

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΙΟΠ-ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΚΑΝ.ΕΠΕ.-ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
ΚΑΛΟΓΗΡΟΣ ΗΛΙΑΣ

Περίληψη

Η εργασία που παρουσιάζεται στη συνέχεια αποτελεί σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών μεγεθών, όσον αφορά την ενίσχυση δοκών με ινοπλισμένα πολυμερή υλικά(FRP). Οι τιμές των πειραματικών μεγεθών ελήφθησαν από συγγράμματα διακεκριμένων μελετητών, ενώ οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές υπολογίστηκαν με βάση τα δεδομένα των ιδίων πειραμάτων και τις διατάξεις του Κανονισμού Επεμβάσεων(ΚΑΝ.ΕΠΕ.). Περιγράφεται αναλυτικά ολόκληρη η διαδικασία υπολογισμού της ροπής αντοχής της δοκού μετά την ενίσχυση και, τέλος, παρατίθενται οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη διαδικασία.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – Καμπτική ενίσχυση με επικολλητά φύλλα από χάλυβα ή FRP

Η χρήση επικολλητών φύλλων από χάλυβα ή FRP, ως εξωτερικού οπλισμού στο εφελκόμενο πέλμα δοκών, είναι μια πρακτική τεχνική με την οποία επιτυγχάνεται η αύξηση της καμπτικής αντοχής των στοιχείων. Επιπλέον επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση της καμπτικής ακαμψίας και μείωση των παραμορφώσεων και της αναμενόμενης ρηγμάτωσης.

Η κυριότερη αδυναμία της τεχνικής βρίσκεται στην περιοχή αγκύρωσης των άκρων των φύλλων. Η πρόωγη αστοχία των άκρων με απόσχιση στη γειτονική προς το έλασμα περιοχή σκυροδέματος και η ευαισθησία διάβρωσής τους στην περίπτωση χρήσης χάλυβα είναι τα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου που οφείλονται στην υψηλή συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή.

Εδώ συνοψίζοντας τις σχετικές αναφορές, μπορούν να διακριθούν δύο βασικοί έλεγχοι που αφορούν την περιοχή αγκύρωσης στα άκρα των επικολλητών φύλλων. Ο πρώτος στοχεύει στην εξασφάλιση επαρκούς μήκους αγκύρωσης πέραν της περιοχής που απαιτείται καμπτική ενίσχυση. Ο δεύτερος αφορά τον έλεγχο της συγκέντρωσης καμπτικών και διατμητικών τάσεων στην περιοχή των άκρων, λόγω της ύπαρξης πέρατος, δηλαδή λόγω της ασυνέχειας του επικολλητού φύλλου. Συνήθως ελέγχονται οι διατμητικές τάσεις της περιοχής. Όμως επειδή στην πραγματικότητα υπάρχουν συγχρόνως καμπτικές και διατμητικές τάσεις φαίνεται πιο λογικό ν πρέπει να ελεγχθεί η αλληλεπίδραση των δύο εντάσεων.

Η χρήση φύλλων από ινοπλισμένα αντί για χαλύβδινα ελάσματα διαφοροποιεί τη συμπεριφορά του ενισχυμένου στοιχείου, αφού ο νέος οπλισμός έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά από τον ήδη υπάρχοντα με τον οποίο καλείται, από κοινού, να αναλάβει τις εφελκυστικές δυνάμεις.

Σημειώνεται ότι πρόσφατα πειραματικά αποτελέσματα(Spadea et al, 2000) δείχνουν ότι η πλαστιμότητα, σε όρους καμπυλοτήτων και σε όρους ενέργειας, των ενισχυμένων στοιχείων, είναι σε πολλές περιπτώσεις σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη των αρχικών στοιχείων. Ως εκ τούτου η παραπάνω τεχνική δε συνιστάται εν γένει για την ενίσχυση στοιχείων που συμμετέχουν στην ανάληψη σεισμικής έντασης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο μετά από ειδική μελέτη που θα εξασφαλίζει ότι η πλαστιμότητα του ενισχυμένου μέλους βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων σχεδιασμού.

Η διαδικασία ανάλυσης και διαστασιολόγησης δομικών στοιχείων ενισχυμένων με επικολλητά φύλλα από ινοπλισμένα πολυμερή βασίζεται στις αρχές για τη μελέτη στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω δύο βασικά σημεία(Νεοκλέους κ.α, 1999 – Τριανταφύλλου, 2000):

α) Στην κατάσταση οριακής φέρουσας ικανότητας ο οπλισμός ενίσχυσης(σύνθετων υλικών) δε «διαρρέει» όπως ο χάλυβας αλλά παραμορφώνεται ελαστικά, φτάνοντας σε μεγάλη παραμόρφωση. Η παραμόρφωση αυτή εξαρτάται βασικά από την ικανότητα του

σκυροδέματος(δηλαδή του υποστρώματος) να μεταφέρει μέσω διάτμησης τις εφελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα σύνθετα υλικά, και είναι, κατά κανόνα, μικρότερη από τη μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση(θραύσης) των σύνθετων υλικών.

β)Ο «δεσμός» σύνθετων υλικών-σκυροδέματος μπορεί να αστοχήσει πρόωρα, δηλαδή πριν εξαντληθεί καμπτική αντοχή του ενισχυμένου στοιχείου.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ[1]

α)Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η τοποθέτηση των ελασμάτων από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή γίνεται στο εφελκυσμένο πέλμα της δοκού λόγω ανεπάρκειας του εφελκυσμένου οπλισμού. Η συγκεκριμένη τεχνική δεν εφαρμόζεται σε περιοχές οι οποίες ενδέχεται να βρεθούν υπό θλιπτική καταπόνηση λόγω ανακυκλιζόμενης ροπής ή τυχηματικής δράσης.

