

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ TRM ΚΑΙ FRP ΣΕ ΘΕΜΑΤΑ ΕΠΙΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013 ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΑΤΖΑΜΠΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ

Προπτυχιακή Φοιτήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Παν.Πατρών, julie.atzampou@gmail.com

ΖΑΧΑΡΟΠΟΥΛΟΥ ΕΛΕΝΗ

Προπτυχιακή Φοιτήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Παν.Πατρών, elenciv@gmail.com

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, προκειμένου να αναδείξουμε την αποτελεσματικότητα των σύνθετων υλικών FRP και TRM σε διάφορες εφαρμογές επεμβάσεων, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από πειράματα ενίσχυσης υποστυλώματος μέσω περίσφιγξης με ή χωρίς ανεπαρκή μήκη μάτισης, δοκού σε διάτμηση και δοκού σε κάμψη. Στη συνέχεια, θα προσδιορίσουμε μέσω ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013 τα είδη αστοχίας και τα μηχανικά χαρακτηριστικά (πλαστιμότητα, διατμητική αντοχή κ.ο.κ.) που προέκυψαν μετά την ενίσχυση των δοκιμίων, έτσι ώστε να ελέγξουμε αν συμφωνούν με αυτά των πειραμάτων. Το ενδιαφέρον αυτής της εργασίας, έγκειται τόσο στη σύγκριση των δύο σύνθετων υλικών όσο και στις εκτενείς και διαφορετικές εφαρμογές που αυτά βρίσκουν σε θέματα επεμβάσεων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας, είναι να αναδείξουμε την αποτελεσματικότητα των σύνθετων υλικών FRP και TRM σε διάφορες εφαρμογές ενισχύσεων από πειραματικές δοκιμές, καθώς και να τις συγκρίνουμε με τις εκτιμήσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 σε όρους αντοχών και μορφών αστοχίας, για την περίπτωση των ινοπλισμένων πολυμερών.

Οι βλάβες που προκαλούνται από σεισμούς σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, η προσεισμική ενίσχυση, η γήρανση και φθορά των κατασκευών, καθώς και η αλλαγή χρήσης, οδηγούν ολοένα και περισσότερο προς την αναζήτηση νέων υλικών και τεχνικών επεμβάσεων οι οποίες εξασφαλίζουν αποτελεσματικότητα, ταχύτητα και ευκολία στην εφαρμογή, διατήρηση της γεωμετρίας των δομικών στοιχείων και μείωση του κόστους.[6]

Τα **ινοπλισμένα πολυμερή (FRP)**, είναι σύνθετα υλικά που αποτελούνται από συνεχείς ίνες (συνήθως άνθρακα, γυαλιού και αραμιδίου) με υψηλή εφελκυστική αντοχή, εμποτισμένες συνήθως με εποξειδική ρητίνη. Η ρητίνη διατίθεται σε μορφή δύσκαμπτων λωρίδων (πάχους της τάξης του 1 mm) ή εύκαμπτων υφασμάτων (πάχους 0,1-0,4 mm). Τα χαρακτηριστικά των ινοπλισμένων πολυμερών εξαρτώνται από την περιεκτικότητά τους σε ίνες. Οι ίνες αυτές, είναι το κύριο στοιχείο μεταφοράς φορτίου και παρουσιάζουν υψηλή ακαμψία όταν υπόκεινται σε καταπόνηση. [11]



Σχήμα 1: Φύλλα αραμιδίου, γυαλιού και άνθρακα [2]

Βασικά χαρακτηριστικά που εντάσσονται στα **πλεονεκτήματά των FRP** είναι:

- Η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή.
- Το χαμηλό βάρος.
- Η ανθεκτικότητα σε διάρκεια.
- Η απλή τεχνική εφαρμογής, η οποία βασίζεται στην εξωτερική επικόλληση των σύνθετων υλικών, ενώ χαρακτηρίζεται από ευελιξία και ταχύτητα εκτέλεσης.
- Η μεγάλη ικανότητα παραμόρφωσης.

Παρ' όλα τα πλεονεκτήματά της, η τεχνική των ινοπλισμένων πολυμερών έχει ορισμένες **αδυναμίες** που οφείλονται κυρίως στη χρήση ρητινών. Τέτοιες είναι :

- Η πτωχή συμπεριφορά (απώλεια αντοχής) των ρητινών σε θερμοκρασίες άνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (της τάξης των 70-80 °C).
- Το σχετικά υψηλό κόστος των ρητινών.
- Η αδυναμία εφαρμογής σε υγρές επιφάνειες (εκτός αν γίνει χρήση ρητινών ειδικού τύπου).
- Ο περιορισμός της ικανότητας “αναπνοής” των δομικών στοιχείων που καλύπτονται από μανδύες FRP.
- Η ασυμβατότητα ρητινών με υλικά ιστορικών κατασκευών
- Η δυσκολία διεξαγωγής μη καταστροφικής αποτίμησης πιθανών βλαβών “πίσω” από μανδύες FRP μετά από σεισμούς.

Για τους παραπάνω λόγους, αναπτύχθηκε η τεχνική της ενίσχυσης με μανδύες ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα, η οποία ξεκίνησε προ ολίγων ετών ακολουθώντας την αυξανόμενη παραγωγή δομικών κονιαμάτων υψηλών επιδόσεων.

Τα **ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας (TRM)**, προέκυψαν από την αντικατάσταση των συμβατικών υφασμάτων συνεχών ινών (συνήθως άνθρακα, υάλου, αραμιδίου και βασάλτη) μιας διεύθυνσης με υφάσματα ινών σε μορφή πλέγματος με βροχίδες. Τα πλέγματα αυτά μπορούν να κατασκευάζονται από κλώνους ινών ανά αποστάσεις σε δύο ή περισσότερες διευθύνσεις, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η καλή συνεργασία ινών – μητρικού υλικού (κονίαμα) κυρίως μέσω μηχανικής εμπλοκής του κονιάματος στα κενά μεταξύ των δεσμών (βροχίδες). [11]

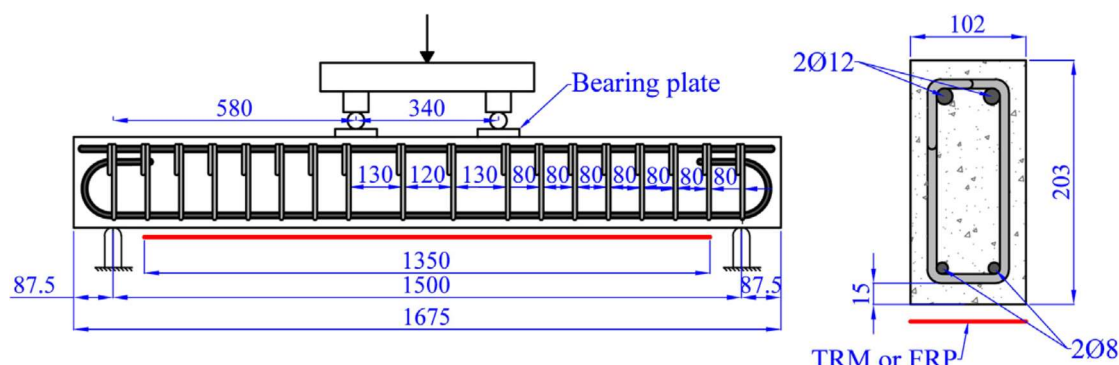
2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013

2.1 Δοκιμή κάμψης δοκών ορθογωνικής διατομής

2.1.1 Περιγραφή του πειράματος

Σε αυτή τη δημοσίευση [3], συγκρίνεται η απόκριση σε κάμψη ενισχυμένων δοκών οπλισμένου σκυροδέματος που ενισχύθηκαν με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας και ινοπλισμένα πολυμερή . Οι παράμετροι που εξετάστηκαν, πέρα από αυτό καθεαυτό το υλικό ενίσχυσης, ήταν ο αριθμός των στρώσεων του υλικού ενίσχυσης, το είδος της επιφάνειας του υφάσματος (με επικάλυψη ή χωρίς επικάλυψη), το υλικό των ινών που περιείχαν τα σύνθετα υλικά (άνθρακας, γυαλί, επικαλυμμένος βασάλτης), καθώς και το σύστημα αγκύρωσης της εξωτερικής ενίσχυσης στις δοκούς. Κατασκευάστηκαν δεκατρείς δοκοί Ο.Σ. ορθογωνικής διατομής (102mm*203mm) και μήκους 1675mm, και αφού ενισχύθηκαν, ελέγχθηκαν έναντι κάμψης τεσσάρων σημείων. Από αυτές, μία χρησιμοποιήθηκε ως δοκίμιο ελέγχου και δεν ενισχύθηκε, επτά ενισχύθηκαν στο εφελκυσμένο πέλμα με εξωτερική στρώση από TRM και οι υπόλοιπες πέντε δοκοί ενισχύθηκαν κατά όμοιο τρόπο με FRP.

Όλες οι δοκοί σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να έχουν μικρό ποσοστό διαμήκους οπλισμού (0,56%), προκειμένου να προσομοιάσουν δοκούς με χαμηλή καμπτική αντοχή. Ο οπλισμός στο εφελκόμενο τμήμα της δοκού αποτελείται από από 2 ράβδους $\varnothing 8$, ενώ στη θλιβόμενη ζώνη τοποθετήθηκαν 2 ράβδοι $\varnothing 12$. Εκτός από τις διαμήκεις ράβδους, τοποθετήθηκε και εγκάρσιος οπλισμός διάτμησης. Συγκεκριμένα, η περίσφιγξη αποτελείτο από ράβδους $\varnothing 8$ τοποθετημένες ανά 80mm, έτσι ώστε η αντοχή σε διάτμηση να είναι επτά φορές υψηλότερη από τη δύναμη διάτμησης που προκαλείται λόγω κάμψης στις μη ενισχυμένες περιοχές. Τέλος, σε όλες τις δοκούς η επικάλυψη σκυροδέματος ήταν ίδια και ίση με 15 mm. Οι διαστάσεις των δοκών, οι οπλισμοί καθώς και η ενίσχυση είναι ευδιάκριτα στο Σχήμα 2 :



Σχήμα. 2. Λεπτομερειακή απεικόνιση των δοκιμών(διαστάσεις σε mm) [3]

Ο συμβολισμός των ενισχυμένων δοκιμών είναι BN_F, όπου το B αντιπροσωπεύει τον τύπο του συνδετικού υλικού της ενίσχυσης (R για εποξειδική ρητίνη και M για τσιμεντοκονίαμα), το N αναφέρεται στον αριθμό των στρώσεων από FRP και TRM και το F συμβολίζει τον τύπο των ινών του σύνθετου υλικού (C για ίνες άνθρακα, CCo για ίνες με επικαλυμμένο άνθρακα, BCo για ίνες επικαλυμμένες με βασάλτη και G για ίνες γύψου). Για τα δοκίμια που ενισχύθηκαν και με μανδύες τύπου U στις απολήξεις των ενισχύσεών τους, υπάρχει ο συμβολισμός EA στην ονομασία τους. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των δοκιμών καθώς και η απεικόνισή τους στο Σχήμα 3:

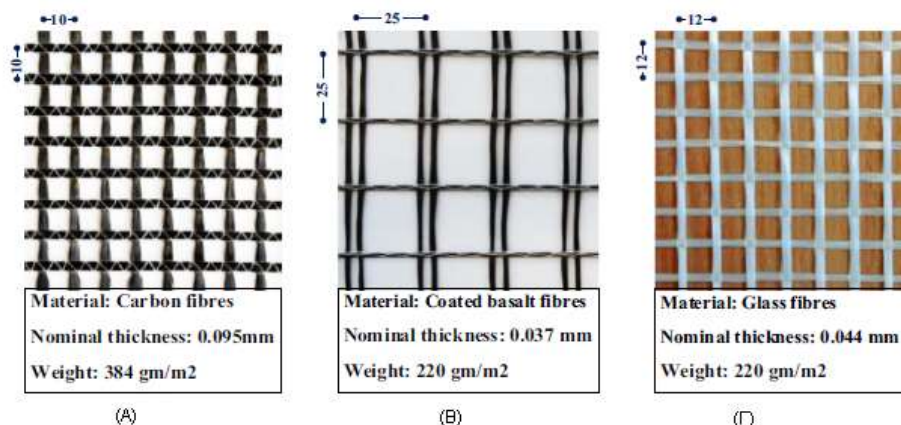
Textile material	Textile+ cement based mortar	Textile+ epoxy resin
	TRM	FRP
Carbon Textile fibres	M1_C M1_CCo M3_C M5_C M3_C_EA	R1_C R3_C R3_C_EA
Basalt Textile fibres	M7_BCo	R7_BCo
Glass Textile fibres	M7_G	M7_G

Σχήμα 3. Τα δοκίμια χωρισμένα σε ομάδες και απεικόνιση του μανδύα U στις άκρες της δοκού(διαστάσεις σε mm). [3]

Δοκίμια	Χαρακτηρισμός
CON	Δοκίμιο ελέγχου
R1_C	1 στρώση FRP με ίνες ξηρού άνθρακα
M1_C	1 στρώση TRM με ίνες ξηρού άνθρακα
M1_CCo	1 στρώση από TRM με επικαλυμμένες ίνες άνθρακα
R3_C	3 στρώσεις από FRP με ίνες ξηρού άνθρακα.
M3_C	3 στρώσεις από TRM με ίνες ξηρού άνθρακα
M5_C	5 στρώσεις από TRM με ίνες ξηρού άνθρακα
R7_BCo	7 στρώσεις από FRP με επικαλυμμένες ίνες βασάλτη.
M7_BCo	7 στρώσεις από TRM με επικαλυμμένες ίνες βασάλτη.
R7_G	7 στρώσεις από FRP με ίνες ξηρού γυαλιού.
M7_G	7 στρώσεις από TPM με ίνες ξηρού γυαλιού
R3_C_EA	3 στρώσεις από FRP με ίνες ξηρού άνθρακα, οι οποίες στα άκρα τους φέρουν και αγκυρωμένους μανδύες U δύο στρώσεων από όμοια FRP
M3_C_EA	3 στρώσεις από TRM με ίνες ξηρού άνθρακα, οι οποίες στα άκρα τους φέρουν και αγκυρωμένους μανδύες U δύο στρώσεων από όμοια TRM

Οι δοκοί κατασκευάστηκαν σε δύο διαφορετικές μέρες και έγινε χρήση του ίδιου τσιμεντοειδούς μίγματος, ενώ την ημέρα που έγινε ο έλεγχος τους, προσδιορίστηκαν οι θλιπτικές και εφελκυστικές αντοχές τους. Για τον έλεγχο του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν τρία κυλινδρικά δοκίμια ύψους 300 mm και διαμέτρου 150 mm, τα οποία ελεγχθήκαν σύμφωνα με τα πρότυπα EN 12390-3 και EN12390-6.

Λεπτομέρειες για τα υλικά ενίσχυσης, όπως το βάρος οι διαστάσεις των κενών του πλέγματος και το ισοδύναμο πάχος (υπολογιζόμενο βάση της ισοδύναμης κατανομής των ινών), είναι εμφανείς στο Σχήμα 4. Αξίζει να σημειωθεί ότι, επτά στρώσεις υλικού ενίσχυσης με ίνες από γυαλί ή επικαλυμμένο βασάλτη παρουσιάζουν περίπου την ίδια δυσκαμψία με μία στρώση υλικού από ίνες ξηρού άνθρακα.



