

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ NSM

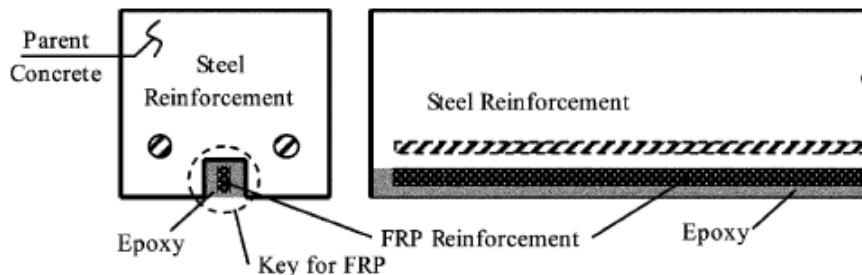
ΚΑΡΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΧΑΛΜΟΥΚΗΣ ΙΑΣΩΝ

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο τη μελέτη της μεθόδου NSM για ενίσχυση δοκών σε κάμψη. Περιλαμβάνει την περιγραφή και τα αποτελέσματα πειραμάτων συνδυασμένα με μια θεωρητική ανάλυση που ακολουθούνται από σχόλια και συμπεράσματα ως προς την αποδοτικότητα της μεθόδου. Τέλος, προτείνεται υλικό ενίσχυσης και διάφορες λύσεις για τη βελτιστοποίηση της μεθόδου.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κατασκευές με την πάροδο του χρόνου παρακμάζουν και γερνούν, με άλλα λόγια η αντοχή για την οποία σχεδιάστηκαν αρχικώς μειώνεται συνεχώς, ενώ οι απαιτήσεις αντοχής και λειτουργικότητας αυξάνουν. Αν λάβει κανείς υπόψη ότι ο κύριος όγκος των κατασκευών έχει ήδη δομηθεί, η ανάγκη των ενισχύσεων και των επισκευών είναι επιτακτική. Η χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ) [ή όπως συναντάται στη βιβλιογραφία (FRP)] σε επισκευές αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη λύση που χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο. Τα FRP χρησιμοποιούνται με διαφορετικές τεχνικές έτσι ώστε να εκμεταλλευτούν τις ιδιότητες των υλικών στο έπακρο. Βασικά πλεονεκτήματα των FRP είναι: αντοχή σε διάβρωση, (συναντώνται συχνά σε παραθαλάσσιες κατασκευές) υψηλός λόγος αντοχής προς βάρος, ηλεκτρομαγνητική ουδετερότητα και η ευκολία εφαρμογής τους. Αρχικά τα FRP χρησιμοποιήθηκαν ως εξωτερική ενίσχυση σε υπάρχοντα μέλη, με βασικά μειονεκτήματα την τρωτότητα έναντι υψηλών θερμοκρασιών πυρκαγιάς, εξωτερικών φθορών και αποκόλλησης. Η σημαντική μείωση των παραπάνω προβλημάτων επιτυγχάνεται με τη χρήση της τεχνικής NSM, (near-surface mounted) μια τεχνική που στηρίζεται στην τοποθέτηση του υλικού ενίσχυσης μέσα σε εγκοπές που έχουν ανοιχθεί στην εφελκυσόμενη πλευρά του δοκιμίου. Τα επικρατέστερα υλικά ενίσχυσης που χρησιμοποιούνται είναι FRP (σε μορφή ράβδων και λωρίδων) από άνθρακα ή γυαλί αλλά και ράβδοι οπλισμού από ανοξείδωτο χάλυβα.



Σχήμα 1. Μέλος από οπλισμένο σκυρόδεμα ενισχυμένο σε κάμψη με τη μέθοδο NSM.

2. ΣΚΟΠΟΣ

Ο στόχος της εργασίας είναι να μελετήσει την καμπτική ενίσχυση δοκών με τη χρήση FRP υλικών αλλά και ανοξείδωτου χάλυβα με χρήση της μεθόδου NSM. Για να

αποτιμηθεί ο βαθμός ενίσχυσης οι κυριότερες παράμετροι που εξετάστηκαν είναι το ποσοστό αύξησης της ροπής αντοχής, ο βαθμός εκμετάλλευσης των χρησιμοποιούμενων υλικών αλλά και η ικανότητα των δοκιμών να απορροφήσουν ενέργεια. Αντικείμενο μελέτης ακόμη αποτελούν γενικές κατασκευαστικές προδιαγραφές αλλά και εγγενείς περιορισμοί και δυσκολίες στη χρήση της μεθόδου.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

1 πείραμα από τους J. R. Yost, S. P. Gross, D. W. Dinehart, J. J. Mildenberg, [1]

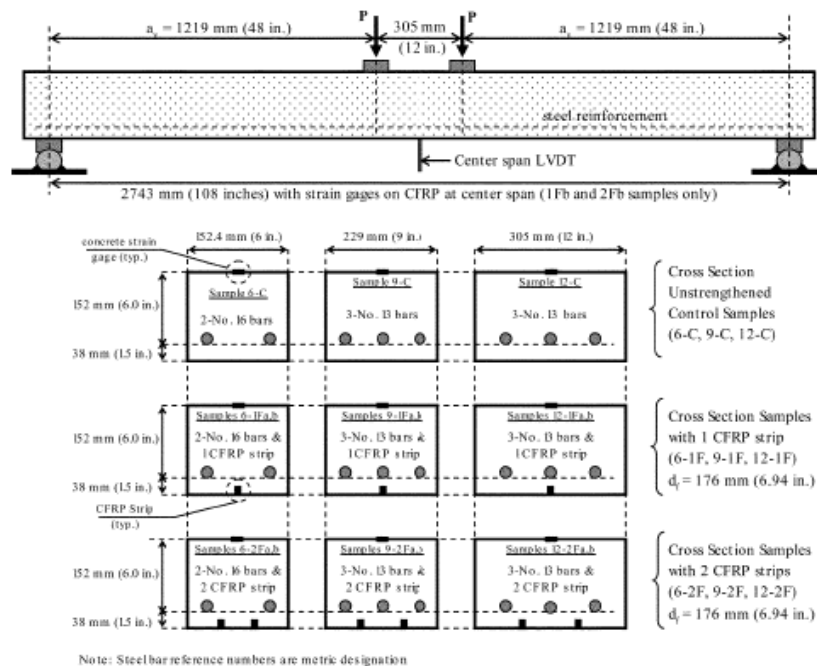
Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν δεκαπέντε δοκίμια ορθογωνικών δοκών τα οποία χωρίστηκαν σε τρεις ομάδες των πέντε δοκών. Η πρώτη ομάδα δοκών είχε διαστάσεις 152X190mm και οπλισμό 2Φ16. Η δεύτερη ομάδα δοκών είχε διαστάσεις 230X190mm και οπλισμό 3Φ13. Τέλος, η τρίτη ομάδα δοκών είχε διαστάσεις 305X190mm και οπλισμό 3Φ13. Για κάθε δοκό ο λόγος του μήκους διατημήσεως προς το στατικό ύψος είναι $av/ds=8.4$. Ο λόγος αυτός επιλέχθηκε εσκεμμένα ώστε η αστοχία να είναι καμπτική. Το υλικό ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκε είναι λωρίδες CFRP ορθογωνικής διατομής και εμβαδού 15X2.5 mm. Σε κάθε ομάδα υπήρχε ένα δοκίμιο ελέγχου χωρίς ενίσχυση, δύο δοκίμια με μία λωρίδα και δύο δοκίμια με δύο λωρίδες.

Αντοχή σκυροδέματος : 37,2MPa

Εμβαδό NSM: 37.5 mm² για το την πρώτη ομάδα και 75 mm² για τη δεύτερη.

Χάλυβας E=200 GPa, διαρροή 500 MPa

NSM E=136 GPa, 1648 MPa.