Για να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα του ενισχυμένου στοιχείου ακόμα και μετά την ενδεχόμενη αστοχία της ενίσχυσης λόγω μιας τυχηματικής δράσης (π.χ. πυρκαγιά), το στοιχείο αυτό πρέπει να είναι σε θέση να φέρει, αρχικώς, τα μόνιμα φορτία τουλάχιστον.

Μέσω αυτής της συστάσεως επιδιώκεται να εξασφαλιστεί ο επιθυμητός τρόπος αστοχίας του στοιχείου, κατά τον οποίον το υλικό ενισχύσεως φθάνει την συμβατική παραμόρφωση αστοχίας του, ενώ το σκυρόδεμα στη θλιβόμενη ζώνη έχει παραμόρφωση ίση ή μικρότερη από 0,0035.Έτσι, αποφεύγεται η τοποθέτηση υπερβολικά μεγάλης ποσότητας υλικού ενίσχυσης, η οποία θα οδηγούσε σε πρόωρη ψαθυρή αστοχία της θλιβόμενης ζώνης.

Αρχικά υπολογίζουμε τη ροπή που αναλαμβάνει ο υφιστάμενος εφελκυσμένος οπλισμός A_{s1} με επικάλυψη c , όπου $A_s=(\pi*d^2)/4$ (1) και d η διάμετρος της διατομής μίας χαλύβδινης ράβδου. Στη συνέχεια βρίσκουμε το μηχανικό ποσοστό του εφελκυσμένου χάλυβα $\omega_1=(A_s*b*d*f_{st})/f_{cc}$ (2), την ανηγμένη ροπή $\mu_{sd}=\omega_1*(1-0.6*\omega_1)$ (3) και, τέλος, τη ροπή που αναλαμβάνει ο οπλισμός $M_{sd}=\mu_{sd}*b*d^2*f_{cc}$ (4).

Ο νέος οπλισμός υπολογίζεται ώστε σε συνεργασία με τον υφιστάμενο παλαιό οπλισμό να αναλαμβάνονται οι εφελκυστικές δυνάμεις που αντιστοιχούν στη συνολική καμπτική ένταση στην περιοχή ενίσχυσης. Προσεγγιστικά, για τον υπολογισμό της πρόσθετης ροπής που καλείται να αναλάβει η ενισχυμένη διατομή (επιπλέον της M_{d0} την οποία μπορεί να αναλάβει η αρχική) μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$\Delta M_{d0}=z*\sigma_{jd}*A_j$ (5) όπου, A_j η απαιτούμενη διατομή του υλικού ενίσχυσης,

z είναι ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων(ο οποίος μπορεί να ληφθεί ίσος με $0,9*d_j$) και

d_j το στατικό ύψος της διατομής, μετρούμενα από τη στάθμη του εξωτερικού οπλισμού.

σ_{jd} η ενεργή τάση του νέου οπλισμού

β)Η εφαρμογή της τεχνικής επιτρέπεται υπό τον όρο ότι το υφιστάμενο δομικό στοιχείο είναι σε θέση να αναλάβει, χωρίς την ενίσχυση, την ένταση από τα μόνιμα φορτία του τελικού σχεδιασμού.

γ)Η ποσότητα του προτιθέμενου υλικού ενισχύσεως συνιστάται να επιλέγεται έτσι ώστε στην οριακή κατάσταση αστοχίας, ο υφιστάμενος εφελκυσμένος οπλισμός να αναπτύσσει παραμόρφωση τουλάχιστον ίση με την παραμόρφωση διαρροής του, χωρίς αστοχία της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος.

δ)Υπό το σύνολο, των προϋποθέσεων που ακολουθούν, το ενισχυμένο στοιχείο θεωρείται μονολιθικό, η δε εκτίμηση της καμπτικής του αντίστασης και των άλλων χαρακτηριστικών του μπορεί να γίνει θεωρώντας το υλικό ενίσχυσης ως νέο εξωτερικό οπλισμό.

ε)Η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως σ_{jd} του νέου οπλισμού, εκτιμάται με βάση μια κρίσιμη τιμή της τάσης $\sigma_{j,crit}$, οφείλει δε να είναι μικρότερη από την τιμή σ_{jd} που αντιστοιχεί στη δυσμενέστερη από τις ακόλουθες δύο μορφές αστοχίας:

• Αστοχία του ίδιου του υλικού ενίσχυσης, οπότε, $\sigma_{j,crit}=f_{jk}$ και $\sigma_{jd}=f_{jk}/\gamma_m$ (6)

όπου f_{jk} είναι η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης και

γ_m είναι ο επί μέρους συντελεστής ασφαλείας για το υλικό ενίσχυσης

Αν το υλικό ενίσχυσης είναι χάλυβας, ως αστοχία θεωρείται η διαρροή του, ενώ αν είναι ινοπλισμένο πολυμερές θεωρείται η θραύση του. Στην πρώτη περίπτωση λαμβάνεται $f_{jk}=f_{sy}$ και η τιμή του συντελεστή ασφαλείας υλικού $\gamma_m=\gamma_s$ προσδιορίζεται με βάση τα προβλεπόμενα στην παράγραφο 4.5.3.2α. Στη δεύτερη περίπτωση λαμβάνεται $\gamma_m=\gamma_{IOΠ}=1.2$ εφαρμοζόμενων αναλόγως και των προβλέψεων της παραγράφου 4.5.3.2β. Εξ άλλου, αν χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία στρώσεις ΙΟΠ, η τιμή της αντοχής του υλικού θεωρείται $f_{jk}=\psi*f_{jk}$ όπου ψ είναι ο μειωτικός συντελεστής πολλών στρώσεων (βλ. παράγραφο 6.2.3).

- Πρόωρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης λόγω ανεπάρκειας της σύνδεσης κατά μήκος του στοιχείου ή της αγκύρωσης των άκρων του, οπότε, $\sigma_{jd}=\sigma_{j,crit}/\gamma_{Rd}$ (7)

όπου,

γ_{Rd} είναι κατάλληλος συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος καλύπτει τις αβεβαιότητες του προσομοιώματος και

$\sigma_{j,crit}$ είναι η τάση του υλικού η οποία οδηγεί σε αποκόλληση, και υπολογίζεται με βάση τα αναφερόμενα στην παράγραφο 6.1.4 του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Ο συντελεστής αβεβαιότητας προσομοιώματος γ_{Rd} μπορεί να ληφθεί ίσος με 1,2.

Γι' αυτή τη μορφή αστοχίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω προσεγγιστικές σχέσεις (βλ. και παρ. 6.1.4):

$$\sigma_{j,crit}=\beta*L_e*(\tau_{b,αποκ}/t_j) \quad (8)$$

όπου,

$\beta=\beta_w*\beta_L$ (9), διορθωτικός συντελεστής

$$\tau_{b,αποκ}=f_{ctm}$$

L_e το ενεργό μήκος αγκύρωσης (δηλαδή το μήκος πέραν του οποίου η αναλαμβανόμενη από το υλικό ενίσχυσης δύναμη, δεν αυξάνεται άλλο), που υπολογίζεται από τη σχέση Σ6.11 του ΚΑΝ.ΕΠΕ. θεωρώντας ότι το άνοιγμα της κρίσιμης ρωγμής ισούται με 0,5mm, και λαμβάνεται ίσο με:

$$(L_e)^2=E_j*t_j/2f_{ctm} \quad (\text{MPa,mm}) \quad (10)$$

t_j, E_j είναι το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενίσχυσης αντίστοιχα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται k επάλληλες στρώσεις υλικού ενίσχυσης πάχους t_{j1} λαμβάνεται $t_j=\psi*k*t_{j1}$, όπου ψ είναι ο μειωτικός συντελεστής πολλών στρώσεων.

$$(\beta_w)^2=[2-(b_j/b_w)]/[1+(b_j/b_w)] \quad (11), \text{ συντελεστής επιρροής πλάτους οπλισμού ενίσχυσης}$$

b_j , το πλάτος του υλικού ενίσχυσης

b_w , το πλάτος του εφελκόμενου πέλματος του δομικού στοιχείου

$$\beta_L=\sin(\pi*\lambda/2)=[\lambda*(2-\lambda)] \quad (12), \text{ συντελεστής επιρροής του διατιθέμενου μήκους αγκύρωσης,}$$

όπου,

$$\lambda=(L_{av}/L_e)<1,0 \text{ και}$$

L_{av} το διατιθέμενο μήκος ακύρωσης του οπλισμού ενίσχυσης το οποίο αρχικά το αποθέτουμε και με δοκιμές το επαληθεύουμε στο τέλος

$\beta_L=1,0$ όταν το λ είναι μεγαλύτερο ή ίσο του 1,0.

Βρίσκουμε τη συνολική ροπή που αντέχει η διατομή που είναι $M_{ολ}=[(4)+(5)]$ (13) και τη δύναμη

P που προκαλεί τη συγκεκριμένη ροπή. Στη συνέχεια υπολογίζουμε την απόσταση που από εκεί

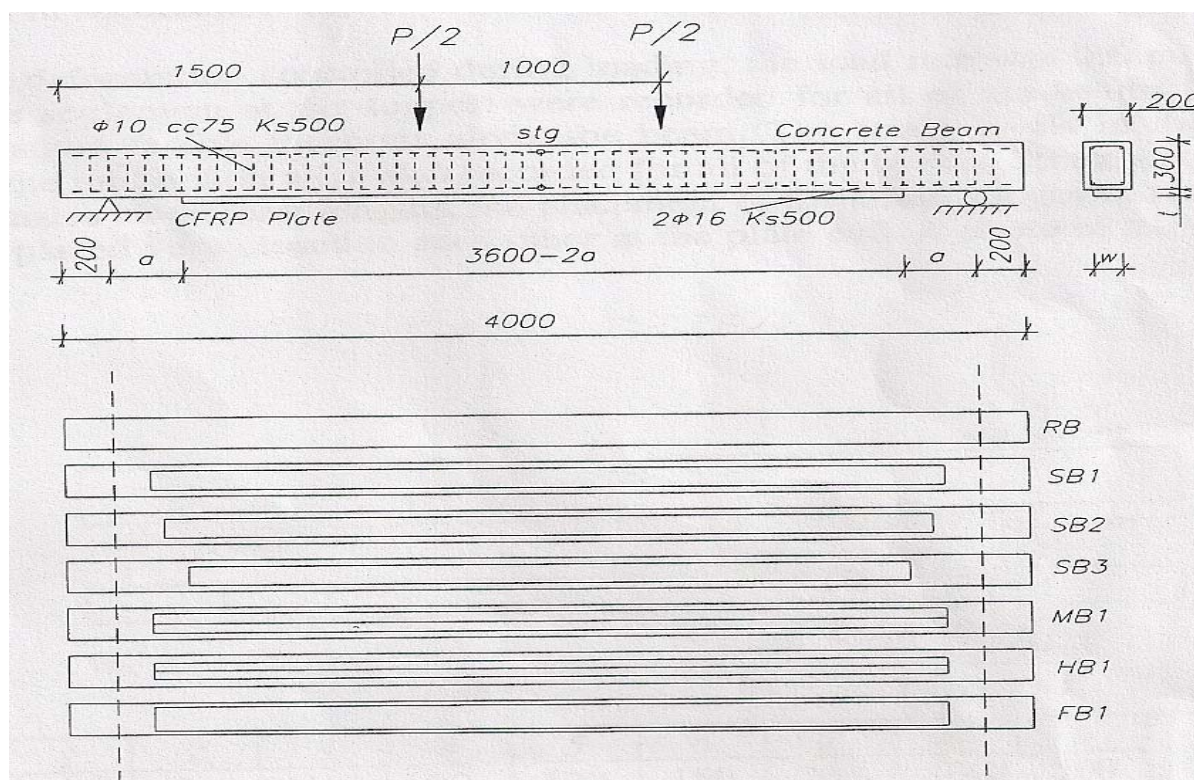
και πέρα ακυρώνεται το έλασμα και είναι $m=[(4)/P]$ (14). Στο τέλος υπολογίζουμε το διατιθέμενο