Σχήμα 4. Υφάσματα ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα: (Α)ύφασμα από ίνες άνθρακα, (Β) ύφασμα από ίνες επικαλυμμένου βασάλτη και (Γ) ύφασμα από ίνες γυαλιού (διαστάσεις σε mm).[3]

Μετά το πέρας των πειραματικών δοκιμών, διαπιστώθηκε ο τρόπος αστοχίας κάθε δοκιμίου. Συγκεκριμένα, στα δοκίμια που ενισχύθηκαν με FRP παρατηρήθηκαν δύο τύποι αστοχίας: αποκόλληση του σύνθετου υλικού από την επιφάνεια του σκυροδέματος (R1_C και R3_C) και θραύση των ινών (R7_Bco, R7_G και R3_C_EA). Τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με TRM, αστόχησαν λόγω ολίσθησης των ινών του σύνθετου υλικού και μερικής θραύσης τους (M1_C), αποκόλλησης της ενίσχυσης με (M3_C και M5_C) ή χωρίς (M1_CCo) αποκόλληση τμήματος της επιφάνειας του σκυροδέματος, καθαρής θραύσης των ινών (M7_BCo και M7_G), καθώς και λόγω συνδυασμού ολίσθησης των ινών και αποκόλλησης του υλικού ενίσχυσης (M3_C_EA). Στο δοκίμιο M3_C_EA, εφαρμόστηκαν κατόπιν στα άκρα του μανδύες U και έτσι επιτεύχθηκε αστοχία μόνο λόγω θραύσης των ινών (επιθυμητός τρόπος). Όπως ήταν αναμενόμενο η δοκός ελέγχου αστόχησε λόγω θραύσης του σκυροδέματος.

Τα αποτελέσματα του πειράματος οδήγησαν στα εξής συμπεράσματα:

- Η ενίσχυση έναντι κάμψης με TRM είχε γενικά χαμηλότερη αποδοτικότητα από αυτή με FRP, με λόγο αποτελεσματικότητας TRM/FRP 0,46 έως 0,80.
- Τριπλασιάζοντας τις στρώσεις των TRM, διπλασιάστηκε ο λόγος αποδοτικότητας TRM/FRP.
- Καλύπτοντας με μανδύα U τις απολήξεις των δοκών, αυξήθηκε η ικανότητα παραλαβής καμπτικής καταπόνησης των μεν με TRM κατά 9% και των δε με FRP κατά 90% .
- Τα διαφορετικά υλικά από τα οποία αποτελούνταν οι ίνες των σύνθετων υλικών, οδήγησαν σε διαφορετικές αυξήσεις της καμπτικής αντοχής. Καλύτερη συμπεριφορά έναντι κάμψης, παρουσίασαν τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με επτά στρώσεις υφάσματος με ίνες από επικαλυμμένο βασάλτη, ακλουθούν τα δοκίμια με επτά στρώσεις υφάσματος από ίνες γυαλιού και τέλος τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με μία στρώση υφάσματος από ίνες άνθρακα.
- Επικαλύπτοντας με εποξειδική ρητίνη τις ίνες από βασάλτη, αυξήθηκε η αποτελεσματικότητα των TRM κατά 55% σε σχέση με τη χρησιμοποίηση ινών ξηρού βασάλτη.

2.1.2 Εφαρμογή ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 [1]

Αρχικά, λάβαμε από το πείραμα τις τιμές για τα εξής, χρήσιμα για τους υπολογισμούς μας, μεγέθη :

- Τις διαστάσεις διατομής των δοκών (b_b, h_b)
- Τις θλιπτικές και εφελκυστικές αντοχές του σκυροδέματος των δοκιμίων (f_{cm}, f_{ctm})
- Τον τύπο του υλικού ενίσχυσης (FRP με ίνες από επικαλυμμένο βασάλτη, FRP με ίνες άνθρακα, FRP με ίνες υάλου)
- Τον αριθμό των στρώσεων του υλικού ενίσχυσης (k)
- Τα πάχη των υλικών ενίσχυσης (t_j)
- Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενίσχυσης (E_j)
- Την εφελκυστική αντοχή του υλικού ενίσχυσης (f_{jd})

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013, όταν οι στρώσεις του σύνθετου υλικού ξεπερνούν τις τέσσερις , τότε τόσο το τελικό πάχος του όσο και η εφελκυστική αντοχή του *πολ/ζονται* με τον μειωτικό συντελεστή αποδοτικότητας πολλών στρώσεων (ψ). Καθ' υπόδειξη της §6.2.3 έχουμε:

Αν $k \geq 4$ τότε $\psi = k^{-1/4}$ και

$$t'_j = \psi k t_j$$

$$f'_{jd} = \psi f_{jd}$$

Η τελική αντοχή των FRP υπολογίστηκε διαιρώντας την αρχική εφελκυστική αντοχή τους (f_{jd} ή f'_{jd}) με τον συντελεστή $\gamma_m=1,2$ (§4.5.3.2α /ΚΑΝ.ΕΠΕ.).

Στη συνέχεια, σύμφωνα με την §8.2.1.3, έγιναν με την σειρά οι εφαρμογές των παρακάτω τύπων, προκειμένου να προσδιοριστεί η ενεργή τάση του σύνθετου υλικού (σ_{jd}):

- $L_e = \sqrt{\frac{E_j t_j}{2 f_{ctm}}}$: ενεργό μήκος αγκύρωσης (δηλ.το μήκος πέραν του οποίου η αναλαμβανόμενη από το υλικό δύναμη ενίσχυσης, δεν αυξάνεται άλλο).
- $\beta_L=1$: συντελεστής επιρροής του διατιθέμενου μήκους αγκύρωσης (ισούται με 1 υπό την προϋπόθεση ότι το ενεργό μήκος αγκύρωσης είναι μεγαλύτερο του διατιθέμενου μήκους αγκύρωσης του υλικού ενίσχυσης)
- $\beta_W = \frac{\sqrt{2}}{2}$: συντελεστής επιρροής πλάτους οπλισμού ενίσχυσης (λαμβάνει αυτή την τιμή λόγω της παραδοχής ότι το το πλάτος του υλικού ενίσχυσης ισούται με το πλάτος του εφελκυσμένου πέλματος του δομικού στοιχείου επί του οποίου επικολλάται το υλικό ενίσχυσης)
- $\beta = \beta_W \beta_L$: διορθωτικός συντελεστής της κρίσιμης τάσης
- $\sigma_{j,crit} = \beta \frac{f_{ctm}}{t_j} L_e$: κρίσιμη τιμή της ενεργού τάσης του υλικού ενίσχυσης
- $\sigma_{jd} = \frac{\sigma_{j,crit}}{\gamma_m}$: τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης του υλικού ενίσχυσης

Η πρόσθετη ροπή που καλείται να αναλάβει η ενίσχυση είναι:

$$\Delta M_{do} = A_j z \sigma_{jd} \quad (\Sigma 8.2), \text{ όπου } A_j \text{ απαιτούμενη διατομή οπλ.ενίσχυσης}$$

Η καμπτική αντοχή του δοκιμίου ελέγχου υπολογίστηκε μέσω των πινάκων και σχέσεων που προτείνει ο EC2 για δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος (Πίν.4.1, [9])

Ακολούθως, συγκρίνουμε την ενεργό τάση με την εφελκυστική αντοχή του υλικού ενίσχυσης. Με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 [1], όταν η πρώτη είναι μεγαλύτερη της δεύτερης συμβαίνει αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης, διαφορετικά πραγματοποιείται θραύση αυτού. Στο κεφάλαιο 2.1.3, διαπιστώνουμε κατά πόσο συμφωνούν οι τρόποι αστοχίας που κατέδειξε ο κανονισμός με τις αστοχίες που διαπιστώθηκαν πειραματικά στα δοκίμια.

2.1.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Παρατίθενται σχήματα με τα αναλυτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013, και ακολουθούν σχόλια και παρατηρήσεις επί αυτών.

Όνομα Δοκιμίου	Αντοχή FRP(MPa)	Αποκόλληση σjd (MPa)	Τελική αστοχία από ΚΑΝ.ΕΠΕ
CON	0	0	
R1_C	2.446,667	980,064	Αποκόλληση
R3_C	2.446,667	565,840	Αποκόλληση
R7_Bco	768,998	509,574	Αποκόλληση
R7_G	522,058	453,103	Αποκόλληση
R3_C_EA	2.446,667	565,840	Θραύση ενισχ. Υλ *

Σχήμα 5. Εκτίμηση μορφής αστοχίας μέσω ΚΑΝ.ΕΠΕ

Όνομα Δοκιμίου	Τελική αστοχία από ΚΑΝ.ΕΠΕ	Αστοχία (Πείραμα)	Σύγκριση
CON		Θραύση Σκυροδέματος	
R1_C	Αποκόλληση	Αποκόλληση	
R3_C	Αποκόλληση	Αποκόλληση	
R7_Bco	Αποκόλληση	Θραύση σύνθετου υλικού	
R7_G	Αποκόλληση	Θραύση σύνθετου υλικού	
R3_C_EA	Θραύση ενισχ. Υλ *	Θραύση σύνθετου υλικού	

Σχήμα 6.Σύγκριση μορφών αστοχίας πειράματος - κανονισμού

Όνομα Δοκιμίου	Ενισχυμένη Καμπτική Αντοχή ΚΑΝ.ΕΠΕ(KNm)	Ενισχυμένη Καμπτική Αντοχή Πείραμα (KNm)	Αύξηση Αντοχής (%) (ΚΑΝ.ΕΠΕ)	Αύξηση Αντοχής(%) (Πείραμα)
CON	7,512	10,030	0,00	0
R1_C	9,222	12,730	22,76	26,92%
R3_C	10,476	17,520	39,46	74,68%
R7_Bco	9,007	15,720	19,91	56,73%
R7_G	9,089	13,980	21,00	39,38%
R3_C_EA	20,327	24,300	170,61	142,27%

Σχήμα 7.Υπολογισμός αύξησης καμπτικής αντοχής πειράματος - κανονισμού

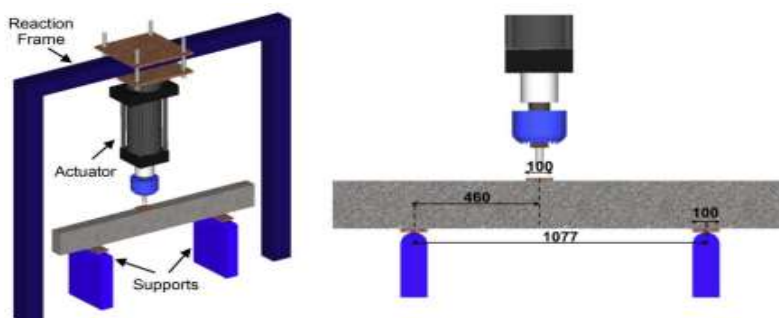
Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα καταλήξαμε στα εξής συμπεράσματα και παρατηρήσεις:

- Το δοκίμιο R3_C_EA ενισχύθηκε με μανδύες τύπου U στις απολήξεις της κυρίως ενίσχυσης, με αποτέλεσμα την αύξηση της δυνατότητας ανάληψης καμπτικής καταπόνησης ως και 170% σε σχέση με το δοκίμιο ελέγχου και 131% σε σχέση με το δοκίμιο χωρίς απολήξεις U (R3_C). Το δοκίμιο R3_C_EA αστόχησε λόγω θραύσης των ινών του υφάσματος με το οποίο είχε ενισχυθεί. Ωστόσο, εφαρμόζοντας τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 προκύπτει αστοχία λόγω αποκόλλησης, όμως η χρήση μανδύων U παρεμποδίζει την αποκόλληση στις απολήξεις και οδηγεί σε θραύση του υλικού. Ο κανονισμός έχει προβλέψει διατμητική ενίσχυση στις απολήξεις με μανδύες U η οποία οδηγεί σε αύξηση της διατμητικής αντοχής αλλά δεν προκύπτει αύξηση της καμπτικής αντοχής (βλ. Σχήμα 7).
- Η ασυμφωνία του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 με τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνεται και από τον τρόπο αστοχίας που υποδεικνύει για τα δοκίμια R7_Bco και R7_G (βλ. Σχήμα 6). Συγκεκριμένα, κατά τον κανονισμό φαίνεται να αστοχούν με αποκόλληση του σύνθετου υλικού, ενώ στην πραγματικότητα πραγματοποιήθηκε θραύση των ινών. Συνεπώς, για τις περιπτώσεις των δοκιμών R7_Bco και R7_G είναι προφανές ότι ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 δεν επαληθεύει τα πειραματικά αποτελέσματα, πιθανώς λόγω των πολλών στρώσεων σύνθετων φύλλων (στρώσεις: 7, αποκλίσεις από τον διορθωτικό συντελεστή ψ). Ωστόσο, επαληθεύει ότι τα δοκίμια R1_C και R3_C αστοχούν λόγω αποκόλλησης του σύνθετου υλικού.
- Αξίζει να αναφερθεί ότι η % αύξηση της καμπτικής αντοχής όλων των δοκιμών, όπως προκύπτει από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013, είναι μικρότερη από την αντίστοιχη που αποδεικνύεται πειραματικά, όμως παραμένει ίδιας τάξης μεγέθους. Συνεπώς, ο Κανονισμός είναι συντηρητικός δίνοντας 39% αύξηση της καμπτικής αντοχής από την αντίστοιχη πραγματική που είναι 74% (δοκίμιο R3_C, Σχήμα 7).
- Η καμπτική αντοχή του δοκιμίου ελέγχου που προκύπτει από EC2 ενδεχομένως να οδηγεί σε εππλέον απόκλιση πέρα από αυτή του ΚΑΝ.ΕΠΕ (δοκίμιο CON, Σχήμα 7).

2.2 Δοκιμή διάτμησης δοκών ορθογωνικής διατομής

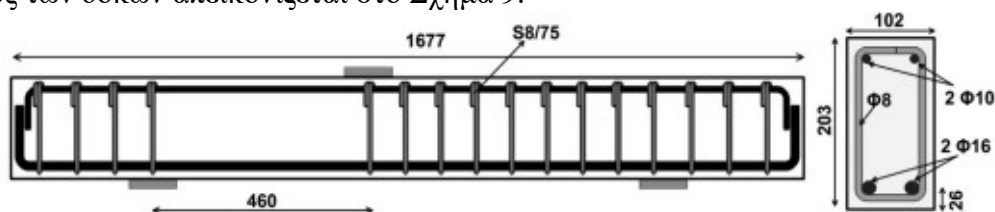
2.2.1 Περιγραφή του πειράματος

Σε αυτή την δημοσίευση [4], συγκρίνεται η ενίσχυση έναντι διάτμησης με μανδύες σύνθετων υλικών από ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας και ινοπλισμένα πολυμερή. Οι δοκοί είχαν μήκος 1677 mm και ήταν ορθογωνικής διατομής πλάτους 102 mm και ύψους 203 mm. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν, πέρα από αυτό καθαυτό το υλικό ενίσχυσης, ήταν ο αριθμός των στρώσεων και ο τρόπος εφαρμογής του μανδύα (μανδύες τύπου U, ολόσωμοι ή τοποθετημένοι μόνο σε μία πλευρά του μήκους). Κατασκευάστηκαν συνολικά δεκατέσσερις δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος, εκ των οποίων ένας δεν ενισχύθηκε και χρησίμευσε ως δοκίμιο ελέγχου, οκτώ ενισχύθηκαν με μανδύες από TRM και πέντε με μανδύες από FRP. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν σε δύο στηρίξεις που απέχαν 1077 mm (αυτό ήταν και το μήκος στο οποίο τοποθετήθηκε η ενίσχυση) και εφαρμόστηκε αξονικό φορτίο σε απόσταση 460 mm από την μία στήριξη, παράλληλα στη διεύθυνση του ύψους τους (Σχήμα 8).