Σχήμα 2. Διάταξη του πειράματος

Μέλος	Φορτίο Διαρροής P_y (kN)	Φορτίο Αστοχίας P_{max} (kN)	Μηχανισμός αστοχίας	P_y/P_{yC}	P_{max}/P_{maxC}
6C (ελέγχου)	19	21,1	CC	1,00	1,00
6C-1-Fa	20,9	24,8	CC	1,10	1,18
6C-1-Fb	21,3	23,2	CC	1,12	1,10
6C-2-Fa	24,4	25	CC	1,28	1,18
6C-2-Fb	24,7	26,9	CC	1,30	1,27
9C (ελέγχου)	22,4	25,3	CC	1,00	1,00
9C-1-Fa	25,3	28,2	CC	1,13	1,11
9C-1-Fb	24,5	27,9	CC	1,09	1,10
9C-2-Fa	27,7	37	CC	1,24	1,46
9C-2-Fb	25	35,8	CC	1,12	1,42
12C (ελέγχου)	21,5	23,5	CC	1,00	1,00
12C-1-Fa	24,7	29,6	TR	1,15	1,26
12C-1-Fb	25,9	31	TR	1,20	1,32
12C-2-Fa	26,5	33,8	CC	1,23	1,44
12C-2-Fb	28	41,7	CC	1,30	1,77

CC = αστοχία σκυροδέματος, TR= αστοχία υλικού ενίσχυσης

Πίνακας 1. Αποτελέσματα 1^{ου} πειράματος

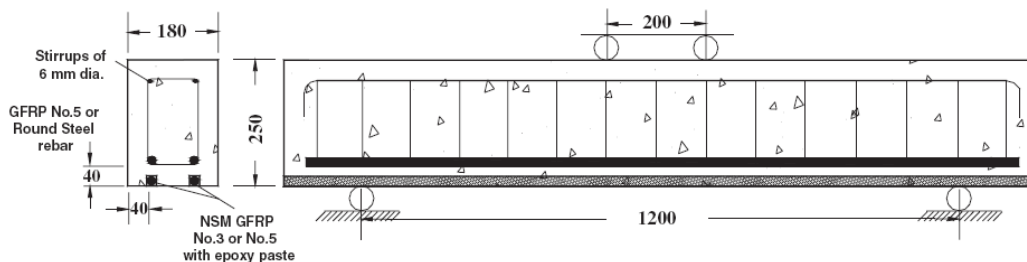
2 πείραμα από τους W.C. Tang, R.V. Balendran, A. Nadeem, H. Y. Leung, [2]

Χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια δοκών διαστάσεων 180X250X1500 mm, τα οποία είχαν οπλισμό στο κάτω πέλμα 2Φ16 και συνδετήρες Φ6 ανά 100 mm ώστε η αστοχία να είναι καμπτική. Η επικάλυψη ήταν 40 mm για όλες τις ράβδους. Από τα τρία δοκίμια το πρώτο δεν ενισχύθηκε καθόλου και χρησιμοποιήθηκε ως δοκός ελέγχου, ενώ στα υπόλοιπα δύο το υλικό ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκε είναι GFRP διαμέτρου 16mm και η ρητίνη ήταν τύπου XH-111 στο ένα και XH-130 στο άλλο.

Αντοχή σκυροδέματος 58 MPa.

Υλικά	Διάμετρος (mm)	Ορίο διαρροής (N/mm^2)	Τάση αστοχίας (N/mm^2)	E (kN/mm^2)	Οριακή παραμόρφωση (%)
Χάλυβας	16	398	512	252	0.55
GFRP no.5	16	-	478	64	0.74

Πίνακας 2. Ιδιότητες υλικών



Σχήμα 3. Διάταξη του πειράματος



Σχήμα 4. Κυκλικές ράβδοι GFRP

Δοκός	Ρητίνη	Διάμετρος ράβδου γυαλιού
S-NC	-	-
S-NC-G5-A	XH-111	Φ16
S-NC-G5-B	XH-130	Φ16

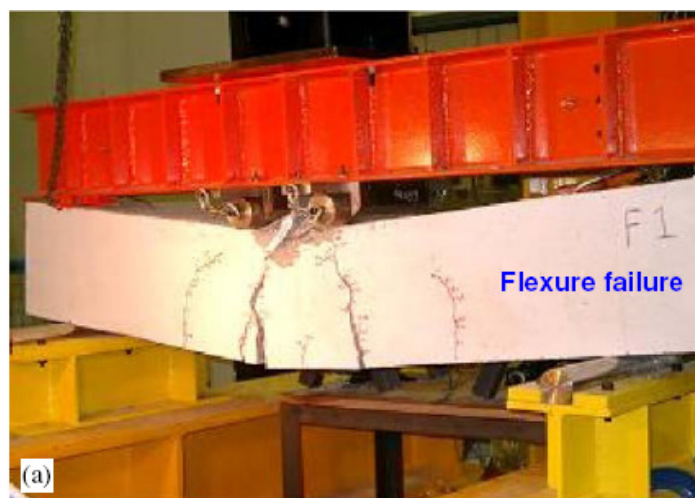
Πίνακας 2. Υλικά ενίσχυσης

Δοκός	Διάμετρος ράβδου γυαλιού (mm)	Φορτίο αστοχίας (kN)	Ροπή αντοχής (kNm)	Ποσοστό Ενίσχυσης %
S-NC	-	118	28.7	-
S-NC-G5-A	16	149	37.3	30
S-NC-G5-B	16	159	39.8	38.7

Πίνακας 3. Αποτελέσματα 2^{ου} πειράματος

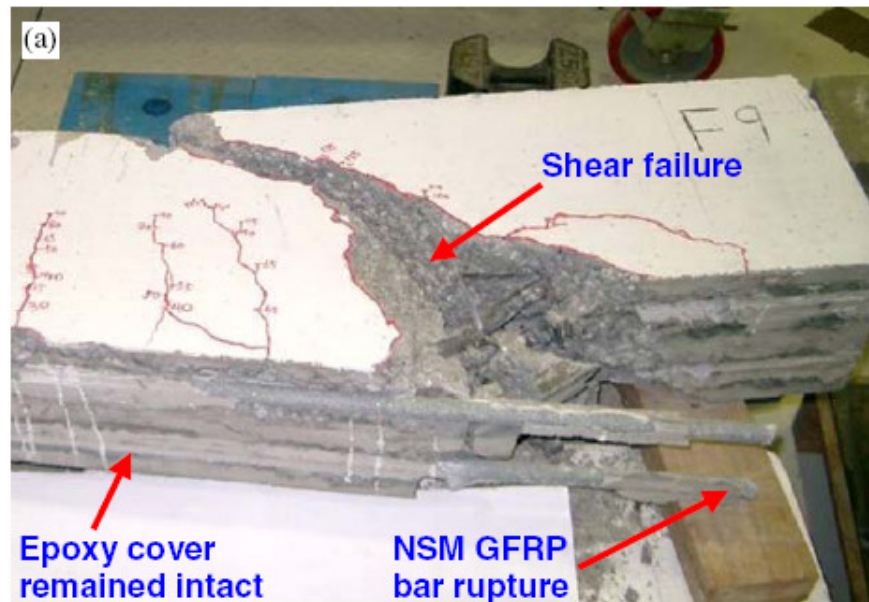
Τρόποι αστοχίας

Το δοκίμιο που δεν ήταν ενισχυμένο αστόχησε σε κάμψη όπως φαίνεται και στο σχήμα. Αυτή η αστοχία πραγματοποιείται στο κεντρικό σημείο της δοκού με διαπλάτυνση των κάθετων ρωγμών. Όσο το εξωτερικό φορτίο αυξανόταν και άλλες ρωγμές δημιουργούνταν από τον ουδέτερο άξονα και πάνω με επίσης σημαντική αύξηση της βύθισης.