μήκος ακύρωσης που είναι $l_{τελ}=[m-a]$ (15), όπου a είναι η απόσταση του ελάσματος από το άκρο

της δοκού, και πρέπει να ταυτίζεται με το L_{av} , που υποθέσαμε αρχικά.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

- Χρησιμοποιούμε τα αποτελέσματα του πειράματος που έγινε στο paper “CONCRETE BEAMS STRENGTHEND FOR BENDING USING CFRP-SHEETS”. Οι διαστάσεις και ο οπλισμός της δοκού φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1: Γεωμετρικά στοιχεία των πειραματικών δοκών-Απεικόνιση της φόρτισης[2]

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των υλικών είναι τα εξής:

Beam	L [mm]	a [mm]	s [mm]	T [mm]	w [mm]	F_{fsu} [Mpa]	E_{fc} [Mpa]	F_{st} [Mpa]	F_{cc} [Mpa]	F_{ct} [Mpa]
RB	-	-	-	-	-	-	-	527	70	3,8
SB1	3300	150	2,1	1,4	120	2400	155	527	64	4
SB2	3200	200	2,4	1,4	120	2400	155	527	65	4,1
SB3	3000	300	3	1,4	120	2400	155	527	65	4,1
MB1	3300	150	2,4	1,4	120	2000	210	527	70	4
HB1	3300	150	2,1	1,4	100	1400	300	527	70	3,8
FB1	3300	150	0,4	2,4	150	1800	95	527	64	4

Πινάκας 1 "Χαρακτηριστικά υλικών" [2]

Αρχικά πρέπει να βρούμε την ροπή που αναλαμβάνουν τα 2φ12 με επικάλυψη 20mm ,με τα οποία είναι οπλισμένη η δοκός. Υπολογίζουμε ροπή που αναλαμβάνουν ο οπλισμός από τους τύπους (1),(2),(3),(4) και φαίνονται παρακάτω:

Beam	A_s (mm ²)	ω_1	μ_{sd}	M_{sd} (KNm)
RB	401,92	0,055	0,053	56,33

SB1	401,92	0,06	0,058	56,15
SB2	401,92	0,059	0,057	56,18
SB3	401,92	0,059	0,057	56,18
MB1	401,92	0,055	0,053	56,33
HB1	401,92	0,055	0,053	56,33
FB1	401,92	0,06	0,058	56,15

Πινάκας 2 "Ροπές αντοχής χάλυβα"

Έπειτα βρίσκουμε την ροπή που αναλαμβάνουν τα ινοπλισμένα πολυμερή από τους τύπους (5),(6),(7),(8),(9),(10),(11),(12),(13),(14),(15) και συγκρίνουμε την θεωρητική δύναμη που μπορεί να αναλάβει η ενισχυμένη δοκός σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. και την πειραματική. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνεται και η επί % διαφορά τους:

Beam	L_e (mm)	β_w	L_{av} (mm)	β_l	β	$\sigma_{j,crit}$ (MPa)	σ_{jd} (MPa)	A (mm ²)	ΔM (KNM)	$M_{ολ}$ (KNM)
RB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57,385
SB1	164,7	0,9354	62	0,611	0,572	1361	2000	0,00017	61,88887	119,09
SB2	162,7	0,9354	65	0,639	0,598	1460	2000	0,00017	66,37301	123,61
SB3	162,7	0,9354	63	0,625	0,584	1426	2000	0,00017	64,82495	122,06
MB1	191,7	0,9354	76	0,636	0,595	1416	1667	0,00017	64,37367	121,76
HB1	235,1	1	93	0,635	0,635	1436	1167	0,00014	54,39436	111,78
FB1	168,8	0,8452	61	0,592	0,5	695	1500	0,00036	67,82685	125,03
$P_{θεωρ}$ (KNm)	$P_{πειρ}$ (KNm)	M (mm)	L (mm)	Διαφορά (%)						
42,50708	-	-	-	-						
88,21717	142,8	648,449	498,4	61,8732586						
91,56272	151	625,109	425,1	64,9142816						
90,41601	147,7	633,037	333	63,356033						
90,19128	159,1	636,254	486,3	76,4028626						
82,7992	160,2	693,057	543,1	93,4801288						
92,61567	148,8	617,653	467,7	60,663963						

Πινάκας 3 "Υπολογισμός συνολικής θεωρητικής ροπής αντοχής της δοκού και σύγκριση με την πειραματική"[2]

Έπειτα ελέγχουμε αν συνεισφέρει ο θλιβόμενος σπλισμός στην κάμψη της δοκού. Από ισορροπία δυνάμεων στην διατομή βρίσκουμε το μήκος της θλβομενης διατομής από τον τύπο $\chi = [F_{st} * d + \sigma_j * (h+t/2)] / [0.85 * b * 0.8 * F_{cc}]$ και συγκρίνουμε το $\chi/2$ την επικάλυψη c.

