστυλωμάτων παλαιών υφιστάμενων κατασκευών με πρόβλημα ανεπαρκούς παράθεσης των διαμήκων ράβδων οπλισμού των.

Οι **M.J.Nigel Priestley, Frieder Seible και Gian Michele Calvi (1996)** μελέτησαν σε βάθος τη συμπεριφορά υποστυλωμάτων γεφυρών με ανεπαρκείς παραθέσεις των διαμήκων οπλισμών στη βάση τους, όπου αναμένεται ο σχηματισμός πλαστικής άρθρωσης, τόσο σε παρθενική μορφή όσο και μετά από επεμβάσεις για τη θεραπεία του προβλήματος της ανεπαρκούς παράθεσης. Μελέτησαν τις περιπτώσεις κατασκευής μανδύων οπλισμένου σκυροδέματος, μεταλλικών μανδύων και μανδύων από σύνθετα υλικά και συνέκριναν τη θεαματικά βελτιωμένη σεισμική απόκριση σε κάθε περίπτωση με την αντίστοιχη ιδιαίτερα κακή σεισμική συμπεριφορά του παρθενικού δοκιμίου υποστυλώματος. Παράλληλα ανέπτυξαν σχέσεις υπολογισμού του μήκους πλαστικής άρθρωσης, της απαιτούμενης δύναμης περίσφιγξης και του απαιτούμενου πάχους μανδύα από χάλυβα ή σύνθετα υλικά. Οι επεμβάσεις που εξέτασαν πραγματοποιήθηκαν με την εφαρμογή περίσφιγξης για την ενίσχυση της καμπτικής πλαστιμότητας των στύλων, τη διατήρηση της καμπτικής ακεραιότητας των πλευρικών παραθέσεων και την ενίσχυση της διατμητικής αντοχής και της δυσκαμψίας των υποστυλωμάτων. Σχετικά με το πρόβλημα των ανεπαρκών παραθέσεων αναφέρουν ότι, μετά την εξάντληση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος στην περιοχή των παραθέσεων, αναπτύσσεται ρηγμάτωση της επικάλυψης και η αστοχία των παραθέσεων μπορεί να αποφευχθεί μόνον εφόσον εφαρμοσθεί κατάλληλη δύναμη περίσφιγξης επί της ρηγματωμένης επιφάνειας. Συντελεστής τριβής $\mu=1,4$ μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλος εφόσον η τιμή της εγκάρσιας παραμόρφωσης του σκυροδέματος δεν υπερβαίνει την τιμή $\epsilon_s=0,0015$ και με την προϋπόθεση αυτή σχεδιάστηκε η ενίσχυση των ανεπαρκών παραθέσεων. Η απαιτούμενη τάση περίσφιγξης για την αποφυγή αστοχίας της παράθεσης μιας ράβδου διαμέτρου A_b που φθάνει στη διαρροή είναι $f_t = \frac{A_b f_s}{\mu \cdot p \cdot l_s}$ όπου p το μήκος του ρήγματος και l_s το μήκος της παράθεσης. Αν αναμένεται σχηματισμός πλαστικής άρθρωσης στην περιοχή των παραθέσεων τότε η τιμή της δύναμης του οπλισμού που πρέπει να μεταφερθεί θα αντιστοιχεί σε εκείνη που προκαλείται για πολύ μεγάλες παραμορφώσεις, οι οποίες λαμβάνουν χώρα εντός της πλαστικής άρθρωσης. Προκύπτει επομένως ότι πρέπει να ληφθεί υπόψη η πιθανότητα ανάπτυξης υπεραντοχής του υλικού. Επομένως η τιμή f_s θα ληφθεί ίση με $f_s = 1,7 \cdot f_{yl}$ όπου f_{yl} η ονομαστική αντοχή διαρροής του διαμήκους οπλισμού. Για την τιμή αυτή της f_s και για συντελεστή $\mu=1,4$ η προηγούμενη σχέση λαμβάνει τη μορφή $f_t = \frac{1,21 \cdot A_b \cdot f_{yl}}{p \cdot l_s}$. Ο υπολογισμός του πάχους κυκλικού χαλύβδινου μανδύα διαμέτρου D γίνεται από την

εξίσωση $\rho_s = \frac{4 \cdot t_j}{D}$ λύνοντας ως προς t_j . Για κυκλικό χαλύβδινο μανδύα ισχύει $f_t = 0,5 \cdot \rho_{sj} \cdot f_{sj}$ όπου $f_{sj} = 0,0015 E_{sj}$. Από την προηγούμενη σχέση προκύπτει το απαιτούμενο ποσοστό οπλισμού περίσφιγξης ίσο με $\rho_{sj} = \frac{2,42 \cdot A_b \cdot f_{yl}}{p \cdot l_s \cdot (0,0015 \cdot E_{sj})}$ αλλά όχι λιγότερο από $\rho_{sj} = \frac{2,42 \cdot A_b \cdot f_{yl}}{p \cdot l_s \cdot f_{yj}}$. Για την περίπτωση μανδύων από σύνθετα υλικά οι Priestley, Seible και Calvi ακολουθούν τις ίδιες βασικές αρχές και εξισώσεις όπως για τους μεταλλικούς μανδύες. Εξ αιτίας όμως του χαμηλού μέτρου ελαστικότητας των σύνθετων υλικών, ιδίως των FRPs, η παραδοχή για ανηγμένη παραμόρφωση $\epsilon = 0,0015$ θα έδινε πολύ μεγάλα απαιτούμενα πάχη μανδύων. Εναλλακτικά προτείνεται η εξασφάλιση ενός βαθμού ενεργητικής περίσφιγξης είτε εφαρμόζοντας το υλικό ενίσχυσης πάνω στο υποστύλωμα υπό ένταση είτε προεντείνοντας το μανδύα εισάγοντας υπό πίεση το συνδετικό υλικό μεταξύ μανδύα και υποστυλώματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις το απαιτούμενο πάχος μανδύα μειώνεται και δίνεται από τη σχέση

$$\rho_{sj} = 2 \left(\frac{\frac{A_b f_s}{\mu p l_s} - f_a}{0,0015 E_{sj}} \right)$$
 όπου f_a η ενεργός τάση περίσφιγξης που παρέχεται από το μανδύα. Για την ενίσχυση των περιοχών ανεπαρκών παραθέσεων με μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα η κατασκευή ελλειπτικού μανδύα γύρω από ορθογωνικής διατομής στύλους είναι προτιμότερη, εφόσον όμως το πάχος του μανδύα είναι τουλάχιστον όσο το ένα έκτο του μήκους της πλευράς του στύλου στον οποίο κατασκευάζεται ο μανδύας, ακόμα και ορθογωνικός μανδύας είναι σε θέση να περισφίξει αποτελεσματικά το υποστύλωμα.

Οι **Jose A. Pincheira, Faridun S. Dotiwala και Jonathan T. D'Souza (1999)** ανέπτυξαν ένα δισδιάστατο μη γραμμικό μοντέλο για τον αναλυτικό υπολογισμό της κυκλικής απόκρισης μη πλάσιμων στύλων οπλισμένου σκυροδέματος. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της συμπεριφοράς υποστυλωμάτων παλαιών κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος υπό μονότονα αυξανόμενη ή ανακυκλιζόμενη σεισμική φόρτιση. Κύρια χαρακτηριστικά του μοντέλου ήταν η ικανότητα αναπαράστασης τόσο της καμπτικής ή διατμητικής αστοχίας των στύλων, όσο και της μείωσης της δυσκαμψίας των δοκιμών λόγω της ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Η ανάπτυξη του μοντέλου, που είναι κατάλληλο για μη γραμμική ανάλυση υφιστάμενων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, βασίστηκε σε μία τροποποιημένη έκδοση του προγράμματος DRAIN-2D. Για την εκτίμηση της καμπτικής συμπεριφοράς υποστυλωμάτων στο μοντέλο εφαρμόστηκε μία διγραμμική σχέση ροπής-στροφής της οποίας ο υστερητικός νόμος βασίστηκε στο μοντέλο Takeda. Το τελευταίο τροποποιήθηκε ώστε να αναπαριστά την αστοχία πλευρικής παράθεσης ή αγκύρωσης του διαμήκους οπλισμού σε δοκούς και στύλους. Η μείωση της καμπτικής αντοχής με την αύξηση του μεγέθους της στροφής ελήφθη υπόψη στο μοντέλο με την εισαγωγή ενός ευθύγραμμου τμήματος μηδενικής κλίσης στην καμπύλη ροπών-στροφών. Η διατμητική συνιστώσα που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο μπορούσε να λάβει υπόψη την μείωση της δυσκαμψίας, τη στένωση των βρόχων υστέρησης και τη σταδιακή μείωση της αντοχής κατά τη διάρκεια των επαναλαμβανόμενων κύκλων φόρτισης. Οι μηχανισμοί αντίστασης που χρησιμοποιήθηκαν για να περιγραφεί η συμπεριφορά των υποστυλωμάτων περιελάμβαναν την κάμψη, τη διάτμηση και την ολίσθηση της αγκύρωσης του

διαμήκους οπλισμού των υποστυλωμάτων. Οι συγγραφείς πραγματοποίησαν σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν για επτά χαρακτηριστικά υποστυλώματα παλαιών κατασκευών βάσει του αναλυτικού τους μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα δύο ανεξάρτητων ερευνών των Aboutaha (1994) και Lynn et al. (1996). Τα δοκίμια που επιλέχθηκαν για μελέτη και σύγκριση είχαν ως προεξάρχουσα τη διατμητική συμπεριφορά κατά τη διενέργεια των πειραμάτων. Σε όλους τους στύλους ο διαμήκης οπλισμός ήταν συνεχής και αγκυρωμένος στη βάση θεμελίωσης με διαμορφωμένα άγκιστρα 90° . Ο εγκάρσιος οπλισμός των δοκιμών αποτελούνταν από συνδετήρες $\text{No}3$ ανά αποστάσεις 12, 16 και 18 ίντσες με μη σεισμικά άγκιστρα 90° . Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κυκλική φόρτιση. Για την προσομοίωση των στύλων στο αναλυτικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν δύο ή τρία πρισματικά στοιχεία. Το μεγαλύτερο σε μήκος κεντρικό στοιχείο (ίσο με το καθαρό ύψος των δοκιμών) προσομοίωνε την καμπτική και τη διατμητική συνιστώσα απόκρισης, ενώ τα πιο κοντά ακραία στοιχεία προσομοίωναν την ολίσθηση της αγκύρωσης του διαμήκους οπλισμού και είχαν δυσκαμψία δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη απ' ό,τι τα μακρύτερα στοιχεία. Οι στροφές των άκρων ελήφθησαν υπόψιν μέσω ενός μη γραμμικού στροφικού ελατηρίου στους κατάλληλους κόμβους των στοιχείων. Για την προσομοίωση των ελεγχόμενων ποσών μετακίνησης που επιβλήθηκαν στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ένα ελαστικό ελατήριο κατάλληλης δυσκαμψίας στην κορυφή των στύλων. Σε όσα δοκίμια επιβλήθηκε αξονικό φορτίο στους στύλους ελήφθη και αυτό υπόψη. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από τους συγγραφείς εφαρμόζεται μόνο σε δισδιάστατες αναλύσεις και υποστυλώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Επίσης η αποτελεσματικότητα των συνδετήρων ως οπλισμών διάτμησης, περίσφιγξης και αποτροπής του πλευρικού λυγισμού του διαμήκους οπλισμού δεν μπορεί να κατανοηθεί πλήρως και συνεπώς είναι δύσκολη η πλήρης ποσοτικοποίησή της. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν από το αναλυτικό μοντέλο εκτίμησης της συμπεριφοράς των επτά εξεταζόμενων στύλων με τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψε ότι η αναλυτική διαδικασία έδωσε λογικές αλλά συντηρητικές εκτιμήσεις της πλευρικής αντοχής και παραμόρφωσης των στύλων. Επίσης, η υπολογιζόμενη μορφή αστοχίας των υποστυλωμάτων ήταν σύμφωνη με την παρατηρούμενη μορφή αστοχίας κατά τη διενέργεια των πειραμάτων. Στις περιπτώσεις των υποστυλωμάτων που το μοντέλο δεν προέβλεψε επαρκώς τη μορφή αστοχίας, αυτό οφειλόταν στη συντηρητική εκτίμηση της απόκρισης των δοκιμών σε πλευρική φόρτιση. Τα κύρια στοιχεία και τα γενικά χαρακτηριστικά της μετρούμενης απόκρισης των στύλων υπό κυκλική φόρτιση, συμπεριλαμβανομένης της δυσκαμψίας και της εξασθένησης της αντοχής, αναπαριστώνται ικανοποιητικά από το μοντέλο.

Ο **Θ. Τριανταφύλλου (2004)** αναφέρεται στα προβλήματα που άπτονται του μηχανισμού συνάφειας μεταξύ των ράβδων οπλισμού και του σκυροδέματος σε περιοχές ανεπαρκών παραθέσεων διαμήκων οπλισμών υποστυλωμάτων παλαιών οικοδομών. Επίσης αναφέρεται σε μία σχέση υπολογισμού του απαιτούμενου πάχους μανδύα περίσφιγξης των στύλων για την αποφυγή απώλειας συνάφειας στις περιοχές των παραθέσεων. Τα υποστυλώματα των παλαιών οικοδομών με λίγο έως καθόλου οπλισμό περίσφιγξης στο ύψος των παραθέσεων, οι οποίες πραγματοποιούνται στη βάση των στύλων ακριβώς επάνω από τη στάθμη του ορόφου όπου ενδέχεται να σχηματισθεί πλαστική άρθρωση, παρουσιάζουν πτωχή αντισεισμική συμπεριφορά. Η

ύπαρξη μάλιστα τις περισσότερες φορές λείου χάλυβα επιτείνει το πρόβλημα και οδηγεί σε πρόωρη αστοχία των παραθέσεων. Η απουσία εγκάρσιου οπλισμού στο ύψος των παραθέσεων οδηγεί στην παραλαβή της εγκάρσιας αναπτυσσόμενης τάσης μόνον από το σκυρόδεμα επικάλυψης μέχρις εξαντλήσεως της εφελκυστικής του αντοχής. Μετά την εξάντληση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος σχηματίζεται ρωγμή διαδρομής p_c . Η δύναμη F που μπορεί σε αυτήν την περίπτωση να αναπτυχθεί σε μία ράβδο εμβαδού A_b στην περιοχή παράθεσης μήκους l_s θα είναι ίση με $F = p_c(\mu \cdot f_{ctm})l_s$. Ο επιτυχής σχεδιασμός μανδύα από ινοπλισμένα πολυμερή υλικά σε περιοχές πλευρικών παραθέσεων οπλισμών οφείλει να εξασφαλίσει ότι η διαρροή του διαμήκους οπλισμού του υποστυλώματος θα αναπτυχθεί πριν από την απώλεια συνάφειας, δηλαδή ότι $A_b \cdot f_{yd} = p_c(\mu \cdot \sigma_l)l_s$ όπου σ_l η τάση περίσφιγξης που παρέχει ο μανδύας των σύνθετων υλικών κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας, οπότε $\sigma_l = \sigma_{l,ud}$. Σε υποστυλώματα ορθογωνικής διατομής η τάση αυτή μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά από το μέσο όρο των τάσεων περίσφιγξης στις δύο διευθύνσεις των πλευρών του στύλου από τη σχέση $\sigma_l = 0.5 \cdot (\sigma_{lud,b} + \sigma_{lud,d})$.

Επομένως

$$\sigma_l = 0,5 \cdot \left(\frac{2t_f}{d} f_{fde} + \frac{2t_f}{b} f_{fde} \right) = t_f \cdot f_{fde} \cdot \left(\frac{d+b}{d \cdot b} \right)$$

όπου f_{fde} η ενεργή τάση σχεδιασμού των σύνθετων υλικών.

Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω εξισώσεων οδηγεί στη σχέση

$$t_f = (b \cdot d \cdot A_b \cdot f_{yd}) / [(b + d) \cdot p_c \cdot \mu \cdot f_{fde} \cdot l_s]$$

για τον υπολογισμό του απαιτούμενου πάχους μανδύα από σύνθετα υλικά για την αποφυγή απώλειας συνάφειας στις περιοχές ανεπαρκών παραθέσεων οπλισμών. Ο υπολογισμός του μήκους της ρωγμής διαδρομής p_c γίνεται για ορθογωνικό υποστύλωμα από τη σχέση:

$$p_c = \left(\frac{s}{2} \right) + 2 \cdot (d_b + c) \leq 2\sqrt{2} \cdot (d_b + c) ,$$

όπου s η απόσταση μεταξύ των ράβδων. Ο Τριανταφύλλου τονίζει ότι οι Seible et al. (1997) βασιζόμενοι σε πειραματικά αποτελέσματα διατύπωσαν μία επιπλέον συνθήκη για την εξασφάλιση συνάφειας ράβδου-σκυροδέματος βάσει της προηγούμενης σχέσης υπολογισμού του πάχους μανδύα. Η συνθήκη αυτή προβλέπει ότι η εγκάρσια παραμόρφωση του σκυροδέματος δεν πρέπει να υπερβαίνει μία κρίσιμη τιμή γύρω στο 0,001-0,002. Επομένως η ενεργή τάση σχεδιασμού των σύνθετων υλικών θα πρέπει να περιορίζεται σε $f_{fde} \leq 0,0015 \cdot E_f$.

Ο **Σ. Δρίτσος (2005)** προτείνει μία σχέση υπολογισμού του απαιτούμενου οπλισμού περίσφιγξης της περιοχής ανεπαρκώς παρατιθέμενων ράβδων υποστυλωμάτων. Με την περίσφιγξη που υπολογίζεται βάσει της σχέσεως που προτείνει επιδιώκεται η αποφυγή της πρόωρης αστοχίας της περιοχής της παράθεσης από διάρρηξη του περιβάλλοντος τη ράβδο σκυροδέματος, η οποία οδηγεί σε αστοχία του μηχανισμού μεταφοράς δυνάμεων μεταξύ των ράβδων και ολίσθησή τους κατά μήκος της κρίσιμης ρωγμής που δημιουργείται μεταξύ των ράβδων πριν αυτές φθάσουν στη

διαρροή τους. Ο υπολογισμός του απαιτούμενου εμβαδού του υλικού περίσφιγξης που μπορεί να είναι χάλυβας ή ινοπλισμένα πολυμερή με τη μορφή συνεχούς μανδύα ή κολάρων πραγματοποιείται βάσει της σχέσεως $\frac{A_j}{s} = \gamma_{Rd} \frac{1-\lambda_s}{\beta} \frac{1}{\mu} \frac{f_{yk} A_b}{\sigma_{jd} l_s}$

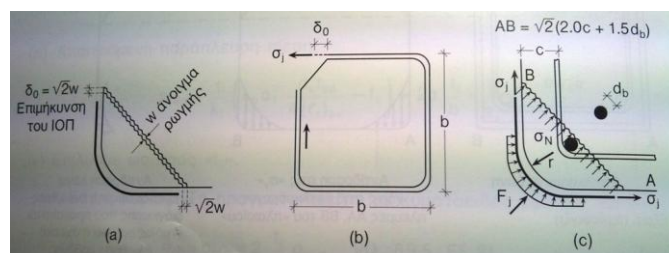
Στην ανωτέρω σχέση $\gamma_{Rd} = 1,5$, $A_j = t_j \cdot w_j$ είναι το εμβαδόν της διατομής του οπλισμού περίσφιγξης υπό μορφή κολάρων, όπου t_j και w_j το πάχος και το πλάτος της διατομής των κολάρων αντίστοιχα. Στην περίπτωση συνεχούς χαλύβδινου εξωτερικού μανδύα είναι $w_j = s$ όπου s η αξονική απόσταση των κολάρων και επομένως $(A_j/s)_{\text{απ}} = (t_j)_{\text{απ}}$. Ο συντελεστής λ_s εκφράζει το μέγεθος της συνεισφοράς της συνάφειας του ήδη διατιθέμενου μήκους παράθεσης. Οι τιμές του συντελεστή β είναι πολύ κοντά στη μονάδα αν $c/d_s \leq 2$, όπου c η μικρότερη επικάλυψη παρατιθέμενης ράβδου. Ο συντελεστής τριβής μ εκφράζει την τριβή που μπορεί να επιστρατευθεί στη δυνητική διεπιφάνεια ολίσθησης στη θέση της αναμενόμενης ρηγμάτωσης. Ακόμα, $A_b = \pi \cdot d_s^2 / 4$ είναι το εμβαδόν μίας παρατιθέμενης ράβδου και $\sigma_{jd} = E_j \cdot \epsilon_{jd}$ είναι η επιστρατευόμενη αξονική τάση σχεδιασμού των στοιχείων περίσφιγξης, η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή $\sigma_{j,\max} = f_{yd}$ για ενίσχυση με στοιχεία από χάλυβα. Τέλος, ο όρος f_{yk} εκφράζει τη χαρακτηριστική αντοχή του χάλυβα. Σύμφωνα με τον Δρίτσο η εφαρμογή περίσφιγξης μπορεί να εξασφαλίσει την αποφυγή αστοχίας συνάφειας των παρατιθέμενων ράβδων όταν το διατιθέμενο μήκος αλληλοκάλυψης είναι $l_s > 0,30 \cdot l_{so}$ και $l_s > 15 \cdot d_s$. Διαφορετικά θεωρεί ότι η περίσφιγξη δεν μπορεί να προσφέρει. Η τιμή του αναγκαίου μήκους παράθεσης l_{so} επιτρέπεται σε υφιστάμενα δομήματα να υπολογίζεται ίση με το μήκος αγκύρωσης όπως προβλέπεται από τον ΕΚΩΣ 2000 [...], §17.6, εξ.17.1, όπου όμως οι τιμές των υλικών εισάγονται με τις μέσες τιμές τους χωρίς συντελεστές ασφαλείας και χωρίς τους πολλαπλασιαστικούς συντελεστές υπερκάλυψης της §17.7.2.2 και της §18.4.7 του ΕΚΩΣ. Επίσης, το μήκος του στοιχείου στο οποίο εφαρμόζεται η περίσφιγξη πρέπει να είναι κατ' ελάχιστο όσο το ύψος της κρίσιμης περιοχής και όχι λιγότερο από $1,3 \cdot l_s$ ή 0,60 m. Τέλος, όταν χρησιμοποιείται συνεχής εξωτερικός μανδύας από χάλυβα το πάχος του πρέπει να είναι τουλάχιστον 1 mm, ενώ αν χρησιμοποιούνται συνδετήρες ή κολάρα διατομής A_j ανά αποστάσεις s οι παραπάνω τιμές αντιστοιχούν στο μέγεθος A_j/s ενώ οι αποστάσεις s δεν πρέπει να ξεπερνούν το $0,3 \cdot d$.

Οι **Jae-Yeol Cho και Jose A. Pincheira (2006)** πραγματοποίησαν μη γραμμικές δισδιάστατες αναλύσεις σε 14 δοκίμια υποστυλωμάτων και συνέκριναν τα αποτελέσματα της υπολογισθείσας συμπεριφοράς των δοκιμίων με τα πειραματικά αποτελέσματα τριών ανεξάρτητων εργασιών όπου εξεταζόταν η σεισμική συμπεριφορά δοκιμίων στύλων πλήρους κλίμακας καθώς και δοκιμίων στύλων - προβόλων. Σκοπός της έρευνάς τους ήταν η δημιουργία ενός αναλυτικού μοντέλου εκτίμησης της σεισμικής απόκρισης υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος με ανεπαρκείς παραθέσεις των διαμήκων οπλισμών στη βάση τους, εντός της περιοχής πιθανής πλαστικής άρθρωσης και με λίγο, αραιά διατεταγμένο οπλισμό διάτμησης. Το μοντέλο βασίστηκε στη σχέση μεταξύ των τάσεων συνάφειας και των ολισθήσεων προκειμένου να υπολογισθεί η αναπτυσσόμενη τάση των διαμήκων ράβδων οπλισμού των στύλων και οι παραμορφώσεις τους κατά την αστοχία των παραθέσεων. Στο μοντέλο περιλαμβάνεται η υποβάθμιση της αντοχής και της δυσκαμψίας των υποστυλωμάτων με την αύξηση των παραμορφώσεων και τον αριθμό των ανακυκλιζόμενων πλευρικών μετακινήσεων. Η προτεινόμενη από τους

συγγραφείς μέθοδος – μοντέλο βαθμονομήθηκε με πειράματα σε δοκίμια που προσομοιάζαν υποστυλώματα κατασκευών της δεκαετίας του 1970 και παλαιότερα. Σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο-μοντέλο προκύπτει ότι οι σχέσεις μεταξύ των τάσεων συνάφειας και των ολισθήσεων για μεμονωμένη ράβδο εμβαπτισμένη σε σκυρόδεμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσομοιωθεί ο μηχανισμός συμπεριφοράς των παρατιθέμενων ράβδων. Επίσης θεωρήθηκε ότι η αντοχή μιας παρατιθέμενης ράβδου είναι σχεδόν η ίδια με την αντοχή μεμονωμένης ράβδου εμβαπτισμένης σε σκυρόδεμα. Οι βασικοί μηχανισμοί αντίστασης που θεωρήθηκε ότι περιγράφουν τη συμπεριφορά υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος είναι τρεις και περιλαμβάνουν τη συνεισφορά από κάμψη, διάτμηση και τη σχέση συνάφειας-ολισθήσεων των ράβδων που παρατίθενται. Οι νόμοι της υστερητικής συμπεριφοράς των ελατηρίων προσομοίωσης των σχέσεων συνάφειας - ολισθήσεων καθορίζονταν από παραμέτρους που περιλαμβάνονταν σε ειδική έκδοση του προγράμματος DRAIN-2D. Στο μοντέλο παρουσιάζεται και μία σχέση υπολογισμού των αναπτυσσόμενων τάσεων στις ράβδους που παρατίθενται σε δεδομένο μήκος κατά την αστοχία των παραθέσεων. Τα δοκίμια υποστυλωμάτων των τριών ανεξαρτήτων εργασιών με τα οποία πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση της μεθόδου είχαν ανεπαρκείς παραθέσεις διαμήκων οπλισμών μήκους 20Φ και 24Φ τοποθετημένες αμέσως επάνω από τη βάση πάκτωσης των στύλων, ενώ ο οπλισμός διάτμησης αποτελούνταν από συνδετήρες No3 ανά 305, 406 ή 457 mm με αγκύρωση 90°. Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη πλευρική φόρτιση με την ίδια ιστορία φόρτισης με εξαίρεση ένα δοκίμιο στο οποίο η ιστορία της φόρτισης αναπαριστούσε τις σεισμικές κινήσεις που μπορούν να αναπτυχθούν στην περιοχή κοντά στο σεισμικό ρήγμα. Από τη σύγκριση των εκτιμήσεων της συμπεριφοράς των δοκιμίων και των πειραματικών αποτελεσμάτων προέκυψε ότι η επιρροή των σχέσεων συνάφειας-ολισθήσεων στις πλευρικές μετακινήσεις είναι σημαντική, καθώς οι ανεπαρκείς παραθέσεις εκτός από μείωση της πλευρικής αντίστασης και της πλαστιμότητας των υποστυλωμάτων μπορούν να προκαλέσουν αυξημένες πλευρικές παραμορφώσεις ακόμα και πριν την εξάντληση της αντοχής των παραθέσεων. Το μέγεθος αυτών των πρόσθετων παραμορφώσεων εξαρτάται από τις λεπτομέρειες όπλισης, τις ιδιότητες των υλικών, τη φόρτιση και τις συνθήκες στήριξης. Το υπολογιζόμενο βάσει του μοντέλου φορτίο πλευρικής αντίστασης, η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην αστοχία της παράθεσης και η μορφή αστοχίας των υποστυλωμάτων προέκυψαν ότι είναι αρκετά κοντά στα μετρούμενα από τα πειράματα μεγέθη με λόγο μετρούμενης προς υπολογισθείσα τιμής για την πλευρική αντοχή ίσο με 1.03 με τυπική απόκλιση 0.09 και για την παραμόρφωση κατά την ακραία αντίσταση ίση με 1.30 με τυπική απόκλιση 0.22. Η σεισμική συμπεριφορά των υποστυλωμάτων με ανεπαρκείς παραθέσεις στη βάση τους εκτιμήθηκε πολύ ικανοποιητικά βάσει του προτεινόμενου αναλυτικού μοντέλου. Ειδικά η συμπεριφορά μετά την ανάπτυξη της μέγιστης αντοχής του στύλου εκτιμάται πολύ καλά με την τριγωνική ομαλή καμπύλη που προκύπτει από το μοντέλο. Η επίδραση των σχέσεων συνάφειας-ολισθήσεων στις αναπτυσσόμενες πλευρικές παραμορφώσεις υποστυλωμάτων με ανεπαρκείς παραθέσεις στη βάση τους είναι ιδιαίτερα σημαντική και δεν πρέπει να αγνοείται κατά την ανάλυση παλαιών κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Για τα δοκίμια στύλων-προβόλων οι πρόσθετες αυτές παραμορφώσεις προέκυψε ότι αντιστοιχούν στο 45% της υπολογισθείσας ανηγμένης πλευρικής στροφής που αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο, ενώ για τα πλήρους κλίμακας δοκίμια οι πρόσθετες παραμορφώσεις ήταν μικρότερες.

Ο **Θ. Τάσιος (2009)** εξετάζει την εφαρμογή περίσφιγξης μέσω στοιχείων Ινοπλισμένων Πολυμερών ΙΟΠ καθώς και μέσω χαλύβδινων μανδυνών προτείνοντας σχέσεις υπολογισμού του απαιτούμενου εμβαδού και πάχους μανδύα ώστε να εξασφαλισθεί η διαρροή των πλευρικών παρατιθέμενων ράβδων στην κρίσιμη περιοχή των υποστυλωμάτων, εντός της οποίας πραγματοποιούνται οι παραθέσεις. Όπως αναφέρει μετά την υπέρβαση της αντοχής του δεσμού μεταξύ των παρατιθέμενων ράβδων δημιουργείται στο σκυρόδεμα μία ρωγμή διαστολικότητας w που εντείνει το υλικό περισφίγξως. Επάνω στη ρωγμή αυτή α) προκαλείται μία κάθετη θλιπτική τάση σ_N , β) επιστρατεύονται αντιστάσεις τριβής ανάμεσα στα δύο τμήματα σκυροδέματος που περιέχουν τις παρατιθέμενες ράβδους και επομένως γ) καθίσταται σταδιακά εφικτή η ανάπτυξη της τάσεως διαρροής των ράβδων. Εφόσον το υλικό που χρησιμοποιείται για την περίσφιγξη είναι ΙΟΠ τότε το μήκος αγκύρωσής του, l_b , προκύπτει βάσει της λογικής ότι η δύναμη με την οποία εντείνεται το ΙΟΠ θα πρέπει να είναι ίση με την δύναμη συνάφειας που αναπτύσσεται κατά μήκος της αγκύρωσής του, δηλαδή $l_b f_b = t_j \sigma_j \rightarrow l_b = \frac{\sigma_j}{f_{ctm}} t_j$

όπου ελήφθη $f_b = f_{ctm}$



Για έναν αδρομερή υπολογισμό της εξόλκευσης του ΙΟΠ ο Τάσιος πραγματοποίησε τις παραδοχές i) της γραμμικής κατανομής σ_j , x και ii) της παραλληλίας κατανομών για διάφορες τιμές ακραίων τάσεων σ_{s0} . Βάσει των παραδοχών αυτών

Λόγω ευθείας κατανομών :

$$\frac{\sigma_j}{\sigma_{j0}} + \frac{x}{x_0} = 1$$

Λόγω παραλληλίας ευθειών:

$$\frac{\sigma_{j0}}{f_{ctm}} = \frac{x_0}{t_j}$$

Ακόμα προκύπτει :

$$\frac{\sigma_j}{\sigma_{j0}} + \frac{x}{t_j} \frac{f_{ctm}}{\sigma_{j0}} = 1$$

οπότε για την εξόλκευση θα είναι (δεδομένου ότι $\sigma = E\varepsilon$):

$$\delta_0 = \int_0^{x_0} \varepsilon_j dx = \int_0^{x_0} \frac{\sigma_j}{E_j} dx$$

και λόγω της πρώτης παραδοχής

$$\delta_0 = \frac{\sigma_j}{E_j} \int_0^{x_0} \left(1 - \frac{x}{x_0}\right) dx = \frac{\sigma_j}{E_j} \left(\int_0^{x_0} 1 dx - \int_0^{x_0} \left(\frac{x}{x_0}\right) dx \right) = \frac{\sigma_j}{E_j} x \left\{ \frac{x_0}{0} - \frac{\sigma_j}{E_j} \frac{x^2}{2x_0} \right\} \frac{x_0}{0} \rightarrow$$

$$\delta_0 = \frac{\sigma_{j0}}{2E_j} x_0$$

ενώ λόγω της δεύτερης παραδοχής τελικά $\delta_0 = \frac{\sigma_{j0}^2}{2E_j f_{ctm}} t_j$

Οπότε για $\sigma_{j0} = \sigma_j$ θα είναι λύνοντας ως προς σ_j :

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{2E_j f_{ctm} \delta_0}{t_j}} = \sqrt{\frac{2E_j f_{ctm} w \sqrt{2}}{t_j}}$$

Εφόσον $l_b < b$ ($\sigma_j < \sigma_{j,lim} = (b/t_j) f_{ctm}$) τότε $\sigma_j = \sqrt{\frac{2E_j f_{ctm} w \sqrt{2}}{t_j}}$

και προκαλείται δύναμη F_j θλιπτική που δρα διαγωνίως πάνω στην στρογγυλεμένη ακμή του υποστυλώματος ίση με

$$F_j = \sigma_j \sqrt{2} \cdot t_j l_s$$

Αυτή η δύναμη εισάγει θλιπτικές τάσεις σ_N που δρουν επί της ρωγμής μήκους

$$(AB) = \sqrt{2} \cdot (2c + 1,5d_b)$$

Η σ_N δίνεται από τη σχέση

$$\sigma_N = \sigma_j \sqrt{2} \cdot \frac{t_j}{AB} \rightarrow \sigma_N = 1,7 \cdot \sqrt{w E_j t_j f_{ctm} / (2c + 1,5d_b)}$$

Για την τιμή της διατμητικής τάσης τριβής τ_{fr} είναι

$$\tau_{fr} = 0,35 f_c \left(2,2 \frac{s}{s_u} + 0,25 \right) \left(0,9 \frac{\sigma_N}{f_c} + 0,3 \right)$$

και η αντίστοιχη δύναμη οιονεί συνάφειας B που αυτή προσφέρει θα είναι

$$B = \tau_{fr} [\sqrt{2}(2c + 1,5d_b)] l_s$$

χάρης στην οποία μπορεί να αναπτυχθεί στις παρατιθέμενες ράβδους τάση

$$\sigma_s = B / (\pi d_b^2 / 4)$$

Τελικά εφόσον η σχέση που δίνει την σ_s λυθεί ως προς t_j προκύπτει η σχέση

$$\frac{t_j}{d_b} = 1,3 \left\{ \left[\frac{\left(\frac{f_{sy}}{f_c} \right)}{\left[\left(2,2 \frac{s}{s_u} + 0,25 \right) \left(\frac{l_s}{d_b} \right) \right]} - 0,2 \left(2 \frac{c}{d_b} + 1,5 \right) \right]^2 \right\} / \left(\frac{w_d E_j f_{ctm}}{d_b f_c f_c} \right)$$

η οποία αποτελεί τη σχέση Σ6.14 του Κανονισμού Επεμβάσεων ΚΑΝ.ΕΠΕ. Η προηγούμενη σχέση αφορά στον υπολογισμό της απαιτούμενης περίσφιγξης γωνιακών παρατιθέμενων ράβδων μέσω στοιχείων ΙΟΓ. Ο Τάσιος αναφέρει ότι στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί για την περίσφιγξη της περιοχής ανεπαρκούς παράθεσης υποστυλώματος κλειστός συγκολλημένος μανδύας από χαλύβδινο έλασμα το προηγούμενο προσομοίωμα ισχύει και πάλι, όμως λόγω της μειωμένης

αντοχής του χάλυβα σε σχέση με τα ΙΟΠ αναμένεται ότι $\sigma_j = f'_{sy}$ όπου f'_{sy} η τάση διαρροής του χαλύβδινου μανδύα, δηλαδή

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{E_j f_{ctm} 2\sqrt{2} \cdot w}{t_j}} = f'_{sy} \quad \text{και άρα} \quad t_j = 2\sqrt{2} \frac{E_j f_{ctm}}{(f'_{sy})^2} w$$

Επειδή στην περίπτωση αυτή το $\sigma_j = f'_{sy}$ είναι γνωστό, στην ανωτέρω σχέση το μόνο άγνωστο μέγεθος είναι το t_j . Λύνοντας την προηγούμενη εξίσωση ως προς t_j λαμβάνεται απ' ευθείας η τιμή του πάχους του χαλύβδινου μανδύα, το οποίο ωστόσο πρέπει να ελεγχθεί αν επαρκεί ώστε να αναπτυχθεί στις παρατιθέμενες ράβδους τάση ίση με την τάση διαρροής τους f_{sy} και να είναι έτσι επιτυχής η περίσφιγξη. Ελέγχεται επομένως η σχέση :

$$\sigma_s = \left(2,2 \frac{s}{s_u} + 0,25\right) \left[1,7 \frac{E_j}{f'_{sy}} \frac{f_{ctm}}{f_c} \frac{w_d}{d_b} + 0,2 \left(2 \frac{c}{d_b} + 1,5\right)\right] \frac{l_s}{d_b} f_c > f_{sy}$$

Η ανωτέρω σχέση προέκυψε από την επίλυση της σχέσεως :

$$\sigma_s = B / (\pi d_b^2 / 4)$$

όπου:

$$B = \tau_{fr} [\sqrt{2}(2c + 1,5d_b)] l_s$$

$$\tau_{fr} = 0,35 f_c \left(2,2 \frac{s}{s_u} + 0,25\right) \left(0,9 \frac{\sigma_N}{f_c} + 0,3\right) ,$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{E_j f_{ctm} 2\sqrt{2} \cdot w}{t_j}} = f'_{sy} \quad \rightarrow \quad t_j = 2\sqrt{2} \frac{E_j f_{ctm}}{(f'_{sy})^2} w \quad \text{και}$$

$$\sigma_N = 1,7 \cdot \sqrt{w E_j t_j f_{ctm} / (2c + 1,5d_b)}$$

Στο παρόν Ερευνητικό πρόγραμμα εξετάζεται και βαθμονομείται η σχέση Σ6.14 του ΚΑΝ.ΕΠΕ λαμβάνοντας υπόψη τη θεωρία του Τάσιου και για την περίπτωση χαλύβδινων μανδύων.

Πειραματικές έρευνες σχετικές με το αντικείμενο των προβλημάτων που δημιουργούνται σε παλαιές κατασκευές λόγω ανεπαρκών παραθέσεων των διαμήκων οπλισμών υποστυλωμάτων έχουν επίσης πραγματοποιηθεί. Σε αυτές εξετάζεται η σεισμική συμπεριφορά δοκιμών υποστυλωμάτων με ανεπαρκείς παραθέσεις στη βάση τους και διερευνώνται τόσο οι παράγοντες που την επηρεάζουν όσο και διάφορες μέθοδοι ενίσχυσης και θεραπείας τους, που βασίζονται όπως αναφέρθηκε είτε στην εφαρμογή εξωτερικής περίσφιγξης με μανδύες ή κολάρα από διάφορα υλικά, είτε στην αποκατάσταση της συνέχειας των παρατιθέμενων ράβδων μέσω συγκόλλησης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η πειραματική διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς των στύλων με συγκολλημένες παρατιθέμενες ράβδους είναι εξαιρετικά περιορισμένη, γεγονός που καθιστά την έρευνα του σχετικού εδαφίου

στο παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα που χρηματοδοτεί ο Ο.Α.Σ.Π εντελώς πρωτότυπη.

Ο **Thomas Paulay (1982)** ερευνήσε τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να οπλιστούν οι περιοχές των υποστυλωμάτων των ανώτερων ορόφων αντισεισμικώς σχεδιασμένων κατασκευών στις οποίες πραγματοποιούνται πλευρικές παραθέσεις των διαμήκων ράβδων οπλισμού, εφόσον έχει εξασφαλισθεί ότι ο σχηματισμός των πλαστικών αρθρώσεων θα συμβεί αποκλειστικά στις δοκούς. Βασιζόμενος στις γνωστές θεωρίες των μηχανισμών διατμητικής τριβής πρότεινε μία απλή μέθοδο προσδιορισμού του εγκάρσιου οπλισμού που απαιτείται ώστε να διασφαλισθεί πως οι παραθέσεις των οπλισμών θα αντέχουν τουλάχιστον δέκα κύκλους ανακυκλιζόμενης πλευρικής φόρτισης αναπτύσσοντας έως και το 95% της ονομαστικής καμπτικής αντοχής της διατομής του υποστυλώματος. Παρουσίασε επίσης τα αποτελέσματα πειραματικής μελέτης στην οποία πραγματοποιούνταν προσομοίωση στατικής και δυναμικής κυκλικής φόρτισης υποστυλωμάτων καθώς και έλεγχος της συμπεριφοράς των παραθέσεων υπό υψηλής έντασης ελαστική και ανελαστική φόρτιση. Τα δοκίμια υποστυλωμάτων-προβόλων που υποβλήθηκαν σε σεισμικού τύπου φόρτιση αναπαριστούσαν περίπου τα 2/3 του πραγματικού μεγέθους υποστυλώματος. Με εξαίρεση τη μορφή της διατομής όλες οι διαστάσεις ήταν όμοιες σε όλες τις κατηγορίες των εξεταζόμενων στύλων. Στις πρώτες κατηγορίες δοκιμών υποστυλωμάτων εξετάστηκαν ορθογωνικές και οκταγωνικές διατομές με όλες τις διαστάσεις τους ίσες με 400 mm. Ο κύριος οπλισμός των δοκιμών αποτελούνταν από ράβδους Φ16mm με ονομαστική αντοχή διαρροής 275 MPa, ενώ το μήκος των παραθέσεων των ράβδων ήταν $30\Phi=480$ mm. Για τον έλεγχο των πιο κρίσιμων συνθηκών στις επόμενες κατηγορίες δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι διαμέτρου 20, 24 και 28 mm με ονομαστική αντοχή διαρροής 380 MPa. Τα μήκη παράθεσης γι' αυτές τις ράβδους υπολογίσθηκαν βάσει των εξισώσεων που πρότεινε η επιτροπή ACI 408. Σε πέντε δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι μεγαλύτερης διαμέτρου και μειώθηκε το πλάτος των υποστυλωμάτων σε 300mm. Η χρήση ράβδων Φ28 mm οδήγησε σε ποσοστά οπλισμού στη διατομή άνω του 5% και δημιούργησε ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες παράθεσης που δεν αντιμετωπίζονται εύκολα σε πλάστιμα στοιχεία. Εξετάστηκε η μορφή αστοχίας των παραθέσεων για φορτίσεις που περιελάμβαναν διαρροή των ράβδων του υποστυλώματος για βαθμιαία αυξανόμενες απαιτήσεις πλαστιμότητας. Για το σκοπό αυτό επιβλήθηκαν στα δοκίμια μετακινήσεις που αντιστοιχούσαν σε πλαστιμότητες $\mu = 2, 4, 6$. Από τη διεξαγωγή των πειραμάτων προέκυψε ότι υποστυλώματα με αραιά διατεταγμένους εγκάρσιους οπλισμούς, ανεπαρκή μήκη παράθεσης και μικρό αξονικό φορτίο μπορούν να αντέξουν μέχρι 10 κύκλους πλευρικής φόρτισης που αντιστοιχούν στο 95% της καμπτικής αντοχής. Οι παραθέσεις αυτές όμως μπορούν να συμπεριφερθούν ικανοποιητικά μόνο σε μερικούς ανελαστικούς κύκλους με πολύ χαμηλές απαιτήσεις πλαστιμότητας. Όταν οι ανελαστικές μετακινήσεις αφορούσαν συντελεστές πλαστιμότητας 2, 4 και 6 όλες οι παραθέσεις αστόχησαν. Με την αύξηση του ποσοστού του εγκάρσιου οπλισμού εντός των περιοχών πλευρικών παραθέσεων μπορεί να σχηματιστούν πλαστικές αρθρώσεις σε κάποια υποστυλώματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις όμως η διαρροή των διαμήκων ράβδων περιορίστηκε εντός ενός πολύ μικρού μήκους με αποτέλεσμα την ανάπτυξη εξαιρετικά μεγάλων παραμορφώσεων στο χάλυβα, λυγισμό των ράβδων

και πιθανώς θραύση του οπλισμού. Για τον λόγο αυτό οι παραθέσεις των οπλισμών υποστυλωμάτων πρέπει να αποφεύγονται στις περιοχές όπου είναι πιθανό να σχηματισθούν πλαστικές αρθρώσεις. Τέλος, ο Paulay κατέληξε στο σημαντικότερο ρόλο της ύπαρξης συνδετήρων στην περιοχή της παράθεσης, η παρουσία των οποίων αποτρέπει σε μεγάλο βαθμό τη δημιουργία της πλαστικής άρθρωσης στην περιοχή αυτή. Στην περίπτωση επομένως υποστυλωμάτων των ανώτερων ορόφων πολυώροφων πλαισίων, τα οποία είναι σχεδιασμένα ώστε να αποκλείουν το σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στους στύλους, είναι δυνατόν οι πλευρικές παραθέσεις των διαμήκων ράβδων να πραγματοποιούνται αμέσως πάνω από τη στάθμη του ορόφου εφόσον υπάρχει κατάλληλο ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού το εμβαδόν του οποίου υπολογίζεται βάσει σχέσης που προτείνει.

Οι **Yuk Hon Chai, M.J.Nigel Priestley και Frieder Seible (1991)** μελέτησαν την επισκευή κυκλικής διατομής υποστυλωμάτων γεφυρών τοποθετώντας μεταλλικούς μανδύες γύρω από την περιοχή της πλαστικής άρθρωσης στη βάση των στύλων. Η μέθοδος επισκευής αυτή επιλέχθηκε να εξετασθεί καθώς αποτελεί μια σχετικά οικονομική και αισθητικά καλή λύση σε σύγκριση με την τοποθέτηση εξωτερικών συνδετήρων και τη σύνδεσή τους με το υφιστάμενο υποστύλωμα, καθώς επίσης και γιατί μέσω της περίσφιγξης που επιφέρει στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης βελτιώνει τις συνθήκες συνάφειας μεταξύ των παρατιθέμενων εκεί διαμήκων ράβδων. Τα κύρια προβλήματα των υποστυλωμάτων παλαιών γεφυρών είναι η χαμηλή αντοχή, η ανεπαρκής καμπτική πλαστιμότητα, η ανεπαρκής διατμητική αντοχή, οι αστοχίες των βάρων θεμελίωσης και των κόμβων στύλων-καταστρώματος και η μικρή καμπτική ικανότητα των στύλων που είχαν μήκη παράθεσης 20Φ στη θέση πλαστικής άρθρωσης τα οποία αποδείχθηκαν ανεπαρκή για να αναπτυχθεί η διαρροή των διαμήκων οπλισμών με αποτέλεσμα τη γρήγορη μείωση της αντοχής σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Σκοπός της έρευνάς τους ήταν ο έλεγχος της αποτελεσματικότητας της ενίσχυσης με μεταλλικούς μανδύες στη βελτίωση της καμπτικής αντοχής και πλαστιμότητας υφιστάμενων κυκλικών υποστυλωμάτων γεφυρών. Ο χαλύβδινοι μανδύες που εφαρμόστηκαν είχαν διάμετρο ελαφρώς μεγαλύτερη από εκείνη των στύλων και το ενδιάμεσο κενό γέμισε με τσιμεντοκονίαμα υπό πίεση. Όλοι οι μανδύες σταματούσαν 25 mm πάνω από τη βάση πάκτωσης των υποστυλωμάτων. Το επίπεδο της περίσφιγξης που προσέφεραν οι μεταλλικοί μανδύες για τις συγκεκριμένες συνθήκες σχεδιασμού αντιστοιχούσε στο ανώτερο όριο περίσφιγξης που παρέχεται από συνδετήρες. Εξετάστηκαν συνολικά έξι δοκίμια μεγάλης κλίμακας διαμέτρου 610mm και ύψους 3,657m. Τα δοκίμια ήταν κλίμακας 1:2,5 ενός στύλου γέφυρας διαμέτρου 1524 mm και θεμελιώνονταν σε πέδιλα ώστε να εξεταστεί και η αλληλεπίδραση θεμελίωσης-στύλου. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ήταν 34,5 MPa στις 28 ημέρες ώστε να αντιπροσωπεύει το 67% της υπεραντοχής σε σχέση με τις τυπικές αντοχές σχεδιασμού του 1960 των 20,7 MPa. Η υπεραντοχή εκφράζει τόσο το συμβατικό σχεδιασμό με σκυρόδεμα και τις πρακτικές του '60 όσο και την αύξηση της αντοχής με τα 20 και πλέον χρόνια φυσικής γήρανσης των κατασκευών. Σε όλα τα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε διαμήκης οπλισμός No 40. Το αξονικό φορτίο των στύλων ήταν 1779 MPa. Οι στύλοι 1,2,5 και 6 είχαν μήκος παράθεσης 20Φ στην πιθανή θέση πλαστικής άρθρωσης, ενώ τα δοκίμια 3 και 4 είχαν συνεχείς διαμήκεις οπλισμούς στύλων αγκυρωμένους στη βάση πάκτωσης με άγκιστρα 90°. Οι μεταλλικοί μανδύες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν πάχος 4,76mm

κατηγορίας χάλυβα A36 με ογκομετρικό λόγο περίσφιγξης $\rho=0,031$. Το μήκος του μανδύα επιλέχθηκε έτσι ώστε η απαίτηση ροπής πάνω από τον μανδύα να μην υπερβαίνει το 75% της αρχικής καμπτικής ικανότητας. Τα δοκίμια 1 και 3 ήταν δοκίμια αναφοράς και δεν δέχθηκαν επισκευή. Το πρώτο ζεύγος στύλων κατασκευάστηκε με πέδιλο σχεδιασμένο κατά τα πρότυπα της δεκαετίας του '60 μόνο με ευθύγραμμους οπλισμούς και υποστηριζόταν από μπλόκια ύψους 25,4 mm και 203mm διαμέτρου προσομοιώνοντας έτσι πασσαλοθεμελίωση. Στα υπόλοιπα τέσσερα δοκίμια κατασκευάστηκε ισχυρό πέδιλο με οπλισμό άνω και κάτω ίνας No8, έξι ζεύγη διαγώνιων ράβδων No8 κοντά στον κόμβο στύλου-πεδίου και σπείρα No4 ανά 64mm μέσα στον κόμβο. Το υποστύλωμα 5 επισκευάστηκε μερικώς για να ερευνηθεί η πιθανότητα ενσωμάτωσης της βάσης του στύλου χωρίς να επιχειρηθεί αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας. Επίσης ερευνήθηκε και η μετασεισμική ενίσχυση των στύλων γεφυρών με μεταλλικούς μανδύες (στύλος 1). Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν στην ίδια σεισμική φόρτιση αυξανόμενου μεγέθους. Από τις μετρήσεις με γραμμικά μεταβλητούς διαφορικούς μετασχηματιστές (LVDTs) της καμπυλότητας των στύλων προέκυψε ότι η τοποθέτηση του μεταλλικού μανδύα οδηγεί σε συγκέντρωση της πλαστικής στροφής σε μια πολύ μικρή περιοχή κοντά στη βάση του στύλου όπου για δεδομένη πλαστιμότητα μετακινήσεων υπάρχει υψηλή απαίτηση πλαστιμότητας στροφών. Το δοκίμιο με τη μετασεισμική ενίσχυση συμπεριφέρθηκε εκπληκτικά καλά μέχρι επίπεδο πλαστιμότητας $\mu=4$. Από τη διενέργεια των πειραμάτων προέκυψε ότι η τοποθέτηση κυλινδρικού χαλύβδινου μανδύα σε κυκλικής διατομής στύλο γέφυρας στην πιθανή περιοχή πλαστικής άρθρωσης ενισχύει αποτελεσματικά την καμπτική αντοχή του στύλου. Τα υποστυλώματα γεφυρών κατασκευασμένων πριν το 1970 με ανεπαρκείς παραθέσεις στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης κινδυνεύουν από πρόωρη μείωση της συνάφειας και αστοχία των παραθέσεων πριν από την ανάπτυξη της ονομαστικής καμπτικής τους αντοχής. Η μείωση της αντοχής των υποστυλωμάτων αυτών είναι σοβαρή και πραγματοποιείται από τους πρώτους κύκλους φόρτισης. Στην περίπτωση που τα υποστυλώματα των παλαιών αυτών γεφυρών είχαν συνεχείς διαμήκεις οπλισμούς στη θέση της πλαστικής άρθρωσης η μείωση της αντοχής τους συμβαίνει σταδιακά και οφείλεται στην αστοχία της περίσφιγξης. Πέδιλα σχεδιασμένα πριν το 1970 και ίσως ακόμα και πιο σύγχρονα προέκυψε ότι είναι επιρρεπή σε διατμητική αστοχία στην περιοχή ακριβώς κάτω από το στύλο. Τα υποστυλώματα που επισκευάστηκαν με χαλύβδινους μανδύες με ογκομετρικό ποσοστό 3,1% στην περιοχή της πιθανής πλαστικής άρθρωσης ανέπτυξαν σταθερούς βρόχους υστέρησης μέχρι επίπεδο πλαστιμότητας $\mu=7$, το οποίο αντιστοιχεί σε ανηγμένη γωνία παραμόρφωσης 5,3%. Η αστοχία επήλθε τελικά από κόπωση του διαμήκους οπλισμού. Η δυσκαμψία των στύλων αυξήθηκε κατά 10-15%. Τέλος, η επισκευή με τη χρήση χαλύβδινου μανδύα υποστυλώματος που είχε προηγουμένως ελεγχθεί σε σεισμική καταπόνηση σε υψηλή πλαστιμότητα και παρουσίασε αστοχία των παραθέσεων του διαμήκους οπλισμού του προέκυψε ότι αποκαθιστά αποτελεσματικά την αντοχή και πλαστιμότητα του βλαμμένου στύλου. Παρά τη μορφή των βρόχων υστέρησης που φανερώνουν την απορρόφηση χαμηλότερων ποσών ενέργειας σε σχέση με τα προσεισμικώς επισκευασμένα δοκίμια υποστυλωμάτων, η αντοχή και η πλαστιμότητα του μετασεισμικώς ενισχυμένου δοκιμίου διατηρήθηκαν έως ανηγμένη γωνία παραμόρφωσης 4%.