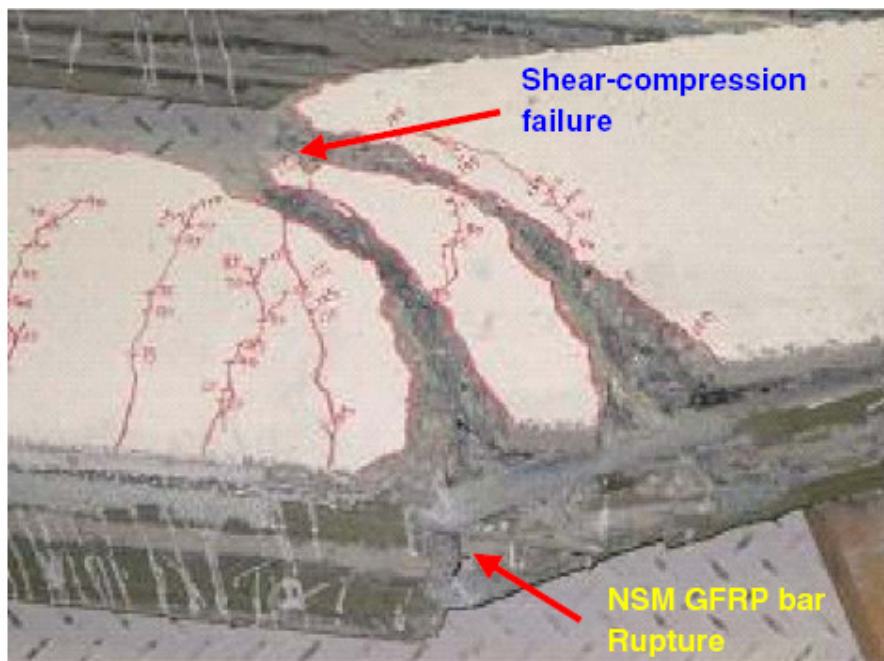


Σχήμα 5. Αστοχία μη ενισχυμένου δοκίμιου

Τα ενισχυμένα δοκίμια αστοχούσαν διατμητικά ενώ ταυτόχρονα αποκόλλουσαν η ρητίνη και ακολουθούσε θραύση του NSM.



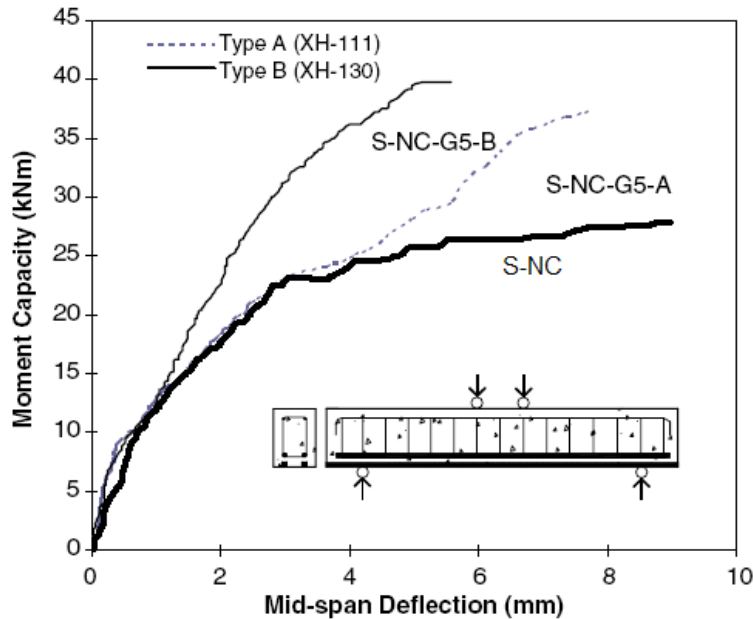
Σχήμα 6. Αστοχία ενισχυμένου δοκιμίου [S-NC-G5-A]



Σχήμα 7. Αστοχία ενισχυμένου δοκιμίου [S-NC-G5-B]

Συγκρίνοντας τα παραπάνω σχήματα συμπεραίνουμε τα εξής για τη ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε. Στην πρώτη περίπτωση υπήρχε πρόβλημα αποκόλλησης ενώ στη δεύτερη που η ρητίνη ήταν ισχυρότερη, μετά τη θραύση του NSM, το ενισχυόμενο υλικό παρουσίαζε καλύτερη συνοχή. Επιπρόσθετα, επειδή η καμπτική αντοχή της

ρητίνης XH-130 ήταν 49 N/mm^2 και της ρητίνης XH-111 ήταν 27 N/mm^2 , το δοκίμιο με την ισχυρότερη ρητίνη έφθασε σε μεγαλύτερη ροπή αστοχίας κυρίως λόγω της καλύτερης συνάφειας του υλικού ενίσχυσης με το περιβάλλον σκυρόδεμα κάτι που καθυστέρησε την αποκόλληση και κατά συνέπεια την αστοχία του μέλους. Με άλλα λόγια, η ρητίνη επηρεάζει τον τρόπο αστοχίας όπως και την αντοχή.



Διάγραμμα 1. Ροπή με βύθιση

3 πείραμα από τους Moataz Badawi, Khaled Soudki, [3]

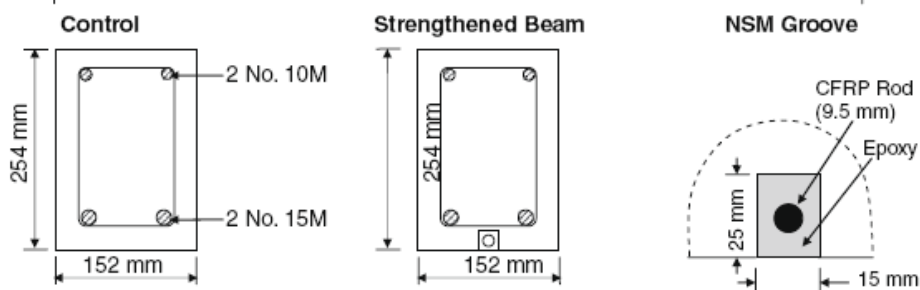
Στο τρίτο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα δοκίμια ορθογωνικών δοκών οπλισμένου σκυροδέματος. Οι διαστάσεις τους ήταν $152 \times 254 \text{ mm}$ και το μήκος 3500 mm . Ο οπλισμός ήταν $2\Phi 15$ στο κάτω πέλμα και $2\Phi 11.2$ στο πάνω. Το πρώτο ήταν ένα δοκίμιο ελέγχου χωρίς ενίσχυση, το δεύτερο ήταν ενισχυμένο με μία ράβδο CFRP $\Phi 9.5$ και τα άλλα δύο είχαν την ίδια ενίσχυση προεντεταμένη στο 40 και 60 % αντίστοιχα στην τιμή αντοχής της.

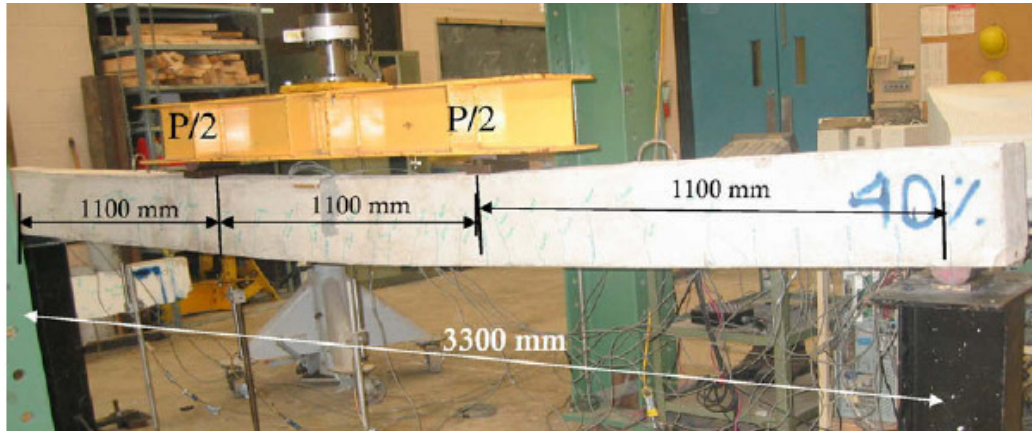
Αντοχή σκυροδέματος : 45 MPa , επικάλυψη 30 mm

Εμβαδό NSM: $9,5 \text{ mm}$ διάμετρος

Χάλυβας $E=190 \text{ GPa}$, 440 MPa

NSM $E=136 \text{ GPa}$, 1970 MPa

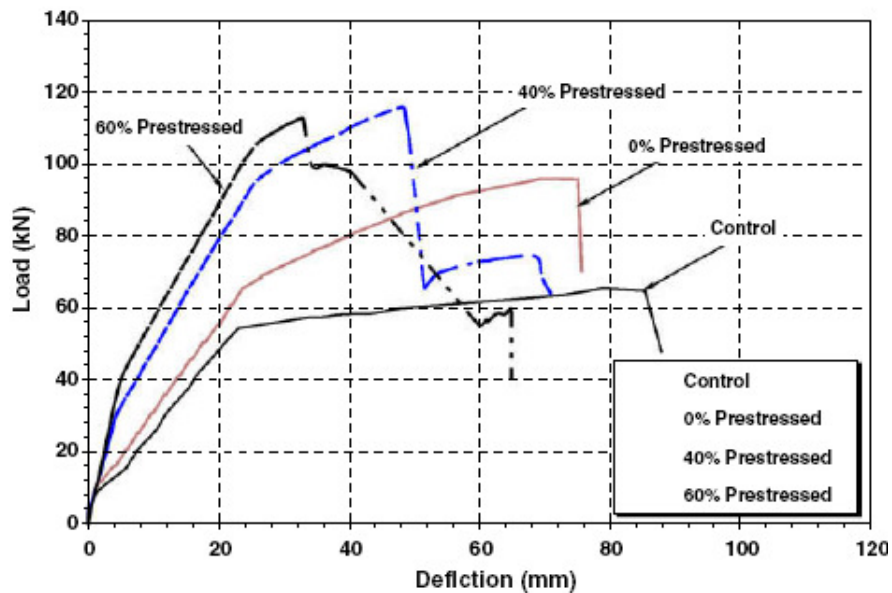




Σχήμα 8. Διάταξη του πειράματος

Η δοκός ελέγχου είχε φορτίο διαρροής 55.1 kN. Το φορτίο διαρροής ορίζεται ως το φορτίο εκείνο στο οποίο παρουσιάζεται διαρροή του χαλύβδινου οπλισμού. Η δοκός που ενισχύθηκε με τη μη προεντεταμένη ράβδο CFRP είχε αύξηση 26% στο φορτίο διαρροής, με 40% προένταση είχε αύξηση 72,4% και τέλος με 60% προένταση παρουσίασε αύξηση 90,6%.

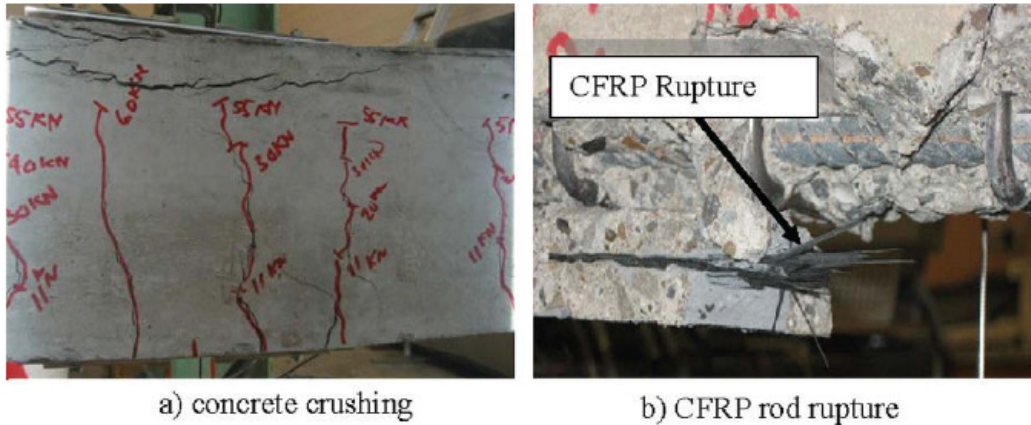
Για την οριακή κατάσταση αστοχίας (διαρροή χαλύβδινου οπλισμού και αστοχία θλιβόμενης ζώνης σκυροδέματος) το οριακό φορτίο αστοχίας για τη δοκό ελέγχου ήταν 64.3 kN. Η δοκός που ενισχύθηκε με τη μη προεντεταμένη ράβδο CFRP είχε αύξηση 50% στο φορτίο αστοχίας, με 40% προένταση είχε αύξηση 79.2% και τέλος με 60% προένταση παρουσίασε αύξηση 76.6%. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει συγκριτικά τις καμπύλες δύναμης-βύθισης στο μέσω για τα τέσσερα δοκίμια.



Διάγραμμα 2. Φορτίο - Βύθιση

Τρόποι αστοχίας

Παρατηρήθηκαν δύο τρόποι αστοχίας. Στη μία περίπτωση είχαμε αστοχία σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη μετά τη διαρροή σε εφελκυσμό του χαλύβδινου οπλισμού. Αυτός ο τρόπος αστοχίας παρατηρήθηκε στο δοκίμιο ελέγχου και στο μη-προεντεταμένο. Στα προεντεταμένα δοκίμια, ο τρόπος αστοχίας πραγματοποιήθηκε με θραύση του CFRP μετά τη διαρροή του χαλύβδινου οπλισμού και ανάπτυξη διατμητικών ρωγμών κατά μήκος του δοκιμίου. Στο παρακάτω σχήμα διακρίνονται και οι δύο τρόποι αστοχίας.



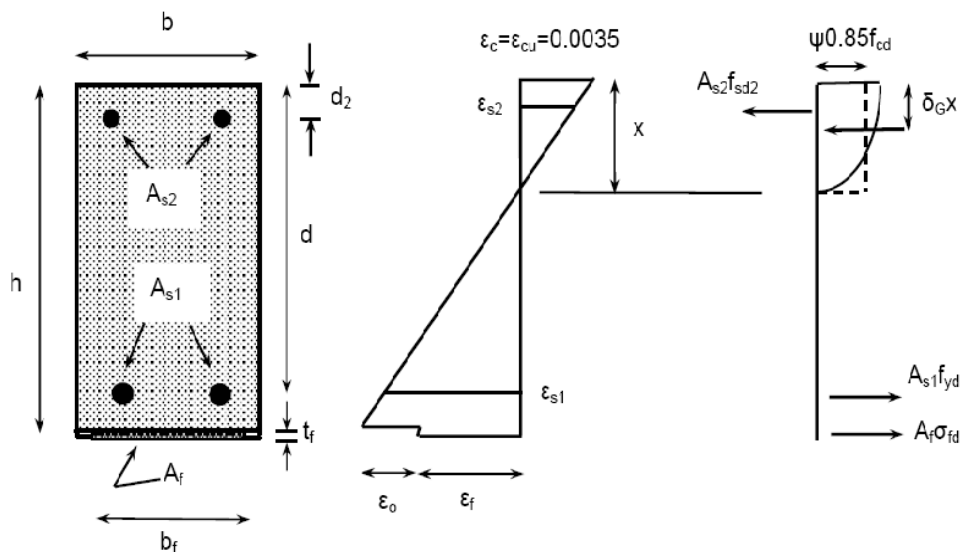
Σχήμα 9. Αστοχίες

Ολκιμότητα

Η ολκιμότητα μειώνεται καθώς αυξάνεται το επίπεδο προέντασης. Σε σχέση με το δοκίμιο ελέγχου η ολκιμότητα μειώθηκε κατά αντιστοιχία σε 30, 47, 64 % για 0, 40, 60 % προένταση του CFRP ράβδο.

4. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ, [4]

Διαρροή εφελκυσμένου χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος



Σχήμα 10. Παραμορφώσεις-Δυνάμεις στη διατομή αστοχίας

Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό ο οποίος είναι και ο πλέον επιθυμητός παρατηρείται διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού και έπειτα σύνθλιψη σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη, χωρίς να υπάρχει αστοχία ή κάποιου είδους αποκόλληση στα σύνθετα υλικά. Ο υπολογισμός της ροπής αντοχής στην κρίσιμη διατομή του μέλους γίνεται μέσω ισορροπίας εσωτερικών δυνάμεων και συμβιβαστού των παραμορφώσεων.

Υπολογισμός ύψους θλιβόμενης ζώνης από ισορροπία εσωτερικών δυνάμεων:

$$\psi \cdot 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x + A_{s2} \cdot f_{sd2} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot \sigma_{fd} \quad (1)$$

Όπου $\psi=0.8$, f_{cd} =τιμή σχεδιασμού θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος, x = το ύψος της θλιβόμενης ζώνης, f_{yd} =τάση σχεδιασμού του χάλυβα και A_f το εμβαδόν διατομής των σύνθετων υλικών. f_{sd2} και σ_{fd} είναι οι τάσεις του θλιβόμενου οπλισμού και των σύνθετων υλικών αντίστοιχα οι οποίες δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις (συμβιβαστό των παραμορφώσεων)

$$f_{sd2} = E_s \left(\varepsilon_c \frac{x - d_2}{x} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{fd} = E_f \left(\varepsilon_c \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o \right) \quad (3)$$

Στις παραπάνω σχέσεις $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ είναι η οριακή παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος ($=0.0035$) και ε_o η αρχική παραμόρφωση στην ακραία εφελκόμενη ίνα.

Ο υπολογισμός της καμπτικής αντοχής δίνεται ως:

$$M_{RD} = A_{s1} \cdot f_{yd}(d - \delta_G + x) + A_f \cdot \sigma_{fd}(h - \delta_G + x) + A_{s2} \cdot f_{sd2} \cdot (\delta_G + x - d_2) \quad (4)$$

όπου $\delta_G = 0.4$

Προϋποθέσεις για την εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης είναι ότι ο χάλυβας έχει όντως διαρρεύσει και ότι η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά είναι μικρότερη είναι μικρότερη της οριακής $\varepsilon_{f,lim}$ (αυτής δηλαδή που αντιστοιχεί στη θραύση ή στην αποκόλληση τους).

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_c \frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (5)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o \leq \varepsilon_{f,lim} \quad (6)$$

Εδώ θεωρήθηκε ότι η $\varepsilon_o=0$ καθώς είναι αμελητέα για το ίδιο βάρος της δοκού.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται οι πειραματικές αλλά και οι θεωρητικές τιμές της ροπής αντοχής για κάθε ένα από τα ανωτέρω παρουσιαζόμενα πειράματα.

Δοκίμια	Πειραματική Mr (kNm)	Θεωρητική Mr Carbon (kNm)	Πειραματική / Θεωρητική
6C	25,62	26,20	0,98
6C-1	29,28	31,70	0,92
6C-2	30,50	35,10	0,87
9C	30,87	27,60	1,12
9C-1	34,28	36,70	0,93
9C-2	44,41	42,80	1,04
12C	28,67	28,30	1,01
12C-1	36,97	40,90	0,90
12C-2	46,12	48,80	0,95

Πίνακας 4. Πείραμα 1^ο Άνθρακας

Δοκίμια	Πειραματική Mr (kNm)	Θεωρητική Mr Γυαλιού (kNm)	Πειραματική/Θεωρητική
S-NC	28,7	32	0,90
S-NC-G5-A	37,3	59	0,63
S-NC-G5-B	39,8	90	0,44

Πίνακας 5. Πείραμα 2^ο Γυαλί

Δοκίμια	Πειραματική Mr (kNm)	Θεωρητική Mr Carbon (kNm)	Πειραματική / Θεωρητική
control	32,1	32,5	0,99
0	53,35	53,5	1,00
40	63,25	61,3	1,03
60	60,5	63	0,96

Πίνακας 6. Πείραμα 3^ο Άνθρακας και προένταση

Στο πρώτο πείραμα και στο τρίτο τα αποτελέσματα των πειραματικών τιμών με των αντίστοιχων θεωρητικών δεν παρουσιάζουν αποκλίσεις, όπως παρατηρείται και από το λόγο της πειραματικής προς τη θεωρητική τιμή. Στο δεύτερο πείραμα τα αποτελέσματα αυτά έχουν σημαντικές αποκλίσεις. Εξήγηση για αυτό αποτελεί ο τρόπος αστοχίας ο οποίος ήταν αστοχία σε τέμνουσα και όχι καμπτική αστοχία με θραύση του υλικού ενίσχυσης, δηλαδή πρόκειται για λανθασμένο σχεδιασμό. Το θεωρητικό μοντέλο σε αυτήν την περίπτωση δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Συνεπώς, χρησιμοποιήθηκε το θεωρητικό μοντέλο μόνο για το πρώτο και για το τρίτο πείραμα.

Δοκίμια	Πειραματική Mr (kNm)	Ποσοστό αύξησης	Θεωρητική Mr Χάλυβα (kNm)	Ποσοστό αύξησης	Θεωρητική Mr Γυαλιού (kNm)	Ποσοστό αύξησης
6C	25,62		26,20		26,20	
6C-1	29,28	0,14	30,30	0,16	29,30	0,12
6C-2	30,50	0,19	33,50	0,28	31,60	0,21
9C	30,87		27,60		27,60	
9C-1	34,28	0,11	29,90	0,08	32,80	0,19
9C-2	44,41	0,44	33,0	0,20	36,80	0,33
12C	28,67		28,30		28,30	
12C-1	36,97	0,29	30,40	0,07	35,80	0,27
12C-2	46,12	0,61	33,50	0,18	41,10	0,45

Πίνακας 7. Πείραμα 1^ο, Ροπές και Ποσοστά Αύξησης τους ανά υλικό

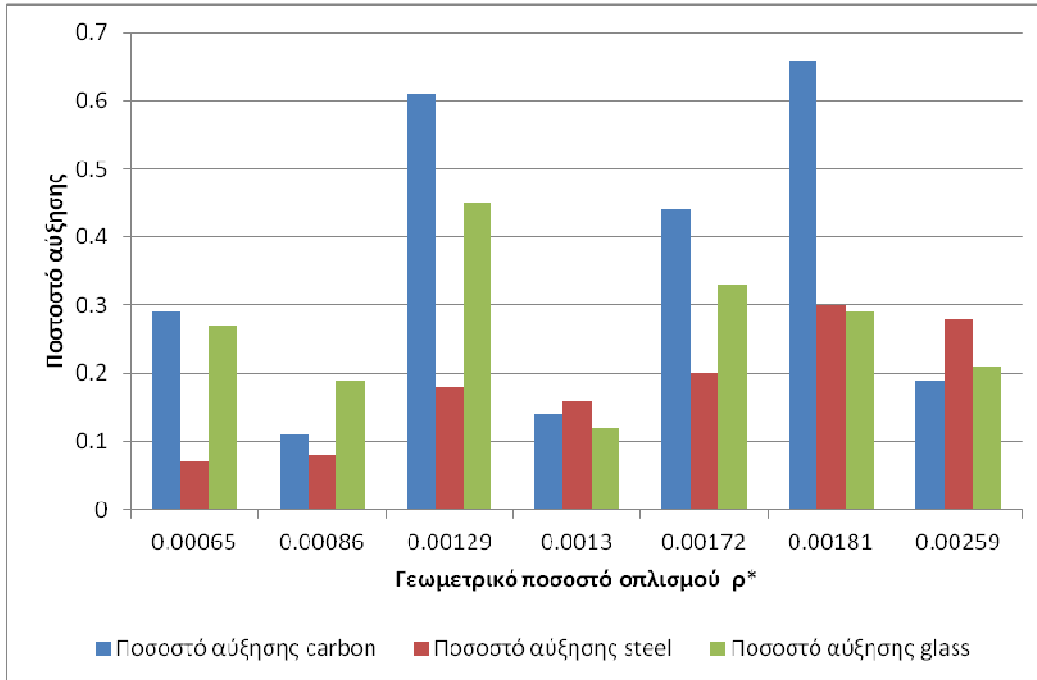
Δοκίμια	Πειραματική Mr (kNm)	Ποσοστό αύξησης	Θεωρητική Mr Χάλυβα (kNm)	Ποσοστό αύξησης	Θεωρητική Mr Γυαλιού (kNm)	Ποσοστό αύξησης
control	32,1		32,5		32,5	
0	53,35	0,66	42,5	0,3	42	0,29

Πίνακας 8. Πείραμα 3^ο, Ροπές και Ποσοστά Αύξησης τους ανά υλικό

Στους παραπάνω πίνακες εκτός από το πειραματικό ποσοστό αύξησης της ροπής αντοχής υπολογίστηκαν οι θεωρητικές τιμές της ροπής αντοχής για το ίδιο εμβαδό υλικού ενίσχυσης, χρησιμοποιώντας ανοξείδωτο χάλυβα και γυαλί. Ο χάλυβας είχε μέτρο ελαστικότητας $E=210$ GPa και όριο διαρροής $f_y=500$ MPa. Το γυαλί είχε μέτρο ελαστικότητας $E=65$ GPa και όριο θραύσης $f_u=910$ MPa.

ρ	Ποσοστό αύξησης carbon	Ποσοστό αύξησης steel	Ποσοστό αύξησης glass
0,00065	0,29	0,07	0,27
0,00086	0,11	0,08	0,19
0,00129	0,61	0,18	0,45
0,00130	0,14	0,16	0,12
0,00172	0,44	0,20	0,33
0,00181	0,66	0,30	0,29
0,00259	0,19	0,28	0,21

Πίνακας 9. Γεωμετρικό Ποσοστό Ενίσχυσης- Ποσοστό Αύξησης Ροπής Αντοχής

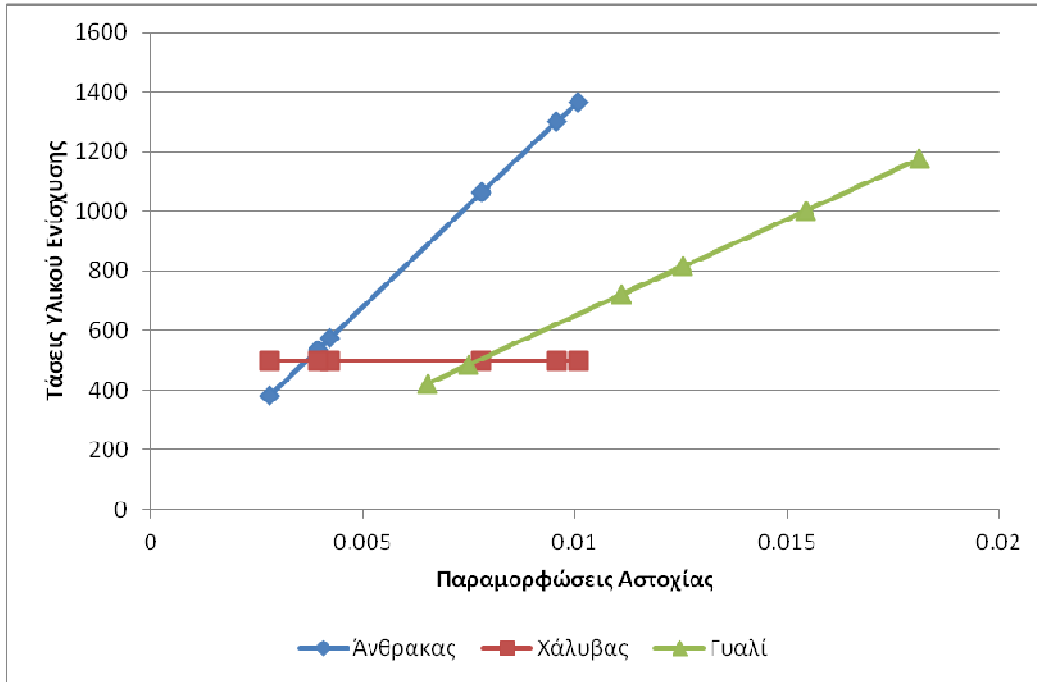


Γράφημα 1. Γεωμετικό ποσοστό οπλισμού-Ποσοστό αύξησης ροπής αντοχής

Στο παραπάνω γράφημα παρουσιάζεται το ποσοστό αύξησης της ροπής αντοχής για κάθε υλικό με συγκεκριμένη τιμή γεωμετρικού ποσοστού οπλισμού. Διακρίνεται ότι με τη χρήση άνθρακα ως υλικού ενίσχυσης το ποσοστό αύξησης της ροπής αντοχής είναι μεγαλύτερο σχεδόν για κάθε τιμή γεωμετρικού ποσοστού οπλισμού. Η αντοχή δεν αυξάνεται μονοτονικά διότι το ανωτέρω γράφημα προέκυψε από διαφορετικά δοκίμια. Στη σύγκριση μεταξύ ανοξειδωτού χάλυβα και γυαλιού, το γυαλί στις περισσότερες των περιπτώσεων παρουσίασε μεγαλύτερα ποσοστά ενίσχυσης.

Εξήγηση για τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει από τον καταστατικό νόμο των υλικών σε συνδυασμό με τον τρόπο που αυτά χρησιμοποιήθηκαν για ενίσχυση. Αναλυτικότερα, για τις παραμορφώσεις της ακραίας εφελκόμενης ίνας, που αντιστοιχεί σε αστοχία του δοκιμίου, ο άνθρακας και το γυαλί λειτουργούν με μεγαλύτερες τάσεις σε σχέση με το χάλυβα λόγω των παραμορφώσεων που εμφανίζονται στην ίνα αυτή. Ο χάλυβας αντίθετα έχει ήδη διαρρεύσει οπότε λειτουργεί με την τάση διαρροής του η οποία είναι σταθερή και μικρότερη της τάσης των άλλων δύο υλικών.

Τα παραπάνω απεικονίζονται στο γράφημα που ακολουθεί.



Γράφημα 2. Παραμορφώσεις αστοχίας-Τάσεις υλικού ενίσχυσης

Το παραπάνω γράφημα τάσεων παραμορφώσεων αφορά τα δυο πρώτα πειράματα για τη χρήση των τριών υλικών. Οι μικρότερες τάσεις για τον άνθρακα και το γυαλί αφορούν την περίπτωση μικρών διαστάσεων δοκιμίου όπου τα υλικά «υποχρησιμοποιούνται» δηλαδή δεν ικανοποιείται η μεγάλη εφελκυστική τους αντοχή. Οι μεγαλύτερες τάσεις που εμφανίζονται για τον άνθρακα και το γυαλί αφορούν τα μεγαλύτερα σε εμβαδό δοκίμια όπου ο λόγος εμβαδού υλικού ενίσχυσης προς εμβαδό διατομής γίνεται μικρότερος. Αξιοσημείωτο είναι ότι σε όλες τις ανωτέρω παραμορφώσεις ο χάλυβας λειτουργεί με τη διαρροή του δηλαδή προσφέρει την επιπρόσθετη ροπή σε μικρές παραμορφώσεις δίδοντας ακολούθως την απαιτούμενη πλαστιμότητα.

6. ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Η μέγιστη τέμνουσα που μπορεί να παραλάβει δοκός δίχως συνδετήρες είναι με βάση τον Eurocode 2, [5]:

$$V_{R,c} = \max[(180(100\rho_1)^{1/3}, 35\sqrt{1 + \sqrt{\frac{0,2}{d}}f_c^{1/6}}][(1 + \sqrt{\frac{0,2}{d}})f_c^{1/3} + 0,15\frac{N}{A_c}]b_w d \quad (7)$$

$$V_{R,s} = \frac{A_{sw}}{s}f_{yd}z(\cot\theta + \cot\alpha)\sin\alpha \quad (8)$$

Για να καταδειχθεί η σημασία της διατμητικής αντοχής του προς ενίσχυση δοκιμίου ακολουθεί αριθμητική εφαρμογή των ανωτέρω σχέσεων για την περίπτωση του δεύτερου πειράματος όπου η αστοχία οφειλόταν σε ανεπαρκή διατμητική αντοχή των μελών.

Με εφαρμογή των ανωτέρω σχέσεων για το 2^ο πείραμα προκύπτει για την αντοχή του σκυροδέματος από τη σχέση [7]:

$$V_{R,c} = 53,3 \text{ KN}$$

Αντίστοιχα η συμβολή των συνδετήρων Φ6 ανά 100 mm για S220 με γωνία λοξής ρογμής $\theta=45^\circ$ υπολογίζεται με βάση την εξίσωση [8]:

$$V_{R,s} = 23,5 \text{ KN}$$

$$V_{Rd,tot} = V_{R,c} + V_{R,s} = 76,8 \text{ KN}$$

Επομένως με βάση τις τιμές της αντοχής σε τέμνουσα η μέγιστη τιμή ροπής που μπορεί να παραλάβει η ανωτέρω δοκός πριν αστοχήσει σε τέμνουσα είναι

$$M_{max} = V_{Rd,tot} \cdot 0,5 = 76,8 \cdot 0,5 \Rightarrow M_{max} = 38,4 \text{ KN}$$

Η ανωτέρω τιμή της ροπής επιβεβαιώνει και το παρατηρούμενο φορτίο αστοχίας καθώς και τον τρόπο αστοχίας. Η τιμή της ροπής στην οποία αστόχησε και στις δυο περιπτώσεις αντιστοιχεί στην τιμή διατμητικής αστοχίας του δοκιμίου, κάτι που συνεπάγεται κακό σχεδιασμό.

Με το παραπάνω παράδειγμα επιβεβαιώνεται αριθμητικά ότι η ενίσχυση σε κάμψη με χρήση της μεθόδου NSM έχει εκ προοιμίου άνω όριο την αντοχή σε διάτμηση της δοκού. Συνεπώς η μέγιστη επιπρόσθετη ροπή που μπορεί το μέλος να παραλάβει καθορίζεται από τη ροπή που αντιστοιχεί στην αντοχή του μέλους σε τέμνουσα. Η παράμετρος αυτή αποτελεί και μια πρώτη ένδειξη για το απαιτούμενο εμβαδό του υλικού ενίσχυσης δεδομένου του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί και με την παραδοχή φυσικά ότι η ενίσχυση σε κάμψη δε συνδυάζεται και με ενίσχυση σε διάτμηση.

7. ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΧΑΛΥΒΑ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

Εάν θεωρήσουμε ως μέτρο αναφοράς την τάση διαρροής του χάλυβα (500 MPa) και την παραμόρφωση διαρροής του διαπιστώνουμε τα ακόλουθα: Ο χάλυβας αγγίζει τη διαρροή του σε σχετικά μικρές παραμορφώσεις (0,24%) κάτι ιδιαίτερα επιθυμητό. Αντίθετα τυπικά CFRP για να αποκτήσουν τάση 500 MPa απαιτούν κατά 50% μεγαλύτερες παραμορφώσεις (0,38%) ενώ τα GFRP απαιτούν τριπλάσιες παραμορφώσεις (0,76%) λόγω του σημαντικά μικρότερου μέτρου ελαστικότητας τους. Για το γυαλί η παράμετρος αυτή αν συνδυαστεί με την ψαθυρότητα του οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το γυαλί αποτελεί τη χειρότερη -μεταξύ των τριών- επιλογή υλικού. Στη σύγκριση μεταξύ χάλυβα και άνθρακα πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι βασικά μειονεκτήματα του άνθρακα αποτελούν η πρακτική δυσκολία που υπάρχει στο να αξιοποιηθεί η μεγάλη εφελκυστική αντοχή του υλικού από μικρές παραμορφώσεις.

Λαμβάνοντας ενδεικτικά υπόψη το κόστος πρέπει να σημειωθεί ότι ο ανοξείδωτος χάλυβας έχει περίπου δεκαπλάσιο κόστος σε σχέση με τον κοινό χάλυβα (5 ευρώ/m) ενώ για το γυαλί και τον άνθρακα παρουσιάζονται σημαντικές διακυμάνσεις με το γυαλί να ξεκινά από τιμές (3 ευρώ/m) και τον άνθρακα να ξεκινά από τιμές ανάλογες του ανοξείδωτου χάλυβα.

Στα ανωτέρω αν ληφθεί υπόψη η δυσκολία προμήθειας των σύνθετων υλικών η έλλειψη εξοικείωσης των μηχανικών με αυτά όπως επίσης και του τεχνικού προσωπικού οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η χρήση ανοξείδωτου χάλυβα είναι η πλέον ενδεικνυόμενη.

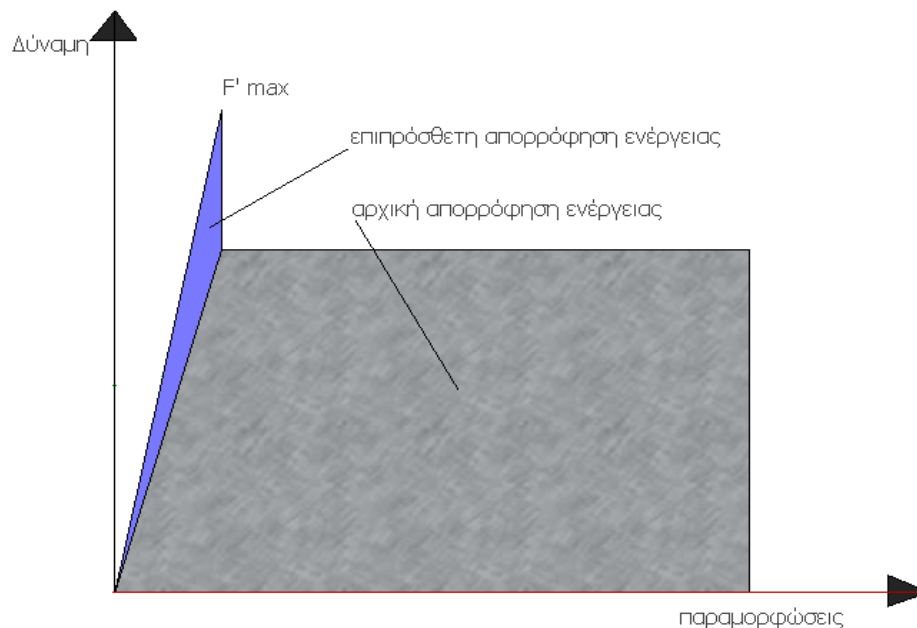
8. ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στα ενισχυμένα δοκίμια παρατηρείται μείωση της ικανότητας τους να απορροφήσουν ενέργεια. Το μέγεθος αυτό υπολογίζεται από το εμβαδό του διαγράμματος δύναμης – παραμόρφωσης με την αναπόφευκτη απροσδιοριστία που υπάρχει ως προς την παραμόρφωση διαρροής. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι λόγοι απορρόφησης του ενισχυμένου δοκιμίου προς το αντίστοιχο δοκίμιο ελέγχου για το πρώτο πείραμα.

Δοκίμια	E_u/E_y	Αναλογία
6C	1,69	1
6C-1	1,5	0,88
6C-2	1,1	0,65
9C	3,24	1
9C-1	2,26	0,7
9C-2	2,87	0,88
12C	3,7	1
12C-1	3,29	0,89
12C-2	3,43	0,93

Πίνακας 10. Πείραμα 1^ο, Απορροφούμενη Ενέργεια

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνονται και από το τρίτο πείραμα όπου και εκεί παρατηρείται μείωση της απορροφούμενης ενέργειας. Και στο δεύτερο πείραμα που έγινε χρήση γυαλιού η μέγιστη βύθιση των ενισχυμένων δοκιμίων προέκυψε μικρότερη από αυτήν του δοκιμίου ελέγχου, συνεπώς και η απορροφούμενη ενέργεια μειώθηκε.

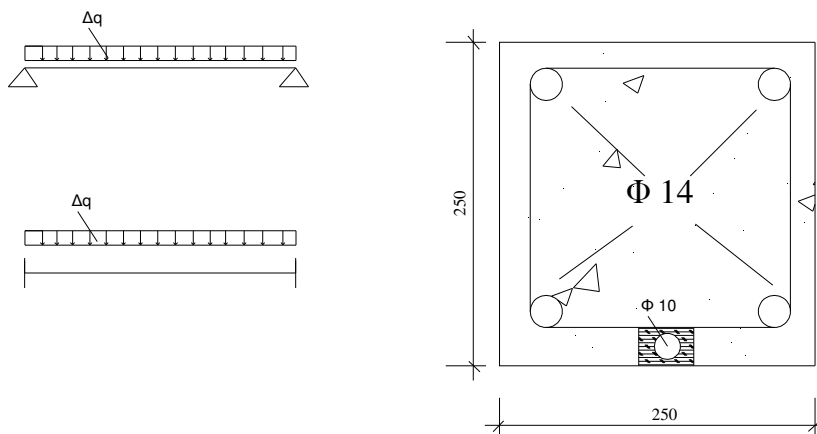


Γράφημα 3. Απορρόφηση ενέργειας για τον επιθυμητό τρόπο αστοχίας

Παρόλο αυτά με κατάλληλη επιλογή εμβαδού ενίσχυσης ώστε το σκυρόδεμα στην θλιβόμενη ζώνη να μην αστοχήσει μπορεί μετά τη θραύση ή διαρροή (στην περίπτωση χάλυβα) του υλικού ενίσχυσης το δοκίμιο να συμπεριφερθεί ως απλή δοκός οπλισμένου σκυροδέματος φορτιζόμενο στην ανελαστική περιοχή. Συνεπώς η απορροφούμενη ενέργεια του ενισχυμένου μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτή του ενισχυμένου.

9. ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ Δq

Διατομές μικρής διαμέτρου μπορούν να προσδώσουν σημαντική επαύξηση της ροπής αντοχής του μέλους. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια τυπική διατομή δοκού 250*250 mm με αρχικό οπλισμό 4Φ14 που ενισχύεται με ανοξείδωτο χάλυβα S500 διαμέτρου Φ10.



Σχήμα 11. Διάταξη ενίσχυσης-Συνθήκες στήριξης

Προσεγγιστικά η επιπλέον ροπή που μπορεί να αναλάβει η διατομή είναι $\Delta M=8.4$ KNm η οποία αν αναχθεί σε φορτίο για την περίπτωση μιας αμφιεπίστου τυπικού ανοίγματος 4m μας δίνει τη δυνατότητα να αυξήσουμε το κατανεμημένο φορτίο κατά $\Delta q=4.2$ KN/m ενώ για την περίπτωση της αμφίπακτης δοκού η αντίστοιχη τιμή είναι $\Delta q= 6.3$ KN/m. Εάν θεωρηθεί ότι οι συνθήκες στήριξης της δοκού είναι κάπου μεταξύ πάκτωσης και στήριξης το επιπρόσθετο φορτίο αστοχίας κινείται στα όρια $4.2 < \Delta q < 6.3$ KN/m μια σημαντική αύξηση φορτίου δεδομένης της μικρής διατομής του υλικού ενίσχυσης.

10. ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Η πρόωρη αποκόλληση της ενίσχυσης είναι ιδιαίτερα πιθανό να συμβεί στα σημεία όπου ματίζεται ο διαμήκης οπλισμός της δοκού καθώς εκεί παρατηρείται συγκέντρωση διατμητικών τάσεων. Συνεπώς εξωτερική ενίσχυση σε διάτμηση στα σημεία αυτά είναι αναγκαία, [6].

Η ρητίνη ως υλικό πλήρωσης της εγκοπής παρουσιάζει καλύτερη μηχανική συμπεριφορά σε σχέση με τα τσιμεντοκονιάματα.

Η διάμετρος της εγκοπής για την περίπτωση χρήσης ράβδων ενίσχυσης πρέπει να είναι περίπου το διπλάσιο της διαμέτρου των ράβδων, [7].

Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των εγκοπών πρέπει να είναι κατά ελάχιστο 40 mm ώστε να εξασφαλίζεται η ανεξαρτησία της μηχανικής συμπεριφοράς των μελών ενίσχυσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι επισκευές πραγματοποιούνται σε ήδη ρηγματωμένα μέλη. Συνεπώς η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης σε αυτά τα μέλη είναι μειωμένη σε σχέση με αυτή των εργαστηριακών δοκιμών.

11. ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Για να μπορέσει να εφαρμοστεί ενίσχυση με NSM απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί μια ελάχιστη αρχική επικάλυψη οπλισμού ώστε να υπάρχει επαρκής χώρος για την τοποθέτηση του υλικού ενίσχυσης. Αυτή η προϋπόθεση δεν τηρείται στις περισσότερες περιπτώσεις στον Ελλαδικό χώρο. Πιθανή λύση αυτού του προβλήματος αποτελεί το κόψιμο των συνδετήρων τοπικά στο σημείο τοποθέτησης του υλικού ενίσχυσης. Πειράματα από τους Ines G. Costa, Joaquim A.O. Barros, [8], έδειξαν ότι η ικανότητα της δοκού να παραλαμβάνει φορτία μειώνεται λιγότερο από 10%. Σε κάθε περίπτωση μια τέτοια λύση πρέπει να συνδυαστεί με εξωτερική ενίσχυση της δοκού σε διάτμηση, για παράδειγμα μορφής U.

Επιπρόσθετα, για την αποδοτικότερη εφαρμογή της μεθόδου είναι αναγκαία η περίσφιξη των άκρων ώστε να αποφευχθεί το ενδεχόμενο αποκόλλησης και πρόωρης αστοχίας. Αυτό όμως είναι ιδιαίτερα δύσκολο καθώς η περίσφιξη δεν είναι εύκολα εφαρμόσιμη σε δοκούς. Τέλος, η τεχνική NSM στις στηρίξεις δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμη.

12. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Flexural Behavior of Concrete Beams Strengthened with Near-Surface-Mounted CFRP Strips by Joseph Robert Yost, Shawn P. Gross, David W. Dinehart, and Jason J. Mildenberg, ACI Structural Journal, V. 104, No. 4, July-August 2007.
- [2] Flexural strengthening of reinforced lightweight polystyrene aggregate concrete beams with near-surface mounted GFRP bars by W.C. Tang, R.V. Balendran, A. Nadeem, H.Y. Leung, China 19 May 2005.
- [3] Flexural strengthening of RC beams with prestressed NSM CFRP rods – Experimental and analytical investigation by Moataz Badawi, Khaled Soudki, 12 March 2009.
- [4] Strengthening & Seismic Retrofitting of Structures with Composites, by Triantafyllou.
- [5] Eurocode 2, Shear Resistance.
- [6] Bond Mechanism of Near-Surface-Mounted Fiber-Reinforced Polymer Bars for Flexural Strengthening of Concrete Structures by Tarek K. Hassan and Sami H. Rizkalla, ACI Structural Journal, V. 101, No. 6, November-December 2004.
- [7] Anchorage Length of Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Bars for Concrete Strengthening - Experimental Investigation and Numerical Modeling by Laura De Lorenzis, Karin Lundgren, and Andrea Rizzo, ACI Structural Journal, V. 101, No. 2, March-April 2004.
- [8] Flexural and shear strengthening of RC beams with composite materials – The influence of cutting steel stirrups to install CFRP strips, by Ines G. Costa, Joaquim A.O. Barros, 5 March 2010.