χ (mm)	$\chi/2$ (mm)	C (mm)
22,24	11,12	20
55,56	27,78	20
50,503	25,2515	20

41,484	20,742	20
49,516	24,758	20
45,377	22,6885	20
57,389	28,6945	20

Πινάκας 4 "Υπολογισμός του μήκους της θλιβόμενης ζώνης"

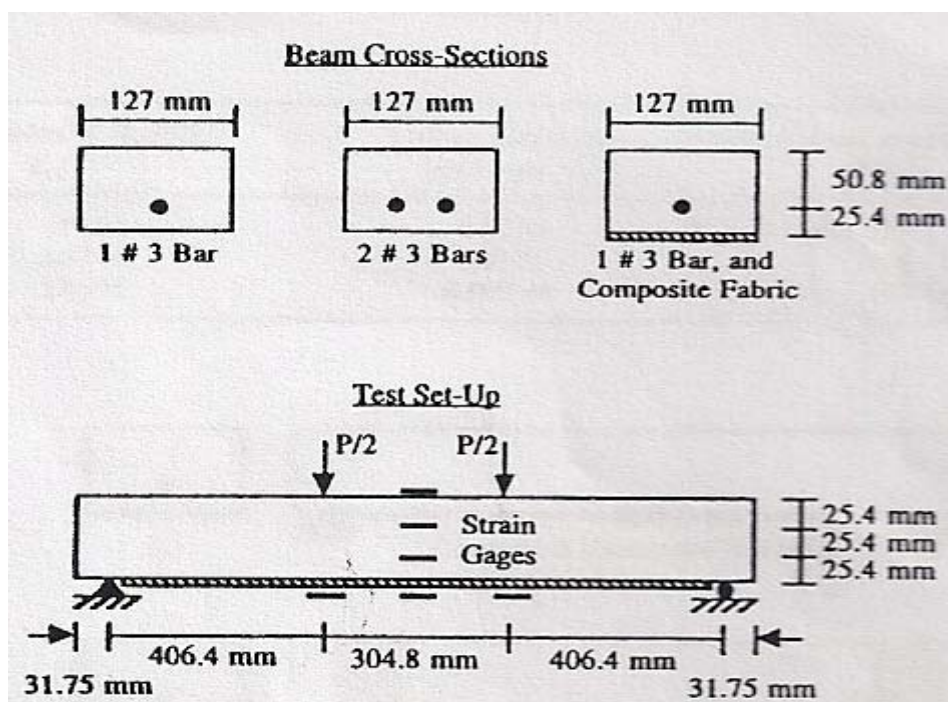
Αφού ο μοχλοβραχίονας του σκυροδέματος είναι μικρότερος από αυτόν του θλιβόμενου οπλισμού, συμπεραίνουμε ότι συνεισφέρει ο θλιβόμενος οπλισμός στην κάμψη, όμως δεν είμαστε σίγουροι αν φτάνει στην διαρροή του με αποτέλεσμα να γνωρίζουμε ότι αναλαμβάνει μεγαλύτερη ροπή χωρίς να μπορούμε να την υπολογίσουμε.

Στο τέλος παραθέτουμε τη μέση τιμή του πλάτους τη ρωγμής για τη κάθε δοκό ανάλογα με τη δύναμη φόρτισης. Στην τελευταία στήλη παρουσιάζεται το πλάτος ρωγμής υπό φόρτιση $P_{\theta\epsilon\omega\rho}$, διαφορετική για κάθε δοκό(οι τιμές στον Πίνακα 3), το οποίο υπολογίστηκε με γραμμική παρεμβολή:

Beam	P=50KN	P=80 KN	P=100 KN	P=120 KN	$P_{\theta\epsilon\omega\rho}$
S1	0,16	0,25	0,3	0,36	0,27
M1	0,14	0,2	0,25	0,27	0,22
H1	0,12	0,17	0,21	0,25	0,18
F1	0,08	0,14	0,16	0,23	0,15

Πινάκας 5 " Μέση τιμή του πλάτους της ρωγμής (mm)"[2]

- Βασιζόμενοι στα στοιχεία του paper "Flexural strengthening of concrete beams using externally bonded composite materials" αντλούμε πληροφορίες σχετικά με την αστοχία του υλικού ενίσχυσης κατά την αστοχία της δοκού. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά για την δοκό δίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχημα 2: Γεωμετρικά στοιχεία των πειραματικών δοκών-Απεικόνιση της φόρτισης [3]

Οι δοκοί είναι ενισχυμένοι με ινοπλισμένα από αραμίδι , γυαλί και άνθρακα και συμβολίζονται ως A,E,G αντίστοιχα. Τα χαρακτηριστικά των ινοπλισμένων, του χάλυβα και του σκυροδέματος φαίνονται στο παρακάτω πίνακα:

Δοκοί	F_{ctm} (MPa)	σ_f (Mpa)	E_f (Mpa)	t(mm)	f_c (Mpa)
A1	3,63058	223	11020	1,04(ένα φύλλο)	42,1
A2	3,65354	223	11020	1,04(ένα φύλλο)	42,5
A3	3,197722	223	11020	1,04(ένα φύλλο)	34,8
E1	3,123782	138	13090	1,42(τρία φύλλα)	33,6
E2	3,63058	138	13090	1,42(τρία φύλλα)	42,1
E3	3,65354	138	13090	1,42(τρία φύλλα)	42,5
G1	3,65354	190	22050	1,22(δύο φύλλα)	42,5
G2	3,63058	190	22050	1,22(δύο φύλλα)	42,1
G3	3,270817	190	22050	1,22(δύο φύλλα)	36

Πινάκας 6 "Χαρακτηριστικά υλικών"[3]

Βασιζόμενοι στις εξισώσεις (1),(2),(3),(4) βρίσκουμε την ροπή αντοχής του χάλυβα:

A_s (mm ²)	ω_1	μ_{sd}	M_{sd} (KNm)
71,21962	0,129	0,1192	1,645
71,21962	0,128	0,1182	1,647
71,21962	0,156	0,1417	1,616
71,21962	0,162	0,1462	1,61

71,21962	0,129	0,1192	1,645
71,21962	0,128	0,1182	1,647
71,21962	0,128	0,1182	1,647
71,21962	0,129	0,1192	1,645
71,21962	0,151	0,1375	1,622

Πινάκας 7 "Ροπές αντοχής χάλυβα"

Έπειτα χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (5),(6),(7),(8),(9),(10),(11),(12),(13),(14),(15) βρίσκουμε την ροπή που αναλαμβάνει η ενίσχυση και συνολικά η δοκός. Στη συνέχεια, συγκρίνουμε τη θεωρητική δύναμη P που προκαλεί αυτή τη ροπή με την πειραματική P που μεταφέραμε στη στήλη $P_{\text{πειρ}}$ του πίνακα που ακολουθεί:

Δοκοί	L_e (mm)	β	$\sigma_{j,crit}$ (MPa)	σ_{jd} (MPa)	A (mm ²)	ΔM (KNm)	$M_{ολ}$ (KNm)	$P_{\theta\epsilon\omega\rho}$ (N)	$P_{\text{πειρ}}$ (N)	m (mm)	$l_{\text{τελ}}$ (mm)
A1	39,73	1,41	163,4	185,8	132,1	1,491	3,136	15432,8	16269	101.13	101.13
A2	39,6	1,41	164	185,8	132,1	1,495	3,142	15462,3	14756	111.59	111.59
A3	42,33	1,41	153,4	185,8	132,1	1,399	3,015	14838,8	16888	95.706	95.706
E1	54,55	1,41	141,4	115	180,3	1,436	3,046	14989,4	15280	105.39	105.39
E2	50,6	1,41	152,5	115	180,3	1,436	3,081	15161,7	15282	107.66	107.66
E3	50,44	1,41	152,9	115	180,3	1,436	3,082	15168,1	15379	107.07	107.07
G1	60,68	1,41	214,1	158,3	154,9	1,696	3,342	16449,3	15059	109.34	109.34
G2	60,87	1,41	213,5	158,3	154,9	1,696	3,341	16442,9	17035	96.584	96.584
G3	64,13	1,41	202,6	158,3	154,9	1,696	3,318	16327,5	14489	111.94	111.94

Διαφορά (%)	Θεωρητική αστοχία	Πραγματική αστοχία
5,418620766	Αποκόλληση σκυροδέματος	Αποκόλληση ελάσματος
-4,56803744	Αποκόλληση σκυροδέματος	Αστοχία σκυροδέματος
13,81003816	Αποκόλληση σκυροδέματος	Αστοχία σκυροδέματος
1,938529083	Αστοχία υλικού ενίσχυσης	Αστοχία υλικού ενίσχυσης
0,793726709	Αστοχία υλικού ενίσχυσης	Αστοχία υλικού ενίσχυσης
1,390647816	Αστοχία υλικού ενίσχυσης	Αστοχία υλικού ενίσχυσης
-8,45196462	Αστοχία υλικού ενίσχυσης	Αστοχία υλικού ενίσχυσης
3,601070762	Αστοχία υλικού ενίσχυσης	Αστοχία υλικού ενίσχυσης
-11,260244	Αστοχία υλικού ενίσχυσης	Αστοχία υλικού ενίσχυσης

Πινάκας 8 "Υπολογισμός

συνολικής θεωρητικής ροπής αντοχής της δοκού και σύγκριση με την πειραματική"[3]