Οι **Raj. Valluvan, Michael E. Kreger και James O. Jirsa (1993)** αναφέρονται στη σημαντική αδυναμία των κατασκευών της δεκαετίας του '50 και του '60 που προκύπτει λόγω της ανεπαρκούς παράθεσης διαμήκων οπλισμών των υποστυλωμάτων, η οποία μάλιστα πραγματοποιούνταν στη βάση των στύλων εντός της περιοχής πιθανής πλαστικής άρθρωσης. Οι παραθέσεις στα υποστυλώματα των παλαιών κατασκευών σχεδιασμένες ως θλιπτικές, μόνο έναντι φορτίων βαρύτητας, και με σχεδόν πλήρη απουσία οπλισμού συνδετήρων δεν επέτρεπαν την ανάπτυξη της καμπτικής αντοχής του υποστυλώματος και αστοχούσαν πρόωρα. Όπως διαπιστώνουν οι συγγραφείς ακόμα και σε ενισχυμένες κατασκευές, εφόσον οι ενισχύσεις δεν συμπεριλαμβάνουν τη θεραπεία της αδυναμίας των υποστυλωμάτων λόγω ανεπαρκών παραθέσεων των οπλισμών στη βάση τους και τον σχεδιασμό τους ώστε να αναπτύσσουν σημαντικές ανελαστικές παραμορφώσεις και εφελκυστικές δυνάμεις, είναι δυνατόν να περιοριστούν τα οφέλη των ενισχύσεων άλλων στοιχείων του φέροντος συστήματος των κτιρίων. Αναφέρονται μάλιστα σε μελέτη του Gaynor, στην οποία πλαίσια της δεκαετίας του '50 που ενισχύθηκαν με εμφανιζόμενα τοιχώματα και υποβλήθηκαν σε εντός επιπέδου πλευρική φόρτιση, αστόχησαν στις ανεπαρκείς παραθέσεις των υποστυλωμάτων εντός των οποίων πραγματοποιήθηκαν οι εμφανιώσεις των τοιχωμάτων. Για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των ενισχυόμενων παραθέσεων οι συγγραφείς κατασκεύασαν 12 δοκίμια υποστυλωμάτων κλίμακας 2/3 με λεπτομέρειες όπλισης των κατασκευών της εποχής του '50 τα οποία ενισχύθηκαν με διάφορους τρόπους. Η φιλοσοφία των ενισχύσεων προέβλεπε την εξέταση αφενός της αποκατάστασης της συνέχειας των παρατιθέμενων οπλισμών με τη μετατροπή τους σε ενιαία ράβδο μέσω συγκόλλησης, ώστε να μεταφέρονται απρόσκοπτα οι δυνάμεις μεταξύ των ράβδων και αφετέρου την επιβολή περίσφιγξης στην περιοχή των παραθέσεων για την αποφυγή της αποφλοίωσης του σκυροδέματος της επικάλυψης των οπλισμών και τη βελτίωση των συνθηκών συνάφειας. Σε όλα τα δοκίμια υποστυλωμάτων το μήκος παράθεσης των διαμήκων οπλισμών τους ήταν 24Φ και οι συνδετήρες τοποθετημένοι αραιά είχαν αγκύρωση 90°. Ένα δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε ως δοκίμιο ελέγχου. Σε δύο δοκίμια πραγματοποιήθηκε συγκόλληση των παρατιθέμενων ράβδων τους οι οποίες βρίσκονταν σε απόσταση ¼ της ίντσας στη θέση της παράθεσης. Στο ένα εξ αυτών τοποθετήθηκε ένας επιπλέον συνδετήρας στο τέλος της παράθεσης για την συγκράτηση των εξωτερικώς παρατιθέμενων ράβδων. Σε εννέα δοκίμια πραγματοποιήθηκαν ενισχύσεις για τη βελτίωση της συνάφειας των ράβδων στις παραθέσεις. Επιλέχθηκαν τρεις τύποι ενίσχυσης α) με μεταλλικά γωνιακά στις γωνίες των στύλων τα οποία συνδεόνταν μεταξύ τους με εγκάρσια μεταλλικά στοιχεία (πέντε δοκίμια), β) περίσφιγξη της περιοχής της παράθεσης με εξωτερικούς συνδετήρες (3 δοκίμια) και γ) τοποθέτηση εσωτερικών συνδετήρων στην περιοχή της παράθεσης αφαιρώντας τοπικά το σκυρόδεμα (1 δοκίμιο). Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε διαδοχικούς κύκλους εφελκυσμού και θλίψης ώστε να εξετασθεί πλήρως η εφελκυστική αντοχή των ενισχυμένων και μη υποστυλωμάτων με ανεπαρκείς παραθέσεις. Από τη διεξαγωγή των πειραμάτων προέκυψε ότι στο υφιστάμενο μη ενισχυμένο δοκίμιο οι ράβδοι οπλισμού δεν διέρρευσαν και η αντοχή των παραθέσεων περιορίστηκε στα 2/3 της αντοχής διαρροής του υποστυλώματος. Η αστοχία ήταν ψαθυρού τύπου και το δοκίμιο απορρόφησε χαμηλά ποσά ενέργειας. Στην περίπτωση ενίσχυσης των παραθέσεων με συγκόλληση των ράβδων προέκυψε ότι εξασφαλίζεται η διαρροή του διαμήκους οπλισμού, απαιτείται όμως η τοποθέτηση περισσότερων του ενός ισχυρών εσωτερικών συνδετήρων για να αποφευχθεί η

αποφλοίωση του σκυροδέματος και να μη διαρρεύσουν οι συνδετήρες. Η περίσφιγξη με μεταλλικά στοιχεία πέτυχε την αύξηση της αντοχής έναντι αποφλοίωσης του σκυροδέματος επικάλυψης των οπλισμών και την ανάπτυξη δυνάμεων τριβής μεταξύ των παρατιθέμενων ράβδων, ενώ οι ανελαστικές παραμορφώσεις αναπτύχθηκαν εκτός της περιοχής των παραθέσεων. Η εφαρμογή της ενίσχυσης με μεταλλικά στοιχεία (γωνιακά και εγκάρσια στελέχη σύνδεσης) σε υφιστάμενους στύλους παλαιών κτιρίων παρουσιάζει δυσκολίες, ενώ τα μεταλλικά στοιχεία πρέπει να συνδέονται με το σκυρόδεμα με τσιμεντοκονίαμα. Η ενίσχυση με την εφαρμογή περίσφιγξης μέσω συνδετήρων αποδείχθηκε ιδιαίτερα επιτυχής στη βελτίωση της σεισμικής απόκρισης των ενισχυμένων στύλων εφόσον όμως οι συνδετήρες είναι καλυμμένοι με τσιμεντοκονίαμα. Η μέθοδος αυτή υστερεί ωστόσο έναντι της ενίσχυσης με μεταλλικά στοιχεία λόγω μειωμένης αντίστασης στην αποφλοίωση της επικάλυψης. Η χρήση εσωτερικών συνδετήρων δεν ήταν επιτυχής καθώς η απομάκρυνση της επικάλυψης κατά την εφαρμογή της ενίσχυσης οδηγεί σε μικρορηγμάτωση του πυρήνα σκυροδέματος και μειώνει την αποτελεσματικότητα της επικάλυψης προκαλώντας περισσότερη βλάβη παρά βελτίωση. Οι συγγραφείς διαπιστώνουν την αναγκαιότητα θεραπείας της αδυναμίας των υποστυλωμάτων λόγω ανεπαρκών παραθέσεων των οπλισμών τους στη βάση τους προκειμένου να εξασφαλιστεί η επιτυχία των ενισχύσεων παλαιών κτιρίων.

Οι **Riyad Aboutaha, Michadel Engelhardt, James O. Jirsa και Michael E. Kreger (1996)** πραγματοποίησαν πειραματική διερεύνηση της ενίσχυσης μη πλάσιμων στύλων παλαιών κατασκευών της δεκαετίας του '50 και του '60 με τη χρήση λεπτών ορθογωνικών μεταλλικών μανδυνών, που προτιμώνται λόγω ευκολίας εφαρμογής για την ενίσχυση στύλων κτιριακών κατασκευών σε σύγκριση με τους κυκλικούς και ελλειπτικούς μανδύες. Σκοπός τους ήταν να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα των ορθογωνικών αυτών μανδυνών στην ενίσχυση παλαιών στύλων μεγαλύτερων διαστάσεων. Τα υποστυλώματα ήταν τυπικά της εποχής με ανεπαρκή μήκη παράθεσης 24Φ των διαμήκων οπλισμών στη βάση τους και αραιά διατεταγμένους οπλισμούς διάτμησης με αγκύρωση 90°. Εξέτασαν ένδεκα δοκίμια στύλων-προβόλων μεγάλης κλίμακας με τρία διαφορετικά πάχη πριν και μετά την ενίσχυσή τους με τέσσερις διαφορετικούς τύπους ενίσχυσης που περιελάμβαναν λεπτούς μεταλλικούς ορθογωνικούς μανδύες συνδυαζόμενους με κοχλίες που βελτιώνουν την αγκύρωση τους στο υποστυλωμα στην πλευρά με τη μεγαλύτερη διάσταση. Σε όλα τα δοκίμια ο διαμήκης οπλισμός των υποστυλωμάτων ήταν No8 grade 60 και οι συνδετήρες No3 Grade 40 ανά 16 ίντσες. Τέσσερα από τα δοκίμια δοκιμάστηκαν χωρίς να έχουν ενισχυθεί αποτελώντας δοκίμια αναφοράς, ενώ από τα υπόλοιπα επτά δοκίμια τα έξι ενισχύθηκαν με συμπαγείς λεπτούς μεταλλικούς μανδύες με ή χωρίς κοχλίες αγκύρωσης που τους καθιστούν πιο δύσκαμπτους και βελτιώνουν την περίσφιγξη στην περιοχή των ανεπαρκών παραθέσεων. Στο έβδομο ενισχυμένο δοκίμιο τοποθετήθηκαν τρία μεταλλικά κολάρα σε απόσταση 8 ιντσών το ένα από το άλλο κατασκευασμένα από μεταλλικά στελέχη. Όλοι οι μανδύες σταματούσαν 1,5 ίντσες από τη βάση πάκτωσης των στύλων για να αποφευχθεί ενδεχόμενος λυγισμός του μανδύα κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης. Οι κοχλίες αγκύρωσης των μανδυνών είχαν διάμετρο 1 ίντσας, μήκος 12 ιντσών και εισέρχονταν 8 ίντσες εντός του σκυροδέματος. Τα δοκίμια δεν δέχονταν αξονικό φορτίο. Οι διαφορετικές παράμετροι που εξετάστηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν η αντοχή του

σκυροδέματος, το πλάτος των στύλων (τρία διαφορετικά πλάτη), ο αριθμός και η θέση τοποθέτησης των κοχλιών αγκύρωσης, οι αποστάσεις των κοχλιών και το ύψος των μεταλλικών μανδυνών (δύο διαφορετικά ύψη 1,2 και 1,5 φορές το μήκος της παράθεσης). Από τη διεξαγωγή των πειραμάτων προέκυψε ότι τα παρθενικά δοκίμια με τις ανεπαρκείς παραθέσεις των διαμήκων οπλισμών τους στη βάση των στύλων και τον ελλιπή οπλισμό διάτμησης αστόχησαν με μη πλάστιμο τρόπο σε πρώιμο στάδιο, πριν από την ανάπτυξη της ονομαστικής καμπτικής αντοχής και της πλαστιμότητάς τους και πριν τη διαρροή των διαμήκων ράβδων οπλισμού τους. Με εξαίρεση το δοκίμιο που ενισχύθηκε με μεταλλικά κολάρα το οποίο παρουσίασε πρόωρη αστοχία της παράθεσης και επέδειξε μικρή μόνο βελτίωση της αντοχής και πλαστιμότητάς του έναντι του αντίστοιχου μη ενισχυμένου στύλου, τα υπόλοιπα ενισχυμένα δοκίμια είχαν σημαντικά βελτιωμένη σεισμική συμπεριφορά. Υποστυλώματα με πλάτος μέχρι και 36 ίντσες μπορούν να ενισχυθούν επιτυχώς με λεπτούς ορθογωνικούς μεταλλικούς μανδύες πάχους $\frac{1}{4}$ της ίντσας που συνδυάζονται με κοχλίες αγκύρωσης. Τα ενισχυμένα δοκίμια παρουσίασαν σημαντικά βελτιωμένη απόκριση σε ανακυκλιζόμενη σεισμική φόρτιση. Επετεύχθη η διαρροή του διαμήκους οπλισμού των στύλων, οι οποίοι ανέπτυξαν και διατήρησαν την καμπτική αντοχή τους για λόγους ανηγμένης γωνίας στροφής έως 4%. Η χρήση των κοχλιών αγκύρωσης βελτίωσε σημαντικά την περίσφιγξη στην περιοχή των ανεπαρκώς παρατιθέμενων ενδιάμεσων ράβδων οπλισμού υποστυλωμάτων με μεγαλύτερες διαστάσεις, ενώ με κατάλληλη κατανομή τους στο πλάτος του μεταλλικού μανδύα η αντοχή και η πλαστιμότητα του στύλου βελτιώθηκαν σημαντικά.

Οι **Abraham C. Lynn, Jack P. Moehle, Stephen A. Mahin και William T. Holmes (1996)** πραγματοποίησαν πειραματική έρευνα με στόχο τη μελέτη της συμπεριφοράς τυπικών υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος κτιρίων της δεκαετίας του 1970 υπό πλευρική και αξονική φόρτιση. Η ύπαρξη ανεπαρκών μηκών παράθεσης των διαμήκων οπλισμών στα υποστυλώματα των κτιρίων της δεκαετίας αυτής είναι πολύ συνηθισμένη. Για το σκοπόν αυτόν κατασκεύασαν 8 δοκίμια φυσικής κλίμακας στα οποία επιβλήθηκε σταθερό αξονικό φορτίο ενώ δέχθηκαν και αυξανόμενες κυκλικές πλευρικές μετακινήσεις μέχρι την αστοχία τους. Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τη συμπεριφορά που υπολογίστηκε ότι θα παρουσιάσουν τα δοκίμια υποστυλωμάτων βάσει διαφόρων αναλυτικών μεθόδων αποτίμησης. Τα δοκίμια υποστυλωμάτων ήταν πλήρους κλίμακας με ύψος 9 πόδια και 8 ίντσες και διάσταση ορθογωνικής διατομής 18 ιντσών. Ο διαμήκης οπλισμός τοποθετήθηκε ομοιόμορφα στην περίμετρο της διατομής και αποτελούνταν από ράβδους είτε Νο8 (ονομαστική διάμετρος 1 ίντσας) είτε Νο10 (ονομαστική διάμετρος 1+1/4 ίντσας) με καθαρή επικάλυψη 2 ιντσών. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις διατάξεις εγκάρσιας όπλισης :

α) συνδετήρες Νο3 (ονομαστική διάμετρος 3/8 ίντσας) με άγκιστρα 90° σε αποστάσεις 18 ιντσών καθ' όλο το ύψος, β) συνδετήρες Νο3 σε διάταξη "διαμαντιού" με άγκιστρα 90° ανά 12 ίντσες καθ' όλο το ύψος και γ) όπως η περίπτωση (β) αλλά στην περιοχή των παραθέσεων των διαμήκων ράβδων οπλισμού η απόσταση των συνδετήρων μειώθηκε σε 4 ίντσες. Σε τρία από τα δοκίμια υπήρχαν παραθέσεις του διαμήκους οπλισμού των στύλων σε μήκος ίσο με 20d_b ακριβώς επάνω από τη βάση πάκτωσης του υποστυλώματος, ενώ στα υπόλοιπα δοκίμια οι διαμήκεις ράβδοι των στύλων ήταν συνεχείς. Εξετάστηκαν δύο επίπεδα αξονικού φορτίου χαμηλό, που αντιστοιχεί σε 0,12A_gf_c και μέτριο, που αντιστοιχεί σε 0,35A_gf_c. Η θλιπτική αντοχή σχεδιασμού του

σκυροδέματος ήταν 3000psi, ενώ η πραγματική αντοχή μετρήθηκε σε κυλίνδρους 6x12 ιντσών και προέκυψε κυμαινόμενη από 3700 έως 4800psi. Επίσης η πειραματικώς υπολογισθείσα τάση διαρροής του χάλυβα οπλισμού βρέθηκε να είναι ίση με 48 ksi για No8 και No10 ράβδους και 58 ksi για No3 ράβδους. Η πλευρική μονοαξονική φόρτιση των δοκιμών εφαρμόστηκε αργά σε τρεις κύκλους αυξανόμενου επιπέδου μετακίνησης σε κλάσματα της υπολογιζόμενης μετακίνησης διαρροής. Μετά τη διαρροή οι μετακινήσεις που εφαρμόστηκαν μέχρι την αστοχία των δοκιμών ήταν πολλαπλάσιες εκείνης που αντιστοιχεί στη διαρροή. Οι μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν κατά την πειραματική εξέταση των δοκιμών υποστυλωμάτων σε σεισμό περιελάμβαναν καμπτική αστοχία, διατμητική αστοχία, αστοχία των παραθέσεων οπλισμού και κατάρρευση λόγω της απώλειας ικανότητας παραλαβής αξονικού φορτίου. Για την αποτίμηση της επάρκειας του μήκους των παραθέσεων χρησιμοποιήθηκε η σχέση του ACI 318-95 περί του μήκους ανάπτυξης μη επικαλυπτόμενου οπλισμού σε σύνηθες σκυρόδεμα. Από τη διεξαγωγή των πειραμάτων προέκυψε ότι οι παραθέσεις διαμήκων ράβδων οπλισμού με μήκος $20d_b$ βρέθηκαν να είναι επαρκείς βάσει των ισχυόντων κανονισμών της εποχής της έρευνας ώστε να αναπτυχθεί τάση διαρροής 48 ksi. Ωστόσο, στην περίπτωση που ο εγκάρσιος οπλισμός στην περιοχή των παραθέσεων ήταν λίγος, η αντοχή των παραθέσεων μειωνόταν σημαντικά με την αύξηση των μετακινήσεων μετά τη διαρροή με αποτέλεσμα την απώλεια της ικανότητας παραλαβής ροπής στο τέλος της παράθεσης. Αντιθέτως, στην περίπτωση που υπήρχε σημαντικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού η περιοχή των παραθέσεων ήταν σε θέση να διατηρήσει τη δύναμη διαρροής για περισσότερους κύκλους αυξανόμενου μεγέθους μετακίνησης. Οι μετρούμενες καμπτικές και διατμητικές αντοχές ήταν κοντά στις υπολογισθείσες βάσει ACI 318-95. Η διατμητική αντοχή των δοκιμών δεν ήταν στενά συνδεδεμένη με την πλαστιμότητα μετακινήσεων. Οι στύλοι που εξάντλησαν την υπολογισθείσα καμπτική αντοχή πριν την αντίστοιχη διατμητική παρουσίασαν σχετικά πλάστιμη συμπεριφορά. Όταν η απόκριση των δοκιμών ήταν κυρίως καμπτική η φέρουσα ικανότητα έναντι φορτίων βαρύτητας διατηρούνταν έως σχετικά μεγάλες μετακινήσεις, ενώ όταν κυριαρχούνταν αρχικά από μείωση της αντοχής της παράθεσης και το αξονικό φορτίο ήταν σχετικά μικρό η φέρουσα ικανότητα έναντι στατικών φορτίων διατηρούνταν μέχρι να συμβεί διατμητική αστοχία.

Οι **Murat Melek και John W.Wallace (2004)** εξέτασαν την επίδραση παραμέτρων όπως το αξονικό φορτίο, ο λόγος ροπής-τέμνουσας και η ιστορία της φόρτισης στη συμπεριφορά υποστυλωμάτων με μικρά μήκη παράθεσης των διαμήκων οπλισμών τους που υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη πλευρική φόρτιση. Εξέτασαν έξι δοκίμια υποστυλωμάτων-προβόλων κλίμακας 1:1 στα οποία τα υποστυλώματα ήταν πακτωμένα σε βάση θεμελίωσης και δέχονταν σταθερό αξονικό φορτίο. Τα δοκίμια αντιπροσώπευαν εσωτερικά υποστυλώματα παλαιάς οικοδομής από το μέσον του ύψους ορόφου μέχρι την παρειά του κόμβου. Τα υποστυλώματα είχαν μήκος από 1.52m έως 1.83m, διάσταση διατομής 457mm, διαμήκεις οπλισμούς 8Φ25.4mm και συνδετήρες Φ9.5/304.8mm με αγκύρωση 90°, όπως συνηθίζονταν στις παλαιές κατασκευές. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών είναι παρόμοια με εκείνα των Lynn et al. (1996) με τα οποία πραγματοποιούνται συγκρίσεις. Ο χάλυβας είχε τάση διαρροής 510 MPa και το σκυρόδεμα αντοχή 36 MPa. Το ύψος των υποστυλωμάτων επιλέχθηκε ώστε να εξασφαλιστεί η ανεμπόδιση ανάπτυξη της καμπτικής αντοχής

στη βάση τους, στη θέση παράθεσης των διαμήκων ράβδων, χωρίς να προηγηθεί διατμητική αστοχία βάσει ACI 318-02. Από τα συνήθη μήκη παράθεσης των $20d_b$ και $24d_b$ εκλέχθηκε ως μήκος παράθεσης των διαμήκων ράβδων στη βάση των υποστυλωμάτων το $20d_b$ που αντιστοιχεί περίπου στο 67% του απαιτούμενου μήκους κατά ACI 318-02 για να αναπτυχθεί η διαρροή των ράβδων. Οι κύριες μεταβλητές που εξετάστηκαν ήταν το επίπεδο του αξονικού φορτίου που εφαρμόζεται (χαμηλό $0.10A_gf_c'$, υψηλό $0.20A_gf_c'$ και μέγιστο $0.30A_gf_c'$), η απαίτηση σε τέμνουσα για τη μέγιστη ροπή στη βάση του στύλου (0.67 με $0.93V_n$) και η ιστορία της επιβαλλόμενης μετατόπισης. Τα πέντε εκ των έξι δοκιμίων υποβλήθηκαν στην ίδια ιστορία μετατοπίσεων (STD) μονοτονικά αυξανόμενης ανηγμένης γωνίας στροφής ($0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 3, 5, 7$ και 10%). Ένα δοκίμιο υποβλήθηκε σε ιστορία μετατόπισης που αναπαριστά την σεισμική καταπόνηση κατασκευής ευρισκόμενης πολύ κοντά στο σεισμικό ρήγμα, καθώς ένα από τα αντικείμενα της έρευνας ήταν και η αξιολόγηση της ταυτόχρονης απώλειας ικανότητας παραλαβής πλευρικού αλλά και αξονικού φορτίου με την επιβολή μεγάλων μετακινήσεων. Η απώλεια ικανότητας παραλαβής από το στύλο αξονικού φορτίου είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αποφυγή κατάρρευσης και την προστασία των ενοίκων. Τα δοκίμια 2S10M, 2S20M και 2S30M με μήκος παράθεσης $20d_b$ δέχθηκαν αξονικό φορτίο $0.10A_gf_c'$, $0.20A_gf_c'$ και $0.30A_gf_c'$ αντίστοιχα, ενώ υποβλήθηκαν στην ίδια, (STD) ιστορία μετακινήσεων και η συμπεριφορά τους συγκρίθηκε με εκείνη δοκιμίου που είχε μήκος παράθεσης ίσο με το προβλεπόμενο κατά ACI 318-02. Παρουσίασαν αστοχία της παράθεσης (υποβάθμιση της ικανότητας παραλαβής πλευρικού φορτίου) όταν η ροπή στη βάση του υποστυλώματος έφτασε στο 60 με 70% της ονομαστικής ροπής αντοχής σε αντίθεση με τις προβλέψεις των Lynn et al. (1996) ότι οι διαμήκεις ράβδοι θα έφταναν στη διαρροή. Σκοπός των τριών αυτών δοκιμών ήταν να αξιολογηθεί η επιρροή του αξονικού φορτίου στις ανεπαρκείς παραθέσεις δοκιμών με λίγο εγκάρσιο οπλισμό για σχετικά μικρή καταπόνηση σε τέμνουσα δύναμη. Δύο επιπλέον δοκίμια, τα 2S20H και 2S20HN, χρησιμοποιήθηκαν για να ελεγχθεί η επίδραση υψηλότερης τέμνουσας δύναμης και διαφορετικής ιστορίας μετακινήσεων για μέσο αξονικό φορτίο ($0.20A_gf_c'$). Στο έκτο δοκίμιο, 2S30X, επιβλήθηκε αυξημένο αξονικό θλιπτικό φορτίο και αυξημένη τέμνουσα δύναμη για να φθάσει η αναμενόμενη τέμνουσα σχεδόν στην τιμή της υπολογισθείσας ονομαστικής αντοχής σε τέμνουσα. Από την έρευνα των Melek και Wallace προκύπτει ότι οι μέγιστες ροπές που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κυμαίνονται από 97 έως 103% των υπολογισθέντων ροπών διαρροής καταδεικνύοντας ότι οι τάσεις συνάφειας ήταν υψηλότερες από τις αναμενόμενες βάσει ACI 318-02 και επομένως η πιθανότητα διατμητικής αστοχίας των στύλων μπορεί να παραβλεφθεί. Η υποβάθμιση της ικανότητας παραλαβής πλευρικού φορτίου παρατηρείται για ανηγμένη στροφή μεταξύ 1 και 1.5% σε όλα τα δοκίμια χωρίς να παρατηρείται πλαστιμότητα μετακινήσεων. Η απώλεια αντοχής οφείλεται στην μείωση της συνάφειας μεταξύ των ράβδων και του περιβάλλοντος σκυροδέματος και ο βαθμός αυτής της μείωσης εξαρτάται κυρίως από την ιστορία των επιβαλλόμενων μετακινήσεων και κατά δεύτερο λόγο από το επίπεδο της επιβαλλόμενης τέμνουσας και του αξονικού φορτίου. Το δοκίμιο που υποβλήθηκε σε ιστορία μετακινήσεων που αντιπροσωπεύει τη σεισμική καταπόνηση που δέχεται κατασκευή πολύ κοντά στο σεισμικό ρήγμα παρουσίασε σημαντικά μικρότερη ελάττωση της αντοχής του. Η μεταβολή του λόγου V_{EXP}/V_n μεταξύ 0.67 και 0.93 , όπου V_n η αντοχή του στύλου σε τέμνουσα κατά ACI 318-02, δεν φαίνεται να επηρεάζει την τιμή της πλευρικής

φόρτισης στην οποία παρατηρήθηκε η υποβάθμιση της συνάφειας, ενώ αντιθέτως ο βαθμός μείωσης της πλευρικής αντοχής αυξήθηκε ελαφρώς με την αύξηση της τέμνουσας. Επίσης προέκυψε ότι για τις διάφορες τιμές του αξονικού φορτίου $0.10A_{gf_c}$, $0.20A_{gf_c}$ και $0.30A_{gf_c}$ είναι μικρή η επίπτωση στην τιμή του πλευρικού φορτίου για την οποία παρατηρείται υποβάθμιση της συνάφειας. Το αξονικό φορτίο επηρέασε ελαφρώς την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των δοκιμών μειώνοντάς την καθώς αυξάνεται το επίπεδο του αξονικού φορτίου. Τα δοκίμια που δέχονταν χαμηλό αξονικό φορτίο διατήρησαν την ικανότητα παραλαβής αξονικού φορτίου για πολύ μεγάλες τιμές ανηγμένης γωνίας στροφής (περίπου 10% του ύψους του στύλου). Τα δοκίμια με μέτριο και υψηλό αξονικό φορτίο έχασαν την ικανότητα παραλαβής αξονικής δύναμης για τιμές ανηγμένης γωνίας στροφής 5 και 7% αντίστοιχα. Τελικό συμπέρασμα των συγγραφέων είναι ότι η αστοχία των παραθέσεων στη βάση των υποστυλωμάτων συνιστά από μόνη της κίνδυνο τοπικής ή και γενικής κατάρρευσης των κτιρίων εφόσον δεν εξασφαλιστεί με άλλους τρόπους ενίσχυσης (όπως η προσθήκη εμφανιζόμενων τοιχωμάτων) ότι η αντοχή και η ακαμψία του συστήματος του φέροντος οργανισμού της οικοδομής έχουν καταστεί επαρκείς για να διασφαλίσουν την πλευρική ευστάθεια του συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

2.1 Εισαγωγή – Στόχος της Έρευνας

Οι σύγχρονες κατασκευές από Οπλισμένο Σκυρόδεμα μελετώνται και κατασκευάζονται σύμφωνα με τους νέους ισχύοντες κανονισμούς, υιοθετώντας με αυτόν τον τρόπο όλη τη σύγχρονη εμπειριστατωμένη γνώση και την τεχνολογία που σχετίζεται με τη συμπεριφορά των κατασκευών από Ο/Σ σε σεισμό. Η εφαρμογή των παλαιότερων κανονισμών, που βασίζονταν περισσότερο σε εμπειρικές πρακτικές και στερούνταν της απαιτούμενης πειραματικής και αναλυτικής εμβάθυνσης, δεν ήταν σε θέση να εξασφαλίσει στις παλαιότερες κατασκευές μία συμπεριφορά ανάλογη με εκείνη που παρουσιάζουν οι αντίστοιχες σύγχρονες έναντι ενός δυναμικού φαινομένου όπως ο σεισμός.

Μία από τις αδυναμίες που παρουσιάζουν κατά κόρον οι κατασκευές των προηγούμενων δεκαετιών είναι η ανεπάρκεια του μήκους παράθεσης των διαμήκων οπλισμών των υποστυλωμάτων τους. Το φαινόμενο αυτό είναι εξαιρετικά γνωστό και σύννηθες στις παλαιές οικοδομές, όπου το μικρό -και κάποιες φορές μάλιστα ιδιαίτερα μικρό- μήκος αναμονών και επομένως και μήκος παράθεσης των διαμήκων οπλισμών των υποστυλωμάτων οδηγεί αφενός στην ανάπτυξη μικρότερων ροπών από τις υπολογιζόμενες στα άκρα των υποστυλωμάτων και αφετέρου σε υπερβολικές παραμορφώσεις λόγω μεγάλης εξόλκευσης των ανεπαρκώς αγκυρωμένων ράβδων οπλισμού.

Στον Κανονισμό Επεμβάσεων, ΚΑΝ.ΕΠΕ. (Σεπτέμβριος 2010), που αποτελεί εμπειριστατωμένο κανονιστικό κείμενο δομητικών επεμβάσεων σε υφιστάμενες κατασκευές, προβλέπεται η αποκατάσταση των ανεπαρκών μηκών παράθεσης ράβδων οπλισμού. Η λογική της αποκατάστασης στηρίζεται στη βελτίωση των συνθηκών μεταφοράς δυνάμεων μεταξύ των ράβδων η οποία μπορεί να επιτευχθεί είτε με ηλεκτροσυγκόλληση των παρατιθέμενων ράβδων ή επέκταση των υφιστάμενων με πρόσθετες ράβδους μέσω ηλεκτροσυγκόλλησης (με την προϋπόθεση ότι η αξονική απόσταση των ράβδων είναι επαρκώς μικρή), είτε με την εφαρμογή εξωτερικής περίσφιξης στο στοιχείο. Στην τελευταία περίπτωση επιδιώκεται η παρεμπόδιση της διάρρηξης του περιβάλλοντος σκυροδέματος των ράβδων και η ολίσθηση αυτών κατά μήκος της κρίσιμης ρωγμής που δημιουργείται μεταξύ των ράβδων πριν αυτές εξαντλήσουν τις δυνατότητές τους και διαρρεύσουν. Στο κείμενο του ΚΑΝ.ΕΠΕ. προτείνονται για το σχετικό ζήτημα σχέσεις υπολογισμού, η αποτελεσματικότητα των οποίων καθώς και η βαθμονόμησή τους απαιτεί τη διεξαγωγή πειραμάτων προκειμένου οι σχέσεις αυτές να αποτελούν ασφαλή και πειραματικώς τεκμηριωμένη πρόταση προς τους μελετητές που εφαρμόζουν τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Η πειραματική μελέτη και τεκμηρίωση της αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. λύσεων σχετικά με το ζήτημα της αποκαταστάσεως των ανεπαρκών μηκών παράθεσης των διαμήκων οπλισμών, καθώς και η βαθμονόμηση των προτεινόμενων σχέσεων υπολογισμού αποτελούν αντικείμενο της παρούσας Έρευνας που χρηματοδοτείται από τον Ο.Α.Σ.Π.

2.2 Προσέγγιση του Προβλήματος

Η πειραματική διερεύνηση που επιδιώκεται σχετικά με τις επεμβάσεις στις περιοχές υποστυλωμάτων παλαιών οικοδομών με ανεπαρκώς παρατιθέμενες διαμήκεις ράβδους οπλισμού προϋποθέτει την οριοθέτηση του προβλήματος που προκαλούν οι ανεπαρκείς παραθέσεις. Γενικώς η αντοχή των υποστυλωμάτων επηρεάζεται από την ύπαρξη ανεπαρκών αναμονών κατά τους εξής τρόπους:

- α) Στις παλαιές οικοδομές οι ανεπαρκείς αναμονές προκαλούν απομείωση της θεωρητικά υπολογισθείσας καμπτικής αντοχής των υποστυλωμάτων λόγω δημιουργίας ανεπαρκών παραθέσεων και εξόλκευσης των αγκυρωμένων στις θέσεις αυτές διαμήκων ράβδων οπλισμού κατά τη διάρκεια του σεισμού.
- β) Στην καθ' ύψος επέκταση παλαιών ή ακόμα και σχετικά σύγχρονων οικοδομών όταν υφίστανται ανεπαρκείς αναμονές οδηγούν, εφόσον δεν ληφθούν κατάλληλα μέτρα θεραπείας, σε ανεπαρκή μήκη παράθεσης με τα γνωστά επακόλουθα τεχνικά προβλήματα που συναντούν οι μηχανικοί αρκετά συχνά.
- γ) Στις παλαιές οικοδομές η καμπτική αντοχή των ενισχυμένων με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος ή από άλλο υλικό υποστυλωμάτων τίθεται εν αμφιβόλω εξαιτίας των ανεπαρκών παραθέσεων των υφιστάμενων διαμήκων οπλισμών υποστυλωμάτων. Το γεγονός αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία κυρίως όταν οι υφιστάμενοι διαμήκεις οπλισμοί ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς ότι συμβάλλουν στη καμπτική λειτουργία των ενισχυμένων στύλων, ενώ είναι ιδιαίτερα ευάλωτοι στις επικείμενες ολισθήσεις κατά τη διάρκεια σεισμού.

Στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. (Σεπτέμβριος 2010), στην παράγραφο §6.3 περιγράφεται ένας τρόπος ενίσχυσης των ανεπαρκών παραθέσεων μέσω της περίσφιξης που επιφέρει η χρήση χαλύβδινων λεπτών μανδυνών. Με τον τρόπο αυτό αντιμετωπίζονται τα προβλήματα που αναφέρονται στο εδάφιο α. Ο υπολογισμός των χαλύβδινων μανδυνών βασίζεται στη σχέση Σ 6.14 του ΚΑΝ.ΕΠΕ:

$$\frac{A_j}{s_w d_s} = \frac{t_j}{d_s} = 1.3 \left[\left(\frac{f_{sy}}{f_c} \right) / \left(2.2 \frac{s_d}{s_u} + 0.25 \right) \left(\frac{l_s}{d_s} \right) - 0.2 \left(\frac{c}{d_s} + 1.5 \right) \right]^2 / \left[\left(\frac{w_d}{d_s} \right) \left(\frac{E_j}{f_c} \right) \left(\frac{f_{cm}}{f_c} \right) \right]$$

Η ανωτέρω σχέση εξετάζεται πειραματικά και βαθμονομείται στο πλαίσιο της παρούσας Έρευνας προκειμένου να εξακριβωθεί η αποτελεσματικότητά της και να αποτελεί ασφαλή και πειραματικώς τεκμηριωμένη πρόταση προς τους μελετητές μηχανικούς που εφαρμόζουν τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Αναφορικά με το πρόβλημα που αναπτύσσεται στο εδάφιο b από τα στοιχεία που διατίθενται (Ευρωκώδικας 8) απαγορεύονται οι κατά παράθεση συγκολλήσεις, ενώ φαίνεται να επιτρέπονται οι κατά μέτωπο συγκολλήσεις των ράβδων. Αυτή η λύση δεν έχει μελετηθεί μέχρι τώρα μέσω δοκιμών. Η ασφάλεια της συγκεκριμένης λύσης ελέγχεται με τη διεξαγωγή πειραμάτων.

Στην §8.2.1.2 του ΚΑΝΕΠΕ, η οποία αναφέρεται στην αποκατάσταση ανεπαρκών μηκών παράθεσης, προτείνονται δύο είδη θεραπείας, η ηλεκτροσυγκόλληση των κατά παράθεση ράβδων και η εφαρμογή εξωτερικής περίσφιγξης στο στοιχείο. Στην παρούσα Έρευνα εξετάζεται επίσης πειραματικά η αποτελεσματικότητα και των δύο αυτών προτεινόμενων μεθόδων έναντι του προβλήματος που αναπτύσσεται στο εδάφιο c με δοκίμια υποστυλωμάτων σχεδόν φυσικής κλίμακας και συγχρόνως βαθμονομείται η σχέση 8.3 του ΚΑΝ.ΕΠΕ:

$$\frac{A_j}{s} = t_j = \gamma_{Rd} \frac{(1 - \lambda_s)}{\beta} \frac{1}{\mu} \frac{f_{yk}}{\sigma_{jd}} \frac{A_b}{l_s}$$

Βάσει της ανάλυσης του προβλήματος που προηγήθηκε οργανώθηκε η κατασκευή δομικών υποσυνόλων υποστυλωμάτων που υποβάλλονται σε σεισμική καταπόνηση και μελετάται πειραματικά η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων που εμπλέκονται στο πρόβλημα που δημιουργούν τα ανεπαρκή μήκη παράθεσης των διαμήκων ράβδων των υποστυλωμάτων. Κατασκευάζονται για τις ανάγκες του παρόντος Ερευνητικού Προγράμματος συνολικά 23 δοκίμια υποστυλωμάτων τα οποία ανήκουν σε τρεις διαφορετικές Σειρές δοκιμών (Σειρά I: 9 δοκίμια, Σειρά II: 4 δοκίμια, Σειρά III: 10 δοκίμια), ανάλογα με τις εξεταζόμενες παραμέτρους.

Στους πίνακες Π.2.1.α, β και γ που ακολουθούν δίνεται μία σύντομη περιγραφή των παραμέτρων που εξετάζονται με κάθε δοκίμιο κάθε Σειράς, των χαρακτηριστικών των δοκιμών, καθώς της και ο τρόπος ονοματολογίας της.

ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ I							
Σύνολο Δοκιμών 9	Αρχικά Δοκίμια 5	Ενισχυμένα Δοκίμια 4	Δοκίμια ελέγχου 1	Μήκη Παράθεσης l_{s1} και l_{s2}	Ενίσχυση με Μεταλλικούς Μανδύες	Πάχη Μανδυσών d_1 και d_2	Μήκος Μανδύα $l>\max\{l_{cr}, 1,3\cdot l_s, 0.6m\}$
Αρχικά Δοκίμια	Περιγραφή των Δοκιμών						
C_1	Δοκίμιο ελέγχου με συνεχείς διαμήκεις ράβδους οπλισμού						
L_1	Δοκίμιο με ανεπαρκές μήκος παράθεσης διαμήκων ράβδων $l_{s1}=200mm$						
L_1	Δοκίμιο με ανεπαρκές μήκος παράθεσης διαμήκων ράβδων $l_{s1}=200mm$						
L_2	Δοκίμιο με ανεπαρκές μήκος παράθεσης διαμήκων ράβδων $l_{s2}=240mm$						
L_2	Δοκίμιο με ανεπαρκές μήκος παράθεσης διαμήκων ράβδων $l_{s2}=240mm$						
Ενισχυμένα Δοκίμια	Περιγραφή των Δοκιμών						
S_1L_1	Δοκίμιο L_1 ενισχυμένο με μεταλλικό μανδύα πάχους $d_1=1mm$						
S_2L_1	Δοκίμιο L_1 ενισχυμένο με μεταλλικό μανδύα πάχους $d_2=5mm$						

S_1L_2	Δοκίμιο L_2 ενισχυμένο με μεταλλικό μανδύα πάχους $d_1=1\text{mm}$
S_2L_2	Δοκίμιο L_2 ενισχυμένο με μεταλλικό μανδύα πάχους $d_2=5\text{mm}$
Σκοπός της Σειράς Δοκιμών I	Με την ταυτόχρονη εξέταση δύο παραμέτρων (μήκους παράθεσης ράβδων και πάχους μεταλλικού μανδύα περίσφιξης) επιδιώκεται η εκτίμηση της βέλτιστης συμπεριφοράς των δοκιμών σε σεισμό με γνώμονα την ιδανική συμπεριφορά του παρθενικού με συνεχείς ράβδους. Βαθμονομείται η σχέση Σ6.14 του ΚΑΝ.ΕΠΕ
Ονομασία Δοκιμών	$L_{1,2}$: Deficient Splices with length $l_{s1,2}$, $S_{1,2}$: Steel Jacket with width $d_{1,2}$, C_1 : Control Specimen of Series I

Πίνακας Π.2.1.α

ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ II					
Σύνολο Δοκιμών 4	Αρχικά Δοκίμια 4	Ενισχυμένα Δοκίμια 0	Δοκίμια ελέγχου 0	Δοκίμια με συγκολλημένους οπλισμούς 3	Δοκίμια με σύνδεση οπλισμών με τη χρήση Μηχανικών Μέσων 1
Δοκίμια	Περιγραφή των Δοκιμών				
W_1	Δοκίμιο με συγκολλημένες κατά παράθεση διαμήκεις ράβδους οπλισμού				
W_2	Δοκίμιο με συγκολλημένες κατά μέτωπο διαμήκεις ράβδους οπλισμού				
W_3	Δοκίμιο με συγκολλημένες κατά λωρίδες διαμήκεις ράβδους οπλισμού				
M_1	Δοκίμιο με σύνδεση των διαμήκων ράβδων οπλισμού με μηχανικά μέσα				
Σκοπός της Σειράς Δοκιμών II	Η μελέτη της αποδοτικότητας των τριών τύπων συγκόλλησης των διαμήκων ράβδων οπλισμού και της εφαρμογής μηχανικών μέσων για τη σύνδεσή τους σε σύγκριση με το δοκίμιο ελέγχου της Σειράς Δοκιμών I.				
Ονομασία Δοκιμών	$W_{1,2,3}$: Welding case 1,2,3, M_1 : Mechanical Anchorage				

Πίνακας Π.2.1.β

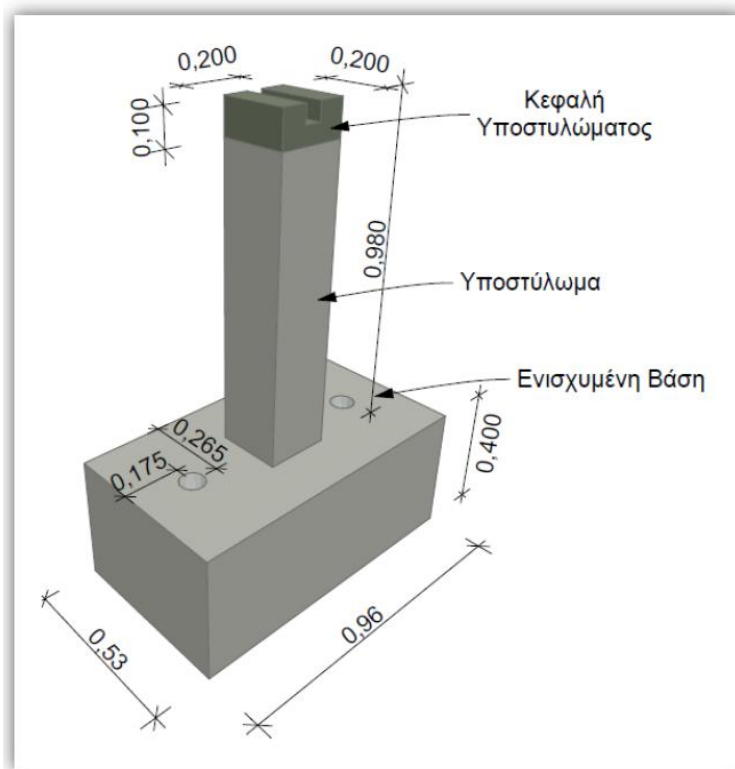
ΣΕΙΡΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ III						
Σύνολο Δοκιμών 10	Αρχικά Δοκίμια 5	Ενισχυμένα Δοκίμια 5	Δοκίμια ελέγχου 1	Μήκη Παράθεσης l_{s1} και l_{s2}	Ενίσχυση με Μανδύες Ο/Σ	Παράμετροι στην περιοχή ανεπαρκούς παράθεσης: συγκόλληση, περίσφιξη
Αρχικά Δοκίμια	Περιγραφή των Δοκιμών					
C_2	Δοκίμιο ελέγχου με συνεχείς διαμήκεις ράβδους οπλισμού					
L_1	Δοκίμιο με ανεπαρκές μήκος παράθεσης διαμήκων ράβδων $l_{s1}=200\text{mm}$					
L_1	Δοκίμιο με ανεπαρκές μήκος παράθεσης διαμήκων ράβδων $l_{s1}=200\text{mm}$					
L_2	Δοκίμιο με ανεπαρκές μήκος παράθεσης διαμήκων ράβδων $l_{s2}=240\text{mm}$					
L_2	Δοκίμιο με ανεπαρκές μήκος παράθεσης διαμήκων ράβδων $l_{s2}=240\text{mm}$					

Ενισχυμένα Δοκίμια	Περιγραφή των Δοκιμίων
RC ₂	Δοκίμιο C ₂ ενισχυμένο με μανδύα Ο/Σ
RWL ₁	Δοκίμιο L ₁ ενισχυμένο με μανδύα Ο/Σ και συγκόλληση στις παραθέσεις
RHL ₁	Δοκίμιο L ₁ ενισχυμένο με μανδύα Ο/Σ και περίσφιξη με επιπλέον συνδετήρες στις παραθέσεις βάσει της σχέσης 8.3 του ΚΑΝ.ΕΠΕ
RWL ₂	Δοκίμιο L ₂ ενισχυμένο με μανδύα Ο/Σ και συγκόλληση στις παραθέσεις
RHL ₂	Δοκίμιο L ₂ ενισχυμένο με μανδύα Ο/Σ και περίσφιξη με επιπλέον συνδετήρες στις παραθέσεις βάσει της σχέσης 8.3 του ΚΑΝ.ΕΠΕ
Σκοπός της Σειράς Δοκιμών III	Σύγκριση της σεισμικής απόκρισης του ενισχυμένου με μανδύα Ο/Σ δοκιμίου ελέγχου της Σειράς III (με συνεχείς οπλισμούς) με την απόκριση των ενισχυμένων με τις δύο προτεινόμενες λύσεις και για τις δύο τιμές μηκών παράθεσης δοκιμίων. Βαθμονομείται η σχέση 8.3 του ΚΑΝ.ΕΠΕ
Ονομασία Δοκιμών	L _{1,2} : Deficient Splices with length l _{s1,2} , R: Concrete Jacket, W: Welding, H: Hoops (confinement), C ₂ : Control Specimen of Series III

Πίνακας Π.2.1.γ

2.3 Περιγραφή των δοκιμών υποστυλωμάτων

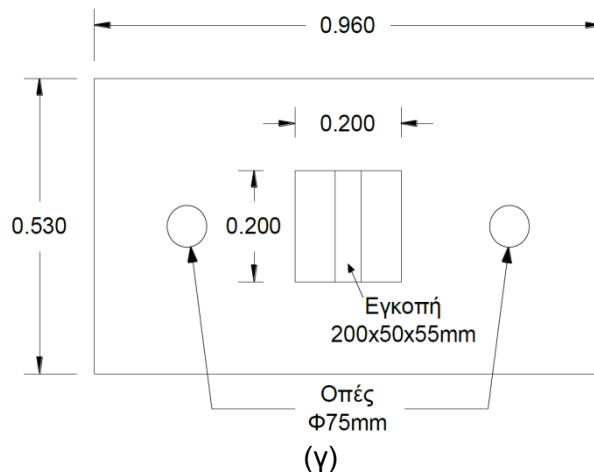
Τα δομικά υποσύνολα υποστυλωμάτων που κατασκευάστηκαν ήταν μορφής στύλου – προβόλου σε σχεδόν φυσική κλίμακα (1:1,5). Κάθε δοκίμιο αποτελούνταν από το υποστύλωμα μήκους 980mm και διαστάσεων ορθογωνικής διατομής 200x200mm (για τα μη ενισχυμένα δοκίμια των Σειρών I και III και τα δοκίμια της Σειράς II), καθώς επίσης και από ένα ενισχυμένο πέδιλο που αποτελεί τη βάση πάκτωσης του υποστυλώματος με μήκος 960mm, πλάτος 530mm και ύψος 400mm. Τα ενισχυμένα με μανδύα Ο/Σ δοκίμια της Σειράς III είχαν διάσταση υποστυλώματος 300x300mm. Το σκυρόδεμα επικάλυψης των οπλισμών είχε πάχος 15mm. Η κεφαλή των στύλων, σε ένα μήκος 150mm όπου πραγματοποιούνταν η πρόσδεση των εμβόλων επιβολής τόσο του πλευρικού όσο και του αξονικού φορτίου, κατασκευάστηκε ενισχυμένη με τη χρήση τοπικά αφενός ειδικού έτοιμου έγχυτου μη συρρικνούμενου τσιμεντοκονιάματος υψηλής αντοχής EMACO S66 και αφετέρου συνδετήρων τοποθετημένων ανά αποστάσεις 50mm, προς αποφυγήν τυχόν αστοχίας στη θέση αυτή. Επίσης, στην κεφαλή κάθε υποστυλώματος διαμορφώθηκε εγκοπή διαστάσεων 65(mm)x50(mm)x200(mm) για την τοποθέτηση ειδικού τεμαχίου μέσω του οποίου πραγματοποιείται η αξονική φόρτιση του στύλου. Στο ενισχυμένο πέδιλο της βάσης κάθε υποστυλώματος διαμορφώθηκαν δύο διαμπερείς οπές σε συγκεκριμένες θέσεις, μέσω των οποίων πραγματοποιήθηκε η πάκτωση των δοκιμίων στη διάταξη επιβολής της σεισμικής φόρτισης (σχήμα Σχ.1α, β, γ). Η μορφή των αρχικών δοκιμών υποστυλωμάτων φαίνεται στο σχήμα 1α.