Σχήμα 8. Εφαρμογή της φόρτισης [4]

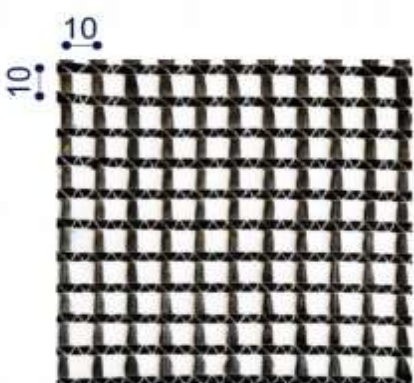
Πρέπει να σημειωθεί, ότι δεν ήταν τυχαία η θέση εφαρμογής του αξονικού φορτίου, καθώς προκειμένου να προσομοιωθούν τα δοκίμια με δοκούς χαμηλής διατμητικής αντοχής, δεν τοποθετήθηκε περίσφιγξη σε μήκος 460 mm από το αριστερό άκρο στήριξης. Το μήκος αυτό, αντιπροσωπεύει τη μικρότερη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μηδενισμών της ροπής. Στα υπόλοιπα τμήματα της δοκού τοποθετήθηκε εγκάρσιος οπλισμός $\phi 8$ ανά 75 mm, ενώ ο διαμήκης οπλισμός ήταν συνεχής και αποτελείτο από 2 ράβδους $\phi 16$ στην εφελκυσμένη ζώνη και 2 ράβδους $\phi 10$ στην θλιβόμενη ζώνη. Τα δοκίμια είναι σχεδιασμένα να αστοχούν λόγω διάτμησης, καθώς η διατμητική δύναμη που απαιτείται προκειμένου να φτάσουν οι δοκοί την καμπτική τους αντοχή, είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από την διατμητική αντοχή τους. Ο οπλισμός των δοκών απεικονίζεται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9. Εγκάρσιος και διαμήκης οπλισμός των δοκιμών [4]

Δοκίμιο	Χαρακτηρισμός
SB_M1	Πλευρική ενίσχυση 1 στρώση TRM
SB_M2	Πλευρική ενίσχυση 2 στρώσεις TRM
SB_M3	Πλευρική ενίσχυση 3 στρώσεις TRM
SB_R1	Πλευρική ενίσχυση 1 στρώση FRP
SB_R2	Πλευρική ενίσχυση 2 στρώσεις FRP
UW_M1	Ενίσχυση U με 1 στρώση TRM
UW_M2	Ενίσχυση U με 2 στρώσεις TRM
UW_M3	Ενίσχυση U με 3 στρώσεις TRM
UW_R1	Ενίσχυση U με 1 στρώση FRP
UW_R2	Ενίσχυση U με 2 στρώσεις FRP
FW_M1	Κλειστή ενίσχυση 1 στρώση TRM
FW_M2	Κλειστή ενίσχυση 2 στρώσεις FRP
FW_R1	Κλειστή ενίσχυση 1 στρώση

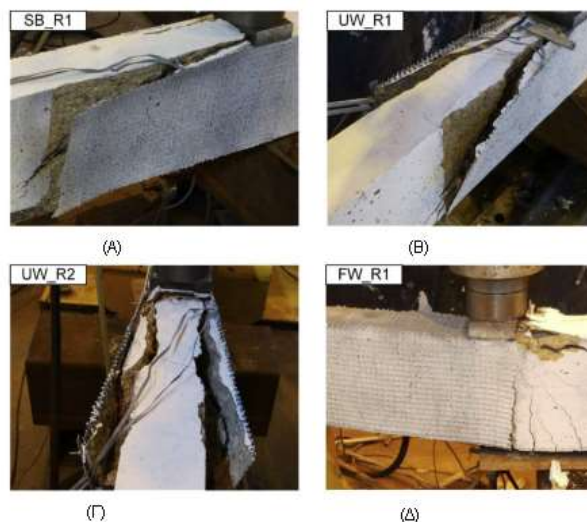
	Textile + Cement based mortar TRM	Textile + Epoxy resin FRP
SB	SB_M1 SB_M2 SB_M3	SB_R1 SB_R2
UW	UW_M1 UW_M2 UW_M3	UW_R1 UW_R2
FW	FW_M1 FW_M2	FW_R1



Σχήμα 10. Κατηγοριοποίηση των δοκιμών και λεπτομέρεια πλέγματος από άνθρακα[4]

Οι δοκοί κατασκευάστηκαν σε ομάδες των τεσσάρων και έγινε χρήση του ίδιου σκυροδέματος, ενώ την ημέρα που έγινε ο έλεγχος τους, προσδιορίστηκαν οι θλιπτικές και εφελκυστικές αντοχές τους παίρνοντας τον μέσο όρο από τις μετρήσεις τριών κυλινδρικών δοκιμών ύψους 300 mm και διαμέτρου 150 mm. Για την παρασκευή των FRP, χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη ρητίνης σε αναλογία 2:1, ενώ για τα TRM, χρησιμοποιήθηκε ανόργανη συνδετική ύλη από τσιμέντο και πολυμερή με λόγο 8:1 κατά βάρος, ενώ τα μηχανικά χαρακτηριστικά του κονιάματος προσδιορίστηκαν από δοκιμές πρισμάτων με διαστάσεις 40 x 40 x 160 mm.

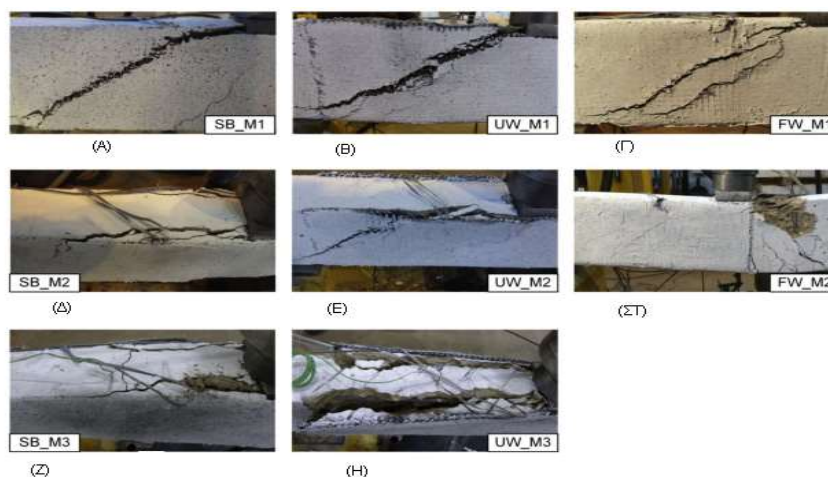
Μετά το πέρας των πειραματικών δοκιμών, διαπιστώθηκε ο τρόπος αστοχίας κάθε δοκιμίου. Συγκεκριμένα, όλα τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με FRP αστόχησαν διατμητικά με αποκόλλησή τους από την επιφάνεια των δοκών, εκτός του FW_R1 στο οποίο εκδηλώθηκε καμπτική αστοχία με θραύση του σκυροδέματος εκτός της ενισχυμένης περιοχής (Σχήμα 11).



(Α) Αποκόλληση πλευρικά τοποθετημένου μανδύα από ΙΟΠ
(Β),(Γ) Αποκόλληση μανδύα τύπου U από ΙΟΠ
(Δ) Καμπτική αστοχία δοκιμίου με ενίσχυση ολόσωμου μανδύα από ΙΟΠ

Σχήμα 11. Αστοχία δοκιμών με ενίσχυση από μανδύες FRP [4]

Τα δοκίμια με ενίσχυση από μανδύες TRM, αστόχησαν διατμητικά με θραύση των ινών ή αποκόλληση του μανδύα (ανάλογα με το πλήθος των στρώσεων), όπως φαίνεται στο Σχήμα 12.



(Α)-(Γ): Τοπική φθορά του μανδύα από ΙΑΜ
(Δ),(Ε): Αποκόλληση του μανδύα από ΙΑΜ σε εκτεταμένη περιοχή της άσπλης ζώνης του δοκιμίου.
(ΣΤ): Διατμητική αστοχία και ρηγμάτωση λόγω διάτμησης του μανδύα από ΙΑΜ
(Ζ): Αποκόλληση του μανδύα από ΙΑΜ σε εκτεταμένη περιοχή της άσπλης ζώνης του δοκιμίου.
(Η): Απότομη αποκόλληση του μανδύα από ΙΑΜ σε ολόκληρη την περιοχή της άσπλης ζώνης του δοκιμίου.

Σχήμα 12. Αστοχία δοκιμίων με ενίσχυση από μανδύες TRM [4]

Τα πειραματικά αποτελέσματα οδήγησαν στα εξής συμπεράσματα:

- Οι μανδύες TRM, διαπιστώθηκε ότι είναι λιγότερο αποτελεσματικοί σε σχέση με τους FRP, αλλά η αποτελεσματικότητά τους καθορίζεται από τον τρόπο τοποθέτησης του μανδύα και τον αριθμό των στρώσεων. Συγκεκριμένα, ο λόγος αποτελεσματικότητας TRM/FRP κυμαίνεται από 0,09 για μία στρώση μανδύα πλευρικά τοποθετημένου, έως 0,92 για δύο στρώσεις μανδύα U.
- Τα TRM αποδείχθηκαν πιο αποδοτικά όσον αφορά την αύξηση της ικανότητας παραμόρφωσης των δοκών .
- Οι μανδύες τύπου U (UW) είναι αρκετά πιο αποτελεσματικοί από τους πλευρικά τοποθετημένους (SB) για την περίπτωση της ενίσχυσης με TRM, ενώ για FRP, αποδείχθηκαν ελάχιστα πιο αποτελεσματικοί. Ωστόσο, οι ολόσωμοι μανδύες (FW) είναι αυτοί με την μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και στις δύο περιπτώσεις.
- Σημαντικό ρόλο στην αύξηση της αποτελεσματικότητας των μανδύων SB και UW, διαδραμάτισε η αύξηση των στρώσεων από μία σε δύο. Συγκεκριμένα, για τους μανδύες από FRP σημειώθηκε αύξηση της αποτελεσματικότητας κατά 1,35 και 1,2 φορές αντίστοιχα, ενώ για αυτούς από TRM κατά 7,8 και 2,6 φορές, αντίστοιχα.
- Η καταφανώς μεγάλη αύξηση της αποτελεσματικότητας των μανδύων από TRM όταν αυξήθηκε ο αριθμός των στρώσεων τους, οδήγησε και σε διαφορετικό τρόπο αστοχίας των δοκιμίων. Συγκεκριμένα, για μία στρώση παρατηρήθηκε μερική θραύση των ινών του σύνθετου υλικού, ενώ για δύο στρώσεις πραγματοποιήθηκε σταδιακή αποκόλληση του μανδύα.

2.2.2 Εφαρμογή ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 [1]

Αρχικά, λάβαμε από το πείραμα τις τιμές για τα εξής, χρήσιμα για τους υπολογισμούς μας, μεγέθη :

- Τις διαστάσεις διατομής υποστυλωμάτων (b_c, h_c)
- Τις τάσεις διαρροής των διαμήκων ράβδων οπλισμού (f_{sy})
- Τις θλιπτικές αντοχές του σκυροδέματος των δοκιμίων (f_{cm})
- Τον αριθμό των στρώσεων του υλικού ενίσχυσης (n)
- Τα πάχη των υλικών ενίσχυσης (t_j)
- Τη μέθοδο ενίσχυσης (κλειστή ή ανοικτή)
- Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενίσχυσης (E_j)
- Την παραμόρφωση αστοχίας του υλικού ενίσχυσης (ϵ_{ju})
- Την χαρακτηριστική αντοχή του υλικού ενίσχυσης (f_{jk})

Για την ευρέση της διατμητικής αντοχής έγινε χρήση των σχέσεων που παρατίθενται στο Κανονισμό επεμβάσεων 2013 Κεφάλαιο 8 (§8.2.2.2)

Το ζητούμενο είναι η αντοχή σε διάτμηση του κάθε δοκιμίου ξεχωριστά η οποία ορίζεται ως:
 $V_{tot} = V_{jd} + V_{Rd,c} + V_{Rd,s}$

όπου V_{jd} : συνεισφορά του ενισχυτικού υλικού

$V_{Rd,c}$: συνεισφορά σκυροδέματος

$V_{Rd,s}$: συνεισφορά συνδετήρων

Στη συνέχεια, γίνεται υπολογισμός της V_{jd}

$$V_{jd} = \sigma_{jd} \rho_j b_w \frac{2d}{3} (\cot \alpha + \sin \alpha) \sin^2 \alpha \quad \text{σχ.8.9 (ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013)}$$

Εν συνεχεία, ανάλογα με το είδος της ενίσχυσης ανοικτή ή κλειστή επιλέγουμε να εξετάσουμε το ενδεχόμενο αστοχίας από αποκόλληση και αστοχίας λόγω θραύσης ινών αντίστοιχα.

Κλειστή Ενίσχυση (μανδύες ή ζώνες από φύλλα που καλύπτουν όλη την περίμετρο της διατομής που ενισχύουν):

Με γνωστά τα ϵ_{ju} και E_j από τα δεδομένα του πειράματος, υπολογίσαμε την αντοχή ως εξής:

$$f_{jk} = E_j \epsilon_{jcrit}$$

Όπου $\epsilon_{jcrit} = k_v \epsilon_{jmax}$ με $k_v = 0.5$

Ένω $\epsilon_{j,max} = \epsilon_{ju}$ $\psi > 1.5\%$, ορίζοντας ως μειωτικό συντελεστή πολλών στρώσεων, $\psi = k^{1/4}$ αν $k > 4$

Καταλήγουμε στην αντοχή του υλικού μέχρι τη θραύση του:

$$\sigma_{jd} = f_{jk} / 1.2^* \quad \text{σχ.8.14}$$

*Ο συντελεστής γμ λαμβάνεται ίσος με 1.2 σύμφωνα με τα σχόλια του ΚΑΝ.ΕΠΕ §8.2.2.2 σελ.8-30

Ανοικτή ενίσχυση (χωρίς παράθεση των φύλλων ενίσχυσης, τύπου U ή φύλλα παράλληλα στο κορμό, τύπου ||) :

Εκτός του προαναφερθέντως ελέγχου για θραύση ινών, εξετάζεται και η αστοχία λόγω αποκόλλησης.

$$\sigma_{jd} = \sigma_{jcrit}/1.2^* \quad \text{σχ.8.15}$$

*Ο συντελεστής γ_{Rd} λαμβάνεται ίσος με 1.2 σύμφωνα με τα σχόλια του ΚΑΝ.ΕΠΕ §8.2.2.2 σελ.8-31

$$\sigma_{jcrit} = k_v \sigma_{jmax}$$

$$\text{όπου } k_v = 0,4 + 0,25 \lambda \leq 0,65$$

$$\text{με τον λόγο, } \lambda = \frac{L_{av}}{L_e} \geq 1$$

όπου:

$$\text{Ενεργό μήκος αγκύρωσης, } L_e = \sqrt{\frac{E_j t_j}{2 f_{ctm}}} \text{ και}$$

$$\text{Διατιθέμενο μήκος αγκύρωσης οπλισμού, } L_{av} = 2d/3$$

Καταλήγουμε:

$$\sigma_{jmax} = \beta \frac{\tau_{αποκ}}{t_j} L_e \quad , \quad \text{σχ.8.10}$$

με $\beta = \beta_w \beta_l = \frac{\sqrt{2}}{2}$, εφόσον $\beta_l = 1$ για $\lambda \geq 1$ και $\beta_w = \frac{\sqrt{2}}{2}$ για συνεχή φύλλα (βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013, Σχόλια, σελ.8-32)

Εν τέλει, θεωρείται ως αντοχή στην αστοχία η μικρότερη τιμή από τις δύο:

$$\sigma_{jd} = \min (\sigma_{jd}(\text{αποκ}), \sigma_{jd}(\text{θραύση}))$$

Ακολουθώντας, γίνεται υπολογισμός του $V_{Rd,c}$:

(Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος Τεύχος 1-Μιχαήλ Ν. Φαρδής/ σχ. 6,10 [9]):

$$V_{Rd,c} = \left[\max \left\{ \frac{180}{\gamma_c} (100 \rho_l)^{1/3}, 35 \sqrt{1 + \sqrt{\frac{0.2}{d}}} f_{ctk}^{1/6} \right\} \left(1 + \sqrt{\frac{0.2}{d}} \right) f_{ctk}^{1/3} + 0.15 \frac{N_{ed}}{A_c} \right] b_w d$$

Τελικά, έγινε υπολογισμός της συνολικής διατμητικής αντοχής που προβλέπει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013 και σύγκριση με την αντίστοιχη πραγματική (αποτελέσματα πειράματος) στο κεφάλαιο 2.2.3.