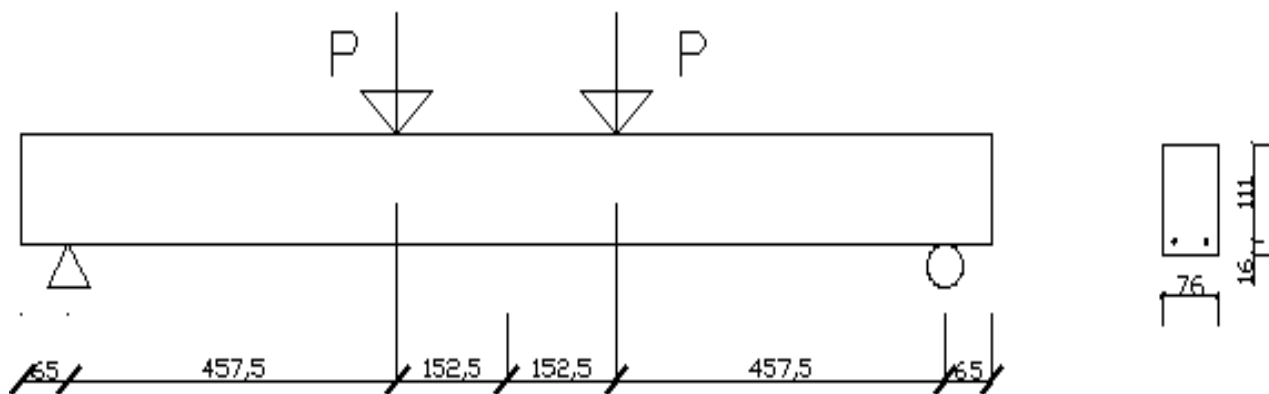
Επειδή έχουμε επαρκές μήκος αγκύρωσης, άρα $\beta_i=1$, υπολογίζουμε κατευθείαν το $\beta=\beta_w$. Στο τέλος βρίσκουμε τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στη θλιβόμενη ζώνη, αφού πρώτα βρούμε το μήκος τη θλιβόμενης ζώνης από την εξίσωση, που είναι $\epsilon_u=\epsilon_{fu}*\chi/(76,2-\chi)$:

Εκτελεστικές δυνάμεις	Θλιπτικές δυνάμεις	χ	ϵ_{fu}	ϵ_u
56,69955	3,6358	15,59498	0,01686	0,00345

56,7677	3,6703	15,46677	0,01686	0,00342
55,37178	3,0053	18,42454	0,01686	0,00408
55,85037	2,9017	19,24749	0,0122	0,00308
55,85037	3,6358	15,36142	0,0122	0,00246
55,85037	3,6703	15,21684	0,0122	0,00244
59,64344	3,6703	16,25029	0,0122	0,0026
59,64344	3,6358	16,40469	0,0122	0,00263
59,64344	3,109	19,18437	0,0122	0,00307

Πινάκας 9 "Υπολογισμός μέγιστων παραμορφώσεων σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη"

- Για να κάνουμε επαλήθευση των 2 προηγούμενων pages χρησιμοποιούμε και ένα τρίτο: «Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials». Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δοκού φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3: Γεωμετρικά στοιχεία των πειραματικών δοκών-Απεικόνιση της φόρτισης

Τα χαρακτηριστικά των υλικών φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Δοκός	L (mm)	A (mm)	t (mm)	w (mm)	f_{fsu} (MPa)	E_{fc} (MPa)	f_{st} (MPa)	f_{cc} (MPa)	f_{ct} (MPa)
1	-	-	-	-	-	-	517	44,7	3,77856
2	1220	75	0,2	42,6	1450	186	517	44,7	3,77856
3	1220	75	0,2	60,5	1450	186	517	44,7	3,77856
4	1220	75	0,65	63,2	1450	186	517	44,7	3,77856
5	1220	75	0,65	63,2	1450	186	517	44,7	3,77856
6	1220	75	0,9	63,3	1450	186	517	44,7	3,77856
7	1220	75	0,9	63,3	1450	186	517	44,7	3,77856
8	1220	75	1,9	63,9	1450	186	517	44,7	3,77856

Πινάκας 10 "Χαρακτηριστικά υλικών" [4]

Όπως και στα παραπάνω, υπολογίζουμε τη ροπή αντοχής του χάλυβα που είναι $M_{rd} = 1,85 \text{KNm}$ (ίδια για όλες τις δοκούς) και την ροπή αντοχής του υλικού ενίσχυσης για κάθε δοκό. Συγκρίνουμε στη συνέχεια P με το $P_{πειρ}$:

Δοκός	L_e (mm)	β_w	L_{av} (mm)	β_l	β	$\sigma_{j,crit}$ (MPa)	σ_{jd} (MPa)	A (mm ²)	ΔM (KNm)	$M_{συν}$ (KNm)
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,5987
2	70,2	0,96	64,29	0,993	0,954	1053	1208,33	8,52	1,02	2,625
3	70,2	0,819	55,7	0,958	0,784	866	1208,33	12,1	1,19	2,7973
4	126	0,799	47,1	0,606	0,484	296,6	1208,33	41,08	1,39	2,9953
5	126	0,799	47,1	0,606	0,484	296,6	1208,33	41,08	1,39	2,99
6	149	0,798	46,1	0,524	0,418	217,5	1208,33	56,97	1,42	3,020
7	149	0,798	46,01	0,523	0,417	217,2	1208,33	56,97	1,41	3,018
8	216	0,794	44,4	0,368	0,292	104,8	1208,33	121,41	1,46	3,0638

P (KN)	$P_{πειρ}$ (KN)	m (mm)	L (mm)	Διαφορά (%)	Θεωρητική αστοχία	Πραγματική αστοχία
6,98	8,59	-	-	22,9	peeling	Αστοχία υλικού ενίσχυσης
11,4	13,16	139,3	64,29	14,66	peeling	Αστοχία υλικού ενίσχυσης
12,22	17,27	130,7	55,73	41,22	peeling	peeling
13,09	29,56	122,1	47,10	125,77	peeling	peeling
13,09	30,5	122,1	47,10	132,9	peeling	peeling
13,20	27,9	121,1	46,08	111,3	peeling	peeling
13,19	25,59	121,2	46,17	93,95	peeling	peeling
13,39	37,33	119,4	44,36	178,71	peeling	peeling