(α)



(β)



Σχ.1 : (α): Μορφή αρχικών δοκιμών υποστυλώματος, (β): Σιδηροπλισμός αρχικού δοκιμίου(C₁).Με τη βοήθεια σωλήνων διαμορφώνονται διαμπερείς οπές στη βάση για την αγκύρωση του δοκιμίου στη διάταξη φόρτισης, (γ): Σχέδιο κάτοψης δοκιμίου

Για την κατασκευή του σιδηροκλωβού μόνο στη βάση πάκτωσης των υποστυλωμάτων χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα δοκίμια όλων των Σειρών χάλυβας ποιότητας B500C διαμέτρου Φ14mm σε πυκνή διάταξη (Σχ.1β, Σχ.3α, γ, δ), προκειμένου να εξασφαλιστεί η διατήρηση της ακεραιότητας της βάσης κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων και οι βλάβες να συγκεντρωθούν αποκλειστικά στους στύλους, των οποίων η σεισμική συμπεριφορά μελετάται. Τα υποστυλώματα αρχικής μορφής των Σειρών Ι και ΙΙΙ σχεδιάστηκαν με τρόπο ώστε να προσεγγίζουν κατά το δυνατόν περισσότερο τον τρόπο κατασκευής υποστυλωμάτων παλαιών οικοδομών που σχεδιάστηκαν με τους παλαιούς κανονισμούς : 1) Β.Δ.18.2/26-7-1954-ΦΕΚ 160Α, (1954) και 2) Β.Δ.19/26-2-1959-ΦΕΚ 36Α, (1959), “Περί Αντισεισμικού Κανονισμού Οικοδομικών Έργων”. Στην υποβληθείσα πρόταση Ερευνητικού Προγράμματος, η οποία εγκρίθηκε για χρηματοδότηση από τον Ο.Α.Σ.Π. και υλοποιήθηκε με το παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα, δεν είχε προβλεφθεί η χρήση λείου χάλυβα για την κατασκευή των αρχικών δοκιμών υποστυλωμάτων που αντιπροσωπεύουν τις παλαιές κατασκευές. Παρόλα αυτά, στην πορεία εκπόνησης του προγράμματος και για να προσεγγισθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η συμπεριφορά των παλαιών κατασκευών, θεωρήθηκε απαραίτητη η χρήση λείων χαλύβων. Βεβαίως, η εύρεση λείου χάλυβα είναι σήμερα εξαιρετικά δύσκολη και εξαιτίας της σπανιότητάς του απαιτήθηκε χρονικό διάστημα αναζήτησής του σε βιομηχανίες και μάντρες υλικών μεγαλύτερο του ενός μήνα, για λυθεί τελικώς το πρόβλημα με την ευγενική προσφορά της Βιομηχανίας ΣΙΔΕΝΟΡ Α.Ε., την οποία ευχαριστούμε ιδιαίτερα για την πολύτιμη συμβολή της στην έρευνα αυτή. Σε όλα τα μη ενισχυμένα υποστυλώματα, που αντιπροσωπεύουν τμήματα παλαιών κατασκευών, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαμήκεις λείες ράβδοι διαμέτρου Φ10mm ποιότητας χάλυβα S220 καθώς και εγκάρσιος λείος οπλισμός διαμέτρου Φ6mm ανά αποστάσεις 200mm ποιότητας χάλυβα S220. Τα άκρα των αναμονών και των διαμήκων ράβδων των υποστυλωμάτων διαμορφώθηκαν ως άγκιστρα, όπως δηλαδή κατασκευάζονταν στην πράξη στις παλαιές οικοδομές (Σχ.3β, γ, δ). Επίσης οι συνδετήρες είχαν αγκύρωση 90° (Σχ.1β). Η τάση διαρροής του λείου χάλυβα βρέθηκε με πειράματα εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκαν σε τρία δοκίμια ράβδων

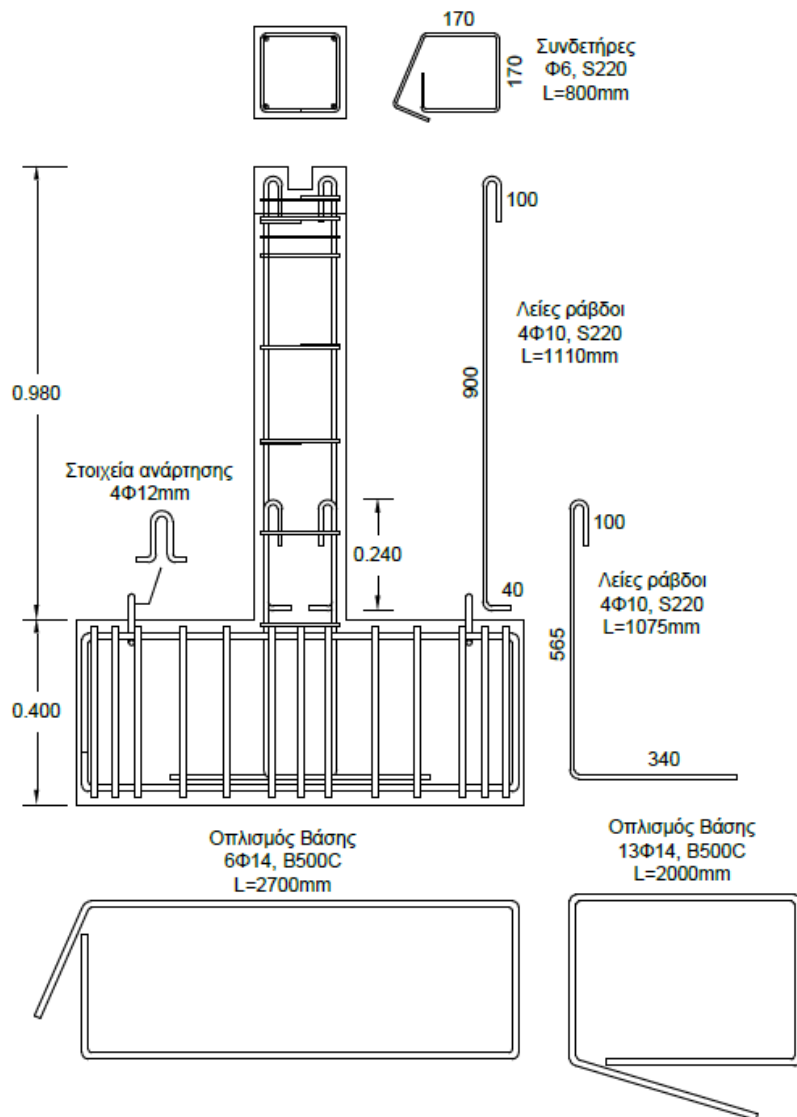
χάλυβα στο Εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών του Α.Π.Θ. Ομοίως βρέθηκαν και τα όρια διαρροής των χαλύβδινων μανδύων που χρησιμοποιήθηκαν για τη θεραπεία των ανεπαρκώς παρατιθέμενων ράβδων των στύλων της Σειράς δοκιμών Ι. Στα αρχικά δοκίμια των Σειρών Ι και ΙΙΙ το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν κατηγορίας C8/10.

Τα δοκίμια C_1 και C_2 (Σχ.3α) με συνεχείς διαμήκεις οπλισμούς υποστυλώματος αντιπροσωπεύουν τις ιδανικές συνθήκες αγκύρωσης των οπλισμών των στύλων παλαιών κατασκευών, χωρίς ματίσεις. Οι δυνάμεις στα δοκίμια αυτά μεταβιβάζονται ανεμπόδιστα λόγω της συνέχειας του οπλισμού και της απουσίας παραθέσεων, δίδοντας την εμπλοκή της συνάφειας μεταξύ παρατιθέμενων ράβδων. Αποτελούν επομένως, τα C_1 και C_2 , δοκίμια των οποίων η συμπεριφορά σε σεισμό αναμένεται πολύ καλύτερη από εκείνη που θα παρουσίαζαν όμοια υποστυλώματα με ανεπαρκή μήκη παράθεσης των διαμήκων οπλισμών τους. Με τις προσεισμικές επεμβάσεις που πραγματοποιούνται επιδιώκεται η βελτίωση των συνθηκών συνάφειας μεταξύ των παρατιθέμενων ράβδων προκειμένου οι ενισχυμένοι στύλοι να παρουσιάζουν μια σεισμική απόκριση που να προσεγγίζει κατά το δυνατόν εκείνη των δοκιμών – στόχων C_1 και C_2 .

Στην παρούσα Έρευνα εξετάστηκαν δύο διαφορετικά μήκη παράθεσης των διαμήκων οπλισμών υποστυλωμάτων ίσα με είκοσι και εικοσιτέσσερις φορές τη διάμετρο των διαμήκων ράβδων ($20d_b$ και $24d_b$). Η επιλογή των μηκών αυτών πραγματοποιήθηκε λόγω των απαιτήσεων των παλαιών κανονισμών που εφαρμόζονταν κατά το παρελθόν στα κτίρια. Επίσης υποστυλώματα με μήκη παράθεσης $20d_b$ και $24d_b$ εξετάζονται κατά κόρον και στη διεθνή βιβλιογραφία.

Τα τέσσερα από τα πέντε αρχικά δοκίμια της Σειράς δοκιμών Ι, με μήκη παράθεσης $20d_b$ και $24d_b$, ενισχύονται με την εφαρμογή χαλύβδινων επικολλητών ελασμάτων – μανδύων με στόχο τη βελτίωση του μηχανισμού μεταφοράς δυνάμεων στην περιοχή όπου πραγματοποιούνται οι παραθέσεις. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά πάχη χαλύβδινων ελασμάτων που προέκυψαν βάσει υπολογισμών (κεφάλαιο 2) ενώ το ύψος στο οποίο εφαρμόστηκαν οι μεταλλικοί μανδύες καθορίστηκε βάσει των προβλέψεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ για την εφαρμογή περίσφιγξης στην περιοχή πιθανής πλαστικής άρθρωσης υποστυλωμάτων. Στα υποστυλώματα με το ίδιο μήκος παράθεσης ράβδων εφαρμόστηκαν χαλύβδινοι μανδύες με διαφορετικό πάχος, ώστε να ελεγχθεί και να βαθμονομηθεί η Σχέση Σ6.14 του ΚΑΝ.ΕΠΕ που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του απαιτούμενου πάχους λεπτού χαλύβδινου μανδύα για την θεραπεία των ανεπαρκών παραθέσεων διαμήκων οπλισμών στα δοκίμια υποστυλωμάτων της Σειράς Ι. Η σεισμική απόκριση των τεσσάρων ενισχυμένων δοκιμών συγκρίνεται κατόπιν με εκείνη του δοκιμίου – στόχου με τους συνεχείς οπλισμούς, C_1 , της Σειράς Ι.

Οπλισμός αρχικών δοκιμίων L_2

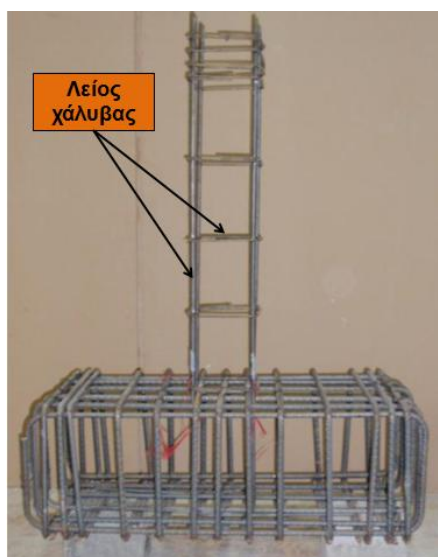


Σχ.2 : Σχέδιο λεπτομερειών όπλισης αρχικών δοκιμών υποστυλώματος L₂ (μήκος παραθέσεως διαμήκων ράβδων ίσο με 24d_b)

Τα τέσσερα δοκίμια της δεύτερης Σειράς δοκιμίων αποτελούν μία ομάδα δοκιμίων με την οποία εξετάζεται η αποτελεσματικότητα των διαφόρων μορφών συγκολλήσεων, καθώς και των μηχανικών αγκυρώσεων μεταξύ των διαμήκων ράβδων οπλισμού κατά την καθ' ύψος επέκταση παλαιών κατασκευών σε μεταγενέστερο στάδιο από την κατασκευή τους. Στις περιπτώσεις αυτές ο μηχανικός καλείται να επεκτείνει τα υφιστάμενα υποστυλώματα καθ' ύψος τοποθετώντας τους νέους διαμήκεις οπλισμούς δίπλα από τις αναμονές στην οροφή του κτιρίου. Τα μήκη αναμονών ωστόσο των παλαιών κτιρίων είναι τις περισσότερες φορές στην καλύτερη περίπτωση ανεπαρκή, ενώ είναι πιθανό οι αναμονές να έχουν κοπεί σε ακόμα μικρότερο μήκος από το προβλεπόμενο βάσει των τότε εν ισχύι κανονισμών. Στα δοκίμια της σειράς II οι αναμονές των διαμήκων ράβδων κάθε στύλου είναι τέσσερις λείες ράβδοι χάλυβα ποιότητας S220 και διαμέτρου Φ10mm, προσομοιώνοντας τις

αναμονές παλαιού κτιρίου. Οι διαμήκεις οπλισμοί του υποστυλώματος είναι τέσσερις ράβδοι διαμέτρου $\Phi 10\text{mm}$ και ποιότητας B500C προσομοιώνοντας τη νέα, σύγχρονη κατασκευή. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε στα δομικά υποσύνολα στύλων της Σειράς II είναι κατηγορίας C20/25. Η συγκολλησιμότητα του λείου χάλυβα ελέγχθηκε κατά τα προβλεπόμενα από τον Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων με δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια χάλυβα που εστάλησαν για ανάλυση στην Ε.Β.Ε.Τ.Α.Μ. (Παράρτημα). Οι συγκολλήσεις κατά μέτωπο, κατά παράθεση και κατά λωρίδες πραγματοποιήθηκαν κατά τα προβλεπόμενα από τον Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων. Οι αρμοκλείδες που χρησιμοποιήθηκαν για την μηχανική αγκύρωση των διαμήκων οπλισμών του στύλου στο δοκίμιο M_1 φαίνονται στο σχήμα Σχ.4α, β. Επίσης για τον έλεγχο της ποιότητας των συγκολλήσεων και της αντοχής των μηχανικών αγκυρώσεων πραγματοποιήθηκαν πειράματα εφελκυσμού (Σχ.4γ) σε δοκίμια χαλύβδινων ράβδων συγκολλημένων με τους προαναφερθέντες τρόπους (σε τρία δοκίμια για κάθε τύπο συγκόλλησης), καθώς και σε τρία δοκίμια ράβδων που ενώνονταν με τη βοήθεια μηχανικών αγκυρώσεων (Σχ.4β). Η συμπεριφορά σε πλευρική φόρτιση των υποστυλωμάτων της ομάδας αυτής συγκρίνεται με τη σεισμική απόκριση του δοκιμίου – στόχου της Σειράς I, C_1 .

Η Σειρά δοκιμών III περιελάμβανε αρχικά την κατασκευή ενός στύλου με συνεχείς διαμήκεις οπλισμούς και τεσσάρων στύλων με μήκη παράθεσης $20d_b$ (σε δύο δοκίμια) και $24d_b$ (σε δύο δοκίμια). Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αφαίρεση του σκυροδέματος επικάλυψης των οπλισμών σε όλα τα δοκίμια και κατασκευή μανδύα Ο/Σ με την τοποθέτηση νέων διαμήκων και εγκάρσιων οπλισμών βάσει υπολογισμού κατά Ε.Κ.Ω.Σ. 2000. Από τα δύο δοκίμια με το ίδιο ανεπαρκές μήκος παράθεσης στο ένα πραγματοποιήθηκε συγκόλληση των ανεπαρκώς παρατιθέμενων διαμήκων ράβδων, ενώ στο άλλο τοποθετήθηκαν εσωτερικά, πριν την κατασκευή του μανδύα Ο/Σ, επιπλέον συνδετήρες. Οι συνδετήρες αυτοί που απαιτούνται για τη θεραπεία των ανεπαρκών παραθέσεων των οπλισμών του στύλου υπολογίστηκαν βάσει της σχέσεως 8.3 του ΚΑΝ.ΕΠΕ η οποία και βαθμονομείται. Η συμπεριφορά των τεσσάρων δοκιμών της Σειράς III μετά τις επεμβάσεις θεραπείας των ανεπαρκών παραθέσεων των οπλισμών τους συγκρίνεται με εκείνη του ενισχυμένου με μανδύα Ο/Σ δοκιμίου – στόχου C_2 της Σειράς III.



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχ.3 : (α): οπλισμός δοκιμίων C_1 και C_2 με συνεχείς διαμήκεις ράβδους στύλου, (β): μήκος παράθεσης $24d_b$ – διαμόρφωση άκρων οπλισμών ως άγκιστρα, (γ): οπλισμός δοκιμίων L_2 , (δ): οπλισμός βάσης του δοκιμίου και αναμονές



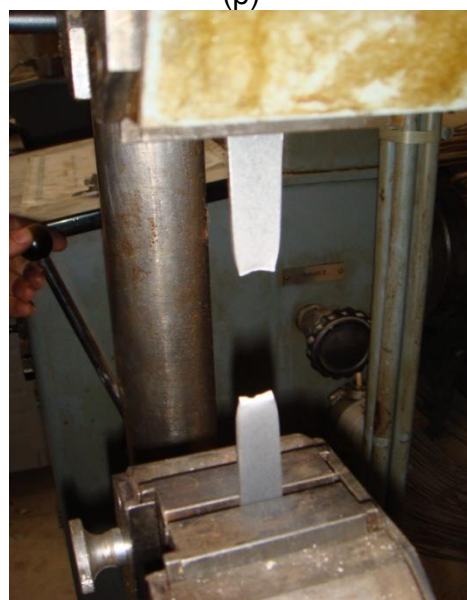
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχ.4 : (α): Αρμοκλείδες – λεπτομέρεια οπλισμού δοκιμίου M₁, (β): πείραμα ελέγχου αντοχής αρμοκλείδας, (γ): έλεγχος αντοχής συγκόλλησης ράβδων κατά μέτωπο (αστόχησε η λεία ράβδος), (δ): πείραμα εφελκυσμού σε δοκίμιο του χαλύβδινου μανδύα που χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση δοκιμίων της Σειράς I

2.4 Κατασκευή των δοκιμίων σε αρχική μορφή

Μετά την κατασκευή του σιδηροοπλισμού και την τοποθέτηση σε συγκεκριμένες θέσεις ταινιών για τη μέτρηση των παραμορφώσεων των οπλισμών, τα δοκίμια σκυροδετήθηκαν με σκυρόδεμα παρασκευασμένο επί τόπου στο Εργαστήριο. Στα αρχικά δοκίμια στύλων των Σειρών δοκιμίων I και III χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα κατηγορίας C8/10 για να προσομοιωθεί η ποιότητα του σκυροδέματος των παλαιών κατασκευών. Στα ενισχυμένα δοκίμια με μανδύα Ο/Σ της Σειράς δοκιμίων III

χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του μανδύα έτοιμο έγχυτο μη συρρικνούμενο τσιμεντοκονίαμα υψηλής αντοχής EMACO S66. Επίσης στην κεφαλή όλων των στύλων σε ένα ύψος 150mm χρησιμοποιήθηκε EMACO S66 για την ενίσχυση τοπικά της κεφαλής στο σημείο πρόσδεσης των εμβόλων. Τα δοκίμια της Σειράς II είχαν σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 καθώς αντιπροσωπεύουν σύγχρονους στύλους κατασκευών καθ' ύψους επέκτασης παλαιών κτιρίων. Η σκυροδέτηση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε σε τρία ειδικά διαμορφωμένα καλούπια (δύο ξυλότυποι και ένας μεταλλότυπος) Σχήμα Σχ.5α. Με τη βοήθεια πλαστικών σωλήνων 6atm διαμέτρου 75mm, που τοποθετήθηκαν και σταθεροποιήθηκαν σε συγκεκριμένες θέσεις, δημιουργήθηκαν διαμπερείς οπές στο πέδιλο της βάσης των υποστυλωμάτων για τη διέλευση των ντιζών αγκύρωσης των δοκιμίων στο πλαίσιο αντίδρασης της διάταξης φόρτισης. Στην κορυφή του υποστυλώματος κάθε δοκιμίου προσαρμόστηκε κεντρικά στο καλούπι ειδικό μεταλλικό στέλεχος σχήματος Π για τη δημιουργία εγκοπής. Εντός της εγκοπής αγκυρώνεται η πλάκα μέσω της οποίας αφενός επιβάλλεται το αξονικό φορτίο και αφετέρου καθίσταται εφικτή η μετακίνηση του φορείου του υδραυλικού γρύλου επιβολής αξονικού φορτίου. Τα καλούπια πριν την τοποθέτηση του σιδηροπλισμού εντός αυτών επαλείφθηκαν με λάδι και ακολούθησε η σκυροδέτηση των δοκιμίων (Σχ.6). Κατά τη σκυροδέτηση ελήφθησαν τρεις κυλινδρικές μήτρες σκυροδέματος διαμέτρου 150mm και ύψους 300mm για κάθε δοκίμιο υποστυλώματος για τον έλεγχο της αντοχής του σκυροδέματος. Η αντοχή του σκυροδέματος των υποστυλωμάτων προέκυψε από πειράματα σύνθλιψης των κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών του Α.Π.Θ. (Σχ.5β), (Πίνακας Π.2.4.α).



(α)



(β)

Σχ.5 : (α): Ξυλότυποι και μεταλλότυπος δοκιμίων, (β): Πειράματα προσδιορισμού της αντοχής του σκυροδέματος των δοκιμίων

Δοκίμιο Στύλου	Μήτρα 1 (MPa)	Μήτρα 2 (MPa)	Μήτρα 3 (MPa)	Μ.Ο. (MPa)
Αρχικά δοκίμια Σειράς I				
L ₁	8.23	8.1	9.3	8.51
L ₁	8.6	9.2	9.32	9.04
L ₂	11.1	10.25	10.6	10.65
L ₂	8.55	8.8	9.45	8.93
C ₁	10.3	10.65	9.8	10.25
Δοκίμια Σειράς II				
M ₁	8.4	9	9.3	8.9
W ₁	11.53	10.7	11	11.01
W ₂	10	10.5	9.8	10.1
W ₃	8.85	9.3	9.5	9.22
Αρχικά δοκίμια Σειράς III				
L ₁	9.23	9.8	10.4	9.81
L ₁	10	9.3	9.6	9.63
L ₂	8.22	9.2	9	8.8
L ₂	8.4	8.54	9	8.65
C ₂	9	8.6	9.21	8.94

Πίνακας Π.2.4.α



Σχ.6 : Σκυροδέτηση δοκιμίων

2.5 Επεμβάσεις για τη θεραπεία των ανεπαρκών μηκών παράθεσης

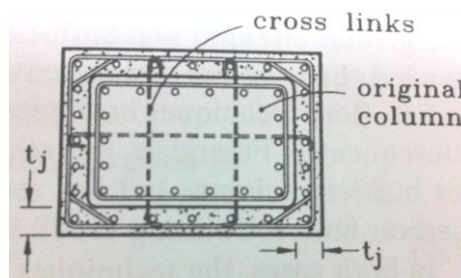
Στα υποστυλώματα των Σειρών δοκιμών I (εκτός από το C₁ με τους συνεχείς οπλισμούς), II και III πραγματοποιήθηκαν επεμβάσεις για τη θεραπεία των ανεπαρκών μηκών ματισμάτων των διαμήκων οπλισμών τους. Οι επεμβάσεις αυτές στα δοκίμια των Σειρών I και III έλαβαν χώρα μετά την παρέλευση τουλάχιστον 28 ημερών από τη σκυροδέτηση των δοκιμών. Όπως ήδη αναφέρθηκε η στρατηγική αντιμετώπισης του προβλήματος που ακολουθείται τόσο διεθνώς όσο και από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ προβλέπει είτε την περίσφιγξη της περιοχής όπου παρατίθενται οι ράβδοι, είτε τη συγκόλληση των παρατιθέμενων ράβδων του υποστυλώματος. Στη Σειρά δοκιμών I χρησιμοποιήθηκαν λεπτοί χαλύβδινοι μανδύες για την εφαρμογή περίσφιγξης στην περιοχή όπου πραγματοποιούνται οι παραθέσεις των ράβδων, ενώ στη Σειρά III μανδύες Ο/Σ. Η ομάδα δοκιμών της Σειράς II δεν δέχθηκε καμία μεταγενέστερη επέμβαση για περίσφιγξη της περιοχής ανεπαρκώς παρατιθέμενων οπλισμών, καθώς στα δοκίμια αυτά επιδιώχθηκε η αποκατάσταση της συνέχειας των διαμήκων οπλισμών των στύλων μέσω συγκόλλησης ή χρησιμοποίησης μηχανικών μέσων αγκύρωσής τους.

Παρατήρηση σχετικά με τις διαστάσεις των αρχικών στύλων πριν τις επεμβάσεις:

Η διατομή 200x200mm των τετραγωνικών υποστυλωμάτων που εξετάστηκαν στο παρόν ερευνητικό πρόγραμμα (τα οποία είναι κατασκευασμένα υπό κλίμακα 1:1.5) απαντάται πολύ συχνά σε υποστυλώματα παλαιών οικοδομών. Ιδιαίτερα μάλιστα στους στύλους των ανώτερων ορόφων σε παλαιές κατασκευές, προ του '60, οι διατομές υποστυλωμάτων διαστάσεων 200x200mm αποτελούν τον κανόνα. Επίσης ένα ακόμα πρόβλημα που αντιμετωπίζεται συχνά είναι η ύστερη καθ' ύψος επέκταση υφιστάμενων στύλων παλαιών κατασκευών με διατομή 200x200mm. Για τον λόγο αυτόν η προσέγγιση που έγινε για τους στύλους των δοκιμών, ακόμα και για την 1:1 αντιμετώπιση του θέματος, θα τολμούσαμε να πούμε ότι είναι ιδιαίτερα ακριβής.

Στα υποστυλώματα αυτά που έχουν μόνον γωνιακές διαμήκεις ράβδους η περίσφιγξη που επιτυγχάνεται μέσω των συνδετήρων του μανδύα είναι σημαντικότερη από την προσφερόμενη σε διατομές μεγαλύτερων διαστάσεων που έχουν και ενδιάμεσες διαμήκεις ράβδους.

Στην περίπτωση επομένως ορθογωνικών υποστυλωμάτων με αυξημένο αριθμό ενδιάμεσων μη γωνιακών διαμήκων ράβδων που ενισχύονται με μανδύα Ο/Σ, σημαντική βελτίωση της καμπτικής και διατμητικής αντοχής και της πλαστιμότητας επιτυγχάνεται εφόσον ο μανδύας είναι ελλειπτικής ή κυκλικής διατομής. Σε διαφορετική περίπτωση ο ορθογωνικός μανδύας Ο/Σ πρέπει να περιλαμβάνει περιφερειακούς συνδετήρες, συνδετήρες με άγκιστρα 45° και συνδετήρες που τοποθετούνται μετά από τη διάνοιξη οπών στο σκυρόδεμα και επί τόπου λυγισμό και συγκόλληση των σκελών τους (σχέδιο που ακολουθεί) ώστε να εξασφαλίζεται η περίσφιγξη και των ενδιάμεσων ράβδων.

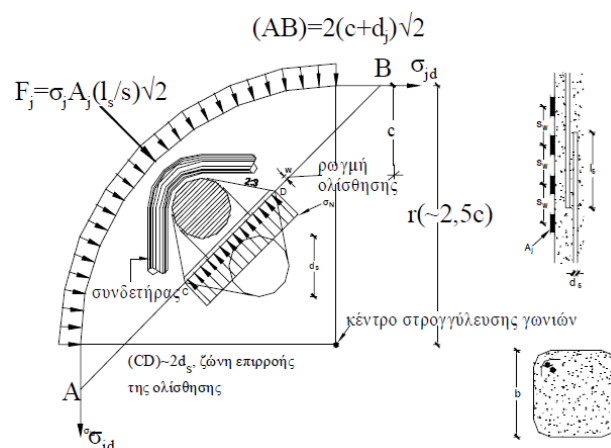


Ακολούθως παρατίθενται οι υπολογισμοί των απαιτούμενων σε κάθε περίπτωση επεμβάσεων, ενώ παράλληλα περιγράφεται και πιστοποιείται με τη βοήθεια φωτογραφικού υλικού η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή των ενισχύσεων στα υποστυλώματα.

2.5.1 Σειρά Δοκιμών Ι

Στον ΚΑΝ.ΕΠΕ αναφέρεται ότι στην περίπτωση που το μήκος αλληλοεπικάλυψης ράβδων οπλισμού υποστυλωμάτων είναι μικρό είναι δυνατή η βελτίωση των συνθηκών μεταφοράς δυνάμεων μέσω εξωτερικής περίσφιγξης που μπορεί να εφαρμοστεί στο υποστύλωμα. Παρουσιάζεται μάλιστα ένα προσομοίωμα υπολογισμού του απαιτούμενου εμβαδού της εξωτερικής περίσφιγξης που μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω ινοπλισμένων πολυμερών υλικών (ΙΟΠ) ή λεπτών χαλύβδινων μανδυνών. Το προσομοίωμα αυτό αναφέρεται στις γωνιακές ράβδους υποστυλώματος και υπολογίζει το απαιτούμενο εμβαδό εξωτερικής περίσφιγξης από τη σχέση

$$\frac{A_j}{s_w d_s} = \frac{t_j}{d_s} = 1.3 \left[\left(\frac{f_{sy}}{f_c} \right) / \left(2.2 \frac{s_d}{s_u} + 0.25 \right) \left(\frac{l_s}{d_s} \right) - 0.2 \left(\frac{c}{d_s} + 1.5 \right) \right]^2 / \left[\left(\frac{w_d}{d_s} \right) \left(\frac{E_j}{f_c} \right) \left(\frac{f_{ctm}}{f_c} \right) \right]$$



η οποία αποτελεί τη Σχέση Σ6.24 του ΚΑΝ.ΕΠΕ που εξετάζεται και βαθμονομείται στο παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα. Η ανάλυση του προσομοιώματος παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 1.

Ακολουθώντας υπολογίζεται ο απαιτούμενος οπλισμός περίσφιγξης (πάχος μεταλλικού μανδύα) βάσει ΚΑΝ.ΕΠΕ:

Στη σχέση Σ6.14 είναι:

$c = 15 \text{ mm}$ (επικάλυψη) και $c/d_s = 15/10 = 1,5$ (ικανοποιεί την προϋπόθεση)

$d_s = d_b = 10 \text{ mm}$.

$f_c = f_{ck}$ οπότε:

Σκυρόδεμα C8 $\rightarrow f_c = 8 \text{ MPa}$ και $f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 1,2 \text{ MPa}$

Χάλυβας S220 $\rightarrow f_{sy} = f_{yk} = 220 \text{ MPa}$.

Υλικό περίσφιγξης: $E_j = 210 \text{ GPa}$

Μήκος Παράθεσης: α) $l_s = 20 \cdot d_b = 20 \cdot 10 = 200 \text{ mm}$.

β) $l_s = 24 \cdot d_b = 24 \cdot 10 = 240 \text{ mm}$.

$s_d = 1,50 \text{ mm}$ για Στάθμη Επιτελεστικότητας Γ, οπότε: $w_d = 0,6 \cdot s_d^{2/3} = 0,6 \cdot 1,5^{2/3} = 0,786 \text{ mm}$.

$S_u = 2,00 \text{ mm}$ (δίνεται).

Για συνεχή εξωτερικό μανδύα από χαλύβδινο έλασμα είναι $s_w = w_j$ οπότε: $A_j/w_j = t_j$ (πάχος μανδύα mm)

Επομένως η Σχέση Σ6.14 δίνει:

α) Για $l_s = 20 \cdot d_b = 20 \cdot 10 = 200 \text{ mm}$

$$A_j/(s_w \cdot d_s) = 1,3 \cdot \{ (f_{sy}/f_c) / [2,2 \cdot (s_d/s_u) + 0,25] \cdot (l_s/d_s) - 0,2 \cdot [(c/d_s) + 1,5]^2 / [(w_d/d_s) \cdot (E_j/f_c) \cdot (f_{ctm}/f_c)] \} \rightarrow$$

$$t_j/10 = 1,3 \cdot \{ (220 \text{ MPa}/8 \text{ MPa}) / [2,2 \cdot (1,5 \text{ mm}/2,0 \text{ mm}) + 0,25] \cdot (200 \text{ mm}/10 \text{ mm}) -$$

$$0,2 \cdot [(15 \text{ mm}/10 \text{ mm}) + 1,5]^2 / [(0,786 \text{ mm}/10 \text{ mm}) \cdot (210000 \text{ MPa}/8 \text{ MPa}) \cdot$$

$$(1,2 \text{ MPa}/8 \text{ MPa}) \} \rightarrow$$

$$t_j = 0,000643 \text{ mm}$$

και

β) Για $l_s = 24 \cdot d_b = 24 \cdot 10 = 240 \text{ mm}$

$$t_j/d_s = 1,3 \cdot \{ (220 \text{ MPa}/8 \text{ MPa}) / [2,2 \cdot (1,5 \text{ mm}/2,0 \text{ mm}) + 0,25] \cdot (240 \text{ mm}/10 \text{ mm}) -$$

$$0,2 \cdot [(15 \text{ mm}/10 \text{ mm}) + 1,5]^2 / [(0,786 \text{ mm}/10 \text{ mm}) \cdot (210000 \text{ MPa}/8 \text{ MPa}) \cdot$$

$$(1,2 \text{ MPa}/8 \text{ MPa}) \} \rightarrow$$

$$t_j = 3,9 \cdot 10^{-7} \text{ mm}$$

Ο Τάσιος (2009) αναφέρει ότι για να μην παρουσιαστεί κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση μεγάλη εξασθένιση της αντίστασης τριβής οι τιμές σχεδιασμού των τιμών ανεκτής βλάβης s_d και w_d πρέπει να είναι επαρκώς μικρές. Ως τέτοιες τιμές που αντιστοιχούν σε έναν ανεκτό βαθμό βλάβης θεωρεί τις τιμές $s_d=0,4$ και $w_d=0,33$. Επομένως

Για τις τιμές ανεκτής βλάβης για τα s_d και s_u :

α) Για $l_s = 20 \cdot d_b = 20 \cdot 10 = 200 \text{ mm}$

$$A_f/(s_w \cdot d_s) = 1,3 \cdot \{ (f_{sy}/f_c) / [2,2 \cdot (s_d/s_u) + 0,25] \cdot (l_s/d_s) - 0,2 \cdot [(c/d_s) + 1,5] \}^2 / [(w_d/d_s) \cdot (E_f/f_c) \cdot (f_{ctm}/f_c)] \rightarrow$$

$$t_j/10 = 1,3 \cdot \{ (220\text{MPa}/8\text{MPa}) / [2,2 \cdot (0,4\text{mm}/2,0\text{mm}) + 0,25] \cdot (200\text{mm}/10\text{mm}) -$$

$$- 0,2 \cdot [(15\text{mm}/10\text{mm}) + 1,5] \}^2 / [(0,33\text{mm}/10\text{mm}) \cdot (210000\text{MPa}/8\text{MPa}) \cdot$$

$$\cdot (1,2\text{MPa}/8\text{MPa})] \rightarrow$$

$$t_j = 0,019 \text{ mm}$$

και

β) Για $l_s = 24 \cdot d_b = 24 \cdot 10 = 240 \text{ mm}$

$$t_j/d_s = 1,3 \cdot \{ (220\text{MPa}/8\text{MPa}) / [2,2 \cdot (0,4\text{mm}/2,0\text{mm}) + 0,25] \cdot (240\text{mm}/10\text{mm}) -$$

$$- 0,2 \cdot [(15\text{mm}/10\text{mm}) + 1,5] \}^2 / [(0,33\text{mm}/10\text{mm}) \cdot (210000\text{MPa}/8\text{MPa}) \cdot$$

$$\cdot (1,2\text{MPa}/8\text{MPa})] \rightarrow$$

$$t_j = 0,011 \text{ mm}$$

Επίσης ο Τάσιος (2009) αναφέρει ότι το προηγούμενο προσομοίωμα της Σχέσεως Σ6.14, το οποίο ανέπτυξε για την εφαρμογή περίσφιγξης μέσω ΙΟΠ, ισχύει και στην περίπτωση που η περίσφιγξη επιβληθεί μέσω συνεχούς, κλειστού χαλύβδινου συγκολλημένου μανδύα, αλλά λόγω της μειωμένης αντοχής του χάλυβα εν σχέσει με τα ΙΟΠ η σχέση Σ6.14 λαμβάνει τη μορφή:

$$t_j = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{E_s \cdot f_{ctm}}{f_{sy}'^2} \cdot w$$

Όπου f_{sy}' : το όριο διαρροής του χαλύβδινου μανδύα.

Για να βεβαιωθεί όμως ότι ο χαλύβδινος μανδύας πέτυχε να ανεβάσει την τάση σ_s των ανεπαρκώς παρατιθέμενων ράβδων στο όριο διαρροής τους f_{sy} πρέπει να ελεγχθεί η σχέση:

$$\sigma_s = \left(2,2 \cdot \frac{s}{s_u} + 0,25 \right) \cdot \left[1,7 \cdot \frac{E_f}{f_{sy}'} \cdot \frac{f_{ctm}}{f_c} \cdot \frac{w}{d_b} + 0,2 \cdot \left(2 \cdot \frac{c}{d_b} + 1,5 \right) \right] \cdot \frac{l_s}{d_b} \cdot f_c > f_{sy}$$

Τρία δοκίμια από κάθε λαμαρίνα που χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση των δοκιμών υποβλήθηκαν σε δοκιμή εφελκυσμού στο Εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών του Α.Π.Θ. Από τις δοκιμές εφελκυσμού (Σχ.4δ) προέκυψε ότι η τάση διαρροής τους είναι: $f_{sy}' = 227,5 \text{ MPa}$.

Άρα:

α) Για $s_d=1.5\text{mm}$ και $w=0,786 \text{ mm}$:

$$t_j = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{E_s \cdot f_{ctm}}{f_{sy}'^2} \cdot w = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{210000 \cdot 1,2}{227,5^2} \cdot 0,786 = 10,82 \text{ mm}$$

και

$$\sigma_s = \left(2.2 \cdot \frac{s}{s_u} + 0.25\right) \cdot \left[1.7 \cdot \frac{E_j}{f_{sy}} \cdot \frac{f_{ctm}}{f_c} \cdot \frac{w}{d_b} + 0.2 \cdot \left(2 \cdot \frac{c}{d_b} + 1.5\right)\right] \cdot \frac{l_s}{d_b} \cdot f_c \rightarrow$$

Για $l_s=20\Phi$:

$$\sigma_s = \left(2.2 \cdot \frac{1.5}{2} + 0.25\right) \cdot \left[1.7 \cdot \frac{210000}{227.5} \cdot \frac{1.2}{8} \cdot \frac{0.786}{10} + 0.2 \cdot \left(2 \cdot \frac{15}{10} + 1.5\right)\right] \cdot \frac{200}{10} \cdot 8 = 5897.6$$

Για $l_s=24\Phi$:

$$\sigma_s = \left(2.2 \cdot \frac{1.5}{2} + 0.25\right) \cdot \left[1.7 \cdot \frac{210000}{227.5} \cdot \frac{1.2}{8} \cdot \frac{0.786}{10} + 0.2 \cdot \left(2 \cdot \frac{15}{10} + 1.5\right)\right] \cdot \frac{240}{10} \cdot 8 = 7077.12$$

β) Για $s_d=0.4mm$ και $w=0.33 mm$:

$$t_j = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{E_s \cdot f_{ctm}}{f_{sy}^2} \cdot w = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{210000 \cdot 1.2}{227.5^2} \cdot 0.33 = 4.54 mm$$

και

$$\sigma_s = \left(2.2 \cdot \frac{s}{s_u} + 0.25\right) \cdot \left[1.7 \cdot \frac{E_j}{f_{sy}} \cdot \frac{f_{ctm}}{f_c} \cdot \frac{w}{d_b} + 0.2 \cdot \left(2 \cdot \frac{c}{d_b} + 1.5\right)\right] \cdot \frac{l_s}{d_b} \cdot f_c \rightarrow$$

Για $l_s=20\Phi$:

$$\sigma_s = \left(2.2 \cdot \frac{0.4}{2} + 0.25\right) \cdot \left[1.7 \cdot \frac{210000}{227.5} \cdot \frac{1.2}{8} \cdot \frac{0.33}{10} + 0.2 \cdot \left(2 \cdot \frac{15}{10} + 1.5\right)\right] \cdot \frac{200}{10} \cdot 8 = 956.84$$

Για $l_s=24\Phi$:

$$\sigma_s = \left(2.2 \cdot \frac{0.4}{2} + 0.25\right) \cdot \left[1.7 \cdot \frac{210000}{227.5} \cdot \frac{1.2}{8} \cdot \frac{0.33}{10} + 0.2 \cdot \left(2 \cdot \frac{15}{10} + 1.5\right)\right] \cdot \frac{240}{10} \cdot 8 = 1148.2$$

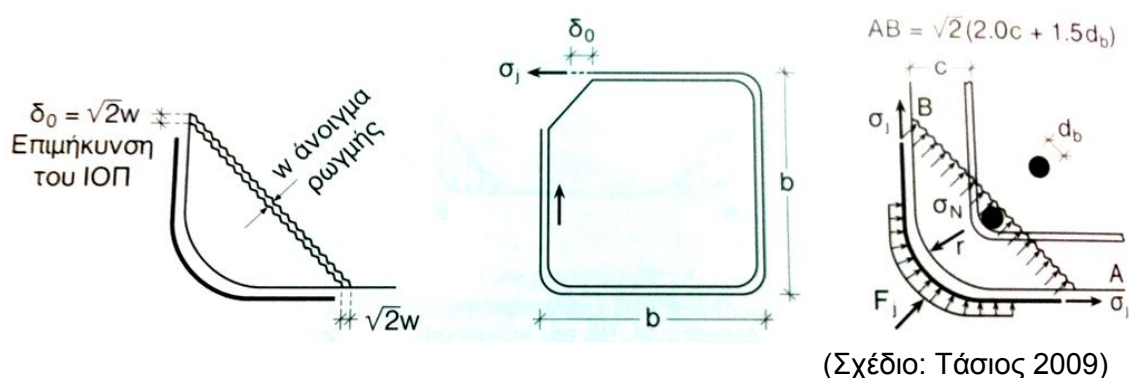
Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ §8.2.1.2 η εφαρμογή της περίσφιξης πρέπει να γίνεται σε ένα ύψος κατ' ελάχιστον όσο η κρίσιμη περιοχή και όχι λιγότερο από $1.3 \cdot l_s = 1.3 \cdot 24(cm) = 31.2cm$ (στη δυσμενέστερη περίπτωση εδώ) ή 60 cm. Το μήκος της κρίσιμης περιοχής είναι 60 cm. Άρα ο μανδύας θα κατασκευαστεί σε ένα μήκος τουλάχιστον 60 cm.

Από τα παραπάνω προκύπτουν δύο διαφορετικά πάχη μανδύων τα οποία πρόκειται να εξετασθούν α) $t_j=1mm$ και β) $t_j=5mm$. Το ύψος στο οποίο εφαρμόζονται οι μεταλλικοί μανδύες προέκυψε ίσο με 60mm. Κάθε μεταλλικός μανδύας ξεκινά 20mm επάνω από τη θέση πάκτωση του υποστυλώματος στη βάση του δοκιμίου. Στα υποστυλώματα της Σειράς δοκιμίων Ι που έχουν το ίδιο ανεπαρκές μήκος παράθεσης οπλισμών εφαρμόζονται μεταλλικοί μανδύες με διαφορετικό πάχος (Πίνακας Π.2.1α).

Σχόλιο:

Στους υπολογισμούς του απαιτούμενου πάχους χαλύβδινου μανδύα βάσει της σχέσεως $t_j = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{E_s \cdot f_{ctm}}{f_{sy}} \cdot w$ προκύπτει ότι για μικρότερο αποδεκτό εύρος ρωγμής w το πάχος του ελάσματος t_j προκύπτει μικρότερο. Η διαπίστωση αυτή ωστόσο ερμηνεύεται από το προσομοίωμα που συστήνει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ στη σχέση Σ6.14 του κεφαλαίου 6. Σύμφωνα με το προσομοίωμα αυτό μεταξύ δύο παρατιθέμενων σε ένα μήκος l_s ράβδων σχηματίζεται, μετά την υπέρβαση της αντοχής του δεσμού, ρωγή κατά μήκος της επαφής τους. Η αύξηση της ολισθήσεως s προκαλεί αύξηση και στο άνοιγμα της ρωγμής w σύμφωνα με τη σχέση $w = 0.6 \cdot s^{2/3}$.

Η επιμήκυνση του υλικού περίσφιγξης προκύπτει ίση με $\delta_0 = w \cdot \sqrt{2}$, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.



Για το μήκος αγκυρώσεως του υλικού της περίσφιγξης (π.χ ΙΟΠ) θα ισχύει ότι:

$$l_b \cdot f_b = t_j \cdot \sigma_j \rightarrow l_b = t_j \cdot \frac{\sigma_j}{f_{ctm}} \quad (a)$$

(όπου για την αντοχή συνάφειας θεωρήθηκε $l_b = f_{ctm}$)

Ισχύει ακόμα ότι:

$$\delta_0 = \int_0^{l_b} \varepsilon_j dx = \int_0^{l_b} \frac{\sigma_j}{E_j} dx = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_j}{E_j} \cdot l_b$$

και αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση το l_b προκύπτει ότι:

$$\delta_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_j^2}{E_j \cdot f_{ctm}} \cdot t_j$$

Δηλαδή η τάση που αναπτύσσεται στο υλικό περίσφιγξης είναι ίση με:

$$\sigma_j = \sqrt{2 \cdot E_j \cdot f_{ctm} \cdot \delta_0 / t_j} \rightarrow \sigma_j = \sqrt{2 \cdot E_j \cdot f_{ctm} \cdot w \cdot \sqrt{2} / t_j} \quad (1)$$

Περίσφιγξη με ΙΟΠ:

Στην περίπτωση που το υλικό περίσφιγξης είναι ΙΟΠ για την ακραία περίπτωση που το μήκος αγκύρωσης l_b προκύπτει ίσο με το μήκος της πλευράς του υποστυλώματος ($l_b = b$) η μέγιστη δυνατή τάση του ΙΟΠ θα είναι λόγω της (a):

$$\sigma_{j,lim} = \frac{b}{t_j} \cdot f_{ctm} \quad (b)$$

Περίσφιγξη με λεπτό χαλύβδινο μανδύα:

Στην περίπτωση του λεπτού χαλύβδινου μανδύα λόγω της μειωμένης αντοχής του χάλυβα σε σύγκριση με τα ΙΟΠ θα είναι

$$\sigma_{j,lim} = f'_{sy} \quad (c)$$

όπου f'_{sy} η τάση διαρροής του χαλύβδινου μανδύα (Τάσιος 2009).

Τόσο στην περίπτωση που το υλικό περίσφιγξης είναι ΙΟΠ όσο και στην περίπτωση που είναι λεπτός χαλύβδινος μανδύας η σχέση (1) θα δώσει για το απαιτούμενο πάχος υλικού περίσφιγξης:

$$\sigma_{j,lim} = \sqrt{2 \cdot E_j \cdot f_{ctm} \cdot w \cdot \sqrt{2}/t_j} \rightarrow t_j = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{E_j \cdot f_{ctm}}{\sigma_{j,lim}^2} \cdot w \quad (2)$$

Από τις σχέσεις (2) και (b) για την περίπτωση των ΙΟΠ προκύπτει:

$$\sigma_{j,lim} = \frac{b}{t_j} \cdot f_{ctm} = \sqrt{2 \cdot E_j \cdot f_{ctm} \cdot w \cdot \frac{\sqrt{2}}{t_j}} \rightarrow t_j = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{b^2 \cdot f_{ctm}}{w \cdot E_j}$$

ενώ για την περίπτωση των χαλύβδινων μανδυνών από τις σχέσεις (2) και (c):

$$t_j = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{E_j \cdot f_{ctm}}{\sigma_{j,lim}^2} \cdot w \rightarrow t_j = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{E_s \cdot f_{ctm}}{f_{sy}^2} \cdot w$$

Για το πάχος t_j που προκύπτει ο κρίσιμος έλεγχος που θα καθορίσει την επιτυχία της περίσφιγξης στην αποκατάσταση της ανεπαρκούς παράθεσης θα γίνεται μεταξύ των αναπτυσσόμενων τάσεων στις διαμήκεις ράβδους, σ_s , και την τάση διαρροής των ράβδων f_{sy} . Εφόσον προκύψει ότι $\sigma_s \geq f_{sy}$ η περίσφιγξη θα έχει επιτύχει την αποκατάσταση της παράθεσης των ράβδων.

Η εφαρμογή της περίσφιγξης στο στύλο των δοκιμών μέσω των λεπτών συγκολλημένων χαλύβδινων μανδυνών πραγματοποιήθηκε από εξειδικευμένο συνεργείο μετά την κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας των υποστυλωμάτων. Αρχικά η λεία επιφάνεια των στύλων εκτραχύνθηκε με τη χρήση τροχού (Σχ.7α) ώστε να προκύψουν ευνοϊκές συνθήκες πρόσφυσης της εποξειδικής ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή του μανδύα επί των υποστυλωμάτων. Οι γωνίες των στύλων καμπυλώθηκαν στο ύψος εφαρμογής των μανδυνών με ακτίνα ίση με δυόμισο φορές το πάχος επικάλυψης ($r=2,5c$) (Τάσιος 2009) (Σχ.7α, β). Με την καμπύλωση των άκρων του στύλου οι γωνιακές ράβδοι περισφίγγονται καλύτερα.

Στη συνέχεια, μετά τον καθαρισμό της επιφάνειας με αέρα έγινε επάλειψη της εποξειδικής ρητίνης Sikadur 30 και εφαρμόστηκαν στο στύλο κάθε δοκιμίου οι χαλύβδινοι μανδύες (Σχ.γ-στ). Κάθε μανδύας αποτελούνταν από δύο χαλύβδινα ελάσματα μορφής Π, τα οποία μετά την τοποθέτησή τους στο υποστύλωμα συσφίχθηκαν μεταξύ τους με σφιγκτήρες, ώστε να εφαρμόσουν πλήρως σ' αυτό. Οι γωνίες των μεταλλικών ελασμάτων σχήματος Π καμπυλώθηκαν με τη βοήθεια στράντζας με ακτίνα $r=2,5c$ ώστε να εφαρμόζουν πλήρως στις καμπυλωμένες ακμές του στύλου. Το υλικό με το οποίο είχε επαλειφθεί η επιφάνεια ανάμεσα στο στύλο και το μεταλλικό μανδύα κάλυψε όλη τη διεπιφάνεια και εξήλθε από τα άνω και κάτω άκρα του μανδύα (Σχ.7δ, ε) σύμφωνα με τα προβλεπόμενα από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ §8,2,1,2α. Μετά την πάροδο επτά ημερών -εντός των οποίων η ρητίνη λαμβάνει το μέγιστο σχεδόν της αντοχής της- πραγματοποιήθηκε ηλεκτροσυγκόλληση των δύο σκελών κάθε μανδύα μεταξύ τους με δύο τμήματα από ίσου πάχους λαμαρίνα (Σχ.7στ). Τα δύο σκέλη μορφής Π κάθε μανδύα τοποθετήθηκαν με τρόπο ώστε οι συγκολλήσεις μεταξύ τους να πραγματοποιούνται στη διεύθυνση την κάθετη στη διεύθυνση επιβολής του πλευρικού σεισμικού φορτίου.



(α)



(β)



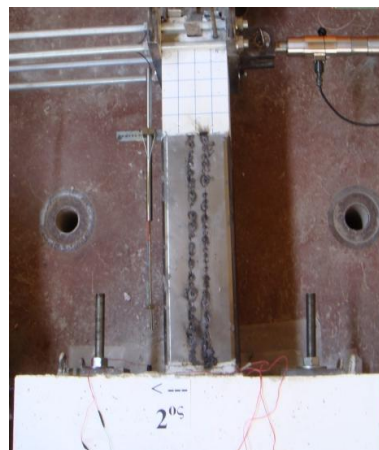
(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

Σχ.7 : (α), (β): εκτράχυνση της επιφάνειας του στύλου, στρογγύλευση γωνιών, (γ): μεταλλικός μανδύας, (δ): επάλειψη της επιφάνειας του στύλου με ρητίνη και εφαρμογή μεταλλικού μανδύα, (ε): πλήρωση του τμήματος ανάμεσα στο στύλο και το μανδύα με συνδετικό υλικό, (στ): συγκόλληση σκελών χαλύβδινου μανδύα

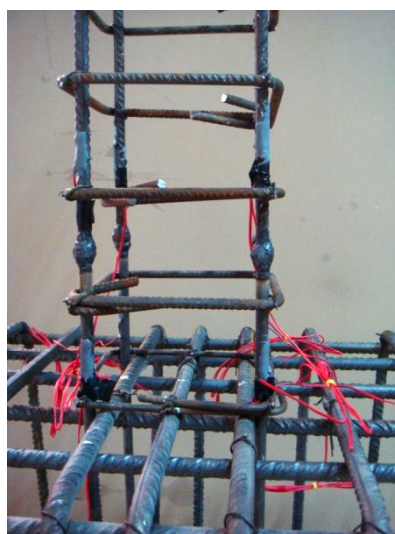
2.5.2 Σειρά Δοκιμών II

Για την πραγματοποίηση των ηλεκτροσυγκολλήσεων μεταξύ των λείων χαλύβων των αναμονών και των νευροχαλύβων των υποστυλωμάτων στα δοκίμια της Σειράς II ελέγχθηκε και εξακριβώθηκε πειραματικά από εξειδικευμένο Εργαστήριο η συγκολλησιμότητα του λείου χάλυβα. Τρία δοκίμια μήκους 600mm στάλθηκαν στην Ε.Β.Ε.Τ.Α.Μ. ώστε να γίνουν οι απαραίτητες χημικές αναλύσεις σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων (Κ.Τ.Χ.). Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι ο λείος χάλυβας είναι συγκολλησιμος. Στα τρία από τα τέσσερα δοκίμια της ομάδας υποστυλωμάτων της Σειράς II πραγματοποιήθηκαν συγκολλήσεις ενώ σε ένα η αγκύρωση των διαμήκων ράβδων του υποστυλώματος έγινε με τη βοήθεια μηχανικών μέσων (αρμοκλείδες). Στο δοκίμιο W_1 έγινε συγκόλληση κατά παράθεση των ματιζομένων ράβδων του υποστυλώματος, στο W_2 κατά μέτωπο και στο W_3 κατά λωρίδες. Όλες οι συγκολλήσεις έγιναν βάσει των διατάξεων του σχετικού εδαφίου στον Κ.Τ.Χ. Μετά την πραγματοποίηση των ηλεκτροσυγκολλήσεων και την τοποθέτηση του εγκάρσιου οπλισμού του στύλου τα δοκίμια σκυροδετήθηκαν με σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25. Για τους συνδετήρες χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι ποιότητας B500C και διαμέτρου $\Phi 8\text{mm}$ ανά 80mm εντός κρίσιμης περιοχής και $\Phi 8\text{mm}$ ανά 120mm εκτός αυτής, όπως προέκυψε ότι απαιτείται βάσει Ε.Κ.Ο.Σ. 2000. Στο δοκίμιο M_1 χρησιμοποιήθηκαν ειδικές μεταλλικές αρμοκλείδες προκειμένου να μελετηθεί η αποτελεσματικότητά τους στη βελτίωση του μηχανισμού μεταφοράς δυνάμεων στις περιπτώσεις πολύ κοντών αναμονών. Αρχικά διαμορφώθηκαν εσοχές βάθους 1mm στις ράβδους που συνδέονται μέσω των αρμοκλειδών, προσαρμόστηκαν οι ράβδοι οπλισμού στις αρμοκλείδες και συσφίχθηκαν οι κοχλίες των αρμοκλειδών επάνω στις ράβδους. Όλοι οι τύποι συγκολλήσεων που εφαρμόστηκαν καθώς και η μηχανική αγκύρωση των ράβδων εξετάστηκαν

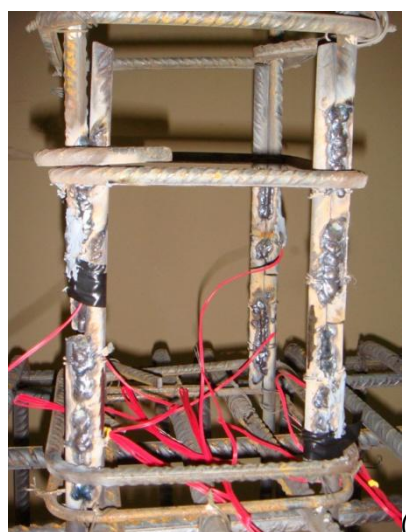
πειραματικά με τα αντίστοιχα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δοκιμές εφελκυσμού στο Εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών του Α.Π.Θ.



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχ.8 : Αποκατάσταση συνέχειας οπλισμού μέσω συγκόλλησης σύμφωνα με Κ.Τ.Χ (α): κατά Παράθεση – δοκίμιο W_1 , (β): κατά μέτωπο - δοκίμιο W_2 , (γ): κατά λωρίδες - δοκίμιο W_3 , (δ): Αποκατάσταση συνέχειας οπλισμού με αρμοκλείδες - δοκίμιο M_1

2.5.3 Σειρά Δοκιμών III

Για το σχεδιασμό των επεμβάσεων στα δοκίμια στύλων της Σειράς III χρησιμοποιήθηκε η Σχέση 8.3 του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Με τη σχέση αυτή υπολογίζεται ο απαιτούμενος εξωτερικός οπλισμός περίσφιγξης που στην περίπτωση κατασκευής μανδύα Ο/Σ το ρόλο του λαμβάνουν οι συνδετήρες του μανδύα. Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ η συμμετοχή των συνδετήρων του υφιστάμενου υποστυλώματος στην περίσφιγξη αγνοείται εφόσον αυτοί δεν είναι πυκνοί και καλά αγκυρωμένοι.

- ΕΥΡΕΣΗ ΤΟΥ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗΣ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΣΧΕΣΕΩΣ

8.3 ΤΟΥ ΚΑΝ.ΕΠΕ:

Αρχικά υποστυλώματα:

Σκυρόδεμα C8/10, Χάλυβας S220, Μήκος Παράθεσης α) $l_s=20 \cdot d_b$ και β) $l_s=24 \cdot d_b$

Διαμήκεις ράβδοι υποστυλώματος Ø10, Συνδετήρες Φ6/200

Μανδύας Ο/Σ:

Σκυρόδεμα ΕΜΑCO S66, χάλυβας B500c, διαμήκης οπλισμός 4Φ10, συνδετήρες

Φ8, συνολικό πάχος μανδύα: 6.5 cm

Στη σχέση 8.3 του ΚΑΝ.ΕΠΕ είναι:

$$\frac{A_j}{s} = t_j = \gamma_{Rd} \frac{(1-\lambda_s)}{\beta} \frac{1}{\mu} \frac{f_{yk}}{\sigma_{jd}} \frac{A_b}{l_s}$$

$\gamma_{Rd} = 1,5$ βάσει του ΚΑΝ.ΕΠΕ

$\lambda_s = 0$ βάσει του ΚΑΝ.ΕΠΕ

$\mu = 1$ μπορεί να ληφθεί αδρομερώς ελλείψει άλλων στοιχείων

$f_{yk} = 500 \text{ MPa}$

$\sigma_{jd} = E \cdot \epsilon_{jd}$

Η τιμή της επιστρατευόμενης αξονικής τάσης σχεδιασμού $\sigma_{jd} = E \cdot \epsilon_{jd}$ δεν μπορεί να υπερβαίνει την τιμή $\sigma_{jd,max}$ που για οπλισμό περίσφιγξης που αποτελείται από χαλύβδινους συνδετήρες ποιότητας B500c είναι: $\sigma_{jd,max} = f_{yd} = 500/1,5 = 435 \text{ MPa}$.

Είναι: $\sigma_{jd} = E \cdot \epsilon_{jd}$

όπου σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ §8.2.1.2.β είναι: $\epsilon_{jd} = w(\sqrt{2})/b_{μέσο}$ και $w = 0.6 \cdot \delta^{2/3}$

όπου $\delta = 1,5$ (ΚΑΝ.ΕΠΕ για στάθμη επιτελεστικότητας Γ)

άρα: $w = 0.6 \cdot 1.5^{2/3} = 0.786$, $\epsilon_{jd} = 0.786 \cdot (\sqrt{2})/200 = 5.56 \cdot 10^{-3}$

οπότε: $\sigma_{jd} = E \cdot \epsilon_{jd} = 200000(\text{MPa}) \cdot 5.56 \cdot 10^{-3} = 1112 \text{ MPa} > f_{sy}$

Επομένως σε αυτήν την περίπτωση η επιστρατευόμενη αξονική τάση σχεδιασμού σ_{jd} θα είναι ίση με τη μέγιστη δυνατή, ήτοι $\sigma_{jd} = \sigma_{jd,max} = f_{yd} = 435 \text{ MPa}$.

Ακόμα:

$A_b = \pi \cdot d_b^2/4 = \pi \cdot 10^2/4 = 78,6 \text{ mm}^2$ για τη διάμετρο μίας ματιζόμενης ράβδου Ø10

Μήκος παράθεσης ράβδων:

α) $l_s = 20 \cdot d_b = 20 \cdot 10 = 200 \text{ mm}$

β) $l_s = 24 \cdot d_b = 24 \cdot 10 = 240 \text{ mm}$

$\beta = 1$ για $c/d_s < 2$ με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ

Στο μανδύα Ο/Σ την περίσφιγξη που βελτιώνει την κατάσταση στη θέση των ανεπαρκών παραθέσεων προσφέρουν οι συνδετήρες του μανδύα. Για τους συνδετήρες του μανδύα Ο/Σ είναι:

$A_j = \pi \cdot d_j/4$ όπου d_j η διάμετρος των συνδετήρων

Οπότε:

$$A_j/s = \gamma_{Rd} \cdot [(1-\lambda_s)/\beta] \cdot (1/\mu) \cdot (f_{yk}/\sigma_{jd}) \cdot (A_b/l_s) \rightarrow$$

$$A_j/s = 1.5 \cdot [500(\text{MPa})/435(\text{MPa})] \cdot [78.5(\text{mm})/l_s(\text{mm})] \rightarrow$$

α) Για $I_s = 20 \cdot d_b = 20 \cdot 10 = 200 \text{ mm}$

$$A_i/s = 1.5 \cdot (500/435) \cdot (78.5/200) = 0.68 \text{ mm} \quad (1)$$

και

β) Για $I_s = 24 \cdot d_b = 24 \cdot 10 = 240 \text{ mm}$

$$A_i/s = 1.5 \cdot (500/435) \cdot (78.5/240) = 0.56 \text{ mm} \quad (2)$$

Εφόσον χρησιμοποιηθούν συνδετήρες Φ8 είναι:

$$A_j = \pi \cdot 8^2 / 4 = 50.2 \text{ mm}^2 \text{ οπότε}$$

$$(1): s = 50.2 / 0.68 = 73.8 \text{ mm}$$

$$(2): s = 50.2 / 0.56 = 89.6 \text{ mm}$$

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ §8.2.1.2 όταν χρησιμοποιούνται για την περίσφιξη ανεπαρκών παραθέσεων συνδετήρες ή κολλάρα οι αποστάσεις s δεν πρέπει να ξεπερνούν το $0.3 \cdot d$. Δηλαδή $0.3 \cdot 17(\text{cm}) = 5.1 \text{ cm}$. Επίσης η εφαρμογή της περίσφιξης πρέπει να γίνεται σε ένα ύψος κατ' ελάχιστον όσο η κρίσιμη περιοχή και όχι λιγότερο από $1.3 \cdot I_s = 1.3 \cdot 24(\text{cm}) = 31.2 \text{ cm}$ (στη δυσμενέστερη περίπτωση εδώ) ή 60 cm . Το μήκος της κρίσιμης περιοχής είναι 60 cm . Άρα ο μανδύας θα κατασκευαστεί σε ένα μήκος τουλάχιστον 60 cm . Επιπλέον θα πρέπει να γίνουν έλεγχοι ώστε να αποφευχθούν α) ο σχηματισμός πλαστικής άρθρωσης ακριβώς πάνω από το πέρας του μανδύα και β) η πρόωρη αστοχία σε διάτμηση του απερίσφικτου τμήματος του υποστυλίου.

Τελικά επιλέγονται συνδετήρες Φ8/50 mm ως απαιτούμενος οπλισμός εξωτερικής περίσφιξης για τη θεραπεία των ανεπαρκώς παρατιθέμενων ράβδων οπλισμού των υποστυλίων.

- ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΑΝΔΥΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΑΠΟ Ο/Σ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΡΩΣΑΣ ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ:

Η τέμνουσα δύναμη V_{sd} με την οποία σχεδιάζεται ο μανδύας μπορεί να υπολογιστεί από τη ροπή που αναπτύσσεται στη βάση του υποστυλίου-προβόλου μήκους l σύμφωνα με την εξίσωση $M = V \cdot l \rightarrow V = M/l$. Αν θεωρήσουμε ότι όλοι οι διαμήκεις οπλισμοί φθάνουν στη διαρροή τους τότε η ροπή M γίνεται ίση με την ροπή αντοχής M_R του ενισχυμένου υποστυλίου.

Για τον υπολογισμό της M_R και κατόπιν της V_{sd} γίνονται οι εξής παραδοχές:

- α) Θεωρείται ότι η σύνθετη διατομή του ενισχυμένου υποστυλίου έχει αντοχή που προκύπτει λαμβάνοντας υπόψιν τις αντοχές τόσο του υφιστάμενου, παλαιού υποστυλίου (ποιότητας σκυροδέματος C8), όσο και του μανδύα (ποιότητας σκυροδέματος S66). Για τον υπολογισμό της αντοχής της σύνθετης διατομής επομένως θα είναι:

$$\frac{A_{s,Y\Phi} \cdot f_{ck,Y\Phi} + A_{s,M} \cdot f_{ck,M}}{A_{s,Y\Phi} + A_{s,M}} = f'_{ck}$$

Όπου:

$A_{s,Y\Phi} = 200(mm) \cdot 200(mm) = 40000 \text{ mm}^2$ το εμβαδό του υφιστάμενου, παλαιού υποστυλώματος

$f_{ck,Y\Phi} = 8 \text{ MPa}$ η θλιπτική αντοχή του υφιστάμενου, παλαιού υποστυλώματος

$A_{s,M} = 300(mm) \cdot 300(mm) - 200(mm) \cdot 200(mm) = 50000 \text{ mm}^2$ το εμβαδό του μανδύα του υποστυλώματος

$f_{ck,M} = 60 \text{ MPa}$ η θλιπτική αντοχή του μανδύα του υποστυλώματος

οπότε:

$$f'_{ck} = \frac{40000 \cdot 8 + 50000 \cdot 60}{40000 + 50000} = 36,88 \text{ MPa}$$

- b) Οι διαμήκεις οπλισμοί του παλαιού υποστυλώματος (4Φ10) είναι ποιότητας χάλυβα S220 ενώ οι διαμήκεις οπλισμοί του μανδύα ενίσχυσης είναι 4Φ10 ποιότητας B500C. Παρόλο που υπολογίστηκε νωρίτερα οπλισμός περισφιξης (συνδετήρες) για την αντιμετώπιση της ανεπαρκούς παράθεσης των διαμήκων ράβδων του παλαιού υποστυλώματος, οι τελευταίοι -λόγω της χαμηλής αντοχής τους σε σχέση με τους διαμήκεις οπλισμούς του μανδύα- είτε θα πρέπει να αγνοηθούν τελείως κατά τον υπολογισμό της σύνθετης διατομής (προς την πλευρά της ασφάλειας), είτε -εφόσον ληφθούν υπόψιν στους υπολογισμούς- να εκληφθούν ως ράβδοι μικρότερης διαμέτρου (από την αρχική τους διάμετρο Φ10) αλλά ποιότητας B500C, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί διάγραμμα αλληλεπίδρασης. Επιλέγεται να αγνοηθούν οι υφιστάμενοι οπλισμοί.

Για αξονικό φορτίο υποστυλώματος $N_{sd} = 150 \text{ kN}$ είναι:

$$v = \frac{N_{sd}}{b \cdot h \cdot f_{cd}} = - \frac{150}{0,3 \cdot 0,3 \cdot \frac{36,88 \cdot 10^3}{1,5}} = -0,067 > -0,1$$

Αν δεν ληφθούν υπόψη οι διαμήκεις οπλισμοί του παλαιού υποστυλώματος, τότε στη σύνθετη διατομή του ενισχυμένου στύλου θα υπάρχουν μόνον οι διαμήκεις ράβδοι του μανδύα δηλαδή 4Φ10 B500C ($A_{s,tot} = 3,14 \text{ cm}^2$). Οπότε:

$$\omega_{tot} = \left(\frac{A_{s,tot}}{b \cdot h} \right) \cdot \left(\frac{f_{yd}}{f_{cd}} \right) = \frac{3,14}{30 \cdot 30} \cdot \frac{500/1,15}{36,88/1,5} = 0,062$$

Επομένως για:

$$v = -0,067 \quad \left| \quad \omega_{tot} = 0,062 \right| \rightarrow \mu = 0,1 \quad (\text{από διάγραμμα αλληλεπίδρασης για B500C και } d_1/h=0,05)$$

Άρα:

$$\mu = \frac{M_R}{b \cdot h^2 \cdot f'_{cd}} \rightarrow M_R = 0,1 \cdot 0,3 \cdot 0,3^2 \cdot 36,88 \cdot 10^3 \rightarrow M_R = 99,58 \text{ kNm}.$$

Οπότε για την τέμνουσα σχεδιασμού του υποστυλώματος θα ισχύει:

$$V_{sd} = \frac{99,58}{0,95} \rightarrow V_{sd} = 104,8 \text{ kN}.$$

ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΔΙΑΓΩΝΙΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k(1.2 + 40 \cdot \rho_l) + 0.15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d$$

όπου:

$$\tau_{Rd} = 0.25 \cdot f_{ctd} = 0.25 \cdot \frac{f_{ctk0.05}}{1.5} = 0.39$$

$$f_{ctm} = 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 0.3 \cdot 36.88^{2/3} = 3.32 \quad \text{και} \quad f_{ctk0.05} = 0.7 \cdot f_{ctm} = 2.324$$

$$k = 1.6 - d = 1.6 - 0.27 = 1.33 > 1$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{b \cdot d} = \frac{150}{0.3 \cdot 0.3} = 1666.67$$

$$\rho_l = (A_s/2)/(b_w \cdot d) = (3.14/2)/(30 \cdot 27) = 1.94 \cdot 10^{-3}$$

Οπότε:

$$V_{Rd1} = [0.39 \cdot 1.33 \cdot 10^3 \cdot (1.2 + 40 \cdot 1.94 \cdot 10^{-3}) + 0.15 \cdot 1666.67] \cdot 0.3 \cdot 0.27 \rightarrow$$

$$V_{Rd1} = 73.93 \text{ kN}$$

Όμως $v = -0.067$ και άρα θα είναι $V_{cd} = 0.3 \cdot V_{Rd1} = 0.3 \cdot 73.93 \rightarrow V_{cd} = 22.18 \text{ kN}$ (εντός κρίσιμης περιοχής).

ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΛΟΞΗ ΘΛΙΨΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΟΡΜΟΥ

Ο έλεγχος γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$V_{Rd2} = \frac{1}{2} \cdot v \cdot f'_{cd} \cdot b_w \cdot z$$

Και πρέπει:

$$V_{sd} < V_{Rd2}$$

Είναι:

$$z = 0.9 \cdot d = 0.9 \cdot 0.27 = 0.243 \text{ m}$$

$$b_w = 0.3 \text{ m}$$

$$f'_{cd} = 36.88/1.5 \text{ MPa}$$

$$v = 0.70 - \frac{f'_{ck}}{200} = 0.70 - \frac{36.88}{200} = 0.516 > 0.5 \quad \text{άρα} \quad v = 0.516$$

Οπότε:

$$V_{Rd2} = \frac{1}{2} \cdot 0.516 \cdot \left(\frac{36.88 \cdot 10^3}{1.5} \right) \cdot 0.30 \cdot 0.9 \cdot 0.27 \rightarrow V_{Rd2} = 462.43 \text{ kN} > V_{sd} = 104.8 \text{ kN}$$

ΤΕΜΝΟΥΣΑ ΑΝΤΟΧΗΣ ΛΟΓΩ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Ο έλεγχος γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$V_{wd} = (A_{sw}/s) \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{ywd}$$

Και πρέπει:

$$V_{sd} < V_{Rd3} = V_{wd} + V_{cd}$$

Ελέγχεται η ενδεχόμενη επάρκεια των ελάχιστων εντός κρίσιμης περιοχής στύλου κατά ΕΚΩΣ 2000 συνδετήρων (Φ8/80 mm). Θα είναι:

$$V_{wd} = \frac{2 \cdot 0.5 \cdot 100(mm^2)}{80(mm)} \cdot 0.9 \cdot 270(mm) \cdot (500/1.15) \cdot \left(\frac{N}{mm^2}\right) \rightarrow V_{wd} = 132.07 \text{ kN}$$

και

$$V_{Rd3} = V_{wd} + V_{cd} = 132.07 + 22.18 \rightarrow V_{Rd3} = 154.25 \text{ kN} > V_{sd} = 104.8 \text{ kN}$$

Επομένως στο μανδύα εντός κρίσιμης περιοχής του υποστύλωματος τοποθετούνται οι ελάχιστοι συνδετήρες Φ8/80mm B500C οι οποίοι και επαρκούν για την διάτμηση.

Οι συνδετήρες Φ8/50mm που είχαν προκύψει νωρίτερα ότι απαιτούνται προκειμένου να περισφιχθεί το υποστύλωμα λόγω ανεπαρκούς μήκους παράθεσης δεν συμπεριλαμβάνονται στους ανωτέρω οπλισμούς, οι οποίοι τοποθετούνται ανεξάρτητα και με στόχο την εξασφάλιση του ενισχυμένου υποστύλωματος έναντι διάτμησης. Ο απαιτούμενος εγκάρσιος οπλισμός για τη θεραπεία των ανεπαρκών παραθέσεων τοποθετείται εσωτερικά του μανδύα Ο/Σ και σε επαφή με τον υφιστάμενο στύλο μετά την απομάκρυνση της επικάλυψης των οπλισμών του.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΙΣΩΣΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΓΙΑ ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΕΝΑΝΤΙ ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ ΚΑΤΑ ΚΑΝ.ΕΠΕ

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ §8.2.2 στην περίπτωση ενίσχυσης υφιστάμενου υποστύλωματος με $V_{sd} > V_{Rd2}$ με μανδύα Ο/Σ ελέγχεται η ανίσωση ασφαλείας:

$$V_{sd} \leq \left(\frac{1}{\gamma_{Rd}}\right) \cdot (V_{Rd,r} + V_{R,M}) \quad \text{Σχέση (8.11) ΚΑΝ.ΕΠΕ}$$

Όπου:

$V_{Rd,r}$ και $V_{R,M}$ οι αντιστάσεις σε τέμνουσα V_{Rd2} του αρχικού και του ενισχυμένου υποστύλωματος αντίστοιχα και $\gamma_{Rd}=1.25$.

Υπολογισμός $V_{Rd,r}$:

Αρχικό υποστύλωμα (κατηγορία σκυροδέματος C8)

$$z = 0.9 \cdot d = 0.9 \cdot 0.17 = 0.153 \text{ m}$$

$$b_w = 0.2 \text{ m}$$

$$f_{cd} = 8/1.5 \text{ MPa}$$

$$v = 0.70 - \frac{f'_{ck}}{200} = 0.70 - \frac{8}{200} = 0.66 > 0.5 \quad \text{άρα } v = 0.66$$

Οπότε:

$$V_{Rd2} = \frac{1}{2} \cdot 0.66 \cdot \left(\frac{8 \cdot 10^3}{1.5} \right) \cdot 0.20 \cdot 0.9 \cdot 0.17 \rightarrow V_{Rd2} = V_{Rd,r} = 53.86 \text{ kN}$$

Υπολογισμός $V_{R,M}$:

Για τον μανδύα χρησιμοποιείται EMACO S66 ($f_{ck}=60 \text{ MPa}$).

Λόγω της μορφής του εμβαδού διατομής του μανδύα για τον υπολογισμό της V_{Rd2} θα υπολογιστεί η V_{Rd2} για διαστάσεις μανδύα 20x20 cm και θα αφαιρεθεί από την V_{Rd2} για διαστάσεις μανδύα 30x30 cm. Δηλαδή θα είναι:

$$V_{R,M} = V_{Rd2,M(30x30)} - V_{Rd2,M(20x20)}$$

Επομένως:

Για διαστάσεις 20x20 cm:

$$z = 0.9 \cdot d = 0.9 \cdot 0.17 = 0.153 \text{ m}$$

$$b_w = 0.2 \text{ m}$$

$$f_{cd} = 60/1.5 \text{ MPa}$$

$$v = 0.70 - \frac{f'_{ck}}{200} = 0.70 - \frac{60}{200} = 0.4 < 0.5 \quad \text{άρα } v = 0.5$$

Οπότε:

$$V_{Rd2,M(20x20)} = \frac{1}{2} \cdot 0.5 \cdot \left(\frac{60 \cdot 10^3}{1.5} \right) \cdot 0.20 \cdot 0.9 \cdot 0.17 \rightarrow V_{Rd2,M(20x20)} = 306 \text{ kN}$$

και

Για διαστάσεις 30x30 cm:

$$z = 0.9 \cdot d = 0.9 \cdot 0.27 = 0.243 \text{ m}$$

$$b_w = 0.3 \text{ m}$$

$$f_{cd} = 60/1.5 \text{ MPa}$$

$$v = 0.70 - \frac{f'_{ck}}{200} = 0.70 - \frac{60}{200} = 0.4 < 0.5 \quad \text{άρα } v = 0.5$$

Οπότε:

$$V_{Rd2,M(30x30)} = \frac{1}{2} \cdot 0.5 \cdot \left(\frac{60 \cdot 10^3}{1.5} \right) \cdot 0.30 \cdot 0.9 \cdot 0.27 \rightarrow V_{Rd2,M(30x30)} = 729 \text{ kN}$$

Άρα:

$$V_{R,M} = V_{Rd2,M(30x30)} - V_{Rd2,M(20x20)} = 729 - 306 \rightarrow V_{R,M} = 423 \text{ kN}$$

Συνεπώς ο έλεγχος ασφαλείας κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ δίνει:

$$\left(\frac{1}{\gamma_{Rd}}\right) \cdot (V_{Rd,r} + V_{R,M}) = \left(\frac{1}{1.25}\right) \cdot (53.86 + 423) = 476.86 \text{ kN} > V_{sd} = 104.8 \text{ kN}$$

Ο έλεγχος ικανοποιείται.

Σχόλιο: Τα ανωτέρω αποτελέσματα οφείλονται τόσο στην πυκνή διάταξη των συνδετήρων (Φ8/80mm), όσο και στην πολύ υψηλή αντοχής του σκυροδέματος μανδύα. Η τέμνουσα που επιλέχθηκε για τον σχεδιασμό του νέου υποστυλώματος σε διάτμηση προέκυψε από τη ροπή αντοχής του ενισχυμένου στύλου, επιλογή μάλλον συντηρητική που εξασφαλίζει όμως το υποστύλωμα έναντι διάτμησης σε έναν ισχυρό σεισμό.

Οι επεμβάσεις στα δοκίμια της Σειράς III για τη θεραπεία των ανεπαρκώς παρατιθέμενων ράβδων έλαβε χώρα τουλάχιστον 28 ημέρες μετά τη σκυροδέτηση των δοκιμών. Για την κατασκευή των μανδύων Ο/Σ γύρω από τους στύλους αφαιρέθηκε αρχικά η επικάλυψη των οπλισμών των δοκιμών με τη βοήθεια κομπρεσέρ (Σχ.9α). Μετά την αποκάλυψη των οπλισμών σε δύο από τα πέντε αρχικά δοκίμια της Σειράς III, στο ένα εκ των δύο δοκιμών L_1 και στο ένα εκ των δύο δοκιμών L_2 με διαφορετικό μήκος παραθέσεων των διαμήκων ράβδων τους, τοποθετήθηκαν εν επαφή με το κάθε υποστύλωμα οι συνδετήρες Φ8/50mm σε ύψος 600mm που προέκυψε ότι απαιτούνται για τη θεραπεία των ανεπαρκών παραθέσεων. Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν οι μανδύες των δύο δοκιμών με τρόπο που περιγράφεται παρακάτω και προέκυψαν τα δοκίμια RHL_1 και RHL_2 (Σχ.9γ). Στα άλλα δύο δοκίμια με διαφορετικό μήκος ματισμάτων, L_1 και L_2 , έγινε συγκόλληση των παρατιθέμενων ράβδων διαμήκους οπλισμού των υποστυλωμάτων τους και κατόπιν κατασκευάστηκε ο μανδύας Ο/Σ (Σχ.9δ). Τα δοκίμια που προέκυψαν ονομάστηκαν RWL_1 και RWL_2 . Το δοκίμιο - στόχος C_2 της Σειράς δοκιμών III μετά την κατασκευή μανδύα γύρω από το υποστύλωμα ονομάστηκε RC_2 . Για την κατασκευή των μανδύων Ο/Σ ανοίχθηκαν με τη βοήθεια τρυπανιού τέσσερις οπές στη βάση κάθε δοκιμίου σε συγκεκριμένες θέσεις κοντά στους διαμήκεις οπλισμούς των υφιστάμενων στύλων. Οι διάμετρος των οπών αυτών ήταν Φ12mm, δηλαδή μεγαλύτερη από τη διάμετρο των ράβδων Φ10mm που αγκυρώθηκαν εντός αυτών για να αποτελέσουν τους διαμήκεις οπλισμούς του μανδύα. Η αγκύρωση των ράβδων επετεύχθη με τη χρήση ιδιαίτερα ρευστής εποξειδικής ρητίνης Isomat Epomax L-10 που εγχύθηκε με σύριγγα εντός των οπών μετά τον καθαρισμό τους με αναρρόφηση και την τοποθέτηση των ράβδων (Σχ.9β). Μετά την ολοκλήρωση της αγκύρωσης των διαμήκων ράβδων του μανδύα τοποθετήθηκαν οι συνδετήρες του μανδύα ενίσχυσης και καθαρίστηκε κάθε στύλος με αέρα υπό πίεση. Τέλος, μετά την τοποθέτηση ταινιών για τη μέτρηση των παραμορφώσεων των οπλισμών του μανδύα τα υποστυλώματα καλουπώθηκαν και πραγματοποιήθηκε η σκυροδέτησή τους με EMACO S66.



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχ.9 : (α): αφαίρεση σκυροδέματος επικάλυψης οπλισμών, (β): έγχυση ρευστής ρητίνης στις οπές για την αγκύρωση των διαμήκων ράβδων του μανδύα Ο/Σ των δοκιμίων, (γ): οπλισμοί δοκιμίων RHL_{1,2}, (δ): οπλισμοί δοκιμίων RWL_{1,2}, (ε): λεπτομέρεια συγκολλημένων παρατιθέμενων ράβδων του ενισχυμένου δοκιμίου RWL₁

2.6 Διάταξη Επιβολής Σεισμικής Φόρτισης - Όργανα Μέτρησης

Τα δοκίμια υποστυλμάτων υποβλήθηκαν σε σεισμικού τύπου καταπόνηση με τη βοήθεια διάταξης φόρτισης που είναι εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας του Α.Π.Θ. Με τη βοήθεια ντιζών που διέρχονταν διαμέσου της ενισχυμένης βάσης του υποστυλώματος και τμήματος του πλαισίου αντίδρασης τα δοκίμια πακτώνονταν στη διάταξη επιβολής της σεισμικής φόρτισης (Σχ.10, Σχ.11). Το έμβολο διπλής ενέργειας δυναμικότητας 1000kN σε σύνθλιψη και 600 kN σε εφελκυσμό με το οποίο επιβλήθηκε στα δοκίμια η πλευρική σεισμική φόρτιση προσδέθηκε στην κεφαλή κάθε στύλου μέσω ειδικών μεταλλικών τεμαχίων. Επίσης στα υποστυλώματα όλων των δοκιμών εφαρμόστηκε σταθερό αξονικό φορτίο 150kN με τη βοήθεια υδραυλικού γρύλου δυναμικότητας 300kN.

Η επιλογή του αξονικού φορτίου έγινε δεδομένου του στόχου να προσομοιωθούν στο παρόν ερευνητικό πρόγραμμα παλαιές κατασκευές (προ του ΒΔ 18-2-54) και κατασκευές που έγιναν με το ΒΔ 18-2-54 και μερικώς και με τα πρόσθετα άρθρα του 1985, ώστε η τιμή του ανηγμένου αξονικού φορτίου v_d να πλησιάζει ή να βρίσκεται στα επίπεδα του v_d των υποστυλμάτων των κατασκευών αυτών.

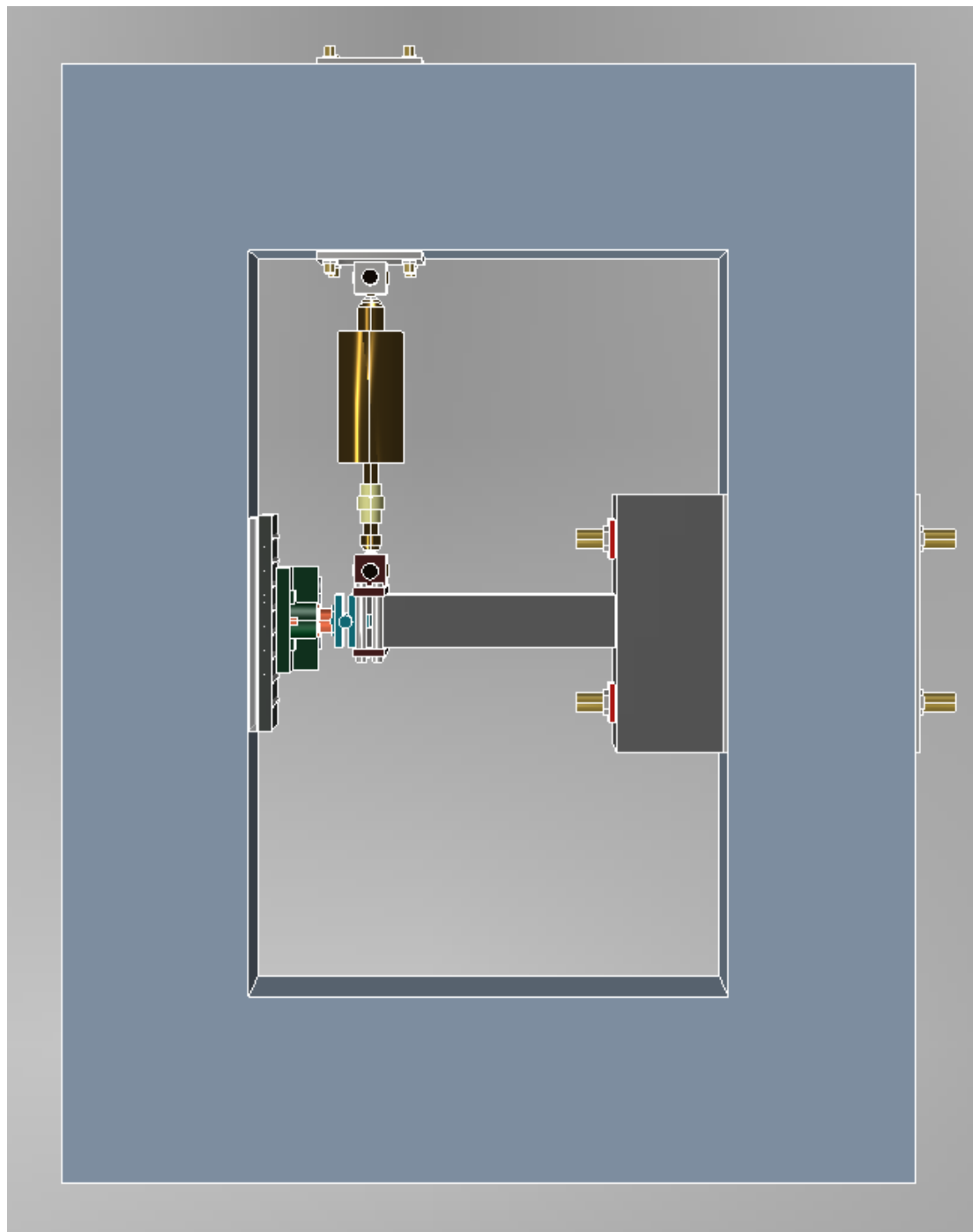
Το φορτίο των 150kN που χρησιμοποιήθηκε είναι τέτοιο ώστε για την τιμή v_d είναι $v_d=0.7>0.65$, που σημαίνει ο στύλος δεν παρουσιάζει επαρκή πλαστιμότητα, όπως δηλαδή συμβαίνει σε υποστυλώματα παλαιών κατασκευών.

$$v_d = N_{sd} / (A_g \cdot f_{cd}) \rightarrow v_d = (150 \text{ kN}) / [(0,2 \text{ m}) \cdot (0,2 \text{ m}) \cdot \left(\frac{8000 \text{ kN}}{1,5 \text{ m}^2} \right)] \rightarrow v_d = 0,7 > 0,65$$

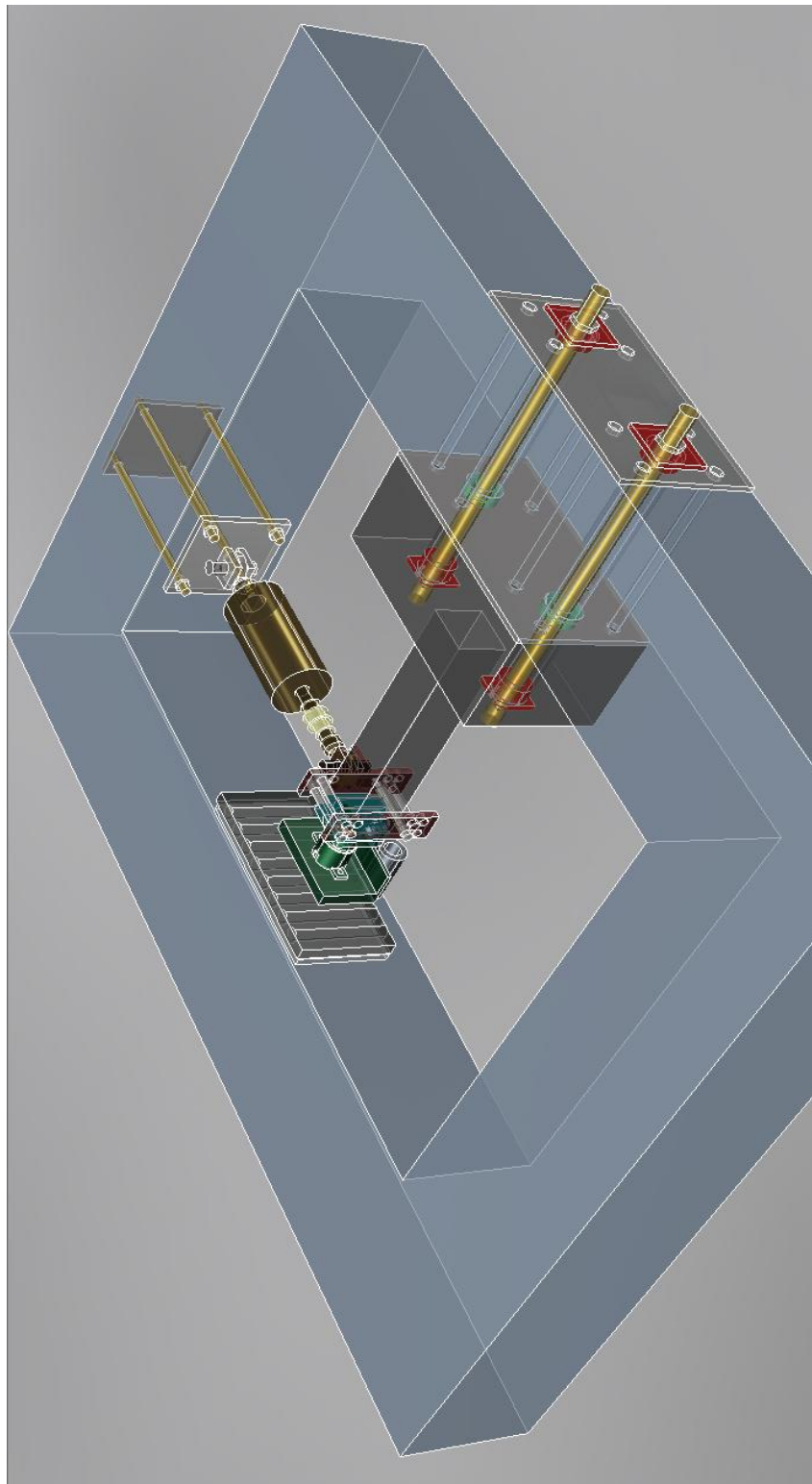
Για την επιβολή του αξονικού φορτίου στο δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο ειδικών μεταλλικών τεμαχίων το οποίο φαίνεται με λεπτομέρεια στο σχέδια των σχημάτων Σχ.12 και Σχ.13 καθώς και τη φωτογραφία του σχήματος Σχ.14α. Ο υδραυλικός γρύλος είναι στερεωμένος σε μεταλλικό φορείο το οποίο εδράζεται επί κυλίνδρων, ώστε να είναι εφικτή η μετακίνησή του κατά την οριζόντια διεύθυνση. Η κεφαλή του γρύλου προσαρμόζεται σε ειδικά διαμορφωμένη θέση στο κέντρο μεταλλικής πλάκας, που με τη βοήθεια πύρου συνδέεται με άλλη μεταλλική πλάκα αγκυρωμένη στην κεφαλή του υποστυλώματος. Το ζεύγος των πλακών αυτών επιτρέπει τη διαρκή εφαρμογή του αξονικού φορτίου στο στύλο κατά τη διεύθυνσή του. Η οπίσθια επιφάνεια του φορείου του γρύλου βρίσκεται σε επαφή με ένα μεταλλικό στέλεχος στο οποίο είναι προσαρμοσμένα κύλιστρα που επιτρέπουν την οριζόντια μετακίνηση του φορείου. Ο τρόπος προσαρμογής του δοκιμίου στη διάταξη επιβολής της σεισμικής φόρτισης αποκλείει κάθε πιθανή μετακίνηση της βάσης του υποστυλώματος.

Για την καταγραφή των διαφόρων μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένα μεγάλο πλήθος μετρητικών οργάνων και συσκευών. Η σεισμική φόρτιση επιβάλλεται στο δοκίμιο για δεδομένες τιμές πλευρικής μετακίνησης της κεφαλής του στύλου. Η τιμή της εκάστοτε μετακίνησης μετράται με τη βοήθεια γραμμικά μεταβλητού διαφορικού μετασχηματιστή (L.V.D.T) συνολικής διαδρομής 200mm, προσαρμοσμένου επί της κεφαλής του στύλου. Στο βραχίονα του εμβόλου διπλής ενέργειας βρίσκεται

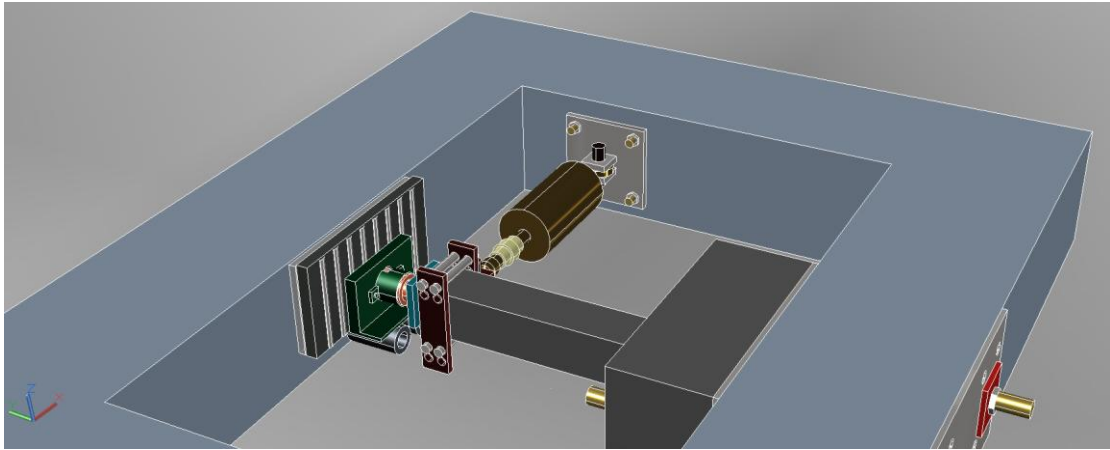
προσαρμοσμένο το όργανο μέτρησης του πλευρικού φορτίου (load cell) το οποίο συνδέεται με γέφυρα μέσω της οποίας λαμβάνονται οι τιμές του φορτίου για δεδομένη μετακίνηση. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν γέφυρες (Σχ.14β) για τη λήψη μικρομετρήσεων των παραμορφώσεων των ράβδων οπλισμού επί των οποίων είχαν τοποθετηθεί ειδικές αγώγιμες ταινίες (strain gages). Η τοποθέτηση των ταινιών μέτρησης των παραμορφώσεων του οπλισμού στις ράβδους του δοκιμίου πραγματοποιείται μετά τη λείανση της ράβδου τοπικά στη θέση όπου πρόκειται να κολληθεί η ταινία. Στη συνέχεια η περιοχή καλύπτεται με εποξειδική κόλλα δύο συστατικών για την προστασία της ταινίας και την αποκατάσταση της απομειωμένης τοπικά διατομής της ράβδου.



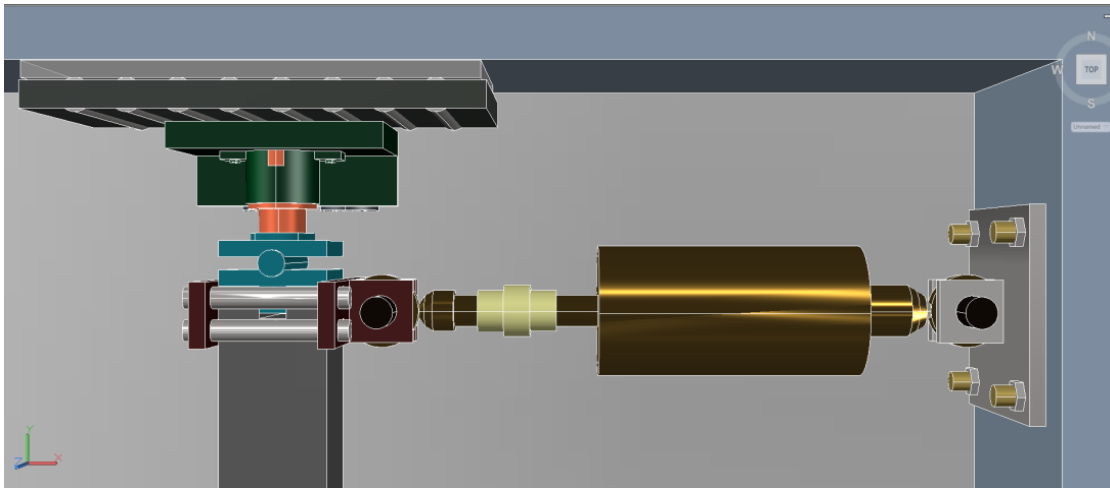
Σχ.10 : Διάταξη φόρτισης των δοκιμών υποστυλωμάτων



Σχ.11 : Αγκύρωση του δοκιμίου στο πλαίσιο της διάταξης φόρτισης μέσω ντιζών



Σχ.12 : Φορείο υδραυλικού γρύλου επιβολής αξονικού φορτίου και έμβολο διπλής ενέργειας



Σχ.13 : Λεπτομέρεια εμβόλου διπλής ενέργειας για την επιβολή της πλευρικής φόρτισης στην κεφαλή του υποστυλώματος. Διακρίνεται το σύνολο των ειδικών τεμαχίων και ο γρύλος επιβολής αξονικού φορτίου στο υποστύλωμα



(α)



(β)

Σχ.14 : (α): Ειδικά μεταλλικά τεμάχια και γρύλος επιβολής αξονικού φορτίου στο υποστύλωμα. Διακρίνονται οι πλάκες στην κεφαλή του στύλου μέσω των οποίων προσδένεται στο υποστύλωμα το έμβολο διπλής ενέργειας