2.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Παρατίθενται σχήματα με τα αναλυτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013, και ακολουθούν σχόλια και παρατηρήσεις επί αυτών.

Όνομα Δοκιμίου	Αντοχή σε αποκόλληση σ_{jcrit}	Αντοχή υλικού(MPa)	Αστοχία ΚΑΝ.ΕΠΕ
CON			
SBR1	771,511	1.406,250	Αποκόλληση
SBR2	545,541	1.406,250	Αποκόλληση
UMR1	829,789	1.406,250	Αποκόλληση
UMR2	586,749	1.406,250	Αποκόλληση
FWR1		1.406,250	

Σχήμα 13.Εκτίμηση μορφής αστοχίας μέσω ΚΑΝ.ΕΠΕ

Όνομα Δοκιμίου	Αστοχία ΚΑΝ.ΕΠΕ	Αστοχία (Πείραμα)	Σύγκριση
CON			
SBR1	Αποκόλληση	Αποκόλληση [Shear Failure]	
SBR2	Αποκόλληση	Αποκόλληση [Shear Failure]	
UMR1	Αποκόλληση	Αποκόλληση [Shear Failure]	
UMR2	Αποκόλληση	Αποκόλληση [Shear Failure]	
FWR1		Καμπτική Αστοχία- Θράυση σκυροδέματος εκτός της ενισχυμένης περιοχής	

Σχήμα 14.Σύγκριση μορφής αστοχίας προτεινόμενες από κανονισμό και πειράματα

Όνομα Δοκιμίου	V _{jd} (KN) ΚΑΝ.ΕΠΕ	V _f (KN) Πείραματος	Διαφορά(%)
CON	0,000	0	0,0
SBR1	44,953	30,5	47,4
SBR2	63,574	41,6	52,8
UMR1	48,349	35,3	37,0
UMR2	68,376	42,6	60,5
FWR1	81,938	56,4	45,3

Σχήμα 15.Σύγκριση συνεισφοράς στη διατμητική αντοχή σύνθετου υλικού προτεινόμενες από κανονισμό και πειράματα

Όνομα Δοκιμίου	V _{tot} (KN) ΚΑΝΕΠΕ	V _{tot} (KN) EXPERIMENT	Διαφορά(%)
CON	16,253	29,7	-45,3
SBR1	61,206	60,2	1,7
SBR2	79,826	71,3	12,0
UMR1	64,602	64,9	-0,5
UMR2	84,629	72,3	17,1
FWR1	98,190	86,1	14,0

Σχήμα 16.Σύγκριση διατμητική αντοχή προτεινόμενη από κανονισμό και πειράματα

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα καταλήξαμε στα εξής συμπεράσματα και παρατηρήσεις:

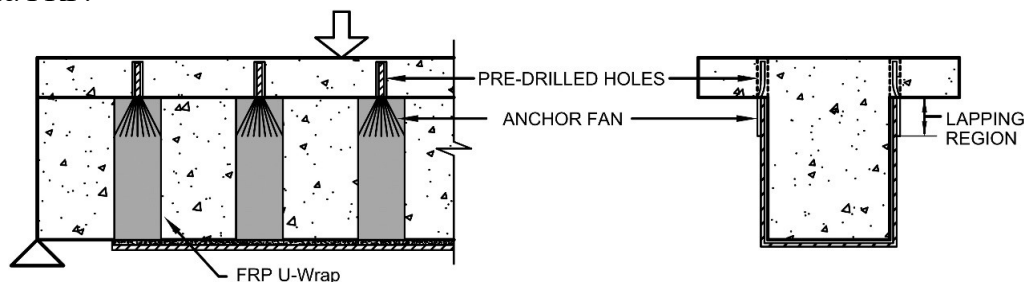
- Στο δοκίμιο FWR1 (κλειστή ενίσχυση τύπου [] με μία στρώση CFRP) δεν εξετάστηκε η περίπτωση αστοχίας προκαλούμενη από αποκόλληση, καθώς ο ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013 θεωρεί ένα τέτοιο φαινόμενο αστοχίας έχει αποφευχθεί λόγω του σχήματος της ενίσχυσης. Επομένως, μοναδική περίπτωση αστοχίας της ενίσχυσης ήταν η θράυση του μανδύα, αστοχία που δεν έλαβε χώρα καθώς η αντοχή του υλικού ενίσχυσης ήταν αρκετά μεγαλύτερη της καμπτικής αντοχής της μη-ενισχυμένης διατομής της δοκού (βλ. Σχήμα 13).
- Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013 απαγορεύεται η χρήση ανοικτής ενίσχυσης με ελάσματα εκατέρωθεν του κορμού της δοκού (δοκίμια SBR1 & 2). Για αυτό το λόγο, έγινε χρήση των σχέσεων για την ανοικτή ενίσχυση U προκειμένου να βρεθεί η διατμητική αντοχή της ενίσχυσης. Η παράλειψη αυτή του κανονισμού θεωρείται υπέρ της ασφαλείας καθώς μια τέτοια τεχνική δεν προσφέρεται για σκοπούς ενισχύσεων-επισκευών, ενώ δεν βρίσκει εφαρμογή στη πράξη.

- Παρατηρούμε ότι όλα τα δοκίμια (πλύν του δοκιμίου ελέγχου και της κλειστής ενισχύσεως) αστόχησαν διατμητικά στο μήκος ενίσχυσης με αποκόλληση του CFRP από το σκυρόδεμα. Αυτή την μορφή αστοχίας επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα από τις σχέσεις που δίνει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013 (βλ. Σχήμα 14.)
- Άξιο να σημειωθεί είναι ότι αν και υπάρχουν οι μεγάλες αποκλίσεις ο κανονισμός δεν τάσσεται υπέρ της ασφαλείας. Τα αποτελέσματα του ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013 υπερεκτιμούν την αντοχή των δοκιμίων σε σχέση με την πραγματική (πειράματα). Συγκεκριμένα, στο δοκίμιο UMR2 (ενίσχυση τύπου U χρήση 2 στρώσεων CFRP) η απόκλιση φτάνει την εκτίμηση 60% παραπάνω αντοχής απ'ότι δίνουν τα αποτελέσματα της δοκιμής (βλ. Σχήμα 15).
- Διαφορά παρατηρήθηκε επίσης και στην συνεισφορά στην διατμητική αντοχή από το σκυρόδεμα. Η $V_{Rd,c}$ που υπολογίστηκε δίνει μικρότερη τιμή από την τιμή της διατμητικής αντοχής του δοκιμίου ελέγχου (βλ. Σχήμα 16). Παρ'όλα αυτά το αποτέλεσμα σε αυτή την περίπτωση είναι συντηρητικό και μπορεί να οφείλεται σε πιθανή μεγαλύτερη συνεισφορά στην αντοχή από τις διαμήκεις ράβδους της διατομής, λόγω ότι στο ρl λαμβάνονται υπόψιν μόνο οι εφελκόμενες ράβδοι της διατομής.
- Η μεγαλύτερη αντοχή υλικού ενίσχυσης σε διάτμηση προκύπτει όπως αναμενόταν αυτή του δοκιμίου FWR1 με τη κλειστή ενίσχυση. Ακολουθούν τα δοκίμια με ενίσχυση U και τέλος η εκατέρωθεν του κορμού ενίσχυση.

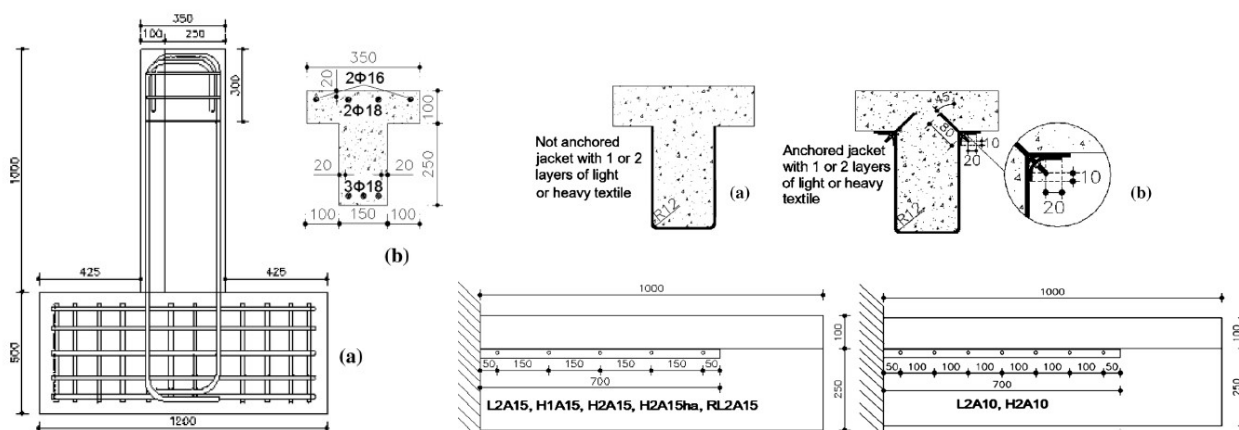
2.3 Δοκιμή διάτμησης δοκών διατομής T

2.3.1 Περιγραφή του πειράματος

Η ενίσχυση σε διάτμηση με σύνθετα υλικά συνήθως πραγματοποιείται μέσω της χρήσης μανδύα σε (σχήμα U) γύρω από τον κορμό των δοκών τύπου T. Το παρόν πείραμα [5], εξέτασε την αποτελεσματικότητα ενισχυμένων δοκών τύπου T με σύνθετα υλικά με οργανική ή ανόργανη μήτρα και υφάσματα από ίνες ή ινοπλέγματα αντίστοιχα. Στη συνέχεια, διερευνήθηκε επίσης αν η αποτελεσματικότητα των υφασμάτων FRP σε σχήμα U μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την τοποθέτηση αγκυρίων στα δύο άκρα του μανδύα σε σχήμα U. Τα συστήματα αγκύρωσης συνήθως περιλαμβάνουν τη χρήση μεταλλικών στοιχείων ή αγκύρια FRP.



Σχήμα 17. Σκαρίφημα τοποθέτησης της ενίσχυσης τύπου U και των αγκυρίων [5]



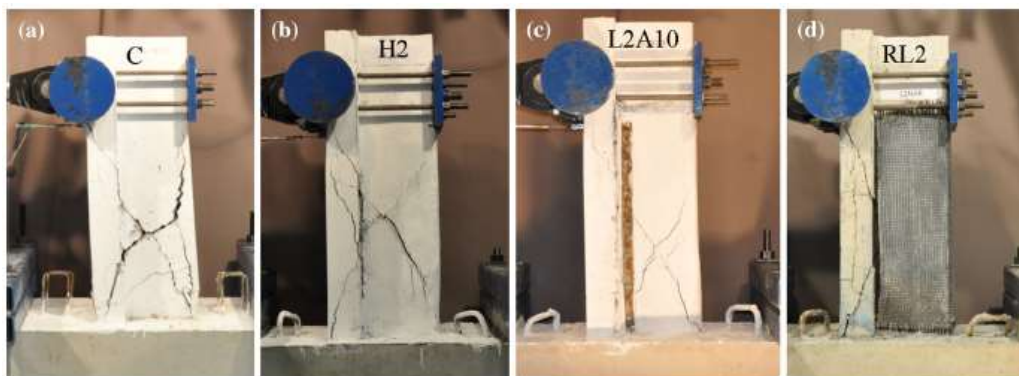
Σχήμα 18. Σχέδιο όπλισης της δοκού T / Θέσεις αγκυρίων κατά μήκος της δοκού T [5]

Συνολικά, κατασκευάστηκαν 13 δοκίμια δοκού-προβόλου διατομής T. Οι συνθήκες στήριξης ήταν μονόπακτος πρόβολος, η πάκτωση προσομοιώνει πιο ρεαλιστικά τις συνθήκες σε συνεχείς δοκούς σε κατασκευές οπλ. σκυροδέματος. Η φόρτιση στην οποία υποβλήθηκαν τα δοκίμια ήταν ανακυκλιζόμενη, ώστε να προσομοιωθούν όσο το δυνατόν καλύτερα τα σεισμικά φορτία. Όλες οι δοκοί ήταν σκόπιμα σχεδιασμένες έτσι ώστε η αντοχή τους στην κάμψη να υπερβαίνει την αντοχή διάτμησης όχι μόνο πριν από την εφαρμογή της ενίσχυσης αλλά και μετά, συνεπώς, μόνο η αποτυχία λόγω διάτμησης θα μπορούσε να αναπτυχθεί. Αμέσως αποτέλεσμα, οι ποσότητες του εσωτερικού χαλύβδινου οπλισμού δεν είναι αντιπροσωπευτικές των πραγματικών δοκών, αλλά εξυπηρετούν το σκοπό της ενεργοποίησης της διατμητικής αποτυχίας ως κυρίαρχος μηχανισμός αστοχίας.

Δοκίμιο	Χαρακτηρισμός
C	Δοκίμιο ελέγχου
L1	1 φύλλο TRM, ελαφρύ ινόπλεγμα (0,048mm)
L2	2 φύλλα TRM, ελαφρύ ινόπλεγμα
H1	1 φύλλο TRM, βαρύ ινόπλεγμα (0,096mm)
H2	2 φύλλα TRM, βαρύ ινόπλεγμα
L2A15	2 φύλλα TRM, ελαφρύ ινόπλεγμα, αγκύρια ανά 150mm
L2A15ha	2 φύλλα TRM, ελαφρύ ινόπλεγμα, αγκύρια ανά 150mm, max επιβαλ. d=5mm
L2A10	2 φύλλα TRM, ελαφρύ ινόπλεγμα, αγκύρια ανά 100mm
H1A15	1 φύλλο TRM, βαρύ ινόπλεγμα, αγκύρια ανά 150mm
H2A15	2 φύλλα TRM, βαρύ ινόπλεγμα, αγκύρια ανά 150mm
H2A10	2 φύλλα TRM, βαρύ ινόπλεγμα, αγκύρια ανά 100mm
RL2	2 φύλλα FRP (0,048mm)
RL2A15	2 φύλλα FRP, αγκύρια ανά 150mm

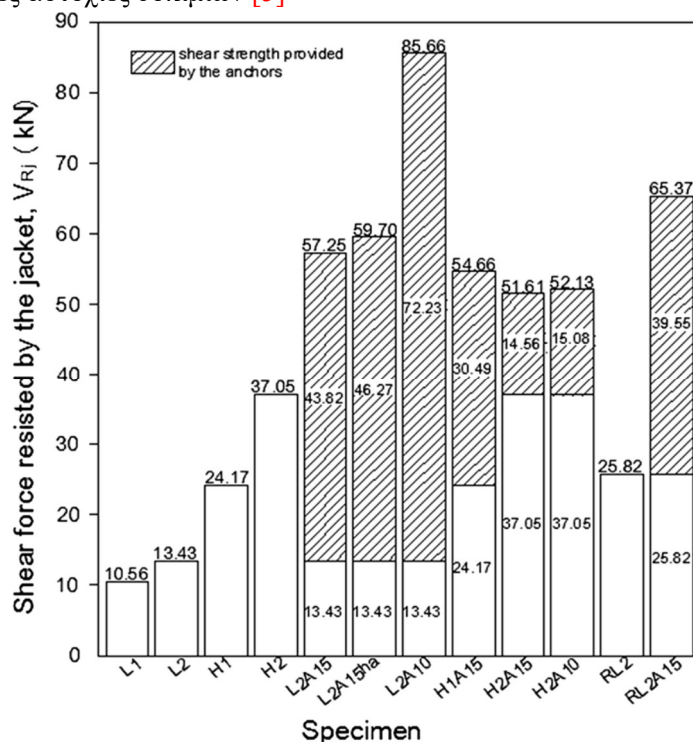
Σχήμα 19. Ονοματολογία Δοκιμίων

Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε πλευρική ανακυκλιζόμενη φόρτιση με μήκος διάτμησης 0,8 m. Η φόρτωση περιλάμβανε διαδοχικούς κύκλους που προοδευτικά αυξάνονταν με σταθερά εύρη μετατόπισης (2 mm σε όλα τα δείγματα, 5 mm στο δείγμα L2A15ha), με ρυθμό ίσο με 0,2 mm / s.



Σχήμα 20.Ενδεικτικές αστοχίες δοκιμών [5]

Specimen	Peak shear force (kN)		Failure mode of the jacket
	Push	Pull	
C	66.41	47.85	—
L1	69.82	65.55	Debonding (local)
L2	77.76	63.35	Debonding (local)
H1	90.70	71.90	Pull-out of rovings
H2	109.74	78.61	Debonding (local)
L2A15	109.50	119.26	Pull-out of rovings
L2A15ha	120.00	113.65	Pull-out of rovings
L2A10	130.62	128.17	Pull-out of rovings
H1A15	113.28	83.50	Pull-out of rovings
H2A15	99.98	90.70	Pull-out of rovings
H2A10	121.95	96.56	Fiber rupture
RL2	92.65	73.24	Debonding (full)
RL2A15	120.97	124.02	Pull-out of anchors and debonding



Σχήμα 21.Πίνακας αποτελεσμάτων [5]

Σχήμα 22. Διατμητική αντοχή μανδύα [5]

Τα πειραματικά αποτελέσματα οδήγησαν στα εξής συμπεράσματα:

- Όλα τα δοκίμια αστόχησαν σε διάτμηση. Σε δοκίμια ενισχυμένα με TRM, οι ρωγμές ήταν σαφώς ορατές στους μανδύες, λόγω της εύθραυστης φύσης της ανόργανης μήτρας (κονίαμα με βάση το τσιμέντο). Η διαγώνια ρωγή στα ενισχυμένα με FRP δοκίμια επιβεβαιώθηκε μετά την αφαίρεση των μανδύων στο τέλος κάθε δοκιμής. Άλλος τρόπος αστοχίας των μανδύων ήταν η «αποκόλληση», η οποία ήταν είτε τοπική ή πλήρης. Ένας τρίτος τρόπος αστοχίας, που παρατηρήθηκε αφορούσε τη απόσχιση των δεσμών ινών κοντά στην επαφή με τον αγκυρωμένο χάλυβα. Τέλος, το δείγμα RL2A15 αστόχησε με την εξόλκευση των αγκυρίων, ακολουθούμενη από πλήρη αποκόλληση (βλ.σχήμα 21).
- Συγκρίνοντας το V_{Rj} στα L1 και L2 καθώς και για τα H1 και H2, γίνεται σαφές ότι η αντοχή σε διάτμηση δοκιμών που φέρουν μανδύα TRM (10.56 και 13.43 kN για L1 και L2, 24,17 και 37,05 kN για τα H1 και H2) δεν αυξάνεται αναλογικά προς τον αριθμό των στρωμάτων. Επιπλέον, οι τιμές V_{Rj} για τα δείγματα L2 και H1 (13.43 και 24.17 kN,

- αντίστοιχα), που περιέχουν τον ίδιο όγκο ινών, δείχνουν ότι ένα στρώμα από βαριά ινοπλέγματα είναι πολύ πιο αποτελεσματικό από δύο στρώματα ελαφρού ινοπλέγματος (βλ.σχήμα 22).
- Σύγκριση των δοκών L2 και L2A15 δείχνει ότι η χρήση της αγκύρωσης αυξάνει δραματικά την αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης, περισσότερο από 300% $[(57.25 - 13.43) / 13.43 = 326\%]$. Ωστόσο, στα δοκίμια H1 και H1A15, υπολογίζεται ότι η χρήση της αγκύρωσης αυξάνει την αποτελεσματικότητα περίπου 125% $[(54.66 - 24.17) / 24.17]$. Τέλος, αν γίνεται σύγκριση για των H2 και H2A15, υπολογίζεται ότι η χρήση της αγκύρωσης αυξάνει την αποτελεσματικότητα κατά περίπου 40% $[(51.61 - 37.05) / 37.05]$. Επομένως, η αποτελεσματικότητα λόγω της αγκύρωσης είναι πάντα υψηλή, αλλά αυξάνεται καθώς μειώνεται το V_{Rj} των μανδύων χωρίς αγκύρια (βλ.σχήμα 22).
 - Σύγκριση όμοιων δοκιμίων ενισχυμένα από FRP και TRM (RL2 και L2, αντίστοιχα) δείχνουν ότι τα πρώτα είναι πιο αποτελεσματικά κατά $\sim 90\%$ $[(25.82 - 13.43) / 13.43 = 92\%]$. Ωστόσο, εάν η σύγκριση γίνεται τα δοκίμια με αγκύρωση (RL2A15 και L2A15), συμπεραίνουμε ότι τα FRP είναι μόνο κατά 14% $[= (65.37 - 57.25) / 57.25]$ πιο αποτελεσματικά από τα TRM (βλ.σχήμα 22).
 - Ο ρόλος της απόστασης των αγκυρών διερευνήθηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για τις δοκούς L2A15, L2A10 και H2A15 έναντι H2A10. Μείωση του διαστήματος αγκύρωσης από 150 έως 100 mm αύξησε την αποτελεσματικότητα της αγκύρωσης περίπου 50% $[(85.66 - 57.25) / 57.25]$ με το ελαφρύ ύφασμα. Αυτό αποδίδεται στην πιο ομοιόμορφη τέντωση των ινών. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ελάχιστη αύξηση στην αποτελεσματικότητα στα δοκίμια με το βαριά ινοπλέγματα, ο λόγος είναι πρόωρη ρήξη των ινών (δείγμα H2A10) κοντά στην επαφή με το αγκυρωμένο τμήμα χάλυβα (βλ.σχήμα 22).
 - Τέλος, μια σύγκριση των αποτελεσμάτων για δοκούς L2A15 και L2A15ha δείχνει ότι η αύξηση στο εύρος μετατόπισης των κύκλων φόρτωσης από 2 σε 5 mm δεν είχαν ουσιαστικά καμία επίδραση στα αποτελέσματα.

2.3.2 Εφαρμογή ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 [1]

Αρχικά, λάβαμε από το πείραμα [5] τις τιμές για τα εξής, χρήσιμα για τους υπολογισμούς μας, μεγέθη :

- Τις διαστάσεις διατομής υποστυλωμάτων (b_c, h_c)
- Τις τάσεις διαρροής των διαμήκων ράβδων οπλισμού (f_{sy})
- Τις θλιπτικές αντοχές του σκυροδέματος των δοκιμίων (f_{cm})
- Τον αριθμό των στρώσεων του υλικού ενίσχυσης (n)
- Τα πάχη των υλικών ενίσχυσης (t_j)
- Τη μέθοδο ενίσχυσης (κλειστή ή ανοικτή)
- Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενίσχυσης (E_j)
- Την παραμόρφωση αστοχίας του υλικού ενίσχυσης (ϵ_{ju})
- Την χαρακτηριστική αντοχή του υλικού ενίσχυσης (f_{jk})

Για την ευρέση της διατμητικής αντοχής έγινε χρήση των σχέσεων που παρατίθενται στο Κανονισμό επεμβάσεων 2013 Κεφάλαιο 8 (§8.2.2.2)

Το ζητούμενο είναι η αντοχή σε διάτμηση του κάθε δοκιμίου ξεχωριστά η οποία ορίζεται ως:

$$V_{tot} = V_{jd} + V_{Rd,c} + V_{Rd,s}$$

Όπου V_{jd} : συνεισφορά του ενισχυτικού υλικού

$V_{Rd,c}$: συνεισφορά σκυροδέματος

$V_{Rd,s}$: συνεισφορά συνδετήρων

Υπολογισμός της V_{jd}

$$V_{jd} = \sigma_{jd} \rho_j b w \frac{2d}{3} (\cot \alpha + \sin \alpha) \sin^2 \alpha \quad \text{σχ.8.9 [1]}$$

Εν συνεχεία, ανάλογα με το είδος της ενίσχυσης ανοικτή ή κλειστή επιλέγουμε να εξετάσουμε το ενδεχόμενο αστοχίας από αποκόλληση ή θραύση των ινών και αστοχίας λόγω θραύσης ινών αντίστοιχα.

Ανοικτή ενίσχυση (χωρίς παράθεση των φύλλων ενίσχυσης, τύπου U ή φύλλα παράλληλα στο κορμό, τύπου ||) :

Εκτός του προαναφερθέντος ελέγχου για θραύση ινών, εξετάζεται και η αστοχία λόγω αποκόλλησης.

$$\sigma_{jd} = \sigma_{jcrit} / 1.2 \quad \text{σχ.8.15 [1]}$$

*Ο συντελεστής γ_{Rd} λαμβάνεται ίσος με 1.2 σύμφωνα με τα σχόλια του ΚΑΝ.ΕΠΕ §8.2.2.2 σελ.8-31

$$\sigma_{jcrit} = k_v \sigma_{jmax}$$

όπου $k_v = 0,4 + 0,25 \lambda \leq 0,65$

με τον λόγο, $\lambda = \frac{L_{av}}{L_e} \geq 1$

όπου:

Ενεργό μήκος αγκύρωσης, $L_e = \sqrt{\frac{E_j t_j}{2 f_{ctm}}}$ και

Διατιθέμενο μήκος αγκύρωσης οπλισμού, $L_{av} = 2d/3$

Καταλήγουμε:

$$\sigma_{jmax} = \beta \frac{\tau_{αποκ}}{t_j} L_e \quad , \quad \text{σχ.8.10 [1]}$$

με $\beta = \beta_w \beta_l = \frac{\sqrt{2}}{2}$, εφόσον $\beta_l = 1$ για $\lambda \geq 1$ και $\beta_w = \frac{\sqrt{2}}{2}$ για συνεχή φύλλα (βλ. ΚΑΝ.ΕΠΕ, Σχόλια, σελ.8-32)

Εν τέλει, θεωρείται ως αντοχή στην αστοχία η μικρότερη τιμή από τις δύο:

$$\sigma_{jd} = \min (\sigma_{jd}(\text{αποκ}), \sigma_{jd}(\text{θραύση}))$$

Υπολογισμός του $V_{Rd,c}$ για τις δύο διευθύνσεις φόρτισης ώθηση- έλξη ξεχωριστά:

(Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος Τεύχος 1-Μιχαήλ Ν. Φαρδής/ σχ. 6,10 [9]):

$$V_{Rd,c} = \left[\max \left\{ \frac{180}{\gamma_c} (100 \rho_l)^{1/3}, 35 \sqrt{1 + \sqrt{\frac{0.2}{d}}} f_{ck}^{1/6} \right\} \left(1 + \sqrt{\frac{0.2}{d}} \right) f_{ck}^{1/3} + 0.15 \frac{N_{ed}}{A_c} \right] b w d$$

Ακολούθησε υπολογισμός της συνολικής διατμητικής αντοχής που προβλέπει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013 και σύγκριση με την αντίστοιχη πραγματική (αποτελέσματα πειράματος).

2.3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Παρατίθενται σχήματα με τα αναλυτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013, και ακολουθούν σχόλια και παρατηρήσεις επί αυτών.

Όνομα Δοκιμίου	Αντοχή σε αποκόλληση σ_{crit}	Αντοχή υλικού(MPa)	Αστοχία ΚΑΝ.ΕΠΕ
CON			
RL2	750,965	1.406,250	Αποκόλληση
RL2A15	796,472	1.406,250	Αποκόλληση

Σχήμα 23. Προσδιορισμός αστοχίας δοκιμίου μέσω ΚΑΝ.ΕΠΕ

Όνομα Δοκιμίου	Αστοχία ΚΑΝ.ΕΠΕ	Αστοχία (Πείραμα)	Σύγκριση
CON			
RL2	Αποκόλληση	Αποκόλληση	
RL2A15	Αποκόλληση	Αποκόλληση & εξόλκευση αγκυριών	

Σχήμα 24. Σύγκριση μορφών αστοχίας ΚΑΝ.ΕΠΕ. και πειράματος

Όνομα Δοκιμίου	V _{jd} (KN) ΚΑΝ.ΕΠΕ	V _f (KN) Πείραματος	Διαφορά(%)
CON			
RL2	30,856	25,390	17,7
RL2A15	32,725	54,560	-66,7

Σχήμα 25.Σύγκριση της προκύπτουσας συνεισφοράς σύνθετου υλικού στην διατμητική αντοχή πειράματος και κανονισμού

Όνομα Δοκιμίου	V _{tot} (KN) ΚΑΝΕΠΕ 2013 PUSH	V _{tot} (KN) EXPERIMENT PUSH	Διαφορά(%)
CON	26,455	66,41	
RL2	57,310	91,800	-60,2
RL2A15	59,180	120,970	-104,4
	Διαφορά U ενίσχυσης-ελέγχου(%) -αύξηση αντοχής		
	27,66		
	Διαφορά U με αγκύρια-ελέγχου(%) - αύξηση		
	45,10		
	Διαφορά U με αγκύρια- U χωρίς(%) - αύξηση		
	24,11		

Σχήμα 26. Σύγκριση της συνολικής διατμητικής αντοχής στη διεύθυνση φόρτισης- ώθηση

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα καταλήξαμε στα εξής συμπεράσματα και παρατηρήσεις:

- Η δοκός δεν διέθετε εγκάρσιο οπλισμό. Επομένως, δε λάβαμε υπόψιν τη συνεισφορά των συνδετήρων στην διατμητική αντοχή της διατομής V_{tot} .
- Σύμφωνα με τα δεδομένα του πειράματος: «Όλες οι δοκοί ήταν σκόπιμα σχεδιασμένες έτσι ώστε η αντοχή τους στην κάμψη να υπερβαίνει την αντοχή διάτμησης όχι μόνο πριν από την ενίσχυση αλλά και μετά, συνεπώς, μόνο η αποτυχία λόγω διάτμησης θα μπορούσε αναπτυχθεί» (βλ. 2.3.1). Επομένως δεν τίθεται λόγος για εξέταση αστοχίας σε κάμψη της δοκού.
- Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013 δε λαμβάνει υπόψιν τη αύξηση της αντοχής του δοκιμίου μέσω της χρήσης αγκυρίων κατα μήκος του κορμού της T δοκού. Μια τέτοια συχνή τεχνική που αποσκοπεί στο να αποτρέψει τη δοκό να αστοχήσει λόγω αποκόλλησης θα έπρεπε να συμπεριληφθεί στις σχέσεις για τον υπολογισμό της αντοχής του υλικού ενίσχυσης, είτε μέσω αυξητικού συντελεστή που μπορεί να προκύψει πειραματικά είτε να ληφθεί υπόψη στο μοντέλο η αντοχή των αγκυρίων μέχρι θραύσης ή εξόλκευσής τους και η πυκνότητα (διάταξη) τους κατα μήκος του στοιχείου. Λόγω της παραπάνω παράλειψης του κανονισμού εργαστήκαμε προσεγγιστικά για το δοκίμιο RL2A15 (ενισχυμένο με μανδύα U και αγκύρια ανά 150 mm).
- Όσον αφορά τη σύγκριση μορφών αστοχίας: Οι αστοχίες προτεινόμενες από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013 ταυτίζονται με αυτές που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές, δηλαδή από πρόωρη αποκόλληση του CFRP (βλ. Σχήμα 24).
- Παρατηρούμε στη σύγκριση των αντοχών V_{jd} , ότι ο ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013 προσέγγισε την αντοχή του δοκιμίου ενισχυμένο- U (δοκίμιο RL2, βλ. Σχήμα 25). Παρόλα αυτά όπως ακριβώς και στα δοκίμια με ορθογωνική διατομή, ο κανονισμός υπερεκτιμά αρκετά την πραγματική V_{jd} κατά 17%. Μεγάλη διαφορά όπως αναμενόταν βρέθηκε μεταξύ των τιμών για το ενισχυμένο με U μανδύα και αγκύρια, καθώς ο κανονισμός αγνοεί τη συνεισφορά των τελευταίων.
- Λόγω του ότι ο ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013 υπολογίζει την V_{jd} για μία διεύθυνση φόρτισης λήφθηκε υπόψη μόνο η διεύθυνση ωθήσεως διότι έτσι προσομοιώνονται καλύτερα η συνήθης φόρτιση των πλακοδοκών.
- Σημειώνεται ότι, η συνολική διατμητική αντοχή των δοκιμίων ενισχυμένων μέσω μανδύων U με αγκύρια, είναι ~25% μεγαλύτερη από τους απλούς μανδύες U και ~50% μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με το δοκίμιο ελέγχου (βλ. Σχήμα 26).

2.4 Δοκιμή περίσφιγξης υποστυλωμάτων ορθογωνικής διατομής

2.4.1 Περιγραφή του πειράματος

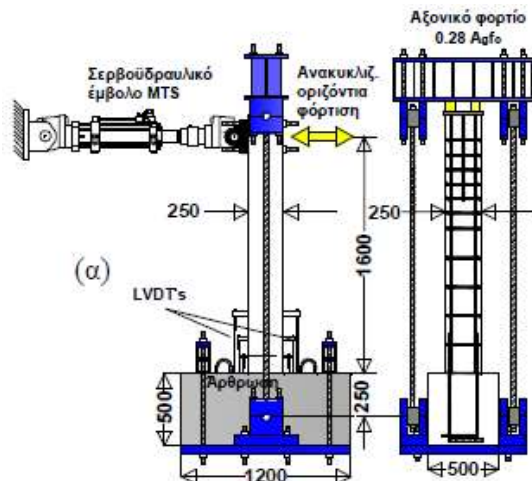
Το παρόν πείραμα [6] αποτελεί μια μελέτη σχετικά με την αποτελεσματικότητα των μανδύων TRM εν σύγκριση με αντίστοιχους μανδύες FRP, ως μέσο περίσφιγξης στις κρίσιμες περιοχές (πόδας και κορυφή) μη σεισμικά σχεδιασμένων υποστυλωμάτων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν συνολικά 13 δοκίμια υποστυλωμάτων πλήρους κλίμακας και ίδιας γεωμετρίας: τα 7 από τα οποία είχαν συνεχή διαμήκη οπλισμό λείο ή με νευρώσεις ενώ τα υπόλοιπα 6 είχαν ευθύγραμμες ενώσεις των διαμήκων ράβδων με υπερκάλυψη στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης. Τα δοκίμια ήταν τύπου προβόλου μήκους 1.60 m ,αντιπροσωπεύοντας υποστυλώματα με ύψος ίσο με το μισό του ύψους

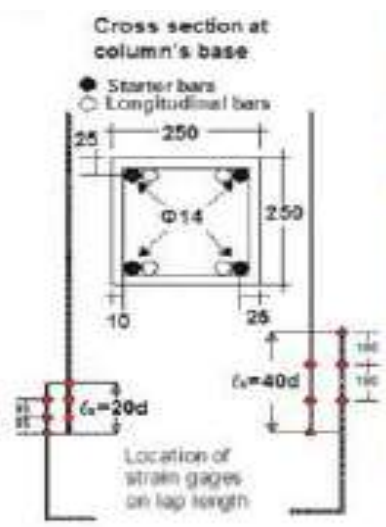
τυπικού ορόφου και όλα είχαν τετραγωνική διατομή. Τα υποστυλώματα ήταν πακτωμένα σε θεμέλια διαστάσεων 1.2x0.5 m σε κάτοψη.

Προκειμένου να προσομοιωθούν τα σεισμικά φορτία, τα δοκίμια υπεβλήθησαν σε φόρτιση που αποτελούνταν από επαναλαμβανόμενους κύκλους μετατοπίσεων αυξανόμενου εύρους (κατά 5 mm) μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Τα δοκίμια φορτίζονταν ταυτόχρονα κατά τη διεύθυνση του άξονά τους με σταθερό αξονικό φορτίο, το οποίο αντιστοιχεί στο 28% περίπου της θλιπτικής αντοχής των υποστυλωμάτων υπό κεντρική θλίψη.

Όλοι οι εφαρμοζόμενοι μανδύες κάλυπταν τον πόδα των υποστυλωμάτων (εκτός μικρού κενού 10 mm) σε ύψος 430 mm, ενώ κατ'εξάιρεση δύο ενισχυμένα δοκίμια με τις μεγαλύτερες ενώσεις (τα δοκίμια L40d_R2 και L40d_M4), όπου το ύψος ενίσχυσής τους ήταν 600 mm, ξεπερνώντας έτσι τα 560 mm του μήκους υπερκάλυψης-μάτισης. Πριν την εφαρμογή της ενίσχυσης, οι γωνίες των διατομών στρογγυλεύτηκαν σε ακτίνα καμπυλότητας περίπου ίση με 25 mm, ώστε να αποφευχθεί η πρόωγη αστοχία του μανδύα σύνθετων υλικών λόγω συγκέντρωσης τάσεων.



Σχήμα 27. Πειραματική Διάταξη [6]



Σχήμα 28. Διατομή δοκιμίων [6]

Δοκίμια	Χαρακτηρισμός
LOS_C	Δοκίμιο ελέγχου, λείος, ενιαίος χάλυβας
LOS_R2	2CFRP, λείος, ενιαίος χάλυβας
LOS_M4	4CTRM, λείος, ενιαίος χάλυβας
LO_C	Δοκίμιο ελέγχου, νευροχάλυβας, ενιαίος
LO_R2	2CFRP, νευροχάλυβας, ενιαίος
LO_M4	4CTRM, νευροχάλυβας, ενιαίος
LO_M4G	4GTRM (glass), νευροχάλυβας, ενιαίος
L20d_C	Δοκίμιο ελέγχου, μικρότερο μήκος μάτισης 20d
L20d_R2	2CFRP, μικρότερο μήκος μάτισης 20d
L20d_M4	4CTRM, μικρότερο μήκος μάτισης 20d
L40d_C	Δοκίμιο ελέγχου, μεγάλο μήκος μάτισης 40d
L40d_R2	2CFRP, μεγάλο μήκος μάτισης 40d
L40d_M4	4CTRM, μεγάλο μήκος μάτισης 40d

Σχήμα 29. Ονοματολογία δοκιμίων

Δοκίμιο	Μέγιστο Φορτίο (kN)		Σχετική Μετακίνηση στο Μέγιστο Φορτίο (%)		Σχετική Μετακίνηση στην Αστοχία (%)		Μορφή Αστοχίας
	Ωθήση	Ελξη	Ωθήση	Ελξη	Ωθήση	Ελξη	
L0S_C	37.92	39.79	2.80	2.80	3.75	3.75	Λυγισμός των διαμήκων ράβδων
L0S_R2	40.16	41.75	3.40	4.40	7.81	7.81	Δεν επετεύχθη η συμβατική αστοχία
L0S_M4	37.23	41.63	4.10	4.40	7.81	7.81	Δεν επετεύχθη η συμβατική αστοχία
L0_C	41.63	42.48	2.50	2.50	3.43	3.43	Λυγισμός των διαμήκων ράβδων
L0_R2	43.46	48.70	2.80	3.10	5.00	-5.31	Λυγισμός των διαμήκων ράβδων έξω από το μανδύα ΙΟΠ
L0_M4	45.77	49.19	2.80	2.80	7.81	7.81	Δεν επετεύχθη η συμβατική αστοχία
L0_M4G	48.82	45.28	4.00	2.80	7.50	6.90	Θραύση του μανδύα ΙΑΜ λόγω λυγισμού και διάγκωση του σκυροδέματος
L20d_C	41.50	36.62	1.87	1.87	4.06	3.12	Διάρρηξη σκυροδέματος και στη συνέχεια αποτίναξη της επικάλυψης
L20d_R2	41.26	52.86	2.81	3.12	5.31	6.25	Διαμήκεις ρωγμές διάρρηξης και εξόγκωση των ράβδων με ενώσεις
L20d_M4	48.46	49.80	3.12	2.18	5.00	5.00	Διαμήκεις ρωγμές διάρρηξης και εξόγκωση των ράβδων με ενώσεις
L40d_C	46.21	43.87	2.50	2.18	3.43	3.12	Διάρρηξη σκυροδέματος και στη συνέχεια αποτίναξη της επικάλυψης
L40d_R2	42.97	49.93	4.68	5.00	7.81	7.81	Δεν επετεύχθη η συμβατική αστοχία
L40d_M4	45.90	50.48	1.87	3.75	7.81	7.81	Δεν επετεύχθη η συμβατική αστοχία

Δοκίμια	Μετ. Πείραμα
L0S_C	3,9274
L0S_R2	6,2298
L0_C	3,2747
L0_R2	5,1735
L20d_C	3,3046
L20d_R2	5,7169
L40d_C	3,2947
L40d_R2	5,2628

Σχήμα 30. Πίνακας αποτελεσμάτων – πλαστιμότητα μ_δ [6]

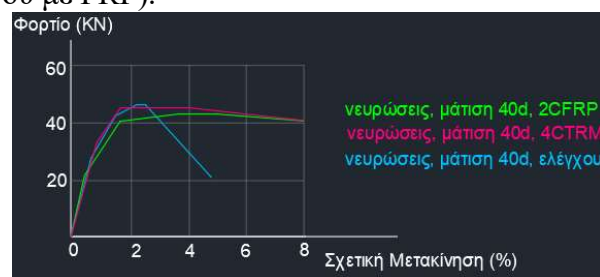
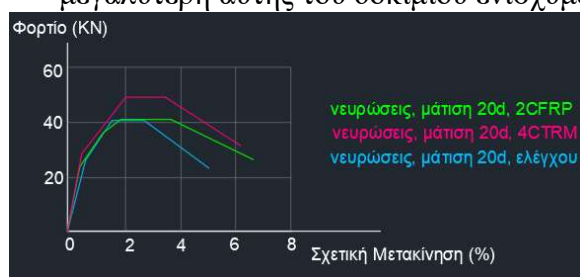
Τα πειραματικά αποτελέσματα οδήγησαν στα εξής συμπεράσματα:

- Η συμπεριφορά και η μορφή αστοχίας όλων των δοκιμών ήταν, όπως αναμενόταν, καμπτική, λόγω της υψηλής τιμής του λόγου διάτμησης ($L_s/h=6.4$).
- Κύριο χαρακτηριστικό της απόκρισης των δύο δοκιμών ελέγχου με συνεχή διαμήκη οπλισμό ήταν η διαρροή τους σε κάμψη, η οποία όμως ακολουθήθηκε από λυγισμό των διαμήκων ράβδων, λόγω του μεγάλου αστήρικτου μήκους από τους αραιά τοποθετημένους συνδετήρες, και αποδιοργάνωση του σκυροδέματος πάνω από τη βάση.
- Η ενίσχυση σε περιοχές με μικρό μήκος παράθεσης οπλισμών κρίνεται απαραίτητη καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις εν συγκρίσει με τις παραθέσεις μεγαλύτερων μηκών που συνήθως επαρκούν χωρίς επιπλέον ενίσχυση, εκμεταλλεύομαστε την αύξηση αντοχής και παραμορφωσιακής ικανότητας στο μέγιστο δυνατό βαθμό.



Σχήμα 31. Καμπύλες P(KN) - Σχετ. Μετακίνηση(%). : α) Για λείο ενιαίο χάλυβα, β) νευροχάλυβα(%)

- Τα δοκίμια λείου εννιαίου χάλυβα ενισχυμένα με φύλλα FRP και TRM (βλ. Σχήμα 31 (α)) εμφάνισαν μεγάλη αύξηση στη σχετική μετακίνηση αστοχίας από το δοκίμιο ελέγχου ενώ η ενίσχυση με TRM ήταν ελαφρώς λιγότερο αποτελεσματική.
- Στα δοκίμια με εννιαίο νευροχάλυβα (βλ. Σχήμα 31 (β)), παρατηρούμε ότι η ενίσχυση με ινοπλέγματα τσιμεντοειδούς μήτρας είναι πολύ πιο αποτελεσματική από την αντίστοιχη οργανική (FRP), καθώς παρουσιάζει μεγαλύτερη ικανότητα παραμόρφωσης και παραλαμβάνει μεγαλύτερο φορτίο. Στην περίπτωση του νευροχάλυβα, η πιο αποδοτική ενίσχυση είναι η περίσφιγξη με 4 φύλλα TRM με ινοπλέγματα άνθρακα καθώς δε εμφάνισαν συμβατική αστοχία, ακολουθούν τα ινοπλέγματα υάλου που αστόχησαν με μεγάλη % σχετική μετακίνηση αστοχίας (35% μεγαλύτερη αυτής του δοκιμίου ενισχυμένου με FRP).



Σχήμα 32. Καμπύλες P(KN) - Σχετ. Μετακίνηση(%). : α) νευροχάλυβας μάτιση 20d, β) νευροχάλυβα μάτιση 40d.

- Το μήκος μάτισης 20d είναι μικρότερο από το $l_{breq}=39d$ (από EC2) που απαιτούν οι ράβδοι Φ14. Στα δοκίμια μικρού μήκους παράθεσης η περίσφιγξη μέσω μανδύα FRP είναι λιγότερο αποτελεσματική από την αντίστοιχη με TRM, αφού η τελευταία παραλαμβάνει μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο και ελαφρά μικρότερη μετακίνηση αστοχίας (βλ. Σχήμα 32 (α)).
- Στα δοκίμια με επαρκές μήκος παράθεσης (βλ. Σχήμα 32 (β)), και οι δύο μέθοδοι ενίσχυσης αποδείχθηκαν αποτελεσματικές καθώς και τα δύο δοκίμια δεν εμφάνισαν συμβατική αστοχία. Τα ενισχυμένα δοκίμια με ινοπλέγματα TRM ανέλαβαν ελαφρώς μεγαλύτερο φορτίο.



Σχήμα 33. Ενδεικτικές αστοχίες δοκιμίων [6]

2.4.2 Εφαρμογή ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013

Αρχικά, λάβαμε από το πείραμα [6] τις τιμές για τα εξής, χρήσιμα για τους υπολογισμούς μας, μεγέθη :

- Τις διαστάσεις διατομής υποστυλωμάτων (b_c, h_c)
- Τις τάσεις διαρροής των διαμήκων ράβδων οπλισμού (f_{sy})
- Τις θλιπτικές αντοχές του σκυροδέματος των δοκιμίων (f_{cm})
- Τον αριθμό των στρώσεων του υλικού ενίσχυσης (n)
- Τα πάχη των υλικών ενίσχυσης (t_j)
- Τα ύψη τοποθέτησης του υλικού ενίσχυσης (h_j)
- Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενίσχυσης (E_j)
- Την χαρακτηριστική αντοχή του υλικού ενίσχυσης (f_{jk})
- Τα μήκη εξομάλυνσης γωνιών στη διατομή των υποστυλωμάτων (d_p, b_p)

Στη συνέχεια, προς εύρεση του συντελεστή α_η εφαρμόστηκε η σχέση Σ6.13 του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 [1] :

$$\alpha_\eta = 1 - \frac{1}{3Ac} [bc^2(1 - \beta)^2 + dc^2(1 - \gamma)^2]$$

$$\text{Όπου : } \beta = 2 \frac{b_p}{b_c} \text{ και } \gamma = 2 \frac{d_p}{h_c}$$

Ο συντελεστής α_s θεωρήθηκε ίσος με 1, επειδή τα υφάσματα ενίσχυσης από FRP είναι συνεχή στο πείραμα.

Ακολουθώντας, ο συντελεστής α για κάθε δοκίμιο υπολογίστηκε ως εξής :

$$\alpha = \alpha_\eta \alpha_s$$

Η αντοχή σχεδιασμού του υλικού ενίσχυσης, υπολογίστηκε από τον τύπο :

$$f_{jd} = f_{jk} / \gamma_m, \text{ όπου } \gamma_m = 1,2 \text{ για περισφιγξη με FRP.}$$

Για τον υπολογισμό του ογκομετρικού ποσοστού του υλικού ενίσχυσης (ω_{wd}), χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του ΕΚΟΣ 2000 (§18.4.4.2) [9], όπου αντί της τάσης διαρροής του χάλυβα (f_{yd}) , τίθεται η εφελκυστική αντοχή (f_{jd}) των μανδύων από frp, εφόσον το πλήθος των στρώσεων είναι μικρότερο ή ίσο των τριών. Διαφορετικά, αν το πλήθος των στρώσεων ήταν μεγαλύτερο των τεσσάρων θα γινόταν απομείωση της εφελκυστικής αντοχής των frp, σύμφωνα με την §6.2.3 του ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013

Επομένως, επιλύοντας ως προς ω_{wd} έχουμε :

$$\omega_{wd} = t_{tot} 2 \min\left(\frac{n_b}{b_c}, \frac{n_h}{h_c}\right) \frac{f_{jd}}{f_{cm}}$$

Όπου $t_{tot} = nt_j$, $n_b = n_h = 2$ (πλήθος σκελών ενίσχυσης κάθετα στις πλευρές b_c και h_c αντίστοιχα).

Στη συνέχεια, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του περισφιγμένου σκυροδέματος προσδιορίστηκαν μέσω των σχέσεων 6.21 και 6.22 της §6.2.3 του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013. Συγκεκριμένα, η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος προέκυψε από την 6.21 :

$$f_{cd,c} = (1,125 + 1,25\alpha\omega_{wd})f_{cd}$$

Όπου $f_{cd} = f_{cm}$, η θλιπτική αντοχή σχεδιασμού του υφιστάμενου σκυροδέματος έτσι όπως προέκυψε από το πείραμα.

Η θλιπτική παραμόρφωση του περισφιγμένου σκυροδέματος προέκυψε από την σχέση 6.22:

$$\varepsilon_{c2,c} = \gamma_{frp} 0,0035 \left(\frac{f_{cd,c}}{f_{cd}} \right)^2, \text{ όπου } \gamma_{frp} = 1,00 \text{ για CFRP.}$$

Ακολούθως, χρειάστηκε να υπολογιστεί το φορτίο στη αξονική διεύθυνση κάθε δοκιμίου (N_{Ed}), το οποίο προσδιορίστηκε με το 28% περίπου της θλιπτικής αντοχής των υποστυλωμάτων υπό κεντρική θλίψη, καθ' υπόδειξη του πειράματος. Ενδεικτικά:

$$N_{Ed} = 0,28 f_{cm} b_c h_c$$

Το ανοιγμένο αξονικό φορτίο κάθε δοκιμίου βρέθηκε ως εξής:

$$v_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{b_c h_c f_{cm}}$$

Προκειμένου να ευρεθεί η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων ($\mu_{1/r} = \mu_\phi$), επιλύθηκε ως προς αυτή η εξίσωση Σ8.11 του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013. Συγκεκριμένα:

$$\mu_{\frac{1}{r}} = \mu_\phi = \frac{\varepsilon_{cu,c}}{2,2 \varepsilon_{sy} v_{Ed}}$$

Για λόγους πληρότητας, βρέθηκε και η μ_ϕ με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.2017 [10] ως εξής:

$$\mu_{\frac{1}{r}} = \mu_\phi = \frac{f_{cd,c}}{f_{cd}} \frac{\varepsilon_{cu,c}}{2,6 \varepsilon_{sy} v_{Ed}}$$

όπου, η απαιτούμενη τιμή της μέγιστης παραμόρφωσης του σκυροδέματος ($\varepsilon_{cu,c}$) τέθηκε ίση με την θλιπτική παραμόρφωση του περισφιγμένου σκυροδέματος ($\varepsilon_{c2,c}$). Επιπλέον, η παραμόρφωση διαρροής του διαμήκους οπλισμού των υποστυλωμάτων (ε_{sy}) υπολογίστηκε διαιρώντας την τάση διαρροής του διαμήκους οπλισμού (f_{sy}) με το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα (200GPa).

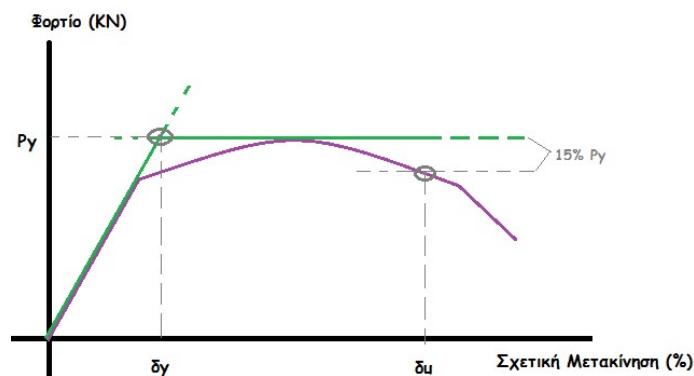
Επιπρόσθετα, η πλαστιμότητα σε όρους στροφής χορδής (μ_θ) υπολογίστηκε από την §Σ8.2.3δ(iv)/ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013, ως εξής :

$$\mu_\theta = \frac{\mu_{\frac{1}{r}} + 2}{3}$$

Εν τέλει, προσδιορίστηκε η πλαστιμότητα (σε όρους μετακινήσεων) της περισφιγμένης διατομής (μ_δ) κάθε υποστυλώματος, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 [9] :

$$\mu_\phi = 2\mu_\delta - 1$$

Οι αντίστοιχες τιμές της μ_δ του πειράματος, προσδιορίστηκαν με διγραμμοποίηση των διαγραμμάτων φορτίου-%σχετικής μετακίνησης λόγω ανακυκλιζόμενης φόρτισης, που παρείχε το πείραμα. Συγκεκριμένα, γνωρίζοντας από το πείραμα την ελάχιστη (από έλξη και ώθηση) σχετική μετακίνηση στην αστοχία, την διαιρέσαμε με την σχετική μετακίνηση στην διαρροή, την οποία υπολογίσαμε από τα προαναφερθέντα διαγράμματα, με τη βοήθεια του προγράμματος Autocad. Τελικά, συγκρίναμε τις πλαστιμότητες των δοκιμίων του πειράματος με αυτές που προέκυψαν κατά τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 [1] προς διεξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, τα οποία αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 34. Σκαρίφημα μεθόδου διγραμμοποίησης

2.4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Παρατίθενται σχήματα με τα αναλυτικά αποτελέσματα από την εφαρμογή του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013, και ακολουθούν σχόλια και παρατηρήσεις επί αυτών.

Δοκίμια	μ _s ΚΑΝ.ΕΠΕ 2017	μ _s ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013	Διαφορά(%)
LOS_C			
LOS_R2	5,1511	4,0869	20,66
LO_C			
LO_R2	3,9676	3,1326	21,05
L20d_C			
L20d_R2	4,2012	3,2495	22,65
L40d_C			
L40d_R2	4,3302	3,3131	23,49

Σχήμα 35.Πλαστιμότητα σε όρους μετακινήσεων μέσω του ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013-2017

Δοκίμια	σχετική μετακίνηση στην αστοχία(πειράμα)	σχετική μετακίνηση στο μέγιστο φορτίο(πειράμα)	σχετική μετακίνηση στην διαρροή(πειράμα)
LOS_C	0,035	0,028	0,65%
LOS_R2	0,071	0,034	0,80%
LO_C	0,031	0,025	1,10%
LO_R2	0,047	0,028	1,00%
L20d_C	0,039	0,0187	1,00%
L20d_R2	0,047	0,0281	0,90%
L40d_C	0,033	0,025	1,00%
L40d_R2	0,078	0,0468	0,85%

Σχήμα 36.Σχετική μετακίνηση διαρροής και αστοχίας μέσω της διγραμμοποίησης των πειραματικών διαγραμμάτων

Δοκίμια	μ _s ΚΑΝ.ΕΠΕ 2017	μ _s ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013	μ _s Πείραμα	Διαφορά(%) ΚΑΝ.ΕΠΕ 2017 - Πείραμα	Διαφορά(%) ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013 - Πείραμα	Σύγκριση
LOS_C			5,3846			Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ είναι συντηρητικός
LOS_R2	5,1511	4,0869	8,8750	- 72,3	- 117,2	Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ είναι συντηρητικός
LO_C			2,8182			Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ είναι συντηρητικός
LO_R2	3,9676	3,1326	4,7000	- 18,5	- 50,0	Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ είναι συντηρητικός
L20d_C			3,9000			Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ είναι συντηρητικός
L20d_R2	4,2012	3,2495	5,2222	- 24,3	- 60,7	Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ είναι συντηρητικός
L40d_C			3,3000			Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ είναι συντηρητικός
L40d_R2	4,3302	3,3131	9,1765	- 111,9	- 177,0	Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ είναι συντηρητικός

Σχήμα 37.Σύγκριση ΚΑΝ.ΕΠΕ και πειραμάτων

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα καταλήξαμε στα εξής συμπεράσματα και παρατηρήσεις:

- Προκειμένου να επιτευχθεί η σύγκριση σε όρους πλαστιμότητας (μ_s) των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013, κρίθηκε απαραίτητος ο προσδιορισμός της πλαστιμότητας των δοκιμών του πειράματος. Το πείραμα παρείχε τις % σχετικές μετακινήσεις στην αστοχία και μέσω της διγραμμοποίησης των διαγραμμάτων φορτίου-%σχετικής μετακίνησης, προσδιορίστηκαν οι %σχετικές μετακινήσεις στη διαρροή. Η διγραμμοποίηση έγινε προσεγγιστικά στο ηλεκτρονικό πρόγραμμα AutoCAD, όπως υποδεικνύεται από το Σχήμα 34 . Η πειραματική πλαστιμότητα των δομικών μελών προσδιορίστηκε τελικώς διαιρώντας την μετακίνηση στην αστοχία με την μετακίνηση στην διαρροή.

- Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι πλαστιμότητες που προέκυψαν από την εφαρμογή του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 ήταν μέχρι 3 φορές (-177%) μικρότερες από τις πειραματικές (βλ. Σχήμα 37). Συγκεκριμένα, μεγαλύτερη πλαστιμότητα παρουσίασε το δοκίμιο L40d_R2, λογικό διότι το συγκεκριμένο δοκίμιο είχε μεγάλο μήκος μάτισης, οπλισμό με νευρώσεις και δύο στρώσεις ενίσχυσης. Αντίθετα, οι πλαστιμότητες που προέκυψαν με βάση τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013, υποδεικνύουν ότι το δοκίμιο L40d_R2 είναι λιγότερο πλάστιμο (κατά 23%) από το LOS_R2. Αυτό οφείλεται πιθανώς στο ότι ο κανονισμός δεν λαμβάνει άμεσα υπόψη τα μήκη μάτισης. Τέλος, για όλα τα δοκίμια ο κανονισμός προβλέπει ότι είναι λιγότερο πλάστιμα σε σχέση με την πραγματικότητα, συνεπώς μπορεί να χαρακτηριστεί αρκετά συντηρητικός.
- Μπορούμε να καταλήξουμε ότι η πλαστιμότητα ακολουθεί την εξής φθίνουσα σειρά (κατά τα πειράματα, με την ίδια ενίσχυση, 2CFRP) : Δοκίμιο με επαρκές μήκος μάτισης > λείος ενιαίος χάλυβας > ανεπαρκής μάτιση > ενιαίος νευροχάλυβας . Ο λείος χάλυβας είναι πιο πλάστιμος από τον νευροχάλυβα και ενδεχομένως σε αυτό να οφείλεται η μεγαλύτερη πλαστιμότητα που παρουσιάζουν τα δοκίμια με λείο χάλυβα.
- Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. επιβεβαιώνει ότι το λιγότερο πλάστιμο δοκίμιο είναι αυτό με τον ενιαίο νευροχάλυβα, όμως ως πιο πλάστιμο υποδεικνύει το δοκίμιο με τον ενιαίο λείο χάλυβα και όχι αυτό με το επαρκές μήκος μάτισης (40d) που αποδεικνύεται στο πείραμα.
- Κατά την εφαρμογή της προτεινόμενης σχέσης (Σ8.11β) από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2017, για την μ_f , καταλήξαμε και πάλι στο ίδιο συμπέρασμα, ότι ο κανονισμός είναι συντηρητικός. Ωστόσο, σε σύγκριση με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013, προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική πλαστιμότητα. Συγκεκριμένα η απόκλιση ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2017 και πειράματος κυμαίνεται από 20-112% με τον κανονισμό να δίνει μικρότερες τιμές.(βλ. Σχήμα 37). Όμοιος με το προαναφερθέν σχόλιο, το δοκίμιο L40d_R2 παρουσίασε τη μέγιστη διαφορά (~112%).
- Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ 2017 δίνει μεγαλύτερες τιμές για την πλαστιμότητα σε σχέση με τον αντίστοιχο κανονισμό του 2013 κατά μέσο όρο 22%, προσεγγίζοντας καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα (βλ. Σχήμα 35).
- Υπάρχει περίπτωση η προσέγγιση να γίνει ακόμα καλύτερη αν ακολουθηθεί ολόκληρη η διαδικασία που προβλέπει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2017, και όχι μόνο η χρήση της διορθωμένης σχέσης (Σ8.11β), όπως εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Σύγκριση TRM και FRP

Σχετικά με την καμπτική ενίσχυση δοκών, [3] διαπιστώθηκε ότι η ενίσχυση με TRM έχει χαμηλότερη αποδοτικότητα από αυτή με FRP, με μέγιστο λόγο αποτελεσματικότητας TRM/FRP 0,80. Ωστόσο, τριπλασιάζοντας τις στρώσεις από TRM διπλασιάστηκε η αποτελεσματικότητά τους. Η τοποθέτηση μανδύων U από TRM στις απολήξεις των δοκών, δεν προσέδωσε σημαντική αύξηση στην καμπτική αντοχή του μέλους (μόνο 9%), ενώ αντίθετα οι αντίστοιχοι μανδύες από FRP οδήγησαν σε αύξησή της κατά 90%.

Σχετικά με την διατμητική ενίσχυση δοκών ορθογωνικής διατομής, [4] διαπιστώθηκε ότι οι μανδύες από TRM είναι λιγότερο αποτελεσματικοί σε σχέση με τους FRP(με λόγο αποτελεσματικότητας TRM/FRP από 0,09 έως 0,92), αλλά αποδείχθηκαν πιο αποδοτικοί όσον αφορά την αύξηση της ικανότητας παραμόρφωσης των δοκών. Η αποτελεσματικότητα των δύο σύνθετων υλικών, καθορίζεται από τον τρόπο τοποθέτησης του μανδύα και τον αριθμό των στρώσεων. Συγκεκριμένα, η αύξηση των στρώσεων των μανδύων από μία σε δύο, επηρέασε περισσότερο τη διατμητική αντοχή των δοκών που ενισχύθηκαν με TRM, καθώς την αύξησε κατά μέγιστο 7,8%(SB μανδύας) , ενώ στην περίπτωση των FRP αυξήθηκε έως και 1,35% (SB μανδύας). Επιπλέον, στην περίπτωση των TRM, η αύξηση των στρώσεων οδήγησε σε επιθυμητό τρόπο αστοχίας , με σταδιακή αποκόλληση του μανδύα.