Πίνακας 11 "Υπολογισμός συνολικής θεωρητικής ροπής αντοχής της δοκού και σύγκριση με την πειραματική"[4]

4)ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

• Στο paper 1 παρατηρούμε ότι όταν έχουμε αστοχία λόγω αποκόλλησης μιας φλούδας σκυροδέματος, η θεωρητική ροπή αντοχής είναι σαφώς μικρότερη μέχρι και 60% από την πραγματική. Η τελική αντοχή των δοκών SB1,SB2 και SB3, που έχουν ίδιο πάχος και πλάτος υλικού και το μήκος τοποθέτησής του από το άκρο της μεγαλώνει κατά 50mm από δοκό σε δοκό, θα έπρεπε σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. να μικραίνει καθώς μειώνεται το μήκος αγκύρωσης. Όμως η πραγματική ροπή που μετρήθηκε στο εργαστήριο αυξάνεται καθώς μικραίνει το μήκος αγκύρωσης, πράγμα που δεν συνάδει με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. Αυτό οφείλεται στο ότι αυξάνεται το πάχος της κόλλας καθώς μικραίνει το μήκος αγκύρωσης. Η αύξηση του πάχους συμβάλλει στην αύξηση της αντοχής της δοκού πράγμα το οποίο ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. το αγνοεί και θεωρεί τον εξωτερικό σπλισμό τοποθετημένο ακριβώς κάτω από τη δοκό. Ο πίνακας με το μέσο πλάτος των ρωγμών δείχνει ότι στην δύναμη που έχουμε αστοχία σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. οι ρωγμές έχουν πάχος περίπου 20-30 mm, δηλαδή ρωγμές που επηρεάζουν την λειτουργικότητα του κτηρίου.

• Στο paper 2 βλέπουμε ότι όταν έχουμε αστοχία λόγω θραύσης του υλικού ενίσχυσης ,που επικολλάται στο εφεκλυόμενο πέλημα της δοκού, η θεωρητική αντοχή είναι περίπου ίδια με την πραγματική. Επίσης, παρατηρούμε ότι στις δοκούς A2 και A3 στις οποίες έχουμε τοποθετήσει στα άκρα εξωτερικούς συνδετήρες, ενώ προβλέπεται αποκόλληση μιας φλούδας σκυροδέματος, έχουμε αστοχία θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος. Οι εξωτερικοί συνδετήρες καθυστερούν το peeling με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται στη θλιβόμενη επιφάνεια παραμορφώσεις μεγαλύτερη της 0,35%. Η συμβολή των συνδετήρων δεν υπολογίζεται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. παρόλο που συνιστάται να χρησιμοποιηθούν. Στη δοκό A1 πριν φτάσουν οι παραμορφώσεις στην θλιβόμενη ζώνη στην τάξη των 0,35% έχουμε διατμητική αστοχία στην κόλλα. Θα έπρεπε να γίνεται έλεγχος στις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στην κόλλα κάτι που είναι δύσκολο να υπολογιστεί και δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο μοντέλο. Οι ρητίνες που υπάρχουν στο εμπόριο υποχρεούνται να έχουν μια αυξημένη διατμητική ανοχή , ώστε να καλύπτουν όλες τις περιπτώσεις.

- Στο paper 3, παρόλο που δεν μας δίνει το πάχος της κόλλας και ακολουθούνται κάποιες διατάξεις για την ωρίμανση της κόλλας και κατά συνέπεια την απόκτηση της μέγιστης αντοχής της, παρατηρείται ότι η θεωρητική αντοχή της δοκού είναι μικρότερη από την πραγματική κατά την αστοχία peeling μέχρι και διαφορά περίπου 180%. Μάλιστα στις δοκούς 2 και 3, ενώ προβλέπεται αστοχία peeling στην πράξη έχουμε αστοχία του υλικού ενίσχυσης.
- Ολοκληρωτικά, καταλήγουμε στο ότι ο μηχανικός για να ενισχύσει μια δοκό θα πρέπει να ξεκινάει από τη μικρότερη διατομή και να επιλέξει αυτήν όπου θα είναι και επαρκής και το $\sigma_{jd} \sim \sigma_{j,crit}$, διότι ο μηχανισμός αποκόλλησης μιας φλούδας σκυροδέματος είναι ψαθυρός και χωρίς προειδοποιήσεις (μικρό εύρος ρωγμών) και δεν επωφελούμαστε όλη την αντοχή του υλικού ενίσχυσης, πράγμα που είναι αντιοικονομικό. Επίσης αν δεχτεί ο μηχανικός μεγαλύτερες παραμορφώσεις της τάξεως των 0,4-0,5 mm θα μπορούσε να αυξήσει την $\sigma_{j,crit}$ κατά 60%.

4)ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ(ΚΑΝ.ΕΠΕ.), παρ. 8.2.1.3α(i,ii,iii,iv,v και σχόλια)
- [2] Prof. Bjorn Taljsten, "CONCRETE BEAMS STRENGTHENED FOR BENDING USING CFRP-SHEETS", Lulea University of Technology, Div. of Civil and Mining Engineering 971 87 Lulea, and Stablator AB 118 99 Stockholm, Sweden.
- [3] Michael J. Chajes, Theodore A. Thomson Jr, Ted F. Januszka and William W. Finch Jr, "Flexural strengthening of concrete beams using externally bonded composite materials",1994, Dep. of Civil Engineering, University of Delaware, 137 DupontHall,Newark,DE 19716,USA.]
- [4] T.C. TRIANTAFILLOU, N. PLEVRIS, "Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials"(page 201-211), Materials and Structures, 1992, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA