



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ – ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ  
ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 54006 - ΕΛΛΑΣ

Τηλ: 00 30 2310 995653 fax: 00 30 2310 995769  
Email: [gcmalos@civil.auth.gr](mailto:gcmalos@civil.auth.gr)

## ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ

Του Ερευνητικού Προγράμματος με τίτλο

**Διατμητική ενίσχυση με χαλύβδινα ινοπλισμένα πολυμερή (ΧΙΟΠ)  
τμήματος συνεχούς δοκού στη περιοχή στήριξης της  
κάτω από ανακυκλιζόμενη σεισμικού τύπου φόρτιση.**

Που χρηματοδοτήθηκε από τον:

**Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ)**

Ο Επιστημονικώς Υπεύθυνος

**Γεώργιος Χ. Μάνος**  
Καθηγητής Α.Π.Θ.

Θεσσαλονίκη, Δεκέμβριος 2011



## Ευχαριστίες

Στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος είναι υποχρέωση του συγγραφέως να αποδώσει ευχαριστίες σε όλους όσους βοήθησαν για την ολοκλήρωσή του.

Αρχικά στο τεχνικό προσωπικό του Εργαστηρίου Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών

Και ιδιαίτερα στους κους. Β. Κουρτίδη και Θ. Κουκουφτόπουλο καθώς και στους κους. Δ. Ρήτο και Φ. Τηλκερίδη.

Σε όλους του συνεργάτες της ερευνητικής ομάδας, δηλαδή τους κους. Κ. Κατάκαλο, Χ. Παπακωνσταντίνου και Β. Σούλη. Τον κο. Γ. Κοϊδη για την βοήθεια ελέγχου των αντοχών των δομικών στοιχείων και τον κο. Ν. Καραμήτσιο για μέρος επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.

Τέλος τον Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) για την οικονομική υποστήριξη.



## Περίληψη και Συμπεράσματα

Τις τελευταίες δεκαετίες αυξάνεται, ολοένα και περισσότερο, η ανάγκη να επισκευαστούν, ενισχυθούν και να διατηρηθούν κατασκευές όπως γέφυρες, φράγματα, κτήρια. Το παραπάνω φαινόμενο οφείλεται κυρίως στα εξής:

α) Η ηλικία σε πολλές κατασκευές Ο/Σ είναι μεγάλη και ως εκ τούτου αρχίζουν να φθείρονται, να απαξιώνονται και να υποβαθμίζονται ποιοτικά.

β) Υπάρχει ανάγκη, πολλές φορές, να αυξηθούν οι απαιτήσεις φορτίσεων μιας κατασκευής, λόγω αλλαγής χρήσης ή εφαρμογής νέων αντισεισμικών κανονισμών.

γ) Το κόστος για την κατασκευή νέων υποδομών και κτηρίων είναι συνήθως μεγαλύτερο από το κόστος επισκευής και ενίσχυσης υφιστάμενων υποδομών/κατασκευών

Οι στόχοι της παρούσας ερευνητικής διερεύνησης είναι:

- Να διερευνηθεί η δυνατότητα χρήσης εξωτερικά επικολημένων ΧΙΟΠ για τη διατμητική ενίσχυση ορθογωνικών δοκών και πλακοδοκών οπλισμένου σκυροδέματος.
- Να χρησιμοποιηθούν διάφορες μορφές και τύποι αγκυρώσεων των λωρίδων ΙΟΠ και να εξεταστεί η συμπεριφορά τους και η επίδραση τους τόσο στις λωρίδες όσο και στο δομικό στοιχείο που καλείται να ενισχυθεί διατμητικά.
- Να διερευνηθεί η επιρροή της επεξεργασίας της διεπιφάνειας στην περίπτωση χρήσης κάποιας μορφής αγκύρωσης λωρίδων ΙΟΠ.
- Να διερευνηθούν οι συνθήκες παραμόρφωσης των λωρίδων ΙΟΠ και να μελετηθούν οι πραγματοποιήσιμες φέρουσες ικανότητες σε σύγκριση με τις ιδεατές τόσο των ατσαλονημάτων (ΧΙΟΠ) όσο και των ανθρακονημάτων (ΑΙΟΠ).
- Να εξεταστεί ο σχεδιαστικός τρόπος υπολογισμού της διατμητικής ενίσχυσης με εξωτερικά επικολημένα ΙΟΠ που προτείνεται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. επί τη βάση των αποτελεσμάτων του παρόντος ερευνητικού έργου καθώς και της βιβλιογραφίας.

Η παρούσα ερευνητική εργασία συμπεριλαμβάνει τρία πειραματικά τμήματα:

1. Δοκιμές αποκόλλησης λωρίδων ΙΟΠ από απλά τμήματα διατομών πλακοδοκού και προκαταρκτική μελέτη τύπων αγκύρωσης τους.
2. Δοκιμές μονότονης κάμψης τεσσάρων σημείων δοκιμίων δοκών Ο/Σ ορθογωνικής διατομής ενισχυμένων διατμητικά με εξωτερικά επικολημένα ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ. Στη φάση αυτή ελέγχθηκε η επιρροή της αγκύρωσης των λωρίδων ΑΙΟΠ ή ΧΙΟΠ στις παρειές των δοκιμίων των δοκών.
3. Δοκιμές ανακυκλιζόμενης φόρτισης δοκιμίων πλακοδοκών Ο/Σ ενισχυμένων διατμητικά με εξωτερικά επικολημένα ΧΙΟΠ. Ελέγχθηκαν επίσης και διάφοροι τύποι αγκύρωσης των λωρίδων ΧΙΟΠ στα εν λόγω δοκίμια των πλακοδοκών.



Στο δεύτερο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται ανάλυση της βιβλιογραφίας που σχετίζεται με τη διατμητική ενίσχυση με χρήση ΙΟΠ. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ιδιότητες των υλικών, οι τρεις τύποι δοκιμών, δηλαδή απλά τμήματα διατομών πλακοδοκού Ο/Σ, ορθογωνικές δοκοί Ο/Σ και πλακοδοκοί Ο/Σ, καθώς και οι αντίστοιχες τρεις πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο των εν λόγω δοκιμών. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα από τις τρεις πειραματικές φάσεις, ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Τέλος στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται ανάλυση και σύγκριση κανονισμών και αναλυτικών μοντέλων με έμφαση στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

### **Συμπεράσματα από τις δοκιμές αποκόλλησης λωρίδων ΙΟΠ από απλά τμήματα διατομών πλακοδοκού και προκαταρκτική μελέτη τύπων αγκύρωσης τους**

- Η εκτράχυνση της επιφάνειας επικόλλησης δεν είναι μείζονος σημασίας στην περίπτωση χρήσης αγκύρωσης. Στην αντίθετη περίπτωση είναι πολύ σημαντική και συντελεί σε αύξηση της δύναμης συνάφειας κατά 40%.
- Τα ΧΙΟΠ έχουν παρόμοια συμπεριφορά με τα ΑΙΟΠ και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικά υλικά ενίσχυσης. Μάλιστα το ποσοστό εκμετάλλευσης, ΜΕΙ, τους είναι υψηλότερο εν συγκρίσει με τα ΑΙΟΠ.
- Στην περίπτωση χρήσης αγκύρωσης το ποσοστό εκμετάλλευσης του υλικού ΜΕΙ είναι μεγαλύτερο από όταν δε χρησιμοποιείται αγκύρωση.
- Η μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα προήλθε για την αγκύρωση που αναπτύχθηκε στο ΑΠΘ και είναι 4 φορές μεγαλύτερη από τη φέρουσα ικανότητα στην περίπτωση της αποκόλλησης.
- Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στη διαστασιολόγηση των βλήτρων αγκύρωσης καθώς σε αρκετές περιπτώσεις η θραύση τους οδήγησε στην αστοχία της ενίσχυσης.
- Η αγκύρωση με χρήση θυσάνου έδωσε τις μικρότερες φέρουσες ικανότητες. Η εφαρμογή της απαιτεί χρόνο και εξειδίκευση. Η κατάλληλη εφαρμογή αυτού του τύπου της αγκύρωσης είναι πολύ σημαντική για την αποτελεσματικότητα της αγκύρωσης. Σε αντίθεση οι άλλοι δύο τρόποι αγκύρωσης, δηλαδή αυτός με γωνιακά και αυτός του Α.Π.Θ. είναι μηχανικές αγκυρώσεις εύκολες στη χρήση και μπορεί να διαστασιολογηθούν σχετικά εύκολα ανάλογα με τις απαιτήσεις της ενίσχυσης.
- Με βάση τις καταγεγραμμένες παραμορφώσεις σε μια διατομή λωρίδας ΙΟΠ μπορεί να προβλεφθεί με ικανοποιητικό τρόπο η φέρουσα ικανότητα κάθε μιας από τις λωρίδες ΙΟΠ που μετρήθηκε πειραματικά.

### **Συμπεράσματα από τις δοκιμές μονότονης κάμψης τεσσάρων σημείων δοκιμών δοκών Ο/Σ ορθογωνικής διατομής ενισχυμένων διατμητικά με εξωτερικά επικολλημένα ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ, με ή χωρίς αγκύρωση.**

- Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα του ενισχυμένου δοκιμίου ορθογωνικής διατομής με αγκυρωμένα ΙΟΠ τριπλασιάστηκε ως προς τη δοκό αναφοράς, χωρίς συνδετήρες, ενώ έγινε 1,35 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τη δοκό αναφοράς με τους συνδετήρες.
- Η χρήση συστήματος αγκύρωσης των λωρίδων ΙΟΠ οδηγεί σε αυξημένες τιμές διατμητικής φέρουσας ικανότητας σε σχέση με τα δοκίμια όπου οι λωρίδες ΙΟΠ δεν είναι αγκυρωμένες.



- Για να λειτουργήσει η αγκύρωση οφείλει το ΙΟΠ να αποκολληθεί από τη διεπιφάνειά του με το σκυρόδεμα, γεγονός που είχε αναφερθεί από την προηγούμενη διερεύνηση.
- Η χρήση των ΧΙΟΠ αποτελεί εναλλακτικό τρόπο ενίσχυσης χωρίς εμφανή μειονεκτήματα, αντιθέτως χαμηλότερο ποσοστό οπλισμού ΧΙΟΠ έναντι ΑΙΟΠ είχε ως αποτέλεσμα την ίδια φέρουσα διατμητική ικανότητα.
- Στην περίπτωση των ΧΙΟΠ τοπικές αστοχίες του υλικού αποτρέπονται λόγω της σχετικής ευκαμψίας των ινών χάλυβα σε σχέση με αυτή των ΑΙΟΠ, αποτρέποντας με αυτόν τον τρόπο τοπικές συγκεντρώσεις έντασης
- Το ποσοστό εκμετάλλευσης του υλικού αυξάνεται στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται αγκύρωση ανεξαρτήτως του τύπου του υλικού ενίσχυσης, χωρίς να φαίνεται ότι υπάρχει κάποια διαφορά στη μεταξύ τους απόδοση. Η παρατήρηση αυτή είχε γίνει κατά την προηγούμενη διερεύνηση.
- Από τις μετρήσεις των παραμορφώσεων μπορεί να προβλεφθεί αρκετά ικανοποιητικά η φέρουσα ικανότητα σε τέμνουσα των ενισχυμένων ορθογωνικών δοκών με ΑΙΟΠ η οποία αποκλίνει από τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές κατά 6%.
- Οι παραμορφώσεις που έχουν μετρηθεί στις λωρίδες ΙΟΠ κατά την εξέταση της καμπτοδιάτμησης των ορθογωνικών δοκών είναι μικρότερες από αυτές τις προηγούμενης διερεύνησης με τα απλά δοκίμια διατομής πλακοδοκού.
- Η τιμή του ποσοστού εκμετάλλευσης για τα δοκίμια ορθογωνικής διατομής που έχουν λωρίδες ΙΟΠ αγκυρωμένες είναι σχετικά ψηλό (63.5%) αλλά με μικρότερη τιμή από την αντίστοιχη τιμή που προέκυψε από τις αγκυρωμένες λωρίδες ΙΟΠ στα απλά δοκίμια διατομής πλακοδοκού.
- Η μέγιστη τιμή της τέμνουσας που υπολογίστηκε με βάση τις μέγιστες μετρημένες τιμές των παραμορφώσεων των λωρίδων ΙΟΠ υποεκτιμά την αντίστοιχη μετρημένη τιμή σε όλες τις περιπτώσεις από 1% έως 33%.

#### **Συμπεράσματα από τις δοκιμές ανακυκλιζόμενης φόρτισης δοκιμίων πλακοδοκών Ο/Σ ενισχυμένων διατμητικά με εξωτερικά επικολημένα ΧΙΟΠ, με ή χωρίς αγκύρωση.**

- Η αστοχία πλακοδοκών Ο/Σ ενισχυμένων με ΧΙΟΠ χωρίς να γίνει χρήση αγκύρωσης υποβαλλόμενων σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση υπαγορεύεται από την αποκόλληση των ΧΙΟΠ από το σκυρόδεμα για τιμές μέγιστων μετρημένων μέσων τιμών παραμόρφωσης στις λωρίδες των ΧΙΟΠ της τάξεως των 4500μstrain.
- Όσο πιο πυκνές είναι οι λωρίδες τόσο πιο αυξημένη φέρουσα ικανότητα σε τέμνουσα παρατηρείται στην περίπτωση μη χρήσης αγκύρωσης.
- Η παρουσία της αγκύρωσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της φέρουσας διατμητικής ικανότητας μέχρι και δύο φορές την φέρουσα ικανότητα του αντίστοιχου δοκιμίου χωρίς αγκύρωση.
- Η τιμή του συντελεστού εκμετάλλευσης του υλικού (ΜΕΙ) με την παρουσία της αγκύρωσης που είναι κατάλληλα σχεδιασμένη μπορεί να φτάσει σε σημαντικά υψηλές τιμές (91%).
- Ενώ σε όλα τα δοκίμια εμφανίστηκαν μεγάλου εύρους διατμητικές ρηγματώσεις με ζώνες αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος, λόγω της ανακυκλιζόμενης φύσης της φόρτισης, η διατμητική ενίσχυση, που ελέγχθηκε με τις σχετικά πυκνές ή αραιές λωρίδες ΧΙΟΠ, ήταν ικανή να διατηρήσει την φέρουσα διατμητική ικανότητα των δοκιμίων σε αρκετά υψηλά επίπεδα χωρίς να αστοχήσουν καταλυτικά οι ίδιες οι λωρίδες. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ως πλεονέκτημα των λωρίδων ΧΙΟΠ που σε συνδυασμό με την αγκύρωση των λωρίδων συντελεί στο να μην εξελιχθούν οι διατμητικού τύπου ρηγματώσεις σε απότομες ψαθυρού-τύπου θραύσεις των ΧΙΟΠ και απότομη πτώση της φέρουσας ικανότητας.



- Σε πολλές περιπτώσεις η τελική αστοχία οφείλεται στην εξόλκευση τμήματος της αγκύρωσης. Αυτό σηματοδοτεί αφενός περαιτέρω εκμετάλλευση των λωρίδων ΧΙΟΠ μέσω της βελτίωσης της συμπεριφοράς της αγκύρωσης.
- Η απορρόφηση της ενέργειας αυξάνεται στην περίπτωση χρήσης κάποιας μορφής αγκύρωσης περίπου πέντε φορές από ότι στην περίπτωση της αποκόλλησης των λωρίδων ΧΙΟΠ.
- Ένα μέρος της μείωσης της μετρημένης διατμητικής φέρουσας ικανότητας που παρατηρείται στα δοκίμια πλακοδοκού σε σύγκριση με τα δοκίμια της ορθογωνικής δοκού, χωρίς την παρουσία αγκυρώσεων, θα πρέπει να αποδοθεί στην ανακυκλιζόμενη φύση της φόρτισης. Η παρουσία αγκυρώσεων φαίνεται να αποτρέπει αυτή την επιρροή της φύσης της φόρτισης. Το φαινόμενο αυτό χρήζει περαιτέρω διερεύνησης
- Με βάση την συμπεριφορά όλων των δοκιμίων της παρούσης διερεύνησης με χρήση ΧΙΟΠ μπορεί να τεκμηριωθεί ότι οι λωρίδες ΧΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκαν αποτέλεσαν αξιόπιστη εναλλακτική λύση χρήσης υλικού ενίσχυσης με κατασκευαστικά πλεονεκτήματα. Επιπρόσθετα, επί τη βάση της μετρημένης συμπεριφορά σε όρους βελτίωσης της διατμητικής φέρουσας ικανότητας φερόντων στοιχείων διατομής πλακοδοκού αποδεικνύεται ότι μπορεί να εκπληρώσουν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό τέτοιο στόχο εφόσον συνδυαστούν είτε με το απαιτούμενο μήκος επικόλλησης είτε, και προτιμότερο, με την κατάλληλη αγκύρωση.

#### **Συμπερασματικές παρατηρήσεις σχετικές με τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ..**

- Οι τιμές που υπολογίζονται βάση της προτεινόμενης μεθοδολογίας του ΚΑΝ.ΕΠΕ. υπερεκτιμούν τη συμβολή των ΙΟΠ στη διατμητική αντοχή των πλακοδοκών, ανεξάρτητα από το αν η αστοχία επέρχεται μετά από θραύση ή αποκόλληση των ινών. Αντιθέτως ο σχεδιασμός που έγινε βάση των σχεδιαστικών μοντέλων του ACI και του Ευρωκώδικα δίνουν πιο συντηρητικά αποτελέσματα.

- Οι πειραματικές τιμές που προέκυψαν από τη χρήση ΧΙΟΠ είναι αυξημένες έναντι των τιμών που δίνουν οι κανονισμοί. Σημειώνεται ότι τόσο για τα ΑΙΟΠ όσο και για τα ΧΙΟΠ χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές ασφαλείας που προτείνονται για τα ΑΙΟΠ. Είναι γνωστό όμως ότι οι ίνες των ΑΙΟΠ παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευπάθεια και η χρήση ρολών κατά την επικόλληση για την εξάλειψη τυχόν φυσαλίδων αέρα οδηγεί σε θραύση ενός πολλές φορές σημαντικού (έως 20%) ποσοστού ινών. Η απώλεια αυτή δεν παρατηρείται στα ΧΙΟΠ όπου η συμπίεση των ινών δεν οδηγεί σε θραύση. Επιπρόσθετα δεν παρατηρούνται και σημαντικές διαφοροποιήσεις στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού (χάλυβας). Κατά συνέπεια ενδείκνυται η χρήση πιο χαλαρών συντελεστών ασφαλείας.

- Η χρήση αγκύρωσης στα ΧΙΟΠ συντελεί σε ιδιαίτερα αυξημένες τιμές τέμνουσας λόγω του ότι αποφεύγεται η πρόωρη αποκόλληση και γίνεται καλύτερη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του υλικού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα αναλυτικά μοντέλα της βιβλιογραφίας καθώς και οι κανονισμοί έχουν βασισθεί σε πειραματικά δεδομένα από πειράματα που διεξήχθησαν σε δοκίμια ενισχυμένα με ΑΙΟΠ και φαίνεται ότι με τον τρόπο αυτό υποτιμάται σημαντικά η διατμητική ενίσχυση που παρέχεται από εξωτερικά επικολλημένα και αγκυρωμένα ΧΙΟΠ. Επιπρόσθετα, έχει παρατηρηθεί ότι στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ΑΙΟΠ, χρησιμοποιώντας είτε πλήρη περιτύλιξη είτε αγκύρωση, η θραύση των ινών στις περισσότερες περιπτώσεις παρατηρείται στις κάτω γωνίες των δοκών λόγω τοπικών φαινομένων συγκέντρωσης τάσεων. Τα σχετικά χαμηλά όρια της μέγιστης παραμόρφωσης των ΙΟΠ που αναφέρονται στους κανονισμούς οφείλονται κυρίως σ' αυτόν το λόγο. Στην παρούσα μελέτη δεν παρατηρήθηκε αντίστοιχο φαινόμενο όταν χρησιμοποιούνται ΧΙΟΠ.



## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	σελ.1
Περίληψη και συμπεράσματα	σελ.2
Περιεχόμενα	σελ.6
Λίστα Σχημάτων	σελ.8
Λίστα Πινάκων	σελ.10
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> – Εισαγωγή	σελ.12
1.1 Ενίσχυση κατασκευών Ο/Σ με ινοπλισμένα πολυμερή	σελ.12
1.2 Στόχοι	σελ.13
1.3 Διάθρωση Εργασίας	σελ.14
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	σελ.15
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> – Κατασκευή τριών τύπων δοκιμίων - Πειραματικές Διατάξεις	σελ.27
3.1 Εισαγωγή	σελ.27
3.2 Προσδιορισμός Ιδιοτήτων των Υλικών	σελ.27
3.2.1 Σκυρόδεμα	σελ.27
3.2.2 Δομικός Χάλυβας	σελ.29
3.2.3 Ίνες Χάλυβα Υψηλής Αντοχής	σελ.32
3.2.4 Ίνες Άνθρακα	σελ.34
3.2.5 Εποξειδική Ρητίνη	σελ.34
3.3 Πειραματική διάταξη δοκιμών απλών τμημάτων διατομής πλακοδοκού Ο/Σ	σελ.35
3.3.1 Γεωμετρικά στοιχεία δοκιμίων	σελ.35
3.3.2 Κατασκευή δοκιμίων	σελ.36
3.3.3 Λεπτομέρειες δοκιμίων	σελ.37
3.3.4 Πειραματική Διάταξη	σελ.38
3.4 Πειραματική διάταξη ορθογωνικών δοκών Ο/Σ	σελ.40
3.4.1 Γεωμετρικά στοιχεία δοκιμίων	σελ.41
3.4.2 Κατασκευή δοκιμίων	σελ.42
3.4.3 Λεπτομέρειες δοκιμίων	σελ.43
3.4.4 Πειραματική Διάταξη	σελ.45
3.5 Πειραματική διάταξη πλακοδοκών Ο/Σ	σελ.47
3.5.1 Γεωμετρικά στοιχεία δοκιμίων	σελ.48
3.5.2 Κατασκευή δοκιμίων	σελ.50
3.5.3 Λεπτομέρειες δοκιμίων	σελ.51
3.5.4 Πειραματική Διάταξη	σελ.54
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> – Πειραματικά Αποτελέσματα	σελ.57
4.1 Εισαγωγή	σελ.57
4.2 Αποτελέσματα δοκιμών απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ	σελ.57
4.2.1 Αναλυτικά αποτελέσματα απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ ενισχυμένων με ΑΙΟΠ	σελ.57
4.2.2 Αναλυτικά αποτελέσματα απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ ενισχυμένων με ΧΙΟΠ	σελ.60
4.3 Αποτελέσματα δοκιμών ορθογωνικών δοκών Ο/Σ	σελ.62



4.4 Αποτελέσματα δοκιμών πλακοδοκών Ο/Σ	σελ.73
Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> – Συγκριτική Αξιολόγηση	σελ.87
5.1 Εισαγωγή	σελ.87
5.2 Συγκριτικά αποτελέσματα απλών τιμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ	σελ.87
5.2.1 Επιρροή προετοιμασίας επιφάνειας επικόλλησης	σελ.90
5.2.2 Αποτελεσματικότητα ΧΙΟΠ ως εναλλακτικού υλικού ενίσχυσης	σελ.91
5.2.3 Επιρροή των διαφόρων ειδών αγκύρωσης και αύξηση της αποτελεσματικότητας των ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ	σελ.92
5.2.4 Ποσοστό εκμετάλλευσης του υλικού (ΜΕΙ)	σελ.93
5.2.5 Υπολογισμός μέγιστης φέρουσας ικανότητας	σελ.93
5.2.6 Συμπεράσματα	σελ.94
5.3 Συγκριτικά αποτελέσματα ορθογωνικών δοκών Ο/Σ	σελ.95
5.3.1 Σχολιασμός Φέρουσας Ικανότητας	σελ.96
5.3.2 Μορφές αστοχίας	σελ.99
5.3.3 Σχολιασμός Αναπτυσσόμενων Παραμορφώσεων – Ποσοστό εκμετάλλευσης ΜΕΙ	σελ.100
5.3.4 Αναλυτικός Υπολογισμός Τέμνουσας	σελ.101
5.3.5 Συμπεράσματα	σελ.102
5.4 Συγκριτικά αποτελέσματα δοκιμών διατομής πλακοδοκού σε ανακυκλιζόμενη σεισμικού τύπου φόρτιση	σελ.104
5.4.1 Φέρουσα ικανότητα και μετακινήσεις	σελ.106
5.4.2 Μορφές αστοχίας	σελ.109
5.4.3 Σχολιασμός Αναπτυσσόμενων Παραμορφώσεων – Ποσοστό εκμετάλλευσης ΜΕΙ	σελ.110
5.4.4 Αριθμητικός Υπολογισμός Τέμνουσας Δύναμης	σελ.111
5.4.5 Υστερητική ενέργεια	σελ.112
5.4.6 Σύγκριση ορθογωνικών δοκών Ο/Σ σε σχέση με πλακοδοκούς	σελ.112
5.4.7 Εκτίμηση της συμπεριφοράς των χρησιμοποιηθέντων συστημάτων αγκύρωσης	σελ.115
5.4.8 Συμπεράσματα	σελ.117
Κεφάλαιο 6 <sup>ο</sup> – Ανάλυση κανονισμών και αναλυτικών μοντέλων	σελ.119
6.1 Παρουσίαση αναλυτικών μοντέλων	σελ.119
6.2 Σχεδιασμός Εξωτερικά επικολλημένης ενίσχυσης ΙΟΠ βάση των διατάξεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ.	σελ.122
6.3 Σχολιασμός των διατάξεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ.	σελ.124
6.4. Συμπερασματικές παρατηρήσεις	σελ.132
6.5 Πρόταση τροποποίησης διατάξεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ.	σελ.135
6.6 Προτάσεις επέκτασης έρευνας	σελ.135
Βιβλιογραφία	σελ.141





## Λίστα Σχημάτων

### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> – Κατασκευή τριών τύπων δοκιμίων - Πειραματικές Διατάξεις

- Σχήμα 3.1 Θλίψη κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος
- Σχήμα 3.2 Καθαρός ελκυσμός δομικού χάλυβα
- Σχήμα 3.3 Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για το δομικό χάλυβα διαμέτρου  $\varnothing 8\text{mm}$
- Σχήμα 3.4 Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για το δομικό χάλυβα διαμέτρου  $\varnothing 14\text{mm}$
- Σχήμα 3.5 Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για το δομικό χάλυβα διαμέτρου  $\varnothing 14\text{mm}$
- Σχήμα 3.6 Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης του ΧΙΟΠ (SRP)
- Σχήμα 3.7 Δοκιμή εφελκυσμού χάλυβα υψηλής αντοχής (ΧΙΟΠ)
- Σχήμα 3.8 Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης του ΧΙΟΠ (SRP) με ρητίνη
- Σχήμα 3.9 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά απλών τιμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ
- Σχήμα 3.9α Κατασκευή δοκιμίων συνάφειας
- Σχήμα 3.10 Πειραματική διάταξη και ενοργάνωση δοκιμίων
- Σχήμα 3.11 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά δοκιμίων ορθογωνικών δοκών Ο/Σ χωρίς συνδετήρες
- Σχήμα 3.12 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά ορθογωνικών δοκών Ο/Σ με συνδετήρες
- Σχήμα 3.13 Κατασκευή ορθογωνικών δοκών 120/360(mm)
- Σχήμα 3.14 Λεπτομέρεια αγκύρωσης ορθογωνικής δοκού
- Σχήμα 3.15 Φωτογραφική απεικόνιση πειραματικής διάταξης
- Σχήμα 3.16 Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης
- Σχήμα 3.17 Ενοργάνωση δοκιμίου ορθογωνικής διατομής
- Σχήμα 3.18 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά δοκιμίων που υπόκεινται σε ανακυκλιζόμενη σεισμικού τύπου φόρτιση διατομής πλακοδοκού (mm)
- Σχήμα 3.19 Διάταξη αγκύρωσης με χρήση γωνιακών χαλύβδινων διατομών διαστάσεων L50X5
- Σχήμα 3.20 Διάταξη αγκύρωσης με χρήση χαλύβδινων λάμων 20X5
- Σχήμα 3.21 Διάταξη αγκύρωσης με χρήση διάταξης αγκύρωσης Α.Π.Θ.
- Σχήμα 3.22 Κατασκευή δοκών Ο/Σ διατομής πλακοδοκού 120/360/360(mm)
- Σχήμα 3.23 Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης πλακοδοκών Ο/Σ
- Σχήμα 3.24 Φωτογραφική απεικόνιση πειραματικής διάταξης
- Σχήμα 3.25 Ενοργάνωση δοκιμίου διατομής πλακοδοκού
- Σχήμα 3.26. Ανακυκλιζόμενη επιβαλλόμενη μετακίνηση στο δοκίμιο διατομής πλακοδοκού

### Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> – Πειραματικά Αποτελέσματα

- Σχήμα 4.1 πλαϊνή όψη CSN1
- Σχήμα 4.2 Διαγράμματα παραμόρφωσης και μετακίνησης με το φορτίο
- Σχήμα 4.3 Μορφή Αστοχίας CSN1
- Σχήμα 4.4 Διάγραμμα Φορτίου-Βύθισης δοκιμίου CRB.
- Σχήμα 4.5 Μορφή αστοχίας μητρικής δοκού
- Σχήμα 4.6 Διάγραμμα Τέμνουσα-Βύθισης.
- Σχήμα 4.7 Διάγραμμα Τέμνουσας-Παραμόρφωσης σπλισμών
- Σχήμα 4.8 Τέμνουσα-Βύθισης RB200C.
- Σχήμα 4.9 Μορφή αστοχίας δοκιμίου RB200C
- Σχήμα 4.10 Τέμνουσα – Παραμορφώσεις RB200C
- Σχήμα 4.11 Τέμνουσα-Βύθιση RB200Ca.
- Σχήμα 4.12 Τέμνουσα – Παραμορφώσεις RB200Ca
- Σχήμα 4.13 Μορφή αστοχίας δοκιμίου RB200Ca
- Σχήμα 4.14 Τέμνουσα-Βύθιση RB200S.
- Σχήμα 4.15 Μορφή αστοχίας δοκιμίου RB200S
- Σχήμα 4.16 Διάγραμμα Τέμνουσας – Παραμορφώσεων RB200S



- Σχήμα 4.17 Τέμνουσα-Βύθιση RB200S.
- Σχήμα 4.18 Θέσεις τοποθέτησης ταινιών παραμόρφωσης
- Σχήμα 4.19 Μορφή αστοχίας δοκιμίου RB200S
- Σχήμα 4.20 Τέμνουσα – Παραμορφώσεις RB200Sa
- Σχήμα 4.21 Τέμνουσα-Βύθιση RB150C
- Σχήμα 4.22 Μορφή αστοχίας δοκιμίου RB150C
- Σχήμα 4.23 Διάγραμμα Τέμνουσας – Παραμορφώσεων RB150C
- Σχήμα 4.24 Τέμνουσα-Βύθιση RB150Ca.
- Σχήμα 4.25 Μορφή αστοχίας δοκιμίου RB150Ca
- Σχήμα 4.26 Διάγραμμα Τέμνουσας – Παραμορφώσεων RB150Ca
- Σχήμα 4.27 Τέμνουσα-Βύθιση RB150S .
- Σχήμα 4.28 Μορφή αστοχίας δοκιμίου RB150S
- Σχήμα 4.29 Διάγραμμα Τέμνουσας – Παραμορφώσεων RB150S
- Σχήμα 4.30 Τέμνουσα-Βύθιση RB150Sa.
- Σχήμα 4.31 Μορφή αστοχίας δοκιμίου RB150Sa
- Σχήμα 4.32 Διάγραμμα Τέμνουσας – Παραμορφώσεων RB150Sa
- Σχήμα 4.33 Τέμνουσας δύναμη – Οριζόντια μετατόπισης δοκιμίου CTB
- Σχήμα 4.34 Αστοχία Δοκιμίου CTB
- Σχήμα 4.35 Τέμνουσα δύναμη– οριζόντια μετατόπιση δοκιμίου TB150
- Σχήμα 4.36 Σχήμα αστοχίας Δοκιμίου TB150
- Σχήμα 4.37 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB150
- Σχήμα 4.39 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης δοκιμίου TB200
- Σχήμα 4.40 Σχήμα αστοχίας Δοκιμίου TB150
- Σχήμα 4.41 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB150
- Σχήμα 4.42 Τέμνουσα δύναμη– μετατόπιση TB150L2t
- Σχήμα 4.43 Σχήμα αστοχίας Δοκιμίου TB150L2t
- Σχήμα 4.44 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB150L2t
- Σχήμα 4.45 Τέμνουσα δύναμη – μετατόπιση TB200L1t
- Σχήμα 4.46 Σχήμα αστοχίας Δοκιμίου TB200L1t
- Σχήμα 4.47 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB200L1t
- Σχήμα 4.48 Τέμνουσας δύναμη – μετατόπιση TB150B1b
- Σχήμα 4.49 Σχήμα αστοχίας TB150B1b
- Σχήμα 4.50 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB150B1b
- Σχήμα 4.51 Τέμνουσα δύναμη – μετατόπιση TB200P2b Σχήμα
- Σχήμα 4.52 Αστοχία TB200P2b
- Σχήμα 4.53 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB200P2b
- Σχήμα 4.54 Τέμνουσα δύναμη– οριζόντια μετατόπιση δοκιμίου TB150-R
- Σχήμα 4.55 Σχήμα αστοχίας Δοκιμίου TB150-R
- Σχήμα 4.56 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB150
- Σχήμα 4.57 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης δοκιμίου TB200-R
- Σχήμα 4.58 Σχήμα αστοχίας δοκιμίου TB200-R
- Σχήμα 4.59 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB200-R
- Σχήμα 4.60 Τέμνουσα δύναμη – μετατόπιση TB200P2b
- Σχήμα 4.61 Αστοχία TB200P2b
- Σχήμα 4.62 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB200P2b-R

#### **Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> – Συγκριτική Αξιολόγηση**

- Σχήμα 5.1 Τέμνουσα δύναμη – Βύθιση για δοκίμια χωρίς αγκύρωση σε σχέση με τα μητρικά
- Σχήμα 5.2 Διάγραμμα Τέμνουσας δύναμης – Βύθισης για δοκίμια με αγκύρωση σε σχέση με τα μητρικά



Σχήμα 5.3 Διάγραμμα Τέμνουσας δύναμης – Βύθισης για δοκίμια ΑΙΟΠ σε σχέση με τα μητρικά

Σχήμα 5.4 Διάγραμμα Τέμνουσας δύναμης – Βύθισης για δοκίμια ΧΙΟΠ σε σχέση με τα μητρικά

Σχήμα 5.5 Συγκριτικό Διάγραμμα Περιβαλλουσών καμπύλων τέμνουσας δύναμης – μετακίνησης

Σχήμα 5.6 Καταγεγραμμένες διατμητικές φέρουσες ικανότητες των μητρικών δοκιμίων καθώς και των δοκιμίων με χρήση διατμητικής ενίσχυσης ΧΙΟΠ και ΑΙΟΠ τόσο για τις ορθογωνικές δοκούς όσο και για πλακοδοκούς.

#### **Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> – Ανάλυση κανονισμών και αναλυτικών μοντέλων - Προτάσεις επέκτασης έρευνας**

Σχήμα 6.1. Διακύμανση σφάλματος για προβλεπόμενες προς πειραματικές τιμές  $V_f$

Σχήμα 6.2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πλακοδοκού.

Σχήμα 6.3 Λόγος πειραματικών  $V_f$  προς αναλυτικών  $V_f$  υπολογιζόμενων βάση κανονισμών για ενισχυμένες δοκούς χωρίς χρήση αγκυρώσεων που αστόχησαν λόγω αποκόλλησης των ΙΟΠ

Σχήμα 6.4 Λόγος (  $V_{f,exp} / V_{f,ana}$  ) πειραματικών  $V_f$  προς αναλυτικών  $V_f$  υπολογιζόμενων βάση κανονισμών για ενισχυμένες δοκούς με χρήση αγκυρώσεων που υποβλήθηκαν σε μονότονη φόρτιση

Σχήμα 6.5 Λόγος (  $V_{f,exp} / V_{f,ana}$  ) πειραματικών  $V_f$  προς αναλυτικών  $V_f$  υπολογιζόμενων βάση κανονισμών για ενισχυμένες δοκούς με χρήση αγκυρώσεων που αστόχησαν λόγω θραύσης των ΙΟΠ



## Λίστα Πινάκων

### Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> – Εισαγωγή

Πίνακας 1.1 Μηχανικές ιδιότητες διαφόρων ινών

### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> – Κατασκευή τριών τύπων δοκιμίων - Πειραματικές Διατάξεις

Πίνακας 3.1α. Αντοχές σκυροδέματος απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ

Πίνακας 3.1β. Αντοχές σκυροδέματος δοκιμίων ορθογωνικών δοκών Ο/Σ

Πίνακας 3.1γ. Αντοχές σκυροδέματος δοκιμίων πλακοδοκού Ο/Σ

Πίνακας 3.2. Μηχανικές Ιδιότητες Δομικού Χάλυβα

Πίνακας 3.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά ΑΙΟΠ (CFRP)

Πίνακας 3.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά εποξειδικής ρητίνης

Πίνακας 3.5 Λεπτομέρειες Δοκιμίων απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ

Πίνακας 3.6 Λεπτομέρειες Δοκιμίων Δοκού Ορθογωνικής Διατομής

Πίνακας 3.7 Λεπτομέρειες μητρικών δοκιμίων διατομής πλακοδοκού

### Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> – Πειραματικά Αποτελέσματα

Πίνακας 4.1 Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμίων ΑΙΟΠ

Πίνακας 4.2 Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμίων ενισχυμένων με ΑΙΟΠ με αγκύρωση θυσάνου

Πίνακας 4.3 Πειραματικά αποτελέσματα απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ ενισχυμένων με ΧΙΟΠ

### Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> – Συγκριτική Αξιολόγηση

Πίνακας 5.1 Συγκριτικά αποτελέσματα των απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ

Πίνακας 5.2 Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών φορτίων αποκόλλησης

Πίνακας 5.3 Συγκριτικά αποτελέσματα ορθογωνικών δοκιμίων (ΧΙΟΠ ή ΑΙΟΠ)

Πίνακας 5.4 Ποσοστά αύξησης φέρουσας ικανότητας

Πίνακας 5.5<sup>α</sup> Ποσοστό εκμετάλλευσης υλικού

Πίνακας 5.5<sup>β</sup> Ποσοστό εκμετάλλευσης υλικού

Πίνακας 5.6 Σύγκριση μετρημένης – υπολογισμένης τέμνουσας

Πίνακας 5.7 Συγκριτικά αποτελέσματα πλακοδοκών Ο/Σ

Πίνακας 5.8<sup>α</sup> Ποσοστά αύξησης φέρουσας ικανότητας και μετακίνησης δοκιμίων διατομής πλακοδοκού

Πίνακας 5.8.β Φέρουσα διατμητική ικανότητα των αντίστοιχων δοκιμίων Ο/Σ ορθογωνικής διατομής

Πίνακας 5.9 Αναπτυσσόμενων παραμορφώσεις – Ποσοστό εκμετάλλευσης ΜΕΙ

Πίνακας 5.10 Σύγκριση μετρημένης και υπολογιζόμενης τέμνουσας

Πίνακας 5.11 Καταναλισκόμενη ενέργεια για κάθε δοκίμιο

### Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> – Ανάλυση κανονισμών και αναλυτικών μοντέλων - Προτάσεις επέκτασης έρευνας

Πίνακας 6.1 Πειραματικά δεδομένα διατμητικά ενισχυμένων πλακοδοκών με ΙΟΠ.

Πίνακας 6.1<sup>α</sup> Παράθεση των δεδομένων που περιγράφονται στα σχήματα 6.3-6.5



## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> – Εισαγωγή

### 1.1 Ενίσχυση κατασκευών Ο/Σ με ινοπλισμένα πολυμερή

Τις τελευταίες δεκαετίες αυξάνεται, ολοένα και περισσότερο, η ανάγκη να επισκευαστούν, ενισχυθούν και να διατηρηθούν κατασκευές όπως γέφυρες, φράγματα, κτήρια κλπ. που οφείλεται κυρίως στα εξής:

α) Η ηλικία σε πολλές κατασκευές Ο/Σ είναι μεγάλη και ως εκ τούτου αρχίζουν να φθείρονται, να απαξιώνονται και να υποβαθμίζονται ποιοτικά.

β) Υπάρχει ανάγκη, πολλές φορές, να αυξηθούν οι απαιτήσεις φορτίσεων μιας κατασκευής, λόγω αλλαγής χρήσης ή εφαρμογής νέων αντισεισμικών κανονισμών.

γ) Το κόστος για την κατασκευή νέων υποδομών και κτηρίων είναι συνήθως μεγαλύτερο από το κόστος επισκευής και ενίσχυσης υφιστάμενων υποδομών/κατασκευών

Στη βιομηχανία των κατασκευών τα σύνθετα υλικά εμφανίζονται για πρώτη φορά για να ενισχύσουν κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος (Ο/Σ) στα μέσα της δεκαετίας του 1950 [1]. Κατά τα τέλη του 1970 και αρχές του 1980, πολλές εφαρμογές των ινοπλισμένων πολυμερών έλαβαν χώρα σε Ευρώπη και Ασία. Το 1986, χτίστηκε στη Γερμανία η πρώτη γέφυρα αυτοκινητοδρόμου στον κόσμο χρησιμοποιώντας τένοντες από σύνθετα υλικά. Το πρώτο κατάστρωμα γέφυρας εξολοκλήρου από σύνθετα υλικά κατασκευάστηκε στην Κίνα. Ενώ η πρώτη πεζογέφυρα εγκαταστάθηκε το 1992 στο Aberfeldy της Σκωτίας. Στις ΗΠΑ, το πρώτο κατάστρωμα γέφυρας εξολοκλήρου από σύνθετα υλικά χτίστηκε το 1996 στο McKinleyville, W.Va, ακολουθούμενο από την πρώτη γέφυρα οχημάτων στο Russell, Κάνσας. Είναι σαφές ότι στον τομέα των κατασκευών η χρήση των σύνθετων υλικών είναι σχετικά καινούργια.

Η χρήση των σύνθετων υλικών για την ενίσχυση των κατασκευών κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος. Μια σημαντική εξέλιξη, για έργα του πολιτικού μηχανικού, είναι η επικόλληση εξωτερικών λωρίδων για την ενίσχυση και την αποκατάσταση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος (Ο/Σ) αλλά και κατασκευών από χάλυβα. Η εφαρμογή των σύνθετων ινών είναι σχετικά πιο εύκολη σε σχέση με τις προϋπάρχουσες παραδοσιακές μεθόδους ενίσχυσης, όπως αυτή των μανδύων Ο/Σ ή αυτή των επικολλημένων φύλλων χάλυβα.

Τα πιο συνηθισμένα ινοπλισμένα πολυμερή χρησιμοποιούν ίνες άνθρακα (CFRP), ίνες ύαλου (GFRP), καθώς και ίνες αραμιδίου (AFRP). Τελευταία πραγματοποιείται μια προσπάθεια ανάπτυξης νέων σύνθετων υλικών με πιθανόν καλύτερες ιδιότητες από τα προηγούμενα. Οι ίνες από χάλυβα υψηλής αντοχής (SRP), για παράδειγμα, και οι κεραμικές ίνες, άρχισαν να ερευνώνται ως εναλλακτικό υλικό χρήσης. Παρά το γεγονός ότι πολλές δοκιμές έχουν διεξαχθεί σχετικά με τις επιδόσεις των ενισχυμένων με σύνθετα υλικά δομικών στοιχείων, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλές πτυχές της χρήσης τους, που δεν έχουν ακόμη να διερευνηθεί.

Η χρήση αυτών των υλικών έχει σαφέστατα και κάποια μειονεκτήματα. Τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι λοιπόν ευπαθή στη φωτιά και σε κάποιες περιπτώσεις επηρεάζονται από την υπερϊώδη ακτινοβολία (UV).



Όπως αναφέρθηκε τα πιο κοινά υλικά ινοπλισμένων πολυμερών για τις κατασκευές είναι ο άνθρακας, το γυαλί και το αραμίδιο. Τα παραπάνω υλικά έχουν διερευνηθεί στο παρελθόν από πολλούς ερευνητές [4-25]. Τα τελευταία χρόνια, μετά το 2004, έχει δημιουργηθεί ένα καινούργιο ερευνητικό ενδιαφέρον που αφορά στην εισαγωγή ινών χάλυβα υψηλής αντοχής εναλλακτικά με τα προαναφερθέντα υλικά [2-9]. Τα ινοπλισμένα πολυμερή από ίνες χάλυβα (SRP) υπερέχουν σε σχέση με αυτά από ίνες άνθρακα, γυαλιού και αραμιδίου λόγω του ότι είναι πολύ πιο πλάσטיμα κρατώντας υψηλά τις αντοχές για σχετικά μεγαλύτερες τιμές της παραμόρφωσης. Ο πίνακας 1.1 δείχνει τις ιδιότητες του κάθε υλικού.

**Πίνακας 1.1 Μηχανικές ιδιότητες διαφόρων ινών**

	Glass	Carbon	Aramid	Χάλυβας
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	1300-3400	2000-5600	2500-3620	1500-3500
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	22-62	150-325	48-76	185-210
Μέγιστη Παραμόρφωση (mm/mm)	0.03-0.5	0.01-0.015	0.02-0.036	0.04
Συντελεστής θερμικής διαστολής (10 <sup>-6</sup> m/m/°K)	5.5	0.0	-0.5	6.5
Σημείο Τήξης (°C)	1100	310	420	1300
Πυκνότητα (gr/cm <sup>3</sup> )	2.5-2.6	1.7	1.4	7.9

Η παρούσα ερευνητική εργασία έχει σα στόχο τη διερεύνηση της χρήσης των εξωτερικά επικολλημένων ινών από χάλυβα υψηλής αντοχής (ΧΙΟΠ) ως μια εναλλακτική μέθοδο ενίσχυσης των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα η διερεύνηση αφορά στη διατμητική ενίσχυση δομικών στοιχείων από Ο/Σ τόσο σε μονότονη όσο και σε ανακυκλιζόμενη σεισμικού τύπου φόρτιση. Επίσης σημαντικό ενδιαφέρον έχει η διερεύνηση και ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας αγκύρωσης, τόσο για τα υπό διερεύνηση χαλύβδινα ινοπλισμένα πολυμερή όσο και για τα παραδοσιακά πολυμερή από ίνες άνθρακα.

## 1.2 Στόχοι

Οι στόχοι της παρούσας ερευνητικής διερεύνησης είναι:

- Να διερευνηθεί η δυνατότητα χρήσης εξωτερικά επικολλημένων ΧΙΟΠ για τη διατμητική ενίσχυση ορθογωνικών δοκών και πλακοδοκών οπλισμένου σκυροδέματος.



- Να χρησιμοποιηθούν διάφορες μορφές και τύποι αγκυρώσεων των λωρίδων ΙΟΠ και να εξεταστεί η συμπεριφορά τους και η επίδραση τους τόσο στις λωρίδες όσο και στο δομικό στοιχείο που καλείται να ενισχυθεί διατμητικά.
- Να διερευνηθεί η επιρροή της επεξεργασίας της διεπιφάνειας στην περίπτωση χρήσης κάποιας μορφής αγκύρωσης λωρίδων ΙΟΠ.
- Να διερευνηθούν οι συνθήκες παραμόρφωσης των λωρίδων ΙΟΠ και να μελετηθούν οι πραγματοποιήσιμες φέρουσες ικανότητες σε σύγκριση με τις ιδεατές τόσο των ατσαλονημάτων (ΧΙΟΠ) όσο και των ανθρακονημάτων (ΑΙΟΠ).
- Να εξεταστεί ο σχεδιαστικός τρόπος υπολογισμού της διατμητικής ενίσχυσης με εξωτερικά επικολλημένα ΙΟΠ που προτείνεται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. επί τη βάση των αποτελεσμάτων του παρόντος ερευνητικού έργου καθώς και της βιβλιογραφίας

### 1.3. Διάρθρωση Εργασίας

Η παρούσα ερευνητική εργασία συμπεριλαμβάνει τρία πειραματικά τμήματα:

1. Δοκιμές αποκόλλησης λωρίδων ΙΟΠ από απλά τμήματα διατομών πλακοδοκού και προκαταρκτική μελέτη τύπων αγκύρωσης τους.
2. Δοκιμές μονότονης κάμψης τεσσάρων σημείων δοκιμίων δοκών Ο/Σ ορθογωνικής διατομής ενισχυμένων διατμητικά με εξωτερικά επικολλημένα ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ. Στη φάση αυτή ελέγχθηκε η επιρροή της αγκύρωσης των λωρίδων ΑΙΟΠ ή ΧΙΟΠ στις παρειές των δοκιμίων των δοκών.
3. Δοκιμές ανακυκλιζόμενης φόρτισης δοκιμίων πλακοδοκών Ο/Σ ενισχυμένων διατμητικά με εξωτερικά επικολλημένα ΧΙΟΠ. Ελέγχθηκαν επίσης και διάφοροι τύποι αγκύρωσης των λωρίδων ΧΙΟΠ στα εν λόγω δοκίμια των πλακοδοκών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται ανάλυση της βιβλιογραφίας που σχετίζεται με τη διατμητική ενίσχυση με χρήση ΙΟΠ. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ιδιότητες των υλικών, οι τρεις τύποι δοκιμίων, δηλαδή απλά τμήματα διατομών πλακοδοκού Ο/Σ, ορθογωνικές δοκοί Ο/Σ και πλακοδοκοί Ο/Σ, καθώς και οι αντίστοιχες τρεις πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο των εν λόγω δοκιμίων. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα από τις τρεις πειραματικές φάσεις, ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Τέλος στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται ανάλυση και σύγκριση κανονισμών και αναλυτικών μοντέλων με έμφαση στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. Τέλος στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια σχόλια για περαιτέρω ανάπτυξη της έρευνας στον τομέα αυτό.



## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η χρήση ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ) για την ενίσχυση δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος έχει περιέλθει στο επίκεντρο της ερευνητικής δράσης πολλών επιστημόνων [10-33]. Ενώ η καμπτική ενίσχυση έχει μελετηθεί διεξοδικά και μοντέλα τόσο ανάλυσης όσο και σχεδιασμού έχουν γίνει αποδεκτά, η διατμητική ενίσχυση με χρήση ΙΟΠ χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Ειδικότερα οι μορφές της που έχουν πρακτική εφαρμογή, όπως αυτές που δεν περιτυλίζουν τη διατομή των στοιχείων αλλά κάνουν χρήση αγκυρίων για τη μεταβίβαση των δυνάμεων που αναλαμβάνουν [5]. Έχει αποδειχθεί ότι η διατμητική αντοχή δομικών στοιχείων από Ο/Σ μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση εξωτερικά επικολλημένων μανδύων ΙΟΠ, τόσο με χρήση ανθρακονημάτων (ΑΙΟΠ) όσο και με χρήση υαλονημάτων (ΥΙΟΠ). Τα σύνθετα αυτά υλικά μπορεί να έχουν τη μορφή ολόσωμων μανδύων ή λωρίδων που τοποθετούνται ανά κάποια απόσταση. Οι ίνες των ΙΟΠ τοποθετούνται συνήθως κάθετα τον άξονα του δομικού στοιχείου. Πρέπει να σημειωθεί ότι στα περισσότερα ερευνητικά προγράμματα έχουν χρησιμοποιήσει ΑΙΟΠ, ενώ υπάρχει σημαντική έλλειψη πειραματικών δεδομένων σχετικά με χρήση άλλων τύπων ινών [34].

Πάρα πολλές παράμετροι υπεισέρχονται στο πρόβλημα κάνοντας το πολυσύνθετο. Μερικές από τις παραμέτρους αυτές είναι η συνάφεια του μηχανισμού επικόλλησης, οι τύποι των ρητινών και των ινών, η διάταξη της ενίσχυσης, η ύπαρξη αγκυρίων και η ψαθυρή αστοχία των ινών. Τα υπάρχοντα ερευνητικά αποτελέσματα, παρότι αρκετά στον αριθμό, προέρχονται από μικρό αριθμό μεμονωμένων δοκιμών και κατά συνέπεια δεν αποτελούν μια συνολική αντιμετώπιση του προβλήματος [5].

Ένας σημαντικός αριθμός ερευνητικών προγραμμάτων έχουν εκπονηθεί σχετικά με την ενίσχυση της διατμητικής αντοχής αμφιέριστων δοκών ορθογωνικής διατομής με χρήση ινοπλισμένων πολυμερών. Ωστόσο, ένας σχετικά περιορισμένος αριθμός ερευνητών [29, 35-37] έχει ασχοληθεί με τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών για τη διατμητική ενίσχυση πλακοδοκών, που αποτελεί και την πιο συνηθισμένη εφαρμογή. Ακόμα λιγότερες είναι οι έρευνες που διεξήχθησαν με σκοπό την προσομοίωση συνεχών δοκών στη στήριξή τους μέσω της εξέτασης δοκιμών μορφής προβόλου με διατομή πλακοδοκού που υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση [38-41], που αποτελούν την πιο ρεαλιστική μορφή της απαίτησης για διατμητική ενίσχυση. Τα ελάχιστα πειραματικά δεδομένα αναφορικά με το πρόβλημα της διατμητικής ενίσχυσης δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με ΧΙΟΠ [42], δεν είναι αρκετά για την διατύπωση κανόνων σχεδιασμού για τη συγκεκριμένη μεθοδολογία ενίσχυσης με δυνατότητες αποτελεσματικής εφαρμογής. Γενικά, αν και η διατμητική αστοχία δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων με διάφορων τύπων ΙΟΠ έχει ερευνηθεί [26, 28, 30-32, 35, 37-41, 43-49], πιστεύεται ότι και περαιτέρω έρευνα είναι αναγκαία.

Οι Bousselham και Chaallal [30] επισήμαναν ότι η σχέση μεταξύ της ενεργής παραμόρφωσης και της δυσκαμψίας των ΙΟΠ χρησιμοποιήθηκε από πολλούς ερευνητές και παίζει πάρα πολύ σημαντικό ρόλο στην απόδοση της ενίσχυσης. Επιπρόσθετα υπογράμμισαν ότι θραύση των ινών στα ΙΟΠ πετυχαίνεται μόνο εφόσον αυτά περιτυλιχτούν πλήρως γύρω από τη διατομή ή χρησιμοποιηθούν μηχανικά αγκύρια. Στο ίδιο συμπέρασμα έφτασε και ο Tanarslan [40] ο οποίος έκανε πειράματα σε δοκίμια αντίστοιχα με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα (με κύρια διαφορά το ότι χρησιμοποίησε ΑΙΟΠ αντί ΧΙΟΠ) δείχνουν ότι η βέλτιστη λύση είναι η χρήση αγκυρίων. Μάλιστα ορισμένα από τα δοκίμια απέφυγαν την ψαθυρή διατμητική αστοχία αστοχώντας καμπτικά. Παρόμοια ευρήματα ανέφερε και ο Anil [38, 39].





Πιο συγκεκριμένα, ο Anil [39], διενήργησε πειράματα σε πλακοδοκούς ενισχυμένες διατμητικά με λωρίδες τοποθετημένες υπό γωνία 45 μοιρών με χρήση μηχανικών αγκυρίων και έφτασε στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος υπολογισμού που προτείνεται από το ACI υποτιμά την διατμητική αντοχή που παρέχεται από τα ΑΙΟΠ. Ο ίδιος ερευνητής σε μια άλλη σειρά πειραμάτων [38], χρησιμοποίησε λωρίδες και υφάσματα ΑΙΟΠ τα οποία τοποθετήθηκαν κάθετα στον κύριο άξονα της δοκού χρησιμοποιώντας μηχανικά αγκύρια. Από τα πειραματικά δεδομένα έγινε σαφές ότι η χρήση αγκυρίων αυξάνει σημαντικά την απόδοση των ΑΙΟΠ. Επιπρόσθετα, η τοποθέτηση ανοιχτού τύπου πλευρικής (επικόλληση μόνο στις παρειές της δοκού) ενίσχυσης σε συνάρτηση με χρήση χαμηλής ποιότητας σκυροδέματος και την έλλειψη μεταλλικών συνδετήρων, οδήγησε σε αστοχία του σκυροδέματος λόγω λυγισμού του διαμήκους οπλισμού. Ένα ακόμα σημαντικό συμπέρασμα είναι το ότι η χρήση συνεχών υφασμάτων δεν προσφέρει επιπρόσθετη αντοχή σε σχέση με τη χρήση λωρίδων ΑΙΟΠ. Το ίδιο συμπέρασμα έβγαλαν και οι Khalifa και Nanni [35] οι οποίοι εξέτασαν την παραμόρφωση των ΑΙΟΠ και δε χρησιμοποίησαν αγκύρια.

Ο Tanarslan [40, 41] πραγματοποίησε δυο σειρές πειραμάτων αντίστοιχες με αυτή του Anil [38] και παρατήρησε ότι μόνο με τη χρήση αγκυρίων και συνεχών λωρίδων ΑΙΟΠ τύπου U μπορεί κανείς να αποφύγει αστοχίες που βασίζονται στην αποκόλληση των ΑΙΟΠ και να φτάσει σε θραύση των ΑΙΟΠ φτάνοντας σε ενεργές παραμορφώσεις που ξεπερνούν τα 0,006 (τιμή σημαντικά ψηλότερη από το όριο που δίνουν οι κανονισμοί). Στην περίπτωση που δε χρησιμοποιούνται αγκύρια οι ενεργές παραμορφώσεις των ΑΙΟΠ δεν ξεπέρασαν τα 0,0036.

Οι Bousselham και Challal [29] διευκρίνισαν ότι η χρήση μανδύα για τη διατμητική ενίσχυση δε αποφέρει οφέλη σε σχέση με τη χρήση λωρίδων. Υπάρχει μια βέλτιστη απόσταση ανάλογα με το τύπο των λωρίδων που χρησιμοποιούνται. Σύμφωνα με τον Τριανταφύλλου [26] οι αποστάσεις μεταξύ των λωρίδων ΙΟΠ δε θα πρέπει να ξεπερνάν την απόσταση  $0.8d$ , και σύμφωνα με τους Khalifa and Nanni [35] η απόσταση  $s_f$  θα πρέπει να είναι μικρότερη από:

$$s_f \leq w_f + \frac{d}{4} \quad (1.1)$$

όπου  $w_f$  είναι το πλάτος της λωρίδας των ΑΙΟΠ. Ο περιορισμός της απόστασης έχει ως σκοπό όλες οι διατμητικές ρηγματώσεις να αντιστέκονται από τα εξωτερικά επικολλώμενα ΙΟΠ.

Σε αρκετές περιπτώσεις ερευνητές χρησιμοποίησαν ΧΙΟΠ για την ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος [2-6, 8, 10, 50, 51]. Στις έρευνες αυτές όμως τα ΧΙΟΠ χρησιμοποιήθηκαν σαν καμπτικός οπλισμός και όχι σαν διατμητικός. Για την ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι υπολογισμού αντίστοιχοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται για τα ΑΙΟΠ

Πρέπει να σημειωθεί παρότι οι ίνες είναι διαφορετικές στα δυο συστήματα ενίσχυσης η επικόλληση τους στο σκυρόδεμα γίνεται με τη χρήση παρόμοιου τύπου ρητινών και κατά συνέπεια η λογική που διέπει την ανάλυση και διαστασιολόγηση ενισχυμένων δομικών στοιχείων Ο/Σ είναι η ίδια.

Έχουν γίνει κάποιες προσπάθειες [26, 31, 32, 49, 52] για τη συγκέντρωση των πειραματικών δεδομένων από διάφορους ερευνητές οι οποίοι προσπάθησαν να ποσοτικοποιήσουν τα αποτελέσματα με σκοπό να καταλήξουν σε κάποιες βασικές μεθόδους ανάλυσης και σχεδιασμού. Από μεριάς



κανονισμών οι πρώτες προσπάθειες έγιναν τόσο από το ACI [53] όσο και από το FIB [34], που βασίστηκαν σε δημοσιευμένες εργασίες των Khalifa [35] και Τριανταφύλλου [26, 49] αντίστοιχα.

Στη σημερινή πρακτική, βάση όλων των υπαρχόντων κανονισμών, η συνολική αντίσταση ενός δοκιμίου οπλισμένου σκυροδέματος ισούται με το άθροισμα της αντίστασης που παρέχεται από τη διατομή του σκυροδέματος συν την αντίσταση που παρέχεται από το διατμητικό οπλισμό (συνδετήρες). Στην περίπτωση που ένα δομικό στοιχείο Ο/Σ έχει ενισχυθεί με ΙΟΠ τότε η συνολική αντοχή του στοιχείου επαυξάνεται με έναν ακόμα όρο, τη συμβολή των ΙΟΠ στην διατμητική αντοχή του δοκιμίου, που προστίθεται στο παραπάνω άθροισμα.

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. [54], η Διεθνής Ομοσπονδία Σκυροδέματος [34], ο Ευρωκώδικας [55] και ο Αμερικάνικος κανονισμός σχεδιασμού [53], θεωρούν ότι τα εξωτερικά επικολλημένα ΙΟΠ συμπεριφέρονται σαν πρόσθετος οπλισμός διάτμησης παρόμοια με τους εσωτερικούς συνδετήρες. Αυτό επιτυγχάνεται κάνοντας την υπόθεση ότι τα ΙΟΠ μεταφέρουν μόνο αξονικές τάσεις στη βασική διεύθυνση των ινών και επίσης ότι έως την διατμητική αστοχία τα ΙΟΠ παραμορφώνονται λιγότερο από τη μέγιστη δυνατή (ιδεατή) παραμόρφωση.

### **ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ**

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα [43] η τέμνουσα αντοχής σχεδιασμού λόγω οπλισμού διάτμησης  $V_{Rd3}$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_{Rd3} = V_{cd} + V_{wd} + V_{fd} \quad (1.2)$$

Όπου  $V_{cd}$  είναι η τέμνουσα που παραλαμβάνεται από το σκυρόδεμα,  $V_{wd}$  η τέμνουσα που παραλαμβάνεται από τους συνδετήρες και  $V_{rd,f}$  η τέμνουσα που παραλαμβάνει το ΙΟΠ, η οποία υπολογίζεται βάση των ακόλουθων σχέσεων:

-Για κλειστού τύπου περιτύλιξη και για επικόλληση τύπου U:

$$V_{rd,f} = 0,9d \cdot f_{fd,e} \cdot 2 \cdot t_f \cdot \left( \frac{w_f}{s_f} \right)^2 \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \sin \beta \quad (1.3)$$

-Για ΙΟΠ επικολλημένα μόνο στις παρειές της δοκού:

$$V_{rd,f} = 0,9d \cdot f_{fd,e} \cdot 2 \cdot t_f \cdot \frac{\sin \beta}{\sin \theta} \cdot \frac{w_f}{s_f} \quad (1.4)$$

Όπου:

$d$  είναι το ενεργό βάθος,  $\theta$  είναι η γωνία μεταξύ των διατμητικών ρηγματώσεων και της κύριας διεύθυνσης της δοκού,  $f_{fd,e}$  είναι τιμή σχεδιασμού της ενεργής αντοχής αποκόλλησης του ΙΟΠ,  $t_f$  είναι το πάχος του ΙΟΠ,  $\beta$  η γωνία μεταξύ της κύριας διεύθυνσης των ινών και του άξονα του δομικού στοιχείου,  $s_f$  είναι η απόσταση μεταξύ των ΙΟΠ (κεντρικά) και  $w_f$  είναι το πλάτος των ΙΟΠ (σε περίπτωση χρήσης ολόσωμου μανδύα  $w_f = \min(0,9d, h_w) \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ ).



Για πλήρως περιτυλιγμένα ΙΟΠ ή αγκυρωμένα (στη θλιπτική ζώνη), η τιμή σχεδιασμού της ενεργής αντοχής αποκόλλησης του ΙΟΠ που χρησιμοποιείται στις εξισώσεις (3) και (4) υπολογίζεται ως:

$$f_{fdd,e,W} = f_{fdd} \cdot \left[ 1 - k \frac{L_e \sin \beta}{2z} \right] + \frac{1}{2} (f_{fu,W(R)} - f_{fdd}) \cdot \left[ 1 - \frac{L_e \sin \beta}{z} \right] \quad (1.5)$$

Όπου  $z=0,9d$ ,  $k=(1-2/\pi)$  και  $f_{fdd}$  είναι η τιμή σχεδιασμού της αντοχής αποκόλλησης:

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{fd}} \sqrt{0,6 \frac{E_f \cdot f_{ctm} \cdot k_b}{t_f}} \quad (N, mm) \quad (1.6)$$

Όπου  $\gamma_{fd}$  είναι ο συντελεστής σχετικός με την αποκόλληση του FRP

$E_f$  το μέτρο ελαστικότητας του ΙΟΠ,  $f_{ctm}$  η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Ο συντελεστής επικάλυψης  $k_b$  δίνεται από τη σχέση:

$$k_b = \sqrt{\frac{1,5 \cdot \left( 2 - \frac{w_f}{s_f} \right)}{\left( 1 + \frac{w_f}{100 mm} \right)}} \quad (1.7)$$

Ο όρος  $f_{fu,W(R)}$  είναι η μέγιστη αντοχή του ΙΟΠ που περιτυλίγεται γύρω από γωνία με ακτίνα  $R$  και δίνεται από τη σχέση:

$$f_{fu,W(R)} = f_{fdd} + \langle \eta_R \cdot f_{fu} - f_{fdd} \rangle \quad (1.8)$$

Όπου ο δεύτερος όρος  $\langle \eta_R \cdot f_{fu} - f_{fdd} \rangle$  πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μόνο αν είναι θετικός και όπου ο συντελεστής  $\eta_R$  εξαρτάται από την ακτίνα καμπυλότητας  $R$  και το πλάτος του δομικού στοιχείου  $b_w$ :

$$\eta_R = 0,2 + 1,6 \frac{R}{b_w} \quad 0 \leq \frac{R}{b_w} \leq 0,5 \quad (1.9)$$

$L_e$  είναι το ενεργό μήκος αγκύρωσης του ΙΟΠ:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{4 \cdot \tau_{max}}} \quad (\muονάδες : N, mm) \quad (1.10)$$

Όπου  $\tau_{max}$  είναι η μέγιστη αντοχή συνάφειας  $\tau_{max} = 1,8 f_{ctm} k_b$

Στην περίπτωση χρήσης ανοικτού τύπου ΙΟΠ (μορφής U) χωρίς χρήση αγκυρίων η τιμή σχεδιασμού της ενεργής αντοχής αποκόλλησης του ΙΟΠ που χρησιμοποιείται στις εξισώσεις (3) και (4) υπολογίζεται ως:

$$f_{fdd,e,U} = f_{fdd} \cdot \left[ 1 - k \frac{L_e \sin \beta}{z} \right] \quad (1.11)$$



Σε περίπτωση χρήσης πλευρικών μόνο ΙΟΠ χωρίς αγκύρια η τιμή σχεδιασμού της ενεργής αντοχής αποκόλλησης του ΙΟΠ που χρησιμοποιείται στις εξισώσεις (3) και (4) υπολογίζεται ως:

$$f_{fd,e,s} = f_{fd} \cdot \frac{z_{rid,eq}}{z} \cdot \left(1 - \sqrt{k \frac{L_{eq}}{z_{rid,eq}}}\right)^2 \quad (1.12)$$

Όπου:

$$z_{rid,eq} = z_{rid} + L_{eq}, \quad z_{rid} = z - L_e \cdot \sin \beta, \quad L_{eq} = \frac{u_1}{\varepsilon_{fd}} \cdot \sin \beta \quad (1.13)$$

Οι όροι  $\varepsilon_{fd}$  και  $u_1$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$\varepsilon_{fd} = f_{fd} / E_f, \quad u_1 = k_b / 3 \quad (1.14)$$

#### **ΔΙΕΘΝΗΣ ΟΜΟΣΠΟΝΔΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (FIB)**

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ομοσπονδία Σκυροδέματος [34] η τέμνουσα αντοχής σχεδιασμού λόγω οπλισμού διάτμησης  $V_{Rd3}$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_{Rd3} = V_{cd} + V_{wd} + V_{fd} \quad (1.15)$$

Όπου  $V_{cd}$  είναι η τέμνουσα που παραλαμβάνεται από το σκυρόδεμα,  $V_{wd}$  η τέμνουσα που παραλαμβάνεται από τους συνδετήρες και  $V_{fd}$  η τέμνουσα που παραλαμβάνει το ΙΟΠ, η οποία υπολογίζεται βάση της σχέσης:

$$V_{fd} = E_f \varepsilon_{fde} \rho_f b_w z_f (1 + \cot \beta) \sin \beta \quad (1.16)$$

Όπου  $\varepsilon_{fde}$  είναι η τιμή σχεδιασμού ενεργής παραμόρφωσης των ΙΟΠ,  $b_w$  είναι το πλάτος της δοκού και  $E_f$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του ΙΟΠ. Η γωνία  $\beta$  περιγράφει τη διεύθυνση των ινών σε σχέση με τον άξονα της δοκού. Η απόσταση  $z_f$  υπολογίζεται σαν  $0.9d_f$  στον Ευρωκώδικα και σαν  $d_f$  σύμφωνα με το ACI. Όπου  $d_f$  είναι το ενεργό βάθος των ΙΟΠ υπολογισμένο από το κέντρο του καμπτικού οπλισμού. Το ποσοστό του οπλισμού ΙΟΠ  $\rho_f$  μπορεί να υπολογιστεί βάση της επόμενης σχέσης:

$$\rho_f = \frac{2t_f w_f}{b_w s_f} \quad (1.17)$$

Όπου  $t_f$  είναι το πάχος του ΙΟΠ,  $w_f$  είναι το πλάτος της λωρίδας ΙΟΠ,  $s_f$  είναι η απόσταση μεταξύ των λωρίδων ΙΟΠ (από κέντρο σε κέντρο) το οποίο ισούται με  $w_f$  όταν χρησιμοποιείται συνεχής μανδύας.

Η τιμή σχεδιασμού  $\varepsilon_{fde}$  λαμβάνεται ως

$$\varepsilon_{fde} = \frac{\varepsilon_{fke}}{\gamma_f} \quad (1.18)$$



Όπου  $\varepsilon_{fke}$  είναι η χαρακτηριστική τιμή παραμόρφωσης και το  $\gamma_f$  είναι συντελεστής ασφάλειας.

Η χαρακτηριστική ενεργή παραμόρφωση λαμβάνεται ως:

$$\varepsilon_{fke} = 0.8 \varepsilon_{fe} \quad (1.19)$$

Τα ΙΟΠ στην πράξη δε μπορούν να φτάσουν τη μέγιστη (ιδεατή) παραμορφωσιμότητα και κατά συνέπεια η παραμόρφωση σχεδιασμού υπολογίζεται για τα ΙΟΠ ως ενεργή παραμόρφωση  $\varepsilon_{fe}$  η οποία δίδεται γενικά από τη σχέση

$$\varepsilon_{fe} = R \varepsilon_{fu} \quad (1.20)$$

Όπου R είναι ένας μειωτικός συντελεστής και  $\varepsilon_{fu}$  είναι η μέγιστη παραμόρφωση του ΙΟΠ.

Οι Τριανταφύλλου και ο Αντωνόπουλος (2000) βασισμένοι σε στατιστική ανάλυση 75 πειραμάτων χρησιμοποίησαν αντί του  $\varepsilon_{fe}$  την χαρακτηριστική ενεργή παραμόρφωση ( $\varepsilon_{fke}=0.8\varepsilon_{fe}$ ). Η τιμή αυτή υιοθετήθηκε από τον FIB [25]. Πιο συγκεκριμένα για κλειστού τύπου (περιτυλιγμένα) ΑΙΟΠ

$$\varepsilon_{fke} = 0.8 \times 0.17 \left( f_c^{2/3} / \rho_f E_f \right)^{0.3} \varepsilon_{fu} \quad (1.21)$$

Ενώ για ανοικτά φύλλα ΑΙΟΠ όπου η πρόωμη αστοχία οφείλεται στην αποκόλληση των ΙΟΠ

$$\varepsilon_{fke} = \min \left[ 0.8 \times 0.65 \left( f_c^{2/3} / \rho_f E_f \right)^{0.56} \times 10^{-3} ; 0.8 \times 0.17 \left( f_c^{2/3} / \rho_f E_f \right)^{0.3} \varepsilon_{fu} \right] \quad (1.22)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν με  $f_c$  σε MPa,  $E_f$  σε GPa και  $z_f=0.9d_f$ . Οι παραπάνω εξισώσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η ενεργή παραμόρφωση των ΙΟΠ εξαρτάται από την ποιότητα του σκυροδέματος (εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος) και την δυσκαμψία των ΙΟΠ. Οι ρόλοι που παίζουν εξαρτώνται από τον τύπο αστοχίας του δομικού στοιχείου. Για παράδειγμα η αντοχή του σκυροδέματος παίζει πολύ σημαντικό ρόλο όταν το ΙΟΠ αποκολλάται από το σκυρόδεμα. Όταν όμως η διατμητική αστοχία συνοδεύεται ή ακολουθείται από τη θραύση των ΙΟΠ τότε η ποιότητα του σκυροδέματος δεν παίζει σημαντικό ρόλο αλλά αντιθέτως η ενεργή παραμόρφωση των ΙΟΠ εξαρτάται κυρίως από την δυσκαμψία τους.

Η μείωση του  $\varepsilon_{fe}$  σε  $\varepsilon_{fke}$  βασίζεται στη λογική του ότι η παραμόρφωση του ΙΟΠ πρέπει να περιορίζεται για να εξασφαλίζει ότι και άλλοι μηχανισμοί όπως αυτός της εμπλοκής των αδρανών μπορούν να λάβουν μέρος. Για την επιλογή της χρήσης κάποιας τιμής μέγιστης παραμόρφωσης για τα ΙΟΠ πρέπει κάποιος να γνωρίζει την κατάσταση (αποκόλληση, θραύση ή μη) των ΙΟΠ κατά την διατμητική αστοχία.

Υπάρχει ωστόσο η αντίληψη ότι κατά κάποιο ποσοστό επέρχεται μερική αποκόλληση των ΙΟΠ ακόμα και αν αυτά δεν αποκολληθούν κατά τη διατμητική αστοχία. Αυτό οφείλεται στη σημαντική παραμόρφωση που υποβάλλονται τα ΙΟΠ κατά τη φόρτιση και την έλλειψη δυνατότητας από μεριάς σκυροδέματος να παραλάβει αντίστοιχη παραμόρφωση. Το σκυρόδεμα ως γνωστό ρηγματώνεται και η ρηγμάτωση του οδηγεί σε συγκεντρώσεις τάσεων που με τη σειρά τους έχουν σαν αποτέλεσμα τοπικές αποκολλήσεις των ΙΟΠ [56]. Συνεπώς η ενεργή παραμόρφωση των ΙΟΠ εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το μήκος επικόλλησης τους ή από το αν χρησιμοποιούνται αγκύρια ώστε να αποφευχθεί η πλήρης αποκόλληση τους.



### ΑΜΕΡΙΚΑΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (ACI)

Σύμφωνα με τον Αμερικάνικο κανονισμό ACI 440R2 [53] η συνολική αντοχή σε διάτμηση δίνεται από τον τύπο:

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad (1.23)$$

Όπου  $\psi_f = 0.95$  για πλήρως περιτυλιγμένα ΙΟΠ ή αγκυρωμένα ΙΟΠ με επικόλληση τύπου U, ενώ  $\psi_f = 0.85$  για ΙΟΠ τύπου U χωρίς αγκύρωση. Η διατμητική αντοχή του ΙΟΠ δίνεται από τη σχέση:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin\alpha + \cos\alpha) d_f}{s_f} \quad (1.24)$$

Όπου:

$$A_{fv} = 2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f \quad (1.25)$$

και η ενεργή τάση του ΙΟΠ:

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \quad (1.26)$$

Η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση του ΙΟΠ υπολογίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \varepsilon_{fu} \quad \text{για κλειστού τύπου περιτυλιγμένα ΙΟΠ} \quad (1.27)$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και όταν χρησιμοποιούνται αγκύρια μηχανικού τύπου αλλά σε καμία περίπτωση η παραμόρφωση δεν επιτρέπεται να ξεπεράσει την τιμή 0,004.

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0.004 \quad \text{για ανοικτού τύπου επικολλούμενα ΙΟΠ} \quad (1.28)$$

Όπου  $k_v$  είναι ένα μειωτικός συντελεστής απώλειας συνάφειας που σχετίζεται με την αποκόλληση του ΙΟΠ από το σκυρόδεμα και εξαρτάται από την αντοχή του σκυροδέματος, την δυσκαμψία του ΙΟΠ και τον τρόπο επικόλλησης του ΙΟΠ στο δομικό στοιχείο. Πιο συγκεκριμένα:

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (1.29)$$

Το ενεργό μήκος αγκύρωσης του ΙΟΠ  $L_e$  είναι το μήκος για το οποίο η τάση συνάφειας διατηρείται αναλλοίωτη:

$$L_e = \frac{23300}{(n t_f E_f)^{0.58}} \quad (1.30)$$



Οι συντελεστές  $k_1$  και  $k_2$  εξαρτώνται από την ποιότητα του σκυροδέματος και τον τρόπο επικόλλησης αντίστοιχα:

$$k_1 = \left( \frac{f_c'}{27} \right)^{2/3} \quad (1.31)$$

$$k_2 = \left\{ \begin{array}{l} \frac{df - Le}{df} \quad \text{για επικόλληση τύπου U} \\ \frac{df - 2Le}{df} \quad \text{για επικόλληση στις πλευρές} \end{array} \right\} \quad (1.32)$$

### **KAN.ΕΠΕ.**

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.[54] η συνεισφορά των ΙΟΠ στη διατμητική αντοχή του δομικού στοιχείου ισούται με:

$$V_{jd} = \sigma_{jd} \rho_j b_w h_{j,ef} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin^2 \alpha \quad (1.33)$$

Όπου το ποσοστό  $\rho_j$  ορίζεται ως:

$$\rho_j = \frac{2A_j}{s_j b_w \sin \alpha} \quad (1.34)$$

$$A_j = t_j w_j \quad (1.35)$$

Ενώ για συνεχή φύλλα θεωρούμε  $w_j = s_j$

Για  $\theta=45$  και  $\alpha=90$  η παραπάνω σχέση απλοποιείται σε:

$$V_{jd} = \sigma_{jd} \rho_j b_w h_{j,ef} = \frac{2A_j}{s_j} \sigma_{jd} h_{j,ef} \quad (1.36)$$

Σύμφωνα με τον κανονισμό το ενεργό ύψος των ΙΟΠ μπορεί να θεωρηθεί ως:

$$h_{j,eff} = \frac{2}{3} d \quad (1.37)$$

Η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως  $\sigma_{jd}$  του ΙΟΠ εκτιμάται με βάση μιας κρίσιμη τιμή τάσεως  $\sigma_{j,crit}$  ή μιας κρίσιμης τιμής παραμορφώσεως  $\varepsilon_{j,crit}$ .



Πιο συγκεκριμένα ο κανονισμός διαχωρίζει δυο μορφές αστοχίας (α) την αστοχία που επέρχεται μετά από θραύση του ΙΟΠ και (β) την αστοχία που επέρχεται μετά από αποκόλληση του ΙΟΠ λόγω ανεπαρκούς αγκύρωσης των άκρων του.

Στην πρώτη περίπτωση η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως  $\sigma_{jd}$  του ΙΟΠ δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{jd} \leq \frac{1}{\gamma_m} f_{jk} \quad (1.38)$$

Όπου:

$$\gamma_m = 1,2 \quad (1.39)$$

Και

$$f_{jk} = E_j \varepsilon_{j,crit} \quad (1.40)$$

Λόγω του ότι έχει παρατηρηθεί ότι τα ΙΟΠ αστοχούν σε παραμορφώσεις χαμηλότερες από τις θεωρητικές μέγιστες η τιμή  $\varepsilon_{j,crit}$  λαμβάνεται ως:

$$\varepsilon_{j,crit} = k_v \varepsilon_{j,max} \quad (1.41)$$

Όπου  $k_v$  είναι μειωτικός συντελεστής που λαμβάνεται ίσος με 0,5 και  $\varepsilon_{j,max}$  η μειωμένη μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση του ΙΟΠ με τη χρήση του συντελεστή  $\psi$  (μειωτικός συντελεστής πολλών στρώσεων).

Και

$$\varepsilon_{j,max} = \psi \cdot \varepsilon_{ju} \leq 1,5\% \quad (1.42)$$

Στην δεύτερη περίπτωση που αφορά στην αποκόλληση των ΙΟΠ η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως  $\sigma_{jd}$  του ΙΟΠ λαμβάνεται ως:

$$\sigma_{jd} \leq \frac{\sigma_{j,crit}}{\gamma_{Rd}} \quad (1.43)$$

Όπου  $\gamma_{Rd}$  είναι ένας συντελεστής αβεβαιότητας προσομοιώματος, ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 1,2. Η τιμή  $\sigma_{j,crit}$  υπολογίζεται βάση της σχέσης:

$$\sigma_{j,crit} = k_v \cdot \sigma_{j,max} \quad (1.44)$$

Όπου:

$$k_v = 0,40 + 0,25\lambda \leq 0,65 \quad (1.45)$$

και





$$\lambda = \frac{L_{av}}{L_e} \quad (1.46)$$

$$\lambda = \frac{L_{av}}{L_e} \quad (\text{η σχέση αυτή δεν υπάρχει στο τελικό κείμενο του ΚΑΝΕΠΠΕ})$$

Το διατιθέμενο μήκος αγκύρωσης του ΙΟΠ δίνεται από τη σχέση:

$$L_{av} = h_{j,eff} \quad (1.47)$$

Και το ενεργό μήκος αγκύρωσης  $L_e$  λαμβάνεται ως:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_j t_j}{2 f_{ctm}}} \quad (MPa, mm) \quad (1.48)$$

Η μέγιστη τάση  $\sigma_{j,max}$  δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{j,max} = \beta \frac{\tau_b^{αποκ}}{t_j} L_e \quad (1.49)$$

Όπου:

$$\tau_b^{αποκ} = f_{ctm} \quad (1.50)$$

και  $t_j$  είναι το πάχος του υλικού ενίσχυσης. Στην περίπτωση που υπάρχουν  $k$  στρώσεις υλικού με πάχος στρώσης  $t_{j1}$  το  $t_j$  δίνεται από τη σχέση:

$$t_j = \psi \cdot k \cdot t_{j1} \quad (1.51)$$

Ο συντελεστής πλάτους ΙΟΠ  $\beta_w$  ίσος με:

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - \frac{w_j}{s_j \sin \alpha}}{1 + \frac{w_j}{s_j \sin \alpha}}} \quad (1.52)$$

Στην περίπτωση που η ενίσχυση γίνεται με συνεχή φύλλα ή υφάσματα τότε ο συντελεστής επιρροής πλάτους οπλισμού ενίσχυσης λαμβάνεται ίσος με:

$$\beta_w = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (1.53)$$

Ο συντελεστής διατιθέμενου οπλισμού αγκύρωσης  $\beta_L$  :



$$\beta_L = \sin \sqrt{\frac{\pi \lambda}{2}} \approx \lambda(2 - \lambda) \quad \text{για } \lambda < 1$$
$$\beta_L = 1 \quad \text{οταν } \lambda \geq 1$$
(1.54)

Τέλος ο διορθωτικός συντελεστής  $\beta$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\beta = \beta_L \beta_w$$
(1.55)

### ΣΧΟΛΙΑ

Τα παρακάτω σχόλια σχετίζονται με την μεθοδολογία που προτείνεται από τους κανονισμούς για τον υπολογισμό της συνεισφοράς των ΙΟΠ στη διατμητική αντοχή ενισχυμένων δοκών οπλισμένου σκυροδέματος :

- Γίνεται ένας βασικός διαχωρισμός μεταξύ των μορφών ενίσχυσης ανάλογα με τον τρόπο επικόλλησης των ΙΟΠ (πλήρως περιτυλιγμένα, επικολλημένα μορφής U και επικολλημένα μόνο πλευρικά).
- Σε όλες τις περιπτώσεις η αγκύρωση των ΙΟΠ στο θλιβόμενο τμήμα των δοκών θεωρείται αντίστοιχη της πλήρους περιτύλιξης των ΙΟΠ.
- Η αστοχία των ΙΟΠ θεωρείται ότι επιτυγχάνεται όταν αυτά φτάσουν κάποια τιμή μέγιστης παραμόρφωσης. Η παραμόρφωση αυτή είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με τη μέγιστη (ιδεατή) παραμορφωσιμότητα των ΙΟΠ.
- Θεωρείται βέβαιη η αποκόλληση των ΙΟΠ από το σκυρόδεμα στην περίπτωση επικόλλησης των ΙΟΠ πλευρικά μόνο ή με μορφή U.
- Οι εξισώσεις που προαναφέρονται βασίζονται σε μια σειρά πειραματικών δεδομένων τα οποία προέρχονται κατά κύριο λόγο από δοκίμια ενισχυμένα με ανθρακονήματα. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι τα ΧΙΟΠ μπορούν να παραμορφωθούν 40% περισσότερο σε σχέση με τα ΑΙΟΠ όταν αυτά χρησιμοποιούνται για καμπτικές ενισχύσεις δοκών[8]. Συνεπώς πιστεύουμε ότι η χρήση ΧΙΟΠ μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερες παραμορφώσεις και κατά συνέπεια σε καλύτερη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του υλικού.

Από την ανάλυση της βιβλιογραφίας που σχετίζεται με τη διατμητική ενίσχυση δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά μπορεί κανείς να βγάλει τα ακόλουθα σημαντικά συμπεράσματα:

- Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι για να αποφευχθεί η αποκόλληση του ΑΙΟΠ το υλικό θα πρέπει να περιτυλιχτεί γύρω από το δοκίμιο ή να αγκυρωθεί στη θλιπτική ζώνη [26, 30, 34]. Είναι σχεδόν αδύνατον σε δοκίμια που ενισχύονται με ΑΙΟΠ χωρίς περιτύλιξη και χωρίς να χρησιμοποιηθούν αγκύρια να επέλθει αστοχία μετά από θραύση των ινών.
- Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η χρήση ολόσωμων μανδύων ΙΟΠ δεν επιφέρει οφέλη σε σχέση με τη χρήση λωρίδων ΙΟΠ επικολλημένων ανά κάποιες αποστάσεις. Πιο συγκεκριμένα υπάρχει ένα βέλτιστο ποσοστό ΙΟΠ (το οποίο εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες του ΙΟΠ) για τη διατμητική ενίσχυση και η περαιτέρω αύξηση του δεν επιφέρει κάποιο επιπλέον κέρδος σχετικό με τη διατμητική αντοχή του δομικού στοιχείου Ο/Σ [29, 40]. Κατά συνέπεια η χρήση συνεχών μανδύων ΙΟΠ δεν κρίνεται ως καλύτερη λύση σε σχέση με τη χρήση λωρίδων τοποθετημένων ανά κάποιες αποστάσεις.

**Παράγοντες που επηρεάζουν την διατμητική αντοχή των εξωτερικά επικολλημένων ΙΟΠ σε δομικά στοιχεία Ο/Σ**



Από την ανάλυση της βιβλιογραφίας βγαίνει το συμπέρασμα ότι οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την διατμητική απόδοση των εξωτερικά επικολλημένων ΙΟΠ είναι:

- Η δυσκαμψία των ΙΟΠ.

Παίζει το σημαντικότερο ρόλο και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλα τα αναλυτικά μοντέλα. Το γινόμενο  $\rho_f E_f$  χρησιμοποιείται σε πολλά μοντέλα και στον κανονισμό ACI. Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι σε περιπτώσεις επικόλλησης τύπου U χωρίς αγκύρια, μεγάλη δυσκαμψία οδηγεί στην αποκόλληση ενώ μικρές δυσκαμψίες έχουν σαν αποτέλεσμα τη θραύση των ινών.

- Το πάχος και πλάτος των λωρίδων ΙΟΠ.

Το πλάτος των ΙΟΠ ( $w_f$  ή  $b_f$ ) και το πάχος ( $t_f$ ) σχετίζεται άμεσα με την δυσκαμψία των ΙΟΠ και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του  $\rho_f$ .

- Η απόσταση μεταξύ των λωρίδων ΙΟΠ.

Η απόσταση μεταξύ των λωρίδων ( $S_f$ ) χρησιμοποιείται σε όλες τις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού του  $V_f$ .

- Το μήκος και ο τρόπος αγκύρωσης των ΙΟΠ.

Η χρήση μηχανικών αγκυρίων οδηγεί συνήθως σε θραύση των ΙΟΠ και αποφεύγεται η αποκόλληση. Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιούνται αγκύρια τότε η αποκόλληση εξαρτάται άμεσα από το διαθέσιμο μήκος αγκύρωσης. Διάφοροι συντελεστές χρησιμοποιούνται στα αναλυτικά μοντέλα οι οποίοι αναφέρονται στο μήκος αγκύρωσης.

- Η ποιότητα του σκυροδέματος

Σχετίζεται κυρίως με την αντοχή της επικόλλησης των ΙΟΠ και την πρόωρη αστοχία τους (αποκόλληση). Η ποιότητα του σκυροδέματος συμπεριλαμβάνεται στους κανονισμούς υπό τη μορφή της εφελκυστικής αντοχής  $f_{ctm}$ . Σε κάποια μοντέλα χρησιμοποιείται ο λόγος  $\rho_f E_f / f_c$ .

- Η ύπαρξη μεταλλικών συνδετήρων

Έχει αποδειχθεί ότι η ύπαρξη και το ποσοστό των συνηθισμένων μεταλλικών συνδετήρων στο στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος επηρεάζει τη διατμητική απόδοση των ΙΟΠ. Ωστόσο σε κανέναν κανονισμό (πλην του Αυστραλέζικου όπου υπάρχει κάποιος συντελεστής) δεν γίνεται αναφορά στη συσχέτιση διατμητικής αντοχής των ΙΟΠ και ύπαρξη των συμβατικών συνδετήρων και σε ένα αναλυτικό μοντέλο που αναπτύχθηκε τελευταία συμπεριλαμβάνονται οι συμβατικοί συνδετήρες στις εξισώσεις υπολογισμού της  $V_f$ .



## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> – Κατασκευή τριών τύπων δοκιμίων - Πειραματικές Διατάξεις

### 3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά οι ιδιότητες των υλικών, οι τρεις τύποι δοκιμίων, δηλαδή απλά τμήματα διατομών πλακοδοκού Ο/Σ, ορθογωνικές δοκοί Ο/Σ και πλακοδοκοί Ο/Σ, καθώς και οι αντίστοιχες τρεις πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο των εν λόγω δοκιμίων.

Όπως αναφέρθηκε στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο, η διερεύνηση χωρίζεται σε τρία πειραματικά τμήματα, με στόχο την πλήρη και βήμα προς βήμα αξιοποίηση των αποτελεσμάτων και της γνώσης από το προηγούμενο βήμα στο επόμενο. Έτσι λοιπόν, στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου γίνεται διαχωρισμός των τριών φάσεων.

Αρχικά, στην παράγραφο 3.2 γίνεται αναφορά στον προσδιορισμό όλων των ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών ακολουθιών. Στη συνέχεια στην παράγραφο 3.3 γίνεται ανάλυση της πειραματικής διάταξης και των λοιπών παραδοχών της διερεύνησης της αποκόλλησης λωρίδων (ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ), από απλά δοκίμια τμήματα πλακοδοκών Ο/Σ. Επίσης σε αυτή την παράγραφο περιγράφονται και σχολιάζονται οι διαφορετικοί τρόποι αγκύρωσης των λωρίδων αυτών

Στην παράγραφο 3.4 γίνεται η περιγραφή των δοκιμίων ορθογωνικών δοκών Ο/Σ που υποβλήθηκαν σε μονότονη κάμψη τεσσάρων σημείων και αφορούν σε δομικά στοιχεία δοκών Ο/Σ πρωτότυπων διαστάσεων με ορθογωνική διατομή, τα οποία είναι ενισχυμένα σε διάτμηση είτε με ΑΙΟΠ είτε με ΧΙΟΠ.

Τέλος στην παράγραφο 3.5 γίνεται η περιγραφή των πειραμάτων σε ανακυκλιζόμενη, σεισμικού τύπου φόρτιση, δομικών στοιχείων Ο/Σ διατομής πλακοδοκού. Τα συγκεκριμένα δομικά στοιχεία προσομοιώνουν τμήματα συνεχών δοκών στην περιοχή της στήριξής τους. Και σε αυτή την παράγραφο περιγράφονται και σχολιάζονται οι διαφορετικοί τρόποι αγκύρωσης των λωρίδων αυτών.

### 3.2 Προσδιορισμός Ιδιοτήτων των Υλικών

#### 3.2.1 Σκυρόδεμα

Σε κάθε κατασκευή δοκιμίων λαμβάνονταν κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος διαστάσεων 150mmX300mm που στόχο είχαν τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Συνολικά ελήφθησαν τρία δοκίμια για κάθε σκυροδέτηση. Στους παρακάτω Πίνακες (3.1α έως Πίνακα 3.1γ) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές θλίψης.



Σχήμα 3.1 Θλίψη κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος

Πίνακας 3.1α. Αντοχές σκυροδέματος απλών τιμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ

Είδος δοκιμίου	Αντοχή (t)	Τάση (Μρα)	Μέση Τάση (Μρα)
1 <sup>η</sup> φάση	41.5	23.05	23.05
	41	22.77	
	42	23.33	
2 <sup>η</sup> φάση	40	22.22	22.40
	39	21.66	
	42	23.33	

Από τον ανωτέρω πίνακα γίνεται φανερό ότι η χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη για τα δοκίμια απλών τιμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ, μπορεί να θεωρηθεί ίση με 22,73 Μρα.



Πίνακας 3.1β. Αντοχές σκυροδέματος δοκιμίων ορθογωνικών δοκών Ο/Σ

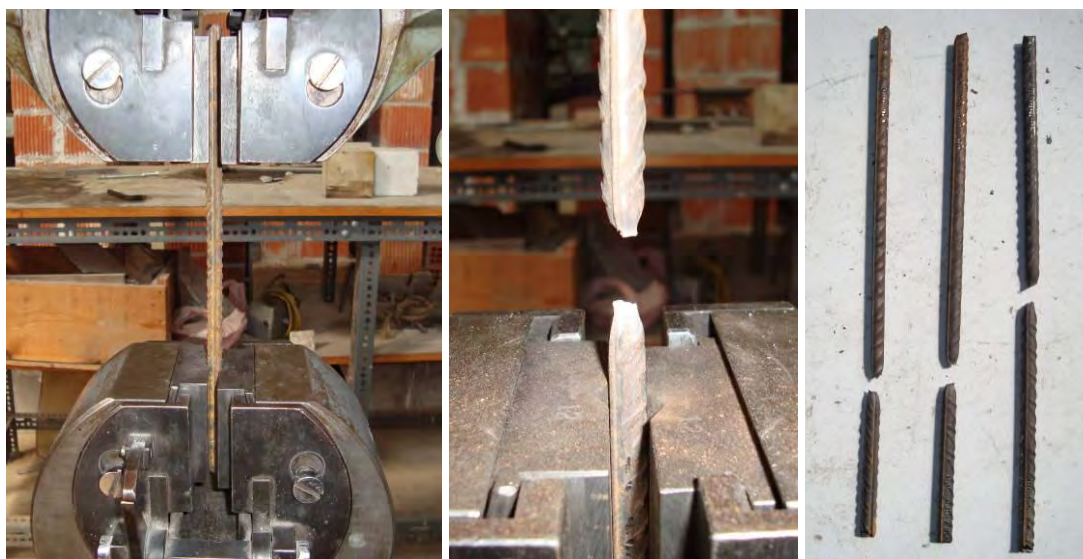
Είδος δοκιμίου	Αντοχή (t)	Τάση (Μρα)	Μέση Τάση (Μρα)
1 <sup>η</sup> φάση	38	21.11	22.40
	43	23.88	
	40	22.22	
2 <sup>η</sup> φάση	42	23.33	25.92
	51	28.33	
	47	26.10	

Πίνακας 3.1γ. Αντοχές σκυροδέματος δοκιμίων πλακοδοκού Ο/Σ

Είδος δοκιμίου	Αντοχή (t)	Τάση (Μρα)	Μέση Τάση (Μρα)
Δοκίμιο 1 <sup>ης</sup> Πλακοδοκού	39	21.66	22.66
	41.4	22.99	
	42	23.33	
Δοκίμιο 2 <sup>ης</sup> Πλακοδοκού	42	23.33	23.05
	42.5	23.61	
	40	22.22	
Δοκίμιο 3 <sup>ης</sup> Πλακοδοκού	44.5	24.72	23.61
	42	23.33	
	41	22.77	
Δοκίμιο 4 <sup>ης</sup> Πλακοδοκού	41	22.77	22.31
	40	22.22	
	39.5	21.94	
Δοκίμιο 5 <sup>ης</sup> Πλακοδοκού	33	18.33	20.74
	39	21.66	
	40	22.22	
Δοκίμιο 6 <sup>ης</sup> Πλακοδοκού	33	18.33	19.62
	38	21.11	
	35	19.44	

### 3.2.2 Δομικός Χάλυβας

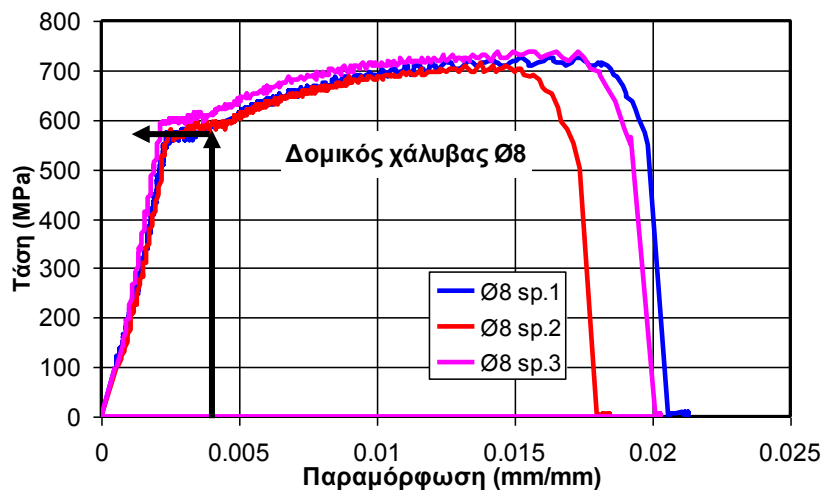
Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρατεθούν τα αποτελέσματα από τις δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού δομικού χάλυβα από τις διάφορες διαμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμίων.



Σχήμα 3.2 Μονο-αξονικός εφελκυσμός δομικού χάλυβα

- Χάλυβας διαμέτρου 8mm

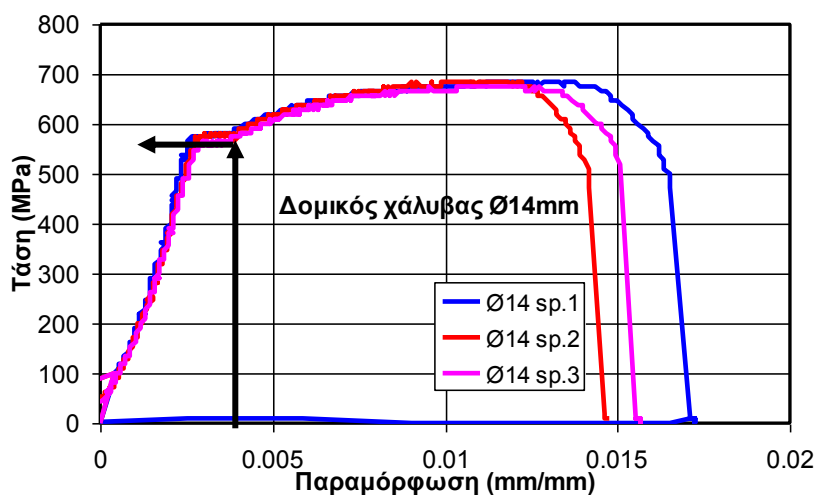
Από το γράφημα που ακολουθεί προκύπτει ότι η μέση τάση διαρροής είναι ίση με 570Μpa με αντίστοιχη παραμόρφωση διαρροής ίση με 2,8%.



Σχήμα 3.3 Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για το δομικό χάλυβα διαμέτρου Ø8mm

- Χάλυβας διαμέτρου 14mm

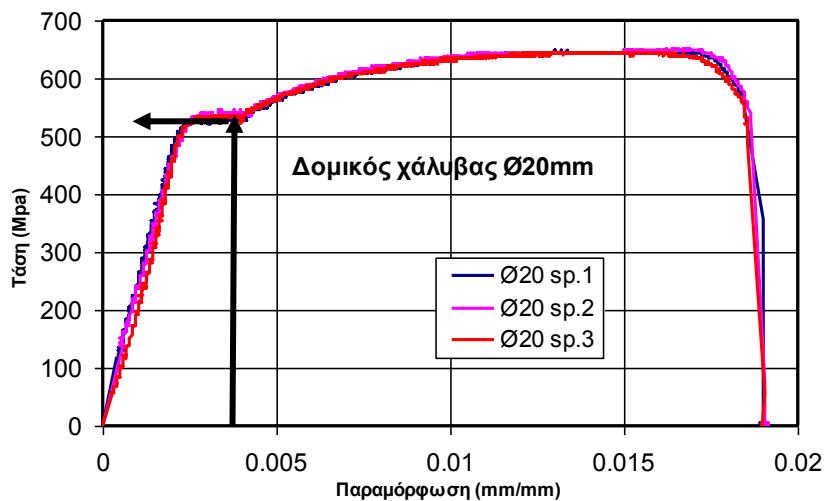
Από το γράφημα που ακολουθεί προκύπτει ότι η μέση τάση διαρροής είναι ίση με 570Μpa με αντίστοιχη παραμόρφωση διαρροής ίση με 2,8%.



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για το δομικό χάλυβα διαμέτρου Ø14mm

- Χάλυβας διαμέτρου 20mm

Από το γράφημα που ακολουθεί προκύπτει ότι η μέση τάση διαρροής είναι ίση με 527Μρα με αντίστοιχη παραμόρφωση διαρροής ίση με 2,6%.



Σχήμα 3.5 Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για το δομικό χάλυβα διαμέτρου Ø14mm



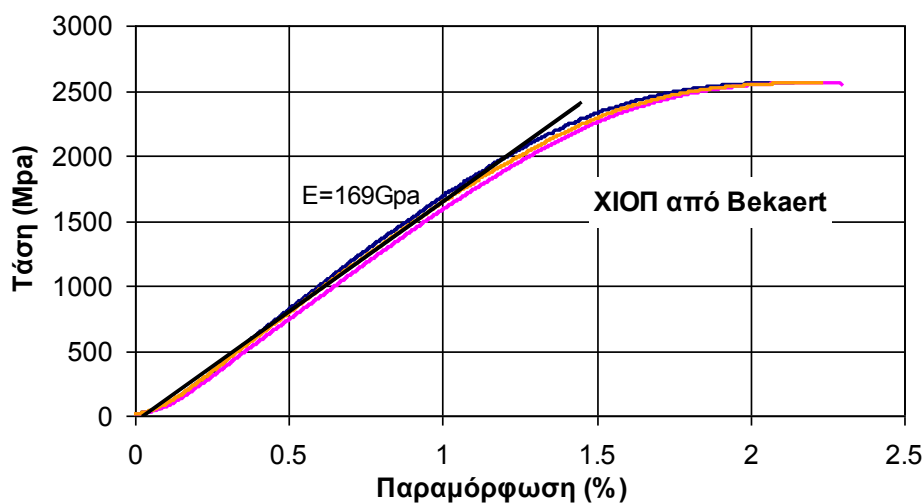


Πίνακας 3.2. Μηχανικές Ιδιότητες Δομικού Χάλυβα

Διάμετρος Δομικού Χάλυβα (mm)	Μέτρο Ελαστικότητας (Gpa)	Τάση Διαρροής (Mpa)	Παραμόρφωση Διαρροής (mm/mm)	Μέγιστη Τάση (Mpa)
Ø8	203,6	570	0,0028	710
Ø14	203,6	570	0,0028	690
Ø20	202,7	527	0,0026	645

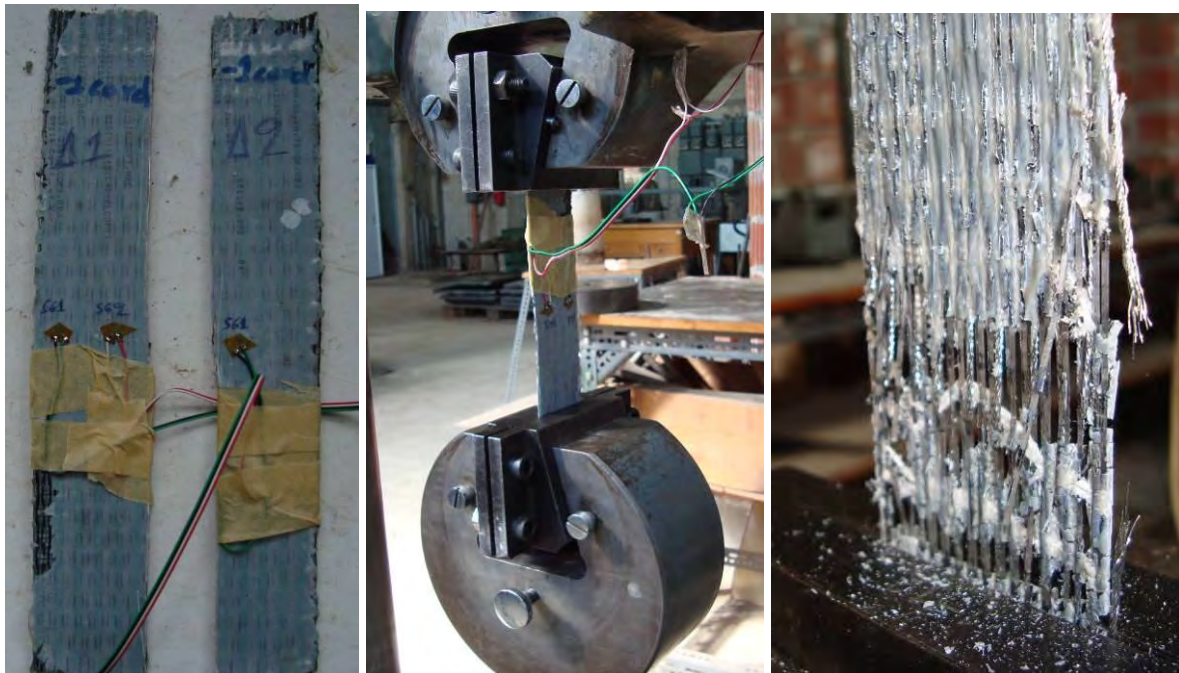
### 3.2.3 Ίνες Χάλυβα Υψηλής Αντοχής

Οι ίνες χάλυβα υψηλής αντοχής έχουν παραχθεί από την εταιρία Bekaert η οποία και προσδιόρισε πειραματικά τις ιδιότητές τους σε απλό εφελκυσμό. Το διάγραμμα 3.6 παρουσιάζει την τάση εφελκυσμού σε σχέση με την παραμόρφωση.



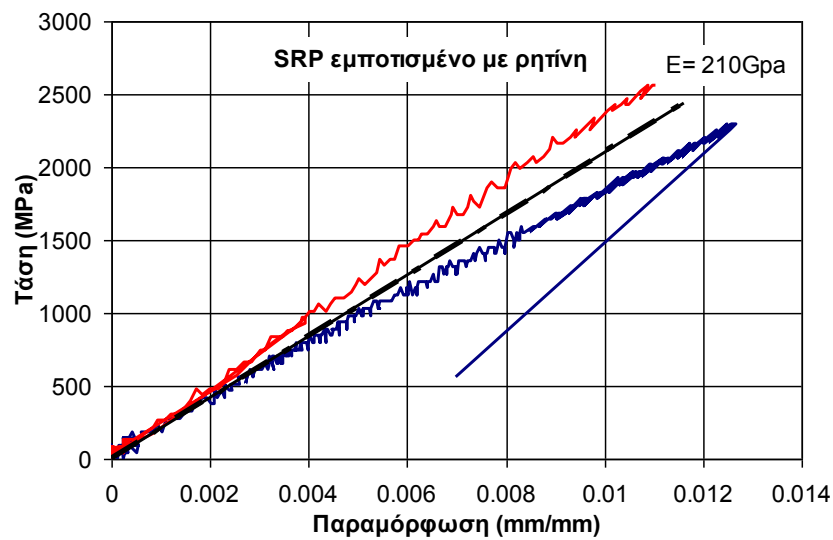
Σχήμα 3.6 Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης του ΧΙΟΠ (SRP)

Στο εργαστήριο κατασκευάστηκαν κουπόνια των χαλύβδινων ινών εμποτισμένα με την εποξειδική ρητίνη που θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος. Πραγματοποιήθηκαν εν συνεχεία δοκιμές μονο-αξονικού εφελκυσμού σε αυτά τα κουπόνια. (Σχήμα 3.7) Το διάγραμμα του σχήματος 3.8 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της τάσης σε εφελκυσμό σε σχέση με την παραμόρφωση.



Σχήμα 3.7 Δοκιμή εφελκυσμού χάλυβα υψηλής αντοχής (ΧΙΟΠ)

Ακολουθεί το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (Σχήμα 3.8)



Σχήμα 3.8 Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης του ΧΙΟΠ (SRP) με ρητίνη

Προκύπτει ότι το μέτρο ελαστικότητας είναι ίσο με 210Gpa, η μέση μέγιστη παραμόρφωση ίση με 1,1% και η μέγιστη τάση ίση με 2310Mpa. Η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού είναι ψαθυρή και οφείλεται στη χαμηλή παραμορφωσιμότητα της ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε.

Το πάχος των λωρίδων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 0.1184mm και το πλάτος τους 100mm.



### 3.2.4 Ίνες Άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα (CFRP) προέρχονται από την εταιρία Sika Hellas. Το συγκεκριμένο ανθρακόνημα είναι το SikaWrap®-230 C/45 και έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

Πίνακας 3.3 Τεχνικά Χαρακτηριστικά ΑΙΟΠ (CFRP)

Βάρος Υφάσματος	230 g/m <sup>2</sup> + 10 g/m <sup>2</sup>
Πάχος Υφάσματος	0,131 mm (στο συνολικό άνθρακα)
Πυκνότητα Ινών	1,76 g/cm <sup>3</sup>
Εφελκυστική αντοχή	4.300 Mpa
Μέτρο ελαστικότητας	234.000 Mpa
Οριακή παραμόρφωση (σε εφελκυσμό)	1,8%

### 3.2.5 Εποξειδική Ρητίνη

Η εποξειδική ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε παράγεται επίσης από την εταιρία Sika Hellas. Έχει την ονομασία Sikadur®-330 και έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

Πίνακας 3.4 Τεχνικά Χαρακτηριστικά εποξειδικής ρητίνης

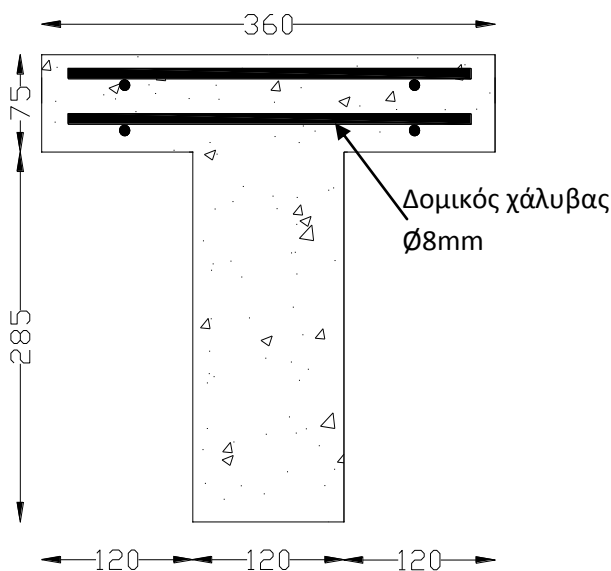
Εφελκυστική Αντοχή	30 Mpa
Πρόσφυση	> 4 Mpa (άμμο/σμένο υπόστρωμα)
Μέτρο Ελαστικότητας Καμπτικό	3.800 Mpa
Μέτρο Ελαστικότητας Εφελκυστικό	4.500 Mpa
Επιμήκυνση Θραύσης	0.9%

### 3.3 Πειραματική διάταξη δοκιμών απλών τμημάτων διατομής πλακοδοκού Ο/Σ

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα αναπτυχθεί η πειραματική διάταξη των δοκιμών συνάφειας. Σκοπός της διερεύνησης αυτής είναι η εξέταση του ρόλου της επιρροής της προετοιμασίας της επιφάνειας σκυροδέματος όπου θα επικολληθούν τα ινοπλισμένα πολυμερή με ή χωρίς την ύπαρξη κάποιας διάταξης αγκύρωσης. Επίσης στο πλαίσιο αυτό θα διερευνηθεί και η επιρροή του είδους της αγκύρωσης. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν τόσο για ΑΙΟΠ (CFRP) όσο και για ΧΙΟΠ (SRP).

#### 3.3.1 Γεωμετρικά στοιχεία δοκιμών

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν έχουν τις διαστάσεις που αποτυπώνονται στο σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ

Επιλέχθηκε να κατασκευαστούν δοκίμια διατομής πλακοδοκού Ο/Σ με σκοπό να προσομοιωθούν οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες και δυσκολίες που συναντώνται κατά τη τοποθέτηση τέτοιου είδους ενισχύσεων στην καθημερινή πράξη. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.9 οι διαστάσεις είναι πρωτότυπης κλίμακας. Τοποθετήθηκε στην πλάκα οπλισμός σε σχάρες διαμέτρου  $\text{Ø}8\text{mm}$  για την παραλαβή τυχόν μικρών καμπτικών ροπών λόγω πιθανών ασυμμετριών κατά τη φόρτιση. Η γεωμετρία της διατομής των εν λόγω δοκιμών είναι ίδια με την διατομή των δοκιμών πλακοδοκού, που θα παρουσιαστούν στην παράγραφο 3.5.

### 3.3.2 Κατασκευή δοκιμίων

Η κατασκευή των δοκιμίων έλαβε χώρα στο εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών του Α.Π.Θ. Συνολικά κατασκευάστηκαν 29 δοκίμια. Τα σχήμα 3.9α που ακολουθεί παρουσιάζει τις φάσεις κατασκευής των δοκιμίων.



Σχήμα 3.9α Κατασκευή δοκιμίων απλών τιμημάτων διατομών πλακοδοκού

Η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, όπως φαίνεται από το υποκεφάλαιο 3.2.1 είναι ίση με 21,6Μρα, και θα θεωρηθεί ίση για όλα τα δοκίμια. Χρησιμοποιήθηκε μεταλλικός μεταλλότυπος όπου έγινε η έγχυση του σκυροδέματος. Μετά από 7 ημέρες σε συνθήκες υγρασίας πάνω από 90% πραγματοποιήθηκε η απομάκρυνση του μεταλλότυπου. Τα δοκίμια σκυροδέματος έμειναν στις ίδιες συνθήκες υγρασίας για τουλάχιστον ακόμη 21 ημέρες. Στη συνέχεια παρέμειναν σε συνθήκες περιβάλλοντος έως την πραγματοποίηση της δοκιμής.

Σε κάθε ένα από τα απλά δοκίμια τιμημάτων διατομών πλακοδοκού σκυροδέματος εφαρμόστηκε ένα από τα συστήματα ενίσχυσης που διερευνήθηκαν, με την μεταβολή κάποιου παραμέτρου (όπως είτε ΧΙΟΠ είτε ΑΙΟΠ, είτε με αγκύρωση είτε χωρίς αγκύρωση κλπ.) . Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση είναι είτε ίνες άνθρακα είτε ίνες χάλυβα υψηλής αντοχής τα οποία εφαρμόστηκαν πάνω σε επεξεργασμένη επιφάνεια σκυροδέματος. Στόχος της διερεύνησης ήταν να διαπιστωθεί εάν στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται αγκύρωση είναι αναγκαία ή όχι η ιδιαίτερη επεξεργασία της επιφάνειας του σκυροδέματος όπως αυτή προτείνεται από τους κατασκευαστές των ΙΟΠ.

Σε ότι αφορά στην επεξεργασία της επιφάνειας ακολουθήθηκαν οι ακόλουθοι δύο τρόποι:

- Βάση των προδιαγραφών της εταιρίας από την οποία έγινε η προμήθεια των υλικών. Η διαδικασία έχει ως εξής:



Αρχικά έγινε εκτράχυνση της επιφάνειας του σκυροδέματος και στη συνέχεια καθαρίστηκε με ηλεκτρική σκούπα και αφαιρέθηκε πολύ καλά η σκόνη και τυχόν σαθρά ή χαλαρά τμήματα. Η επιφάνεια ήταν καθαρή από λάδια, σκόνες, βαφές, τσιμεντόνερα κτλ.

- Για μείωση του απαιτούμενου χρόνου και κόστους προετοιμασίας της επιφάνειας του σκυροδέματος ακολουθήθηκε η ακόλουθη διαδικασία:

Δεν έγινε εκτράχυνση της επιφάνειας του σκυροδέματος παρά μόνο καθαρισμός. Πιο συγκεκριμένα αρχικά αφαιρέθηκαν τυχόν σαθρά τμήματα σκυροδέματος. Η επιφάνεια του σκυροδέματος καθαρίζεται από λάδια, σκόνες, βαφές, τσιμεντόνερα κτλ.

Και στις δυο περιπτώσεις σημαντικό είναι η επιφάνεια του σκυροδέματος να μην είναι υγρή. Μετά την επεξεργασία ή μη της επιφάνειας έγινε η ανάμιξη της ρητίνης δύο συστατικών με την εξής διαδικασία:

Αναμειγνύονται τα δύο συστατικά πρώτα ξεχωριστά και μετά μαζί σε καθαρό δοχείο μέχρι ομογενοποίησης σε χαμηλή ταχύτητα (max 500 rpm) για 3 min, περίπου. Το μίγμα αδειάζετε σε άλλο δοχείο και αναμειγνύεται ξανά σε χαμηλές στροφές για να φύγει ο εγκλωβισμένος αέρας. Προσοχή δόθηκε στο χρόνο εφαρμογής διότι σε μεγάλες ποσότητες ανάμιξης ή/και υψηλές θερμοκρασίες ο διαθέσιμος χρόνο εφαρμογής μειώνεται.

Τέλος εφαρμόζεται το ύφασμα από ίνες άνθρακα ή χάλυβα, με ή χωρίς την ύπαρξη της αγκύρωσης. Αρχικά κόβεται το ύφασμα στις επιθυμητές διαστάσεις. Στη συνέχεια επαλείφεται η αναμιγμένη ρητίνη στο υπόστρωμα. (Η κατανάλωση εξαρτάται από την αδρότητα του υποστρώματος και κυμαίνεται από 0,7 έως 1,2 kg/m<sup>2</sup>). Έπειτα επικολλάται το ύφασμα προσεκτικά πιέζοντάς το στην ρητίνη με πλαστικό ρολό. Η ρητίνη οφείλει να διαφύγει μέσα από την πλέξη του υφάσματος, έτσι ώστε να διαποτιστεί πλήρως το ύφασμα. Η πίεση με πλαστικό ρολό γίνεται για να επιβεβαιωθεί ότι δεν έχει μείνει εγκλωβισμένος αέρας στη ρητίνη κάτω από το ύφασμα.

### 3.3.3 Λεπτομέρειες δοκιμών

Συνολικά σε αυτή τη φάση του ερευνητικού προγράμματος χρησιμοποιήθηκαν 29 δοκίμια. Οι παράμετροι που ελέγχθηκαν είναι η προετοιμασία της επιφάνειας επικόλλησης των ΙΟΠ, η ύπαρξη ή όχι αγκύρωσης, το είδος της αγκύρωσης και τέλος η χρήση ινών άνθρακα ή χάλυβα υψηλής αντοχής από 1 έως δύο στρώσεις.

Στον Πίνακα 3.5 που ακολουθεί παρουσιάζονται όλα τα δοκίμια με τις αντίστοιχες κατασκευαστικές λεπτομέρειες.

Το πρώτο γράμμα C ή S υποδηλώνει το είδος των ινών άνθρακα για το C και χάλυβας για το S. Το δεύτερο γράμμα S ή R ή N υποδηλώνει την επεξεργασία της επιφάνειας επικόλλησης, S για τη λεία επιφάνεια και R για την επεξεργασμένη επιφάνεια και N στις περιπτώσεις που δε χρησιμοποιήθηκε ρητίνη και κατά συνέπεια δεν υπάρχει επιφάνεια επαφής μεταξύ σκυροδέματος και φύλλου ΙΟΠ. Το τρίτο γράμμα υποδηλώνει το είδος της αγκύρωσης, N στην περίπτωση που δεν υπάρχει αγκύρωση, L όταν χρησιμοποιείται χαλύβδινο γωνιακό έλασμα με βίδες, T στην περίπτωση που χρησιμοποιείται αγκύρωση με θύσανο από ίνες άνθρακα και τέλος P όταν χρησιμοποιείται η αγκύρωση που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών με αριθμό πατέντας WO2011073696. Έπεται ο αριθμός 1 ή 2 που δηλώνει τον αριθμό των στρώσεων του ΙΟΠ. Τέλος το s ή t αντιστοιχεί στον τρόπο που δημιουργείται η ένταση στην αγκύρωση, s όταν η αγκύρωση



λειτουργεί σε διάτμηση με δράση βλήτρου και  $t$  στις περιπτώσεις που η αγκύρωση λειτουργεί σε ελκυσμό με δράση αγκυρίου.

### 3.3.4 Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο σχήμα 3.10.

Σε κάθε δοκίμιο έχουν επικολληθεί 4 ταινίες παραμόρφωσης, όπως φαίνεται και από το σχήμα, δύο σε κάθε παρειά του δοκιμίου. Έχουν τοποθετηθεί στο μέσο του πλάτους του ΙΟΠ, η μία χαμηλά και κοντά στην άκρη του κάτω μέρος του δοκιμίου η δεύτερη αρκετά ψηλά και πολύ κοντά στην αγκύρωση του ΙΟΠ. Επιλέχθηκαν αυτές οι θέσεις με στόχο την καταγραφή της αποκόλλησης, η οποία ξεκινά συνήθως από χαμηλά, καθώς και το πως αναπτύσσεται στο ύψος της διεπιφάνειας. Επίσης καταγράφονται οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά τη φόρτιση του δοκιμίου. Τέλος από τις μετρήσεις αυτές προκύπτει πόσο συμμετρική είναι η φόρτιση καθώς και το ποσοστό εκμετάλλευσης του ΙΟΠ.

Επίσης έχουν τοποθετηθεί από ένα LVDT στις δύο παρειές του δοκιμίου και πιο συγκεκριμένα στο μέσο ύψος της διεπιφάνειας, με στόχο την καταγραφή της έναρξης της αποκόλλησης σε εκείνο το σημείο.

Όλες οι παραπάνω μετρήσεις καταγράφονται και συγκεντρώνονται σε ένα ψηφιακό σύστημα απόκτησης δεδομένων μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή και συνδυάζονται με τη μέτρηση του φορτίου που επιβάλλεται, με τη βοήθεια ενός δυναμόμετρου.

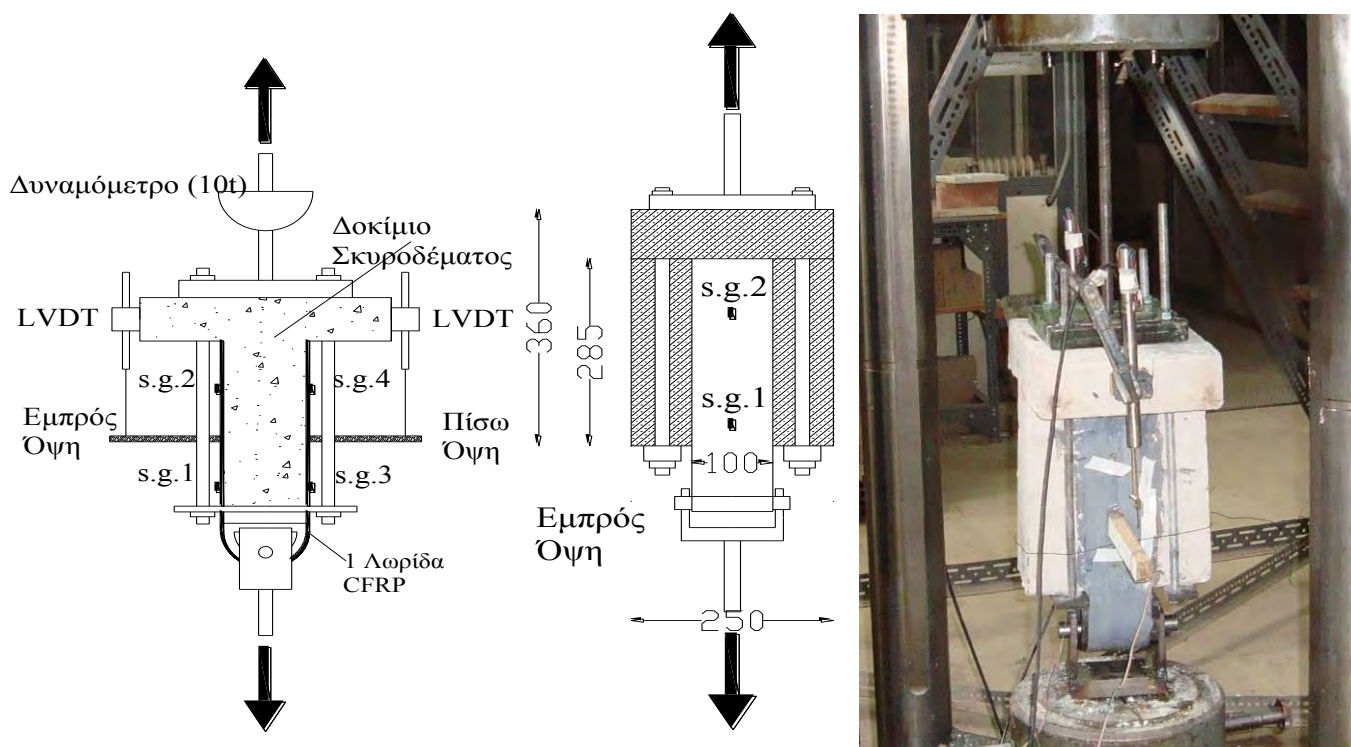
Τέλος η επιβολή της φόρτισης γίνεται με την επιβολή καταναγκασμένης μετακίνησης μέσω ενός υδραυλικού εμβόλου μέγιστης δύναμης 1000kN.



Πίνακας 3.5 Λεπτομέρειες Δοκιμίων απλών τιμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ

Όνομα Δοκιμίου	Είδος Ενίσχυσης	Αριθμός Λωρίδων	Επιφάνεια Επικόλλησης	Είδος Αγκύρωσης	Σχόλια / Είδος Κοχλιών
CSN1	ΑΙΟΠ	1	λεία	no	no
CRN1	ΑΙΟΠ	1	επεξεργασμένη	no	no
CSL2t <sup>1HUS</sup>	ΑΙΟΠ	2	λεία	L-shape	1xHUS by Hilti
CRL2t <sup>1HUS</sup>	ΑΙΟΠ	2	επεξεργασμένη	L-shape	1XHUS by Hilti
CRL2t <sup>M8</sup>	ΑΙΟΠ	2	επεξεργασμένη	L-shape	1xbolt M8 through floor
CSL2t <sup>M8</sup>	ΑΙΟΠ	2	λεία	L-shape	1xbolt M8 through floor
CSL2t <sup>2HUS</sup>	ΑΙΟΠ	2	λεία	L-shape	2xHUS by Hilti
CSP2s	ΑΙΟΠ	2	λεία	pin-anchor	2xHUS by Hilti
CRP2s	ΑΙΟΠ	2	επεξεργασμένη	pin-anchor	2xHUS by Hilti
CNT1s	ΑΙΟΠ	1	Χωρίς διεπιφάνεια	Tassel -anchor	shear direction
CNT1t	ΑΙΟΠ	1	Χωρίς διεπιφάνεια	Tassel -anchor	tension direction
CNT1s,t	ΑΙΟΠ	1	Χωρίς διεπιφάνεια	Tassel -anchor	both directions
CNT1s <sup>O</sup>	ΑΙΟΠ	1	Χωρίς διεπιφάνεια	Tassel -anchor	shear direction over
CNT1s <sup>B</sup>	ΑΙΟΠ	1	Χωρίς διεπιφάνεια	Tassel -anchor	shear direction below
CSTs <sup>Ob</sup>	ΑΙΟΠ	2	λεία	Tassel -anchor	shear direction over blind
CSTs <sup>Ot</sup>	ΑΙΟΠ	2	λεία	Tassel -anchor	shear direction over through
SSN1	ΧΙΟΠ	1	λεία	no	no
SRN1	ΧΙΟΠ	1	επεξεργασμένη	no	no
SSL2t	ΧΙΟΠ	2	λεία	L-shape	1xHUS by Hilti
SRL2t	ΧΙΟΠ	2	επεξεργασμένη	L-shape	1xHUS by Hilti
SNL1t	ΧΙΟΠ	1	Χωρίς διεπιφάνεια	L-shape	1xM8 no resin through floor
SNL1t <sup>R</sup>	ΧΙΟΠ	1	Χωρίς διεπιφάνεια	L-shape	1xM8 resin anchor through floor
SSL2t <sup>M8</sup>	ΧΙΟΠ	2	λεία	L-shape	1xbolt M8 through floor
SNL2t <sup>M8-M10</sup>	ΧΙΟΠ	2	Χωρίς διεπιφάνεια	L-shape	1xbolt M8 (+M10) through floor
SNL2t <sup>M10</sup>	ΧΙΟΠ	2	Χωρίς διεπιφάνεια	L-shape	1xbolt M10 through floor
SNL2t <sup>M12</sup>	ΧΙΟΠ	2	Χωρίς διεπιφάνεια	L-shape	1xbolt M12 through floor
SSL2t <sup>2HUS</sup>	ΧΙΟΠ	2	λεία	L-shape	2xHUS by Hilti
SSP2	ΧΙΟΠ	2	λεία	pin-anchor	2xHUS by Hilti
SRP2	ΧΙΟΠ	2	επεξεργασμένη	pin-anchor	2xHUS by Hilti





Σχήμα 3.10 Πειραματική διάταξη και ενοργάνωση δοκιμίων

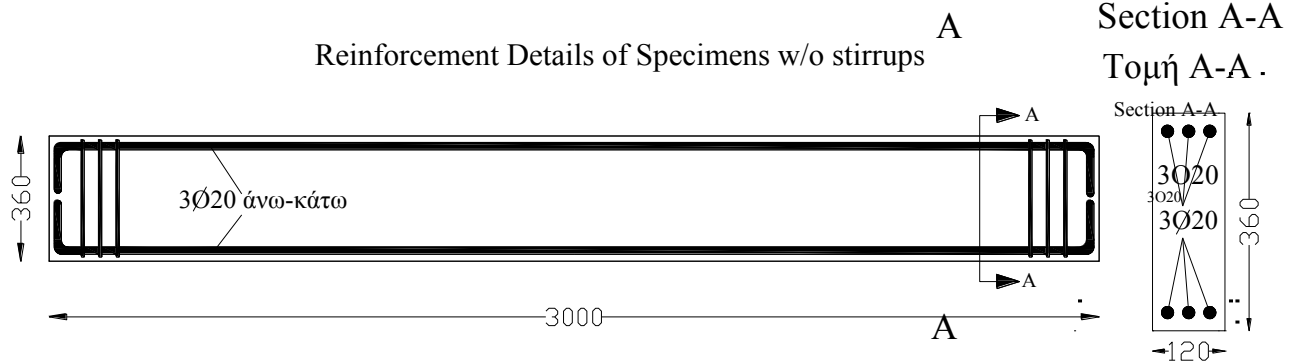
### 3.4 Πειραματική διάταξη ορθογωνικών δοκών Ο/Σ

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη των δοκιμών σε μονότονη κάμψη τεσσάρων σημείων. Διερευνήθηκαν εδώ ορθογωνικές δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος οι οποίες ενισχύθηκαν διατμητικά με ΙΟΠ. Σκοπός της διερεύνησης αυτής είναι η μελέτη της επιρροής της απόστασης των λωρίδων ενίσχυσης, του είδους του υλικού ενίσχυσης, ίνες άνθρακα ΑΙΟΠ (CFRP) ή ίνες χάλυβα υψηλής αντοχής ΧΙΟΠ (SRP). Τέλος διερευνήθηκε η επιρροή της ύπαρξης ή μη της διάταξης αγκύρωσης που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών του Α.Π.Θ. με αριθμό πατέντας WO2011073696.



## Reinforcement Details of Specimens w/o stirrups

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν έχουν τις διαστάσεις που αποτυπώνονται στα παρακάτω σχήματα.



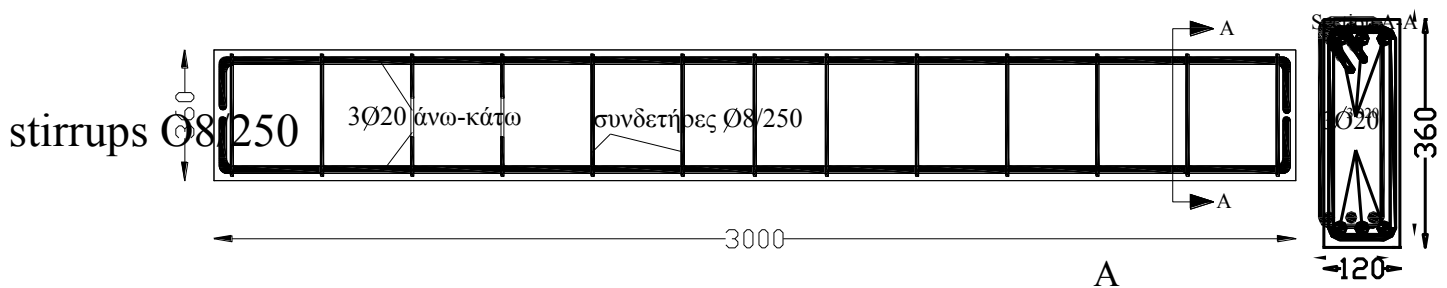
Σχήμα 3.11 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά δοκιμίων ορθογωνικών δοκών Ο/Σ χωρίς συνδετήρες

## Reinforcement Details of Specimens with stirrups

Reinforcement Details of Specimens with stirrups  
 3Ø20 top-bottom

3Ø20 top-bottom stirrups Ø8/250

Reinforcement Details of Specimens with stirrups



Σχήμα 3.12 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά ορθογωνικών δοκών Ο/Σ με συνδετήρες

Επιλέχθηκε να κατασκευαστούν δοκίμια ορθογωνικής διατομής αυτών των διαστάσεων, ήτοι 120/360(mm) και μήκους 3000(mm), με σκοπό να μπορέσουν να συγκριθούν τα αποτελέσματα με παρόμοια αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Επίσης κρίθηκε σκόπιμο οι δοκοί της διερεύνησης να μην έχουν εσωτερικό οπλισμό διάτμησης, έτσι ώστε το φαινόμενο και το αποτέλεσμα της ενίσχυσης να είναι πιο ξεκάθαρο. Παράλληλα όμως κατασκευάστηκε μια δοκός με εσωτερικό οπλισμό διάτμησης με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της ενίσχυσης.

### 3.4.2 Κατασκευή δοκιμίων

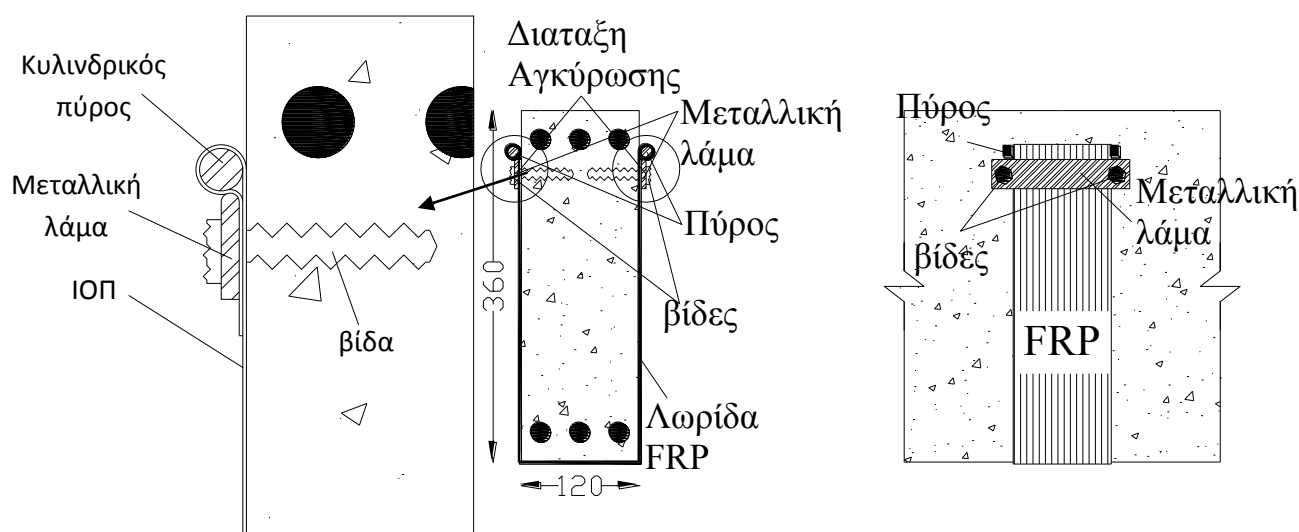
Η κατασκευή των δοκιμίων έλαβε χώρα στο εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών του Α.Π.Θ. Συνολικά κατασκευάστηκαν 10 δοκίμια. Χρησιμοποιήθηκαν ξυλότυποι για την κατασκευή η οποία πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις σκυροδέτησης (σχήμα 3.13). Αρχικά σκυροδετήθηκαν 7 δοκοί και στη συνέχεια ακόμη τρεις.



Σχήμα 3.13 Κατασκευή ορθογωνικών δοκών 120/360(mm)

Η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος, όπως φαίνεται από το υποκεφάλαιο 3.2.1 είναι ίση με 21,11Μρα για τα δοκίμια της 1<sup>ης</sup> φάσης και 23,3 Μρα για τα τρία τελευταία δοκίμια. Μετά από 7 ημέρες σε συνθήκες υγρασίας πάνω από 90% πραγματοποιήθηκε η απομάκρυνση του ξυλότυπου. Τα δοκίμια δοκού έμειναν στις ίδιες συνθήκες υγρασίας για τουλάχιστον ακόμη 21 ημέρες. Στη συνέχεια παρέμειναν σε συνθήκες περιβάλλοντος έως την πραγματοποίηση της δοκιμής.

Σε όλα τα δοκίμια σκυροδέματος έλαβε χώρα η εφαρμογή ενός συστήματος ενίσχυσης, εκτός από ένα που θεωρήθηκε σαν δοκός αναφοράς. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση είναι είτε ίνες άνθρακα (ΑΙΟΠ) είτε ίνες χάλυβα υψηλής αντοχής (ΧΙΟΠ) τα οποία εφαρμόστηκαν πάνω σε μη επεξεργασμένη, λεία επιφάνεια σκυροδέματος. Επιλέχθηκε να μην πραγματοποιηθεί κάποια επεξεργασία στην επιφάνεια επικόλλησης λόγω των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από την προηγούμενη διερεύνηση. Η εφαρμογή στη συνέχεια, των λωρίδων ΑΙΟΠ ή ΧΙΟΠ πραγματοποιήθηκε όπως προηγουμένως. Στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζεται σε τομή και σε όψη η εφαρμογή της αγκύρωσης στη δοκό ορθογωνικής διατομής. Η αγκύρωση έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών του Α.Π.Θ. με αριθμό πατέντας WO2011073696 [57].



Σχήμα 3.14 Λεπτομέρεια αγκύρωσης ορθογωνικής δοκού

### 3.4.3 Λεπτομέρειες δοκιμίων

Συνολικά διερευνήθηκαν 10 δοκίμια έναντι 9 δοκιμίων που περιλαμβάνονταν στην πρόταση. Οι παράμετροι που ελέγχθησαν είναι η ύπαρξη ή όχι αγκύρωσης, η αξονική απόσταση των λωρίδων ΙΟΠ, και τέλος η χρήση ινών άνθρακα ή χάλυβα υψηλής αντοχής.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται όλα τα δοκίμια με τις διαφορετικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες που έχουν.

Το πρώτο γράμμα C υποδηλώνει το γεγονός ότι πρόκειται για δοκίμιο αναφοράς (control beam). Το RB σημαίνει ορθογωνική διατομή (rectangular beam), ενώ το s δηλώνει την ύπαρξη συνδετήρων (stirrups). Το 150 ή 200 δηλώνει την αξονική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών λωρίδων ενίσχυσης σε χιλιοστά. Τέλος το μεσαίο γράμμα C ή S επισημαίνει το είδος των ινών που χρησιμοποιούνται, C για τις ίνες άνθρακα και S για τις ίνες χάλυβα υψηλής αντοχής. Τέλος όταν υπάρχει το γράμμα a τότε οι λωρίδες ΙΟΠ είναι αγκυρωμένες.

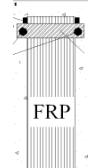
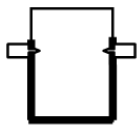
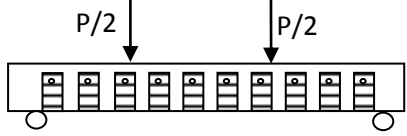
Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι για την επικόλληση των λωρίδων ΙΟΠ δεν έλαβε χώρα κάποια μορφή επεξεργασία, η επιφάνεια επικόλλησης είναι λεία. Επίσης για την αγκύρωση των λωρίδων ΙΟΠ χρησιμοποιήθηκε για όλα τα δοκίμια η αγκύρωση που αναπτύχθηκε στο Α.Π.Θ.



Πίνακας 3.6 Λεπτομέρειες Δοκιμίων Δοκού Ορθογωνικής Διατομής

Δοκός	Τύπος Φόρτισης	Οπλισμός Διατηρήσεως	Υπαρξη αγκύρωσης	Πλάτος ΙΟΠ (mm)	Αξονική απόσταση ΙΟΠ	Διάταξη ΙΟΠ	Τύπος Δοκιμίου Διάταξη Φόρτισης
RB	Μονό-τονη	Όχι	Όχι	100	Όχι		
RBs	Μονό-τονη	Ναι Ø8/ 250	Όχι	100	Όχι		
RB200 C	Μονό-τονη	A-ΙΟΠ	Όχι	100	Ναι, 200 mm		
RB200 Ca	Μονό-τονη	A-ΙΟΠ		100	Ναι, 200 mm		
RB200 S	Μονό-τονη	X-ΙΟΠ	Όχι	100	Ναι, 200 mm		
RB200 Sa	Μονό-τονη	X-ΙΟΠ		100	Ναι, 200 mm		
RB150 C	Μονό-τονη	A-ΙΟΠ	Όχι	100	Ναι, 150 mm		
RB150 Ca	Μονό-τονη	A-ΙΟΠ		100	Ναι, 150 mm		
RB150 S	Μονό-τονη	X-ΙΟΠ	Όχι	100	Ναι, 150 mm		



Δοκός	Τύπος Φόρτισης	Οπλισμός Διατημής	Υπαρξη αγκύρωσης	Πλάτος ΙΟΠ (mm)	Αξονική απόσταση ΙΟΠ	Διάταξη ΙΟΠ	Τύπος Δοκιμίου Διάταξη Φόρτισης
RB150 Sa	Μονό-τονη	X-ΙΟΠ		100	Ναι, 150 mm		

### 3.4.4 Πειραματική Διάταξη

Πρόκειται για διερεύνηση σε κάμψη τεσσάρων σημείων στο ένα τρίτο. Το συνολικό μήκος είναι 2700(mm) και το κάθε διατημητικό άνοιγμα είναι ίσο με 900(mm).

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα 3.15 και 3.16.

Σε κάθε δοκίμιο που έχει εξωτερική ενίσχυση με λωρίδες ΙΟΠ έχουν τοποθετηθεί 8 ταινίες παραμόρφωσης, όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 3.17. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι ταινίες έχουν τοποθετηθεί στο μέσο του πλάτους του ΙΟΠ και κοντά στην αναμενόμενη διατημητική ρηγμάτωση. Επίσης, καταγράφονται οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά τη φόρτιση του δοκιμίου. Τέλος, από τις μετρήσεις αυτές προκύπτει ποιες ταινίες και πόσο λειτουργούν στην αντίσταση έναντι παραλαβής τέμνουσας. Επίσης έχουν τοποθετηθεί από ένα LVDT κάτω ακριβώς από την επιβολή της φόρτισης, τα οποία μετρούν τις βυθίσεις της δοκού στα σημεία αυτά.



Σχήμα 3.15 Φωτογραφική απεικόνιση πειραματικής διάταξης

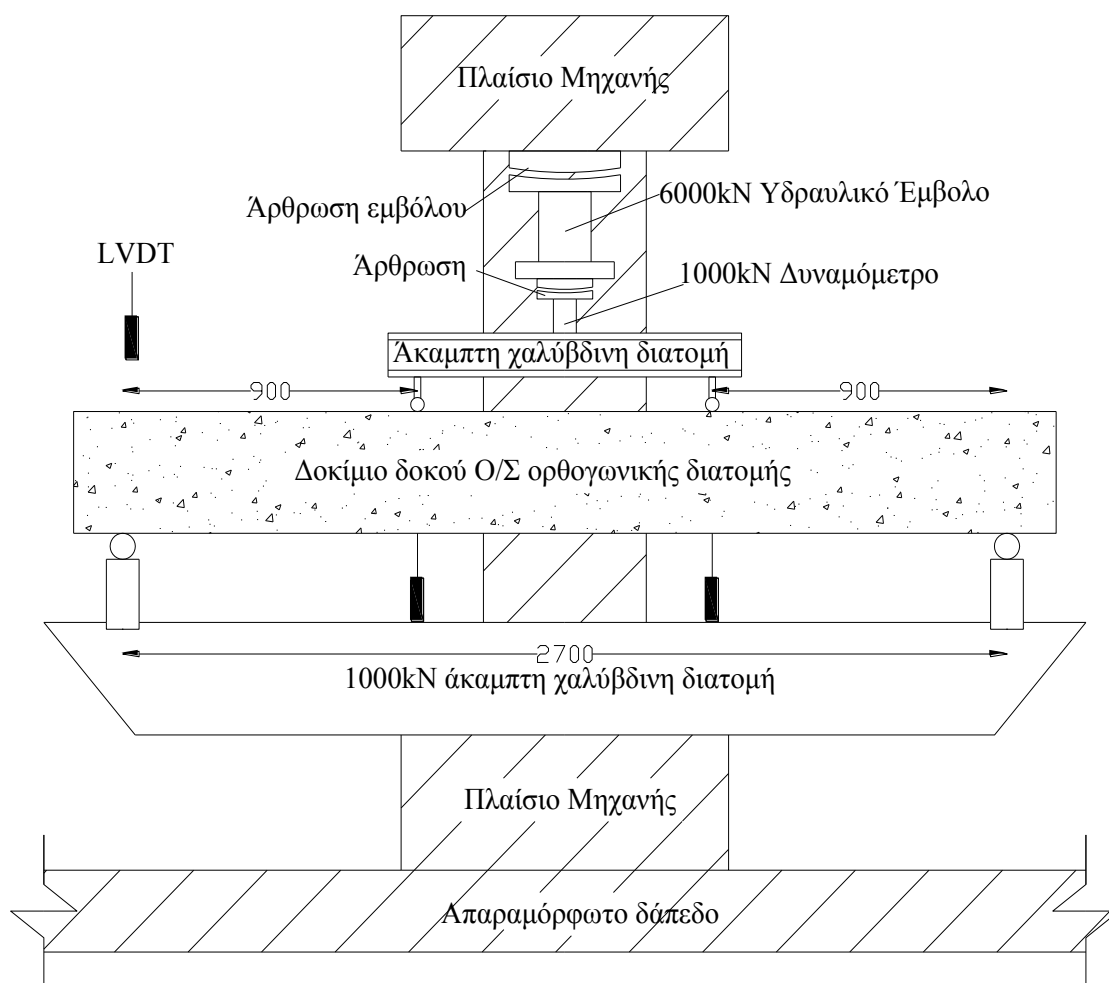


Όλες οι παραπάνω μετρήσεις συνδυάζονται με τη μέτρηση του φορτίου που επιβάλλεται, με τη βοήθεια ενός δυναμόμετρου.

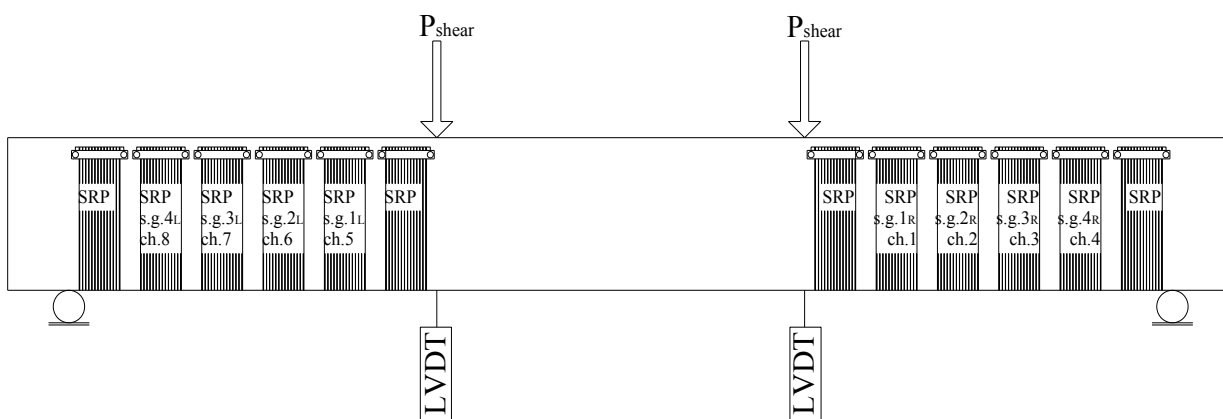
Όλες οι μετρήσεις καταγράφονται και συγκεντρώνονται σε ένα ψηφιακό σύστημα απόκτησης δεδομένων μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Τέλος η επιβολή της φόρτισης γίνεται με την επιβολή καταναγκασμένης μετακίνησης μέσω ενός υδραυλικού εμβόλου μέγιστης δύναμης 6000kN.

## Πειραματική Διάταξη



Σχήμα 3.16 Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης



Σχήμα 3.17 Ενοργάνωση δοκιμίου ορθογωνικής διατομής

### 3.5 Πειραματική διάταξη πλακοδοκών Ο/Σ

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη των δοκιμών σε ανακυκλιζόμενη σεισμικού τύπου φόρτιση δοκιμών διατομών πλακοδοκών Ο/Σ. Εξετάζονται δοκοί οπλισμένοι σκυροδέματος, διατομής πλακοδοκού, οι οποίες ενισχύθηκαν διατμητικά με χαλύβδινα ινοπλισμένα πολυμερή (ΧΙΟΠ). Σκοπός της διερεύνησης αυτής είναι η επιρροή της ανακυκλιζόμενης φόρτισης στις ενισχυμένες διατμητικά πλακοδοκούς. Επίσης διερευνάται η επιρροή της απόστασης των λωρίδων ενίσχυσης. Τέλος διερευνήθηκε η επιρροή της ύπαρξης ή μη διαφόρων διατάξεων αγκύρωσης.

#### 3.5.1 Γεωμετρικά στοιχεία δοκιμών

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν έχουν τις διαστάσεις που αποτυπώνονται στο σχήμα 3.18. Επιλέχθηκε να κατασκευαστούν δοκίμια διατομής πλακοδοκού αυτών των διαστάσεων, ήτοι 120/360/360(mm) και μήκους 1750(mm), με σκοπό να μπορέσουν να συγκριθούν τα αποτελέσματα με παρόμοια αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Επίσης οι διαστάσεις αυτές είναι οι ίδιες με δοκίμια στα οποία έγινε η πρώτη διερεύνηση καθώς επίσης και με τα δοκίμια δοκού ορθογωνικής διατομής. Επίσης κρίθηκε σκόπιμο, όπως και προηγουμένως οι δοκοί της διερεύνησης να μην έχουν εσωτερικό οπλισμό διάτμησης, έτσι ώστε το φαινόμενο και το αποτέλεσμα της ενίσχυσης να είναι πιο ξεκάθαρο. Τέλος οφείλει να αναφερθεί το γεγονός ότι τα δοκίμια αυτά αντιπροσωπεύουν δοκούς πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος με πολύ ισχυρούς στύλους.

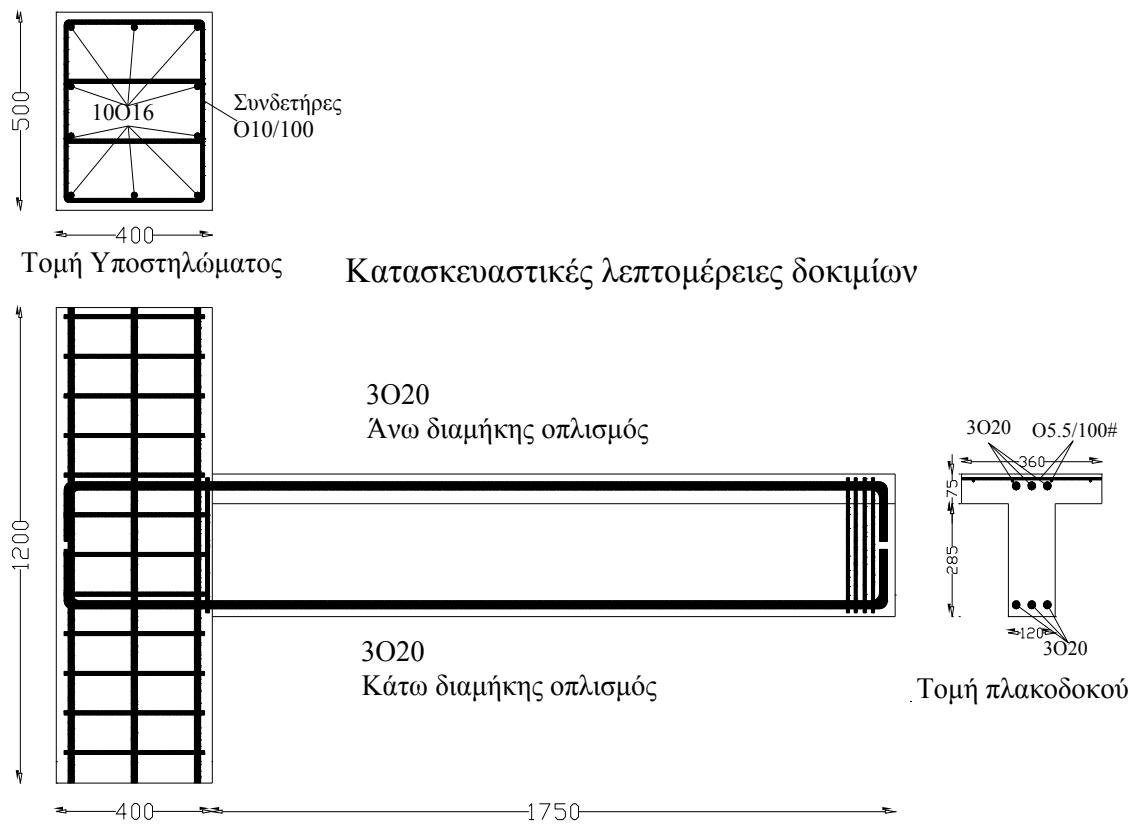
Τα υποστυλώματα καθώς και οι κόμβοι είναι υπεροπλισμένοι με σκοπό οι αστοχίες να εντοπίζονται στη δοκό. Επίσης ο διαμήκης οπλισμός κάμψης είναι ίσος με 3Ø20, οπλισμός πάνω από τα επιτρεπτά όρια των κανονισμών σε επίπεδα ποσοστών οπλισμού.

Πιο συγκεκριμένα  $\rho = \frac{942}{120 \cdot 360} = 2,18\% > \rho_{\max} = \frac{7}{550} = 1,27\%$  (ΕΚΟΣ κεφ. 18). Ως εκ τούτου όλες οι πιθανές αστοχίες αναμένεται να εντοπιστούν σε διάτμηση στον κορμό της πλακοδοκού.



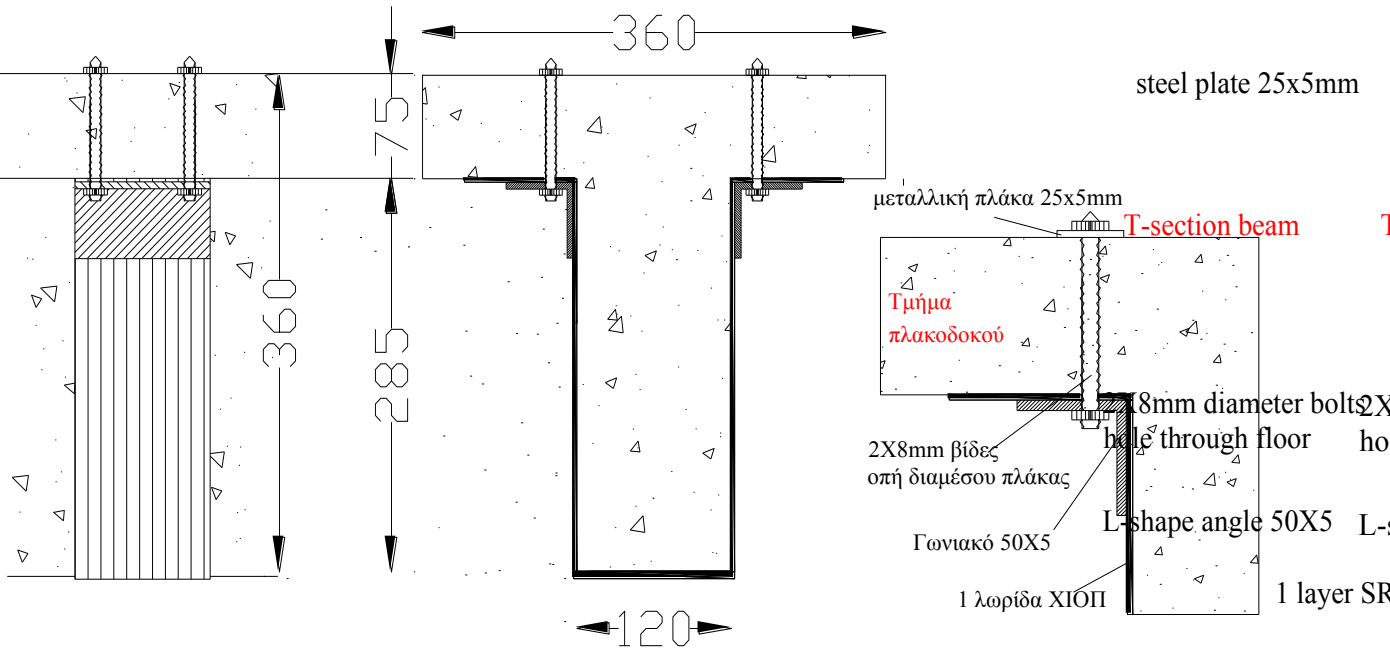


Ακολουθεί το σχήμα 3.18 με τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες των δοκιμών.

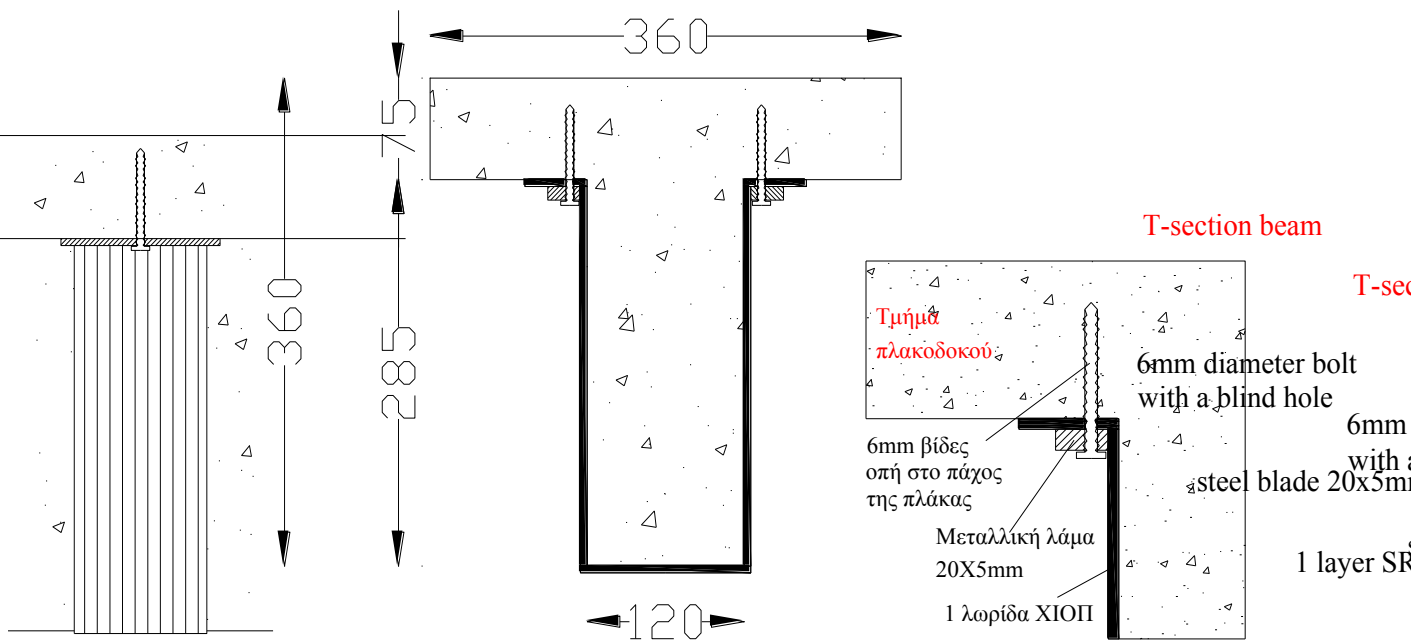


Σχήμα 3.18 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά δοκιμών που υπόκεινται σε ανακυκλιζόμενη σεισμικού τύπου φόρτιση διατομής πλακοδοκού (mm)

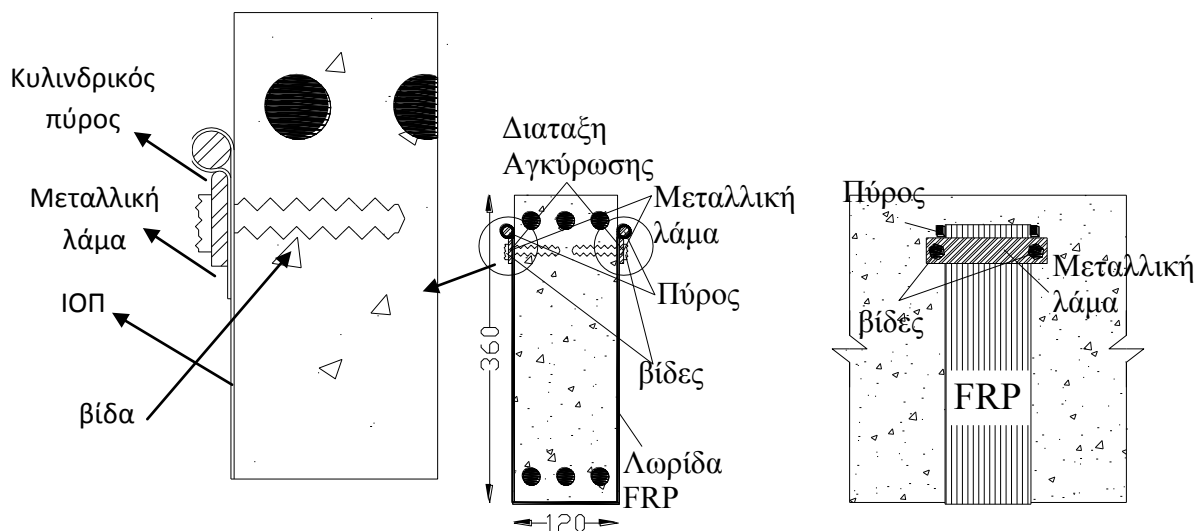
Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητη η αναφορά των κατασκευαστικών λεπτομερειών των διαφόρων διατάξεων αγκύρωσης που έχουν χρησιμοποιηθεί (σχ. 3.19 - 3.21).



Σχήμα 3.19 Διάταξη αγκύρωσης με χρήση γωνιακών χαλύβδινων διατομών διαστάσεων L50X5



Σχήμα 3.20 Διάταξη αγκύρωσης με χρήση χαλύβδινων λάμων 20X5



Σχήμα 3.21 Διάταξη αγκύρωσης με χρήση διάταξης αγκύρωσης Α.Π.Θ.

### 3.5.2 Κατασκευή δοκιμίων

Η κατασκευή των δοκιμίων έλαβε χώρα στο εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών του Α.Π.Θ. Συνολικά κατασκευάστηκαν 10 δοκίμια έναντι 5 δοκιμίων που περιλαμβάνονταν στην πρόταση. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε ειδικός μεταλλότυπος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.22. Κάθε δοκίμιο κατασκευάζονταν ξεχωριστά ακολουθώντας τις ίδιες κατασκευαστικές λεπτομέρειες σε ότι αφορά στις διαστάσεις, στον οπλισμό και στην ποιότητα του σκυροδέματος.



Σχήμα 3.22 Κατασκευή δοκών Ο/Σ διατομής πλακοδοκού 120/360/360(mm)

Η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος, όπως φαίνεται από το υποκεφάλαιο 3.2.1 είναι λίγο διαφορετική για κάθε πλακοδοκό. Πιο συγκεκριμένα για την 1<sup>η</sup> είναι 22.66Μpa, για τη 2<sup>η</sup> 23.05 Μpa , για την 3<sup>η</sup> είναι 23.61 Μpa, για την 4<sup>η</sup> ίση με 22.31 Μpa, για την 5<sup>η</sup> 20.74 Μpa και τέλος για την 6<sup>η</sup> θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι ίση με 19.62 Μpa. Μετά από 7 ημέρες σε συνθήκες



υγρασίας πάνω από 90% πραγματοποιήθηκε η απομάκρυνση του μεταλλότυπου. Τα δοκίμια πλακοδοκού έμειναν στις ίδιες συνθήκες υγρασίας για τουλάχιστον ακόμη 21 ημέρες. Στη συνέχεια παρέμειναν σε συνθήκες περιβάλλοντος έως την πραγματοποίηση της δοκιμής. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για όλα τα δοκίμια.

Σε όλα τα δοκίμια σκυροδέματος έλαβε χώρα η εφαρμογή ενός συστήματος ενίσχυσης, εκτός από το πρώτο που θεωρήθηκε ως δοκός αναφοράς. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση είναι ίνες χάλυβα υψηλής αντοχής (ΧΙΟΠ) τα οποία εφαρμόστηκαν πάνω σε μη επεξεργασμένη, λεία επιφάνεια σκυροδέματος. Επιλέχθηκε να μην πραγματοποιηθεί κάποια επεξεργασία στην επιφάνεια επικόλλησης λόγω των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν κατά την αρχική διερεύνηση. Η εφαρμογή στη συνέχεια, των λωρίδων ΧΙΟΠ πραγματοποιήθηκε όπως αυτή περιγράφηκε προηγουμένως.

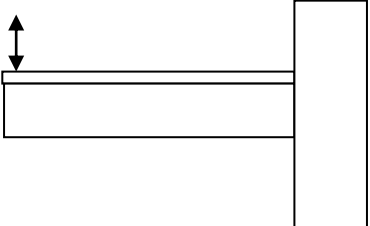
### 3.5.3 Λεπτομέρειες δοκιμών

Συνολικά κατασκευάστηκαν και διερευνήθηκαν 7 δοκίμια. Οι παράμετροι που ελέγχθηκαν είναι η επιρροή της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, η υπαρξη ή όχι αγκύρωσης, η απόσταση των λωρίδων ενίσχυσης, το είδος της αγκύρωσης και τέλος η εφαρμοστικότητα ινών χάλυβα υψηλής αντοχής (ΧΙΟΠ).

Στον πίνακα 3.7 που ακολουθεί παρουσιάζονται όλα τα δοκίμια και οι κατασκευαστικές τους λεπτομέρειες.

Το πρώτο γράμμα C υποδηλώνει το γεγονός ότι πρόκειται για το δοκίμιο αναφοράς (control beam). Το TB σημαίνει δοκός διατομής πλακοδοκού (T-section beam). Το 150 ή 200 δηλώνει την αξονική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών λωρίδων ενίσχυσης σε χιλιοστά. Το γράμμα L, B ή P υποδηλώνει το είδος της αγκύρωσης που εφαρμόστηκε, L όταν χρησιμοποιείται χαλύβδινο γωνιακό 50X5, B στην περίπτωση χρήσης λάμας (blade) διατομής 20X5 ή P στην περίπτωση χρήσης της αγκύρωσης που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής Υλικών και Κατασκευών του Α.Π.Θ. Στη συνέχεια ο αριθμός 1 ή 2 επισημαίνει τον αριθμό των κοχλιών που χρησιμοποιούνται για την αγκύρωση. Τέλος το μικρό γράμμα t ή b δηλώνει το γεγονός αν ο κοχλίας αγκύρωσης διαπερνά την πλάκα t (through floor) ή εάν η οπή σταματά μέσα στο πάχος της πλάκας (blind hole). Τέλος το σύμβολο -R αναφέρεται στα δοκίμια τα οποία έχουν επισκευαστεί.

Πίνακας 3.7 Λεπτομέρειες μητρικών και επισκευασμένων δοκιμών διατομής πλακοδοκού

Δοκός	Τύπος Φόρτισης	Οπλισμός Διατήρησης	Ύπαρξη αγκύρωσης	Πλάτος ΙΟΠ (mm)	Αξονική απόσταση ΙΟΠ	Διάταξη ΙΟΠ	Τύπος Δοκιμίου Διάταξη Φόρτισης
CTB	Ανακυκλιζόμενη	Όχι	Όχι	100	Όχι	Όχι	



Δοκός	Τύπος Φόρτισης	Οπλισμός Διατήρησης	Υπαρξη αγκύρωσης	Πλάτος ΙΟΠ (mm)	Αξονική απόσταση ΙΟΠ	Διάταξη ΙΟΠ	Τύπος Δοκιμίου Διάταξη Φόρτισης
TB150	Ανακυκλιζόμενη	X-ΙΟΠ (1 στρώση)	Όχι	100	Ναι, 150 mm		
TB200	Ανακυκλιζόμενη	X-ΙΟΠ (1 στρώση)	Όχι	100	Ναι, 200 mm		
TB150 L2t	Ανακυκλιζόμενη	X-ΙΟΠ (1 στρώση)		100	Ναι, 150 mm		
TB200 L1t	Ανακυκλιζόμενη	X-ΙΟΠ (1 στρώση)		100	Ναι, 200 mm		
TB150 P1b	Ανακυκλιζόμενη	X-ΙΟΠ (1 στρώση)		100	Ναι, 150 mm		
TB200 P2b	Ανακυκλιζόμενη	X-ΙΟΠ (2 στρώσεις)		100	Ναι, 200 mm		

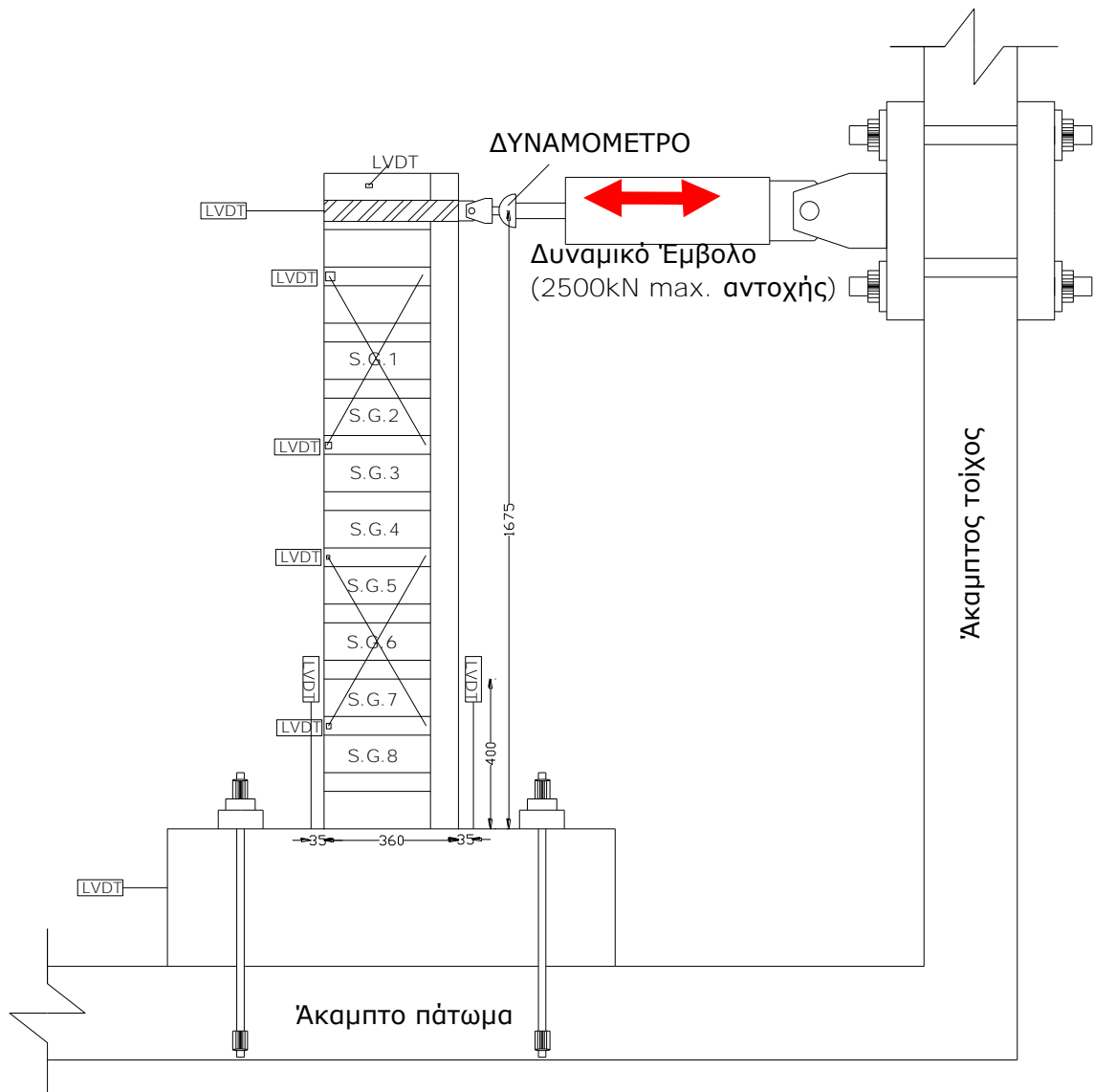


Δοκός	Τύπος Φόρτισης	Οπλισμός Διατήρησης	Υπαρξη αγκύρωσης	Πλάτος ΙΟΠ (mm)	Αξονική απόσταση ΙΟΠ	Διάταξη ΙΟΠ	Τύπος Δοκιμίου Διάταξη Φόρτισης
TB150-R	Ανακυκλιζόμενη	X-ΙΟΠ (1 στρώση)		100	Ναι, 150 mm		
TB200-R	Ανακυκλιζόμενη	A-ΙΟΠ (1 στρώση)		100	Ναι, 200 mm		
TB200 P2b-R*	Ανακυκλιζόμενη	X-ΙΟΠ (2 στρώσεις)		100	Ναι, 200 mm		

\* πρόκειται για τροποποιημένη αγκύρωση η οποία έχει τόσο βλήτρα όσο και αγκύρια που περνούν μέσα από την πλάκα.

### 3.5.4 Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται αναλυτικά στα σχήματα 3.23 και 3.24.



Σχήμα 3.23 Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης πλακοδοκών Ο/Σ

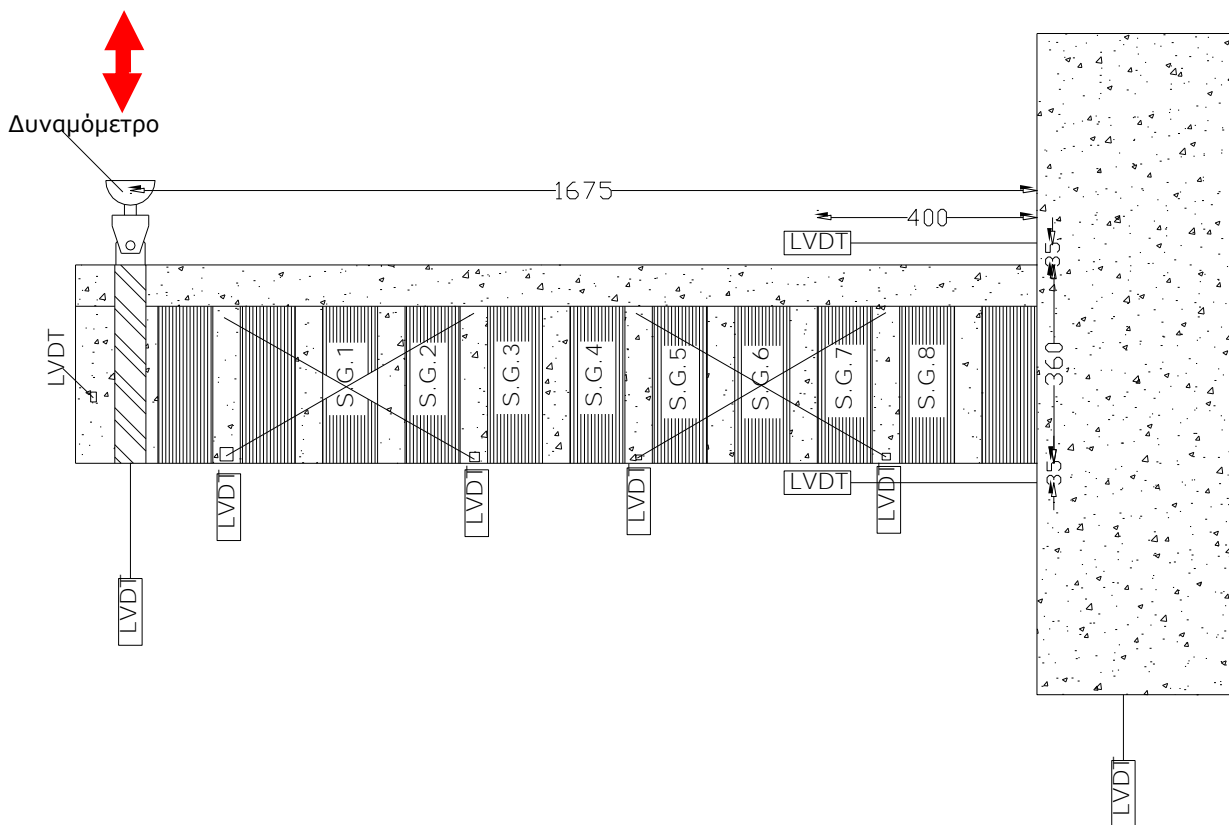


Σχήμα 3.24 Φωτογραφική απεικόνιση πειραματικής διάταξης

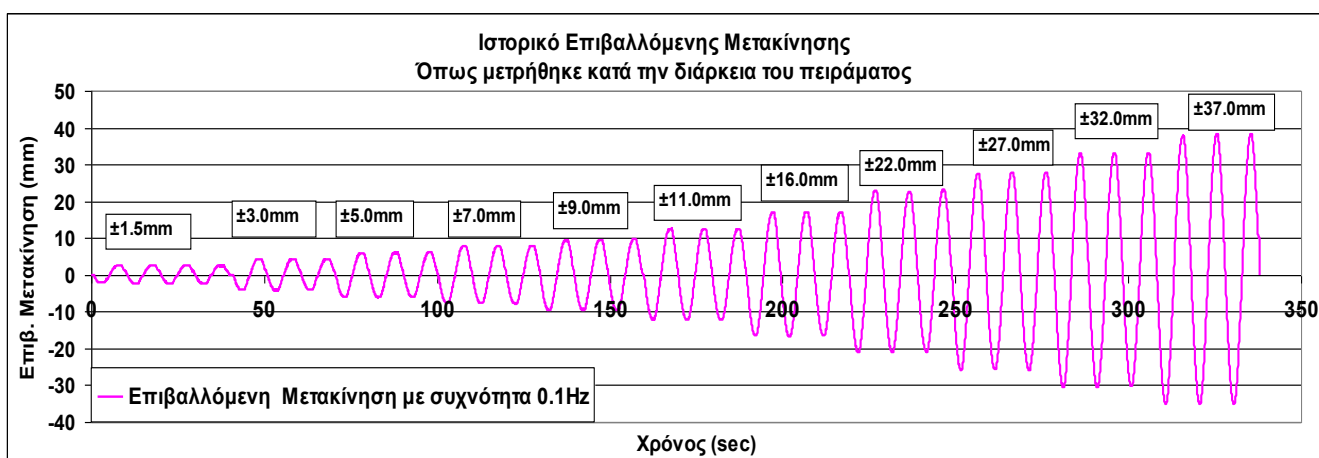
Όπως αναφέρθηκε, πρόκειται για διερεύνηση σε ανακυκλιζόμενη “σεισμικού τύπου” φόρτιση πλακοδοκού που αναπαριστά ακραία δοκό πλαισίου Ο/Σ, καταπονούμενη σε κάμψη και διάτμηση. Το φορτίο επιβάλλεται σε ύψος 1675 mm κατά την οριζόντια έννοια ώστε να δημιουργήσει στο εν λόγω δοκίμιο την επιθυμητή εντατική κατάσταση της καμπτο-διάτμησης στην ένωση μιας τέτοιας δοκού και ενός ακραίου υποστύλωματος. Σε κάθε δοκίμιο που έχει εξωτερική ενίσχυση με λωρίδες ΧΙΟΠ έχουν τοποθετηθεί 8 ταινίες παραμόρφωσης, όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 3.25. Σε όλες τις περιπτώσεις οι ταινίες έχουν τοποθετηθεί στο μέσο του πλάτους του ΙΟΠ και κοντά στην αναμενόμενη διατμητική ρηγμάτωση. Επίσης, καταγράφονται οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά τη φόρτιση του δοκιμίου. Τέλος από τις μετρήσεις αυτές προκύπτει ποιες ταινίες και πόσο λειτουργούν στην αντίσταση έναντι παραλαβής τέμνουσας. Επίσης έχουν τοποθετηθεί δυο LVDT εκτός επιπέδου φόρτισης τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για επιβεβαίωση ότι δεν είχαμε μετακινήσεις εκτός επιπέδου. Επιπρόσθετα τοποθετήθηκαν δυο LVDT, ένα κοντά στην κάτω ίνα και ένα κοντά στην πάνω ίνα της δοκού κοντά στην θέση σύνδεσής της με το υποστύλωμα για τον υπολογισμό τυχόν στροφών της δοκού ως προς το υποστύλωμα. Όλες οι μετρήσεις συνδυάζονται με τη μέτρηση του φορτίου που επιβάλλεται, με τη βοήθεια ενός δυναμόμετρου και καταγράφονται και συγκεντρώνονται σε ένα ψηφιακό σύστημα απόκτησης δεδομένων μέσω δύο ηλεκτρονικών υπολογιστών. Τέλος η επιβολή της φόρτισης γίνεται με την επιβολή καταναγκασμένης ανακυκλιζόμενης μετακίνησης μέσω ενός δυναμικού εμβόλου μέγιστης δύναμης 2500kN. Η συχνότητα μεταβολής της εν λόγω καταναγκασμένης μετακίνησης ήταν 0.1Hz. Το ιστορικό μεταβολής της καταναγκασμένης μετακίνησης φαίνεται στο σχήμα 3.26, όπως ακριβώς μετρήθηκε κατά την διάρκεια μιας ολόκληρης φορτιστικής ακολουθίας, ενώ η διεύθυνση επιβολής της στο δοκίμιο της πλακοδοκού φαίνεται στο σχήμα 3.25. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.26, η καταναγκασμένη ανακυκλιζόμενη μετακίνηση επιβάλλονταν σε διακριτά στάδια τριών επάλληλων κύκλων για κάθε στάδιο. Η συνολική φορτιστική ακολουθία ήταν πολλών τέτοιων σταδίων με συνεχώς αυξανόμενο εύρος εκκινώντας από  $\pm 1.5\text{mm}$ . Για κάθε στάδιο πραγματοποιούνταν τρεις κύκλοι καταναγκασμένης μετακίνησης διατηρώντας το εύρος σταθερό μέχρι το επόμενο στάδιο. Αυτό το είδος της φορτιστικής ακολουθίας υιοθετείται συχνά για την προσομοίωση της επιβολής «σεισμικού τύπου»



καταπόνησης σε δοκίμια δομικών στοιχείων όπως αυτά που εξετάζονται στην παρούσα διερεύνηση. Σημαντική πτώση της φέρουσας ικανότητας και μεγάλου εύρους βλάβες υπαγόρευαν την διακοπή της φορτιστικής ακολουθίας.



Σχήμα 3.25 Ενοργάνωση δοκιμίου διατομής πλακοδοκού



Σχήμα 3.26. Ανακυκλιζόμενη επιβαλλόμενη μετακίνηση στο δοκίμιο διατομής πλακοδοκού



## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> – Πειραματικά Αποτελέσματα

### 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται εκτενής παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δοκιμών που έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Η αναφορά και σχολιασμός των αποτελεσμάτων αναπτύσσεται σε τρία υποκεφάλαια. Στο υποκεφάλαιο 4.2 θα παρατεθούν και θα σχολιαστούν συνοπτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ. Στην παράγραφο 4.3 θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των ορθογωνικών δοκών Ο/Σ και τέλος στο υποκεφάλαιο 4.4 θα αναφερθούν και θα σχολιαστούν συνοπτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών πλακοδοκών Ο/Σ σε ανακυκλιζόμενη σεισμικού τύπου φόρτιση.

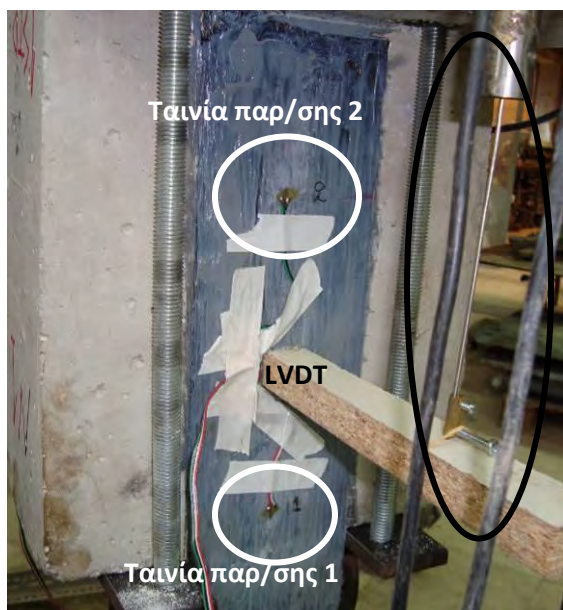
### 4.2 Αποτελέσματα δοκιμών απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ

Συνολικά ελέγχθηκαν 29 δοκίμια. Στην παράγραφο 4.2.1 γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων όλων των δοκιμών που έχουν χρησιμοποιήσει σαν υλικό ενίσχυσης ίνες άνθρακα (ΑΙΟΠ), ενώ στη παράγραφο 4.2.2 τα αποτελέσματα των δοκιμών που ενισχύθηκαν με ίνες χάλυβα υψηλής αντοχής (ΧΙΟΠ). Τέλος στην παράγραφο 4.3 θα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών σε συγκριτικούς πίνακες καθώς και ο συνοπτικός σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

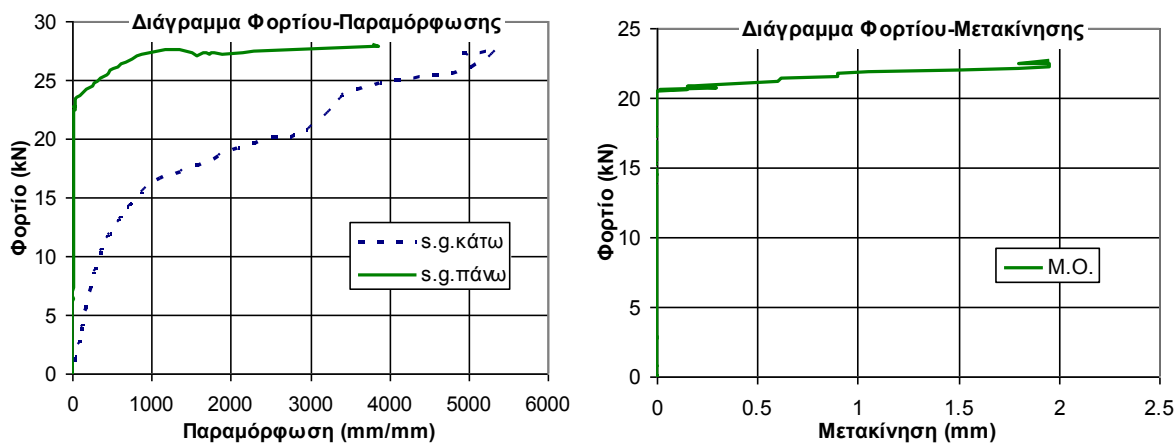
#### 4.2.1 Αναλυτικά αποτελέσματα απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ ενισχυμένων με ΑΙΟΠ

Το δοκίμιο CSN1 αποτελείται από ένα τμήμα σκυροδέματος διατομής πλακοδοκού μήκους 360mm στις δύο παρειές του οποίου έχει επικολληθεί μια στρώση ΑΙΟΠ χωρίς την ύπαρξη κάποιας αγκύρωσης. Η επιφάνεια επικόλλησης δεν έχει υποστεί κάποια ιδιαίτερη επεξεργασία.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η μια από τις δύο όψεις του δοκιμίου όπου μετρώνται οι παραμορφώσεις σε δύο σημεία και οι μετακινήσεις στο μέσο του μήκους επικόλλησης. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των παραμορφώσεων στα σημεία κάτω (s.g.1) και άνω (s.g.2), καθώς και το διάγραμμα του μέσου όρου της μετακίνησης των δύο όψεων σε σχέση με το φορτίο. Από το διάγραμμα φορτίου παραμόρφωσης προκύπτει ότι η πλήρης αποκόλλησή του υφάσματος του SRP εμφανίζεται για δύναμη 23,5kN. Το γεγονός αυτό φαίνεται από την ένδειξη της άνω ταινίας παραμόρφωσης (s.g.2), η οποία δεν έχει καμία ένδειξη μέχρι τη στιγμή εκείνη. Αντιθέτως η ταινία παραμόρφωσης κάτω (s.g.1) έχει ενδείξεις από την αρχή της φόρτισης του δοκιμίου. Οι μέγιστες τιμές της παραμόρφωσης τείνουν να ταυτιστούν για τις δύο ταινίες, με μέγιστη μέση τιμή τα 5400  $\mu$ strain ή 5,4%. Από το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης, μετρημένης στο μέσο μήκος αγκύρωσης, προκύπτει ότι η αποκόλληση στο σημείο εκείνο ξεκίνησε σε φορτίο 21 kN. Η ένδειξη αυτή είναι λίγο μικρότερη από την ένδειξη της αποκόλλησης από την άνω ταινία παραμόρφωσης, γεγονός που υποδηλώνει την προοδευτική εξέλιξη της αποκόλλησης του ΑΙΟΠ. Τέλος το μέγιστο φορτίο που μετρήθηκε είναι ίσο με 27,94 kN.



Σχήμα 4.1 πλαϊνή όψη CSN1



Σχήμα 4.2 Διαγράμματα παραμόρφωσης και μετακίνησης με το φορτίο



Από το διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης, μετρημένης στο μέσο μήκος αγκύρωσης, προκύπτει ότι η αποκόλληση στο σημείο εκείνο ξεκίνησε σε φορτίο 21 kN. Η ένδειξη αυτή είναι λίγο μικρότερη από την ένδειξη της αποκόλλησης από την άνω ταινία παραμόρφωσης, γεγονός που υποδηλώνει την προοδευτική εξέλιξη της αποκόλλησης του ΑΙΟΠ. Τέλος το μέγιστο φορτίο που μετρήθηκε είναι ίσο με 27,94 kN.

Η μορφή αστοχίας του δοκιμίου αυτού χαρακτηρίζεται από την ολοκληρωτική αποκόλληση της λωρίδας ΑΙΟΠ από την μη επεξεργασμένη επιφάνεια του σκυροδέματος (Σχήμα 4.3). Μια τέτοιου είδους μορφή αστοχίας έχει ως αποτέλεσμα την μη αξιοποίηση, σε μεγάλο βαθμό, των

Σχήμα 4.3 Μορφή Αστοχίας CSN1

Στη συνέχεια αναφέρονται τα αποτελέσματα των υπολοίπων δοκιμών στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών ΑΙΟΠ

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο (kN)	Μέγιστη μέση παραμόρφωση (μstrain)	Φορτίο αποκόλλησης από s.g.2 (kN)	Φορτίο αποκόλλησης από LVDT (kN)	Μορφή αστοχίας
CRN1	42,67	6775	40.11	36.16	αποκόλληση
CSL2t <sup>1HUS</sup>	42,06	3680	28,0	27,0	εξόλκευση βίδας αγκύρωσης
CRL2t <sup>1HUS</sup>	47,62	3931	43.3	43.0	εξόλκευση βίδας αγκύρωσης
CSL2t <sup>M8</sup>	54,94	4680	32	28,0	τοπική αστοχία ΑΙΟΠ
CRL2t <sup>M8</sup>	61,81	5880	45,0	34,0	αστοχία αγκύρωσης
CSL2t <sup>2HUS</sup>	50,05	4347	32,0	32,0	εξόλκευση βίδας αγκύρωσης
CSP2s	113,0	9065	30,0	32,0	Θραύση ΑΙΟΠ
CRP2s	102,7	8275	38,3	40,5	Θραύση ΑΙΟΠ

Συνοπτικά μπορεί να ειπωθεί για τα παραπάνω ότι την καλύτερη συμπεριφορά έδειξε η αγκύρωση που αναπτύχθηκε στο Α.Π.Θ. Επίσης η αγκύρωση με γωνιακά έχει μια ικανοποιητική συμπεριφορά και εύκολα προβλέψιμη.



Στα έξι δοκίμια που ακολουθούν έγινε χρήση αγκύρωσης με θύσανο από ΑΙΟΠ. Πρόκειται για ένα είδος αγκύρωσης το οποίο χρησιμοποιείται εμπορικά και πωλείται από τις εταιρίες. Πρόκειται για ένα κορδόνι από ίνες άνθρακα μιας διεύθυνσης, σε μορφή θυσάνου. Τα αποτελέσματα αυτά περιγράφονται στον Πίνακα 4.2. Στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει χρήση εποξειδικής ρητίνης στη διεπιφάνεια ΑΙΟΠ και σκυροδέματος η χρήση των μετακινησιομέτρων LVDTs δεν κατέστη δυνατή. Επίσης σε αυτές τις περιπτώσεις δεν υπάρχει φορτίο αποκόλλησης αφού δεν υφίσταται κάποια διεπιφάνεια.

Πίνακας 4.2 Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών ενισχυμένων με ΑΙΟΠ με αγκύρωση θυσάνου

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο (kN)	Μέγιστη μέση παραμόρφωση (μstrain)	Φορτίο αποκόλλησης από s.g.2 (kN)	Φορτίο αποκόλλησης από LVDT (kN)	Μορφή αστοχίας
CNT1s	24,6	4500	-	-	αστοχία αγκύρωσης
CNT1t	10,9	1730	-	-	πρόωρη αστοχία αγκύρωσης
CNT1s,t	33,8	6278	-	-	αστοχία αγκύρωσης
CNT1s <sup>0</sup>	38,6	6500	-	-	αστοχία ΑΙΟΠ
CNT1s <sup>B</sup>	41,4	6980	-	-	αστοχία αγκύρωσης
CSTs <sup>Ob</sup>	49,0	4382	30,5	-	αστοχία αγκύρωσης
CSTs <sup>Ot</sup>	61,3	5695	30,5	-	αστοχία αγκύρωσης

Η συμπεριφορά αυτής της αγκύρωσης δεν είναι ικανοποιητική. Αστοχεί πρόωρα και θέτει περιορισμό στο ανώτερο φορτίο που μπορεί να παραληφθεί από την ενίσχυση. Το σημαντικότερο πρόβλημα εντοπίστηκε στο γεγονός ότι δεν εισέρχεται το απαραίτητο ποσοστό ρητίνης στις ίνες άνθρακα.

#### 4.2.2 Αναλυτικά αποτελέσματα απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ ενισχυμένων με ΧΙΟΠ

Οι αντίστοιχες πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια με χρήση χαλύβδινων ινών υψηλής αντοχής σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη (ΧΙΟΠ). Τα πειραματικά αποτελέσματα παραθέτονται υπό μορφή πινάκων.



Πίνακας 4.3 Πειραματικά αποτελέσματα απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ ενισχυμένων με ΧΙΟΠ

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο (kN)	Μέγιστη μέση παραμόρφωση (μstrain)	Φορτίο αποκόλλησης από s.g.2 (kN)	Φορτίο αποκόλλησης από LVDT (kN)	Μορφή αστοχίας
SSN1	29,9	5700	25,3	25	αποκόλληση
SRN1	39,2	7465	38,7	37	αποκόλληση
SSL2t	41,7	4950	30,5	29,0	εξόλκευση βίδας αγκύρωσης
SRL2t	45,8	5400	36,5	36	εξόλκευση βίδας αγκύρωσης
SNL1t	13,4	-	-	-	Πρόωρη θραύση των ινών χάλυβα (όχι ρητίνη)
SNL1t <sup>R</sup>	53,9	-	-	-	θραύση ινών χάλυβα όχι ρητίνη
SSL2t <sup>M8</sup>	65,2	5765	31	30,5	θραύση ντίζας M8
SNL2t <sup>M8-M10</sup>	61,0	6150	-	-	θραύση ντίζας M8
SNL2t <sup>M10</sup>	97,6	9622	-	-	θραύση ντίζα M10
SNL2t <sup>M12</sup>	90,6	9025	-	-	θραύση ΧΙΟΠ
SSL2t <sup>2HUS</sup>	44,15	5125	32	31	εξόλκευση βίδας αγκύρωσης
SSP2	87,3	7980	30	27,4	θραύση ΧΙΟΠ
SRP2	105,2	10235	41,1	40,3	θραύση ΧΙΟΠ

Από τα παραπάνω αποτελέσματα έγινε ξεκάθαρο ότι η αγκύρωση με χρήση γωνιακών μπορεί να διαστασιολογηθεί με ασφάλεια. Την μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα την έδωσε το δοκίμιο με χρήση της αγκύρωσης που αναπτύχθηκε στο ΑΠΘ.

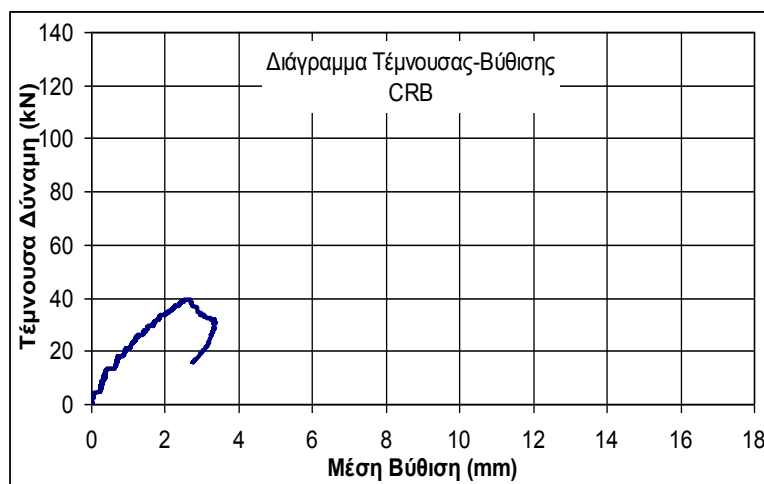
Όλοι οι παραπάνω πίνακες αποτελούν τα επιμέρους αποτελέσματα των δοκιμών σε αυτό το είδος της αξονικής φόρτισης που επιβλήθηκε στα απλά δοκίμια τμήματος πλακοδοκού. Στο επόμενο κεφάλαιο 5 θα αναφερθούν τα αποτελέσματα συγκεντρωτικά και θα σχολιαστούν εκτενέστερα. Επίσης θα γίνουν αναλύσεις και συγκρίσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων με αναλυτικές σχέσεις.

### 4.3 Αποτελέσματα δοκιμών ορθογωνικών δοκών Ο/Σ

Συνολικά έχουν διερευνηθεί 10 δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος καθαρού ανοίγματος 2700mm ορθογωνικής διατομής 120mm πλάτους x 360mm ύψους. Οι δοκοί υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Παρακάτω γίνεται αναφορά των αποτελεσμάτων του κάθε δοκιμίου ξεχωριστά.

#### - Δοκίμιο CRB

Πρόκειται για το πρώτο δοκίμιο της διερεύνησης το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως δοκίμιο αναφοράς, δεν έχει ενισχυθεί με κάποιο τρόπο. Στο Σχήμα 4.4 που ακολουθεί παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης του παρόντος δοκιμίου.



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα Φορτίου-Βύθισης δοκιμίου CRB.



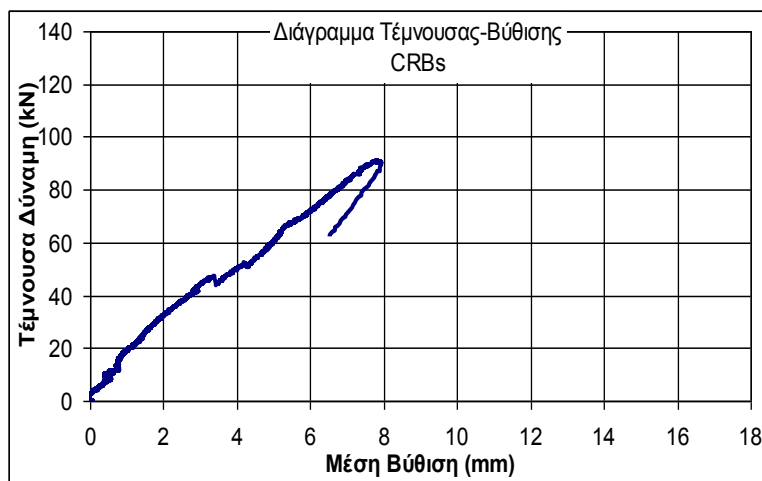
Σχήμα 4.5 Μορφή αστοχίας μητρικής δοκού

Από το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται ένα οριακό φορτίο ίσο με 39,4 kN. Η μορφή αστοχίας είναι διατμητικού τύπου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.5, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αντοχή σε διάτμηση της μητρικής δοκού λόγω του σκυροδέματος που είναι και ο μόνος μηχανισμός αντίστασης είναι ίση με 39,4kN.

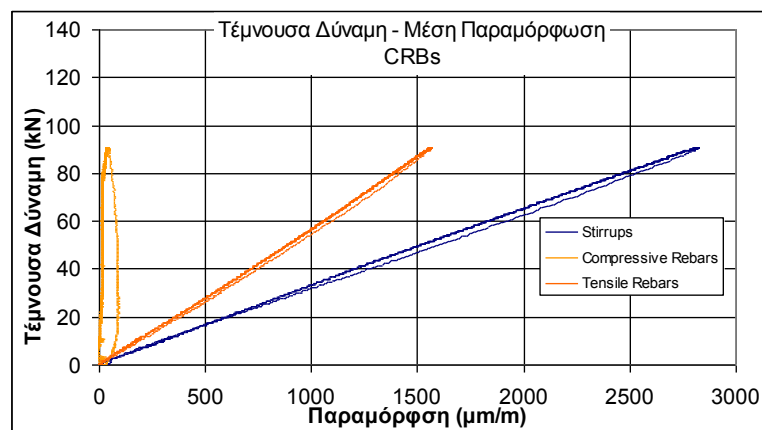
Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5 η μορφή αστοχίας αναπτύχθηκε με τη δημιουργία λοξού ρήγματος, διατμητικού τύπου, με γωνία περίπου ίση με 45° από την οριζόντια πλευρά.

### - Δοκίμιο CRBs

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μητρικής δοκού, χωρίς την ύπαρξη κάποιας εξωτερικής ενίσχυσης, αλλά με την ύπαρξη εσωτερικών συνδετήρων. Η δοκός αυτή όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι οπλισμένη με συνδετήρες  $\varnothing 8/250$ , προσπαθώντας να προσομοιάσουν τον αντίστοιχο οπλισμό διάτμησης παλαιών κατασκευών. Μετρήθηκε λοιπόν η φέρουσα ικανότητα αυτής της δοκού και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στο παρακάτω διάγραμμα 4.6 φορτίου-βύθισης.



Σχήμα 4.6 Διάγραμμα Τέμνουσα-Βύθισης.



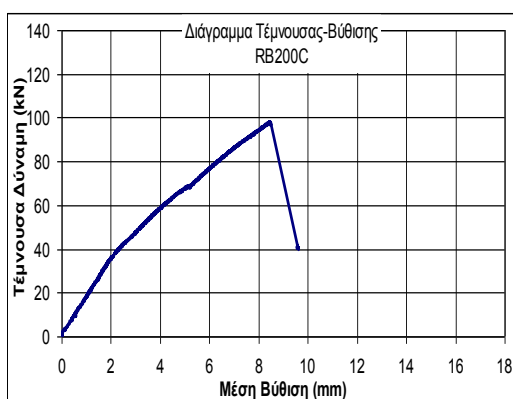
Σχήμα 4.7 Διάγραμμα Τέμνουσας-Παραμόρφωσης οπλισμών

Η μέγιστη τέμνουσα που παραλήφθηκε είναι ίση με 90,9kN, περίπου 2,3 φορές μεγαλύτερη από αυτή χωρίς συνδετήρες. Το πείραμα έλαβε τέλος όταν οι παραμορφώσεις των εσωτερικών συνδετήρων ξεπέρασαν τη διαρροή, δηλαδή τα 2500μstrain. Για τη δοκό αυτή είχαν τοποθετηθεί ταινίες παραμόρφωσης τόσο στους συνδετήρες όσο και στον εφελκόμενο και θλιβόμενο οπλισμό. Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται οι μετρήσεις των ταινιών παραμόρφωσης. Είναι εμφανές από την εξέταση των παραμορφώσεων ότι η αστοχία ήταν διατμητική αφού οι μέγιστες παραμορφώσεις στον εφελκόμενο οπλισμό δεν ξεπέρασαν τα 1500 μstrain.

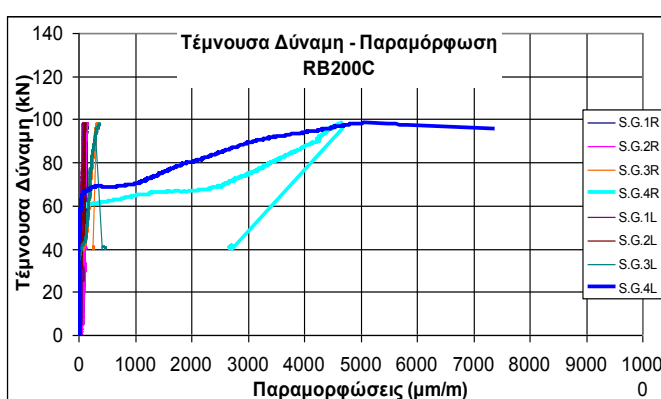


### - Δοκίμιο RB200C

Το δοκίμιο RB200C δεν έχει εσωτερικό σπλισμό διάτμησης και είναι ενισχυμένο εξωτερικά με λωρίδες ΑΙΟΠ πλάτους 100mm ανά 200mm, απόσταση που μετρείται αξονικά από τον άξονα στο μέσο του πλάτους κάθε λωρίδας. Σε αυτό το δοκίμιο δεν έχει τοποθετηθεί κάποιου είδους αγκύρωση. Οι λωρίδες είναι απλά επικολλημένες πάνω στην επιφάνεια του σκυροδέματος και σε όλο το ύψος της δοκού. Το σχήμα 4.8 που ακολουθεί δηλώνει τη συμπεριφορά του δοκιμίου μέσω του διαγράμματος τέμνουσας έναντι μέσης βύθισης.



Σχήμα 4.8 Τέμνουσα-Βύθισης RB200C.



Σχήμα 4.9 Τέμνουσα – Παραμορφώσεις RB200C

Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα είναι ίση με 97,8kN, 2,5 φορές μεγαλύτερη από αυτή του μητρικού δοκιμίου. Η μορφή αστοχίας προήλθε από την αποκόλληση λωρίδας ΑΙΟΠ από την παρειά του σκυροδέματος. Η μορφή αυτή αστοχίας απεικονίζεται στο Σχήμα 4.10.



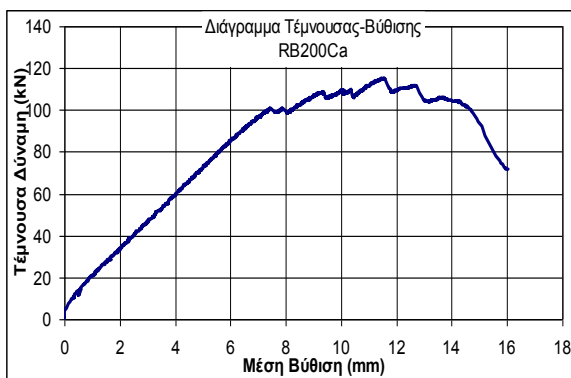
Σχήμα 4.10 Μορφή αστοχίας δοκιμίου RB200C

Επίσης στο δοκίμιο αυτό έχουν τοποθετηθεί ταινίες παραμόρφωσης στις λωρίδες ΑΙΟΠ. Οι καταγραφές τους παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.9. Η κύρια ρηγμάτωση τέμνει δύο λωρίδες τις 3L και 4L με τιμές 610 και 7390 μstrain.

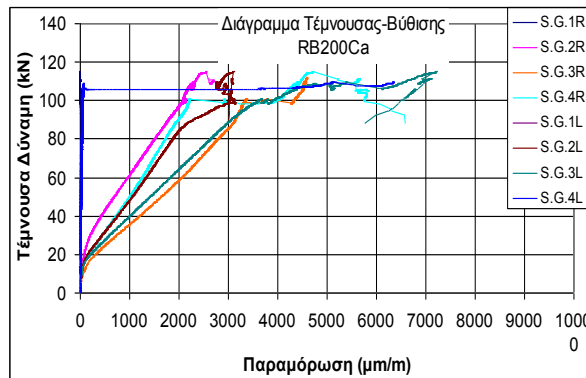
### - Δοκίμιο RB200Ca

Το δοκίμιο RB200Ca έχει ενισχυθεί με τον ίδιο τρόπο όπως και το προηγούμενο δοκίμιο με τη διαφορά ότι οι λωρίδες ΑΙΟΠ δεν έχουν μόνο επικολληθεί αλλά επιπρόσθετα έχουν αγκυρωθεί με τον τρόπο που έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 3.

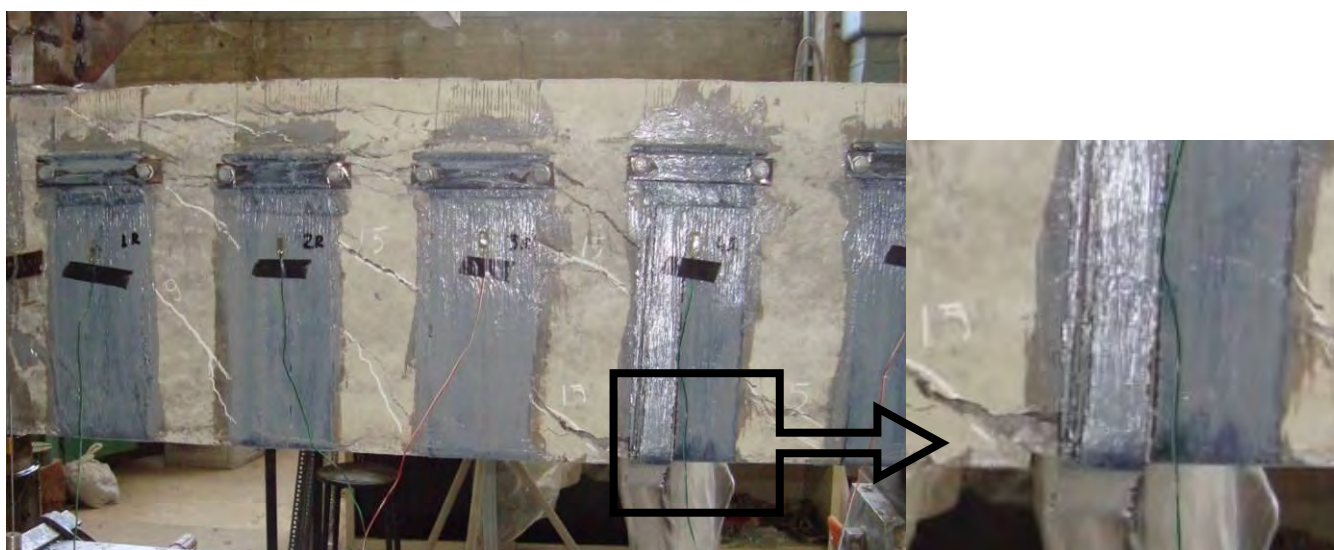
Το Σχήμα 4.11 παρουσιάζει το διάγραμμα τέμνουσας δύναμης σε σχέση με τη μέση βύθιση του δοκιμίου. Η μέγιστη τέμνουσα δύναμη που παρέλαβε το παρόν δοκίμιο ανέρχεται στα 115,1kN. Η τέμνουσα αυτή είναι σαφέστατα μεγαλύτερη από αυτή του μητρικού δοκιμίου (39N) αλλά και μεγαλύτερη από το δοκίμιο RB200C (97,8kN), δηλαδή αυτό χωρίς την αγκύρωση. Οι μετρήσεις των ταινιών παραμόρφωσης παρουσιάζονται στο σχήμα 4.12. Το κύριο διατμητικό ρήγμα τέμνει δύο ταινίες παραμόρφωσης με τιμές 4580  $\mu$ strain και 6590  $\mu$ strain, πρόκειται για τις ταινίες 3R και 4R. Σε ότι αφορά στη μορφή αστοχίας, παρατηρείται ότι η μορφή αστοχίας εντοπίζεται στην πρόωρη αστοχία του ΑΙΟΠ λόγω συγκέντρωσης τάσεων, όπως φαίνεται το Σχήμα 4.13.



Σχήμα 4.11 Τέμνουσα-Βύθιση RB200Ca.



Σχήμα 4.12 Τέμνουσα – Παραμορφώσεις RB200Ca



Σχήμα 4.13 Μορφή αστοχίας δοκιμίου RB200Ca

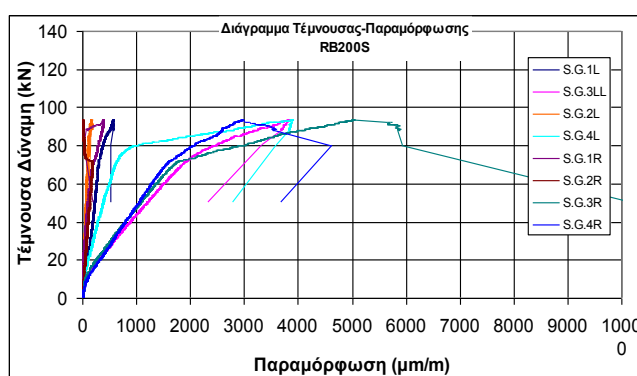
- Δοκίμιο RB200S

Στη συνέχεια με ακριβώς τις ίδιες παραδοχές πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές των ορθογωνικών δοκών τα οποία έχουν ενισχυθεί με λωρίδες ΧΙΟΠ. Το δοκίμιο RB200S δεν έχει κάποια μορφή αγκύρωσης. Στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζεται το διάγραμμα Τέμνουσας δύναμης σε σχέση με τη μέση βύθιση του δοκιμίου, ενώ στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζεται η μορφή αστοχίας του δοκιμίου, η οποία εντοπίζεται στην αποκόλληση του ΧΙΟΠ.

Η μέγιστη αντίσταση σε τέμνουσα του δοκιμίου αυτού είναι 94kN, λίγο χαμηλότερη από την αντίστοιχη του δοκιμίου ενισχυμένου με ΑΙΟΠ αλλά μεγαλύτερη από αυτές των μητρικών δοκιμίων τόσο με εσωτερικό οπλισμό διάτμησης όσο και χωρίς.



Σχήμα 4.14 Τέμνουσα-Βύθιση RB200S



Σχήμα 4.15 Τέμνουσας – Παραμορφώσεις RB200S

Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζεται το διάγραμμα Τέμνουσας δύναμης σε σχέση με τις παραμορφώσεις των ταινιών παραμόρφωσης. Από το Σχήμα της μορφής αστοχίας παρατηρείται ότι το κύριο διατμητικό ρήγμα τέμνει τις ταινίες 3R και 4R με τιμές 5935  $\mu$ strain και 4620  $\mu$ strain αντιστοίχως.



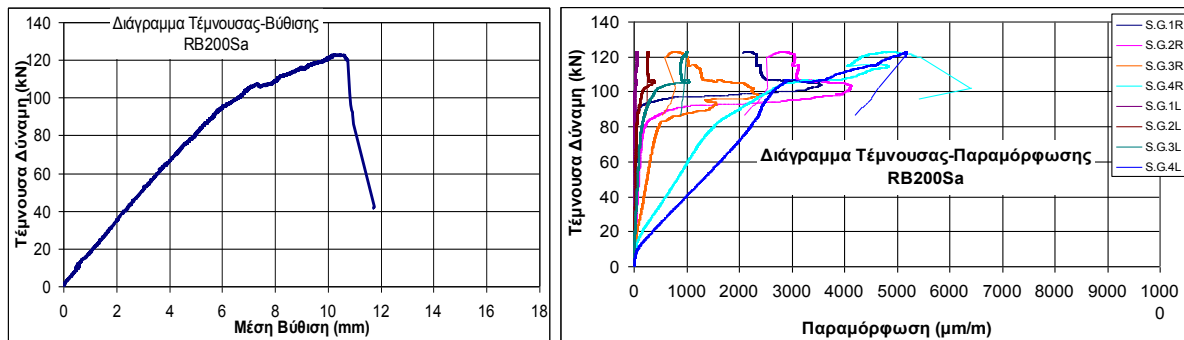
Σχήμα 4.16 Μορφή αστοχίας δοκιμίου RB200S

### - Δοκίμιο RB200Sa

Στο δοκίμιο αυτό εφαρμόστηκε η ίδια αγκύρωση με το δοκίμιο που είχε ενισχυθεί διατμητικά από ΑΙΟΠ. Συνεπώς η μόνη διαφορά έγκειται στο είδος του υλικού ενίσχυσης. Και σε αυτήν την περίπτωση θα παρατεθούν τα διαγράμματα της Τέμνουσας δύναμης σε σχέση με τη μέση βύθιση και τις ανηγμένες παραμορφώσεις, Σχήμα 4.17 και 4.20 αντίστοιχα.

Η μέγιστη αντίσταση σε τέμνουσα καταγράφηκε ίση με 122,6 kN.

Η μορφή αστοχίας εμφανίστηκε στην αριστερή μεριά του δοκιμίου εντοπιζόμενη στην αστοχία της αγκύρωσης λόγω εξόλκευσης των κοχλιών από τον όγκο του σκυροδέματος (Σχήμα 4.19).



Σχήμα 4.17 Τέμνουσα-Βύθιση RB200S.

4.20 Τέμνουσα – Παραμορφώσεις RB200Sa

Η τοποθέτηση των ταινιών παραμόρφωσης είναι διαφορετική από τις άλλες δοκιμές. Στο Σχήμα 4.18 αποτυπώνονται οι θέσεις που αυτές τοποθετήθηκαν. Πραγματοποιήθηκε κάποια πύκνωση με τοποθέτηση τριών ταινιών στη λωρίδα ΧΙΟΠ όπου αναμένονταν η κυρίαρχη διατμητική ρηγμάτωση. Από το Σχήμα 4.20 φαίνεται ότι οι καταγραφές στη δεξιά μεριά 1r,2r,3r αφορούν μία λωρίδα και έχουν τιμές 3545μstrain, 4115μstrain, 2370μstrain αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι οι παραμορφώσεις δεν είναι συμμετρικές αλλά ακολουθούν μια κατανομή περίπου παραβολική. Η ταινία 4r κατέγραψε παραμορφώσεις στην ακριβώς διπλανή λωρίδα από την οποία περνούσε η διατμητική ρωγμή ίση με 6415μstrain η οποία όπως φαίνεται είναι τελικά η κυρίαρχη ρωγμή.



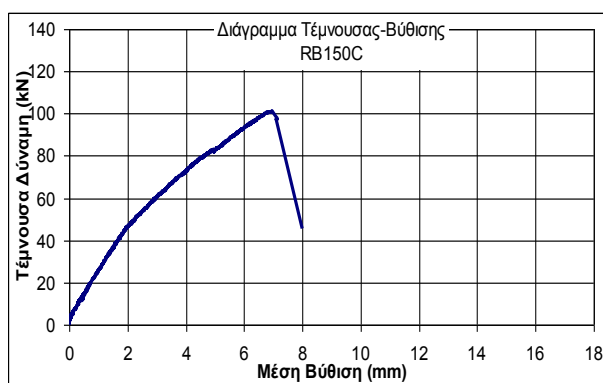
Σχήμα 4.18 Θέσεις τοποθέτησης ταινιών παραμόρφωσης



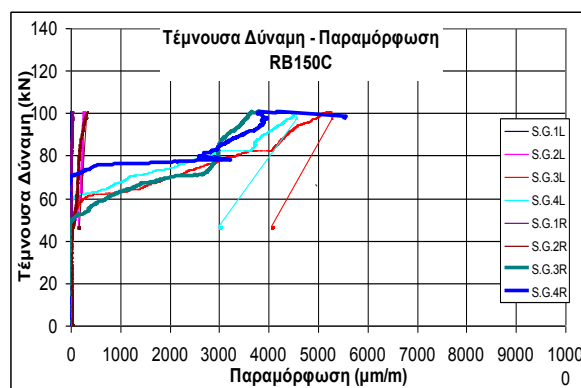
Σχήμα 4.19 Μορφή αστοχίας δοκιμίου RB200S

### - Δοκίμιο RB150C

Στη συνέχεια ακολούθησε μια σειρά πειραμάτων με τις ίδιες παραμέτρους ως ανωτέρω αλλά με τη διαφορά ότι η απόσταση ανάμεσα σε δύο άξονες στο μέσο του πλάτους του ΙΟΠ δύο επάλλληλων λωρίδων μειώθηκε από τα 200mm στα 150mm. Αρχικά ελέγχθηκε το δοκίμιο με απλή επικόλληση ενός ΑΙΟΠ χωρίς αγκύρωση. Η συμπεριφορά του αποτυπωμένη σε διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – μέσης βύθισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.21



Σχήμα 4.21 Τέμνουσα-Βύθιση RB150C



4.23 Τέμνουσα – Παραμορφώσεις RB150C

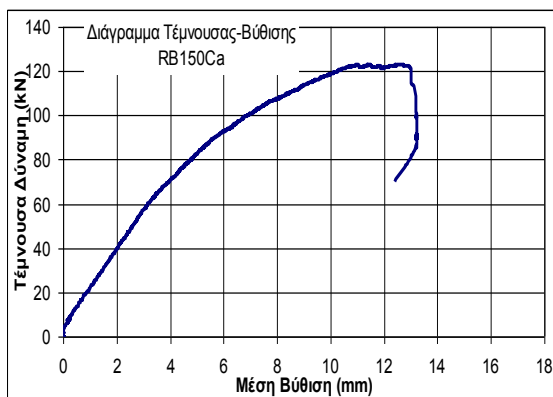
Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα είναι ίση με 101kN. Η μορφή αστοχίας προήλθε από την αποκόλληση του ΑΙΟΠ (Σχήμα 4.22) και πιο συγκεκριμένα αποκολλήθηκαν πάνω στο κυρίαρχο ρήγμα οι ταινίες 3r και 4r. Οι λωρίδες ΑΙΟΠ που αποκολλήθηκαν είναι οι 3r και 4r με τιμές αντίστοιχα 3820μstrain και 5580μstrain



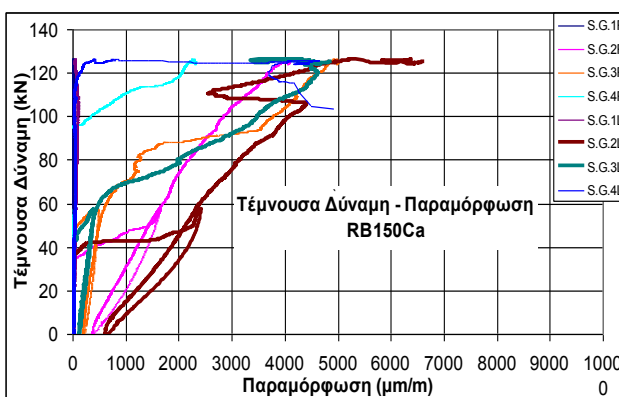
Σχήμα 4.22 Μορφή αστοχίας δοκιμίου RB150C

### - Δοκίμιο RB150Ca

Στη συνέχεια ακολούθησε η διερεύνηση του ίδιου δοκιμίου αλλά με χρήση της αγκύρωσης. Το Σχήμα 4.24 παρουσιάζει το διάγραμμα τέμνουσας δύναμης, σε σχέση με τη μέση βύθιση του δοκιμίου. Η μέγιστη τέμνουσα δύναμη είναι ίση με 123kN.



Σχήμα 4.24 Τέμνουσα-Βύθιση RB150Ca



4.25 Τέμνουσα – Παραμορφώσεις RB150Ca

Η μορφή αστοχίας προήλθε από θραύση του ΑΙΟΠ σε δύο λωρίδες, τόσο στην περιοχή της αγκύρωσης όσο και σε τυχαίο σημείο στο μήκος του ΑΙΟΠ. Η μορφή αυτή αστοχίας απεικονίζεται στο Σχήμα 4.26



Σχήμα 4.26 Μορφή αστοχίας δοκιμίου RB150Ca

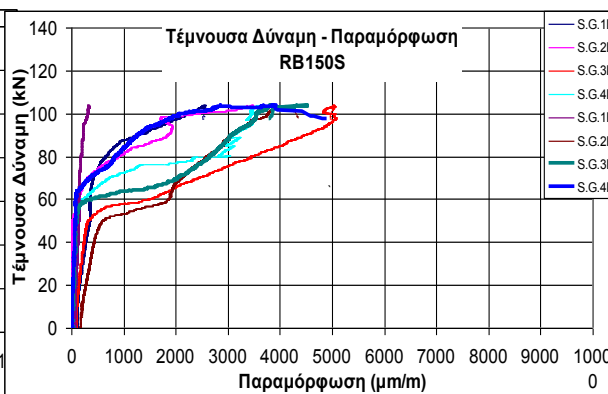
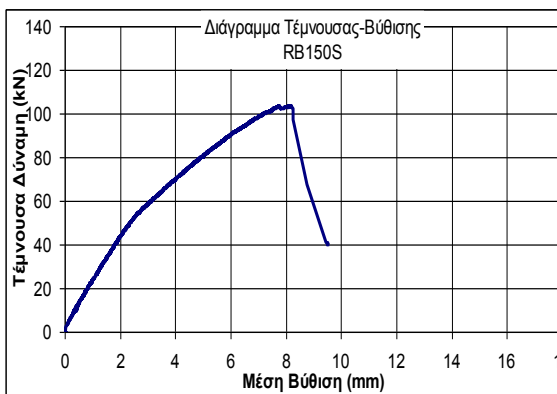
Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των καταγραφών των ταινιών παραμόρφωσης στο Σχήμα 4.25. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.25 και πάλι δύο είναι οι λωρίδες που αντιστέκονται στην πραγματοποίηση της κύριας ρηγμάτωσης, οι λωρίδες με τις ταινίες 2L και 3L με τιμές παραμορφώσεων ίσες με 7145strain και 6080μstrain αντίστοιχα



### - Δοκίμιο RB150S

Ακολουθούν τα δοκίμια τα οποία έχουν πιο πυκνή τοποθέτηση λωρίδων ΙΟΠ ίση με 150mm αλλά χρησιμοποιούν ως υλικό ενίσχυσης ίνες χάλυβα υψηλής αντοχής (ΧΙΟΠ).

Η συμπεριφορά του δοκιμίου στο οποίο δεν χρησιμοποιήθηκε αγκύρωση φαίνεται στο Σχήμα 4.27. Η μέγιστη τέμνουσα δύναμη είναι ίση με 103kN. Οι τιμές των μετρήσεων των παραμορφώσεων φαίνονται στο Σχήμα 4.28. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές στις θέσεις 3r και 4r είναι ίσες με 4530  $\mu$ strain και 4905  $\mu$ strain αντίστοιχα.



Σχήμα 4.27 Τέμνουσα-Βύθιση RB150S

Σχήμα 4.28 Τέμνουσα – Παραμορφώσεις RB150S

Η αστοχία προήλθε από την αποκόλληση των χαλύβδινων λωρίδων 3r και 4r όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.29.

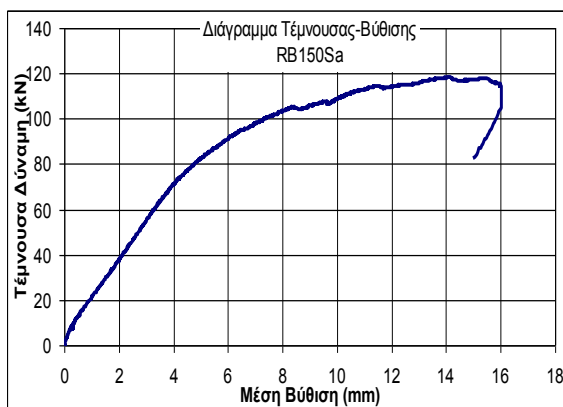


Σχήμα 4.29 Μορφή αστοχίας δοκιμίου RB150S

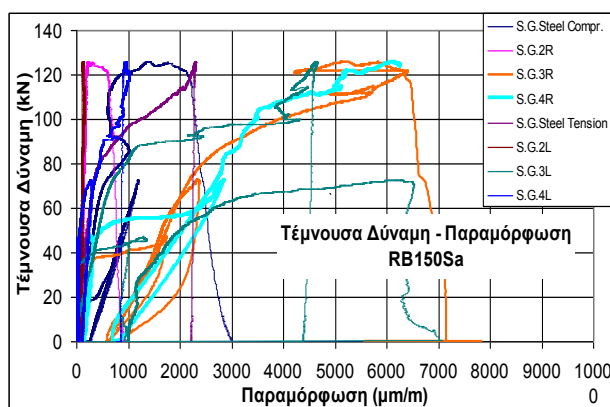


### - Δοκίμιο RB150Sa

Τέλος διερευνήθηκε ένα αντίστοιχο με το προηγούμενο δοκίμιο με τη διαφορά ότι σε αυτό έχει τοποθετηθεί η αγκύρωση που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών. Η συμπεριφορά του τελευταίου αυτού δοκιμίου αντικατοπτρίζεται στην παρακάτω Σχήμα 4.30. Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα σε τέμνουσα δύναμη είναι ίση με 119kN. Οι λωρίδες με τις ταινίες 3r και 4r έχουν παρουσιάσει μέγιστες τιμές παραμορφώσεων ίσες με 7855  $\mu$ strain και 6245  $\mu$ strain αντίστοιχα. Τέλος όλες οι καταγραφές των ταινιών παραμόρφωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα που ακολουθεί 4.31.



Σχήμα 4.30 Τέμνουσα-Βύθιση RB150Sa.



Σχήμα 4.31 Τέμνουσα – Παραμορφώσεις RB150Sa

Η αστοχία προήλθε από αστοχία της αγκύρωσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.32. Παρατηρείται επίσης ότι ο θλιβόμενος σπλισμός της δοκού λύγισε και ιδιαίτερα στην περιοχή όπου αστόχησε η αγκύρωση 3r και 4r.



Σχήμα 4.32 Μορφή αστοχίας δοκιμίου RB150Sa

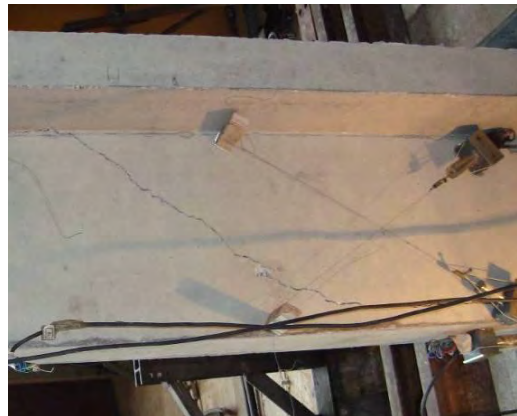
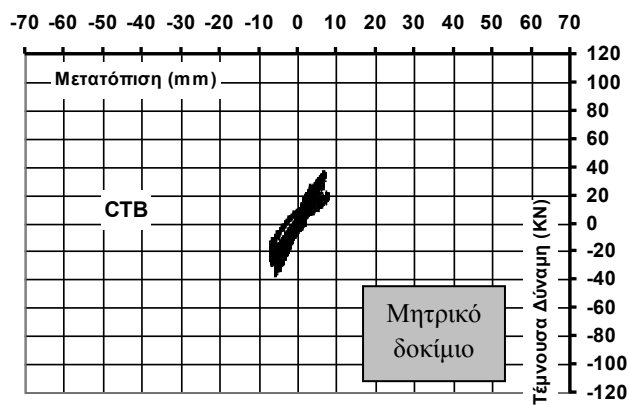
Στο δοκίμιο αυτό έγιναν εκτός από τις μετρήσεις των παραμορφώσεων στις λωρίδες ΧΙΟΠ μετρήσεις παραμορφώσεων των διαμήκων συμβατικών μεταλλικών σπλισμών της δοκού με στόχο να εξακριβωθεί ότι πραγματικά τόσο ο εφελκόμενος όσο και ο θλιβόμενος σπλισμός απέχουν από τις περιοχές πλαστικοποίησής τους. Πιο συγκεκριμένα ο εφελκόμενος σπλισμός βρίσκεται σε μέγιστες τιμές ίσες με 2300 $\mu$ strain ενώ στο θλιβόμενο σπλισμό παρατηρείται αλλαγή πρόσημου από αρνητικές τιμές ίσες με 500 $\mu$ strain σε θετικές ίσες και έως 4000 $\mu$ strain γεγονός που υποδηλώνει το λυγισμό των σπλισμών αυτών.

#### 4.4 Αποτελέσματα δοκιμών πλακοδοκών Ο/Σ

Τα δοκίμια που έχουν διερευνηθεί σε ανακυκλιζόμενη σεισμικού τύπου φόρτιση είναι συνολικά 7 και έχουν διατομή πλακοδοκού με διαστάσεις αντίστοιχες αυτών με ορθογωνική διατομή. Παρακάτω ακλουθεί αναφορά των αποτελεσμάτων του κάθε δοκιμίου ξεχωριστά.

##### - Δοκίμιο CTB

Το πρώτο δοκίμιο που δοκιμάστηκε στην πειραματική διερεύνηση δοκιμών πλακοδοκού σε ανακυκλιζόμενη σεισμικού τύπου φόρτιση είναι ένα μητρικό δοκίμιο χωρίς κάποιου είδους διατμητική ενίσχυση και χωρίς χαλύβδινους συνδετήρες. Η συμπεριφορά του δοκιμίου απεικονίζεται στο Σχήμα 4.33, όπου παρουσιάζονται οι ανακυκλήσεις τέμνουσας δύναμης – οριζόντιου φορτίου του δοκιμίου αυτού. Η κλίμακα που έχει επιλεγεί για τα διαγράμματα αυτά παραμένει σταθερή τόσο σε επίπεδο τέμνουσας δύναμης όσο και οριζόντιας μετατόπισης, με στόχο την άμεση σύγκριση των δοκιμίων. Τέλος η μέγιστη φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου αυτού είναι ίση με 37,25kN.



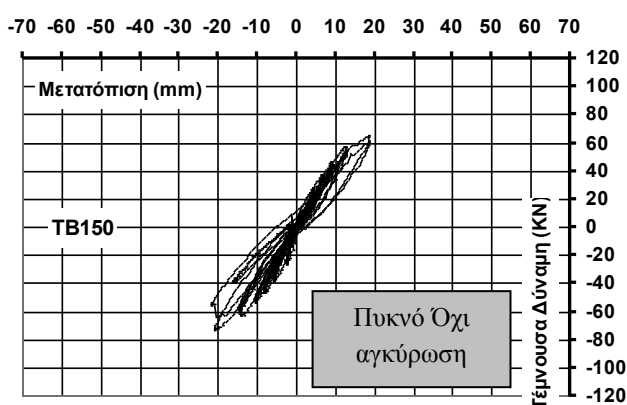
Σχήμα 4.33 Τέμνουσας δύναμη – Οριζόντιας μετατόπισης δοκιμίου CTB      Σχήμα 4.34 Αστοχία Δοκιμίου CTB

Η μορφή αστοχίας φαίνεται στο Σχήμα 4.34 με δημιουργία κλασικών διατμητικών ρηγματώσεων και ψαθυρού τύπου αστοχία.

Στο δοκίμιο αυτό δεν τοποθετήθηκαν ταινίες παραμόρφωσης σε κανένα σημείο της δοκού. Λόγω του γεγονότος ότι δεν υπάρχει κανένας εσωτερικός συνδετήρας η μέγιστη φέρουσα ικανότητα που λήφθηκε αντικατοπτρίζει την αντίσταση του σκυροδέματος έναντι τέμνουσας σε ανακυκλιζόμενη σεισμικού τύπου φόρτιση.

- Δοκίμιο TB150

Ακολούθησε το δοκίμιο TB150 το οποίο είναι ενισχυμένο με ίνες χάλυβα υψηλής αντοχής (ΧΙΟΠ), με απλή επικόλληση, χωρίς αγκύρωση. Η αξονική απόσταση των λωρίδων ΧΙΟΠ είναι ίση με 150 mm. Η Σχήμα 4.35 παρουσιάζει τους υστερητικούς βρόχους του δοκιμίου αυτού σε επίπεδα τέμνουσας δύναμης σε σχέση με τη μετατόπιση της κεφαλής. Οι βρόχοι είναι σαφέστατα πιο μεγάλοι σε σχέση με αυτούς του δοκιμίου CTB. Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου αυτού είναι ίση με 73,2 kN.

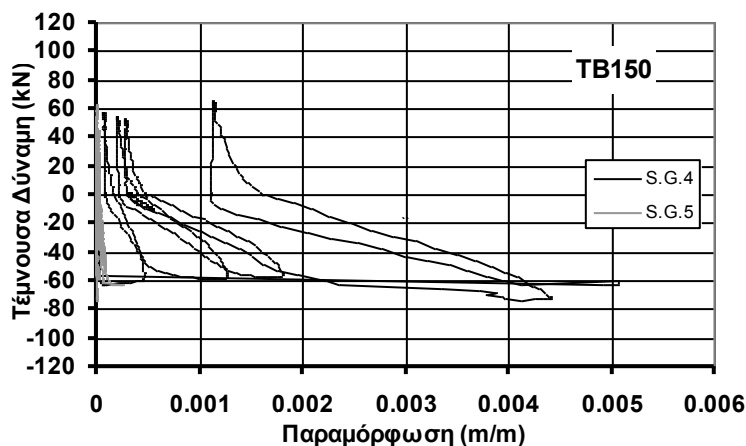


Σχήμα 4.35 Τέμνουσα δύναμη– οριζόντια μετατόπιση TB150

Σχήμα 4.36 Σχήμα αστοχίας Δοκιμίου δοκιμίου TB150

Η μορφή αστοχίας προήλθε από την αποκόλληση δυο λωρίδων ΧΙΟΠ όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.36. Πιο συγκεκριμένα κυρίως αποκολλήθηκε η λωρίδα 4 και ακολούθησε η λωρίδα 5.

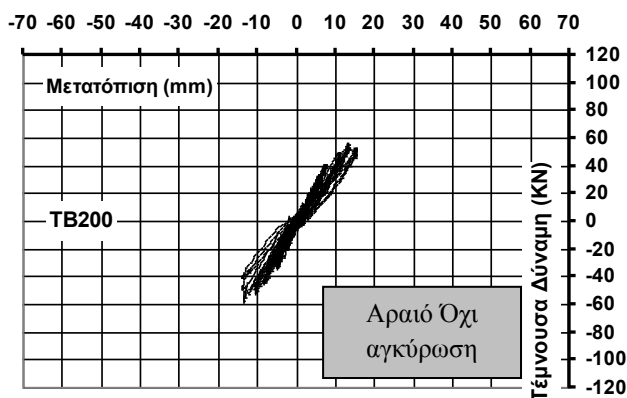
Πάνω στις λωρίδες έχουν τοποθετηθεί ταινίες παραμόρφωσης και πιο συγκεκριμένα από μία στο κέντρο κάθε λωρίδας. Το κύριο διατμητικό ρήγμα τέμνει δύο λωρίδες πάνω στις οποίες είναι κολλημένες οι ταινίες 4 και 5. Στο Σχήμα 4.37 παρουσιάζονται τα διαγράμματα τέμνουσας δύναμης σε σχέση με την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση για τις καταγραφές των δύο αυτών ταινιών. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα οι μέγιστες τιμές είναι ίσες με 5075μstrain και 275μstrain αντίστοιχα.



Σχήμα 4.37 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB150

- Δοκίμιο TB200

Ακολούθως πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή ΧΙΟΠ χωρίς αγκύρωση τοποθετημένα σε μεγαλύτερη απόσταση. Σε αυτό το δοκίμιο TB200 η αξονική απόσταση μεταξύ δύο λωρίδων είναι ίση με 200mm. Στο Σχήμα 4.38 παρουσιάζονται οι βρόχοι λόγω της ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα για το δοκίμιο αυτό είναι ίση με 58,3kN.

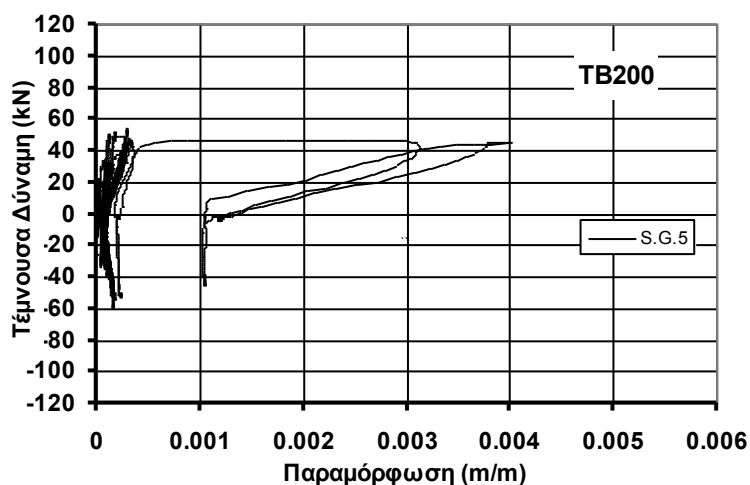


Σχήμα 4.38 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης δοκιμίου TB200

Σχήμα 4.39 Σχήμα αστοχίας Δοκιμίου TB150

Η μορφή αστοχίας επίσης εντοπίστηκε στην αποκόλληση του ΧΙΟΠ από την παρεία της πλακοδοκού. Πιο συγκεκριμένα αποκολλήθηκε η λωρίδα 5 όπως φαίνεται από το σχήμα 4.39. Σε αυτήν την περίπτωση το κύριο διατμητικό ρήγμα πέρασε μόνο μέσα από αυτήν τη λωρίδα.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η λωρίδα 5 είναι αυτή που αποκολλήθηκε. Στο Σχήμα 4.40 που ακολουθεί παρουσιάζεται το διάγραμμα τέμνουσας δύναμης σε σχέση με τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στο κέντρο αυτής της λωρίδας ΧΙΟΠ. Η μέγιστη καταγεγραμμένη παραμόρφωση είναι ίση με 4010μstrain.

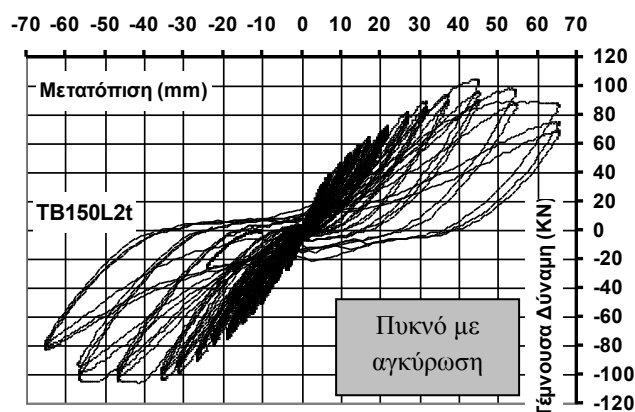


Σχήμα 4.40 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB150

#### - Δοκίμιο TB150L2t

Τα δύο προηγούμενα ενισχυμένα δοκίμια είχαν παρόμοια μορφή αστοχίας. Η αστοχία τους προήλθε από την αποκόλληση των λωρίδων ενίσχυσης από το σκυρόδεμα. Η μορφή αυτή αστοχίας δίδει ένα άνω όριο στο βαθμό ενίσχυσης που μπορεί να αναβαθμιστεί ένα δομικό στοιχείο. Επίσης προσδίδει ένα άνω όριο στο ποσοστό εκμετάλλευσης του υλικού της ενίσχυσης. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε μια ακόμη σειρά πειραμάτων δοκιμίων πλακοδοκού υποβαλλόμενες σε ανακυκλιζόμενη σεισμικού τύπου φόρτιση με την τοποθέτηση αγκύρωσης στις λωρίδες ΧΙΟΠ.

Το δοκίμιο TB150L2t είναι, λοιπόν, δοκίμιο ενισχυμένο με ΧΙΟΠ σε αξονική απόσταση ίση με 150mm και με αγκύρωση τοποθετημένη στο κάτω μέρος της πλάκας. Η αγκύρωση αποτελείται από ένα χαλύβδινο γωνιακό πάχους 5mm και από δύο μπουλόνια τα οποία διαπερνούν το πάχος της πλάκας και βιδώνονται στο επάνω μέρος αυτής. Η συμπεριφορά του δοκιμίου αυτού σε ανακυκλιζόμενη σεισμικού τύπου φόρτιση παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.41. Είναι εμφανής τόσο η αύξηση της φέρουσας ικανότητας όσο και η αύξηση του πλάτους των βρόχων. Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα έφτασε τα 106,7kN



Σχήμα 4.41 Τέμνουσα δύναμη– μετατόπιση TB150L2t

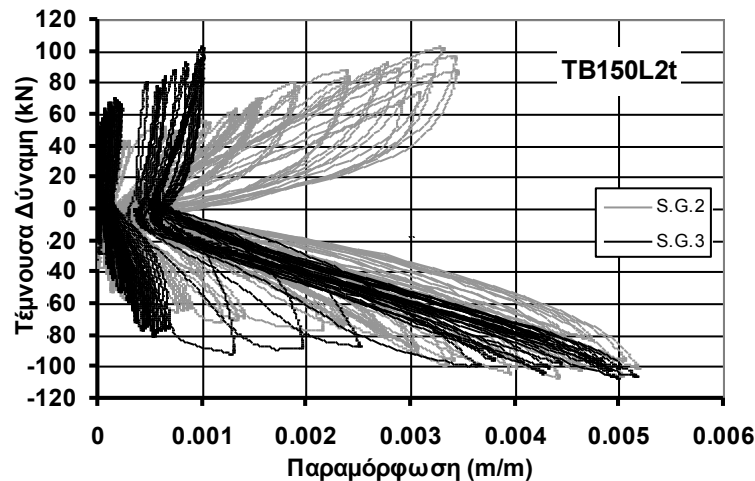


Σχήμα 4.42 Σχήμα αστοχίας Δοκιμίου TB150L2t

Η μορφή αστοχίας προήλθε από τη διαρροή του διαμήκου σπλισμού. Πρόκειται για αστοχία σε κάμψη του δοκιμίου αυτού. Οφείλει να σημειωθεί ότι ο διαμήκης σπλισμός είναι 3Ø20 πάνω και κάτω



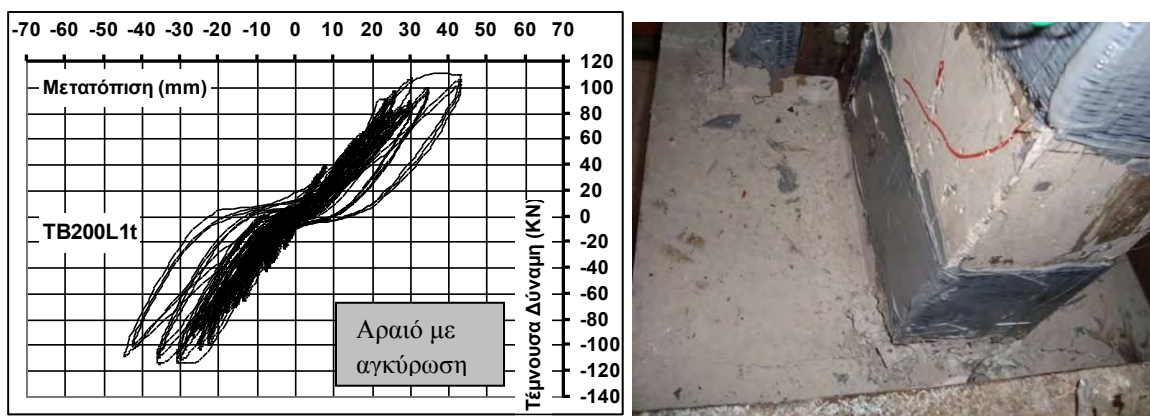
στη διατομή της πλακοδοκού. Σύμφωνα με τον ΕΚΟΣ το ποσοστό αυτό του διαμήκους οπλισμού είναι πάνω από τα αποδεκτά όρια. Η ενίσχυση έναντι διάτμησης είναι αποτελεσματική ακόμα και σε αυτά τα επίπεδα ποσοστού καμπτικού οπλισμού. Βέβαια η εμφάνιση κάποιων διατμητικών ρηγματώσεων είναι αναπόφευκτη. Στο παρόν δοκίμιο το κύριο διατμητικό ρήγμα διαπέρασε δύο λωρίδες, τη λωρίδα 2 και τη λωρίδα 3. Όπως και στα προηγούμενα δοκίμια έτσι και σε αυτό όλες οι λωρίδες έχουν τοποθετημένη μια ταινία παραμόρφωσης στο κέντρο του πλάτους τους. Στο Σχήμα 4.43 παρουσιάζεται το διάγραμμα τέμνουσας δύναμης σε σχέση με τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις των ταινιών 2 και 3. Οι μέγιστες τιμές τους είναι ίσες με 5180μstrain και 5160μstrain αντίστοιχα.



Σχήμα 4.43 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB150L2t

- Δοκίμιο TB200L1t

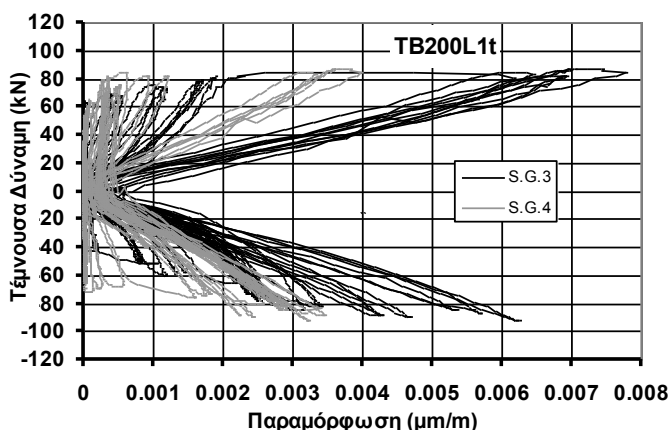
Το προηγούμενο δοκίμιο ενισχύθηκε διατμητικά σε τέτοιο βαθμό ώστε να οδηγηθεί η αστοχία του σε καμπτικού τύπου αστοχία και παράλληλα να αποφευχθεί η διατμητικού τύπου. Το δοκίμιο που παρουσιάζεται χρησιμοποιεί πιο αραιές λωρίδες ΧΙΟΠ και πιο συγκεκριμένα σε αξονικές αποστάσεις ίσες με 200mm. Επίσης επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η ίδια αγκύρωση με προηγουμένως με τη διαφορά ότι μόνο ένα μπουλόνι διαπερνά το πάχος της πλάκας, αντί δύο που χρησιμοποιήθηκαν στο προηγούμενο δοκίμιο. Γενικότερα για το δοκίμιο αυτό επιλέχθηκε μια πιο γρήγορη, πιο οικονομική αλλά και πιο ασθενής ενίσχυση. Στο Σχήμα 4.45 που ακολουθεί παρουσιάζεται το διάγραμμα τέμνουσας δύναμης σε σχέση με τη μετατόπιση κεφαλής. Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα είναι ίση με 91,2 kN.



Σχήμα 4.45 Τέμνουσα δύναμη – μετατόπιση TB200L1t 4.46 Σχήμα αστοχίας Δοκιμίου TB200L1t

Η μορφή αστοχίας εντοπίζεται στην αστοχία του κόμβου της θεμελίωσης για το λόγο αυτό μειώθηκε ο μοχλοβραχίονας από το 1.675m στα 1.15m. Στο δοκίμιο αυτό, ακόμη και μετά τη μείωση του μοχλοβραχίονα, παρουσιάστηκε κάποια πρόωρη αστοχία της θεμελίωσης με την εμφάνιση διατμητικών ρωγμών. Για το λόγο αυτό δεν εμφανίστηκε κάποιου άλλου είδους αστοχία στα ΧΙΟΠ ή στην αγκύρωσή τους. Οι μέγιστες παραμορφώσεις είναι μεταξύ των λωρίδων 3 και 4.

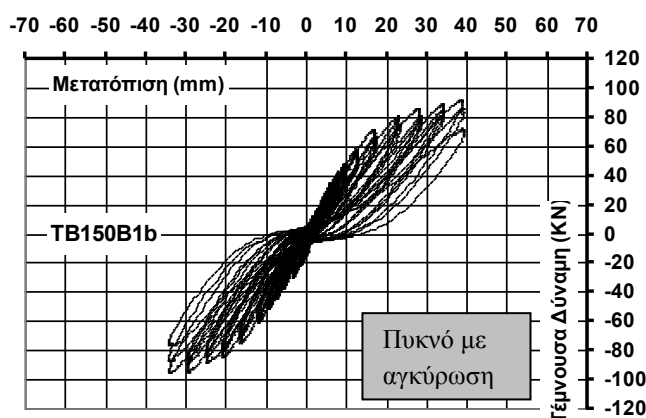
Οι καταγραφές των ταινιών παραμόρφωσης των λωρίδων 3 και 4 φαίνονται στο Σχήμα 4.47 που ακολουθεί. Οι μέγιστες τιμές που έχουν καταγραφεί είναι ίσες με 7790  $\mu\text{strain}$  και 3995  $\mu\text{strain}$  αντίστοιχα.



Σχήμα 4.47 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB200L1t

- Δοκίμιο TB150B1b

Παρατηρείται ότι η χρήση της αγκύρωσης αποτρέπει την αποκόλληση του ΧΙΟΠ από το δοκίμιο πλακοδοκού. Για το λόγο αυτό στη συνέχεια επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μια ακόμη πιο οικονομική και εύκολη στην κατασκευή της αγκύρωσης με χρήση ΧΙΟΠ αξονικής απόστασης ίση με 150mm. Η αγκύρωση αυτή αποτελείται από μια χαλύβδινη λάμα αντί του γωνιακού και μια βίδα για σκυρόδεμα η οποία δεν διαπερνά όλο το πάχος της πλάκας. Η Σχήμα 4.48 που ακολουθεί παρουσιάζει την υστερητική συμπεριφορά του δοκιμίου αυτού. Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα που παρατηρήθηκε για το δοκίμιο αυτό είναι ίση με 95,5kN.

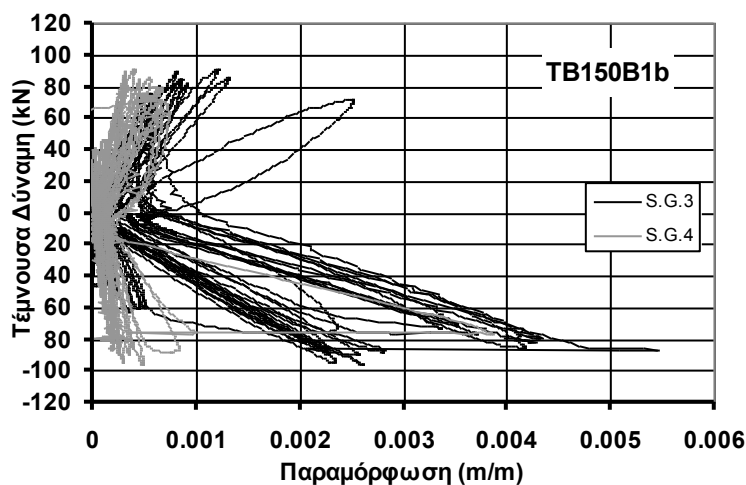


Σχήμα 4.48 Τέμνουσα δύναμη – μετατόπιση TB150B1b

Σχήμα 4.49 Σχήμα αστοχίας TB150B1b

Το δοκίμιο αυτό αστόχησε στην αγκύρωση των λωρίδων 3 και 4. Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε εξόλκευση της βίδας στη λωρίδα 3, ενώ παρατηρήθηκε θραύση της βίδας στη λωρίδα 4.

Οι τιμές των παραμορφώσεων των ταινιών στις λωρίδες 3 και 4 παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.50 που ακολουθεί. Οι μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων στις θέσεις αυτές είναι ίσες με 5455μstrain και 3855μstrain αντίστοιχα.



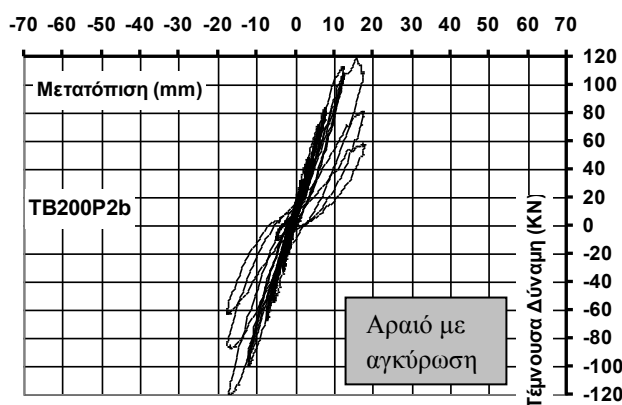
Σχήμα 4.50 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB150B1b



**- Δοκίμιο TB200P2b**

Τελευταίο δοκίμιο της παρούσας διερεύνησης αποτέλεσε το δοκίμιο πλακοδοκού που ακολουθεί. Για το δοκίμιο αυτό στόχος αποτέλεσε η αύξηση της φέρουσας ικανότητας ενισχύοντάς το όχι μόνο διατμητικά αλλά και καμπτικά. Πιο συγκεκριμένα επικολλήθηκαν 2 στρώσεις CFRP στο άνω και κάτω πέλαμα της δοκού που στόχο έχουν την καμπτική ενίσχυσή της. Επίσης για την ενίσχυση έναντι τέμνουσας επιλέχθηκε η χρήση 2 λωρίδων ΧΙΟΠ με παράλληλη χρήση της αγκύρωσης που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών (ΕΠΑΥΚ). Η αξονική απόσταση των λωρίδων ΧΙΟΠ είναι ίση με 200mm. Η ίδια αγκύρωση χρησιμοποιήθηκε και για τις λωρίδες ΑΙΟΠ έναντι κάμψης. Ένα ακόμη μέτρο που λήφθηκε ήταν η μείωση του μοχλοβραχίονα από 1,675m σε 1,15m με στόχο την περαιτέρω μείωση των καμπτικών ροπών στη βάση.

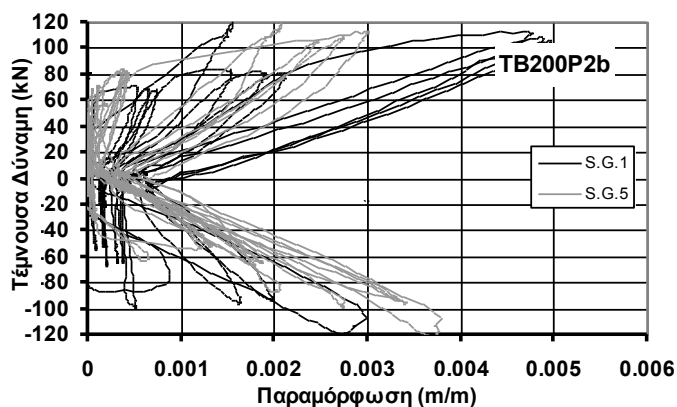
Η Σχήμα 4.51 που ακολουθεί αποτυπώνει την υστερητική συμπεριφορά του δοκιμίου αυτού. Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα που καταγράφηκε είναι ίση με 120kN, που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη από όλες τις δοκιμές.



Σχήμα 4.51 Τέμνουσα δύναμη – μετατόπιση TB200P2b

Σχήμα 4.52 Αστοχία TB200P2b

Η μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε εντοπίζεται στην αγκύρωση με παράλληλη εξόλκευση των ακυρώσεων, των δύο λωρίδων που μετρώνται οι παραμορφώσεις, από τον όγκο σκυροδέματος της δοκού. Στο Σχήμα 4.53 αποτυπώνονται οι καταγραφές των παραμορφώσεων των δύο αυτών λωρίδων μέχρι και την αστοχία της αγκύρωσης. Οι τιμές αυτές είναι ίσες με 4960 $\mu$ strain και 3000  $\mu$ strain αντίστοιχα

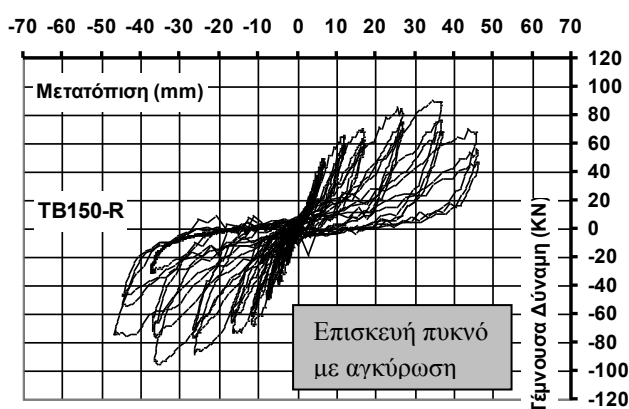


Σχήμα 4.53 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB200P2b

- Δοκίμιο TB150-R

Μετά την αστοχία του δοκιμίου TB150, αστοχία που προήλθε από αποκόλληση των ΙΟΠ, ακολούθησε η επισκευή του. Στο δοκίμιο TB-150-R εφαρμόστηκε εκ νέου διατμητική ενίσχυση με λωρίδες από ίνες χάλυβα υψηλής αντοχής (ΧΙΟΠ) και με τη χρήση της αγκύρωσης που αναπτύχθηκε στο ΕΠΑΥΚ του Α.Π.Θ. Η αξονική απόσταση αυτών των λωρίδων ΧΙΟΠ ήταν ίση με 150 mm. Το σχήμα 4.54 παρουσιάζει τους υστερητικούς βρόχους που προέκυψαν από την φόρτιση του δοκιμίου αυτού σε όρους τέμνουσας δύναμης σε σχέση με τη μετατόπιση της κεφαλής του δοκιμίου. Επίσης υιοθετήθηκε εδώ η μείωση του μοχλοβραχίονα επιβολής του φορτίου από την διατομή ένωσης δοκού-υποστυλώματος από 1,675m σε 1,15m με στόχο τη μείωση των καμπτικών ροπών στη περιοχή αυτή του δοκιμίου και την αποφυγή με τον τρόπο αυτό ανάπτυξης καμπτικών αστοχιών στην θέση αυτή.

Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου TB150 μετρήθηκε ίση με 73,2 kN ενώ η μέγιστη φέρουσα ικανότητα του επισκευασμένου δοκιμίου TB150-R μετρήθηκε ίση με 93,9 kN. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι η αγκύρωση των λωρίδων ΧΙΟΠ που εφαρμόστηκε για το δοκίμιο αυτό αναβάθμισε την διατμητική φέρουσα ικανότητά του κατά 28%.

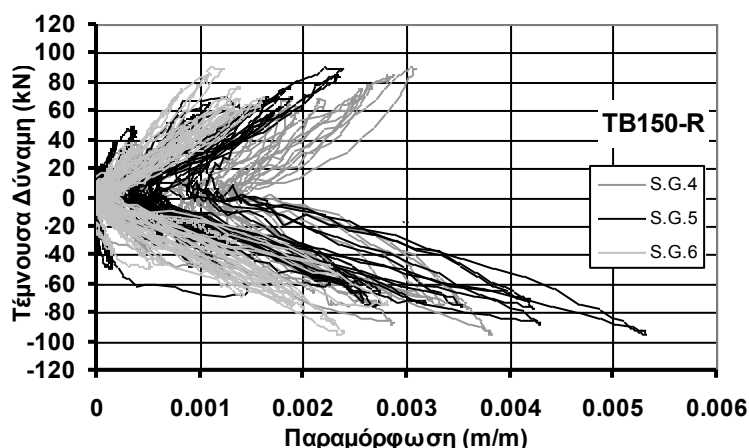


Σχήμα 4.54 Τέμνουσα δύναμη– οριζόντια μετατόπιση TB150-R

Σχήμα 4.55 Σχήμα αστοχίας Δοκιμίου δοκιμίου TB150-R

Η μορφή αστοχίας προήλθε από την αστοχία της αγκύρωσης μέσω του μηχανισμού εξόλκευσης της βίδας αγκύρωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.55.

Πάνω στις λωρίδες είχαν τοποθετηθεί ταινίες παραμόρφωσης και πιο συγκεκριμένα από μία ταινία στο κέντρο κάθε λωρίδας. Το κύριο διατμητικό ρήγμα που παρατηρήθηκε τέμνει τρεις λωρίδες πάνω στις οποίες είναι κολλημένες οι ταινίες 4, 5 και 6. Στο Σχήμα 4.56 παρουσιάζονται τα διαγράμματα τέμνουσας δύναμης σε σχέση με την αναπτυσσόμενη παραμόρφωση για τις καταγραφές των τριών αυτών ταινιών. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα οι μέγιστες τιμές είναι ίσες με 3820  $\mu$ strain, 5305  $\mu$ strain και 2815  $\mu$ strain αντίστοιχα.



Σχήμα 4.56 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB150

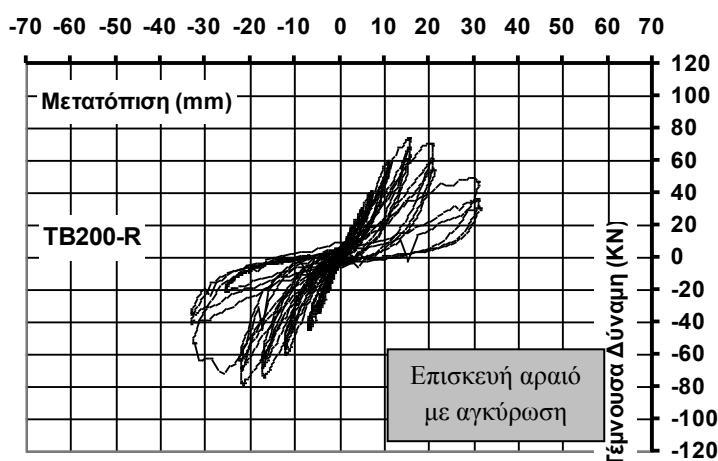
Οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων που μετρήθηκαν για το δοκίμιο TB150 βρέθηκαν ίσες με  $5075\mu\text{strain}$  και  $275\mu\text{strain}$  αντίστοιχα. Από την σύγκριση των τιμών των μετρημένων παραμορφώσεων μεταξύ του αρχικού δοκιμίου TB150 και του επισκευασμένου δοκιμίου TB150-R παρατηρούμε την ανάπτυξη στο δοκίμιο TB150-R μεγαλύτερων τιμών στις εν λόγω παραμορφώσεις και σε μεγαλύτερο πλήθος λωρίδων ΧΙΟΠ. Και αυτή η παρατήρηση καταδεικνύει την αποτελεσματικότητα του συστήματος αγκύρωσης των λωρίδων ΧΙΟΠ που απέτρεψαν, ως ένα επίπεδο τέμνουσας, την αδρανοποίηση των ΧΙΟΠ, όπως συμβαίνει με την αποκόλληση των εν λόγω λωρίδων. Παρόλα αυτά, οι τιμές των παραμορφώσεων είναι σχετικά μικρές αν αυτές συγκριθούν με τιμές παραμορφώσεων σε λωρίδες ΧΙΟΠ άλλων δοκιμίων πλακοδοκών. Συγκρίνοντας την συμπεριφορά του δοκιμίου TB150-R με αυτή του δοκιμίου TB200 L1t\* , για το οποίο η μέγιστη μετρηθείσα παραμόρφωση σε λωρίδα ΧΙΟΠ ήταν  $10035\mu\text{strain}$  και η φέρουσα διατμητική του ικανότητα  $115\text{KN}$  χωρίς να εμφανισθεί αστοχία των αγκυρώσεων των λωρίδων ΧΙΟΠ, καταδεικνύεται η κυρίαρχη σημασία της αγκύρωσης για να επιτευχθεί αποτελεσματική διατμητική ενίσχυση. Αν η σύγκριση της διατμητικής συμπεριφοράς των δοκιμίων TB150 και TB150-R γίνει συγκρίνοντας την φέρουσα ικανότητά τους με αυτή του αρχικού δοκιμίου TB (χωρίς διατμητικό οπλισμό) η επαύξηση που επιτυγχάνεται με την απλή επικόλληση (δοκίμιο TB150) είναι της τάξεως του 96.5% ενώ μαζί με την αγκύρωση είναι της τάξεως του 152.0% (δες επίσης πίνακα 5.7). Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι το δοκίμιο TB150-R ήταν ένα ήδη καταπονημένο διατμητικά δοκίμιο πλακοδοκού του οποίου οι αρχικές διατμητικές ρηγματώσεις δεν σφραγίστηκαν κατά την νέα επισκευή του με αγκυρωμένες λωρίδες ΧΙΟΠ. Τέλος, αν η σύγκριση γίνει μέσω των επιπέδων μέγιστης μετακίνησης στην κορυφή της πλακοδοκού αξίζει να σημειωθεί ότι οι μέγιστη μετακίνηση για το δοκίμιο TB150 ήταν 20mm ενώ για το επισκευασμένο δοκίμιο TB150-P ήταν 40mm, που αποτελεί μια επαύξηση της τάξεως του 100%. Σε σχέση με το μητρικό δοκίμιο η επαύξηση αυτή είναι της τάξεως του 500% (από 7mm σε 40mm).

### - Δοκίμιο TB200-R

Μετά την αστοχία του δοκιμίου TB200, αστοχία που προήλθε από αποκόλληση των ΙΟΠ, ακολούθησε η επισκευή του. Στο δοκίμιο TB-200-R εφαρμόστηκε εκ νέου διατμητική ενίσχυση με λωρίδες από ίνες άνθρακα ΑΙΟΠ με την αγκύρωση που αναπτύχθηκε στο Α.Π.Θ. τοποθετημένα σε μεγαλύτερη αξονική απόσταση, ίση με 200mm. Η επιλογή των ΑΙΟΠ έγινε για λόγους περαιτέρω διερεύνησης του τρόπου εφαρμογής και συμπεριφοράς της αγκύρωσης με ένα άλλο υλικό πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο.

Η αξονική απόσταση αυτών των λωρίδων ΑΙΟΠ ήταν ίση με 200 mm. Το σχήμα 4.57 παρουσιάζει τους υστερητικούς βρόχους που προέκυψαν από την φόρτιση του δοκιμίου αυτού σε όρους τέμνουσας δύναμης σε σχέση με τη μετατόπιση της κεφαλής του δοκιμίου. Επίσης υιοθετήθηκε και εδώ η μείωση του μοχλοβραχίονα επιβολής του φορτίου από την διατομή ένωσης δοκού-υποστυλώματος από 1,675m σε 1,15m με στόχο τη μείωση των καμπτικών ροπών στη περιοχή αυτή του δοκιμίου και την αποφυγή με τον τρόπο αυτό ανάπτυξης καμπτικών αστοχιών στην θέση αυτή.

Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα για το δοκίμιο αυτό είναι ίση με 78,5kN.



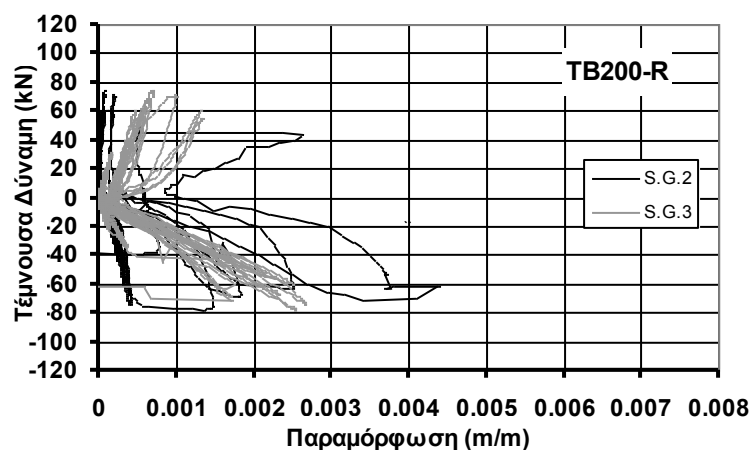
Σχήμα 4.57 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – οριζόντιας μετατόπισης δοκιμίου TB200-R



Σχήμα 4.58 Σχήμα αστοχίας Δοκιμίου TB200-R

Η μορφή αστοχίας εδώ εντοπίστηκε στην πρόωγη θραύση των ινών ΑΙΟΠ στα σημεία όπου συγκεντρώνονται τάσεις, δηλαδή στις γωνίες. Πιο συγκεκριμένα έσπασε η λωρίδα 2 στη γωνία της κάτω παρειάς της δοκού καθώς και η λωρίδα 3 στην αγκύρωση. Οι αστοχίες παρουσιάζονται στο σχήμα 4.58. Σε αυτήν την περίπτωση το κύριο διατμητικό ρήγμα διέρχεται μέσω αυτών των λωρίδων 2 και 3, οι οποίες έσπασαν πρόωρα. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να αποδοθεί στην αδυναμία των πολύ δύσκαμπτων ανθρακονημάτων να απορροφήσουν επιτυχώς τοπικές αστοχίες.

Στο Σχήμα 4.59 που ακολουθεί, παρουσιάζεται το διάγραμμα τέμνουσας δύναμης σε σχέση με τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στο κέντρο των λωρίδων αυτών από ΑΙΟΠ. Η μέγιστη καταγεγραμμένη παραμόρφωση είναι ίση με 4010μstrain.



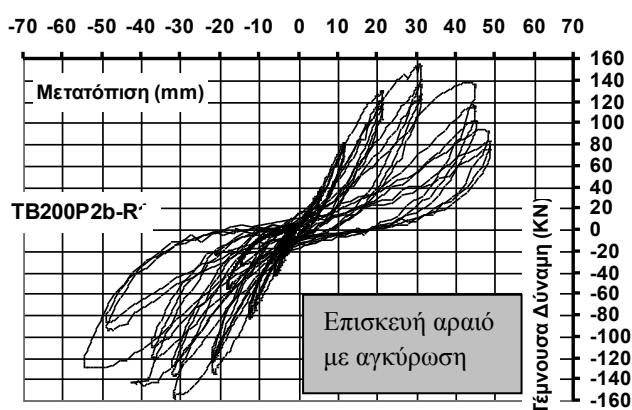
Σχήμα 4.59 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB200-R

Συγκρίνοντας το επισκευασμένο δοκίμιο TB200-R (78,5KN, λωρίδες ΑΙΟΠ με αγκυρώσεις) με αυτή του δοκιμίου TB200 (58,3KN, ΧΙΟΠ χωρίς αγκυρώσεις) προκύπτει μια επαύξηση της φέρουσας ικανότητας λόγω της παρουσίας των αγκυρώσεων της τάξεως 34.6%.

### - Δοκίμιο TB200P2b-R

Τελευταίο δοκίμιο της διερεύνησης των επισκευών, όπως περιγράφεται στην 5<sup>η</sup> φάση της πρότασης, αποτέλεσε το δοκίμιο πλακοδοκού TB200P2b-R. Αυτό προήλθε από την εκ νέου διατμητική ενίσχυση του δοκιμίου TB200P2b για το οποίο είχαν αστοχήσει οι αγκυρώσεις των διατμητικών λωρίδων ΧΙΟΠ. Το δοκίμιο TB200P2b-R ενισχύθηκε εκ νέου διατμητικά χρησιμοποιώντας αφενός πάλι λωρίδες ΧΙΟΠ σε αποστάσεις 200mm αφετέρου ένα πιο ενισχυμένο σύστημα αγκύρωσης του ίδιου τύπου με αυτό που αναφέρθηκε προηγουμένως ότι αναπτύχθηκε στο ΕΠΑΥΚ. Πέραν αυτής της διατμητικής ενίσχυσης το εν λόγω δοκίμιο ενισχύθηκε επιπλέον καμπτικά με την επικόλληση τόσο στο άνω πέλμα της πλακοδοκού όσο και στο κάτω πέλμα της με λωρίδες ΑΙΟΠ (δύο λωρίδες σε κάθε πέλμα). Οι λωρίδες αυτές αγκυρώθηκαν με το ίδιο ενισχυμένο σύστημα αγκύρωσης στην περιοχή του κόμβου. Στόχος της εν λόγω σύνθετης ενίσχυσης ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας περαιτέρω διατμητικής ενίσχυσης του δοκιμίου ώστε το οριακό μέγιστο φορτίο να είναι αυξημένο σε σχέση με αυτό που μετρήθηκε για το δοκίμιο TB200P2b (120KN). Επιπλέον, ένας παράλληλος στόχος ήταν να αποτρέψει την διατμητική αστοχία για το δοκίμιο αυτό μέσω της εμφάνισης ως κυρίαρχης αστοχίας την καμπτικού τύπου αστοχία. Και οι δύο αυτοί στόχοι πραγματοποιήθηκαν. Δηλαδή, το μέγιστο φορτίο που μετρήθηκε εδώ για το δοκίμιο TB200P2b-R ήταν 156KN έναντι 120KN για το δοκίμιο TB200P2b, μια επαύξηση της τάξεως του 30%. Και ο παράλληλος στόχος πραγματοποιήθηκε αφού για αυτό το μέγιστο φορτίο εμφανίστηκε θραύση των 2 λωρίδων ΑΙΟΠ, που χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση σε κάμψη στην κάτω παρειά της δοκού. Και εδώ υιοθετήθηκε η μείωση του μοχλοβραχίονα επιβολής του φορτίου από την διατομή ένωσης δοκού-υποστυλώματος από 1,675m σε 1,15m ώστε να μην εκδηλωθεί πρόωρα η καμπτική αστοχία. Θα πρέπει εδώ να τονισθεί ότι το μέγιστο φορτίο που μετρήθηκε για το δοκίμιο αυτό (δηλαδή αυτό των 156KN) αποτελεί την μέγιστη φέρουσα ικανότητα σε διάτμηση από όλα τα δοκίμια πλακοδοκού που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσης διερεύνησης. Το γεγονός αυτό θα πρέπει επίσης να αποτιμηθεί σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το δοκίμιο TB200P2b-R ήταν ένα επισκευασμένο δοκίμιο (όχι παρθένο) από διατμητικές βλάβες της προηγούμενης φορτιστικής του ακολουθίας (TB200P2b). Επιπρόσθετα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το φορτίο των 156KN δεν αποτελεί την φέρουσα ικανότητά του σε διάτμηση αφού το δοκίμιο αυτό αστόχησε καμπτικά.

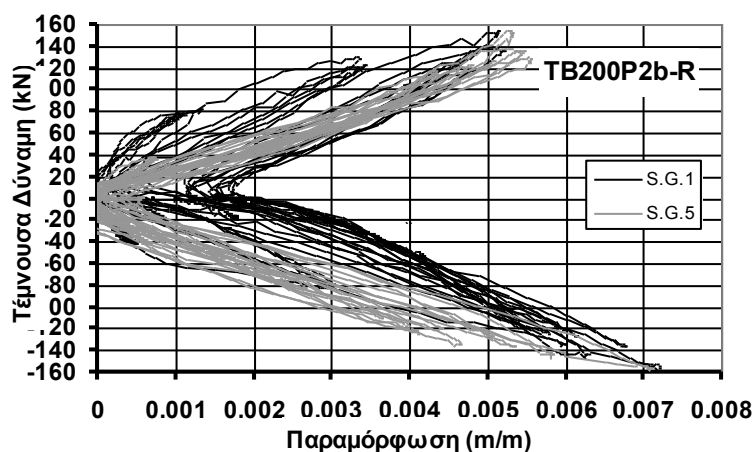
Το σχήμα 4.60 παρουσιάζει τους υστερητικούς βρόχους που προέκυψαν από την φόρτιση του δοκιμίου αυτού σε όρους τέμνουσας δύναμης σε σχέση με τη μετατόπιση της κεφαλής του δοκιμίου



Σχήμα 4.60 Τέμνουσα δύναμη – μετατόπιση TB200P2b Σχήμα 4.61 Αστοχία TB200P2b



Η τελική μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε εντοπίζεται στη θραύση του ΑΙΟΠ της κάμψης, χωρίς να εντοπιστούν αστοχίες στις αγκυρώσεις. Σαφώς αναπτύχθηκαν διατμητικές ρηγματώσεις οι οποίες οδήγησαν στην ανάπτυξη παραμορφώσεων στις λωρίδες ΧΙΟΠ που παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί. Τέλος οι παραμορφώσεις που μετρήθηκαν στο ΑΙΟΠ που αστόχησε έφτασαν τα 7100μstrain που αποτελούν από σχετικά πολύ μεγάλες τιμές παραμορφώσεων για τις λωρίδες ΧΙΟΠ που μετρήθηκαν σε όλη την πειραματική ακολουθία με τα δοκίμια των πλακοδοκών (δες πίνακες 5.7 και 5.9). Θα πρέπει να ληφθεί επίσης υπόψη ότι στην διατμητική ενίσχυση του εν λόγω δοκιμίου TB200P2b-R χρησιμοποιήθηκαν λωρίδες ΧΙΟΠ διπλού πάχους ενώ σε όλα τα προηγούμενα δοκίμια πλακοδοκών χρησιμοποιήθηκαν λωρίδες ΧΙΟΠ απλού (μονού) πάχους. Με βάση όλα τα ανωτέρω στοιχειοθετείται ο κρίσιμος ρόλος του συστήματος αγκύρωσης των διατμητικών αυτών λωρίδων. Το σύστημα αγκύρωσης που αναπτύχθηκε στο ΕΠΑΥΚ συνετέλεσε στην δυνατότητα αναβάθμισης της διατμητικής φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου της πλακοδοκού από 37KN (χωρίς καθόλου διατμητικό οπλισμό) σε μεγαλύτερο από 156KN, που αποτελεί επαύξηση περίπου 320%.



Σχήμα 4.62 Διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – παραμόρφωσης δοκιμίου TB200P2b-R



## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> – Συγκριτική Αξιολόγηση

### 5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται συγκριτική αξιολόγηση της συμπεριφοράς των τριών τύπων δοκιμίων που εξετάστηκαν. Αρχικά εξετάζεται η συμπεριφορά των απλών δοκιμίων τμημάτων πλακοδοκού που υποβλήθηκαν διαδικασία της φόρτισης που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.1. Πρόκειται για τις σχετικά πιο απλές δοκιμές, τα αποτελέσματα των οποίων συνοψίζονται στο παρόν κεφάλαιο και χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε πιο σύνθετες δοκιμές.

Στη συνέχεια γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των δοκιμών μονότονης κάμψης τεσσάρων σημείων ορθογωνικών δοκών Ο/Σ. Υπολογίζεται η φέρουσα ικανότητα των δομικών στοιχείων με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς και τέλος συνοψίζονται τα αποτελέσματα και συμπεράσματα με στόχο να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα στην πιο σύνθετη διερεύνηση, δηλαδή αυτή των δοκιμών Ο/Σ διατομής πλακοδοκού που υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη σεισμικού τύπου φόρτιση.

### 5.2 Συγκριτικά αποτελέσματα απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα γίνει ο συγκριτικός σχολιασμός των αποτελεσμάτων των απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ. Οι στόχοι της παρούσας διερεύνησης είναι οι εξής:

- Επιρροή της προετοιμασίας της επιφάνειας επικόλλησης των ΙΟΠ
- Επιρροή της ύπαρξης αγκύρωσης κατά τη χρήση των ΙΟΠ
- Αποτελεσματικότητα της χρήσης ΧΙΟΠ και σύγκριση με χρήση ΑΙΟΠ σε σχέση με τους ανωτέρω παράγοντες.
- Δοκιμή και έλεγχος διαφορετικών τύπων αγκυρώσεων με αναφορά σε πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών.

Στον Πίνακα 5.1 που ακολουθεί αναφέρονται συγκριτικά όλα τα αποτελέσματα των εν λόγω δοκιμίων που έχουν υποβληθεί σε απλό ελκυσμό. Η πρώτη στήλη αναφέρει την κωδική ονομασία του δοκιμίου όπως αυτή έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 3. Στη 2<sup>η</sup> στήλη αναφέρεται το μέγιστο φορτίο που έχει καταγραφεί από το ηλεκτρικό δυναμόμετρο. Η 3<sup>η</sup> στήλη παρουσιάζει τη μέση μέγιστη παραμόρφωση που έχουν καταγράψει οι ταινίες παραμόρφωσης στις 2 παρειές του δοκιμίου. Η 4<sup>η</sup> στήλη υποδεικνύει το φορτίο αποκόλλησης της λωρίδας ΙΟΠ από τις μετρήσεις παραμόρφωσης της ταινίας κοντά στην αγκύρωση, ενώ η 5<sup>η</sup> στήλη αναφέρει το φορτίο αποκόλλησης από τις μετρήσεις των LVDT. Συνεχίζοντας, η 6<sup>η</sup> στήλη παρουσιάζει το φορτίο που προκύπτει κατά τη μετατροπή των παραμορφώσεων σε φορτίο, χρησιμοποιώντας τη θεωρία ελαστικότητας. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας ότι το υλικό βρίσκεται στην ελαστική περιοχή, υπολογίζονται οι τάσεις από τις παραμορφώσεις πολλαπλασιάζοντας με το μέτρο ελαστικότητας του ΙΟΠ. Στη συνέχεια πολλαπλασιάζοντας με την επιφάνεια της διατομής του ΙΟΠ είτε με μια στρώση είτε με δύο υπολογίζεται η δύναμη που αναπτύσσεται στο σημείο όπου είναι τοποθετημένες οι ταινίες παραμόρφωσης. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι η τιμή αυτή του φορτίου που υπολογίζεται υποθέτει ομοιόμορφη κατανομή των παραμορφώσεων στο πλάτος κάθε λωρίδας.





Στη συνέχεια στην 7<sup>η</sup> στήλη υπολογίζεται ο λόγος της μετρημένης δύναμης  $P_{max}$  δια της δύναμης που έχει υπολογιστεί από τις καταγραφές των ταινιών παραμόρφωσης  $P_{cal}$ . Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι ο λόγος τόσο πιο ομοιόμορφες μπορούν να θεωρηθούν οι τάσεις σε μια διατομή ΙΟΠ.

Στη συνέχεια στη στήλη 8 γίνεται λόγος για ένα «ποσοστό εκμετάλλευσης του υλικού» ΙΟΠ (MEI, Material Exploitation index). Το ποσοστό αυτό υπολογίζεται διαιρώντας την μέγιστη μετρημένη τιμή των παραμορφώσεων δια της μέγιστης παραμόρφωσης που δίνει ο κατασκευαστής ή έχει μετρηθεί πειραματικά στο εργαστήριο. Πιο συγκεκριμένα οι μέγιστη τιμή παραμόρφωσης είναι κοινή για τα δύο υλικά ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκαν και είναι ίση με 1,1% ή 11000  $\mu strain$ . Σε ορισμένα κελιά του πίνακα γίνεται χρήση του συμβόλου \*, τα δοκίμια αυτά χρησιμοποιούν μία στρώση ΙΟΠ. Σε αυτές τις περιπτώσεις το ποσοστό εκμετάλλευσης MEI έχει διαιρεθεί στο μισό με στόχο να γίνεται άμεσα η σύγκριση των δοκιμών που χρησιμοποιούν μία στρώση, με αυτά που χρησιμοποιούν δύο στρώσεις.

Τέλος στην 9<sup>η</sup> και τελευταία στήλη γίνεται αναφορά της μορφής αστοχίας του κάθε δοκιμίου.

Ακολουθεί ο Πίνακας 5.1 με τα συγκριτικά αποτελέσματα όλων των δοκιμών.

Πίνακας 5.1 Συγκριτικά αποτελέσματα των απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ

Δοκίμιο	Μέγιστο μετρηθέν φορτίο $P_{max}$ (kN)	Μέγιστη μέση τροπή ( $\mu strain$ )	Φορτίο αποκόλλησης από s.g. (kN)	Φορτίο αποκόλλησης από LVDT	Υπολογιζόμενο φορτίο από s.g. $P_{cal}$ (kN)	Λόγος $P_{max} / P_{cal}$	MEI	Μορφή αστοχίας
CSN1	27.9	5400	23.5	21	32.54	0.86	0.25*	αποκόλληση
CRN1	42.7	6775	40.11	36.16	40.83	1.05	0.31*	αποκόλληση
CSL2t1 <sup>H</sup> <sub>US</sub>	42.1	3680	28,0	27,0	44.35	0.95	0.33	εξόλκευση βίδας αγκύρωσης
CRL2t1 <sup>H</sup> <sub>US</sub>	47.6	3931	43.3	43	47.38	1.01	0.36	εξόλκευση βίδας αγκύρωσης
CSL2t	54.9	4680	32	28,0	56.40	0.97	0.43	τοπική αστοχία ΑΙΟΠ
CRL2t	61.8	5880	45,0	34,0	70.87	0.87	0.53	αστοχία αγκύρωσης
CSL2t2 <sup>H</sup> <sub>US</sub>	50.1	4347	32,0	32,0	52.39	0.96	0.40	εξόλκευση βίδας αγκύρωσης
CSP2s	113.0	9065	30,0	32,0	109.25	1.03	0.82	Θραύση ΑΙΟΠ
CRP2s	102.7	8275	38,3	40,5	99.73	1.03	0.75	Θραύση ΑΙΟΠ
CNT1s	24.6	4500	-	-	27.12	0.91	0.20*	αστοχία αγκύρωσης
CNT1t	10.9	1730	-	-	10.42	1.05	0.08*	πρόωρη αστοχία αγκύρωσης



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ - ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

CNT1s,t	33.8	6278	-	-	37.83	0.89	0.29*	αστοχία αγκύρωσης
CNT1s <sup>O</sup>	38.6	6500	-	-	39.17	0.99	0.30*	αστοχία ΑΙΟΠ
CNT1s <sup>B</sup>	41.4	6980	-	-	42.06	0.98	0.32*	αστοχία αγκύρωσης
CSTsOb	49.0	4382	30,5	-	52.81	0.93	0.40	αστοχία αγκύρωσης
CSTsOt	61.3	5695	30,5	-	68.64	0.89	0.52	αστοχία αγκύρωσης
SSN1	29.9	5700	25,3	25	28.34	1.05	0.26*	αποκόλληση
SRN1	39.2	7465	38,7	37	37.12	1.06	0.34*	αποκόλληση
SSL2t	41.7	4950	30,5	29	49.23	0.85	0.45	εξόλκευση βίδας αγκύρωσης
SRL2t	45.8	5400	36,5	36	53.71	0.85	0.49	εξόλκευση βίδας αγκύρωσης
SNL1t	13.4	-	-	-	-	-	-	Πρόωρη θραύση των ινών χάλυβα (όχι ρητίνη)
SNL1t <sup>R</sup>	53.9	-	-	-	-	-	-	θραύση ινών χάλυβα όχι ρητίνη
SSL2t <sup>M8</sup>	65.2	5765	31	30,5	57.34	1.14	0.52	θραύση ντίζας M8
SNL2t <sup>M8- M10</sup>	61.0	6150	-	-	61.17	1.00	0.56	θραύση ντίζας M8
SNL2t <sub>M10</sub>	97.6	9622	-	-	95.70	1.02	0.87	θραύση ντίζας M10
SNL2t <sub>M12</sub>	90.6	9025	-	-	89.76	1.01	0.82	θραύση ΧΙΟΠ
SSL2t2 <sup>HU</sup> <sub>s</sub>	44.2	5125	32	31	50.97	0.87	0.47	εξόλκευση βίδας αγκύρωσης
SSP2	87.3	7980	30	27,4	79.37	1.10	0.73	θραύση ΧΙΟΠ
SRP2	105.2	10235	41,1	40,3	101.79	1.03	0.93	θραύση ΧΙΟΠ



### 5.2.1 Επιρροή προετοιμασίας επιφάνειας επικόλλησης

Από τις δοκιμές CSN1 και SSN1 υπολογίζεται μια φέρουσα ικανότητα αποκόλλησης λείας επιφάνειας ίση με 29kN ενώ η αντίστοιχη για τα δοκίμια που έχουν επεξεργασμένη επιφάνεια επικόλλησης (CRN1 και SRN1) η αντίστοιχη τιμή είναι 41kN. Συνεπώς η εκτράχυνση της επιφάνειας συνετέλεσε σε μια αύξηση της φέρουσας ικανότητας ίση με 41,3%, γεγονός που δηλώνει ότι η εκτράχυνση και προετοιμασία της επιφάνειας παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας στην περίπτωση που δε χρησιμοποιείται κάποιου είδους αγκύρωση.

Στις δοκιμές που έχει χρησιμοποιηθεί κάποιου είδους αγκύρωση φαίνεται ότι αρχικά λαμβάνει χώρα η αποκόλληση και στη συνέχεια αρχίζει να λειτουργεί η αγκύρωση με αποτέλεσμα να αυξάνεται η φέρουσα ικανότητα λόγω της χρήσης της αγκύρωσης. Πιο συγκεκριμένα στις στήλες 4 και 5 παρουσιάζεται το φορτίο αποκόλλησης της λωρίδας ΙΟΠ το οποίο σε όλες τις περιπτώσεις είναι μικρότερο από το μέγιστο καταγεγραμμένο φορτίο. Οι μέση τιμή του φορτίου αποκόλλησης στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει εκτράχυνση της διεπιφάνειας προκύπτει περίπου ίση με 28kN, ενώ στις περιπτώσεις όπου η επιφάνεια έχει δεχθεί επεξεργασία η αντίστοιχη τιμή του φορτίου είναι περίπου 39kN. Οι τιμές αυτές είναι πολύ κοντά στις τιμές των δοκιμών τόσο των ΑΙΟΠ όσο και των ΧΙΟΠ χωρίς την ύπαρξη κάποιας αγκύρωσης.

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε ένα αναλυτικό μοντέλο (Holzenkampfer 1994, Neubauer and Rostasy, 1999). Σύμφωνα με το μοντέλο η σχέση δύναμης αποκόλλησης ( $N_{fa}$ ) – μήκους επικόλλησης ( $l_b$ ) περιγράφεται αναλυτικά από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\text{για } l_b > l_{b,max} \quad N_{fa} = c_1 k_c k_b b_f \sqrt{f_{ctm} E_f t_f} \quad (4.1)$$

$$l_{b,max} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{f_{ctm}}} \quad (mm) \quad (4.2)$$

όπου:

$$k_b = \sqrt{\frac{1.125 \left( 2 - \frac{b_f}{b} \right)}{1 + \frac{b_f}{400}}} \quad (4.3)$$

και  $c_1=0.64$ ,  $k_c$ =συντελεστής επιφάνειας σκυροδέματος 1.0 για καλά προετοιμασμένη επιφάνεια σκυροδέματος χωρίς ατέλειες και 0.87 για ιδιαίτερα τραχιά επιφάνεια ή επιφάνεια με ατέλειες,  $b_f$ =πλάτος λωρίδας ΙΟΠ,  $b$ =πλάτος στοιχείου σκυροδέματος.

Χρησιμοποιώντας το αναλυτικό αυτό μοντέλο και λαμβάνοντας την τιμή  $k_c=1.0$  (για επεξεργασμένη επιφάνεια επικόλλησης) υπολογίστηκε ότι το φορτίο αποκόλλησης για τα ΑΙΟΠ είναι 40,2 kN και για τα ΧΙΟΠ 35,8 kN. Οι αντίστοιχες πειραματικές τιμές είναι : 42,7kN και 39,2kN αντίστοιχα στην περίπτωση που η επιφάνεια του σκυροδέματος εκτραχύνθηκε. Στον Πίνακα 5.2 γίνεται μια σύγκριση τιμών μέγιστων φορτίων αποκόλλησης μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.



Η τιμή  $N_{fa,ana}$  είναι η τιμή αποκόλλησης που υπολογίστηκε βάση των προηγούμενων σχέσεων από πειραματικά δεδομένα σε δοκίμια όπου δεν χρησιμοποιήθηκαν μηχανικά αγκύρια. Όπως φαίνεται οι διαφορές μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών τιμών είναι 5% στην περίπτωση των ΑΙΟΠ και 6,5% στην περίπτωση των ΧΙΟΠ. Η τιμή  $N_{fa,anc}$  είναι η τιμή αποκόλλησης που υπολογίστηκε από πειραματικά δεδομένα σε δοκίμια με χρήση μηχανικών αγκυρίων. Όπως αναμενόταν οι πειραματικές τιμές είναι περίπου 60% υψηλότερες από τις θεωρητικές τιμές αποκόλλησης ανεξάρτητα από τον τύπο των ινών που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 5.2 Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών φορτίων αποκόλλησης

	$N_{fa,anal}$ (kN) Αναλυτική	$N_{fa,exp}$ (kN) Πειραματική Τραχιά επιφάνεια σκυροδέματος	$N_{fa,anch}$ (kN) Πειραματική Δοκίμια με αγκυρώσεις	$\frac{N_{fa,exp}}{N_{fa,ana}}$	$\frac{N_{fa,anc}}{N_{fa,ana}}$
ΑΙΟΠ	40,2	42,7*	67,5**	1,05	1,57
ΧΙΟΠ	35,8	39,2*	61,6**	1,065	1,57

\*Δεν αποτελούν τη φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου αλλά τη δύναμη όπου καταγράφηκε η αποκόλληση

\*\* Οι τιμές αυτές βασίζονται είτε σε αστοχία αγκύρωσης είτε σε θραύση ινών.

Επιπρόσθετα, από την ανάλυση των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι το μέγιστο φορτίο αστοχίας στην περίπτωση που έχει χρησιμοποιηθεί αγκύρωση δεν επηρεάζεται από την προετοιμασία της επιφάνειας και την ενδεχόμενη αποκόλληση των ΙΟΠ αλλά μόνο από την αστοχία της αγκύρωσης.

Συμπερασματικά μπορεί να αναφερθεί ότι η επεξεργασία της επιφάνειας επικόλλησης δεν προσδίδει κάποια αύξηση στη φέρουσα ικανότητα στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται κάποιου είδους αγκύρωση, η οποία φυσικά έχει φέρουσα ικανότητα μεγαλύτερη από εκείνη της απλής επικόλλησης.

### 5.2.2 Αποτελεσματικότητα ΧΙΟΠ ως εναλλακτικού υλικού ενίσχυσης

Σε γενικές γραμμές όλες οι δοκιμές που έλαβαν χώρα με τη χρήση των ινών άνθρακα ΑΙΟΠ επαναλήφθηκαν με τη χρήση ινών χάλυβα υψηλής αντοχής ΧΙΟΠ. Από τους πίνακες 5.1 και 5.2 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών ΧΙΟΠ είναι παρόμοια με αυτά των ΑΙΟΠ και μάλιστα το δοκίμιο SRP2 είναι το δοκίμιο με τη 2<sup>η</sup> μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα με μορφή αστοχίας εντοπισμένη στη θραύση του ΧΙΟΠ παρόμοια με αυτή του αντίστοιχου ΑΙΟΠ (δοκίμιο CRP2). Παρότι οι λωρίδες ΧΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκαν είχαν το ίδιο πλάτος με αυτές των ΑΙΟΠ το πάχος τους ήταν μικρότερο (0.118mm έναντι 0.131mm των ΑΙΟΠ). Επίσης το μέτρο ελαστικότητας των



ΧΙΟΠ είναι μικρότερο από αυτό των ΑΙΟΠ (210 GPa έναντι 238 GPa). Λόγω αυτών των διαφορών το αναμενόμενο φορτίο αποκόλλησης στα ΑΙΟΠ ήταν μεγαλύτερο από των ΧΙΟΠ.

Τα ΧΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διερεύνησης αποτελούν ένα εναλλακτικό υλικό ενίσχυσης με συμπεριφορά παρόμοια αυτών των ΑΙΟΠ. Οφείλει να σημειωθεί ότι η αυξημένη τους δυσκαμψία, σε σχέση με τα ΑΙΟΠ δεν επέφερε προβλήματα κατά την εφαρμογή τους στο σκυρόδεμα.

### 5.2.3 Επιρροή των διαφορών ειδών αγκύρωσης και αύξηση της αποτελεσματικότητας των ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ

Στην παρούσα διερεύνηση ελέχθησαν συνολικά τρεις βασικές διατάξεις αγκύρωσης με διάφορες παραλλαγές. Βασικό συμπέρασμα της όλης διερεύνησης είναι ότι η ύπαρξη κάποιας μορφής αγκύρωσης αυξάνει τη φέρουσα ικανότητα της ενίσχυσης. Για να αρχίσει να λειτουργεί η αγκύρωση πρέπει να έχει ξεκινήσει η αποκόλληση του ΙΟΠ. Στο γεγονός αυτό, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στηρίζεται και η συλλογιστική ότι η εκτράχυνση της επιφάνειας, όταν υπάρχει αγκύρωση, δεν είναι καθοριστικής σημασίας.

Όλες οι αγκυρώσεις συμπεριφέρθηκαν σε γενικές γραμμές με τον ίδιο τρόπο είτε χρησιμοποιήθηκαν ΑΙΟΠ είτε ΧΙΟΠ. Στην περίπτωση χρήσης της αγκύρωσης θυσάνου ινών άνθρακα δεν έγιναν αντίστοιχες δοκιμές με χρήση ΧΙΟΠ, παρά μόνο με ΑΙΟΠ. Πιο συγκεκριμένα η αγκύρωση με χρήση θυσάνου έδωσε τις μικρότερες φέρουσες ικανότητες σε σχέση με τις άλλες αγκυρώσεις. Σημαντικό επίσης είναι το γεγονός ότι η αγκύρωση με θύσανο δεν μπορεί να αυξηθεί σε αντοχή. Ο αριθμός των ινών είναι συγκεκριμένος και τυποποιημένος. Τέλος πρόβλημα παρατηρήθηκε κατά την εφαρμογή του και τον εμποτισμό των ινών στη ρητίνη. Είναι μια διαδικασία που απαιτεί χρόνο και εξειδίκευση και παράλληλα πάρα πολύ σημαντική για την αποτελεσματικότητα της αγκύρωσης.

Από τα αποτελέσματα που παρατέθηκαν στον πίνακα 5.1 γίνεται σαφές ότι η αγκύρωση που έδωσε τις πιο μεγάλες φέρουσες ικανότητες και οδήγησε την αστοχία στη θραύση τόσο των ΑΙΟΠ όσο και των ΧΙΟΠ είναι η αγκύρωση που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών του ΑΠΘ. Τα δοκίμια που έχουν σαν τρίτο γράμμα Ρ είναι αυτά που έχει χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη αγκύρωση. Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα που καταγράφηκε είναι ίση με 113kN για το δοκίμιο CSP2s που χρησιμοποιεί ΑΙΟΠ. Αξίζει να αναφερθεί ότι το δοκίμιο αυτό κατά την επικόλληση των ΑΙΟΠ δεν έγινε κάποια κατεργασία της επιφάνειας. Το αμέσως επόμενο δοκίμιο με τη μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα είναι το δοκίμιο SRP2s με 105,2kN.

Επίσης έγινε εκτενής διερεύνηση της αγκύρωσης που χρησιμοποιεί χαλύβδινα γωνιακά. Στις περιπτώσεις όπου οι βίδες βιδώνονται μόνο στο πάχος της πλάκας του σκυροδέματος (δοκίμια CSL2t1<sup>HUS</sup>, CRL2t1<sup>HUS</sup>, CSL2t2<sup>HUS</sup>, SSL2t2<sup>HUS</sup>) η μορφή αστοχίας εντοπίζεται στην εξόλκευση της βίδας από το πάχος της πλάκας Ο/Σ. Το γεγονός αυτό θέτει επίσης ένα άνω όριο στο βαθμό της ενίσχυσης που δύναται να εφαρμοστεί.

Για να αποφευχθεί η μορφή αυτή αστοχίας έγινε αντικατάσταση των βιδών με μπουλόνια, τα οποία διαπερνούν το πάχος της πλάκας Ο/Σ και βιδώνονται στο πάνω μέρος της πλάκας. Στις περιπτώσεις αυτές ο εφαρμοστής οφείλει να επισκέπτεται από πάνω το δομικό στοιχείο που χρήζει ενίσχυσης, να βρίσκει κάτω από τα υφιστάμενα δάπεδα την πλάκα Ο/Σ και να βιδώνει. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι



παρότι η αποτελεσματικότητα της αγκύρωσης είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική, η εφαρμογή της είναι δύσκολη και σε κάποιες περιπτώσεις συνδέεται με υψηλό κόστος. Ένα πλεονέκτημα επίσης της αγκύρωσης αυτής είναι το γεγονός ότι είναι εύκολα διαστασιολογίσιμη. Αυτό αποδείχθηκε πειραματικά από τις μορφές αστοχίας των δοκιμίων  $SSL2t^{M8}$ ,  $SNL2t^{M8-M10}$ ,  $SnL2t^{M10}$ ,  $SNL2t^{M12}$ . Πιο συγκεκριμένα η μορφή αστοχίας οδηγήθηκε από τη διαρροή και θραύση της ντίζας M8 και M10 στη θραύση του ΧΙΟΠ όταν χρησιμοποιήθηκε ντίζα M12. Σημειώνεται ότι η αγκύρωση των ΧΙΟΠ με γωνιακά χαλύβδινα ελάσματα και τέτοιου τύπου έδωσε αποτελέσματα αντίστοιχα με αυτά που λάβαμε από τη χρήση της πατενταρισμένης αγκύρωσης.

Τέλος οφείλει να αναφερθεί ότι η χρήση της αγκύρωσης από θύσανο ανθρακονημάτων δεν αποδείχθηκε αποτελεσματική. Σε όλες τις περιπτώσεις επήλθε αστοχία της αγκύρωσης. Το βασικό πρόβλημα εντοπίστηκε στο μη ομοιόμορφο διαποτισμό ρητίνης στις ίνες χάλυβα, παρά το γεγονός ότι έγινε μεγάλη προσπάθεια για να επιτευχθεί αυτό.

#### 5.2.4 Ποσοστό εκμετάλλευσης του υλικού (MEI)

Για τις ανάγκες της παρούσας διερεύνησης χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης εκμετάλλευσης του υλικού ενίσχυσης (material exploitation index) MEI. Ο δείκτης αυτός αποτελεί το λόγο των καταγεγραμμένων τιμών των παραμορφώσεων δια της οριακής παραμόρφωσης που δίνει ο κατασκευαστής ή της οριακής παραμόρφωσης που έχει μετρηθεί πειραματικά. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι το χαμηλότερο δείκτη MEI ραπαρουσιάζουν τα δοκίμια εκείνα για τα οποία δεν εφαρμόστηκε κάποιου είδους αγκύρωση και αστόχησαν πρόωρα λόγω αποκόλλησης των ΙΟΠ από το δοκίμιο Ο/Σ σκυροδέματος. Αντιθέτως το μέγιστο ποσοστό αξιοποίησης του υλικού ΙΟΠ παρατηρήθηκε στα δοκίμια εκείνα όπου χρησιμοποιήθηκε αγκύρωση και η αστοχία επήλθε μετά από θραύση των ινών. Πιο συγκεκριμένα το δοκίμιο SRP2 (όπου χρησιμοποιήθηκε η αγκύρωση που αναπτύχθηκε στο ΑΠΘ) εμφανίζει ένα ποσοστό αξιοποίησης ίσο με 0,93 ή 93%. Τιμές του δείκτη εκμετάλλευσης πάνω από 80% παρατηρήθηκαν για τρία δοκίμια που χρησιμοποιήθηκε ΧΙΟΠ ενώ μόνο σε μία περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε ΑΙΟΠ. Τέλος για τα δοκίμια που δεν έχει χρησιμοποιηθεί αγκύρωση ο δείκτης κυμαίνεται από 25% έως 34%, ενώ για τα δοκίμια που έχει χρησιμοποιηθεί κάποια μηχανική αγκύρωση με χρήση μεταλλικού ελάσματος τα ποσοστά αξιοποίησης κυμαίνονται κοντά στο 50%. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η χρήση θυσάνων δεν επιφέρει κάποια διαφοροποίηση σε σχέση με την απλή αποκόλληση και αυτό φαίνεται και από το ποσοστό εκμετάλλευσης.

#### 5.2.5 Υπολογισμός μέγιστης φέρουσας ικανότητας

Στον πίνακα 5.1 και πιο συγκεκριμένα στη έκτη στήλη παρουσιάζεται το φορτίο που υπολογίστηκε βάση των μέγιστων παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στα ΙΟΠ. Ο τρόπος υπολογισμού έχει αναφερθεί σε προηγούμενο υποκεφάλαιο. Από την έβδομη στήλη προκύπτει ο λόγος της καταγεγραμμένης συνολικής δύναμης προς την υπολογισμένη δύναμη μέσω των παραμορφώσεων ( $P_{max}/P_{cal}$ ). Από τα αποτελέσματα της 7<sup>ης</sup> στήλης προκύπτει μια μέση απόκλιση των δύο τιμών μικρότερη από 10%. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η κατανομή των παραμορφώσεων σε μια διατομή ΙΟΠ είναι σχετικά ομοιόμορφη στην περίπτωση όπου τα ΙΟΠ υποβάλλονται σε αξονικές



φορτίσεις όντας επικολλημένα ή και αγκυρωμένα σε διατομή πλακοδοκού όπως τα δοκίμια που εξετάστηκαν.

### 5.2.6 Συμπεράσματα

- Η εκτράχυνση της επιφάνειας επικόλλησης δεν είναι μείζονος σημασίας στην περίπτωση χρήσης αγκύρωσης. Στην αντίθετη περίπτωση είναι πολύ σημαντική και συντελεί σε αύξηση της δύναμης συνάφειας κατά 40%.
- Τα ΧΙΟΠ έχουν παρόμοια συμπεριφορά με τα ΑΙΟΠ και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικά υλικά ενίσχυσης. Μάλιστα το ποσοστό εκμετάλλευσης, ΜΕΙ, τους είναι υψηλότερο εν συγκρίσει με τα ΑΙΟΠ.
- Στην περίπτωση χρήσης αγκύρωσης το ποσοστό εκμετάλλευσης του υλικού ΜΕΙ είναι μεγαλύτερο από όταν δε χρησιμοποιείται αγκύρωση.
- Η μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα προήλθε για την αγκύρωση που αναπτύχθηκε στο ΑΠΘ και είναι 4 φορές μεγαλύτερη από τη φέρουσα ικανότητα στην περίπτωση της αποκόλλησης.
- Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στη διαστασιολόγηση των βλήτρων αγκύρωσης καθώς σε αρκετές περιπτώσεις η θραύση τους οδήγησε στην αστοχία της ενίσχυσης.
- Η αγκύρωση με χρήση θυσάνου έδωσε τις μικρότερες φέρουσες ικανότητες. Η εφαρμογή της απαιτεί χρόνο και εξειδίκευση. Η κατάλληλη εφαρμογή αυτού του τύπου της αγκύρωσης είναι πολύ σημαντική για την αποτελεσματικότητα της αγκύρωσης. Σε αντίθεση οι άλλοι δύο τρόποι αγκύρωσης, δηλαδή αυτός με γωνιακά και αυτός του Α.Π.Θ. είναι μηχανικές αγκυρώσεις εύκολες στη χρήση και μπορεί να διαστασιολογηθούν σχετικά εύκολα ανάλογα με τις απαιτήσεις της ενίσχυσης.
- Με βάση τις καταγεγραμμένες παραμορφώσεις σε μια διατομή λωρίδας ΙΟΠ μπορεί να προβλεφθεί με ικανοποιητικό τρόπο η φέρουσα ικανότητας κάθε μιας από τις λωρίδες ΙΟΠ που μετρήθηκε πειραματικά.



### 5.3 Συγκριτικά αποτελέσματα ορθογωνικών δοκών Ο/Σ

Γενικά Σχόλια:

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα γίνει εκτενής αναφορά των συγκριτικών αποτελεσμάτων των δοκιμών ορθογωνικής διατομής τα οποία έχουν υποβληθεί σε μονότονη κάμψη τεσσάρων σημείων.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι για την παρούσα διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε η αγκύρωση που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών του ΑΠΘ. Επιλέχθηκε αυτού του είδους η αγκύρωση για τους εξής λόγους: α) μπορεί και εφαρμόζεται σε δοκούς ορθογωνικής διατομής, λόγω της γεωμετρίας της και β) από την προηγούμενη διερεύνηση φάνηκε ότι πλεονεκτούσε σε σχέση με τις άλλες αγκυρώσεις και ιδιαίτερα με αυτή χρήσης θυσάνου ΑΙΟΠ. Συνεχίζοντας κατά την εφαρμογή της ενίσχυσης δεν έλαβε χώρα κάποια εκτράχυνση του σκυροδέματος. Οι επιφάνειες επικόλλησης είναι λείες. Στις περιπτώσεις όπου γίνεται χρήση αγκύρωσης αποδείχθηκε ότι η εκτράχυνση δεν είναι ουσιαστικής σημασίας.

Ο πίνακας 5.3 παρουσιάζει τα συγκριτικά αποτελέσματα των 10 ορθογωνικών δοκιμών. Στην 1<sup>η</sup> στήλη αναφέρεται η ονομασία του δοκιμίου. Στη 2<sup>η</sup> στήλη παρουσιάζεται η τέμνουσα δύναμη του κάθε δοκιμίου όπως αυτή έχει μετρηθεί από την καταγραφή του δυναμόμετρου (διαιρεμένη δια δύο). Στην 3<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup> στήλη αναφέρονται οι μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων στις λωρίδες από τις οποίες περνά η κυρίαρχη διατμητική ρωγμή. Στη συνέχεια ακολουθεί η 5<sup>η</sup> στήλη στην οποία γίνεται υπολογισμός της μέγιστης τέμνουσας δύναμης επί τη βάση των μετρήσεων των παραμορφώσεων των λωρίδων ΙΟΠ. Πιο συγκεκριμένα η τέμνουσα δύναμη που αναπτύσσεται από την επιβολή της φόρτισης είναι το άθροισμα της αντίστασης του σκυροδέματος καθώς επίσης και το άθροισμα της αντίστασης των λωρίδων ΙΟΠ που τέμνει το διατμητικό ρήγμα.

Για τον υπολογισμό της τέμνουσας, λοιπόν, γίνεται χρήση της τέμνουσας αντοχής του μητρικού δοκιμίου, ήτοι 39,4kN στην οποία προστίθενται οι δυνάμεις που προκύπτουν από τα ΙΟΠ. Για τον υπολογισμό της δύναμης των ΙΟΠ θα γίνει η βασική παραδοχή της ομοιόμορφης κατανομής των παραμορφώσεων σε μια λωρίδα ΙΟΠ. Εξ αυτής της παραδοχής οι καταγεγραμμένες παραμορφώσεις πολλαπλασιαζόμενες με το μέτρο ελαστικότητας του ΙΟΠ θα δώσουν τις αναπτυσσόμενες τάσεις οι οποίες στη συνέχεια (με βάση την παραδοχή της ομοιόμορφης κατανομής) πολλαπλασιαζόμενες με την επιφάνεια της διατομής θα δώσουν τις δυνάμεις σε kN που αναπτύσσει η κάθε λωρίδα. Ακολούθως αυτές οι τιμές προστίθενται μεταξύ τους και με την αντίσταση του σκυροδέματος και δίνουν την υπολογιζόμενη τέμνουσα όπως αυτή παρουσιάζεται στην 5<sup>η</sup> στήλη του πίνακα 5.3. Τέλος η 6<sup>η</sup> στήλη περιγράφει τις μορφές αστοχίας του κάθε δοκιμίου.

Πίνακας 5.3 Συγκριτικά αποτελέσματα ορθογωνικών δοκιμών (ΧΙΟΠ ή ΑΙΟΠ)

Δοκίμιο	Είδος λωρίδας	Αγκύρωση	Πειραματική* τιμή της Τέμνουσας Δύναμης (kN)	Παραμόρφωση 1 <sup>ης</sup> ταινίας (μstrain)	Παραμόρφωση 2 <sup>ης</sup> ταινίας (μstrain)	Υπολογιζόμενη Φέρουσα ικανότητα σε Τέμνουσα (kN)	Μορφή Αστοχίας
CRB	-	-	39.4	-	-	-	Διατμητική ρωγμή
CRBs	-	-	90.9	-	-	-	Διαρροή συνδετήρων





<b>RB200C</b>	ΑΙΟΠ	Όχι	97.8	7390	610	87.61	Αποκόλληση
<b>RB200Ca</b>	ΑΙΟΠ	Ναι	115.1	4580	6590	106.71	Πρόωρη αστοχία ΑΙΟΠ
<b>RB200S</b>	ΧΙΟΠ	Όχι	94	5935	4620	103.00	Αποκόλληση
<b>RB200Sa</b>	ΧΙΟΠ	Ναι	122	4115	6415	102.85	Αγκύρωση
<b>RB150C</b>	ΑΙΟΠ	Όχι	101	3820	5580	96.04	Αποκόλληση
<b>RB150Ca</b>	ΑΙΟΠ	Ναι	123	7145	6080	119.09	Αστοχία ΑΙΟΠ
<b>RB150S</b>	ΧΙΟΠ	Όχι	103	4530	4905	96.26	Αποκόλληση
<b>RB150Sa</b>	ΧΙΟΠ	Ναι	119	7855	6245	124.37	Αγκύρωση

\* μέγιστη τιμή

### 5.3.1 Σχολιασμός Φέρουσας Ικανότητας

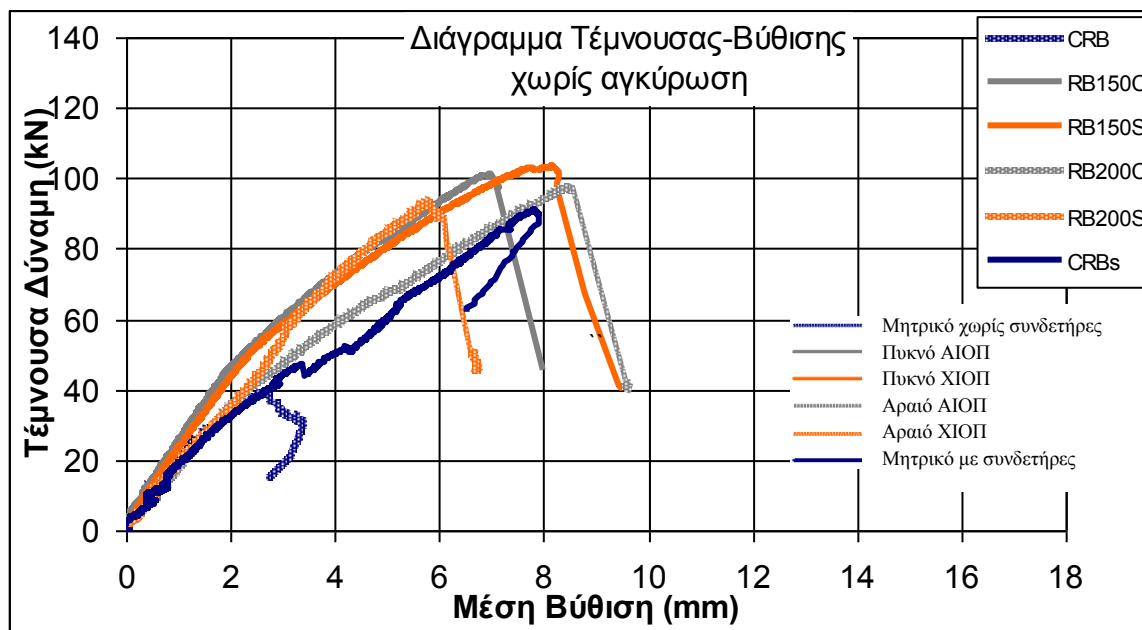
Είναι φανερή η αύξηση της φέρουσας ικανότητας των δοκών ορθογωνικής διατομής σε τέμνουσα στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί κάποια μορφής διατμητική ενίσχυση. Η μητρική δοκός αστόχησε σε φορτίο 39,4kN ενώ η μητρική δοκός με συνδετήρες Ø8/250 άγγιξε τα 90,9 kN. Σε όλες τις περιπτώσεις οι φέρουσες ικανότητες είναι μεγαλύτερες από τη φέρουσα ικανότητα της δοκού Ο/Σ που ως διατμητικό οπλισμό είχε συμβατικούς χαλύβδινους συνδετήρες. Ακολουθεί ο πίνακας 5.4 όπου παρουσιάζονται τα ποσοστά αύξησης της φέρουσας ικανότητας τόσο ως προς τη μητρική δοκό χωρίς συνδετήρες όσο και με τη δοκό με τους συνδετήρες. Το μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης είναι πάνω από 200%, δηλαδή η φέρουσα ικανότητα σε τέμνουσα τριπλασιάστηκε σε σχέση με τη μητρική δοκό Ο/Σ χωρίς συνδετήρες.

Πίνακας 5.4 Ποσοστά (%) αύξησης φέρουσας ικανότητας

Δοκίμιο	CRB	CRBs	RB200C	RB200Ca	RB200S	RB200Sa	RB150C	RB150Ca	RB150S	RB150Sa
% αύξηση ως προς CRB	0	130.7	148.2	192.1	138.6	209.6	156.3	212.2	161.4	202.0
% αύξηση ως προς CRBs	-	0	7.6	26.6	3.4	34.2	11.1	35.3	13.3	30.9

Ακόμη και στην περίπτωση της σύγκρισης με τη δοκό με τους συνδετήρες προκύπτει μέγιστη αύξηση 30%. Στη συνέχεια ακολουθεί σχολιασμός των δοκιμών που έχουν ενισχυθεί είτε με ΑΙΟΠ είτε με ΧΙΟΠ αλλά χωρίς την τοποθέτηση αγκύρωσης. Στο Σχήμα 5.1 που ακολουθεί φαίνεται η αύξηση της φέρουσας ικανότητας από τα μητρικά δοκίμια ελέγχου. Επίσης είναι ξεκάθαρο το γεγονός ότι οι φέρουσες ικανότητες και η δυσκαμψία των δοκιμών με πυκνή τοποθέτηση ΙΟΠ (150mm αξονική απόσταση μεταξύ των λωρίδων) είναι μεγαλύτερες από αυτές με αραιή (200mm αξονική απόσταση μεταξύ των λωρίδων). Τόσο για τα δοκίμια με πυκνά ΙΟΠ όσο και για αυτά με αραιά ΙΟΠ το κύριο διατμητικό ρήγμα τέμνει 2 λωρίδες. Θα περίμενε κανείς, λοιπόν, ότι οι φέρουσες ικανότητες θα ήταν ίδιας τάξης μεγέθους. Αυτό επαληθεύεται για τα δοκίμια που με χρήση ΑΙΟΠ αλλά δεν επαληθεύεται για αυτά με ΧΙΟΠ. Τέλος η χρήση των δύο υλικών ενίσχυσης έχει ως αποτέλεσμα αντίστοιχη αύξηση της διατμητικής φέρουσας ικανότητας των ορθογωνικών δοκών Ο/Σ. Η δυσκαμψία όμως των ΙΟΠ ( $\rho_f E_f$ ) έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία [26] ότι επηρεάζει άμεσα τη διατμητική φέρουσα ικανότητα των ενισχυμένων δοκών Ο/Σ. Τα ΧΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη έχουν κατά 25% χαμηλότερη εν συγκρίσει με τα ΑΙΟΠ. Μια ανάλογη μείωση της φέρουσας ικανότητας των ενισχυμένων δοκών Ο/Σ με ΧΙΟΠ θα ήταν αναμενόμενη. Παρ' όλα αυτά δεν παρατηρείται μείωση της φέρουσας ικανότητας των δοκών που ενισχύθηκαν με ΧΙΟΠ. Μάλιστα τη μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα σε τέμνουσα την εμφάνισε το δοκίμιο RB150S με τιμή ίση με 103kN ελάχιστα πιο μεγάλη από το αντίστοιχο με ΑΙΟΠ (101kN).

Κατά συνέπεια μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι τα ΧΙΟΠ μπορούν να προσφέρουν μια πολύ καλή εναλλακτική λύση έναντι των ΑΙΟΠ.

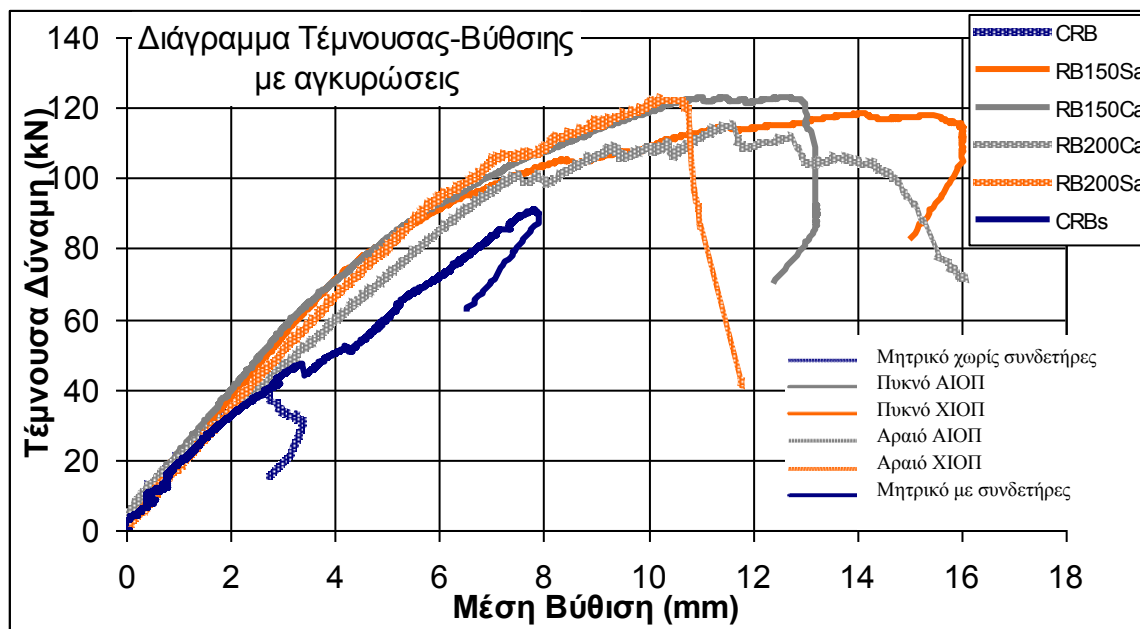


Σχήμα 5.1 Τέμνουσα δύναμη – Βύθιση για δοκίμια χωρίς αγκύρωση σε σχέση με τα μητρικά

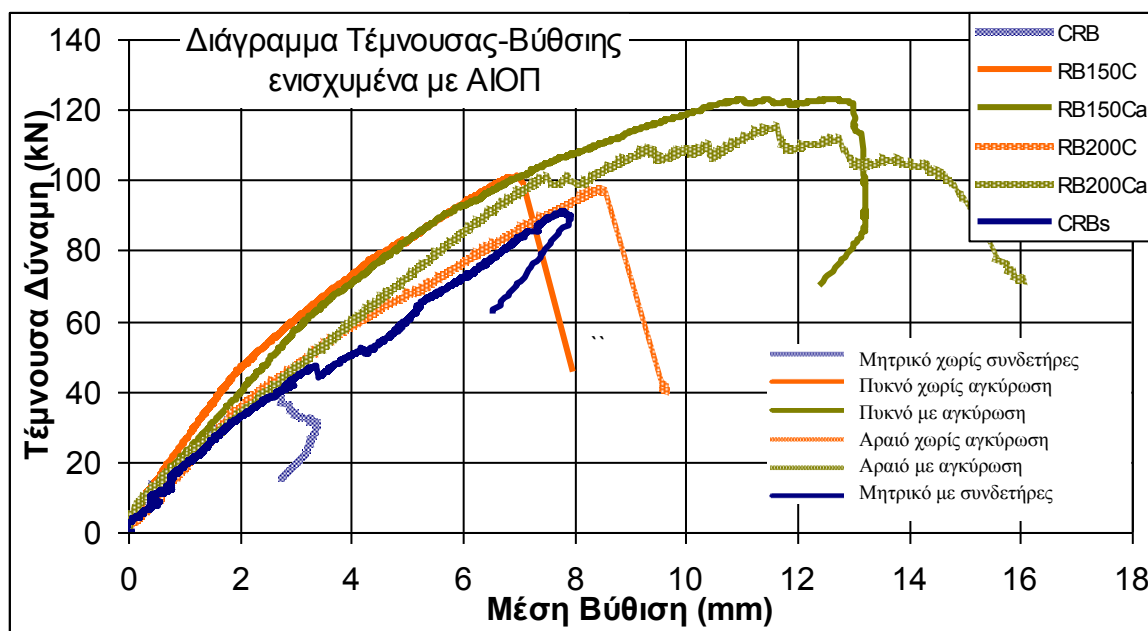
Στο διάγραμμα 5.2 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δοκών στα οποία έχει τοποθετηθεί η αγκύρωση. Είναι εμφανής η σημαντική αύξηση της φέρουσας ικανότητας σε σχέση με τα μητρικά δοκίμια ελέγχου. Όπως και προηγουμένως τα δοκίμια με πιο πυκνή τοποθέτηση λωρίδων ΙΟΠ εμφάνισαν μεγαλύτερη αντίσταση έναντι τέμνουσας συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα με αραιή τοποθέτηση. Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα σε αυτή τη σειρά των δοκιμών με αγκυρώσεις εμφανίστηκε για το δοκίμιο RB150Ca και είναι ίσο με 123kN. Η τέμνουσα αυτή αποτελεί τη



μεγαλύτερη καταγραφή από όλα τα δοκίμια. Το δοκίμιο αυτό έχει ενισχυθεί με ΑΙΟΠ. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι και σε αυτή τη σειρά των δοκιμών δεν υπάρχει κάποια διαφορά από τη σκοπιά της μέγιστης φέρουσας ικανότητας μεταξύ των ΑΙΟΠ και των ΧΙΟΠ.



Σχήμα 5.2 Διάγραμμα Τέμνουσας δύναμης – Βύθισης για δοκίμια με αγκύρωση σε σχέση με τα μητρικά

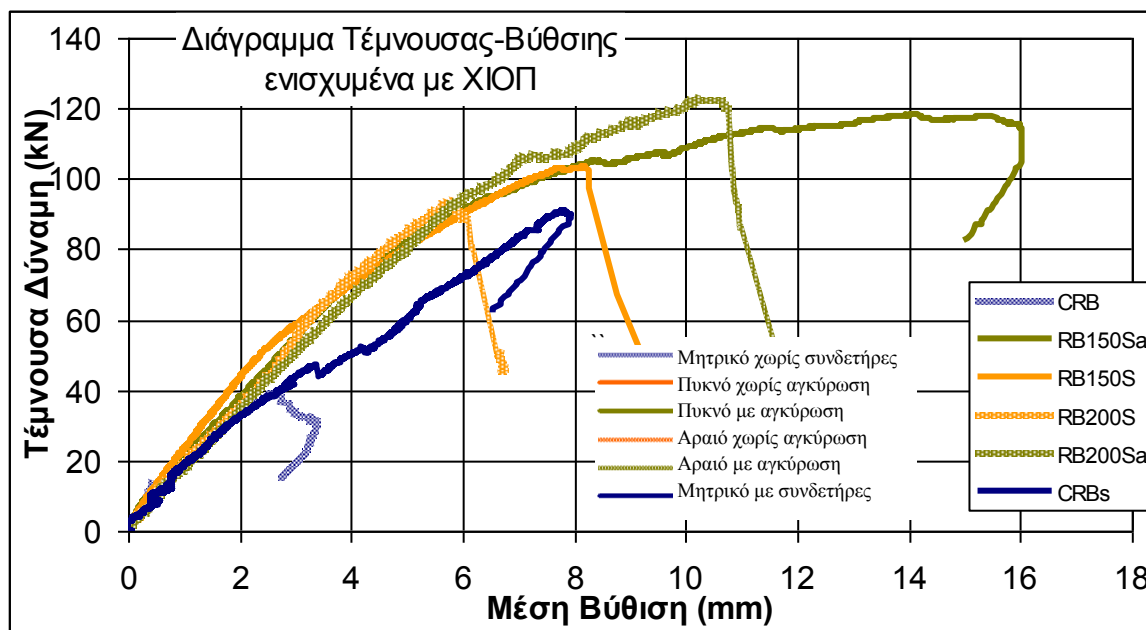


Σχήμα 5.3 Διάγραμμα Τέμνουσας δύναμης – Βύθισης για δοκίμια ΑΙΟΠ σε σχέση με τα μητρικά

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται διαγράμματα βύθισης τέμνουσας δύναμης των δοκιμών που έχουν ενισχυθεί με χρήση ιών άνθρακα (ΑΙΟΠ) είτε με αγκύρωση είτε χωρίς. Παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει αγκύρωση γίνεται μια απότομη διακοπή του διαγράμματος φορτίου – βύθισης, και μάλιστα για περιορισμένα επίπεδα βύθισης. Τα διαγράμματα συνεχίζονται στην

περίπτωση που τοποθετείται η αγκύρωση, με αύξηση τόσο της φέρουσας ικανότητας όσο και της μέγιστης βύθισης.

Αντίστοιχα διαγράμματα απεικονίζονται στο Σχήμα 5.4 και αφορούν στα δοκίμια που έχουν ενισχυθεί με ΧΙΟΠ. Η αρχική δυσκαμψία των δοκών είναι ίδια ανεξάρτητα με το αν είναι αγκυρωμένα τα ΙΟΠ ή όχι. Τα μη αγκυρωμένα δοκίμια αστοχούν σχετικά πρόωρα ενώ όταν χρησιμοποιείται αγκύρωση τόσο η διατμητική φέρουσα ικανότητα όσο και η μέγιστη βύθιση είναι αυξημένη.



Σχήμα 5.4 Διάγραμμα Τέμνουσας δύναμης – Βύθισης για δοκίμια ΧΙΟΠ σε σχέση με τα μητρικά

### 5.3.2 Μορφές αστοχίας

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται ένας γενικός σχολιασμός των μορφών αστοχίας που παρατηρήθηκαν κατά τη διεξαγωγή της παρούσας διερεύνησης. Αρχικά θα πρέπει να αναφερθεί πως δεν υπάρχει καμία διαφορά στη μορφή αστοχίας των δοκιμίων που δεν έχουν αγκύρωση, είτε χρησιμοποιούν ΑΙΟΠ είτε ΧΙΟΠ. Το ίδιο ισχύει τόσο για τα πυκνά δοκίμια όσο και για τα πιο αραιά (αξονικές αποστάσεις λωρίδων). Η μορφή αστοχίας είναι κοινή για όλα τα παραπάνω και εντοπίζεται στην αποκόλληση των λωρίδων ΙΟΠ από την παρεία της δοκού και την εν συνεχεία αστοχία της δοκού σε διάτμηση.

Η αρχική συμπεριφορά (δύναμη – βύθιση) των δοκιμίων είναι παρόμοια είτε χρησιμοποιήθηκε αγκύρωση είτε όχι. Το φαινόμενο αυτό στηρίζεται στο γεγονός ότι για να λειτουργήσει η αγκύρωση οφείλει η λωρίδα ΙΟΠ να αποκολληθεί και εν συνεχεία παραλαμβάνει τις εντάσεις η αγκύρωση. Το φαινόμενο αυτό έχει καταγραφεί στη διερεύνηση των απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ και αποδεικνύεται ότι ισχύει και για τις ορθογωνικές δοκούς Ο/Σ.

Σε ότι αφορά στα δοκίμια με αγκύρωση παρατηρείται μια σημαντική διαφορά μεταξύ ΧΙΟΠ και ΑΙΟΠ. Πιο συγκεκριμένα, στις δοκούς που ενισχύθηκαν με ΑΙΟΠ η αστοχία επήλθε μετά από θραύση της λωρίδας των ΑΙΟΠ στις κάτω γωνίες των δοκών λόγω συγκεντρώσεων τάσεων. Αντιθέτως, το



φαινόμενο αυτό δεν παρατηρήθηκε στα ΧΙΟΠ. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται ΧΙΟΠ, η κυρίαρχη μορφή αστοχίας εντοπίζεται στην αστοχία της αγκύρωσης λόγω εξόλκευσής της από τον όγκο του σκυροδέματος.

### 5.3.3 Σχολιασμός Αναπτυσσόμενων Παραμορφώσεων – Ποσοστό εκμετάλλευσης ΜΕΙ

Σε κάθε δοκίμιο έχουν μετρηθεί οι παραμορφώσεις των λωρίδων ΙΟΠ. Στον πίνακα 5.5α που ακολουθεί παρουσιάζεται το ποσοστό εκμετάλλευσης του υλικού ΙΟΠ, καθώς και οι δυο μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Στον πίνακα που ακολουθεί γίνεται λόγος για ένα ποσοστό εκμετάλλευσης του υλικού ΙΟΠ ΜΕΙ (Material Exploitation index). Το ποσοστό αυτό υπολογίζεται διαιρώντας την μέγιστη μετρημένη τιμή των παραμορφώσεων δια της μέγιστης παραμόρφωσης που δίνει ο κατασκευαστής ή έχει μετρηθεί πειραματικά στο εργαστήριο. Πιο συγκεκριμένα οι μέγιστη τιμή παραμόρφωσης είναι κοινή για τα δύο υλικά ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκαν και είναι ίση με 1,1% ή 11000μstrain.

Πίνακας 5.5α Ποσοστό εκμετάλλευσης υλικού

Δοκίμιο	CRB	CRBs	RB200C	RB200Ca	RB200S	RB200Sa	RB150C	RB150Ca	RB150S	RB150Sa
Παραμόρφωση 1 <sup>ης</sup> ταινίας (μstrain)	-	-	7390	4580	5935	4115	3820	7145	4530	7855
Παραμόρφωση 2 <sup>ης</sup> ταινίας (μstrain)	-	-	610	6590	4620	6415	5580	6080	4905	6245
ΜΕΙ	-	-	0.67	0.60	0.54	0.58	0.51	0.65	0.45	0.71

Στη δοκό RB200C, δοκίμιο χωρίς αγκύρωση με χρήση ΑΙΟΠ τοποθετημένα σε αξονική απόσταση 200mm, φαίνεται να υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά μεταξύ των παραμορφώσεων που καταγράφηκαν στις δυο λωρίδες που αντιστάθηκαν στο διατμητικό ρήγμα. Αυτό οφείλεται στο ότι η 1<sup>η</sup> ταινία παραμόρφωσης έτυχε να βρίσκεται ακριβώς πάνω στο ρήγμα με αποτέλεσμα να καταγραφεί πολύ υψηλή τιμή (ενδεχόμενη σημειακή παραμόρφωση). Από την άλλη έχουμε καταγράψει πολύ χαμηλή τιμή στη 2<sup>η</sup> λωρίδα. Αυτό οφείλεται στο ότι η ταινία παραμόρφωσης βρίσκεται αρκετά κάτω από το διατμητικό ρήγμα. Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία υπάρχει έντονη διακύμανση στη κατανομή των τάσεων/παραμορφώσεων καθ' ύψος της λωρίδας ΙΟΠ [58]. Επιπρόσθετα, οι παραμορφώσεις στην περιοχή της λωρίδας ΙΟΠ που βρίσκεται κάτω από το ρήγμα είναι αρκετά χαμηλότερες σε σχέση με τις παραμορφώσεις της λωρίδας ΙΟΠ που βρίσκονται πάνω από το διατμητικό ρήγμα.



Πίνακας 5.5β Ποσοστό εκμετάλλευσης υλικού

Δοκίμιο	Δοκίμια ορθογωνικής διατομής					Απλά δοκίμια τμήματος πλακοδοκού (παράγραφος 5.2)				
	RB200Ca	RB200Sa	RB150Ca	RB150Sa	Μέσος Όρος	SSP2	SRP2	CSP2	CRP2	Μέσος Όρος
MEI	60%	58%	65%	71%	63.5%	73.0%	93%	82%	75%	80.75%

Στον πίνακα 5.5.β γίνεται η σύγκριση της τιμής του μέσου όρου του ποσοστού εκμετάλλευσης (MEI) όπως προέκυψε από τα τέσσερα δοκίμια ορθογωνικής διατομής όπου οι λωρίδες των ΙΟΠ ήταν αγκυρωμένες με την τιμή του ποσοστού εκμετάλλευσης στα αντίστοιχα απλά δοκίμια διατομής πλακοδοκού που ήδη σχολιάστηκαν στην παράγραφο 5.2. Όπως φαίνεται στον πίνακα αυτό η τιμή του ποσοστού εκμετάλλευσης για τα δοκίμια ορθογωνικής διατομής που έχουν λωρίδες ΙΟΠ αγκυρωμένες είναι σχετικά ψηλό (63.5%) αλλά με μικρότερη τιμή από την αντίστοιχη τιμή που προέκυψε από τις αγκυρωμένες λωρίδες ΙΟΠ στα απλά δοκίμια διατομής πλακοδοκού. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να αποδοθεί στους εξής δύο παράγοντες:

- Στην ανομοιόμορφη κατανομή των παραμορφώσεων στο πλάτος της λωρίδας ΙΟΠ που είναι αγκυρωμένη στην ορθογωνική δοκό, που υποβάλλεται σε δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων, λόγω της θέσης και διεύθυνσης του διατμητικού ρήγματος σε σύγκριση με την μάλλον ομοιόμορφη κατανομή των παραμορφώσεων στο πλάτος της αντίστοιχης λωρίδας που είναι αγκυρωμένη στο αντίστοιχο απλό δοκίμιο τμήματος πλακοδοκού που υποβάλλεται σε αξονικό εφελκυσμό.
- Στην αποτελεσματικότητα της αγκύρωσης που και αυτή στην πρώτη περίπτωση είναι αγκυρωμένη σε τμήμα της ορθογωνικής διατομής με ένταση από καμπτο-διάτμηση ενώ στην δεύτερη περίπτωση υποβάλλεται και αυτή στην ένταση που προκύπτει από την απλή φόρτιση του αξονικού εφελκυσμού.

### 5.3.4 Αναλυτικός Υπολογισμός Τέμνουσας

Στα πλαίσια της παρούσας διερεύνησης έγινε προσπάθεια υπολογισμού της τέμνουσας δύναμης του κάθε δοκιμίου από τις καταγραφές των ταινιών παραμόρφωσης. Στον Πίνακα 5.6 που ακολουθεί δίνονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού καθώς και ο λόγος της πειραματικής τιμής ως προς την υπολογιζόμενη τιμή. Η τιμή  $P_{cal}$  υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$P_{cal} = V_{c,exp} + V_{f,cal} \quad (4.4)$$

όπου  $V_{c,exp}$  είναι η πειραματική διατμητική αντοχή της μη ενισχυμένης δοκού (CRB), ενώ το  $V_{f,cal}$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{f,cal} = 2 \cdot A_f E_f \varepsilon_{f,exp} = 2 t_f b_f E_f \varepsilon_{f,exp} \quad (4.5)$$

όπου:



$$\varepsilon_{f,exp} = \varepsilon_{f1,exp} + \varepsilon_{f2,exp} \quad (4.6)$$

και  $\varepsilon_{f1,exp}$ ,  $\varepsilon_{f2,exp}$  είναι οι μέγιστες τιμές παραμόρφωσης που μετρήθηκαν στις δύο λωρίδες που κόβουν το διατμητικό ρήγμα (βλ. Πίνακα 5.5). Σημειώνεται ότι δε χρησιμοποιήθηκε η συνηθισμένη σχέση όπου χρησιμοποιείται ο λόγος  $d/S_f$  για να υπολογιστεί ο αριθμός των λωρίδων που συμβάλλουν στη διατμητική ικανότητα των ΙΟΠ.

Γίνεται δηλαδή η θεώρηση ότι ένα διατμητικό ρήγμα στο σκυρόδεμα συναντά ακριβώς δυο λωρίδες ΙΟΠ (αυτές που δίνουν τις δυο μεγαλύτερες παραμορφώσεις και αναφέρονται στον Πίνακα 5.5.α). Σημειώνεται ότι αυτή η θεώρηση επιβεβαιώθηκε και από όλα τα πειράματα.

Πίνακας 5.6 Σύγκριση μετρημένης – υπολογισμένης μέγιστης τιμής της τέμνουσας

Δοκίμιο	CRB	RB200Ca	RB200S	RB200Sa	RB150C	RB150Ca	RB150S	RB150Sa
<b>Πειραματικά μετρημένη τιμή της μέγιστης Τέμνουσας Δύναμη <math>P_{ex-max}</math> (kN)</b>	39.4	115.1	94	122	101	123	103	119
<b>Υπολογιζόμενη Τέμνουσα <math>P_{cal}</math> (kN)</b>	-	109.05	91.71	91.59	98.01	121.87	86.16	109.28
<b>Λόγος <math>P_{ex-max}/P_{cal}</math></b>	-	1.06	1.02	1.33	1.03	1.01	1.20	1.09

Από τις τιμές του παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις η μέγιστη τιμή της τέμνουσας που υπολογίστηκε υποεκτιμά την αντίστοιχη μετρημένη τιμή. Είναι βέβαια σαφές ότι οι διαφορές είναι αρκετά μικρές και κυμαίνονται από 1 έως 33%. Η μέση διαφορά για τα ΑΙΟΠ είναι της τάξης του 6%, ενώ οι διαφορές είναι μεγαλύτερες στα ΧΙΟΠ. Βέβαια λόγω του ότι χρησιμοποιήθηκε μόνο μία ταινία παραμόρφωσης σε κάθε λωρίδα ΙΟΠ και όπως προαναφέρθηκε οι παραμορφώσεις των ΙΟΠ πιστεύεται ότι μεταβάλλονται τόσο καθ' ύψος όσο και κατά πλάτος των λωρίδων, λόγω της κλίσης της ρηγμάτωσης, γεγονός που συμβάλει στο να ερμηνευθεί η ανωτέρω παρατηρούμενη απόκλιση ανάμεσα στην μετρημένη και υπολογισμένη μέγιστη τιμή της τέμνουσας

### 5.3.5 Συμπεράσματα

- Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα του ενισχυμένου δοκιμίου ορθογωνικής διατομής με αγκυρωμένα ΙΟΠ τριπλασιάστηκε ως προς τη δοκό αναφοράς, χωρίς συνδετήρες, ενώ έγινε 1,35 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τη δοκό αναφοράς με τους συνδετήρες.
- Η χρήση συστήματος αγκύρωσης των λωρίδων ΙΟΠ οδηγεί σε αυξημένες τιμές διατμητικής φέρουσας ικανότητας σε σχέση με τα δοκίμια όπου οι λωρίδες ΙΟΠ δεν είναι αγκυρωμένες.
- Για να λειτουργήσει η αγκύρωση οφείλει το ΙΟΠ να αποκολληθεί από τη διεπιφάνειά του με το σκυρόδεμα, γεγονός που είχε αναφερθεί από την προηγούμενη διερεύνηση.
- Η χρήση των ΧΙΟΠ αποτελεί εναλλακτικό τρόπο ενίσχυσης χωρίς εμφανή μειονεκτήματα, αντιθέτως χαμηλότερο ποσοστό οπλισμού ΧΙΟΠ έναντι ΑΙΟΠ είχε ως αποτέλεσμα την ίδια φέρουσα διατμητική ικανότητα.



- Στην περίπτωση των ΧΙΟΠ τοπικές αστοχίες του υλικού αποτρέπονται λόγω της σχετικής ευκαμψίας των ινών χάλυβα σε σχέση με αυτή των ΑΙΟΠ, αποτρέποντας με αυτόν τον τρόπο τοπικές συγκεντρώσεις έντασης
- Το ποσοστό εκμετάλλευσης του υλικού αυξάνεται στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται αγκύρωση ανεξαρτήτως του τύπου του υλικού ενίσχυσης, χωρίς να φαίνεται ότι υπάρχει κάποια διαφορά στη μεταξύ τους απόδοση. Η παρατήρηση αυτή είχε γίνει κατά την προηγούμενη διερεύνηση.
- Από τις μετρήσεις των παραμορφώσεων μπορεί να προβλεφθεί αρκετά ικανοποιητικά η φέρουσα ικανότητα σε τέμνουσα των ενισχυμένων ορθογωνικών δοκών με ΑΙΟΠ η οποία αποκλίνει από τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές κατά 6%.
- Οι παραμορφώσεις που έχουν μετρηθεί στις λωρίδες ΙΟΠ κατά την εξέταση της καμπτοδιάτμησης των ορθογωνικών δοκών είναι μικρότερες από αυτές τις προηγούμενης διερεύνησης με τα απλά δοκίμια διατομής πλακοδοκού.
- Η τιμή του ποσοστού εκμετάλλευσης για τα δοκίμια ορθογωνικής διατομής που έχουν λωρίδες ΙΟΠ αγκυρωμένες είναι σχετικά ψηλό (63.5%) αλλά με μικρότερη τιμή από την αντίστοιχη τιμή που προέκυψε από τις αγκυρωμένες λωρίδες ΙΟΠ στα απλά δοκίμια διατομής πλακοδοκού.
- Η μέγιστη τιμή της τέμνουσας που υπολογίστηκε με βάση τις μέγιστες μετρημένες τιμές των παραμορφώσεων των λωρίδων ΙΟΠ υποεκτιμά την αντίστοιχη μετρημένη τιμή σε όλες τις περιπτώσεις από 1% έως 33%.





#### 5.4 Συγκριτικά αποτελέσματα δοκιμών διατομής πλακοδοκού σε ανακυκλιζόμενη σεισμικού τύπου φόρτιση

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων της παρούσας φάσης επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν οι αγκυρώσεις που συμπεριφέρθηκαν καλύτερα κατά την πρώτη φάση ελέγχου δοκιμών απλών τμημάτων διατομής πλακοδοκού. Οι αγκυρώσεις αυτές είναι είτε με χαλύβδινα γωνιακά είτε ο τύπος που αναπτύχθηκε στο ΑΠΘ (δες παράγραφο 3.5.1.). Το υλικό ενίσχυσης είναι από λωρίδες ΧΙΟΠ. Όπως αποδείχθηκε από τις δύο προηγούμενες διερευνήσεις τα ΧΙΟΠ αποτελούν ένα εξίσου αποτελεσματικό υλικό ενίσχυσης συγκρινόμενο με αυτό των ΑΙΟΠ. Επίσης σε αυτή τη πειραματική διερεύνηση, όπως και στην προηγούμενη, οι λωρίδες ΧΙΟΠ έχουν επικολληθεί σε λεία επιφάνεια σκυροδέματος. Ακολουθεί συγκριτικός σχολιασμός των αποτελεσμάτων που έχουν καταγραφεί από τη διεξαγωγή των δοκιμών ανακυκλιζόμενης σεισμικού τύπου φόρτισης σε δοκίμια πλακοδοκού.

Οι δοκιμές σε αυτό τον τύπο ανακυκλιζόμενης φόρτισης είναι οι πιο πολύπλοκες σε σχέση με τις δοκιμές που έχουν προηγηθεί. Τα βασικά συμπεράσματα που έχουν εξαχθεί από τις προηγούμενες διερευνήσεις έχουν ληφθεί υπόψη στην παρούσα διερεύνηση. Για το λόγο αυτό το κύριο υλικό ενίσχυσης σε διάτμηση είναι τα ΧΙΟΠ, τα οποία παρουσιάστηκαν ως εξίσου αποδοτική εναλλακτική λύση υλικού ενίσχυσης.

Στον Πίνακα 5.7 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των 10 δοκιμών που έλαβαν χώρα στην παρούσα φάση της διερεύνησης με τα δοκίμια της πλακοδοκού. Η 1<sup>η</sup> στήλη αναφέρει την κωδική ονομασία του δοκιμίου, ενώ στη 2<sup>η</sup> στήλη απεικονίζεται το είδος της αγκύρωσης που χρησιμοποιήθηκε. Στη 3<sup>η</sup> στήλη παρουσιάζεται το αντίστοιχο μέγιστο φορτίο που έχει καταγραφεί. Στην 4<sup>η</sup> φαίνεται ο αριθμός και το όνομα των ταινιών παραμόρφωσης των λωρίδων που τέμνει η κύρια διατμητική ρηγμάτωση. Συνεχίζοντας στις στήλες 5 και 6 καταγράφονται οι μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων των ταινιών που αναφέρονται στη 4<sup>η</sup> στήλη. Στην 7<sup>η</sup> στήλη υπάρχει η υπολογισμένη τιμή της μέγιστης τέμνουσας σε kN βάση των μέγιστων τιμών των καταγεγραμμένων παραμορφώσεων. Στην 8<sup>η</sup> στήλη απεικονίζεται η υπολογιζόμενη δύναμη  $P_{cal}$  της τέμνουσας η οποία προκύπτει από την άθροιση της διατμητικής συνεισφοράς του σκυροδέματος όπως αυτή καταγράφηκε από το δοκίμιο ελέγχου CTB (37.25kN) συν τις τιμές της 7<sup>ης</sup> στήλης. Τέλος στην 9<sup>η</sup> και τελευταία στήλη παρουσιάζεται ο τρόπος αστοχίας του κάθε δοκιμίου.

Θα αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι οι γραμμές του πίνακα που αναφέρονται σε δοκίμια είναι 11 και όχι 10. Πράγματι το δοκίμιο TB200L1t δεν αστόχησε διατμητικά κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση που του επιβλήθηκε, αλλά αστόχησε πρόωρα στον κόμβο της θεμελίωσής του. Για το λόγο αυτό μειώθηκε το ύψος επιβολής της φόρτισης από το 1,675μ στο 1,15μ. και ξαναφορτίστηκε («νέο» δοκίμιο TB200L1t\*).

Ακολουθεί ο πίνακας 5.7 με τα συγκριτικά αποτελέσματα πλακοδοκών Ο/Σ



Πίνακας 5.7 Συγκριτικά αποτελέσματα πλακοδοκών Ο/Σ

Δοκίμιο	Είδος αγκύρωσης	Max Μετρηθείσα Τέμνουσα Δύναμη Pmax (kN)	Λωρίδες ΧΙΟΠ στο ρήγμα	Παραμόρφωση 1 (μstrain)	Παραμόρφωση 2 (μstrain)	Υπολογισμένη Τέμνουσα από λωρίδες ΧΙΟΠ (kN)	Υπολογισμένη Συνολική Τέμνουσα Pcal (kN)	Μορφή Αστοχίας
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
CTB	-	37.25	0	-	-	0	37.25	Διατμητικό ρήγμα
TB150	καμία	73.2	2 sg4-5	5075	245	26.46	63.71	Αποκόλληση
TB200	καμία	58.3	1 sg5	4010	-	19.94	57.19	Αποκόλληση
TB150 L2t	L-shape 50X5 2 X βίδες 8mm M8.8 διάτρηση πλάκας	106.7	2 sg2-3	5180	5160	51.42	88.67	Διατμητικό ρήγμα και διαρροή διαμήκους οπλισμού
TB200 L1t	L-shape 50X5	91.2	2 sg3-4	7790	3995	58.60	95.85	Κόμβος Θεμελίωσης
TB200 L1t*	1 X βίδα 8mm M8.8 διάτρηση πλάκας	115	2 sg5-6	10035	3330	66.46	103.71	Διατμητικό ρήγμα
TB150 B1b	plate 20X5 1 X βίδα HILTI HUS 6mm	95.5	2 sg3-4	5455	3855	46.30	83.55	Διατμητικό ρήγμα Εξόλκευση βίδας αγκύρωσης (δράση αγκυρίου)
TB200 P2b*	A.Π.Θ. 2 X βίδες HILTI HUS 8mm	120	2 sg1-5	4960	3000	79.17	116.42	Διατμητικό ρήγμα Εξόλκευση αγκύρωσης (δράση βλήτρου)
TB150-R*	A.Π.Θ. 2 X βίδες HILTI HUS 8mm	93.9	3 sg4-5-6	3820	5305 + 2815	59.38	96.63	Διατμητικό ρήγμα Εξόλκευση αγκύρωσης (δράση αγκυρίου)



TB200-R*	Α.Π.Θ. 2 X βίδες HILTI HUS 8mm	78.5	sg2-3	2390	4385	33.69	70.94	Πρώωρη θραύση των ΑΙΟΠ διάτμησης
TB200 P2b-R*	Α.Π.Θ. 2 X βίδες HILTI HUS 8mm	156	sg2-3	7195	7099	86.14	123.39	Διατμητικό ρήγμα Θραύση των ΑΙΟΠ έναντι κάμψης

\* Χαμηλός μοχλοβραχίονας

#### 5.4.1 Φέρουσα ικανότητα σε διάτμηση και μετακινήσεις

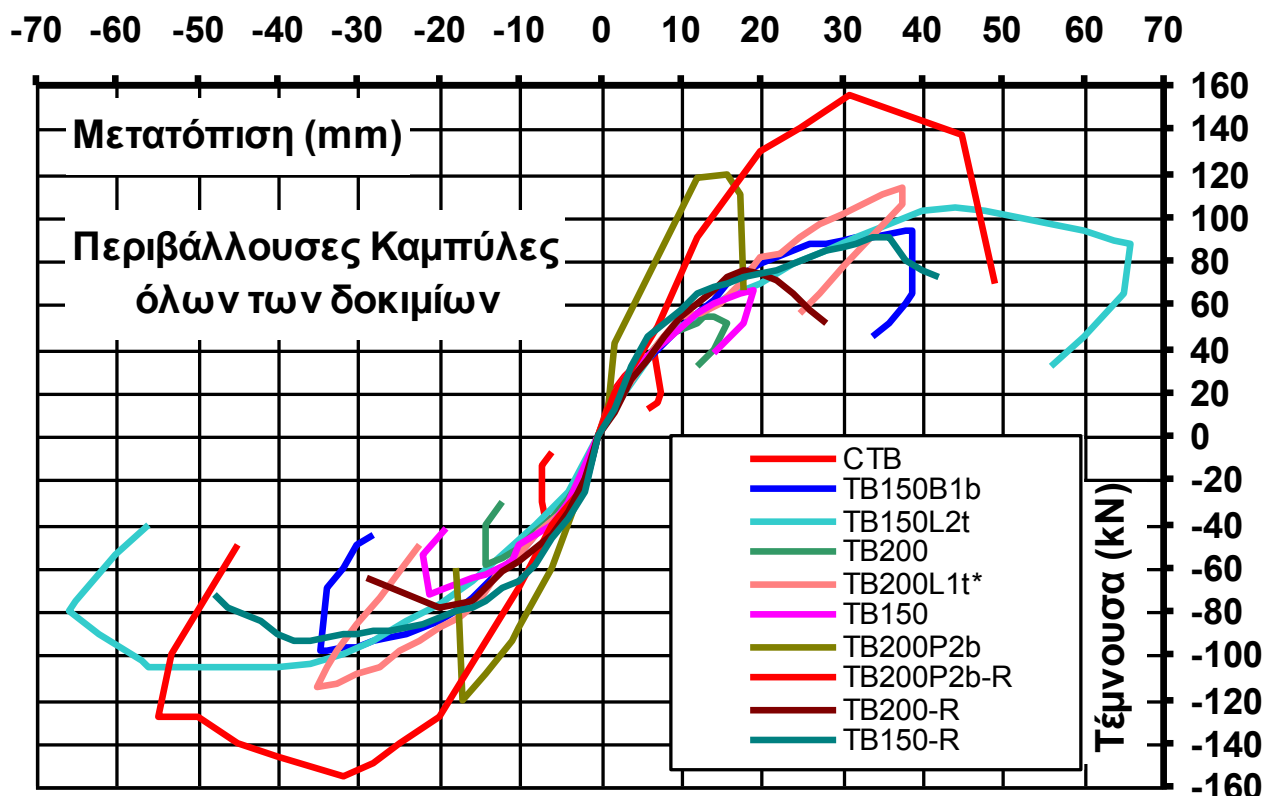
Στην παρούσα υποπαράγραφο 5.4.1 γίνεται σχολιασμός όλων των δοκιμών σε επίπεδο μέγιστης φέρουσας ικανότητας σε τέμνουσα καθώς και μέγιστων επιβαλλόμενων οριζοντίων μετακινήσεων. Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα τέμνουσας δύναμης σε σχέση με την επιβαλλόμενη μετακίνηση για το σύνολο των 7 δοκιμών σε επίπεδο περιβαλλουσών καμπύλων.

Αρχικά το μητρικό δοκίμιο ελέγχου αναπτύσσει μια μέγιστη τέμνουσα, σε ανακυκλιζόμενη σεισμικού τύπου φόρτιση ίση με 37,25kN για επιβαλλόμενη μέγιστη μετακίνηση ίση με 7mm. Θα πρέπει να σχολιαστεί ότι αυτής της τάξης φέρουσα διατμητική ικανότητα ήταν αναμενόμενο να αναπτυχθεί λόγω της προηγούμενης διερεύνησης όπου το αντίστοιχο δοκίμιο ορθογωνικής διατομής αστόχησε σε τέμνουσα 39kN. Συνεχίζοντας η πρώτη απόπειρα ενίσχυσης έλαβε χώρα με χρήση 1 λωρίδας ΧΙΟΠ σε αξονική απόσταση ίση με 150mm, χωρίς την ύπαρξη κάποιας μορφής αγκύρωση (TB150). Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου αυτού είναι ίση με 73,2kN για μετακίνηση ίση με 20mm. Η ποσοστιαία αύξηση σε επίπεδο μέγιστης τέμνουσας, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 5.7 είναι ίση με 96,5%. Στο επόμενο δοκίμιο έγινε προσπάθεια αραιώσης της ενίσχυσης με τοποθέτηση λωρίδων ΧΙΟΠ ανά 200mm (TB200). Στην περίπτωση αυτή μειώθηκε η αναπτυσσόμενη μέγιστη τέμνουσα στα 58,3kN με παράλληλη μείωση της μετακίνησης στα 15mm. Συνεπώς η πύκνωση των λωρίδων ΧΙΟΠ συντελεί, όπως άλλωστε αναμενόταν, στην αύξηση της διατμητικής φέρουσας ικανότητας των πλακοδοκών. Ακολούθησαν οι δοκιμές των δοκιμών όπου τα ΙΟΠ έχουν αγκυρωθεί. Για το δοκίμιο TB150L2t χρησιμοποιήθηκαν πυκνές λωρίδες ΧΙΟΠ με χρήση γωνιακών ελασμάτων σαν αγκύρωση και παράλληλη τοποθέτηση μπουλονιών μέσα από το πάχος της πλάκας. Πρόκειται για μια από τις ισχυρές αγκυρώσεις, όπως αποδείχθηκε στη διερεύνηση των δοκιμών απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ. Το δοκίμιο αυτό έφτασε σε μέγιστη τέμνουσα ίση με 106,7kN, με επιβαλλόμενη μετακίνηση ίση με 66mm. Το ποσοστό ενίσχυσης σε επίπεδο φέρουσας ικανότητας είναι ίσο με 186,4%.

Στο δοκίμιο TB200L1t έγινε χρήση πιο αραιών ΧΙΟΠ με πιο ασθενή αγκύρωση η οποία είναι πιο οικονομική και πιο γρήγορη. Η μέγιστη τέμνουσα αυτού του δοκιμίου είναι ίση με 91,2kN και μέγιστη μετακίνηση ίση με 29,5mm. Ακολούθησε μείωση του ύψους επιβολής της ανακυκλιζόμενης φόρτισης στο 1,15μ με συνέπεια να αυξηθεί περαιτέρω η φέρουσα διατμητική ικανότητα στα 115kN με μέγιστη οριζόντια μετατόπιση 38mm. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η πιο απλή αγκύρωση με μία βίδα βιδωμένη στο πάχος της πλάκας. Το δοκίμιο TB150B1b άγγιξε τα 95,5kN, δηλαδή μειωμένη φέρουσα διατμητική ικανότητα λόγω πρόωρης αστοχίας της αγκύρωσης, με αντίστοιχη επιβαλλόμενη



μετακίνηση ίση με 37mm. Τέλος ελέγχθηκε ένα τελευταίο δοκίμιο το οποίο επιλέχθηκε να ενισχυθεί και καμπτικά με στόχο την ανάπτυξη ακόμη μεγαλύτερης τέμνουσας. Τόσο για την καμπτική ενίσχυση με ΑΙΟΠ όσο και για τη διατμητική ενίσχυση με ΧΙΟΠ (2 λωρίδες) χρησιμοποιήθηκε το σύστημα αγκύρωσης που αναπτύχθηκε στο ΑΠΘ. Το δοκίμιο αυτό (TB200P2b) ξεπέρασε τα 120kN αλλά η μέγιστη μετακίνηση μειώθηκε στα 18mm. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι, και για αυτό το δοκίμιο, ο μοχλοβραχίονας της επιβολής της φόρτισης μειώθηκε από το 1,675m στα 1,15m, για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Εξ αυτού του λόγου αυξήθηκε η δυσκαμψία του δοκιμίου αυτού, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5. Η ποσοστιαία αύξηση της φέρουσας ικανότητας είναι ίση με 222,1% σε σχέση με το μητρικό δοκίμιο CTB.



Σχήμα 5.5 Συγκριτικό Διάγραμμα Περιβαλλουσών καμπύλων τέμνουσας δύναμης – μετακίνησης

#### Επισκευασμένα δοκίμια.

- Η μέγιστη φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου TB150 (λωρίδες ΧΙΟΠ χωρίς αγκύρωση) μετρήθηκε ίση με 73,2 kN ενώ η μέγιστη φέρουσα ικανότητα του επισκευασμένου δοκιμίου TB150-R (λωρίδες ΧΙΟΠ με αγκύρωση) μετρήθηκε ίση με 93,9 kN. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι η αγκύρωση των λωρίδων ΧΙΟΠ που εφαρμόστηκε για το δοκίμιο αυτό αναβάθμισε την διατμητική φέρουσα ικανότητά του κατά 28%.
- Συγκρίνοντας το επισκευασμένο δοκίμιο TB200-R (78,5kN, λωρίδες ΑΙΟΠ με αγκυρώσεις) με αυτή του δοκιμίου TB200 (58,3kN, ΧΙΟΠ χωρίς αγκυρώσεις) προκύπτει μια επαύξηση της φέρουσας ικανότητας λόγω της παρουσίας των αγκυρώσεων της τάξεως 34.6%.
- Το μέγιστο φορτίο που μετρήθηκε για το δοκίμιο δοκίμιο TB200P2b-R (λωρίδες ΧΙΟΠ με βελτιωμένο σύστημα αγκύρωσης) ήταν 156kN έναντι 120kN για το δοκίμιο TB200P2b (λωρίδες ΧΙΟΠ με αρχικό σύστημα αγκύρωσης), μια επαύξηση της τάξεως του 30%. Η επαύξηση αυτή προέκυψε μόνο από την βελτίωση του συστήματος αγκύρωσης.



Με βάση όλα τα ανωτέρω στοιχειοθετείται ο κρίσιμος ρόλος του συστήματος αγκύρωσης των διατμητικών αυτών λωρίδων. Το σύστημα αγκύρωσης που αναπτύχθηκε στο ΕΠΑΥΚ συνετέλεσε στην δυνατότητα αναβάθμισης της διατμητικής φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου της πλακοδοκού από 37kN (χωρίς καθόλου διατμητικό οπλισμό) σε μεγαλύτερο από 156kN, που αποτελεί επαύξηση περίπου 320%.

Τα δοκίμια ορθογωνικής δοκού χωρίς αγκυρώσεις RB150S και RB200S έχουν μέγιστη αντίσταση σε τέμνουσα ίση με 103kN και 94kN αντίστοιχα. Τα ίδια δοκίμια αλλά διατομής πλακοδοκού έδειξαν αντοχή σε τέμνουσα ίση με 73,2kN και 58,3kN αντίστοιχα, φέρουσες ικανότητες που είναι αρκετά πιο χαμηλές. Βέβαια το μήκος αγκύρωσης είναι 18% μεγαλύτερο στην περίπτωση των ορθογωνικών δοκών. Μια άλλη διαφορά είναι το ύψος που αναπτύσσεται η τέμνουσα και το είδος της φόρτισης. Όλα τα παραπάνω οδήγησαν σε αυτή τη διαφορά της φέρουσας ικανότητας μεταξύ των δοκιμίων πλακοδοκού έναντι ορθογωνικών. Σε ότι αφορά στα δοκίμια με αγκυρώσεις στην περίπτωση των δοκιμίων ορθογωνικής δοκού η μέγιστη φέρουσα ικανότητα σε διάτμηση είναι 122kN (δοκίμιο RB200Sa, Πίνακας 5.8.β) ενώ στα δοκίμια διατομής πλακοδοκού η αντίστοιχη τιμή είναι 120kN (δοκίμιο TB200P2b, Πίνακας 5.8.α). Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος τύπος αγκύρωσης, που τελικά αστόχησε και στις δύο περιπτώσεις γεγονός που δίδει έναυσμα για περαιτέρω βελτίωση αυτού του τύπου της αγκύρωσης

Πίνακας 5.8α Ποσοστά αύξησης φέρουσας διατμητικής ικανότητας και συνολικής μετακίνησης δοκιμίων διατομής πλακοδοκού

Δοκίμιο	CTB	TB150	TB200	TB150L2t	TB200L1t	TB200L1t*	TB150B1b	TB200P2b	TB150-R*	TB200-R*	TB200 P2b-R*
Μετρημένη μέγιστη Τέμνουσα (kN)	37,25	73,2	58,3	106,7	91,2	115	95,5	120	93.9	78.5	156
% αύξηση τέμνουσας ως προς CTB	0	96,5	56,5	186,4	144,8	208,9	156,4	222,1	152,1	110,7	318,8
Μετρημένη μέγιστη Μετακίνηση (mm)	7	20	15	66	29,5	38	37	18	40	25	45
% αύξηση μετακίνησης ως προς CTB	0	185,7	114,3	842,9	321,4	442,9	425,6	157,1	471,4	257,1	542,9



Πίνακας 5.8.β Φέρουσα διατμητική ικανότητα των αντίστοιχων δοκιμίων Ο/Σ ορθογωνικής διατομής

<b>Δοκίμιο Ορθογωνικής Διατομής (παράγραφος 5.3)</b>	<b>RB200S</b>	<b>RB200Sa</b>	<b>RB150S</b>	<b>RB150Sa</b>
<b>Τέμνουσα Δύναμη P<sub>max</sub> (kN)</b>	94	122	103	119

#### 5.4.2 Μορφές αστοχίας

Οι μορφές αστοχίας παρουσιάζονται στην τελευταία στήλη του πίνακα 5.7. Το μητρικό δοκίμιο ελέγχου αστόχησε καθαρά διατμητικά δημιουργώντας διαγώνιο ρήγμα στον κορμό της πλακοδοκού. Όπως ήταν αναμενόμενο για τα δύο δοκίμια που δεν είχαν χρήση αγκύρωσης παρατηρήθηκε η αποκόλληση των λωρίδων ΧΙΟΠ από τις παρειές της δοκού. Στην μεν περίπτωση πυκνής χρήσης ΧΙΟΠ το διατμητικό ρήγμα τέμνει 2 λωρίδες ενώ στο αραιό τέμνει μόνο μια λωρίδα. Εξ αυτού του λόγου παρατηρείται και η διαφορά στη φέρουσα ικανότητα. Σε ότι αφορά στα δοκίμια που έκαναν χρήση αγκύρωσης, οι μορφές αστοχίας ποικίλουν.

Το δοκίμιο TB150B1b εμφάνισε αστοχία στην αγκύρωση, μορφή αστοχίας η οποία είχε προβλεφθεί. Σε αυτής της μορφής αγκύρωση η βίδα που έχει απλώς βιδωθεί στο πάχος της πλάκας δουλεύει με δράση αγκυρίου. Η φέρουσα ικανότητα αυτής της δράσης είναι γνωστή τόσο από βιβλιογραφία τόσο και από κανονισμούς.

Τέλος το δοκίμιο TB200P2b εμφάνισε αστοχία στην αγκύρωση. Πιο συγκεκριμένα εξολκεύτηκαν οι βίδες αγκύρωσης από το κορμό της δοκού.

Όπως φαίνεται από τα ανωτέρω, ενώ σε όλα τα δοκίμια εμφανίστηκαν μεγάλου εύρους διατμητικές ρηγματώσεις με ζώνες αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος, λόγω της ανακυκλιζόμενης φύσης της φόρτισης, η διατμητική ενίσχυση, που ελέγχθηκε με τις σχετικά πυκνές ή αραιές λωρίδες ΧΙΟΠ, ήταν ικανή να διατηρήσει την φέρουσα διατμητική ικανότητα των δοκιμίων σε αρκετά υψηλά επίπεδα χωρίς να αστοχήσουν καταλυτικά οι ίδιες οι λωρίδες. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ως πλεονέκτημα των λωρίδων ΧΙΟΠ που σε συνδυασμό με την αγκύρωση των λωρίδων συντελεί στο να μην εξελιχθούν οι διατμητικού τύπου ρηγματώσεις σε απότομες ψαθυρού-τύπου θραύσεις των ΧΙΟΠ και απότομη πτώση της φέρουσας ικανότητας. Επειδή, στις περιπτώσεις αυτές, η τελική αστοχία οφείλεται στην εξόλκευση τμήματος της αγκύρωσης αυτό σηματοδοτεί αφενός περαιτέρω εκμετάλλευση των λωρίδων ΧΙΟΠ μέσω της βελτίωσης της συμπεριφοράς της αγκύρωσης, όπως ήδη σχολιάστηκε, αφετέρου πιθανή περαιτέρω ευκαταία ικανοποιητική συμπεριφορά και παραμορφωσιμότητα των ΧΙΟΠ σε αυξημένες απαιτήσεις τέμνουσας από αυτές που μετρήθηκαν μέχρι τώρα στα πλαίσια των δοκιμίων που ελέγχθηκαν. Δηλαδή, η τιμή της μέγιστης τέμνουσας που μετρήθηκε στα δοκίμια πλακοδοκού (120kN) θα πρέπει να θεωρηθεί ως κάτω όριο για τα ΧΙΟΠ που εξετάστηκαν αφού αναμένεται αύξηση της τιμής αυτής αν γίνει δυνατή η βελτίωση της συμπεριφοράς της αγκύρωσης.



### Επισκευασμένα δοκίμια.

Στη συνέχεια ακολούθησαν οι δοκιμές των επισκευασμένων δοκιμίων. Στο δοκίμιο TB150-R αστόχησε η αγκύρωση των ΧΙΟΠ και πιο συγκεκριμένα η μορφή αστοχίας παρατηρήθηκε στην εξόλκευση των αγκυρίων (βίδες) υπό αξονική καταπόνηση. Η μορφή αυτή αστοχίας σχολιάστηκε και ανωτέρω. Για το δοκίμιο TB200-R επιλέχθηκε η χρήση ΑΙΟΠ. Στο δοκίμιο αυτό αστόχησαν, πρόωρα, οι λωρίδες ΑΙΟΠ στα σημεία των συγκεντρώσεων των τάσεων (γωνίες). Το γεγονός αυτό θα πρέπει να αποδοθεί στην αδυναμία των πολύ δύσκαμπτων ανθρακονημάτων να απορροφήσουν επιτυχώς τοπικές αστοχίες. Τέλος για το δοκίμιο TB200P2b-R παρατηρήθηκε η θραύση των λωρίδων ΑΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκαν για την παραλαβή των καμπτικών εντάσεων ενώ η βελτίωση του συστήματος αγκύρωσης απέτρεψε την εκδήλωση αστοχίας τόσο στο σύστημα αγκύρωσης αυτό καθεαυτό όσο και στις διπλές λωρίδες ΧΙΟΠ που αγκυρώθηκαν μέσω αυτού, παρά το σχετικά μεγάλο επίπεδο έντασης που αναπτύχθηκε στην περιοχή αγκύρωσης εξ αυτού του λόγου.

#### **5.4.3 Σχολιασμός Αναπτυσσόμενων Παραμορφώσεων – Ποσοστό εκμετάλλευσης ΜΕΙ**

Οι αναπτυσσόμενες τάσεις που έχουν καταγραφεί στις ταινίες παραμορφώσεις παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 5.9. Στον πίνακα αυτό υπολογίζεται το ποσοστό εκμετάλλευσης (ΜΕΙ) του ΧΙΟΠ.

Πίνακας 5.9 Αναπτυσσόμενων παραμορφώσεις – Ποσοστό εκμετάλλευσης ΜΕΙ

Δοκίμιο	CTB	TB150	TB200	TB150L2t	TB200L1t	TB200L1t*	TB150B1b	TB200P2b	TB150-R	TB200-R	TB200 P2b-R
<b>Παραμόρφωση 1<sup>ης</sup> ταινίας (μstrain)</b>	-	5075	4010	5180	7790	10035	5455	4960	3820	2390	7195
<b>Παραμόρφωση 2<sup>ης</sup> ταινίας (μstrain)</b>	-	245	-	5160	3995	3330	3855	3000	5305 και 2815	4385	7099
<b>ΜΕΙ</b>	-	0.46	0.36	0.47	0.71	0.91	0.50	0.45	0.48	0.40	0.65

Το ποσοστό αυτό υπολογίζεται διαιρώντας την μέγιστη μετρημένη τιμή των παραμορφώσεων δια της μέγιστης παραμόρφωσης που δίνει ο κατασκευαστής ή έχει μετρηθεί πειραματικά στο εργαστήριο. Πιο συγκεκριμένα οι μέγιστη τιμή παραμόρφωσης είναι κοινή για τα δύο υλικά ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκαν και είναι ίση με 1,1% ή 11000μstrain.

Από τον πίνακα 5.9. φαίνεται ότι τα ποσοστά εκμετάλλευσης είναι μεγαλύτερα στις περιπτώσεις όπου έχει χρησιμοποιηθεί κάποια αγκύρωση. Το γεγονός αυτό έχει αποδειχθεί και στις δύο προηγούμενες διερευνήσεις, των απλών τιμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ και των ορθογωνικών δοκών Ο/Σ (παράγραφοι 5.2. και 5.3). Το μεγαλύτερο ποσοστό ΜΕΙ παρουσιάστηκε για το δοκίμιο TB200L1t\* στο οποίο η τιμή του ΜΕΙ υπολογίστηκε ίση 91%. Το ποσοστό αυτό είναι πολύ υψηλό, αφού πλησιάζει την μέγιστη τιμή παραμόρφωσης του υλικού σύμφωνα με τον κατασκευαστή του, και υποδηλώνει ότι η θραύση των ΧΙΟΠ θα πρέπει να ήταν αναμενόμενη σε περαιτέρω αύξηση της διατημητικής απαίτησης. Το μικρότερο ποσοστό εμφανίστηκε στο δοκίμιο TB200 με συντελεστή ΜΕΙ



ίσο με 36% που αντιστοιχεί σε δοκίμιο με λωρίδες ΧΙΟΠ χωρίς αγκυρώσεις που οδηγήθηκαν σε πρόωρη αποκόλληση, γεγονός που υπογραμμίζει την μεγάλη σημασία της κατάλληλης αγκύρωσης. Η χαμηλή τιμή του ποσοστού εκμετάλλευσης των ΧΙΟΠ για τη δοκό TB200P2b (MEI=45%), όπου οι λωρίδες ΧΙΟΠ έχουν αγκυρώσεις που αστόχησαν, οφείλεται στο ότι στο συγκεκριμένο δοκίμιο χρησιμοποιήθηκαν δύο στρώσεις ΧΙΟΠ έναντι μιας που χρησιμοποιήθηκαν στα υπόλοιπα δοκίμια. Για αυτές τις λωρίδες δύο στρώσεων ΧΙΟΠ η χρησιμοποιούμενη αγκύρωση ήταν προφανώς ανεπαρκής σε σύγκριση με την φέρουσα ικανότητα των δύο στρώσεων και για αυτό και αστόχησε. Επισημαίνεται και πάλι η σημασία της περαιτέρω διερεύνησης της βελτίωσης της συμπεριφοράς της αγκύρωσης ώστε να αυξηθούν κατά το δυνατό οι τιμές του MEI άλλως, εκτός της σχετικά μη μεγάλης επαύξησης της διατμητικής φέρουσας ικανότητας προκύπτει από την εν λόγω αντιμετώπιση και σχετική σπατάλη του υλικού των ΙΟΠ. Αυτό επιτεύχθηκε κυρίως μέσω του επισκευασμένου δοκιμίου TB200P2b-R όπου η τιμή του συντελεστή MEI έγινε ίση με 0.65 σε σύγκριση με την τιμή του συντελεστή MEI του δοκιμίου TB200P2b ίση με 0.45, μια επαύξηση της τάξεως του 45%.

#### 5.4.4 Υπολογισμός της Μέγιστης Τέμνουσας Δύναμης

Στον Πίνακα 5.10 γίνεται η παράθεση των μετρήσεων της μέγιστης τέμνουσας δύναμης κάθε δοκιμίου και ακολουθεί η παράθεση των αποτελεσμάτων της δύναμης που έχει υπολογιστεί από τις καταγραφές των ταινιών παραμόρφωσης, όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.3.4.

Πίνακας 5.10 Σύγκριση μετρημένης και υπολογιζόμενης μέγιστης τέμνουσας

Δοκίμιο	CTB	TB150	TB200	TB150L2t	TB200L1t	TB200L1t*	TB150B1b	TB200P2b	TB150-R	TB200-R	TB200 P2b-R
<b>Μέγιστη Μετρημένη Τέμνουσα Δύναμη <math>P_{ex-max}</math> (kN)</b>	37,25	73,2	58,3	106,7	91,2	115	95,5	120	93,9	78,5	156
<b>Υπολογιζόμενη Τέμνουσα <math>P_{cal}</math> (kN)</b>	-	64.06	57.5	89.36	96.65	103,7	84.17	117.49	96,63	70,94	123,39
<b>Λόγος <math>P_{ex-max}/P_{cal}</math></b>	-	1,14	1,01	1,19	0,94	1,11	1,13	1,02	0,97	1,11	1,26

Για τα δοκίμια TB200P2b και TB200 σημειώνονται αποκλίσεις μόλις 2% ανάμεσα στην μετρημένη και στην προβλεφθείσα τιμή της μέγιστης τέμνουσας. Αντίθετα, για το δοκίμιο TB150L2t οι δύο αυτές τιμές εμφανίζουν απόκλιση 20%. Σε ότι αφορά τις επισκευές η μικρότερη απόκλιση είναι ίση με 3% για το δοκίμιο TB150-R ενώ είναι 26% για το δοκίμιο TB200 P2b-R.

#### 5.4.5 Υστερητική ενέργεια

Από τους βρόχους υστέρησης του κάθε δοκιμίου πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός του συνολικού εμβαδού στο σύνολο των βρόχων υστέρησης που περικλείονται στο διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης.





Το εμβαδόν αυτό αντικατοπτρίζει την απορροφημένη ενέργεια σε μονάδες kNmm ( Joule ). Στον πίνακα 5.11 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές της συνολικής απορροφημένης ενέργειας ανά δοκίμιο καθώς και την σημειούμενη αύξησης σε σχέση με το μητρικό δοκίμιο ελέγχου ως λόγος της σχετικής ενέργειας του κάθε ενισχυμένου διατμητικά δοκιμίου σε σχέση με το αρχικό άοπλο δοκίμιο (CTB). Μια άλλη σύγκριση γίνεται επί τη βάση της ενέργειας που καταναλώθηκε από το δοκίμιο (TB150) που ενισχύθηκε με λωρίδες ΧΙΟΠ που όμως, λόγω της απουσίας αγκυρώσεων αποκολλήθηκαν.

Πίνακας 5.11 Καταναλισκόμενη ενέργεια για κάθε δοκίμιο

	Μητρικό	Χωρίς Αγκυρώσεις		Με αγκυρώσεις							
<b>Καταναλισκόμενη Ενέργεια ( kNmm =joule)</b>	316	801	701	15114*	4361	6271	3862	4569	3975	2256	19785*
<b>λόγος αύξησης ενέργειας ως προς CTB</b>	1	2,53	2,21	47,83	13,80	18,85	12,22	14,46	12,58	7,14	62,61
<b>λόγος αύξησης ενέργειας ως προς TB150</b>	0,376	1	0,875	18.87	5,44	7,83	4,82	5,7	4,96	2,82	24,71

\*Καμπτική μορφή αστοχίας

Από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό ότι η απορρόφηση της ενέργειας αυξάνεται στην περίπτωση χρήσης κάποιας μορφής αγκύρωσης περίπου πέντε φορές από ότι στην περίπτωση της αποκόλλησης των λωρίδων ΧΙΟΠ. Ακόμη και στις περιπτώσεις των επισκευών των δοκιμίων TB150 και TB200, είναι σαφής η αύξηση της ενέργειας που έχει καταναλωθεί, λόγω της ύπαρξης της αγκύρωσης. Στην επισκευή του δοκιμίου TB200Π2b καταναλώνεται η μεγαλύτερη ενέργεια η οποία μάλιστα είναι 62 φορές μεγαλύτερη από το μητρικό δοκίμιο. Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται ότι η επισκευή αυτή περιλαμβάνει και την επισκευή σε κάμψη με τη χρήση ΑΙΟΠ.

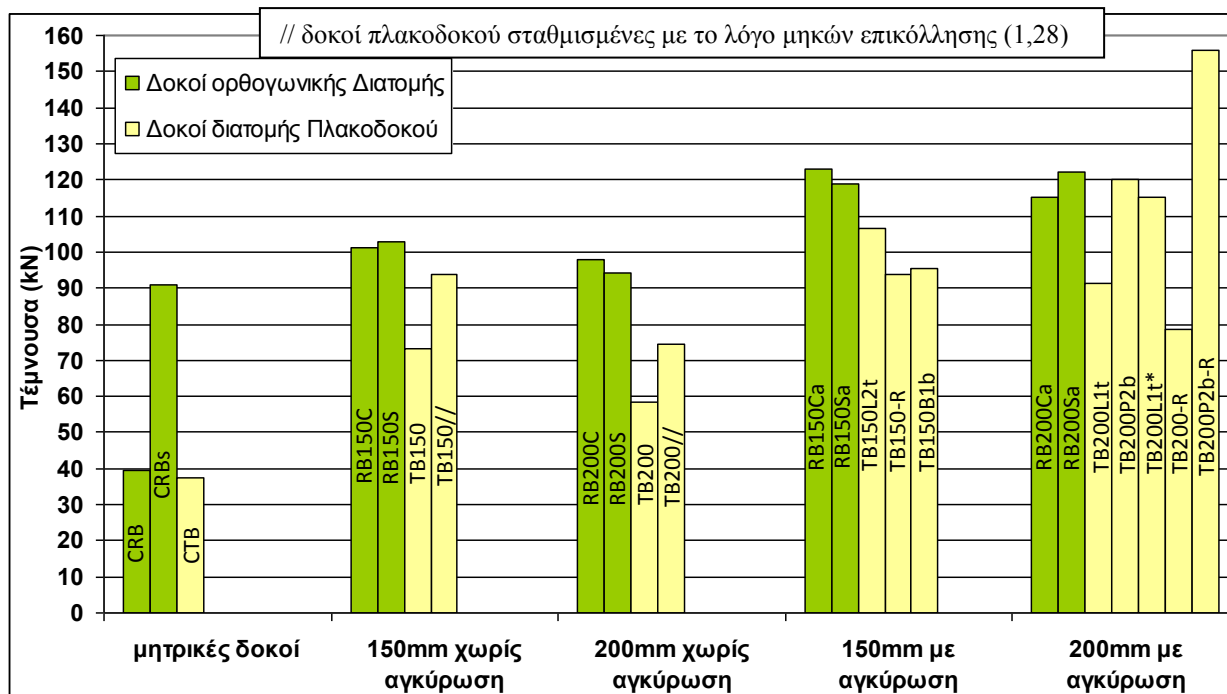
#### 5.4.6 Σύγκριση ορθογωνικών δοκών Ο/Σ σε σχέση με πλακοδοκούς

##### Μέγιστη μετρημένη φέρουσα διατμητική ικανότητα

Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζονται οι μέγιστες διατμητικές φέρουσες ικανότητες όπως μετρήθηκαν είτε μέσω των δοκιμίων ορθογωνικής διατομής σε μονότονη φόρτιση είτε μέσω των δοκιμίων πλακοδοκού σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η σύγκριση αυτή γίνεται για δοκίμια ενισχυμένα με λωρίδες ΧΙΟΠ ή ΑΙΟΠ, με ή χωρίς αγκύρωση. Όπως περιγράφηκε διεξοδικά, οι μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν



και που μπορεί να συσχετισθούν με την διατμητική τους συμπεριφορά και την μετρημένη φέρουσα διατμητική ικανότητα ήταν είτε η αποκόλληση των λωρίδων (απουσία αγκύρωσης) είτε η αστοχία της αγκύρωσης, είτε θραύση των ινών σε κάποιες περιπτώσεις που έγινε χρήση ΑΙΟΠ. Επί τη βάση αυτών των παρατηρήσεων θα γίνει ο σχετικός σχολιασμός.



Σχήμα 5.6 Καταγεγραμμένες διατμητικές φέρουσες ικανότητες των μητρικών δοκιμίων καθώς και των δοκιμίων με χρήση διατμητικής ενίσχυσης ΧΙΟΠ και ΑΙΟΠ τόσο για ορθογωνικές δοκούς όσο και για πλακοδοκούς.

- Η χρήση αγκύρωσης οδηγεί σε αύξηση της φέρουσας ικανότητας για όλα τα δοκίμια είτε πρόκειται για τα δοκίμια ορθογωνικών δοκών είτε για τα δοκίμια των πλακοδοκών, όταν οι μετρημένες τιμές συγκρίνονται με αυτές που αντιστοιχούν σε δοκίμια που απουσιάζει η αγκύρωση και επέρχεται η αποκόλληση των λωρίδων.

- Για τα δοκίμια που δεν υπάρχει αγκύρωση, η αποκόλληση των ΙΟΠ υπαγορεύει την διατμητική τους φέρουσα ικανότητα είτε πρόκειται για τις ορθογωνικές δοκούς είτε για τις πλακοδοκούς, είτε για ΑΙΟΠ, είτε για ΧΙΟΠ. Στην περίπτωση αυτή, η σύγκριση της φέρουσας διατμητικής ικανότητας των δύο τύπων δοκιμίων (ορθογωνικές δοκοί-μονότονη φόρτιση έναντι πλακοδοκών-ανακυκλιζόμενη φόρτιση) οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αποκόλληση οδηγεί τα δοκίμια πλακοδοκού σε μικρότερες φέρουσες διατμητικές ικανότητες (33% κατά μέσο όρο) από ότι τα δοκίμια ορθογωνικής δοκού. Αυτό θα πρέπει να αποδοθεί σε δύο παράγοντες. Ο πρώτος είναι η φύση της φόρτισης ενώ ο δεύτερος είναι η διαφορά του μήκους επικόλλησης των λωρίδων ΧΙΟΠ στους δύο τύπους δοκιμίων. Το μήκος επικόλλησης στα δοκίμια ορθογωνικής δοκού είναι 360mm ενώ στα δοκίμια πλακοδοκού είναι 280mm.

- Όταν οι λωρίδες ΧΙΟΠ είναι αγκυρωμένες, η διαφορά στην φέρουσα ικανότητα ανάμεσα στα δοκίμια ορθογωνικής δοκού και δοκίμια πλακοδοκού μειώνεται, γεγονός που υποδεικνύει ότι η παρουσία της αγκύρωσης ακυρώνει προφανώς την επιρροή του μήκους επικόλλησης και πιθανώς την επιρροή του είδους της φόρτισης.



- Το προηγούμενο σκεπτικό θα μπορούσε να επεκταθεί χωρίς περαιτέρω σχολιασμό αναφορικά με την επιρροή της φύσης της φόρτισης και στην περίπτωση των δοκιμών χωρίς αγκύρωση. Αντ' αυτού ακολουθείται ο εξής χειρισμός. Οι τιμές της φέρουσας διατμητικής ικανότητας των δοκιμών πλακοδοκών πολλαπλασιάζονται με το αντίστροφο των σχετικών μηκών επικόλλησης ( $360/280=1.28$ ), ώστε να σταθμισθεί η φέρουσα διατμητική ικανότητα των δύο τύπων δοκιμών ως προς αυτόν τον παράγοντα (μήκος επικόλλησης). Οι σχετικές τιμές είναι επίσης καταχωρημένες στο ίδιο διάγραμμα του σχήματος 5.6. με το συμβολισμό //. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6. με αυτή την στάθμιση ανακτάται ένα μέρος μόνο της διαφοράς ανάμεσα στα δοκίμια ορθογωνικής διατομής και σε αυτά της πλακοδοκού ενώ ένα άλλο μέρος της διαφοράς παραμένει (15%), γεγονός που υποδηλώνει ότι αυτό το μέρος της μείωσης της μετρημένης διατμητικής φέρουσας ικανότητας που παρατηρείται στα δοκίμια πλακοδοκού σε σύγκριση με τα δοκίμια της ορθογωνικής δοκού θα πρέπει να αποδοθεί στην ανακυκλιζόμενη φύση της φόρτισης. Όπως ήδη σχολιάστηκε η επιρροή του τύπου της φόρτισης παύει να έχει μετρίσιμη επιρροή με την παρουσία των αγκυρώσεων.

- Η πύκνωση των λωρίδων ΧΙΟΠ φαίνεται να έχει ένα μέρος από το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα όταν δεν υπάρχουν αγκυρώσεις ενώ το αντίθετο από το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα για τα δοκίμια με αγκυρώσεις. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να αποδοθεί στο ότι με την παρουσία αγκυρώσεων και την αστοχία τους, όπως έγινε στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν η φέρουσα ικανότητα υπαγορεύεται από την συμπεριφορά των αγκυρώσεων και όχι την πύκνωση των λωρίδων ΧΙΟΠ.



#### 5.4.7 Εκτίμηση της συμπεριφοράς των χρησιμοποιηθέντων συστημάτων αγκύρωσης

Το βασικό σκεπτικό που διέπει ένα σύστημα αγκύρωσης περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση

$$V_{jd} < V_{αγκ} \quad (5.7)$$

Όπου  $V_{jd}$  είναι η τέμνουσα όπως προκύπτει για την δοκό από την συνεισφορά των λωρίδων ΙΟΠ (βλ. Κεφάλαιο 6) και υπολογίζεται από σχέσεις που δίδονται από διάφορους σχετικούς κανονισμούς.

Και  $V_{αγκ}$  είναι η αντίστοιχη τέμνουσα που μπορεί να παραλάβει το σύστημα αγκύρωσης των λωρίδων ΙΟΠ. Η τιμή αυτή για το σύστημα αγκύρωσης περιλαμβάνει στον υπολογισμό της, τους επί μέρους συντελεστές ασφάλειας για να αποτραπεί η αδρανοποίηση της αγκύρωσης από τυχόν αστοχία ενός ή περισσοτέρων από τα τμήματα που την αποτελούν, όπως θα περιγραφεί συνοπτικά κατωτέρω.

Το βασικό σύστημα αγκύρωσης που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος είχε αρχικά αναπτυχθεί και εξελιχθεί, ως προς τις δυνατότητές του και τις παραλλαγές της μορφολογίας του, σε προηγούμενη ερευνητική δραστηριότητα του εργαστηρίου Πειραματικής Αντοχής των Υλικών και των Κατασκευών του Α.Π.Θ. Αυτό το σύστημα αγκύρωσης διέπεται από την Patent No WO2011073696 [57]. Επιπρόσθετα, η διαστασιολόγηση των αγκυρώσεων και εν γένει οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες της διατμητικής ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψε από την χρήση ειδικού λογισμικού που αποτελεί τμήμα του ήδη ανεπτυγμένου και πατενταρισμένου συστήματος αγκυρώσεως που προαναφέρθηκε. Το εν λόγω λογισμικό, ακολουθεί την ανίσωση (5.7) που διατυπώθηκε ανωτέρω και λαμβάνει υπόψη του τα εξής πιθανά σενάρια:

- Διαρροή και θραύση των χαλύβδινων στοιχείων των αγκυρώσεων (λάμα, γωνιακό, πύρος). Είναι μη επιθυμητός τρόπος αστοχίας. Αποφεύγεται μέσω επιλογής κατάλληλων γεωμετρικών διαστάσεων.
- Ολίσθηση του ΙΟΠ. Επίσης μη επιθυμητός τρόπος αστοχίας. Αποφεύγεται με κατάλληλο μήκος επικόλλησης στο κάτω μέρος της πλάκας του ορόφου. Δεν υφίσταται αυτός ο τρόπος αστοχίας στην αγκύρωση του Α.Π.Θ.
- Αστοχία βίδας ή ντίζας. Μέσω αυτών επιτυγχάνεται η μεταφορά των δυνάμεων από τα ΙΟΠ στο δομικό στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα. Είναι μη επιθυμητός, κατά περίπτωση, τρόπος αστοχίας και έχει τα ακόλουθα επί-μέρους σενάρια αστοχίας:
  - Αστοχία σε δράση αγκυρίου
    - Απόσχιση ή διάρρηξη σκυροδέματος
    - Ολίσθηση ή εξόλκευση αγκυρίου
    - Διαρροή του υλικού
  - Αστοχία σε δράση βλήτρου
    - Αστοχία χάλυβα σε διάτμηση (διαρροή βίδας)
    - Αστοχία σκυροδέματος λόγω πλευρικής πίεσης
    - Αστοχία σκυροδέματος με τη μορφή απόσχισης ενός πλευρικού κώνου λόγω μικρών αποστάσεων από τα όρια του στοιχείου αγκύρωσης
- Θραύση του ΙΟΠ. Επιθυμητός τρόπος αστοχίας οδηγεί σε πλήρη εκμετάλλευση του ΙΟΠ.

Συνοψίζοντας μπορούν να αναφερθούν τα παρακάτω αναφορικά με την εκτίμηση της συμπεριφοράς των χρησιμοποιηθέντων συστημάτων αγκύρωσης:

1. Για ένα αποτελεσματικό σύστημα αγκύρωσης η τελική μορφή αστοχίας είναι η θραύση των λωρίδων ΙΟΠ που αγκυρώνονται μέσω αυτού στο στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος. Με ένα τέτοιο αποτελεσματικό σύστημα αγκύρωσης έχουν εφαρμογή οι διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ.



σχετικά με τη διαστασιολόγηση των ΙΟΠ που προβλέπουν ότι η αστοχία οδηγείται σε θραύση των ινών των ΙΟΠ.

2. Ένα τέτοιο αποτελεσματικό σύστημα αγκύρωσης θα πρέπει να διαστασιολογηθεί ως προς τα επί μέρους στοιχεία του ώστε όλες οι μορφές αστοχίας των επί μέρους στοιχείων του να έπονται αυτής των ινών των λωρίδων ΙΟΠ.
3. Μορφές αστοχίας των επί μέρους στοιχείων του αποτελεσματικού συστήματος αγκύρωσης του Α.Π.Θ. που χρησιμοποιήθηκε παραπέμπουν στις δράσεις βλήτρου ή αγκυρίου και ως τέτοιοι αντιμετωπίζονται από σχετικό λογισμικό.
4. Η κατασκευαστική λεπτομέρεια που περιλαμβάνεται στο αποτελεσματικό σύστημα αγκύρωσης του Α.Π.Θ. που χρησιμοποιήθηκε είναι απαγορευτικό για την εκδήλωση του σεναρίου της ολίσθησής της λωρίδας ΙΟΠ στην περιοχή της αγκύρωσης.

Με βάση τα ανωτέρω μπορεί να υποστηριχθεί ότι η αγκύρωση που αναπτύχθηκε στο Α.Π.Θ. ικανοποιεί πλήρως την ανισότητα (5.7). Το αποτελεσματικό αυτό σύστημα αγκύρωσης χρησιμοποιήθηκε στο δοκίμιο TB200P2b-R (δες παράγραφο 4.4), όπου τόσο οι λωρίδες ΑΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκαν μαζί με την σχετική αγκύρωση για την ενίσχυση της καμπτικής συμπεριφοράς όσο και οι λωρίδες ΧΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκαν μαζί με την σχετική αγκύρωση για την ενίσχυση της διατμητικής συμπεριφοράς απέτρεψαν τα διάφορα ανεπιθύμητα σενάρια αστοχίας με την τελική αστοχία να εκδηλώνεται με την θραύση των ινών λωρίδων του ΑΙΟΠ που ήταν επικολημένες στο κάτω πέλαμα της δοκού από δυνάμεις που αναπτύχθηκαν εκ της καμπτικής λειτουργίας της δοκού. Αυτό ήταν και το επιθυμητό σενάριο για την σύνθετη αυτή ενίσχυση στο εν λόγω δοκίμιο.



#### 5.4.8 Συμπεράσματα

- Η αστοχία πλακοδοκών Ο/Σ ενισχυμένων με ΧΙΟΠ χωρίς να γίνει χρήση αγκύρωσης υποβαλλόμενων σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση υπαγορεύεται από την αποκόλληση των ΧΙΟΠ από το σκυρόδεμα για τιμές μέγιστων μετρημένων μέσων τιμών παραμόρφωσης στις λωρίδες των ΧΙΟΠ της τάξεως των 4500μstrain.
- Όσο πιο πυκνές είναι οι λωρίδες τόσο πιο αυξημένη φέρουσα ικανότητα σε τέμνουσα παρατηρείται στην περίπτωση μη χρήσης αγκύρωσης.
- Η παρουσία της αγκύρωσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της φέρουσας διατμητικής ικανότητας μέχρι και δύο φορές την φέρουσα ικανότητα του αντίστοιχου δοκιμίου χωρίς αγκύρωση.
- Η τιμή του συντελεστού εκμετάλλευσης του υλικού (ΜΕΙ) με την παρουσία της αγκύρωσης που είναι κατάλληλα σχεδιασμένη μπορεί να φτάσει σε σημαντικά υψηλές τιμές (91%).
- Ενώ σε όλα τα δοκίμια εμφανίστηκαν μεγάλου εύρους διατμητικές ρηγματώσεις με ζώνες αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος, λόγω της ανακυκλιζόμενης φύσης της φόρτισης, η διατμητική ενίσχυση, που ελέγχθηκε με τις σχετικά πυκνές ή αραιές λωρίδες ΧΙΟΠ, ήταν ικανή να διατηρήσει την φέρουσα διατμητική ικανότητα των δοκιμίων σε αρκετά υψηλά επίπεδα χωρίς να αστοχήσουν καταλυτικά οι ίδιες οι λωρίδες. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ως πλεονέκτημα των λωρίδων ΧΙΟΠ που σε συνδυασμό με την αγκύρωση των λωρίδων συντελεί στο να μην εξελιχθούν οι διατμητικού τύπου ρηγματώσεις σε απότομες ψαθυρού-τύπου θραύσεις των ΧΙΟΠ και απότομη πτώση της φέρουσας ικανότητας.
- Σε πολλές περιπτώσεις η τελική αστοχία οφείλεται στην εξόλκευση τμήματος της αγκύρωσης . Αυτό σηματοδοτεί αφενός περαιτέρω εκμετάλλευση των λωρίδων ΧΙΟΠ μέσω της βελτίωσης της συμπεριφοράς της αγκύρωσης.
- Η απορρόφηση της ενέργειας αυξάνεται στην περίπτωση χρήσης κάποιας μορφής αγκύρωσης περίπου πέντε φορές από ότι στην περίπτωση της αποκόλλησης των λωρίδων ΧΙΟΠ.
- Ένα μέρος της μείωσης της μετρημένης διατμητικής φέρουσας ικανότητας που παρατηρείται στα δοκίμια πλακοδοκού σε σύγκριση με τα δοκίμια της ορθογωνικής δοκού, χωρίς την παρουσία αγκυρώσεων, θα πρέπει να αποδοθεί στην ανακυκλιζόμενη φύση της φόρτισης. Η παρουσία αγκυρώσεων φαίνεται να αποτρέπει αυτή την επιρροή της φύσης της φόρτισης. Το φαινόμενο αυτό χρήζει περαιτέρω διερεύνησης
- Με βάση την συμπεριφορά όλων των δοκιμίων της παρούσης διερεύνησης με χρήση ΧΙΟΠ μπορεί να τεκμηριωθεί ότι οι λωρίδες ΧΙΟΠ που χρησιμοποιήθηκαν απετέλεσαν αξιόπιστη εναλλακτική λύση χρήσης υλικού ενίσχυσης με κατασκευαστικά πλεονεκτήματα. Επιπρόσθετα, επί τη βάση της μετρημένης συμπεριφορά σε όρους βελτίωσης της διατμητικής φέρουσας ικανότητας φερόντων στοιχείων διατομής πλακοδοκού αποδεικνύεται ότι μπορεί να εκπληρώσουν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό τέτοιο στόχο εφόσον συνδυαστούν είτε με το απαιτούμενο μήκος επικόλλησης είτε, και προτιμότερο, με την κατάλληλη αγκύρωση.

Τα κατωτέρω σχόλια αφορούν την επαύξηση της φέρουσας διατμητικής ικανότητας που επιτεύχθηκε στα επισκευασμένα δοκίμια λόγω του συστήματος αγκύρωσης των λωρίδων ΧΙΟΠ – ΑΙΟΠ.

- Λόγω της παρουσίας απλών τύπων αγκύρωσης έναντι της απλής επικόλλησης προέκυψε επαύξηση της φέρουσας διατμητικής ικανότητας των δοκιμίων περίπου της τάξεως του 30%.
- Βελτίωση του τρόπου αγκύρωσης και χρησιμοποίησή της εκ νέου σε διατμητική επισκευή δοκιμίου που είχε ήδη υποστεί σημαντική διατμητική καταπόνηση έδωσε νέα επαύξηση στη φέρουσα διατμητική ικανότητα της τάξεως του 30%



Με βάση όλα τα ανωτέρω στοιχειοθετείται ο κρίσιμος ρόλος του συστήματος αγκύρωσης των διατμητικών αυτών λωρίδων. Το σύστημα αγκύρωσης που αναπτύχθηκε στο ΕΠΑΥΚ ικανοποιεί πλήρως την ανισότητα (5.7). Μέσω αυτού του συστήματος αγκύρωσης έγινε δυνατή η αναβάθμιση της διατμητικής φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου της πλακοδοκού από 37KN (χωρίς καθόλου διατμητικό οπλισμό) σε μεγαλύτερο από 156KN, που αποτελεί επαύξηση περίπου 320%.



## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> – Ανάλυση αναλυτικών μοντέλων και κανονισμών

### 6.1 Παρουσίαση αναλυτικών μοντέλων

Σε όλους τους κανονισμούς και αναλυτικά μοντέλα που αναφέρονται στη βιβλιογραφία η συνεισφορά των εξωτερικά επικολημένων ΙΟΠ προστίθεται στη διατμητική αντοχή του σκυροδέματος και μεταλλικών συμβατικών συνδετήρων. Η προστιθέμενη διατμητική αντοχή των ΙΟΠ σε όλες τις προαναφερόμενες περιπτώσεις υπολογίζεται μέσω μιας σχέσης ανάλογης αυτής που χρησιμοποιείται για τους χαλύβδινους συνδετήρες.

Τα πρώτα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση και σχεδιασμό αυτής της διατμητικής ενίσχυσης βασίζονται στη γενική αρχή ότι η δυσκαμψία των ινοπλισμένων πολυμερών σε συνάρτηση με το ποσοστό τους παίζει το σημαντικότερο ρόλο στη συμπεριφορά του ενισχυμένου δομικού στοιχείου. Πιο συγκεκριμένα, τα πρώτα μοντέλα των Τριανταφύλλου και Khalifa [49, 59] καθώς και ο κανονισμός του ACI βασίζεται στο ότι η σημαντικότερη παράμετρος που επηρεάζει τη διατμητική συνεισφορά των εξωτερικά επικολημένων ΙΟΠ είναι το ποσοστό οπλισμού των ΙΟΠ  $\rho_f$ . Όπου:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot w_f}{b_w \cdot s_f} \quad (12.1)$$

Τα πρώτα μοντέλα των Τριανταφύλλου και Khalifa, στα οποία βασίστηκε ο κανονισμός ACI-440 υποστήριξαν ότι το γινόμενο  $\rho_f E_f$  θα πρέπει να είναι το βασικότερο στοιχείο στον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής που παρέχει η εξωτερικά επικολημένη ενίσχυση ΙΟΠ.

Στα μοντέλα αυτά βασίστηκαν και οι (Pereira et al., 2009) και πρότειναν την ακόλουθη αναλυτική σχέση για τον υπολογισμό του  $V_f$ .

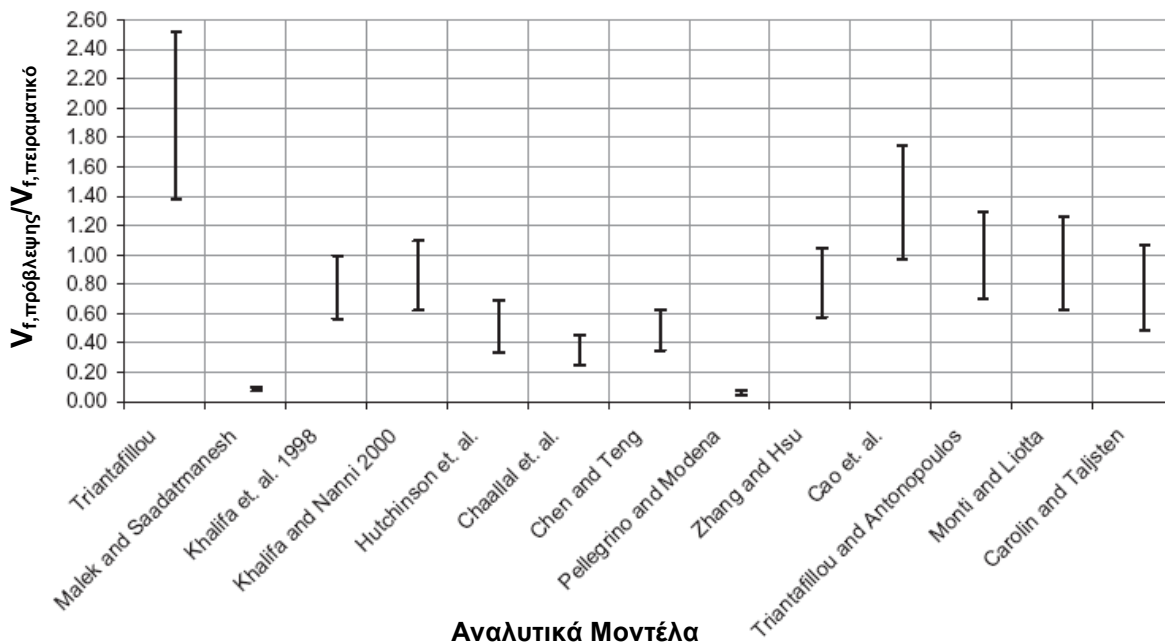
$$V_f = c_1 \cdot \rho_f^{c_2} \cdot n \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,e} \cdot (\cos \beta + \sin \beta) \cdot d_f \cdot b_w \quad (12.2)$$

και χρησιμοποιώντας μια βάση πειραματικών δεδομένων υπέδειξαν ως τιμές των  $c_1$  και  $c_2$  τις τιμές 4,44 και 1,11 αντίστοιχα. Έτσι η παραπάνω εξίσωση παίρνει τελικά τη μορφή:

$$V_f = 4,44 \cdot \rho_f^{1,11} \cdot n \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,e} \cdot (\cos \beta + \sin \beta) \cdot d_f \cdot b_w \quad (12.3)$$

Η εξίσωση (12.3) σύμφωνα με τους Pereira et al. (2009) παρέχει τη μικρότερη απόκλιση σε σχέση με τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα.





Σχήμα 6.1. Διακύμανση σφάλματος για προβλεπόμενες προς πειραματικές τιμές  $V_f$  (από [58])

Σε γενικές γραμμές υπάρχουν δυο τύποι μοντέλων / αναλυτικών σχέσεων. Αυτές που βασίζονται στη μέγιστη ενεργή παραμόρφωση των ΙΟΠ και αυτές που βασίζονται σε μια ανομοιόμορφη κατανομή τάσεων/παραμορφώσεων κατά μήκος των επικολλημένων λωρίδων ΙΟΠ. Οι Belrabi et al. [58] συνέκριναν τα πειραματικά αποτελέσματα από περισσότερα από 200 δοκίμια με προβλέψεις από διάφορα αναλυτικά μοντέλα και συμπέραναν ότι μικρότερες αποκλίσεις προσφέρουν τα αναλυτικά μοντέλα που θέτουν κάποια μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή ενεργής παραμόρφωσης για τις διατμητικές λωρίδες ΙΟΠ.

Αξίζει να αναφερθεί ότι όλα τα μοντέλα αναφέρονται σε δυο μορφές αστοχίας. Αυτή της θραύσης των ινών και αυτή της αποκόλλησης τους από το σκυρόδεμα.

Σύμφωνα με ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα αναλυτικά μοντέλα φαίνεται ότι τα μοντέλα των Zhang and Hsu [60], Monti and Liotta [61], Khalifa and Nanni [35] και Carolin and Taljsten [62] δίνουν τις μικρότερες αποκλίσεις αποτελεσμάτων σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας (βλ. Σχήμα 6.1). Το μοντέλο των Chen and Teng [63] στο οποίο βασίζεται το μοντέλο αποκόλλησης των διατάξεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. φαίνεται να υποτιμά την αντοχή των ΙΟΠ. Πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι οι εξισώσεις που δίνονται από τους Chen and Teng δίνουν αντοχές κατά περίπου 20% χαμηλότερες του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Συνεπώς στο Σχήμα 6.1 οι τιμές του θα κυμαινόταν μεταξύ του 0,42 και 0,78. Βάση αυτού του σχολίου μπορεί κανείς να ισχυριστεί ότι το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζονται οι διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι ως οφείλει συντηρητικό.

Το μοντέλο των Zhang and Hsu [60] βασίζεται σε ένα παλιότερο μοντέλο των Khalifa and Nanni [44] το οποίο προτείνει τη χρήση τροποποιημένης ενεργής παραμόρφωσης, τόσο για θραύση όσο και για αποκόλληση.



Η διατμητική αντοχή των ΙΟΠ δίνεται από τη σχέση:

$$V_{frp} = \frac{A_{frp} f_{frp,e} (\sin \beta + \cos \beta) d_{frp}}{S_{frp}} \quad (12.4)$$

Χρησιμοποιώντας τα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα η ακόλουθη σχέση που σχετίζεται με το λόγο ενεργής προς μέγιστης τάσης / παραμόρφωσης:

$$R = \frac{f_{frp,e}}{f_{frp}} = \frac{\varepsilon_{frp,e}}{\varepsilon_{frp}} = 1.8589 \cdot \left( \frac{\rho_{frp} E_{frp}}{f_c} \right)^{-0.7488} \quad (12.5)$$

$$R = \frac{f_{frp,e}}{f_{frp}} = \frac{\tau_{max} L_e}{2t_{frp} f_{frp,u}} \leq 1 \quad (12.6)$$

Όπου

$$\tau_{max} = (7,64 f_c^2 \times 10^{-4}) - (2,73 f_c \times 10^{-2}) + 6,38 \quad (12.7)$$

Οι προτάσεις των Zhang and Hsu [60] περιλαμβάνουν ουσιαστικά ένα διαφορετικό τρόπο υπολογισμού του συντελεστή R που σχετίζεται με την απόδοση του υλικού.

Επιπρόσθετα, η ανάλυση των υπάρχοντων πειραματικών δεδομένων οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η δυσκαμψία των ΙΟΠ σχετίζεται και με τον τρόπο αστοχίας τους. Πιο συγκεκριμένα όταν το γινόμενο ( $E_{frp} \rho_{frp}$ ) είναι μικρότερο των 0,55Gpa τότε η αστοχία επέρχεται μετά από θραύση των ΙΟΠ ενώ αν είναι μεγαλύτερο τότε η αστοχία επέρχεται μετά από αποκόλληση των ΙΟΠ από το σκυρόδεμα.

Χαρακτηριστικό είναι ότι σε κανένα μοντέλο δεν γίνεται συγκεκριμένη αναφορά σε χρήση μηχανικών αγκυρίων, τα οποία αποδεδειγμένα προσφέρουν μεγάλα οφέλη στη διατμητική ενίσχυση με ΙΟΠ. Οι περισσότεροι κανονισμοί και αναλυτικά μοντέλα θεωρούν ότι στην περίπτωση που έχουμε πλήρη περιτύλιξη της δοκού με ΙΟΠ ή όταν χρησιμοποιηθούν αγκύρια στη θλιβόμενη ζώνη της δοκού τότε η αστοχία θα επέλθει με θραύση των ΙΟΠ. Επιπρόσθετα υποστηρίζεται ότι το ποσοστό των υπάρχοντων μεταλλικών συνδετήρων παίζει πιθανώς σημαντικό ρόλο και θα έπρεπε να συνυπολογιστεί στα αναλυτικά μοντέλα [64]. Οι Mofidi and Challal [64] προτείνουν τη χρήση του συντελεστή  $\beta_c$  ο οποίος υπολογίζεται ως:

$$\beta_c = \frac{w_{fe}}{d_f} = \frac{0,6}{\sqrt{\rho_f E_f + \rho_s E_s}} \quad (12.8)$$

Στην περίπτωση που έχουμε επικόλληση τύπου U. Ενώ όταν τα ΙΟΠ είναι επικολλημένα μόνο πλευρικά λαμβάνει την τιμή:



$$\beta_c = \frac{w_{fe}}{d_f} = \frac{0,43}{\sqrt{\rho_f E_f + \rho_s E_s}} \quad (12.9)$$

Το  $w_{fe}$  θεωρείται το ενεργό πλάτος της λωρίδας των ΙΟΠ. Πιο συγκεκριμένα υποστηρίζεται ότι δε λειτουργεί όλο το πλάτος των λωρίδων αλλά μόνο ένα τμήμα του πλάτους. Το πόσο θα είναι αυτό το πλάτος εξαρτάται από την δυσκαμψία των ΙΟΠ καθώς και από την δυσκαμψία του συμβατικού διατμητικού οπλισμού.

Έτσι προτείνεται σαν σχέση σχεδιασμού η ακόλουθη:

$$\varepsilon_{fe} = \frac{\beta_c \cdot \beta_L \cdot \beta_w \cdot \tau_{eff} \cdot L_e}{t_f \cdot E_f} \quad (12.10)$$

$$V_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot w_f \cdot \varepsilon_{fe} \cdot E_f (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \cdot d_f}{s_f} = \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fe} \cdot b \cdot d_f \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad (12.11)$$

## 6.2 Σχεδιασμός Εξωτερικά επικολημένης ενίσχυσης ΙΟΠ βάση των διατάξεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Η μέθοδος σχεδιασμού που προτείνεται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. βασίζεται στο σκεπτικό ότι η κατανομή των τάσεων κατά μήκος της λωρίδας ενίσχυσης δεν είναι ομοιόμορφη και ακολουθεί το σκεπτικό που εκφράζεται στο αναλυτικό μοντέλο των Chen and Teng [63].

Δίνονται δυο μορφές αστοχίας ανάλογα με τη μορφή επικόλλησης. Αυτή της θραύσης των ΙΟΠ και αυτή της αποκόλλησης. Στην περίπτωση θραύσης των ινών τίθεται ένα όριο παραμόρφωσης  $\varepsilon_{jmax}=0,015$ , ενώ στην περίπτωση αποκόλλησης των ινών δε χρησιμοποιούνται μέγιστες επιτρεπόμενες παραμορφώσεις των ΙΟΠ, αλλά μειωτικοί συντελεστές ασφαλείας για τις επιτρεπόμενες τάσεις στα ΙΟΠ.

Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση της θραύσης των ΙΟΠ η μέγιστη τάση μειώνεται πολλαπλασιάζοντας την τιμή που δίνει ο κατασκευαστής με το συντελεστή  $k_v=0,5$  και διαιρώντας το αποτέλεσμα με το συντελεστή  $\gamma_m=1,2$ . Όπως προαναφέρθηκε ο κανονισμός επιβάλλει μια μέγιστη τιμή παραμόρφωσης ίση με 1,5%, η οποία χρησιμοποιώντας το  $k_v=0,5$  και το  $\gamma_m=1,2$  ισοδυναμεί με μια μέγιστη ενεργή παραμόρφωση ίση με 0,625%. Η παραμόρφωση αυτή είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με τις αντίστοιχες μέγιστες παραμορφώσεις που λαμβάνονται από τους υπόλοιπους κανονισμούς (π.χ. 0,4% στον ACI).

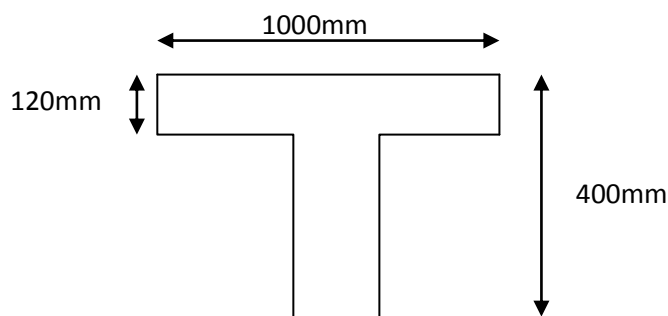
Στην περίπτωση αποκόλλησης η μέγιστη τάση των ΙΟΠ υπολογίζεται σαφώς μειωμένη σε σχέση με την τιμή που δίνει ο κατασκευαστής ή υπολογίζεται πειραματικά (από πειράματα απλών τμημάτων διατομών πλακοδοκού Ο/Σ). Για τον υπολογισμό της μέγιστης τάσης λαμβάνεται υπόψη το μήκος αγκύρωσης των ΙΟΠ, η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ΙΟΠ.



Ο τρόπος υπολογισμού της αποκόλλησης των ΙΟΠ που περιλαμβάνεται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. βασίζεται σε ένα αναλυτικό μοντέλο το οποίο συμπεριλαμβάνει την επίδραση όλων σχεδόν των παραγόντων που επηρεάζουν την αντοχή της διατμητικής ενίσχυσης.

Αν θεωρήσουμε το παράδειγμα μιας πλακοδοκού με διαστάσεις που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (6.2) και θεωρώντας ότι οι ιδιότητες των ΙΟΠ είναι οι ακόλουθες:

$f_{ck}=20\text{MPa}$ ,  $e_{fu}=0.018$   $E_f=230\text{GPa}$ ,  $d=360\text{mm}$ ,  $t_f=0,15\text{mm}$   $b_f=100\text{mm}$  και  $s_f=150\text{mm}$



Σχήμα 6.2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πλακοδοκού.

(α) Στην περίπτωση θραύσης των ινών έχουμε:

$$\varepsilon_{j,crit} = k_v \varepsilon_{j,max} = \frac{1}{2} \cdot 0,015 = 0,0075 \quad (12.12)$$

$$f_{jk} = E_j \varepsilon_{j,crit} = 230000 \cdot 0,0075 = 1725\text{MPa} \quad (12.13)$$

$$\sigma_{jd} = \frac{1}{\gamma_m} \cdot f_{jk} = \frac{1}{1,2} \cdot 1725 = 1437,5\text{MPa} \quad (12.14)$$

$$V_{jd} = \sigma_{jd} \rho_j b_w h_{j,ef} = \frac{2A_j}{s_j} h_{j,ef} \sigma_{jd} = \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 100}{150} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot 360\right) \cdot 1437,5 = 69\text{kN} \quad (12.15)$$

(β) Στην περίπτωση αποκόλλησης έχουμε:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_j}{2 f_{ctm}}} = \sqrt{\frac{230000 \cdot 0,15}{2 \cdot 2,2}} = 88,55\text{mm} \quad (12.16)$$



$$\lambda = \frac{L_{av}}{L_e} = \frac{240}{88,55} = 2,71 \quad (12.17)$$

$$k_v = 0,40 + 0,25 \cdot 2,71 = 1,07 > 0,65 \rightarrow k_v = 0,65 \quad (12.18)$$

$$\beta = \beta_L \beta_w = 1 \cdot \sqrt{\frac{2 - \frac{w_j}{s_j}}{1 + \frac{w_j}{s_j}}} = 0,894 \quad (12.19)$$

$$\sigma_{j,max} = \beta \frac{\tau_b^{αποκ}}{t_j} L_e = 0,894 \frac{2,2}{0,15} 88,55 = 1161 MPa \quad (12.20)$$

$$\sigma_{j,crit} = k_v \sigma_{j,max} = 0,65 \cdot 1161 = 754,6 MPa \quad (12.21)$$

$$\sigma_{jd} = \frac{1}{\gamma_{RD}} \cdot \sigma_{j,crit} = \frac{1}{1,2} \cdot 754,6 = 628,86 MPa \quad (12.22)$$

$$V_{jd} = \sigma_{jd} \rho_j b_w h_{j,ef} = \frac{2A_j}{s_j} h_{j,ef} \sigma_{jd} = \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 100}{150} \cdot 240 \cdot 628,86 = 30,2 kN \quad (12.23)$$

Όπως λοιπόν φαίνεται από το παραπάνω παράδειγμα η υπολογιζόμενη  $V_{jd}$  στην περίπτωση αποκόλλησης είναι σημαντικά χαμηλότερη απ' ότι στην περίπτωση θραύσης των ινών. Σημειώνεται ότι οι διορθώσεις που έγιναν στο τελικό κείμενο του ΚΑΝ.ΕΠΕ. φαίνεται να οδηγούν σε ασφαλέστερα αποτελέσματα, καθώς η αυξημένη τιμή του  $k_v$  στην περίπτωση της αποκόλλησης στα προηγούμενα σχέδια του κανονισμού οδηγούσε σε αρκετά υψηλές τιμές του προβλεπόμενου  $V_{jd}$ .

Το  $\sigma_{jd}$  στο παραπάνω παράδειγμα στην περίπτωση της θραύσης των ΙΟΠ αντιστοιχεί σε  $\epsilon_{jd}=0,00625$  που είναι ιδιαίτερα υψηλή σε σχέση με τα όρια που βάζουν οι υπόλοιποι κανονισμοί. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές της μέγιστης παραμόρφωσης που επιτρέπονται από τους υπόλοιπους κανονισμούς (π.χ. ACI) κυμαίνονται σε επίπεδα χαμηλότερα του 0,004.



### 6.3 Σχολιασμός των διατάξεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Στη συνέχεια ακολουθεί η αποτίμηση της αποτελεσματικότητας της διατμητικής ενίσχυσης και μέσω αυτής ο σχολιασμός των σχετικών διατάξεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Για αυτόν τον σκοπό γίνεται χρήση των δοκιμίων που περιλαμβάνονται στον πίνακα 6.1. μέσω των κατάλληλων γραφημάτων (Σχήματα 6.3-6.5). Τα δοκίμια αυτά, εν συνόλω 20, είναι δοκίμια που εξετάστηκαν στο παρόν ερευνητικό πρόγραμμα καθώς και δοκίμια από τη βιβλιογραφία. Στην βιβλιογραφία υπάρχει σημαντικός αριθμός δοκιμίων ενισχυμένων διατμητικά με ΑΙΟΠ που υποβάλλονται σε μονότονη φόρτιση. Τα δοκίμια που υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη «σεισμικού τύπου» φόρτιση είναι σχετικά λίγα. Επίσης, δοκίμια ενισχυμένα διατμητικά με λωρίδες ΧΙΟΠ που να υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη «σεισμικού τύπου» φόρτιση είναι μόνον αυτά του παρόντος ερευνητικού προγράμματος. Η επιλογή από τη βιβλιογραφία, έγινε χρησιμοποιώντας δοκίμια διατομής πλακοδοκού με περίπου αντίστοιχες διαστάσεις και μορφή επικόλλησης οπλισμού ενίσχυσης λωρίδων ΙΟΠ. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκαν δοκοί ενισχυμένες με ανοικτές λωρίδες ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ επικολλημένες ανά αποστάσεις σε γωνία  $90^0$  σε σχέση με τον διαμήκη άξονα των δοκών. Για όσο το δυνατόν πιο αντικειμενική σύγκριση των ΧΙΟΠ και ΑΙΟΠ σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση χρησιμοποιήθηκαν πειραματικές τιμές [38, 39, 41] από δοκούς αντίστοιχης διατομής ενισχυμένες με ΑΙΟΠ υποβαλλόμενες σε ανακυκλιζόμενη «σεισμικού τύπου» φόρτιση. Τα δοκίμια που επιλέχθηκαν για την αποτίμηση της αποτελεσματικότητας της επικόλλησης ή της αγκύρωσης σε σχέση με τις προβλέψεις της διατμητικής φέρουσας ικανότητάς τους μέσω των αντίστοιχων διατάξεων τεσσάρων κανονισμών περιλαμβάνονται στον Πίνακα 6.1. Επιλέχθηκαν 10 δοκίμια διατομής πλακοδοκού που υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη «σεισμικού τύπου» φόρτιση (έξη του παρόντος ερευνητικού προγράμματος και τεσσάρων της βιβλιογραφίας). Αναφορικά με τα δοκίμια που υποβάλλονται σε μονότονη φόρτιση επιλέχθηκαν δέκα δοκίμια ορθογωνικής διατομής του παρόντος ερευνητικού προγράμματος λόγω της «συγγένειας» που έχουν αυτά με τα δοκίμια της διατομής πλακοδοκού σε διαστάσεις της διατομής τους, ποσοστά και διάταξη διαμήκους οπλισμού, ποιότητας (θλιπτική αντοχή) σκυροδέματος και κατασκευαστικών λεπτομερειών των συστημάτων διατμητικής ενίσχυσης που διερευνήθηκαν. Στον πίνακα 6.1 που ακολουθεί περιλαμβάνονται όλες οι πληροφορίες των είκοσι αυτών δοκιμίων.

Στον Πίνακα 6.2 δίνονται πειραματικά δεδομένα από πειράματα που διεξήχθησαν σε δοκούς ενισχυμένες με συνεχή φύλλα και λωρίδες ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ. Ορισμένα από τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν στα σχήματα 6.3, 6.4, και 6.5 (συμπεριλαμβάνονται επίσης και στον πίνακα 6.1) για σύγκριση των τιμών που δίνουν τέσσερις κανονισμοί (ΚΑΝ.ΕΠΕ., ACI, Eurocode και FIB). Από τα πειραματικά αποτελέσματα του πίνακα 6.2. συνάγεται ότι οι μέγιστες πειραματικές τιμές παραμόρφωσης των ΙΟΠ δεν ξεπερνούν τη τιμή 0,0047 όταν η αστοχία επέρχεται με αποκόλληση των ΙΟΠ και 0,007 όταν η αστοχία επέρχεται με θραύση των ινών. Οι μέσες τιμές κυμαίνονται σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα (0.0026 για αποκόλληση και 0.0062 για θραύση ινών). Τόσο οι μέσες όσο και οι μέγιστες τιμές παραμόρφωσης που καταγράφηκαν στην παρούσα μελέτη είναι αυξημένες σε σχέση με αυτές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία και σχετίζονται με τη χρήση ΑΙΟΠ. Ειδικότερα, η μέσες τιμές είναι 0.0045 και 0.0059 ενώ οι μέγιστες 0.005 και 0.0078 για αποκόλληση και θραύση ινών/αστοχία αγκύρωσης αντίστοιχα.



Πίνακας 6.1 Παράθεση των δεδομένων που περιγράφονται στα σχήματα 6.3-6.5

Αριθμ Δοκμ	Είδος Υλικού / Αγκύρωση	Αντιστοίχιση Δοκιμίου	Πειραματική μέγιστη τέμνουσα (kN)	$V_f^{exp}$ (kN)	ACI $V_f^{exp} /$ $V_f^{ana}$	FIB $V_f^{exp} /$ $V_f^{ana}$	Eurocode $V_f^{exp} /$ $V_f^{ana}$	KAN.ΕΠΕ. $V_f^{exp} /$ $V_f^{ana}$
	Διατομή δοκού / Είδος φέρτισης	Πλάτος ΙΟΠ / αξονική απόσταση						
Δ1*	ΧΙΟΠ/χωρίς αγκύρωση Ορθογωνική/Μονότονη	RB150S 100mm/150mm	103,00	63,60	2,33	2,46	2,12	2,12
Δ2*	ΑΙΟΠ/ χωρίς αγκύρωση Ορθογωνική/Μονότονη	RB150C 100mm/150mm	101,00	61,60	2,00	2,19	1,88	1,86
Δ3*	ΧΙΟΠ/ χωρίς αγκύρωση Ορθογωνική/Μονότονη	RB200S 100mm/200mm	94,00	54,60	2,67	2,40	3,13	2,17
Δ4*	ΑΙΟΠ/ χωρίς αγκύρωση Ορθογωνική/Μονότονη	RB200C 100mm/200mm	97,80	58,40	2,53	2,35	3,07	2,10
Δ5	ΑΙΟΠ/ χωρίς αγκύρωση Πλακοδοκός/Μονότονη	4-Khalifa [35] 50mm/90mm	162,00	72,00	2,20	2,39	4,33	2,64
Δ6*	ΧΙΟΠ/ χωρίς αγκύρωση Πλακοδοκός/Ανακυκλ.	TB200 100mm/200mm	58,30	21,10	1,55	1,56	2,11	1,13
Δ7*	ΧΙΟΠ/ χωρίς αγκύρωση Πλακοδοκός/Ανακυκλ.	TB150 100mm/150mm	73,20	36,00	1,98	2,34	2,09	1,62
Δ8	ΑΙΟΠ/ χωρίς αγκύρωση Πλακοδοκός/Ανακυκλ.	4-Tanarslan [40] 50mm/110mm	60,01	20,5	0,97	1,23	1,30	0,94
Δ9*	ΧΙΟΠ/ με αγκύρωση Ορθογωνική/Μονότονη	RB150Sa 100mm/150mm	119,00	79,60	2,11	2,49	2,31	1,75
Δ10*	ΧΙΟΠ/ με αγκύρωση Ορθογωνική/Μονότονη	RB200Sa 100mm/200mm	122,00	82,60	3,12	3,39	4,46	2,59
Δ11*	ΑΙΟΠ/ με αγκύρωση Ορθογωνική/Μονότονη	RB150Ca 100mm/150mm	123,00	83,60	1,94	2,97	2,38	1,96
Δ12*	ΑΙΟΠ/ με αγκύρωση Ορθογωνική/Μονότονη	RB200Ca 100mm/200mm	115,10	75,70	2,34	3,29	3,72	2,37
Δ13	ΑΙΟΠ/ με αγκύρωση Πλακοδοκός/Μονότονη	6-Khalifa [35] ολόσωμο	221,00	145,00	1,58	1,63	1,65	1,01
Δ14*	ΧΙΟΠ/ με αγκύρωση Πλακοδοκός/Ανακυκλ.	TB200P2b* 100mm/200mm	116,40	82,75	1,99	2,88	5,27	1,65
Δ15*	ΧΙΟΠ/ με αγκύρωση Πλακοδοκός/Ανακυκλ.	TB150B1b 100mm/150mm	95,50	58,25	2,11	2,54	2,57	1,75
Δ16*	ΧΙΟΠ/ με αγκύρωση Πλακοδοκός/Ανακυκλ.	TB200L11* 100mm/200mm	115,00	77,75	3,75	4,41	6,80	2,59
Δ17*	ΧΙΟΠ/ με αγκύρωση Πλακοδοκός/Ανακυκλ.	TB150L2t 100mm/150mm	106,70	69,45	2,51	3,03	3,06	2,09
Δ18	ΑΙΟΠ/ με αγκύρωση Πλακοδοκός/Ανακυκλ.	7-Tanarslan [40] 100mm/90mm	90,00	51,00	1,41	1,19	1,61	0,86
Δ19	ΑΙΟΠ/ με αγκύρωση Πλακοδοκός/Ανακυκλ.	7-Tanarslan [41] 50mm/80mm	80,67	41,67	1,42	1,12	1,80	0,86
Δ20	ΑΙΟΠ/ με αγκύρωση Πλακοδοκός/Ανακυκλ.	5-Anil [38] ολόσωμο	89,30	58,19	1,25	1,27	1,68	0,76

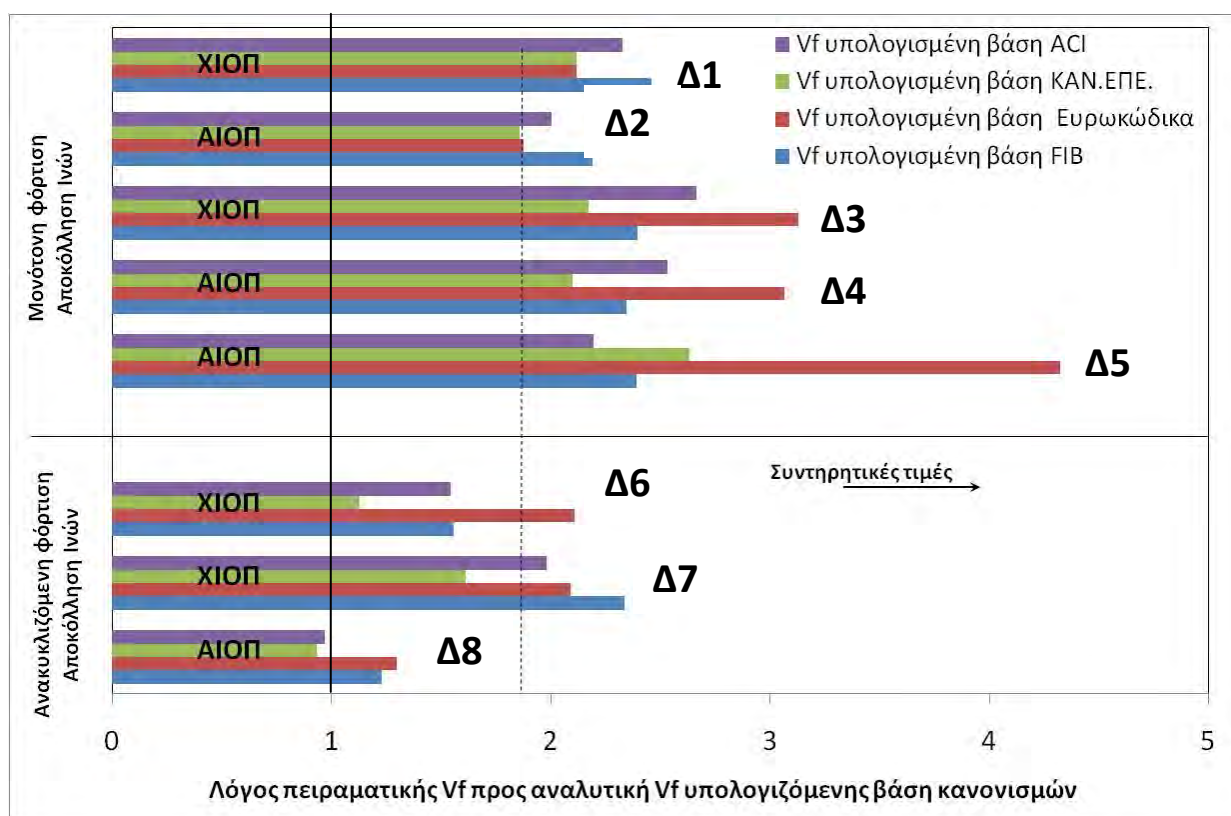
\* Τα δεδομένα των δοκιμών με το σύμβολο (\*) έχουν προέλθει από τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας ερευνητικής διερεύνησης.

Στα σχήματα 6.3, 6.4 και 6.5 φαίνεται ο λόγος της πειραματικής διατμητικής αντοχής των ΙΟΠ προς τη διατμητική αντοχή που υπολογίστηκε βάση των τεσσάρων κανονισμών για δοκούς που ενισχύθηκαν διατμητικά με ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ. Κάθε ραβδόμορφη ομάδα αποτελεσμάτων στο ως άνω γράφημα αντιστοιχεί σε ένα δοκίμιο δοκού (Δi) του Πίνακα 6.1 (βλ. δεύτερη στήλη), και αποτελείται από τέσσερις ράβδους (τιμές λόγων πειραματικών  $V_f$  ( $V_f^{exp}$ ) προς αναλυτικές  $V_f$  ( $V_f^{ana}$ ) με κάθε τιμή λόγου (ράβδο) να αντιστοιχεί στην πρόβλεψη ενός από τους τέσσερις κανονισμούς που χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή ACI, ΚΑΝ-ΕΠΕ, Ευρωκώδικας και FIB (ενώ η πειραματική μέτρηση για



κάθε δοκίμιο δοκού είναι η ίδια για την κάθε ραβδόμορφη ομάδα). Η τιμή του λόγου ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) έχει και τον χαρακτήρα του τελικού βαθμού ασφάλειας που εμπεριέχεται στην πρόβλεψη της διατμητικής ικανότητας κάθε κανονισμού. Στον Πίνακα 6.1<sup>α</sup> γίνεται η παράθεση των δεδομένων που περιγράφονται στα σχήματα 6.3-6.5. Θα πρέπει εδώ να υπογραμμισθεί ότι οι αναλυτικές τιμές που έχουν χρησιμοποιηθεί για να προκύψουν οι λόγοι ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) περιλαμβάνουν τον συντελεστή ασφάλειας, έτσι όπως προβλέπεται από κάθε κανονισμό. Στις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. προτείνεται η τιμή του συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_m$  να λαμβάνετε ίση με 1,2. Στον Ευρωκώδικα η αντίστοιχη προτεινόμενη τιμή ισούται με 1,5, ενώ ο Fib προτείνει τη χρήση δυο διαφορετικών συντελεστών ασφαλείας για τα ΙΟΠ ανάλογα με τον τρόπο αστοχίας. Τέλος στον ACI ο αντίστοιχος συντελεστής είναι ίσος με 0,8 πολλαπλασιασμένος με 0,85 ή 0,95, ήτοι κυμαίνεται από 1,24-1,47.

Τιμή του λόγου ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) αρκετά μεγαλύτερη της μονάδας (π.χ. μεγαλύτερη του 1.8, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3, παρά το γεγονός ότι η επιλογή της συγκεκριμένης τιμής περιλαμβάνει κάποιο βαθμό αυθαιρεσίας) σηματοδοτεί την συντηρητικότητα της αντίστοιχης πρόβλεψης ενώ τιμές όχι πολύ μεγαλύτερες της μονάδας (π.χ. 1.2) σηματοδοτούν το αντίθετο. Τιμές του λόγου ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) μικρότερες της μονάδας σηματοδοτούν ότι η πρόβλεψη του αντίστοιχου κανονισμού είναι ανασφαλής.



Σχήμα 6.3 Λόγος πειραματικών  $V_f$  προς αναλυτικών  $V_f$  υπολογιζόμενων βάση κανονισμών για ενισχυμένες δοκούς χωρίς χρήση αγκυρώσεων που αστόχησαν λόγω αποκόλλησης των ΙΟΠ.

Στο σχήμα 6.3 φαίνεται ο λόγος ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) της πειραματικής διατμητικής αντοχής των ΙΟΠ προς τη διατμητική αντοχή που υπολογίστηκε βάση των τεσσάρων κανονισμών για δοκούς που ενισχύθηκαν διατμητικά με ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ σε σχήμα U χωρίς τη χρήση μηχανικών αγκυρίων και υποβλήθηκαν τόσο σε μονότονη φόρτιση όσο και σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση

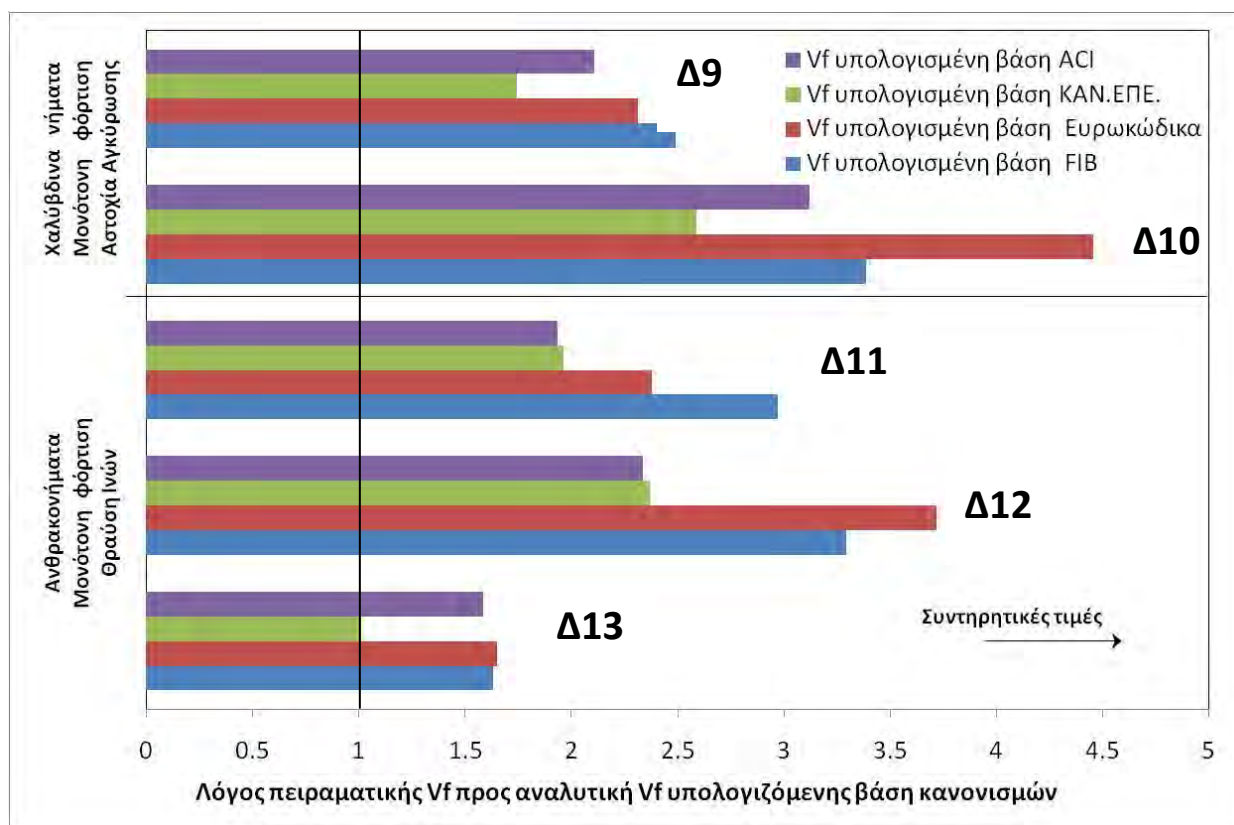




Με βάση το εν λόγω σχήμα θα διατυπωθούν οι εξής παρατηρήσεις.

Δοκίμια ενισχυμένα διατμητικά με λωρίδες ΑΙΟΠ ή ΧΙΟΠ χωρίς την χρήση αγκυρώσεων (δοκίμια Δ1 έως Δ8).

1. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα από τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε μονότονες φορτίσεις με λωρίδες ΑΙΟΠ ή ΧΙΟΠ χωρίς την χρήση αγκυρώσεων (δοκίμια Δ1 έως Δ5), οι προβλέψεις όλων των κανονισμών έχουν ένα βαθμό συντηρητικότητας.
2. Η αναλυτική πρόβλεψη  $V_f^{ana}$  της διατμητικής φέρουσας ικανότητας επί τη βάση των διατάξεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις η υψηλότερη τιμή συγκρινόμενη με τις αντίστοιχες προβλέψεις των υπολοίπων κανονισμών. Κατά συνέπεια η τιμή του λόγου ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) με βάση την πρόβλεψη του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι μικρότερη σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν επί τη βάση των προβλέψεων των άλλων κανονισμών
3. Η προηγούμενη παρατήρηση ισχύει και όταν οι τιμές των λόγων ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) προκύπτουν επί τη βάση των πειραματικών αποτελεσμάτων από τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενες φορτίσεις (δοκίμια Δ6 έως Δ8). Δηλαδή και πάλι η τιμή του λόγου ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) με βάση την πρόβλεψη του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι μικρότερη σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν επί τη βάση των προβλέψεων των άλλων κανονισμών.
4. Πέραν της παρατήρησης 3 θα πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα το γεγονός ότι όταν οι τιμές των λόγων ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) που προκύπτουν επί τη βάση των πειραματικών αποτελεσμάτων από τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενες φορτίσεις είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές που προκύπτουν επί τη βάση των αποτελεσμάτων των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε μονότονες φορτίσεις.
5. Συνέπεια της παρατήρησης 4 είναι ότι η συντηρητικότητα που επιδείκνυαν οι προβλέψεις των κανονισμών εξανεμίζεται σε μεγάλο βαθμό. Ειδικότερα, η πρόβλεψη της φέρουσας διατμητικής ικανότητας για το δοκίμιο Δ8 που υποβλήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση ενισχυμένο με λωρίδες ΑΙΟΠ, επί τη βάση των διατάξεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και του ΑCΙ σύμφωνα με το σκεπτικό που αναπτύχθηκε προηγουμένως, θα πρέπει να χαρακτηριστεί ως ανασφαλής. Θα πρέπει βεβαίως να σημειωθεί ότι η εν λόγω παρατήρηση βασίζεται σε μια μόνο πειραματική μέτρηση.
6. Όπως φαίνεται από το σχήμα 6.3 δεν υπάρχει διαφοροποίηση στις τιμές των λόγων ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) μεταξύ ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ για μονότονη φόρτιση. Αυτό όμως παύει να ισχύει για τα δοκίμια της ανακυκλιζόμενης φόρτισης όπου η συντηρητικότητα των προβλέψεων των κανονισμών εξανεμίζεται δραστικά στην περίπτωση του δοκιμίου Δ8 που έχει ενισχυθεί διατμητικά με ΑΙΟΠ από ότι για τα δοκίμια που έχουν ενισχυθεί διατμητικά με ΧΙΟΠ (Δ6, Δ7).
7. Εκ του λόγου ότι ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. απευθύνεται σε επεμβάσεις για να αντιμετωπισθούν, κατά κύριο λόγο, συνέπειες σεισμικών φορτίσεων των οποίων είναι δεδομένος ο ανακυκλιζόμενος χαρακτήρας τους οι προηγούμενες παρατηρήσεις υποδεικνύουν την χρήση ενός αυξημένου συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_m$ , από αυτόν που προβλέπεται μέχρι τώρα, ειδικά στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται αποτελεσματικό σύστημα αγκύρωσης ή πλήρης περιτύλιξη.



Σχήμα 6.4 Λόγος ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) πειραματικών  $V_f$  προς αναλυτικών  $V_f$  υπολογιζόμενων βάσει κανονισμών για ενισχυμένες δοκούς με χρήση αγκυρώσεων που υποβλήθηκαν σε μονότονη φόρτιση.

Στό σχήμα 6.4 φαίνεται ο λόγος ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) της πειραματικής διατμητικής αντοχής προς τη διατμητική αντοχή που υπολογίστηκε βάσει των τεσσάρων κανονισμών για δοκίμια δοκών (Δ9 έως Δ13) που ενισχύθηκαν διατμητικά με ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ σε σχήμα U με την χρήση αγκυρώσεων και υποβλήθηκαν σε μονότονη φόρτιση.

Με βάση το εν λόγω σχήμα θα διατυπωθούν οι εξής παρατηρήσεις.

Δοκίμια (Δ9 έως Δ13) ενισχυμένα διατμητικά με λωρίδες ΑΙΟΠ ή ΧΙΟΠ με την χρήση αγκυρώσεων που υποβλήθηκαν σε μονότονη φόρτιση

1. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα από τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε μονότονες φορτίσεις με λωρίδες ΑΙΟΠ ή ΧΙΟΠ με την χρήση αγκυρώσεων οι προβλέψεις όλων των κανονισμών έχουν ένα βαθμό συντηρητικότητας.

2. Η αναλυτική πρόβλεψη  $V_f^{ana}$  της διατμητικής φέρουσας ικανότητας επί τη βάση των διατάξεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις η υψηλότερη τιμή συγκρινόμενη με τις αντίστοιχες προβλέψεις των υπολοίπων κανονισμών. Κατά συνέπεια η τιμή του λόγου ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) με βάση την πρόβλεψη του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι μικρότερη σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν επί τη βάση των προβλέψεων των άλλων κανονισμών.

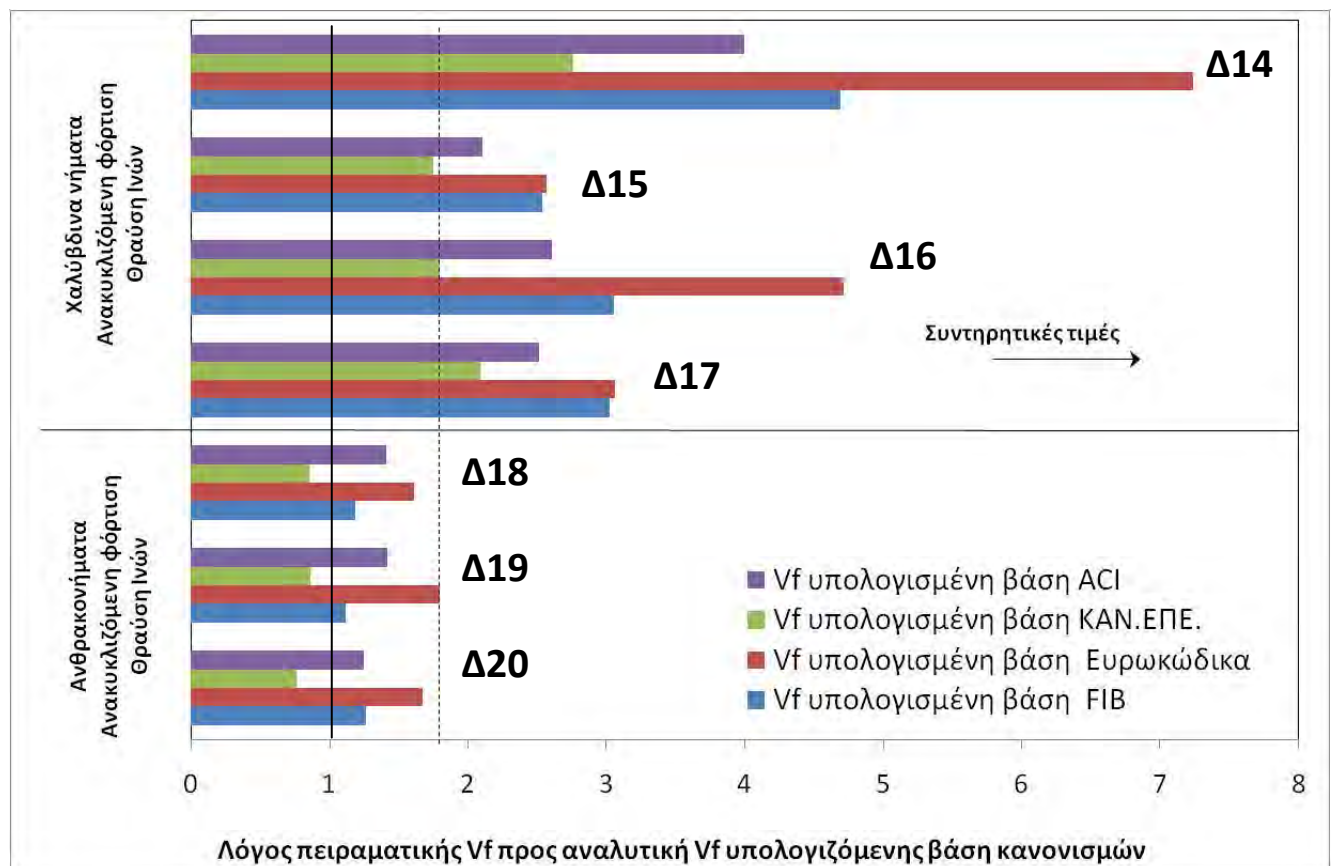
3. Όπως φαίνεται από το σχήμα 6.4 δεν υπάρχει διαφοροποίηση στις τιμές των λόγων ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) μεταξύ ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ για μονότονη φόρτιση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση χρήσης ΑΙΟΠ η αστοχία επήλθε μετά από θραύση των ινών άνθρακα, ενώ στην περίπτωση χρήσης ΧΙΟΠ η



αστοχία ήταν αποτέλεσμα αστοχίας της αγκύρωσης. Αναμένεται ότι στην περίπτωση που υπήρχε θραύση των ΧΙΟΠ οι πειραματικές τιμές θα ήταν σημαντικά μεγαλύτερες.

4. Για το δοκίμιο Δ13, που έχει ενισχυθεί διατμητικά όχι με λωρίδες αλλά με συνεχή μανδύα ΑΙΟΠ η συντηρητικότητα των κανονισμών είναι εμφανώς μειωμένη. Επιπρόσθετα, η πρόβλεψη της φέρουσας διατμητικής ικανότητας για το δοκίμιο Δ13 που υποβλήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση ενισχυμένο με ολόσωμο μανδύα ΑΙΟΠ και όχι με λωρίδες, επί τη βάση των διατάξεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ., σύμφωνα με το σκεπτικό που αναπτύχθηκε προηγουμένως, θα πρέπει να χαρακτηριστεί και πάλι ότι ως ανασφαλής. Θα πρέπει βεβαίως να σημειωθεί ότι η εν λόγω παρατήρηση βασίζεται σε μια μόνο πειραματική μέτρηση.

5. Η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με ολόσωμο μανδύα υπερεκτιμάται από όλους τους κανονισμούς. Η υπερεκτίμηση αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη στην περίπτωση του ΚΑΝ.ΕΠΕ.. Η ύπαρξη αγκύρωσης δεν συμβάλει στην επαύξηση της αποτελεσματικότητας αυτού του τύπου της ενίσχυσης ούτε αναιρεί την υπερεκτίμηση της φέρουσας διατμητικής ικανότητας που προβλέπεται από τους κανονισμούς και ιδιαίτερα τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ.. Θα πρέπει βεβαίως να σημειωθεί ότι η εν λόγω παρατήρηση βασίζεται σε μια μόνο πειραματική μέτρηση.



Σχήμα 6.5 Λόγος ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) πειραματικών  $V_f$  προς αναλυτικών  $V_f$  υπολογιζόμενων βάση κανονισμών για ενισχυμένες δοκούς με χρήση αγκυρώσεων που αστόχησαν λόγω θραύσης των ΙΟΠ.



Στό σχήμα 6.5 φαίνεται ο λόγος ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) της πειραματικής διατμητικής αντοχής προς τη διατμητική αντοχή που υπολογίστηκε βάση των τεσσάρων κανονισμών για δοκίμια δοκών (Δ14 έως Δ20) που ενισχύθηκαν διατμητικά με ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ σε σχήμα U με χρήση αποτελεσματικών αγκυρώσεων και υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Τα δοκίμια αυτά αστόχησαν λόγω θραύσης των ΙΟΠ.

Με βάση το εν λόγω σχήμα θα διατυπωθούν οι εξής παρατηρήσεις.

Δοκίμια (Δ14 έως Δ20) ενισχυμένα διατμητικά με λωρίδες ΑΙΟΠ ή ΧΙΟΠ με την χρήση αποτελεσματικών αγκυρώσεων, που υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση και αστόχησαν λόγω θραύσης των ΙΟΠ.

1. Όπως φαίνεται από το σχήμα 6.5 υπάρχει σαφής διαφοροποίηση στις τιμές των λόγων ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) μεταξύ ΑΙΟΠ και ΧΙΟΠ για ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Οι προβλέψεις όλων των κανονισμών έχουν μεγαλύτερο βαθμό συντηρητικότητας για τις λωρίδες ΧΙΟΠ που συνοδεύονται από αγκυρώσεις από ότι για τις αντίστοιχες λωρίδες ΑΙΟΠ. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι το σύστημα αγκύρωσης είναι περισσότερο αποτελεσματικό για τα ΧΙΟΠ σε αντίθεση με τα ΑΙΟΠ ακόμη και στην περίπτωση ανακυκλιζόμενης φόρτισης και στο ότι οι συγκεντρώσεις τάσεων στις κάτω γωνίες των δοκών όπου κάμπτονται τα ΙΟΠ επηρεάζουν περισσότερο τα ΑΙΟΠ. Το γεγονός αυτό δεν αναγνωρίζεται σε κάποιο βαθμό από τις προβλέψεις των κανονισμών.

2. Η αναλυτική πρόβλεψη  $V_{f,ana}$  της διατμητικής φέρουσας ικανότητας επί τη βάση των διατάξεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις η υψηλότερη τιμή συγκρινόμενη με τις αντίστοιχες προβλέψεις των υπολοίπων κανονισμών. Κατά συνέπεια η τιμή του λόγου ( $V_f^{exp} / V_f^{ana}$ ) με βάση την πρόβλεψη του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι μικρότερη σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν επί τη βάση των προβλέψεων των άλλων κανονισμών

3. Οι διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. στην περίπτωση των δοκών που υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση και ενισχύθηκαν με αγκυρωμένα ΑΙΟΠ υπερτιμά σημαντικά την διατμητική τους συνεισφορά. Σύμφωνα με το σκεπτικό που αναπτύχθηκε στο παρόντα σχολιασμό, οι προβλέψεις με βάση τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. της διατμητικής φέρουσας ικανότητας για τα δοκίμια Δ19 και Δ20, ενισχυμένα με λωρίδες ΑΙΟΠ, θα πρέπει να χαρακτηριστεί ως ανασφαλής.

4. Εκ του λόγου ότι ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. απευθύνεται σε επεμβάσεις για να αντιμετωπισθούν, κατά κύριο λόγο, συνέπειες σεισμικών φορτίσεων των οποίων είναι δεδομένες ο ανακυκλιζόμενος χαρακτήρας τους οι προηγούμενες παρατηρήσεις υποδεικνύουν τη χρήση ενός αυξημένου συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_m$ , από αυτόν που προβλέπεται μέχρι τώρα, ειδικά στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται λωρίδες ΑΙΟΠ ακόμα και με σύστημα αγκύρωσης .

#### 6.4 Συμπερασματικές παρατηρήσεις.

- Όπως φαίνεται στα σχήματα 6.3-6.5 οι τιμές που υπολογίζονται βάση της προτεινόμενης μεθοδολογίας του ΚΑΝ.ΕΠΕ. υπερεκτιμούν τη συμβολή των ΙΟΠ στη διατμητική αντοχή των πλακοδοκών, σε σχέση με τους άλλους τρεις κανονισμούς (ACI, Fib, Eurocode), ανεξάρτητα από το αν η αστοχία επέρχεται μετά από θραύση ή αποκόλληση των ινών.

- Στην περίπτωση που η φόρτιση είναι ανακυκλιζόμενη και δεν υπάρχει αγκύρωση, οπότε η αστοχία θεωρείται ότι θα επέλθει μετά από αποκόλληση των ινών, οι διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. οδηγούν σε



ανασφαλείς προβλέψεις της διατμητικής φέρουσας ικανότητας λωρίδων είτε ΑΙΟΠ είτε ΧΙΟΠ. Εκ του λόγου ότι ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. απευθύνεται σε επεμβάσεις για να αντιμετωπισθούν, κατά κύριο λόγο, συνέπειες σεισμικών φορτίσεων των οποίων είναι δεδομένος ο ανακυκλιζόμενος χαρακτήρας τους οι προηγούμενες παρατηρήσεις υποδεικνύουν την χρήση ενός αυξημένου συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_m$ , από αυτόν που προβλέπεται μέχρι τώρα. Αυτό ισχύει στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται λωρίδες ΑΙΟΠ ακόμα και με σύστημα αγκύρωσης.

- Στην περίπτωση που η φόρτιση είναι ανακυκλιζόμενη και τα ΙΟΠ είναι αγκυρωμένα οπότε η αστοχία θεωρείται ότι θα επέλθει μετά από θραύση των ινών ο ΚΑΝ.ΕΠΕ υποτιμά τη συνεισφορά των ΧΙΟΠ αλλά υπερτιμά τη συνεισφορά των ΑΙΟΠ τα οποία αστοχούν σε τιμές παραμόρφωσης χαμηλότερες του 0,00625 που προβλέπεται από τον κανονισμό. Για το λόγο αυτό προτείνεται η μείωση του  $e_{jmax}$  σε 0,012 από 0,015.

- Στα διαγράμματα των σχημάτων 6.3, 6.4 και 6.5 έγινε ένας διαχωρισμός μεταξύ των δεδομένων από χρήση ΑΙΟΠ έναντι των δεδομένων της παρούσας διερεύνησης (ΧΙΟΠ). Όπως φαίνεται σε όλα τα διαγράμματα οι πειραματικές τιμές που προέκυψαν από τη χρήση ΧΙΟΠ είναι ιδιαίτερα αυξημένες έναντι των τιμών που δίνουν οι κανονισμοί. Σημειώνεται ότι τόσο για τα ΑΙΟΠ όσο και για τα ΧΙΟΠ χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές ασφαλείας που προτείνονται για τα ΑΙΟΠ. Είναι γνωστό όμως ότι οι ίνες των ΑΙΟΠ παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευπάθεια και η χρήση ρολών κατά την επικόλληση για την εξάλειψη τυχόν φυσαλίδων αέρα οδηγεί σε θραύση ενός πολλές φορές σημαντικού ποσοστού ινών (έως 20%). Η απώλεια αυτή δεν παρατηρείται στα ΧΙΟΠ όπου η συμπίεση των ινών δεν οδηγεί σε θραύση. Επιπρόσθετα δεν παρατηρούνται και σημαντικές διαφοροποιήσεις στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού (χάλυβας). Κατά συνέπεια ενδείκνυται η χρήση πιο μειωμένων συντελεστών ασφαλείας για τα ΧΙΟΠ από ότι για τα ΑΙΟΠ στην περίπτωση διατμητικών ενισχύσεων.

- Η χρήση αποτελεσματικής αγκύρωσης με λωρίδες ΧΙΟΠ, όπως φαίνεται από τα γραφήματα (Σχήματα 6.4-6.5) συντελεί σε ιδιαίτερα αυξημένες τιμές φέρουσας ικανότητας σε τέμνουσας λόγω του ότι αποφεύγεται η αποκόλληση και γίνεται καλύτερη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του υλικού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα αναλυτικά μοντέλα της βιβλιογραφίας καθώς και οι κανονισμοί έχουν βασισθεί σε πειραματικά δεδομένα από πειράματα που διεξήχθησαν σε δοκίμια ενισχυμένα διατμητικά με ΑΙΟΠ. Με βάση τα αποτελέσματα του παρόντος ερευνητικού προγράμματος φαίνεται ότι η χρήση των πειραματικών δεδομένων από δοκίμια ενισχυμένα διατμητικά με ΑΙΟΠ οδηγεί σε αποτελέσματα που υποτιμούν σημαντικά τη διατμητική ενίσχυση που παρέχεται από εξωτερικά επικολλημένες και αγκυρωμένες λωρίδες ΧΙΟΠ. Επιπρόσθετα, έχει παρατηρηθεί ότι στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ΑΙΟΠ και έχουμε πλήρη περιτύλιξη ή αγκύρωση η θραύση των ινών στις περισσότερες περιπτώσεις παρατηρείται στις κάτω γωνίες των δοκών λόγω τοπικών φαινομένων συγκέντρωσης τάσεων. Τα σχετικά χαμηλά όρια της μέγιστης παραμόρφωσης των ΙΟΠ που αναφέρονται στους κανονισμούς οφείλονται σ' αυτόν το λόγο. Στην παρούσα μελέτη δεν παρατηρήθηκε αντίστοιχο φαινόμενο στις περιπτώσεις δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν λωρίδες ΧΙΟΠ ως διατμητική ενίσχυση.

- Η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με ολόσωμο μανδύα από ΙΟΠ υπερεκτιμάται από όλους τους κανονισμούς. Η υπερεκτίμηση αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη στην περίπτωση του ΚΑΝ.ΕΠΕ.. Η ύπαρξη αγκύρωσης δεν συμβάλει στην επαύξηση της αποτελεσματικότητας αυτού του τύπου της ενίσχυσης ούτε αναιρεί την υπερεκτίμηση της φέρουσας διατμητικής ικανότητας που προβλέπεται από τους κανονισμούς και ιδιαίτερα τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ.. Θα πρέπει βεβαίως να σημειωθεί ότι η εν λόγω παρατήρηση βασίζεται σε μια μόνο πειραματική μέτρηση.



### 6.5 Πρόταση τροποποίησης διατάξεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

α) προσθήκη της εξίσωσης υπολογισμού του  $\lambda$  στο τελικό κείμενο.

β) αύξηση του συντελεστή  $\gamma_m$  από 1.2 σε 1.5 στην περίπτωση που έχουμε αποκόλληση. Παρόμοια αύξηση στην περίπτωση που έχουμε εξωτερικό διατμητικό σπλισμό με λωρίδες ΑΙΟΠ ακόμη και στην περίπτωση ύπαρξης αγκύρωσης.

γ) μείωση του  $\epsilon_{jmax}$  στην περίπτωση θραύσης ινών από 0,015 σε 0,012 λόγω του ότι σε πάρα πολλές περιπτώσεις οι κατασκευαστές των ινών δίνουν μεγάλες τιμές μέγιστης παραμόρφωσης οι οποίες στην πράξη δεν μπορούν να επιτευχθούν λόγω πρόωρης ρηγμάτωσης των ρητινών.

δ) Σχετικά με τη χρήση των ΧΙΟΠ δεν παρατηρήθηκε ουσιαστικά διαφορετική συμπεριφορά των δοκών που ενισχύθηκαν με ΧΙΟΠ έναντι αυτών που ενισχύθηκαν με ΑΙΟΠ. Μάλιστα οι δοκοί που ενισχύθηκαν με ΧΙΟΠ παρουσίασαν μεγαλύτερη διατμητική αντοχή σε σχέση με αντίστοιχες δοκούς που ενισχύθηκαν με ΑΙΟΠ. Κατά συνέπεια προτείνεται να προστεθεί η δυνατότητα χρήσης και εξωτερικά επικολλημένων ΧΙΟΠ στον ΚΑΝ.ΕΠΕ (χρησιμοποιώντας μειωμένους συντελεστές ασφαλείας στην περίπτωση θραύσης των ινών π.χ.  $\gamma_m=1.2$ )

ε) Προτείνεται να οριστεί η έννοια της «επαρκούς αγκύρωσης» στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. καθώς και σενάρια αστοχίας των αγκυρώσεων (δες παράγραφο 5.4.7) . Επιπρόσθετα, να προβλέπεται διάταξη για τον σχεδιασμό έναντι της πρόωρης αστοχίας της αγκύρωσης.

### 6.6 Προτάσεις Επέκτασης Ερευνητικού Αντικειμένου

- Η χρήση των ΧΙΟΠ φαίνεται ότι αποτελεί έναν εναλλακτικό υλικό ενίσχυσης χωρίς να εμφανίζει κάποια μειονεκτήματα κατά την εφαρμογή του. Αντιθέτως με βάση τα αποτελέσματα του παρόντος ερευνητικού προγράμματος τα ΧΙΟΠ φαίνεται να πλεονεκτούν των ΑΙΟΠ ως λωρίδες διατμητικής ενίσχυσης τόσο στη μονότονη όσο και στην ανακυκλιζόμενο τύπου φόρτιση. Η προηγούμενη παρατήρηση χρειάζεται περαιτέρω τεκμηρίωση με περισσότερες δοκιμές, ελέγχοντας την συμπεριφορά λωρίδων ΙΟΠ συνδυασμένων με αγκυρώσεις όταν τα σχετικά δοκίμια υποβάλλονται σε σεισμικού τύπου φορτίσεις. Από τα αποτελέσματα ικανού αριθμού δοκιμών πιθανόν να προκύψουν διαφορετικοί συντελεστές ασφαλείας για τα ΧΙΟΠ από ότι για τα ΑΙΟΠ και με ικανό βαθμό εμπιστοσύνης ώστε να στοιχειοθετούν την υιοθέτησή τους από τους αντίστοιχους κανονισμούς.

- Σε ένα επόμενο επίπεδο είναι δυνατόν να γίνει η διερεύνηση των ιδίων ή αντίστοιχων παραμέτρων σε δοκίμια τα οποία είναι προ-ρηγματωμένα. Στην περιορισμένη διερεύνηση του παρόντος ερευνητικού προγράμματος, η διατμητική συμπεριφορά των προ-ρηγματωμένων δοκιμίων δεν προκύπτει δυσμενής επιρροή εκ της προϋπάρχουσας διατμητικής καταπόνησής και ρηγμάτωσης τους (TB200P2B-R) σε σχέση με τα παρθένα (αρηγμάτωτα) δοκίμια. Με τον τρόπο αυτό θα καλυφθεί η επισκευή-ενίσχυση σε υφιστάμενα δομικά συστήματα μετά από κάποια ισχυρή σεισμική καταπόνηση. Θα διερευνηθεί λοιπόν διεξοδικά, κατά πόσο οι υφιστάμενες ρηγματώσεις επηρεάζουν την φέρουσα ικανότητα και δυσκαμψία των ενισχυμένων δομικών στοιχείων και πόσο κρίσιμες είναι για την ασφάλεια της κατασκευής, λαμβάνοντας υπόψη και την πιθανή επιρροή του αυξημένου αριθμού ανακυκλίσεων.



- Η χρήση εποξειδικών ρητινών εισάγει ένα άνω όριο στις επιτρεπόμενες παραμορφώσεις ίσο με τη μέγιστη τιμή παραμόρφωσης της ρητίνης. Το γεγονός αυτό δε λαμβάνεται υπόψη σε κανένα κανονισμό, τουλάχιστον άμεσα. Χρήζει περαιτέρω διερεύνησης η χρήση άλλου μέσου επικόλλησης με μεγαλύτερες μέγιστες παραμορφώσεις και ίσως, πιο φιλικές προς το τεχνικό προσωπικό χρήσης τους και προς το περιβάλλον, όπως λ.χ. ανόργανες μήτρες.
- Η ανακυκλιζόμενη φόρτιση φαίνεται να επηρεάζει δυσμενώς το φαινόμενο της διατμητικής ενίσχυσης κυρίως στην περίπτωση της απλής επικόλλησης. Η παρατήρηση αυτή διατυπώθηκε ως συμπέρασμα της παρούσης ερευνητικής προσπάθειας παρά τον πολύ περιορισμένο αριθμό δοκιμίων. Η δυσμενής αυτή επιρροή δεν παρατηρήθηκε στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη αγκύρωση. Επομένως πιστεύεται ότι χρειάζεται σε βάθος διερεύνηση του φαινομένου αυτού, στην περίπτωση της απλής επικόλλησης σε δοκίμια που υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενου τύπου σεισμικές φορτίσεις. Στην μελλοντική διερεύνηση θα μπορούσε να εξετασθεί επίσης η επιρροή του συχνοτικού περιεχομένου της φόρτισης.
- Τέλος από τα αποτελέσματα του παρόντος ερευνητικού έργου φάνηκε ξεκάθαρα ότι η χρήση κατάλληλης διάταξης αγκύρωσης οδηγεί σε μεγαλύτερα ποσοστά εκμετάλλευσης του υλικού των ΙΟΠ, γεγονός που καθιστά την ενίσχυση πιο οικονομική και αποτελεσματική. Ο κανονισμός επεμβάσεων οφείλει να γίνει πιο σαφής στο θέμα αυτό και να περιλαμβάνει οδηγίες για τη χρήση τέτοιων διατάξεων αγκύρωσης.



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ - ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Πίνακας 6.2 Πειραματικά δεδομένα διατμητικά ενισχυμένων δοκών με ΙΟΠ.

ρθρο	Αριθμός Δοκιμίου Αρ. Δοκ. Πιν. (6.3-6.5)	Είδος φόρτισης	Υλικό Ενίσχυσης	FRP πλάτος $w_f$ (mm)	Γωνία FRP	Απόσταση sf (mm)	Ύπαρξη Αγκώρωσης	Τύπος Επικόλλησης	Αντοχή Σκυροδέματος $f_c$ (MPa)	Μορφή Αστοχίας	Μέγιστη Τέμνουσα (kN)	Μεταλλικοί Συνδετήρες	$\epsilon_{ult}$	$\epsilon_{ef}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
Anil [38]	1	Ανακυκλ/νη	-	-	-	-	όχι	-	15	Διάτμηση	37,3	όχι	-	-
Anil [38]	2	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	50	90	80	ναι	U	14	Διάτμηση (θραύση- αποκόλληση)	80	όχι	0,017	0,0047
Anil [38]	3	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	100	90	130	ναι	U	14,5	Κάμψη (θραύση)	92,3	όχι	0,017	0,0048
Anil [38]	4	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	1750	90	0	ναι	πλευρικά	14,8	Αποκόλληση	70,8	όχι	0,017	0,001
Anil [38]	5 – (Δ20)	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	1750	90	0	ναι	U	14,2	Αποκόλληση	89,3	όχι	0,017	0,0018
Anil [38]	6	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	100	90	130	ναι	U	14,7	Αποκόλληση	47,1	όχι	0,017	0,0022
Anil [39]	2	Ανακυκλ/νη	-	-	-	-	όχι	-	30	Διάτμηση	41,4	όχι	-	-
Anil [39]	3	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	50	45	285	ναι	πλευρικά	35,6	Διάτμηση	74,3	όχι	0,017	0,0042
Anil [39]	4	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	100	45	285	ναι	πλευρικά	35,8	Κάμψη	89,9	όχι	0,017	0,0045
Anil [39]	5	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	50	45	143	ναι	πλευρικά	35,2	Κάμψη/Διάτμηση	90	όχι	0,017	0,0045
Anil [39]	6	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	50/100	45/90	285	ναι	πλευρικά /U	35	Κάμψη	91,9	όχι	0,017	0,0045
Tanarslan [40]	1	Ανακυκλ/νη	-	-	-	-	όχι	-	30,1	Διάτμηση	39,52	όχι	-	-
Tanarslan [40]	2	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	50	90	110	όχι	πλευρικά	31,9	Διάτμηση (αποκόλληση)	61,63	όχι	0,017	0,002
Tanarslan [40]	3	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	50	90	110	ναι	πλευρικά	30,7	Θλίψη-λυγισμός κάτω	59,66	όχι	0,017	0,0047
Tanarslan [40]	4 – (Δ8)	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	50	90	110	όχι	U	29,1	Διάτμηση (αποκόλληση)	60,01	όχι	0,017	0,0016
Tanarslan [40]	5	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	50	90	80	ναι	U	30,7	Διάτμηση (θραύση)	80,67	όχι	0,017	0,006
Tanarslan [40]	6	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	100	90	160	ναι	πλευρικά -L	30,8	Θλίψη-λυγισμός κάτω	64,33	όχι	0,017	0,0045
Tanarslan [40]	7 – (Δ18)	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	100	90	130	ναι	Uext	30,6	Κάμψη	90	όχι	0,017	0,0078
Tanarslan [41]	2	Ανακυκλ/νη	-	-	-	-	όχι	-	30,1	Διάτμηση	39,52	όχι	-	-
Tanarslan [41]	3	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	50	90	110	όχι	πλευρικά	32,4	Διάτμηση (αποκόλληση)	61,63	όχι	0,017	0,002
Tanarslan [41]	4	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	50	90	80	όχι	πλευρικά	30,2	Διάτμηση (αποκόλληση)	62,94	όχι	0,017	0,0032





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ - ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ρθρο	Αριθμός Δοκιμίου Αρ. Δοκ. Πιν. (6.3-6.5)	Είδος φόρτισης	Υλικό Ενίσχυσης	FRP πλάτος $w_f$ (mm)	Γωνία FRP	Απόσταση sf (mm)	Υπαρξη Αγκύρωσης	Τύπος Επικόλλησης	Αντοχή Σκυροδέματος $f_c$ (MPa)	Μορφή Αστοχίας	Μέγιστη Τέμνουσα (kN)	Μεταλλικοί Συνδετήρες	$\epsilon_{ult}$	$\epsilon_{ef}$
Tanarlan [41]	5	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	100	90	130	όχι	πλευρικά	31,4	Διάτμηση (αποκόλληση)	68,48	όχι	0,017	0,0034
Tanarlan [41]	6	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	50	90	110	όχι	U	28,3	Διάτμηση (αποκόλληση)	60,01	όχι	0,017	0,0017
Tanarlan [41]	7 – (Δ19)	Ανακυκλ/νη	ΑΙΟΠ	50	90	80	ναι	U	31,6	Διάτμηση (θραύση)	80,67	όχι	0,017	0,006
Khalifa [35]	1	Μονότονη	-	-	-	-	όχι	-	35	Διάτμηση	90	όχι	-	-
Khalifa [35]	2	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	35	Διάτμηση (αποκόλληση)	155	όχι	0,015	0,0045
Khalifa [35]	3	Μονότονη	ΑΙΟΠ	jacket 2ply	0/90	90	όχι	U	35	Διάτμηση (αποκόλληση)	157,5	όχι	0,015	0,0045
Khalifa [35]	4 – (Δ5)	Μονότονη	ΑΙΟΠ	50	90	125	όχι	U	35	Διάτμηση (αποκόλληση)	162	όχι	0,015	0,01
Khalifa [35]	5	Μονότονη	ΑΙΟΠ	50	90	125	όχι	πλευρικά	35	Διάτμηση (αποκόλληση)	121,5	όχι	0,015	-
Khalifa [35]	6 – (Δ13)	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	ναι	U	35	Κάμψη (θραύση)	221	όχι	0,015	0,0063
Bousselham[29]	DS0-0L	Μονότονη	-		0	0	όχι	0	25	Διάτμηση	214,4	όχι	0	0
Bousselham[29]	DS0-0,5L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	322,8	όχι	0,013	0,0047
Bousselham[29]	DS0-1L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	343,6	όχι	0,013	0,0026
Bousselham[29]	DS0-2L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	347,8	όχι	0,013	0,0019
Bousselham[29]	DS1-0,5L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	373,6	ναι	0,013	
Bousselham[29]	DS1-1L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	427,8	ναι	0,013	
Bousselham[29]	DS1-2L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	430,5	ναι	0,013	
Bousselham[29]	DS2-1L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	468,9	ναι	0,013	
Bousselham[29]	DS2-2L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	487,1	ναι	0,013	
Bousselham[29]	SS0-0L	Μονότονη	-		0	0	όχι	0	25	Διάτμηση	122,7	όχι	0	0
Bousselham[29]	SS0-0,5L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	154,7	όχι	0,013	
Bousselham[29]	SS0-1L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	181,2	όχι	0,013	
Bousselham[29]	SS0-2L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	183,8	όχι	0,013	
Bousselham[29]	SS1-0,5L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	426	ναι	0,013	0,005
Bousselham[29]	SS1-1L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	385,2	ναι	0,013	0,0035
Bousselham[29]	SS1-2L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	403,6	ναι	0,013	0,0017
Bousselham[29]	SS2-0L	Μονότονη	-	-	-	-	όχι	0	25	Κάμψη	445,7	ναι	-	-



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
 ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ - ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ρθρο	Αριθμός Δοκιμίου Αρ. Δοκ. Πιν. (6.3-6.5)	Είδος φόρτισης	Υλικό Ενίσχυσης	FRP πλάτος $w_f$ (mm)	Γωνία FRP	Απόσταση sf (mm)	Υπαρξη Αγκύρωσης	Τύπος Επικόλλησης	Αντοχή Σκυροδέματος $f_c$ (MPa)	Μορφή Αστοχίας	Μέγιστη Τέμνουσα (kN)	Μεταλλικοί Συνδετήρες	$\epsilon_{ult}$	$\epsilon_{cr}$
Bousselham[29]	SS2-1L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Κάμψη	467,3	ναι	0,013	-
Bousselham[29]	SS2-2L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Κάμψη	448,9	ναι	0,013	-
Bousselham [37]	DS0-0L	Μονότονη	-	-	-	-	όχι	-	25	Διάτμηση	176,2	όχι	-	-
Bousselham [37]	DS0-1L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	194,7	όχι	0,013	-
Bousselham [37]	DS0-2L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	192,8	όχι	0,013	-
Bousselham [37]	DS1-1L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	195,1	ναι	0,013	-
Bousselham [37]	DS1-2L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	200,2	ναι	0,013	-
Bousselham [37]	SS0-0L	Μονότονη	-	-	-	-	όχι	-	25	Διατμηση	54,3	όχι	-	-
Bousselham [37]	SS0-1L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	89,2	όχι	0,013	-
Bousselham [37]	SS0-2L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	103	όχι	0,013	-
Bousselham [37]	SS1-1L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	143,9	ναι	0,013	-
Bousselham [37]	SS1-2L	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	90	0	όχι	U	25	Διάτμηση (αποκόλληση)	158	ναι	0,013	-
Chajes [36]	ctr1	Μονότονη	-	-	-	-	-	-	49,6	Διάτμηση	38.3	όχι	-	-
Chajes [36]	ctr2	Μονότονη	-	-	-	-	-	-	61,9	Διάτμηση	39.8	όχι	-	-
Chajes [36]	ctr3	Μονότονη	-	-	-	-	-	-	45,5	Διάτμηση	38.5	όχι	-	-
Chajes [36]	ctr4	Μονότονη	-	-	-	-	-	-	47,11	Διάτμηση	36.0	όχι	-	-
Chajes [36]	A1	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	0/90	0	όχι	U	45,5	Διάτμηση (αποκόλληση)	77.5	όχι	0,0225	-
Chajes [36]	A2	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	0/90	0	όχι	U	48,3	Διάτμηση (αποκόλληση)	60.1	όχι	0,0225	-
Chajes [36]	G1	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	0/90	0	όχι	U	41,8	Διάτμηση (αποκόλληση)	73.5	όχι	0,0134	0,005
Chajes [36]	G2	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	0/90	0	όχι	U	48,3	Διάτμηση (αποκόλληση)	68.0	όχι	0,0134	0,0059
Chajes [36]	c1	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	0/90	0	όχι	U	43,9	Διάτμηση (αποκόλληση)	71.0	όχι	0,0095	-
Chajes [36]	c2	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	0/90	0	όχι	U	47,1	Διάτμηση (αποκόλληση)	72.9	όχι	0,0095	0,0048
Chajes [36]	c1-45	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	45/135	0	όχι	U	47,1	Διάτμηση (αποκόλληση)	75.1	όχι	0,0095	-
Chajes [36]	C2-45	Μονότονη	ΑΙΟΠ	συνεχές	45/135	0	όχι	U	41,8	Διάτμηση (αποκόλληση)	94.6	όχι	0,0095	-
Παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα	CTB	Ανακυκλ/νη	-	-	-	-	-	-	20	Διάτμηση	37.25	όχι	-	-



**ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ - ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

ρθρο	Αριθμός Δοκιμίου Αρ. Δοκ. Πιν. (6.3-6.5)	Είδος φόρτισης	Υλικό Ενίσχυσης	FRP πλάτος $w_f$ (mm)	Γωνία FRP	Απόσταση sf (mm)	Υπαρξη Αγκύρωσης	Τύπος Επικόλλησης	Αντοχή Σκυροδέματος $f_c$ (MPa)	Μορφή Αστοχίας	Μέγιστη Τέμνουσα (kN)	Μεταλλικοί Συνδετήρες	$\epsilon_{ult}$	$\epsilon_{cr}$
Παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα	TB150 (Δ7)	Ανακυκλ/νη	ΧΙΟΠ	100	90	150	όχι	U	20	Διάτμηση (αποκόλληση)	73.2	όχι	0,011	0,005
Παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα	TB200 (Δ6)	Ανακυκλ/νη	ΧΙΟΠ	100	90	200	όχι	U	20	Διάτμηση (αποκόλληση)	58.3	όχι	0,011	0,004
Παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα	TB150L2t (Δ17)	Ανακυκλ/νη	ΧΙΟΠ	100	90	150	ναι	U	20	Διατμητικό ρήγμα και διαρροή διαμήκους σπλισμού	106.7	όχι	0,011	0,0052
Παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα	TB200L1t* (Δ16)	Ανακυκλ/νη	ΧΙΟΠ	100	90	200	ναι	U	20	Διατμητικό ρήγμα	115	όχι	0,011	0,01
Παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα	TB150B1b (Δ15)	Ανακυκλ/νη	ΧΙΟΠ	100	90	150	ναι	U	20	Διατμητικό ρήγμα Εξόγκευση βίδας αγκύρωσης (δράση αγκυρίου)	95.5	όχι	0,011	0,0055
Παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα	TB200P2b* (Δ14)	Ανακυκλ/νη	ΧΙΟΠ	100	90	200	ναι	U	20	Διατμητικό ρήγμα Εξόγκευση βίδας αγκύρωσης (δράση αγκυρίου)	116.4	όχι	0,011	0,005
Παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα	RB200C (Δ4)	Μονότονη	ΑΙΟΠ	100	90	200	όχι	U	20	Αποκόλληση	97.8	όχι	0,017	0,0073
Παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα	RB200Ca (Δ12)	Μονότονη	ΑΙΟΠ	100	90	200	ναι	U	20	Πρόωρη αστοχία ΑΙΟΠ	115.1	όχι	0,017	0,0066
Παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα	RB200S (Δ3)	Μονότονη	ΧΙΟΠ	100	90	200	όχι	U	20	Αποκόλληση	94	όχι	0,011	0,0059
Παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα	RB200Sa (Δ10)	Μονότονη	ΧΙΟΠ	100	90	200	ναι	U	20	Αγκύρωση	122	όχι	0,011	0,0064
Παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα	RB150C (Δ2)	Μονότονη	ΑΙΟΠ	100	90	150	όχι	U	20	Αποκόλληση	101	όχι	0,017	0,0056
Παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα	RB150Ca (Δ11)	Μονότονη	ΑΙΟΠ	100	90	150	ναι	U	20	Αστοχία ΑΙΟΠ	123	όχι	0,017	0,0071
Παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα	RB150S (Δ1)	Μονότονη	ΧΙΟΠ	100	90	150	όχι	U	20	Αποκόλληση	103	όχι	0,011	0,0049
Παρόν Ερευνητικό Πρόγραμμα	RB150Sa (Δ9)	Μονότονη	ΧΙΟΠ	100	90	150	ναι	U	20	Αγκύρωση	119	όχι	0,011	0,0078



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ACI, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-08)", in ACI 440.2R-08. 2008, American Concrete Institute: Farmington Hills. p. 45.
2. Ceroni, F. and M. Pecce, "Cracking behaviour of RC beams externally strengthened with emerging materials." Construction & Building Materials, 2007. 21(4): p. 736-45.
3. Casadei, P., A. Nanni, and T. Alkhrdaji, "Steel-reinforced polymer: An innovative and promising material for strengthening infrastructures." Concrete Engineering International, 2005. 9(1): p. 54-56.
4. Casadei, P., et al., "Performance of double-T prestressed concrete beams strengthened with steel reinforcement polymer." Advances in Structural Engineering, 2005. 8(4): p. 427-441.
5. Pecce, M., et al., "Response prediction of RC beams externally bonded with steel-reinforced polymers." Journal of Composites for Construction, 2006. 10(3): p. 195-203.
6. Wobbe, E., et al. "Flexural capacity of RC beams externally bonded with SRP and SRG". 2004. Long Beach, CA, United States: Soc. for the Advancement of Material and Process Engineering, Covina, CA 91724-3748, United States.
7. Barton, B., et al., "Characterization of reinforced concrete beams strengthened by steel reinforced polymer and grout (SRP and SRG) composites." Materials Science and Engineering A, 2005. 412(1-2): p. 129-136.
8. Prota, A., et al., "Performance of shallow reinforced concrete beams with externally bonded steel-reinforced polymer." ACI Structural Journal, 2006. 103(2): p. 163-70.
9. Lopez, A., et al., "Strengthening of a reinforced concrete bridge with externally bonded steel reinforced polymer (SRP)." Composites Part B (Engineering), 2007. 38(4): p. 429-36.
10. Katakalos, K. and C.G. Papakonstantinou, "Fatigue of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Steel-Reinforced Inorganic Polymers." Journal of Composites for Construction, 2009. 13(2): p. 103-112.
11. Papakonstantinou, C.G. and K. Katakalos, "Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams strengthened with a hybrid retrofit system." Structural Engineering and Mechanics, 2009. 31(4).
12. G.C. Manos, V.K., P. Matsoukas "Investigation of the flexural and shear capacity of simple R/C beam specimens including repair schemes with FRP". in FRPRCS-8 Conference. 2007. Patras.
13. Ritchie, P.A., et al., "External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced-Plastics." ACI Structural Journal, 1991. 88(4): p. 490-500.
14. Triantafyllou, T.C. and N. Plevris, "Strengthening of Rc Beams with Epoxy-Bonded Fiber-Composite Materials." Materials and Structures, 1992. 25(148): p. 201-211.
15. Sharif, A., et al., "Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates." ACI Structural Journal (American Concrete Institute), 1994. 91(2): p. 160-168.
16. Nanni, A., "Concrete repair with externally bonded FRP reinforcement." Concrete International, 1995. 17(6): p. 22-26.
17. Arduini, M. and A. Nanni, "Behavior of precracked RC beams strengthened with carbon FRP sheets." Journal of Composites for Construction, 1997. 1(2): p. 63-70.
18. Saadatmanesh, H. and A.M. Malek, "Design guidelines for flexural strengthening of RC beams with FRP plates." Journal of Composites for Construction, 1998. 2(4): p. 158-164.



19. Wu, Z.S. and H. Yoshizawa, "*Analytical/experimental study on composite behavior in strengthening structures with bonded carbon fiber sheets.*" Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1999. 18(12): p. 1131-1155.
20. Taljsten, B. and L. Elfgren, "*Strengthening concrete beams for shear using CFRP-materials: evaluation of different application methods.*" Composites Part B-Engineering, 2000. 31(2): p. 87-96.
21. Nanni, A. "*Guides and specifications for the use of composites in concrete and masonry construction in North America*". 2001. Capri, Italy: American Society of Civil Engineers.
22. Triantafyllou, T.C., "*Seismic retrofitting of structures with advanced composites - A review.*" Frp Composites in Civil Engineering, Vols I and II, Proceedings, 2001: p. 807-816
23. Smith, S.T. and J.G. Teng, "*FRP-strengthened RC beams. I: Review of debonding strength models.*" Engineering Structures, 2002. 24(4): p. 385-395.
24. Shaheen, H., et al. "*Behaviour of rectangular RC columns retrofitted by fibre reinforced polymers under axial and cyclic loading*". 2003. Dundee, United Kingdom: Thomas Telford Services Ltd, London, E14 4JD, United Kingdom.
25. Lopez, M.M., et al., "*Behavior of RC beams strengthened with FRP laminates and tested under cyclic loading at low temperatures.*" International Journal of Materials and Product Technology, 2003. 19(1-2): p. 108-117.
26. Triantafyllou, T.C. and C.P. Antonopoulos, "*Design of concrete flexural members strengthened in shear with FRP.*" Journal of Composites for Construction, 2000. 4(4): p. 198-205.
27. Khalifa, A., L. De Lorenzis, and A. Nanni, "*FRP composites for shear strengthening of RC beams.*" Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, 2000: p. 137-144
- 876.
28. Bousselham, A. and O. Chaallal, "*Maximum Shear Strength of RC Beams Retrofitted in Shear with FRP Composites.*" Journal of Composites for Construction, 2009. 13(4): p. 302-314.
29. Bousselham, A. and O. Chaallal, "*Behavior of reinforced concrete T-beams strengthened in shear with carbon fiber-reinforced polymer - An experimental study.*" ACI Structural Journal, 2006. 103(3): p. 339-347.
30. Bousselham, A. and O. Chaallal, "*Shear strengthening reinforced concrete beams with fiber-reinforced polymer: Assessment of influencing parameters and required research.*" ACI Structural Journal, 2004. 101(2): p. 219-227.
31. Bousselham, A., et al. "*Shear strengthening of concrete structures with FRP : A critical review of code design provisions*". 2003. Moncton, NB, Canada: Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, H3H 2R9, Canada.
32. Chaallal, O., M.J. Nollet, and D. Perraton, "*Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded fiber-reinforced-plastic plates: design guidelines for shear and flexure.*" Canadian Journal of Civil Engineering, 1998. 25(4): p. 692-704.
33. Rabinovitch, O. and Y. Frostig, "*Delamination failure of RC beams strengthened with FRP strips - A closed-form high-order and fracture mechanics approach.*" Journal of Engineering Mechanics, 2001. 127(8): p. 852-861.
34. (fib), I.F.f.S.C., "*Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*", in *Bulletin 14*, f.T.G. 9.3, Editor. 2001. p. 165.
35. Khalifa, A. and A. Nanni, "*Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites.*" Cement & Concrete Composites, 2000. 22(3): p. 165-174.
36. Chajes, M.J., et al., "*Shear Strengthening of Reinforced-Concrete Beams Using Externally Applied Composite Fabrics.*" ACI Structural Journal, 1995. 92(3): p. 295-303.



37. Boussselham, A. and O. Chaallal, "*Effect of transverse steel and shear span on the performance of RC beams strengthened in shear with CFRP.*" Composites Part B-Engineering, 2006. 37(1): p. 37-46.
38. Anil, O., "*Strengthening of RC T-section beams with low strength concrete using CFRP composites subjected to cyclic load.*" Construction and Building Materials, 2008. 22(12): p. 2355-2368.
39. Anil, O., "*Improving shear capacity of RC T-beams using CFRP composites subjected to cyclic load.*" Cement & Concrete Composites, 2006. 28(7): p. 638-649.
40. Tanarlan, H.M., Y. Ertutar, and S. Altin, "*The effects of CFRP strips for improving shear capacity of RC beams.*" Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2008. 27(12): p. 1287-1308.
41. Tanarlan, H.M. and S. Altin, "*Behavior of RC T-section beams strengthened with CFRP strips, subjected to cyclic load.*" Materials and Structures, 2010. 43(4): p. 529-542.
42. Mitolidis, G., T.N. Salonikios, and A.J. Kappos, "*Flexural and Shear Strengthening of Support Regions of R/C Beams using SRP and CFRP*", in *16th Concrete Conference*. 2009: Pafos, Cyprus.
43. Khalifa, A., et al., "*Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members.*" Journal of Composites for Construction, 1998. 2(4): p. 195-202.
44. Khalifa, A. and A. Nanni, "*Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites.*" Construction and Building Materials, 2002. 16(3): p. 135-146.
45. "*Construction and building materials*". 2003. London, United Kingdom: Elsevier Science Ltd.
46. Boussselham, A. and O. Chaallal, "*Contribution to the study of the shear reinforcement of concrete beams with the help of advanced composite materials.*" Canadian Journal of Civil Engineering, 2005. 32(2): p. 339-351.
47. Chaallal, O., M. Shahawy, and M. Hassan, "*Performance of reinforced concrete T-girders strengthened in shear with carbon fiber-reinforced polymer fabric.*" ACI Structural Journal, 2002. 99(3): p. 335-343.
48. Tanarlan, H.M., "*Repairing and strengthening of earthquake-damaged RC beams with CFRP strips.*" Magazine of Concrete Research, 2010. 62(5): p. 365-378.
49. Triantafyllou, T.C., "*Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites.*" ACI Structural Journal, 1998. 95(2): p. 107-115.
50. Barton, B., et al., "*Characterization of reinforced concrete beams strengthened by steel reinforced polymer and grout (SRP and SRG) composites.*" Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2005. 412(1-2): p. 129-136.
51. Papakonstantinou, C.G. and K. Katakalos, "*Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with a hybrid inorganic matrix - steel fiber retrofit system.*" Structural Engineering and Mechanics, 2009. 31(5): p. 567-585.
52. Hodhod, O.A. and M.A. Khalifa, "*Seismic performance of a fiber-reinforced plastic cable-stayed bridge.*" Structural Engineering and Mechanics, 1997. 5(4): p. 399-414.
53. 440, A.C., "*Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-02)*", in *ACI 440.2R-02*. 2002, American Concrete Institute: Farmington Hills. p. 45.
54. Ο.Α.Σ.Π., "*KANONISMOS ΕΠΙΕΜΒΑΣΕΩΝ (KAN.ΕΠΙΕ.) ΤΕΛΙΚΟ ΕΝΑΡΜΟΝΙΣΜΕΝΟ ΚΕΙΜΕΝΟ*". 2011.
55. 1998-3:2005, E., "*Eurocode 5 -Design of Structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings*". 2005, CEN: Brussels. p. 35-55.
56. Rostasy, F.S. and U. Neubauer. "*Bond behaviour of CFRP laminates for the strengthening of concrete members*". in *Proc., Compos.*



*Constr.-Conventional and Innovative*. 1997. Zurich.

57. G.C.Manos, K. Katakalos, and V.Kourtides, "*CONSTRUCTION STRUCTURE WITH STRENGTHENING DEVICE AND METHOD*". 2010.
58. Belarbi, A., S.-W. Bae, and A. Brancaccio, "*Behavior of full-scale RC T-beams strengthened in shear with externally bonded FRP sheets.*" *Construction and Building Materials*, 2011. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.102.
59. "*ASTM Standard D3039/D3039M-00(2006) Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*", ASTM International: West Conshohocken, PA.
60. Zhang, Z.C. and C.T.T. Hsu, "*Shear strengthening of reinforced concrete beams using carbon-fiber-reinforced polymer laminates.*" *Journal of Composites for Construction*, 2005. 9(2): p. 158-169.
61. Monti, G. and M. Liotta, "*Tests and design equations for FRP-strengthening in shear.*" *Construction and Building Materials*, 2007. 21(4): p. 799-809.
62. Carolin, A. and B. Taljsten, "*Probabilistic design of FRP strengthening of concrete structures.*" *High Performance Structures and Materials Iv*, 2008. 97: p. 481-489
63. Chen, J.F. and J.G. Teng, "*Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding.*" *Construction and Building Materials*, 2003. 17(1): p. 27-41.
64. Mofidi, A. and O. Chaallal, "*Shear Strengthening of RC Beams with Externally Bonded FRP Composites: Effect of Strip Width to Strip Spacing Ratio*", *Journal of Composites for Construction*, 2011. 15(5): p. 11.