Σχετικά με την διατμητική ενίσχυση πλακοδοκών , [5] στα δοκίμια που ενισχυθήκαν με TRM, οι ρωγμές ήταν σαφώς ορατές στους μανδύες, λόγω της εύθραυστης φύσης της ανόργανης μήτρας, ενώ η διαγώνια ρωγμή στα ενισχυμένα με FRP δοκίμια επιβεβαιώθηκε μετά την αφαίρεση των μανδύων στο τέλος κάθε δοκιμής. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι για ίδιο όγκο ινών, ένα στρώμα από βαριά ινοπλέγματα είναι πολύ πιο αποτελεσματικό από δύο στρώματα ελαφρού ινοπλέγματος. Επιπροσθέτως, υψίστης σημασίας κρίνεται η εφαρμογή συστήματος αγκύρωσης στον μανδύα ενίσχυσης, καθώς η αποτελεσματικότητά του μπορεί να αυξηθεί έως και 300%. Τα μη αγκυρωμένα δοκίμια με FRP είναι σχεδόν διπλάσια πιο αποτελεσματικά σε σχέση με τα αντίστοιχα με TRM, ωστόσο, εάν οι μανδύες είναι αγκυρωμένοι, το σύστημα TRM είναι οριακά κατώτερο από το σύστημα FRP.

Σχετικά με τη διατμητική ενίσχυση δοκών, με μανδύες από FRP και TRM, όταν δοκοί ήταν εκτιθέμενοι σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 20 έως 250°C [7], διαπιστώθηκε ότι η διατμητική ενίσχυση με μανδύες από TRM είναι αρκετά πιο αποτελεσματική από ότι με FRP, σε υψηλές θερμοκρασίες. Πιο αναλυτικά, αυξάνοντας την θερμοκρασία από 100°C σε 150°C, παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη πτώση της αποτελεσματικότητας των μανδύων από FRP, ενώ αντιθέτως, η αποτελεσματικότητα των μανδύων από TRM μειώθηκε ελάχιστα για σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας από 100°C σε 250°C. Επιπλέον, η χρησιμοποίηση αγκυρίων σε συνδυασμό με ολόσωμους μανδύες από TRM, οδήγησε σε αύξηση της αποτελεσματικότητάς τους κατά 80%, παρόλο που στο τέλος λόγω υψηλής θερμοκρασίας καταργήθηκε η αγκύρωση.

Σχετικά με την ενίσχυση τριών τύπων τοιχοποιίας: α) τοιχία διάτμησης (shear walls), β) τύπου δοκού-υποστυλώματος και (γ) δοκοί., [8] συμπεραίνεται ότι, οι επικαλύψεις από TRM παρέχουν σημαντική αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας σε σύγκριση με τις ενισχύσεις που βασίζονται στη ρητίνη. Όσον αφορά τη αντοχή, οι μανδύες από TRM προσδίδουν τουλάχιστον 65-70% μεγαλύτερη αντοχή. Όσον αφορά τη δυνατότητα παραμόρφωσης είναι πιο αποτελεσματικοί κατά 15-30% στους διάτμητικούς τοίχους, κατά 135% σε τοίχους τύπου δοκού-υποστυλώματος και 350% σε τοιχώματα τύπου δοκού. Επιπλέον, ανεξάρτητα από το μητρικό υλικό (κονίαμα ή ρητίνη), η αποτελεσματικότητα γενικά αυξάνεται με τον αριθμό των στρώσεων.

Σχετικά με την περίσφιγξη υποστυλωμάτων, [6] οι μανδύες από TRM βρέθηκαν εξαιρετικά αποτελεσματικοί για την αύξηση της αντοχής και της ικανότητας παραμόρφωσής τους κατά την αστοχία, όταν εφαρμόζονται σε υποστυλώματα με μικρά μήκη υπερκάλυψης ράβδων. Συγκρινόμενοι με μανδύες FRP ίσης δυστένειας, χαρακτηρίζονται από ελαφρώς μειωμένη αποτελεσματικότητα για υποστυλώματα με μικρά μήκη υπερκάλυψης ράβδων (20d) και από ίδια αποτελεσματικότητα όταν εφαρμόζονται σε υποστυλώματα με μεγαλύτερες υπερκαλύψεις ράβδων (40d). Ειδικά για τα δοκίμια με διαμήκεις ράβδους νευροχάλυβα, η αποτελεσματικότητα των μανδύων TRM ήταν κατά 50% περίπου μεγαλύτερη από τους μανδύες FRP. Και για τις δύο περιπτώσεις των σύνθετων υλικών, η ικανότητα παραμόρφωσης των ενισχυμένων δοκιμίων υπερδιπλασιάστηκε. Συγκεκριμένα, οι ελαφρώς λυγισμένες μέσα από τους μανδύες ράβδοι, μπορούσαν να παραλάβουν σημαντικό ποσοστό της θλιπτικής τους αντοχής, μιας και η αποτίναξη της επικάλυψης παρεμποδίζονταν από τους μανδύες. Αναμένεται ότι, όπως η τεχνική των FRP, έτσι και η τεχνική των TRM, στο εγγύς μέλλον θα αποτελεί μια εξαιρετικά ενδιαφέρουσα πρόταση για την αναβάθμιση των ανεπαρκώς σχεδιασμένων υποστυλωμάτων.

5.2 Σύγκριση ΚΑΝ.ΕΠΕ και πειραματικών αποτελεσμάτων

Συμπερασματικά, μπορούμε να καταλήξουμε στις εξής παρατηρήσεις:

Δοκιμή Κάμψης δοκού:

- Η ασυμφωνία του κανονισμού [1] στις μορφές αστοχίας των δοκιμίων περιορίζεται μόνο στα δοκίμια με ενίσχυση από στρώσεις βασάλτη και υάλου, ενώ συμφωνεί σε όλα τα δοκίμια επένδυσης άνθρακα. Αυτή η απόκλιση μπορεί να οφείλεται πιθανώς στην ενίσχυση μέσω πολλών στρώσεων σύνθετων φύλλων (στρώσεις: 7, αποκλίσεις από τον διορθωτικό συντελεστή ψ) καταλήγοντας σε πιθανώς μικρότερη αντοχή ενίσχυσης.
- Στο δοκίμιο με μανδύες τύπου U στις απολήξεις της κυρίως ενίσχυσης, παρατηρήθηκε αύξηση της δυνατότητας ανάληψης καμπτικής αντοχής σχεδόν 3 φορές σε σχέση με το δοκίμιο ελέγχου και περίπου 2 φορές σε σχέση με το δοκίμιο χωρίς απολήξεις U. Η χρήση μανδύων U παρεμποδίζει την αποκόλληση στις απολήξεις και οδηγεί σε θραύση του υλικού.
- Αξίζει να αναφερθεί ότι η % αύξηση της καμπτικής αντοχής όλων των δοκιμίων, όπως προκύπτει από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.2013, είναι μικρότερη από την αντίστοιχη που αποδεικνύεται πειραματικά, όμως παραμένει ίδιας τάξης μεγέθους. Συνεπώς, ο Κανονισμός είναι συντηρητικός

Δοκιμή Διάτμησης δοκού ορθογωνικής:

- Ο κανονισμός [1] επιβεβαιώνει όλες τις μορφές αστοχίας των δοκιμίων.
- Η διατμητική αντοχή($V_{Rd,tot}$) και η συνεισφορά του συνθετου υλικού (V_{jd}) υπερεκτιμάται αρκετά. Συγκεκριμένα, στο δοκίμιο με ενίσχυση τύπου U (2 στρώσεων) η απόκλιση στην V_{jd} είναι 60% μεγαλύτερη απ'ότι δίνουν τα αποτελέσματα της δοκιμής.
- Η μεγαλύτερη αντοχή υλικού ενίσχυσης σε διάτμηση προκύπτει όπως αναμενόταν αυτή του δοκιμίου με τη κλειστή ενίσχυση. Ακολουθούν τα δοκίμια με ενίσχυση U και τέλος η πλευρική ενίσχυση.

Δοκιμή Διάτμησης δοκού διατομής T:

- Παρατηρούμε στη σύγκριση των αντοχών V_{jd} , ότι ο ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013 [1] προσέγγισε την αντοχή του δοκιμίου ενισχυμένο- U. Παρόλα αυτά όπως ακριβώς και στα δοκίμια με ορθογωνική διατομή, ο κανονισμός υπερεκτιμά αρκετά την πραγματική V_{jd} κατά 17%. Μεγάλη διαφορά όπως αναμενόταν βρέθηκε μεταξύ των τιμών για το ενισχυμένο με U μανδύα και αγκύρια, καθώς ο κανονισμός αγνοεί τη συνεισφορά των τελευταίων.
- Σημειώνεται ότι, η αύξηση στην αποτελεσματικότητα των μανδύων U μέσω των αγκυρίων, τα οποία προσδίδουν ~25% μεγαλύτερη αντοχή στα ενισχυμένα δοκίμια και ~50% μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με το δοκίμιο ελέγχου.

Δοκιμή Περίσφιγξης υποστρώματος:

- Η πλαστιμότητα μ_s που υπολογίζει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013-2017 [1]-[10] είναι αρκετά μικρότερη της πραγματικής, επομένως τάσσεται υπέρ της ασφαλείας.
- Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι πλαστιμότητες που προέκυψαν από την εφαρμογή του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 [1] ήταν έως και 3 φορές μικρότερες από τα πειραματικά αποτελέσματα. Παρουσιάστηκε μέγιστη διαφορά εμφανίστηκε στο δοκίμιο με μάτιση 40d, γεγονός που πιθανώς να οφείλεται στο μεγάλο μήκος παράθεσης του οπλισμού, μια παράμετρος που δε λαμβάνεται άμεσα υπόψη στις σχέσεις που προτείνει ο κανονισμός.
- Μεγαλύτερη πλαστιμότητα για τον ίδιο αριθμό ενισχυτικών φύλλων μανδύα είχε το δοκίμιο με επαρκές μήκος μάτισης, ακολουθεί το δοκίμιο με λείο εννιαίο χάλυβα, στη συνέχεια η ανεπαρκής μάτιση και τέλος ο εννιαίος νευροχάλυβας.
- Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. επιβεβαιώνει ότι το λιγότερο πλαστικό δοκίμιο είναι αυτό με τον ενιαίο νευροχάλυβα, όμως ως πιο πλαστικό υποδεικνύει το δοκίμιο με τον ενιαίο λείο χάλυβα και όχι αυτό με το επαρκές μήκος μάτισης (40d) που αποδεικνύεται στο πείραμα.
- Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2017 [10] , σε σύγκριση με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013 [1] , προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική πλαστιμότητα. Συγκεκριμένα η απόκλιση ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2017 και πειράματος είναι κατά μ.ο 20%.
- Υπάρχει περίπτωση η προσέγγιση να γίνει ακόμα καλύτερη αν ακολουθηθεί ολόκληρη η διαδικασία που προβλέπει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2017, και όχι μόνο η χρήση της διορθωμένης σχέσης (Σ8.11β), όπως εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία.

5.3 Προτάσεις για μελλοντικές αναθεωρήσεις/διορθώσεις:

Στο κανονισμό θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν:

- Η αύξηση διατμητικής αντοχής λόγω χρήσης αγκυρίων ανά ορισμένες αποστάσεις. Επίσης, λόγω αυτού θα προκύψουν επιπλέον μορφές αστοχίας που θα αφορούν τα αγκύρια και πιθανή πρόωρη αστοχία τους. Μια τέτοια συχνή τεχνική που αποσκοπεί στο να αποτρέψει τη δοκό να αστοχήσει λόγω αποκόλλησης θα έπρεπε να συμπεριληφθεί εντός του ΚΑΝ.ΕΠΕ., είτε μέσω αυξητικού συντελεστή που μπορεί να προκύψει πειραματικά είτε να ληφθεί υπόψη στο μοντέλο η αντοχή των αγκυρίων μέχρι θραύσης ή εξόλκευσής τους και η πυκνότητα (διάταξη) τους κατά μήκος του στοιχείου.
- Με αφορμή το ότι ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. λαμβάνει υπόψη τη συνεισφορά μανδύων U στις απολήξεις, προτείνεται να συμπεριληφθεί και η συνεισφορά τέτοιων μανδύων τοποθετημένων ανά αποστάσεις κατά μήκος της δοκού. Ενώ μια τέτοια τεχνική λαμβάνεται υπόψη σαν διατμητικός οπλισμός στο αντίστοιχο χωρίο του ΚΑΝ.ΕΠΕ θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως επιπλέον οπλισμός επί ενός κύριου ελάσματος σε περίπτωση καμπτικής ενίσχυσης δοκού. Με αυτόν τον τρόπο, αποτρέπεται η αποκόλληση του ελάσματος, πιθανώς αυξάνοντας την καμπτική αντοχή του και οδηγώντας σε αστοχία λόγω θραύσης πριν εμφανιστεί αποκόλληση.
- Πιθανή επιπλέον διερεύνηση και διόρθωση της σχέσης που υπολογίζει την συνεισφορά των σύνθετων υλικών (ιδιαίτερα σε ενισχύσεις με $\kappa > 3$ στρώσεων) στη διατμητική αντοχή έτσι ώστε να μην υπερεκτιμά την αντοχή τους και να δίνει πιο ασφαλή (συντηρητικά) αποτελέσματα.
- Η επιρροή της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, που προσεγγίζει τις πραγματικές φορτίσεις λόγω σεισμού. Οι σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ., δίνουν αποτελέσματα θεωρώντας μια διεύθυνση φόρτισης.
- Σχέσεις για τον υπολογισμό του απαιτούμενου αριθμού στρώσεων για ενισχύσεις σε δοκούς και υποστυλώματα με τα σύνθετα υλικά TRM. Η σύγχρονη τεχνική αυτή βρίσκει όλο ένα και πιο πολύ εφαρμογή στη πράξη και είναι απαραίτητη η προσθήκη οδηγιών στον κανονισμό.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2013
- [2] Σημειώσεις μαθήματος “Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος”, διδάσκων: Δρ.Δρίτσος
- [3] “Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams.” Saad M. Raoof -Lampros N. Koutas - Dionysios A. Bournas (ELSEVIER,2017)
- [4] “Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams.” Zoi C.Tetta- Lampros N. Koutas - Dionysios A. Bournas (ELSEVIER,2015)
- [5] “Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets.” E. Tzoura - T. C. Triantafillou (ELSEVIER,2014)
- [6] “Περίσφιγξη Υφιστάμενων Υποστυλωμάτων Οπλισμένου Σκυροδέματος με Μειωμένη Ικανότητα Παραμόρφωσης μέσω Τοπικών Μανδυνών ΙΑΜ και ΙΟΠ.” Διονύσιος Μπουρνάς-Αθανάσιος Τριανταφύλλου (16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/ 2009, Πάφος, Κύπρος)
- [7] “TRM vs FRP jacketing in shear strengthening of concrete members subjected to high temperatures.” Zoi C.Tetta- Dionysios A. Bournas (ELSEVIER,2016)
- [8] “Textile-reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in-plane cyclic loading” Catherine G. Papanicolaou -Thanasis C. Triantafillou - Kyriakos Karlos-Myrto Papathanasiou (RILEM, 2006)
- [9] “Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος Ι” , Μιχαήλ Ν. Φαρδής, Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών (Πάτρα,2016)
- [10] ΚΑΝ.ΕΠΕ 2017
- [11] “Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας με Σύνθετα Υλικά” , Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου, Καθηγητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών (Πάτρα,2006)

