

ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ ΙΟΠ (FRP) ΣΕ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΔΟΚΩΝ

ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΥ ΓΕΩΡΓΙΑ
ΤΣΑΓΓΟΥΡΗ ΕΛΕΝΗ

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο να περιγράψει και να αναλύσει τις μεθόδους αγκύρωσης σε δοκούς ενισχυμένες με FRP. Γίνεται αναφορά στην αγκύρωση δοκών που καταπονούνται και αστοχούν σε κάμψη με μια ειδική πλάκα ή μεταλλικά αγκύρια. Δίνονται αναλυτικά στοιχεία για μεθόδους αγκύρωσης δοκών που ενισχύονται έναντι διάτμησης, όπως η μηχανική αγκύρωση, η μέθοδος NSM, η μέθοδος CMAS και η χρήση υβριδικών αγκυρίων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

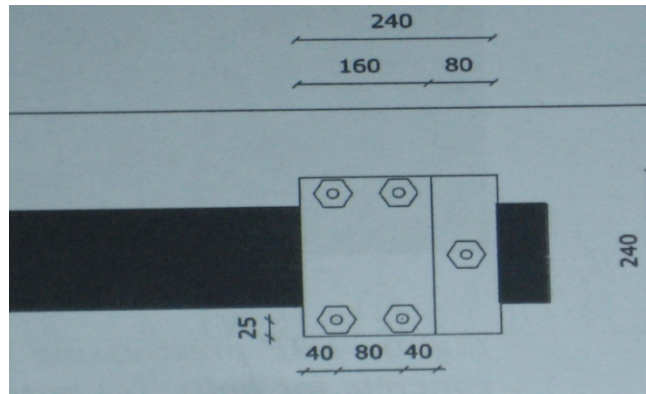
Η ενίσχυση δοκού με σύνθετα υλικά επιτυγχάνεται μέσω της επικόλλησης υφασμάτων FRP ή, σπανιότερα, ελασμάτων, στις εξωτερικές επιφάνειες με τις ίνες κατά το δυνατόν παράλληλες στις τροχιές των κυρίων τάσεων, δηλαδή σε διεύθυνση κάθετη στον άξονα της δοκού. Στην πράξη η δοκός ενισχύεται με μια ή περισσότερες στρώσεις FRP στις τρεις από τις τέσσερις εξωτερικές της πλευρές, δηλαδή στο κάτω πέλμα και στις δύο πλαϊνές πλευρές της (τρίπλευρος ανοικτός μανδύας) όταν κυρίαρχο είναι το φαινόμενο της διάτμησης και στο κάτω πέλμα της μόνο όταν κυριαρχεί η κάμψη. [2]

Ο συνηθέστερος τρόπος αστοχίας των ενισχύσεων στις δοκούς είναι η απότομη (ψαθυρή) αποκόλληση της ενίσχυσης από την εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος στα σημεία όπου σταματάει το FRP στο επάνω μέρος των πλαϊνών πλευρών της διατομής (διάτμηση) ή στα άκρα του κάτω πέλματος (κάμψη). Το φαινόμενο γίνεται έντονο στις περιοχές της δοκού όπου μεγαλώνει και κυριαρχεί η αρνητική ροπή (κοντά στις στηρίξεις). Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφοροι τρόποι αγκύρωσης αυτής της προβληματικής περιοχής οι οποίοι και θα αναπτυχθούν αναλυτικότερα παρακάτω. [2],[1]

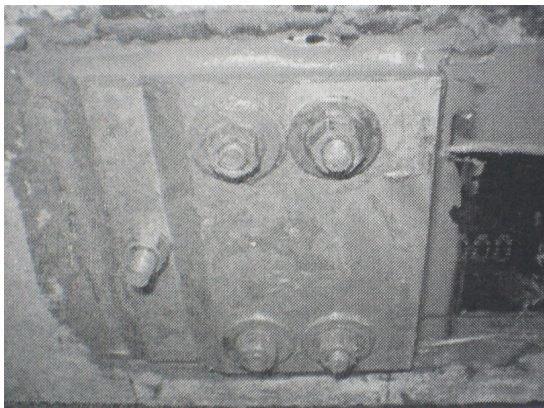
2. ΑΓΚΥΡΩΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

Στην περίπτωση της ενίσχυσης σε κάμψη η μεταφορά δυνάμεων στο παλιό σκυρόδεμα γίνεται σε μεγάλο μήκος της δοκού και βαθμωτά αλλάζει σε όλο το μήκος της ανάλογα με τη φόρτιση. Η εφαρμογή ελασμάτων ή υφασμάτων για ενισχύσεις έναντι κάμψης γίνεται με επικόλληση στο εφελκυστικό πέλμα της δοκού με διεύθυνση των ινών τέτοια ώστε να παραλαμβάνουν τις λόγω κάμψης εφελκυστικές δυνάμεις (δηλαδή παράλληλα στον άξονα του μέλους). [2]

Ένας συνηθισμένος τρόπος αγκύρωσης είναι η τοποθέτηση και στα δύο ακραία τμήματα της ενίσχυσης με ελάσματα FRP στο κάτω πέλμα της δοκού, μεταλλικής πλάκας και μηχανισμών μεταλλικών αγκυρίων. Στη βιβλιογραφία δεν γίνεται πουθενά αναφορά σε κατασκευαστικές διατάξεις για την επιλογή και χρήση των αγκυρίων. Σε πειράματα που έχουν διεξαχθεί παρατηρήθηκε ότι ο τρόπος αστοχίας της δοκού με και χωρίς αγκύρωση παραμένει ο ίδιος, δηλαδή είναι εμφανές το στάδιο των προρηγματώσεων (pre-cracked stage), της ρηγμάτωσης (post-cracked stage) και της διαρροής (post-yielded stage) με απότομη αποκόλληση του ελάσματος FRP που ξεκινά πάντα από το ελεύθερο άκρο. Παρ' όλα αυτά, πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι το συνολικό φορτίο που παραλαμβάνεται από τη δοκό είναι πολύ μεγαλύτερο στην περίπτωση της αγκύρωσης όπου μάλιστα η συνολική παραμόρφωση έως την αστοχία έφτασε τα 0,58%, σημαντική αύξηση που υποδηλώνει την βελτίωση της διατομής με την παρουσία των μεταλλικών πλακών και αγκυρίων. [10],[8]



Σχήμα 1 :Αγκύρωση έναντι κάμψης [10]

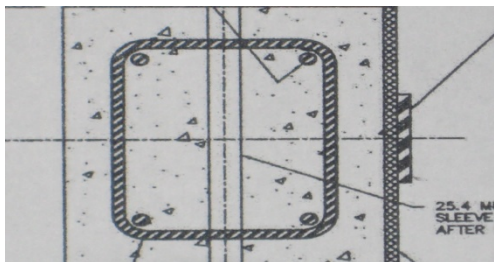


Σχήμα 2 : Εφαρμογή της αγκύρωσης [10]



Σχήμα 3 :Αστοχία της ενίσχυσης στην περιοχή της αγκύρωσης [10]

Ένας επιπλέον τρόπος αγκύρωσης πλακών FRP που τοποθετούνται και αυτές με τη σειρά τους στο κάτω πέλμα της δοκού είναι η τοποθέτηση στο ενδιάμεσο ειδικής πλάκας FRP υψηλής αντοχής. Η ειδική αυτή πλάκα ονομάζεται wgap στην αγγλική βιβλιογραφία και τοποθετείται σε διπλή στρώση απλά επικολλητή με εποξειδική ρητίνη ανάμεσα στην εξωτερική επιφάνεια της δοκού και του FRP σε όλο το ενισχυμένο τμήμα της δοκού και σε μικρές περιοχές γύρω από αυτό. Μάλιστα, σε πειραματικές διατάξεις που μελετήσαμε οι ίνες της ειδικής πλάκας-wgap είχαν προσανατολιστεί σε γωνία 45 μοιρών από τον κύριο άξονα της δοκού. Είναι άξια μνημόνευσης τα χαρακτηριστικά αυτής της ενδιάμεσης πλάκας, καθώς έχει ονομαστική τάση σε εφελκυσμό 4.100kN/mm^2 , μέτρο ελαστικότητας $E=231\text{ GPa}$, παραμόρφωση αστοχίας 1,7%. Σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε ενισχυμένες δοκούς με και χωρίς αγκύρωση προέκυψε αστοχία στην διεπιφάνεια. Όμως, στην περίπτωση τοποθέτησης πλάκας wgap είχαμε 53% αύξηση του φορτίου αστοχίας και παράλληλα αυτό το φορτίο αστοχίας αντιπροσώπευε μόνον το 18% και 27,5% της ικανότητας της FRP πλάκας για την μη αγκυρωμένη και την αγκυρωμένη δοκό αντίστοιχα.[10],[8]



Σχήμα4 : Αγκύρωση με FRP υψηλής αντοχής στο ενδιάμεσο [3]

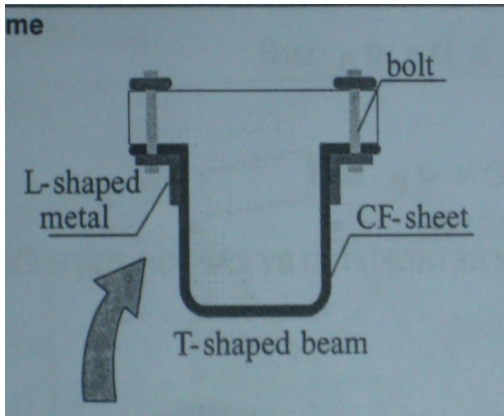
Ο ACI προτείνει ένα μειωτικό συντελεστή K_m που μειώνει την επιτρεπόμενη παραμόρφωση ϵ_{fu} στο FRP για να αποφευχθεί η αποκόλληση. Η αριθμητική τιμή του K_m υπολογίστηκε από πειραματικές διατάξεις που πραγματοποιήθηκαν χωρίς αγκύρωση μεν αλλά σε ενισχυμένες με FRP δοκούς έναντι κάμψης. Ο συντελεστής αυτός σε επόμενη ενότητα της εργασίας μας θα πάρει τιμές για δύο μεθόδους. Η προκύπτουσα έκφραση του K_m είναι η εξής :

$$K_m = \begin{cases} \frac{1}{60 + \epsilon_{fu}} \left(1 - \frac{n \cdot E_f \cdot t_f}{860.000} \right) \leq 0.90 \text{ για } n f \cdot E_f \cdot t_f \leq 180.000 \\ \frac{1}{60 + \epsilon_{fu}} \left(1 - \frac{90.000}{n f \cdot E_f \cdot t_f} \right) \leq 0.90 \text{ για } n f \cdot E_f \cdot t_f \leq 180.000 \end{cases} \quad (1)$$

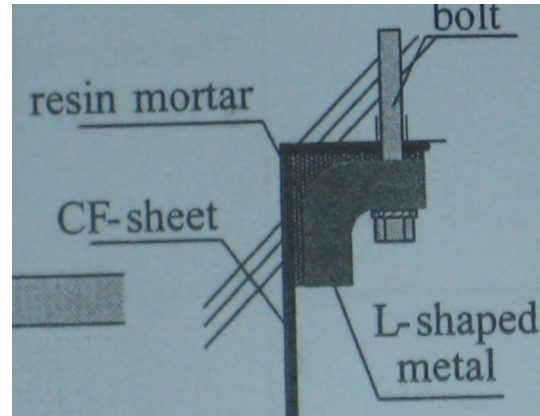
Όπου n =αριθμός στρώσεων FRP , E_f = μέτρο ελαστικότητας σε MPa , t_f =πάχος του φύλλου FRP σε mm.Ο κανονισμός θεωρεί σαν μέγιστη τιμή το $K_m=0.90$ για μια ενισχυμένη δοκό με FRP χωρίς αγκύρωση. Την τιμή αυτή θα συγκρίνουμε ακόλουθες πειραματικές διατάξεις. Αναζητώντας στοιχεία για την αγκύρωση σε ενισχυμένη δοκό έναντι κάμψης καταλήξαμε ότι χρειάζεται περαιτέρω αναζήτηση και σύγκριση των μεθόδων αγκύρωσης σε πειραματικό επίπεδο. Παράλληλα, δεν υπάρχει κανένας κανονισμός που να δίνει σχετικούς ελέγχους αντοχής και κατασκευαστικές διατάξεις. Συγκρίνοντας τις δύο προαναφερθείσες μεθόδους, η πρώτη έχει χρησιμοποιηθεί με διθυραμβικά αποτελέσματα σε πολλές πειραματικές διατάξεις, ενώ η δεύτερη είναι μια πρωτότυπη τεχνική που έχει μελετηθεί ελάχιστα και σίγουρα απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση στο μέλλον.[10],[8]

3.ΑΓΚΥΡΩΣΗ ΜΕ MECHANICAL ANCHORAGE

Ένας ευρέως γνωστός τρόπος αγκύρωσης είναι αυτός της τοποθέτησης μεταλλικών αγκυρίων στο άκρο του ανοικτού μανδύα FRP ο οποίος παίρνει το όνομα mechanical anchorage στη διεθνή βιβλιογραφία. Όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες αυτής της εργασίας μια μορφή αγκύρωσης μπορεί να προκύψει από την επικόλληση ενός μεταλλικού ελάσματος σχήματος L στην ενισχυμένη περιοχή της δοκού με τη βοήθεια εποξειδικής ρητίνης. Αυτά τα μεταλλικά ελάσματα αγκυρώνονται και στο κομμάτι της μη ενισχυμένης δοκού (plate of T-beam) με μεταλλικές ράβδους-αγκύρια (steel tensile plates). [9]

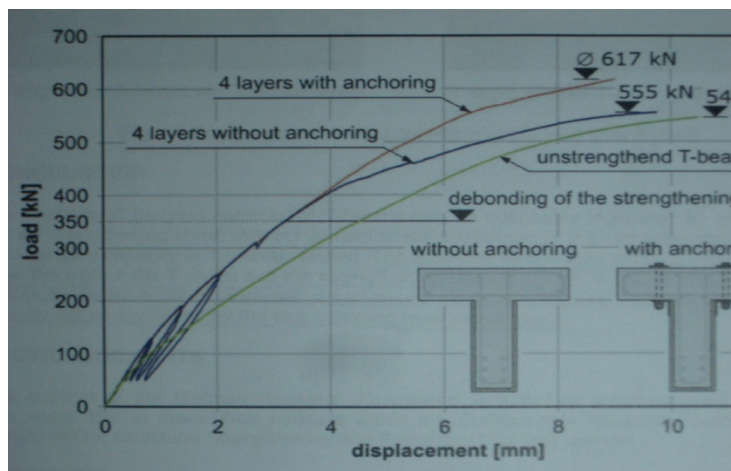


Σχήμα 5: Mechanical anchorage [9]



Σχήμα 6: Κατασκευαστική λεπτομέρεια, mechanical anchorage [9]

Αν επικεντρωθούμε στην περιοχή της αγκύρωσης και μελετήσουμε τον μηχανισμό μεταφοράς δυνάμεων θα παρατηρήσουμε ότι καθώς εισάγουμε δύναμη, η αγκύρωση φορτίζεται από μεταφορά δυνάμεων κάθετα στις στρώσεις του FRP. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στη περιοχή της συγκόλλησης πρέπει να μεταφερθούν από την εξωτερική στην εσωτερική στρώση του υφάσματος. Όμως η εσωτερικά ακραία στρώση του υφάσματος φορτίζεται περισσότερο από κάθε άλλη στρώση, γεγονός που οδηγεί τελικά σε αποκόλληση της ενίσχυσης. Μάλιστα, από πειραματικές μετρήσεις που έγιναν προέκυψε ότι αν τοποθετηθεί μικρός αριθμός στρώσεων και η τάση αστοχίας του FRP παίρνει σχετικά μικρές τιμές η αύξηση του φορτίου αστοχίας μπορεί να επιτευχθεί και χωρίς την αγκύρωση. Η συνάφεια της συγκόλλησης μεταξύ της υπάρχουσας δοκού και της ενίσχυσης είναι καθοριστική για την αποτελεσματική αγκύρωση στη δοκό. Αν η προαναφερθείσα συνοχή υπερβεί κάποια όρια, η ενίσχυση θα αποκολληθεί και θα οδηγηθεί σε αστοχία. Πειραματικά δεδομένα έδειξαν ότι, οι παραπάνω εσωτερικές δυνάμεις της αγκύρωσης ξεκινούν να αναπτύσσονται και να γίνονται αντιληπτές στη καμπύλη φορτίο παραμόρφωσης της δοκού μόνο μετά από ένα επίπεδο φορτίου που είναι υψηλότερο από το όριο για αστοχία χωρίς αγκύρωση, κάτι που είναι αναμενόμενο και επιθυμητό. [4],[9]



Σχήμα 7 : Διάγραμμα φορτίου παραμόρφωσης από σχετικό πείραμα [4]

Μια ιαπωνική ομάδα μάλιστα προτείνει και τύπους για την αντοχή της διατομής σε διάτμηση, όπου

$$V_u = b * j_t * p_w * \sigma_y * \cot \phi + \alpha * (1 - \beta) * b * D * v_0 * \sigma_B \quad (2)$$

$$\alpha = \{ \sqrt{((L/D)^2 + 1)} - (L/D) \} / 2 \quad (3)$$

$$\beta = \{ (1 + \cot^2 \phi) * p_w * \sigma_y \} / (v_0 * \sigma_B) \quad (4)$$

$$v_0 * \sigma_B = 1,7 * (1 + 2 * n) * \sigma_B^{0,667} \quad (5)$$

$$\sigma_y \leq 125 * \sqrt{v_0 * \sigma_B} \quad (6)$$

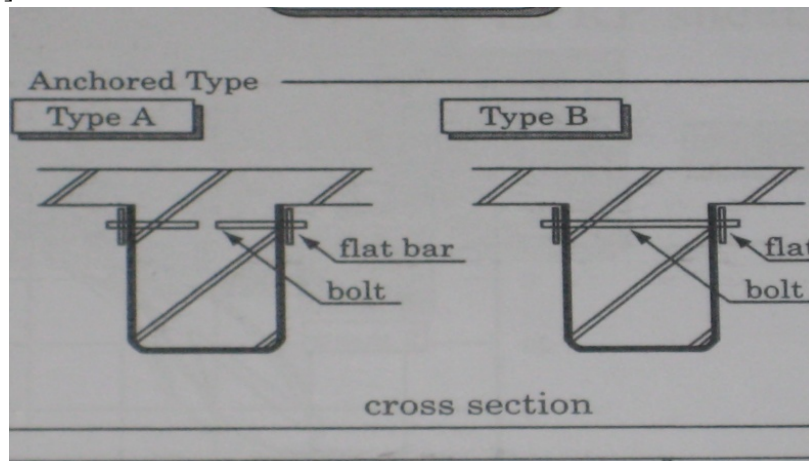
$$\cot \phi = \min \{ (2 - 3 * n) \geq 1, (j_t / 2 * \alpha * D), \sqrt{v_0 * \sigma_B} / ((p_w * \sigma_y) - 1) \} \quad (7)$$

p_w =εύρος διατμητικής αντοχής, σ_y =αντοχή του υλικού σε διάτμηση, n =αριθμός

στρώσεων, b =πλάτος, σ_B =τάση οπλισμού, j_t =πάχος FRP, D =διάμετρος αγκυρίου, v_0 =μειωμένο ποσοστό τάσης του FRP, L =μήκος FRP

Σαν συμπέρασμα, καταλήγουμε ότι η αποτελεσματικότητα της μεθόδου επηρεάζεται από το πάχος και τον αριθμό των στρώσεων.[9]

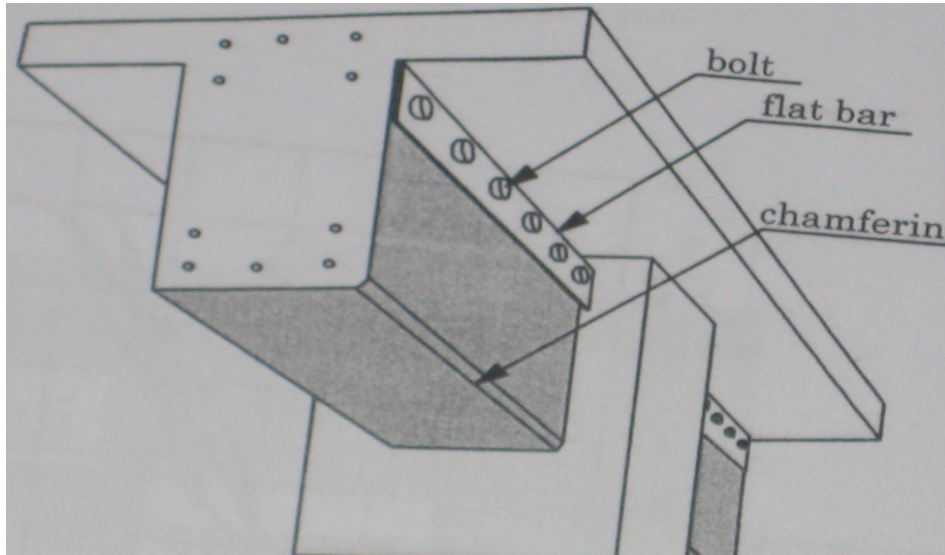
Ένας άλλος τρόπος μηχανικής αγκύρωσης είναι αυτός που φαίνεται στην επόμενη φωτογραφία.[9]



Σχήμα8 : Αγκύρωση σε διάτμηση με μηχανικά αγκύρια, τύπος Α και Β [9]

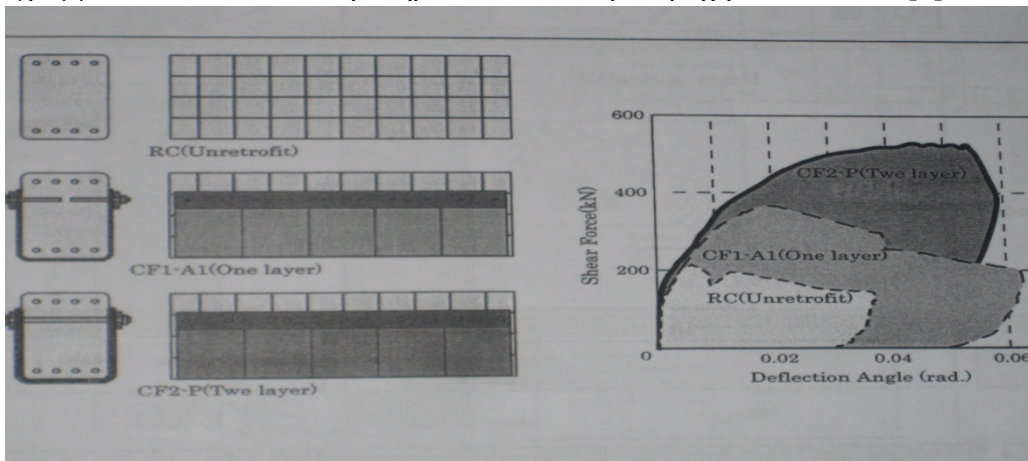
Μια μεταλλική πλάκα τοποθετείται λίγο πριν το ακραίο σημείο της ενίσχυσης και πάνω σε αυτήν αγκυρώνεται ένα μεταλλικό αγκύριο. Η μόνη διαφορά από τη προηγούμενη μέθοδο έγκειται στη θέση της αγκύρωσης. Το αγκύριο μπορεί να τοποθετείται στη μια πλευρά, να διαπερνά τη διατομή και να αγκυρώνεται και πάλι στην απέναντι πλευρά(τύπος Β) ή μπορεί να τοποθετηθούν 2 διαφορετικά αγκύρια αντικριστά(τύπος Α). Η διατμητική αντοχή της ενισχυμένης δοκού δίνεται από τον τύπο

$$V_u = b * j_t * \Sigma(p_w * \sigma_w) + 0,5 * (1 - \beta) * b * D * v * \sigma_B * \tan \theta \quad (\text{τα σύμβολα επεξηγούνται παραπάνω}) \quad (8)$$



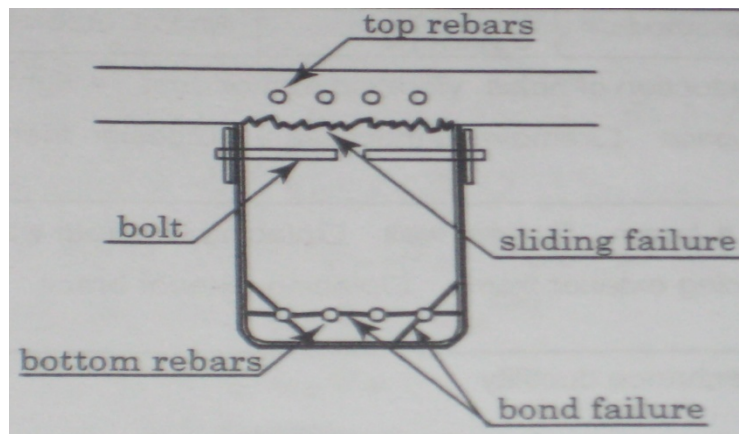
Σχήμα 9: Δοκός αγκυρωμένη με mechanical anchors [9]

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρατηρείται εύκολα η υπεροχή του τύπου B.[9]



Σχήμα 10: Διάγραμμα διατμητικού φορτίου-παραμόρφωσης για τους 2 τύπους αγκύρωσης [9]

Το σημαντικότερο πρόβλημα αυτής της μεθόδου έγκειται στην πιθανότητα συγκέντρωσης τάσεων στην περιοχή πάνω από τα αγκύρια όπως παραστατικά φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 11: Συγκέντρωση τάσεων [9]

Γι' αυτό και προτείνεται ο έλεγχος της διατμητικής αντοχής της δοκού με τη βοήθεια της σχέσης : $Q_u = b \cdot j_t \cdot \tau_{sp} + 0.5 \cdot (1 - \beta) \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B \cdot \tan \theta$ (9)

Από τη σύγκριση των δύο μεθόδων μηχανικής αγκύρωσης καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η πρώτη μέθοδος αγκύρωσης υπερέχει έναντι της δεύτερης. Πιο συγκεκριμένα, η αγκύρωση στη δοκό αναλαμβάνει μεγαλύτερα φορτία και έχει μεγαλύτερη παραμόρφωση αστοχίας. Παράλληλα, η δεύτερη μέθοδος έχει πολλά προβλήματα συγκέντρωσης τάσεων όπως αναφέρθηκε μόλις παραπάνω.[9]

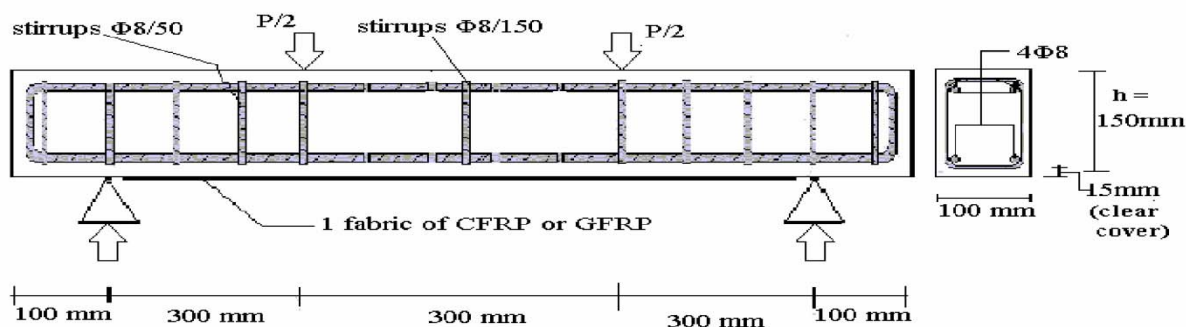
Η αγκύρωση με μηχανικά αγκύρια συναντά πολλά πρακτικά προβλήματα στην εφαρμογή της στο πεδίο. Επίσης, μειονεκτεί μιας και η χρήση μεταλλικών αγκυριών συνεπάγεται και κίνδυνο διάβρωσης και ασυμβατότητα με τα FRP. Ακόμη, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η συγκέντρωση τάσεων αποτρέπουν τους Μηχανικούς από την επιλογή τους σαν μέσο αγκύρωσης ενισχυμένης δοκού.[9]

4. ΑΓΚΥΡΩΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ C-MAS

Η μέθοδος C-MAS δημιουργήθηκε από μια ερευνητική ομάδα και βασίζεται στην λογική και τις δυνατότητες της πλευρικής περίσφυξης της ενισχυμένης δοκού για την αποφυγή της αστοχίας σε διάτμηση. Σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε ενισχυμένες δοκούς για τη διερεύνηση της μεθόδου C-mas ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα (που ορίζουν και τη διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου στη πράξη): Αρχικά το κάτω μέρος της δοκού καθαρίζεται ώστε να επιτευχθεί καλύτερη πρόσφυση με τα σύνθετα υλικά. Ένα στρώμα εποξειδικής κόλλας απλώνεται στη κάτω επιφάνεια της δοκού, τοποθετείται μια στρώση FRP με την ισχυρή διεύθυνση παράλληλα στον άξονα της δοκού και τελικά η ταινία FRP αγκυρώνεται στα άκρα της με συνδετήρα μορφής U από γυαλί ή άνθρακα. Δυο αγκύρια από γυαλί εμποτισμένα με εποξειδική κόλλα εισέρχονται στις τρύπες του υλικού και αγκυρώνουν το U συνδετήρα. Τέλος, το αγκυρωμένο U καλύπτεται σε συγκεκριμένη επιφάνεια από ένα κομμάτι ύφασμα του ίδιου υλικού FRP για την καλύτερη επιθυμητή αγκύρωση. [12]

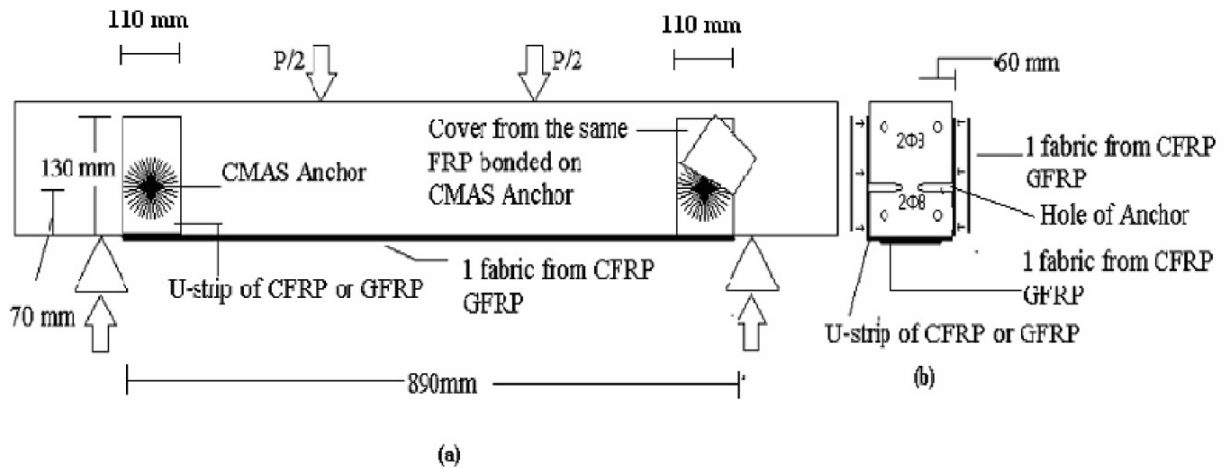
Επιλέχθηκαν αγκύρια από γυαλί, λόγω της ευέλικτης παραμόρφωσης τους, πλεονέκτημα απαραίτητο για την βέλτιστη συνεργασία με την δοκό. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται τα αγκύρια να συνοδεύουν την δοκό καθ' όλη την παραμόρφωση της εμποδίζοντας την αποκόλληση υλικού ανάμεσα στο FRP και το σκυρόδεμα με αποτέλεσμα την καθυστέρηση αστοχίας.

Οι δοκοί του πειράματος εξετάστηκαν υπό μονοτονική φόρτιση ασκώντας δύναμη κάμψης σε τέσσερα σημεία της δοκού. Όπως σε όλα τα σχετικά πειράματα, η ομάδα ελέγχου περιλαμβάνει δοκούς οι οποίες δεν ενισχύθηκαν με FRP υλικά σχεδιασμένες και διαστασιολογημένες για πρόβλεψη αστοχίας σε κάμψη. (BV1)[12]



Σχήμα 12: Λεπτομέρειες δοκού οπλισμένου σκυροδέματος χωρίς ενίσχυση [12]

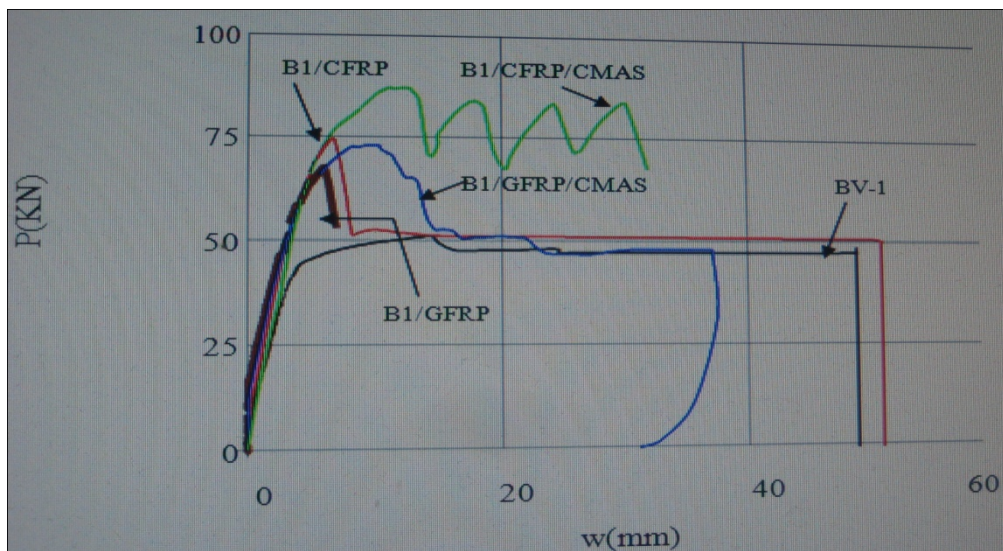
Σε μια δεύτερη ομάδα τοποθετήσαμε δοκούς που ενισχύθηκαν με GFRP και CFRP χωρίς αγκύρωση στο άκρο των ινών (B1/GFRP, B1/CFRP αντίστοιχα). Σε μια τελευταία ομάδα τοποθετήσαμε δοκούς που ενισχύθηκαν με GFRP ή CFRP με αγκύρωση στο άκρο των ινών (B1/GFRP/CMAS και B1/CFRP/CMAS αντίστοιχα).



Σχήμα 13: Λεπτομερείες μεθόδου συστήματος αγκύρωσης CMAS με FRP .(a) Ενισχυμένη δοκός (b) Τομή A-A. [12]

Οι δοκοί B1/GFRP και B1/CFRP υπό την επιβολή φορτίου, εμφάνισαν πυκνές ρωγμές κάμψης στο μέσο του ανοίγματος FRP. Αυξάνοντας το φορτίο, σημειώθηκαν διατμητικές ρωγμές, οι οποίες διαδόθηκαν κατά μήκος της δοκού και συγκεντρώθηκαν στα άκρα του FRP προκαλώντας αστοχία σε διάτμηση. Το φορτίο κατάρρευσης είναι 67,5 kN και 74.5 kN αντίστοιχα, με μέγιστες μετατοπίσεις 6 mm και 6.6 mm αντίστοιχα. Η αστοχία συνοδεύεται από την αποκόλληση του σκυροδέματος από τη δοκό. [12]

Οι δοκοί B1/GFRP/CMAS και B1/CFRP/CMAS υπό την επιβολή φορτίου, ανέπτυξαν μεγάλες μετατοπίσεις στο μέσο της δοκού. Με την αύξηση του φορτίου, οι ρωγμές διαδόθηκαν από την επιφάνεια προς το βάθος της εντατικής ζώνης της δοκού, επιτυγχάνοντας την ανάληψη μεγαλύτερων φορτίων λόγω της συνεργασίας χάλυβα – σκυροδέματος. Επιπροσθέτως, οι εκτεταμένες αυτές ρωγμές διαδόθηκαν προς την επιφάνεια επιρροής του U-συνδετήρα αποδεικνύοντας την αποδοτική συμβολή της μεθόδου αγκύρωσης CMAS στον τρόπο αστοχίας τέτοιων δοκών. Συμπερασματικά, η μέθοδος C-MAS επιτυγχάνει προοδευτική κατάρρευση των δοκών.



Σχήμα14 : Διάγραμμα φορτίου βύθισης για τις διάφορες πειραματικές δοκούς [12]

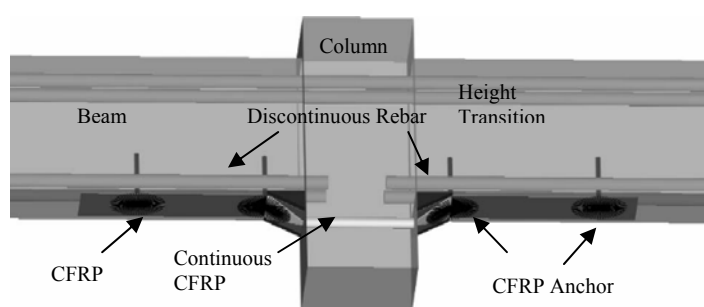
Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν βοήθησαν στην διατύπωση βασικών κανόνων για την εφαρμογή της μεθόδου CMAS στη πράξη. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται ως απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης το : $L_{max}=0.7[(E_F \cdot t_f)/f_{cm}]^{0.5}$ (mm) (10)

Μεγαλύτερο μήκος αγκύρωσης δεν αυξάνει την αποδοτικότητα της αγκύρωσης.

Πάχος κόλλας περίπου 2-3 mm, βάθος έμπτυξης περίπου 50-70mm με βέλτιστο τα 60mm και πάχος φύλλων FRP έως 1.3mm.

5.ΑΓΚΥΡΩΣΗ ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΟΠΟΥ Η ΔΟΚΟΣ ΣΥΝΑΝΤΑ ΤΟ ΥΠΟΣΤΗΛΩΜΑ

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν αναφορές στη χρήση ενίσχυσης με FRP στο άκρο δοκού στη περιοχή όπου συναντά το υποστυλώμα. Μάλιστα, αναφέρεται ότι η αγκύρωση με FRP έχει ως στόχο τη μεταφορά δυνάμεων από την δοκό προς την διαδοχική της δια μέσω υποστυλώματος όταν η ασυνέχεια του οπλισμού της δοκού δεν το επιτρέπει. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι ούτε η ενίσχυση αλλά ούτε η αγκύρωση της δοκού δεν πραγματοποιείται στη περιοχή του κόμβου όπου και τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης των φορέων εξελίσσονται διαφορετικά και ξεφεύγουν από τα όρια της συγκεκριμένης εργασίας.[11]



Σχήμα 15:Χρήση CFRP ως συνέχεια οπλισμού [11]

Σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν συγκρίθηκαν δυο τρόποι αγκύρωσης και η αποτελεσματικότητά τους. Οι τρόποι αγκύρωσης που εξετάστηκαν ήταν οι U-wrap και τα αγκύρια που θα αναλυθούν εκτενέστατα παρακάτω.

Σύμφωνα με εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν σε εργαστήρια, τοποθετείται FRP στο ύψος μεταφοράς δοκού-υποστυλώματος, του οποίου η αντοχή πρέπει να είναι μεγαλύτερη του σκυροδέματος. Ύστερα ταινία FRP εφαρμόζεται στο κάτω πέλμα της δοκού. Μια πρόσθετη

ταινία FRP τοποθετείται πλευρικά του υποστρώματος και στη ταινία FRP της δοκού . Η δοκός έχει σχεδιαστεί με προϋπάρχουσα ρωγμή στο μέσο της .[11]

Για να εκτιμήσουμε τη συνεισφορά κάθε μεθόδου αγκύρωσης που αναπτύσσεται σε αυτή τη παράγραφο θα χρησιμοποιήσουμε έναν δείκτη αποτελεσματικότητας e που δίνεται από τον ακόλουθο τύπο: $e=(V_{LS}/V_T)*(T_{max}/T_{cap})$ (11)

Όπου $T_{max}=PL/Ah$ = μέγιστη τάση στο FRP (12)

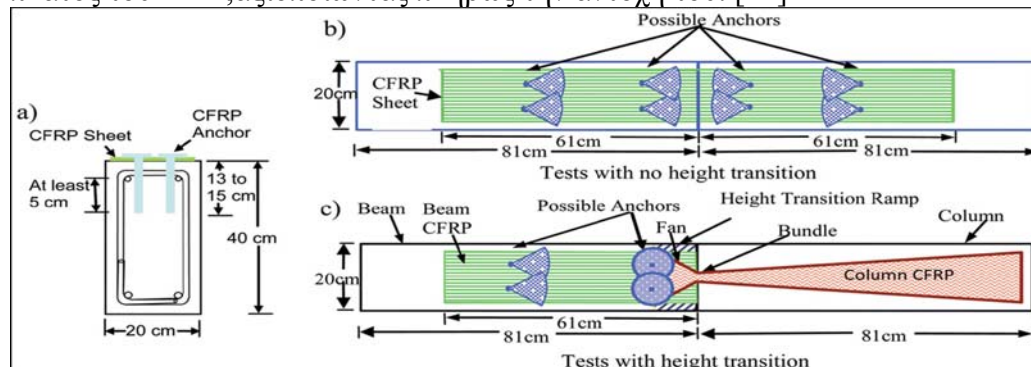
L =απόσταση μεταξύ των στηρίξεων

T_{cap} =εφελκυστική αντοχή του FRP στην αστοχία

V_{LS} =όγκος FRP (πάχος*πλάτος*μήκος)

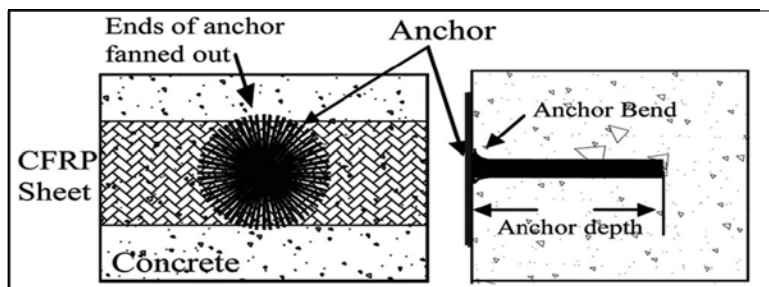
V_T =ολικός όγκος FRP (συμπεριλαμβάνονται όλα τα FRP και τα αγκύρια)

Η δοκός που ενισχύθηκε με 1 στρώση U-wrap σημείωσε τάση αστοχίας ίση με το 70% της τάσης αντοχής του FRP(διατμητική αστοχία του FRP) με δείκτη αποτελεσματικότητας $e=22\%$,ενώ η δοκός με διπλή στρώση U-wrap σημείωσε τάση αστοχίας 93% της τάσης αντοχής του FRP. Η αποτελεσματικότητα e μειώθηκε 6% εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας υλικού ακύρωσης. Οι δοκοί που αγκυρώθηκαν με τη δεύτερη υπό μελέτη μέθοδο έδειξαν ότι η αγκύρωση δοκού με 1 σειρά αγκυρίων διαμέτρου 1,6cm έδωσε τάση αστοχίας 67 % της τάσης αντοχής του FRP(το δοκίμιο κατέρρευσε λόγω αστοχίας στην αγκύρωση σε θέση όπου το αγκύριο καμώθηκε εξαιτίας του σκυροδέματος) και δείκτη αποτελεσματικότητας $e=38\%$, ενώ η αγκύρωση δοκού με 2 σειρές αγκυρίων διαμέτρου 1,3cm έδωσε τάση αστοχίας 79% της τάσης αντοχής του FRP(παρατηρήθηκε ότι τα αγκύρια δεν ήταν επαρκή για όλο το πλάτος του FRP, προκαλώντας μερική αστοχία και αποκόλληση).Η αγκύρωση δοκού με 3 σειρές αγκυρίων διαμέτρου 1,3cm , ανέπτυξε την ολική τάση αντοχής του FRP (100%) και έδωσε δείκτη αποτελεσματικότητας $e=58\%$. Η αστοχία εμφανίστηκε σε όλο το πλάτος του FRP ,αξιοποιώντας πλήρως την αντοχή του. [11]



Σχήμα 16: (α) Βάθος αγκύρωσης CFRP, (β) Εφαρμογή χωρίς ύψος μεταφοράς (c) Εφαρμογή με ύψος μεταφοράς [11]

Συμπερασματικά, στην αγκύρωση U-wrap αποδείχθηκε ότι η χρήση λιγότερου υλικού FRP στην αγκύρωση αυξάνει τον δείκτη αποτελεσματικότητας ,επιτυγχάνοντας παράλληλα ικανοποιητική αντοχή . Εκτιμώντας τα αποτελέσματα των αγκυρίων αποδεικνύεται ότι η αύξηση του αριθμού αγκυρών με παράλληλη μείωση της διαμέτρου κατορθώνει να αξιοποιήσει 100% την τάση αντοχής του FRP με τη μέγιστη αποτελεσματικότητα 57% . Αρά συνίσταται η χρήση 3 στρώσεων U-wrap.



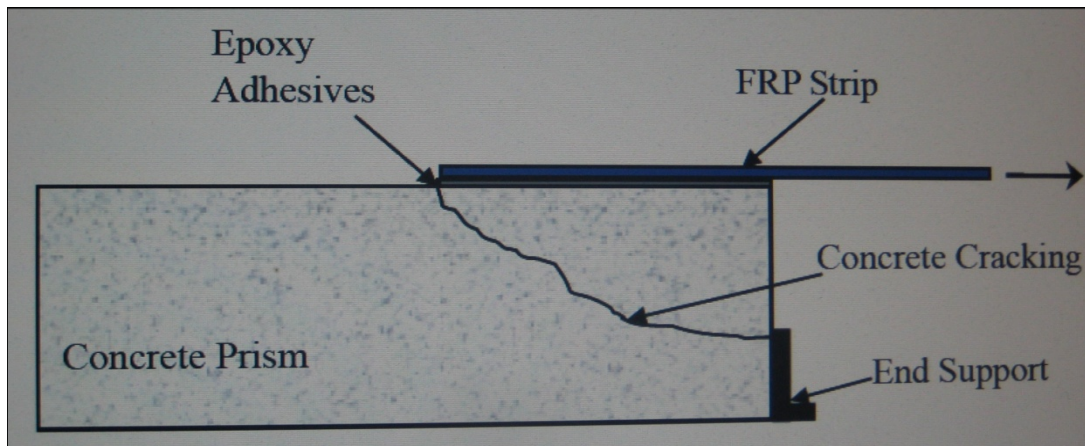
Σχήμα 17: Λεπτομέρεια αγκύρωσης [11]

Εισάγοντας αγκύρια μέσα στο σκυρόδεμα επιβεβαιώνεται ότι οι τάσεις θα μεταφερθούν στο σκυρόδεμα και στον περιβάλλοντα οπλισμό. Επίσης, η χρήση αγκυρίων αποκλείει την αστοχία λόγω αποκόλλησης της επικάλυψης σκυροδέματος. Σε πειραματικές μελέτες έχει παρατηρηθεί ότι τα αγκύρια ενδέχεται να χάσουν την μισή τους αντοχή λόγω της συγκέντρωσης τάσεων. Το φαινόμενο αυτό αποτρέπεται με την θεώρηση ότι το εμβαδόν των αγκυρίων είναι 2 φορές το εμβαδόν του σύνθετου υλικού CFRP που χρησιμοποιείται. Οι παράμετροι της κλίσης και του ύψους μεταφοράς δεν επηρεάζουν αισθητά την αντοχή των αγκυρωμένων FRP. [11]

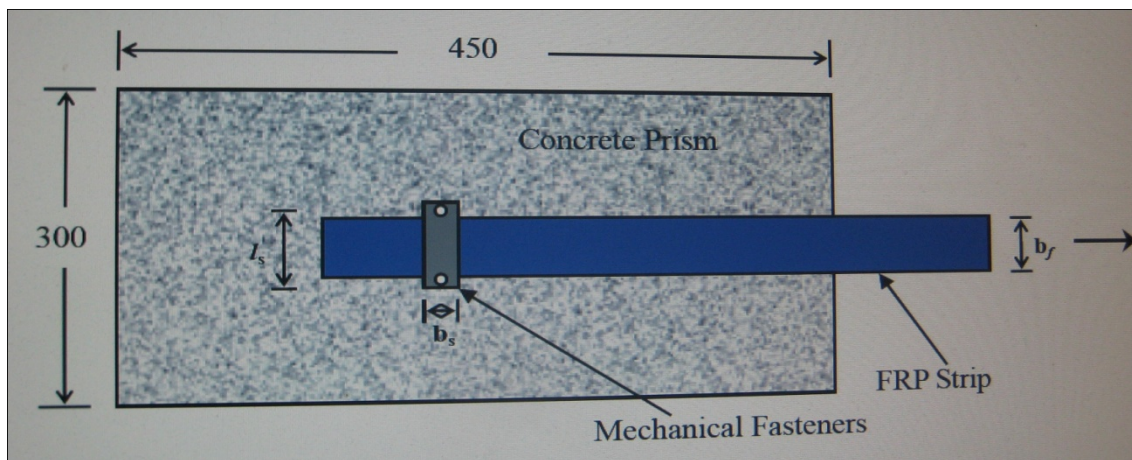
6. ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ

Η μέθοδος HB- FRP προτάθηκε και μελετήθηκε αποκλειστικά από μια ιαπωνική ομάδα επιστημόνων και έχει τις βάσεις της στη μέθοδο της μηχανικής αγκύρωσης ενώ εφαρμόζεται στο κάτω πέλαμα δοκών που ενισχύονται με FRP έναντι διάτμησης. Στην εφαρμογή της στη πράξη, η επιφάνεια FRP επικολλάται στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Αφού η εποξειδική κολλά αναπτύξει ικανοποιητική αντοχή, ένα ακόμα στρώμα ρητίνης απλώνεται στη επιφάνεια του FRP και ειδικά μηχανικά αγκύρια τοποθετούνται σε συγκεκριμένες αποστάσεις κατά μήκος του FRP. Η αποτελεσματική διεπιφάνεια FRP-σκυροδέματος συμμετέχει ενεργά στη μεταφορά τάσεων στα μελή του HB- FRP χάριν στη συνεισφορά των μηχανικών αγκυρίων. Σε πειραματικές διατάξεις που καταγράφηκαν, τα αγκύρια που χρησιμοποιήθηκαν, τοποθετήθηκαν κοντά στα ελεύθερα άκρα της πλάκας FRP, αφήνοντας μήκος του FRP χωρίς αγκύρωση. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η θραύση του σκυροδέματος που συνήθως εμφανίζεται στο φορτισμένο άκρο του ενισχυμένου κομματιού της δοκού. Για να επιτευχθεί σίγουρη αποκόλληση της πλάκας FRP από το σκυρόδεμα σαν τρόπος αστοχίας (και να αποφύγουμε τη καταστροφή του FRP) τα πειράματα της ομάδας που προαναφέραμε έγιναν σε δοκούς με πολλές στρώσεις ενίσχυσης (4 φύλλα FRP). Παράλληλα σε πολλές υπό μελέτη δοκούς τοποθετήθηκε μόνον ένα αγκύριο ώστε η εξέταση της απόκρισης σε διάτμηση να είναι πιο εκτενής. Το αγκύριο (fastener) τοποθετείται σε ισαπέχουσες αποστάσεις από την αρχή και το τέλος του κολλημένου μήκους FRP. (Σε 100 mm μήκους το αγκύριο τοποθετείται σε 50mm από την αρχή και το τέλος του μήκους).

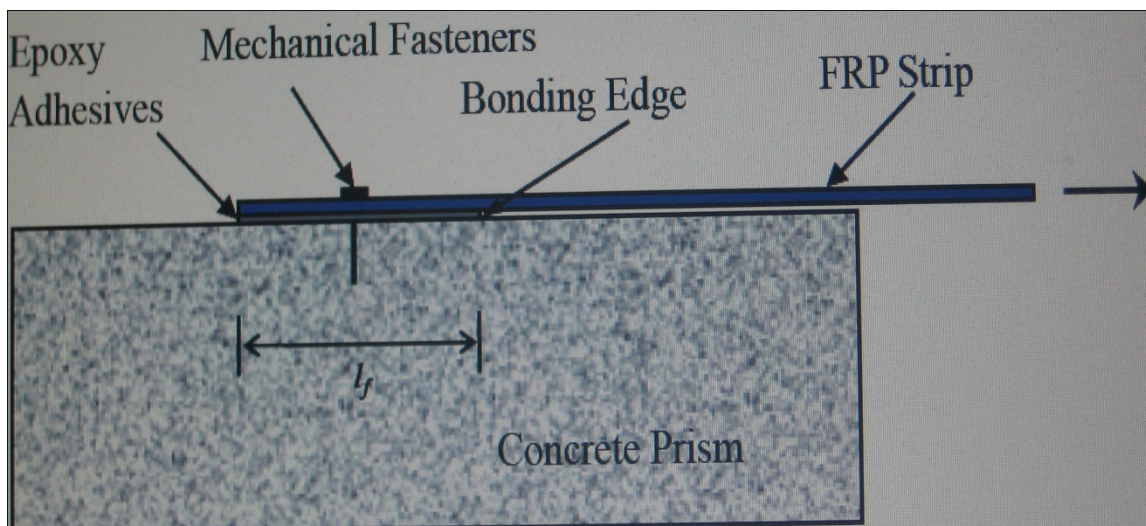
Οι ομάδες δοκών που χρησιμοποιήθηκαν διαφοροποιούνται σε πολλούς παράγοντες, έτσι ώστε να ελέγχει η απόκριση της αγκύρωσης σε κάθε ένα από αυτούς. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει δοκίμια στα όποια εξετάζεται η επίδραση του μήκους αγκύρωσης (l_f). Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει δοκίμια με διαφορετικό πλάτος αγκυρίου (b_f). Στην τρίτη ομάδα εξετάζεται η επιρροή της απόστασης ανάμεσα στα αγκύρια (l_s). Η τέταρτη ομάδα ελέγχει την συμπεριφορά των δοκιμίων σε διαφορετικό αριθμό. [13]



Σχήμα 18: Μορφή αστοχίας σκυροδέματος με HB- FRP [13]



Σχήμα 19 : Προοπτική κάτοψη τμήματος δοκού του υπό μελέτη πειράματος [13]



Σχήμα 20: Όψη τμήματος δοκού του πειράματος [13]

Ο πίνακας αποτελεσμάτων του πειράματος που ακολουθεί είναι κατατοπιστικότατος για την επίδραση καθενός από τους παραπάνω παράγοντες και η παρατήρηση του από τον αναγνώστη δίνει σημαντικές πληροφορίες για την αποδοτικότερη διάταξη της αγκύρωσης. [13]

Τάση σκυροδέματος 28d (MPa)	CFRP πάχος(mm)	CFRP:μήκος αγκύρωσης (mm)	Απόσταση αγκυρίων l_s (mm)	Αριθμός αγκυρίων	Φορτίο αστοχίας (kN)
68.9	50	100	60	1	40.8
44,4	50	200	60	1	44.1
42.8	50	100	80	1	42.3
43.1	90	100	100	1	59.3
45.4	50	200	60	2	63.2
48.6	50	300	60	1	56.7
48.9	50	300	60	2	69.9
50.2	50	300	60	3	80.2

Πίνακας 1 : Πειραματικά Αποτελέσματα

Συμπερασματικά, η αύξηση του πάχους του αγκυρίου επιφέρει σημαντική αύξηση του φορτίου αστοχίας, άρα και της αντοχής της ενίσχυσης όταν συνοδεύεται με μείωση του μήκους αγκύρωσης και αύξηση της απόστασης των αγκυρίων. Η αύξηση του μήκους αγκύρωσης επιτρέπεται αρκεί να συνοδεύεται με παράλληλη αύξηση των αριθμών των αγκυρίων. [13]

Τέλος, για την ανάλυση του μηχανισμού των υβριδικών συστημάτων η ίδια ιαπωνική ομάδα προτείνει τύπους με τους οποίους υπολογίζεται η τάση αντίστασης, η εφελκυστική δύναμη που ασκείται στο FRP και η μεταξύ τους συσχέτιση όπως φαίνεται παρακάτω:

Υπολογισμός τάσης αντίστασης σε ένα κομμάτι δοκού μήκους dx ($i-1^{\text{η}}$ αρχική της διατομή, i η τελική της διατομή) που πήραμε ενδεικτικά για μελέτη:

$$\Delta F_i = F_i - F_{i-1} = (\varepsilon_{f,i} - \varepsilon_{f,i-1}) * t_f * b_f * E_f \quad (13)$$

Η εφελκυστική δύναμη που ασκείται στο FRP ισορροπείται από την δύναμη αντίστασης του FRP. Συνεπώς, $\Delta F_i = \tau_{\alpha,i} * b_f * \Delta l_{f,i}$ (14)

Η μέση τιμή της τάσης αντίστασης είναι :

$$\tau_{\alpha,i} = (\varepsilon_{f,i} - \varepsilon_{f,i-1}) * t_f * b_f * E_f / \Delta l_{f,i} \quad (15)$$

Όπου t_f :πάχος FRP πλάκας

b_f :πλάτος FRP πλάκας

$\Delta l_{f,i}$:απόσταση των μηκυνσιομέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα

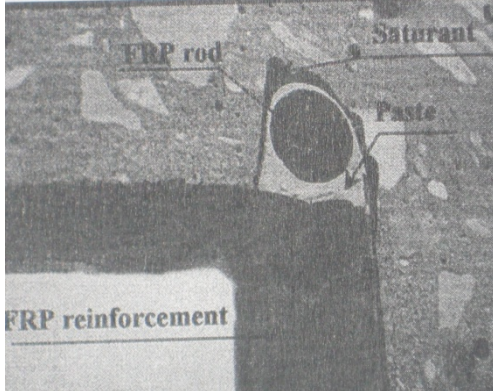
7.NSM (Near Surface Mounted anchorage)

Ίσως η πιο διαδεδομένη τεχνική αγκύρωσης της ενίσχυσης με FRP σε διάτμηση είναι η λεγόμενη U-anchor, γνωστή και ως Near Surface Mounted anchorage (NSM) το όνομα της οποίας δεν αποδίδεται εύστοχα στα Ελληνικά. [4],[5]

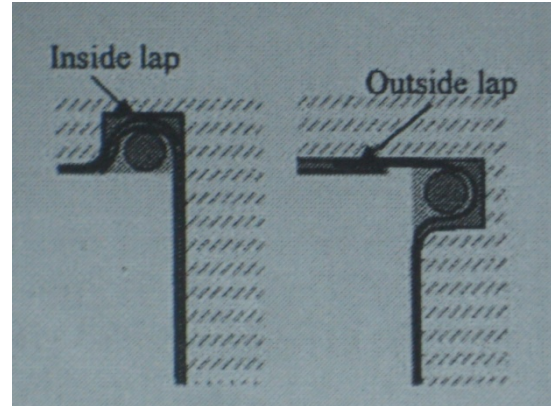
Υπάρχουν δύο τύποι αγκύρωσης με NSM, ο πρώτος με χρήση ράβδων FRP και ο δεύτερος με χρήση λωρίδων FRP μεγάλου μήκους, μικρού πάχους (strips). Η βασική ιδέα της πρώτης μεθόδου είναι η επέκταση του FRP μέσα σε μια “σκαμμένη” περιοχή του σκυροδέματος της δοκού κοντά ή στο τέλος της περιοχής ενίσχυσης. Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιήθηκαν φύλλα FRP η προέκταση αυτή για την αγκύρωση πραγματοποιείται στη φάση της τοποθέτησης του FRP στη δοκό, ενώ στη περίπτωση της χρήσης ελασμάτων FRP (σπάνια

εφαρμόζεται στη πράξη και γι αυτό δεν θα γίνει περαιτέρω αναφορά της μεθόδου) η αγκύρωση έχει ήδη διαμορφωθεί πριν την τοποθέτηση της ενίσχυσης στη δοκό.

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται οι πιθανοί σχηματισμοί που προκύπτουν. Όπως παρατηρείται τα συστήματα αγκύρωσης διαφέρουν στο σημείο τοποθέτησης στη δοκό: πριν η μετά τη γωνία στην οποία καταλήγει το ύφασμα ενίσχυσης [4],[5],[6],[7].



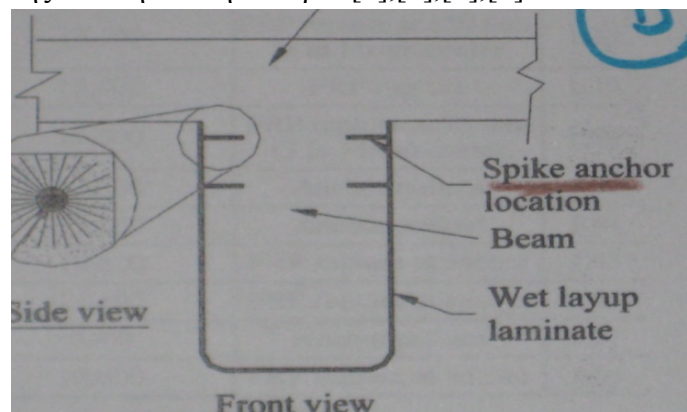
Σχήμα 21 : Τομή δοκού, λεπτομερής απεικόνιση αγκύρωσης [5]



Σχήμα 22 : Πιθανές θέσεις αγκύρωσης [5]

Το “αυλάκι”(σκαμμένη περιοχή) δημιουργείται με απομάκρυνση σκυροδέματος κοντά στο άκρο του φύλλου FRP κάθετα στη διεύθυνση των ινών του υφάσματος με εξειδικευμένα μηχανήματα και τεχνικές. Το FRP επικολλάται στα τοιχώματα της διαρρηγμένης περιοχής και στη συνέχεια το μεγαλύτερο τμήμα του κενού καλύπτεται από μια παχύρρευστη ουσία που συνήθως είναι κάποιο είδος εποξειδικής ρητίνης. Ακολουθώντας, τοποθετείται, σχεδόν βυθίζεται και η ράβδος FRP με την οποία γεμίζει το κενό που είχε σχηματιστεί. Η παραπάνω τεχνική έχει εφαρμοστεί και χωρίς την ύπαρξη ράβδου. Οι διαστάσεις που προτείνονται από τη βιβλιογραφία μιλούν για 10mm διάμετρο ράβδου και 1,5 φορά μεγαλύτερη (από της ράβδου) διάμετρο αυλακίου τοποθέτησης.

Στην περίπτωση της δεύτερης μεθόδου αγκύρωσης NSM τοποθετούμε λωρίδες-spike anchors, αγκύρια δηλαδή με ελεύθερες ίνες από FRP στην μια πλευρά και ίνες περιτυλιγμένες με ύφασμα FRP επίσης από την άλλη πλευρά. [4],[5],[6],[7]



Σχήμα 23 : Spike anchors με λεπτομέρεια [6]

Η τοποθέτηση της αγκύρωσης γίνεται παράλληλα με την ενίσχυση με FRP της δοκού. Αφού καθαριστεί η επιφάνεια του σκυροδέματος, ανοίγονται τρύπες σε αυτό κατάλληλης διαμέτρου και βάθους, απλώνεται η πρώτη στρώση FRP και αφού επικαλυφθεί με ρητίνη και ανοιχτούν και σε αυτή οι κατάλληλες οπές, οι spike anchors διαπερνούν το FRP και

τοποθετούνται στις ειδικά διαμορφωμένες τρύπες του σκυροδέματος. Μετά την εναπόθεση των αγκυρώσεων, οι ίνες που προεξέχουν πάνω από τη στρώση της ενίσχυσης, επικολλούνται με ρητίνη στην επιφάνεια του πρώτου φύλλου FRP και τελικά προστίθενται και οι υπόλοιπες στρώσεις FRP δημιουργώντας ένα εσωτερικά στη δοκό ‘‘εγκλωβισμένο’’ σύστημα. Οι διαστάσεις που προτείνονται από τη βιβλιογραφία κυμαίνονται και εδώ σε ίδια επίπεδα όπως στη προηγούμενη μέθοδο (δηλαδή προτεινόμενη διάμετρος 10mm) χωρίς καμία πιο συγκεκριμένη αναφορά στις υπόλοιπες διαστάσεις του αγκυρίου.



Σχήμα 24 : Spike anchors [6]

Οι πειραματικές εργασίες που συγκεντρώσαμε στη βιβλιογραφία, έχουν πάντα σαν παραμέτρους μελέτης και των δύο μεθόδων τη θέση της αγκύρωσης στη δοκό και το πάχος και μήκος του αυλακιού.[4],[5],[6],[7]

Ο ACI για τη μέτρηση της διατμητικής αντοχής δοκού ενισχυμένης με ράβδους NSM προτείνει τον μειωτικό συντελεστή K_v της μέγιστης παραμόρφωσης ϵ_{fe} , ο οποίος και εφαρμόζεται στη σχέση:

$$\epsilon_{fe} = K_v \cdot \epsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (16)$$

Ο συντελεστής K_v μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$K_v = (k_1 \cdot k_2 \cdot L_e) / (11.900 \cdot \epsilon_{fu}) \quad \text{με } K_v \leq 0.75 \quad (17)$$

Όπου $L_e = 2.300 / (n \cdot t_f \cdot E_f)^{0.58}$ = ενεργό μήκος συνάφειας σε mm, t_f = πάχος ενίσχυσης FRP (18)

$$k_1 = (f_c / 27)^{0.667} \quad \text{με } f_c = \text{αντοχή σκυροδέματος σε MPa} \quad (19)$$

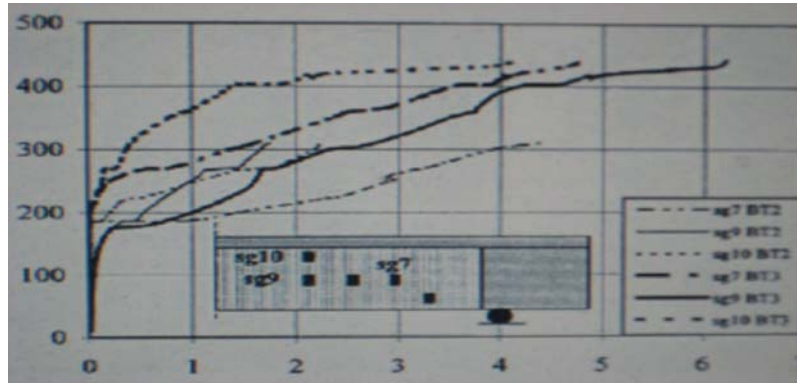
$$k_2 = (d_f - 2 \cdot L_e) / d_f \quad \text{με } d_f = \text{πάχος FRP} \quad (20)$$

Σε πειράματα δοκών σχήματος T πραγματικών διαστάσεων σε κάμψη τεσσάρων σημείων χρησιμοποιήθηκε ενίσχυση με φύλλα FRP που κάλυψαν εξωτερικά τη δοκό σχηματίζοντας μια χαρακτηριστική μορφολογία U (με διεύθυνση ινών κάθετα στον κύριο άξονα της δοκού). Στο άκρο αυτής της U-wrap ενίσχυσης τοποθετήθηκαν οι ράβδοι NSM με τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω.

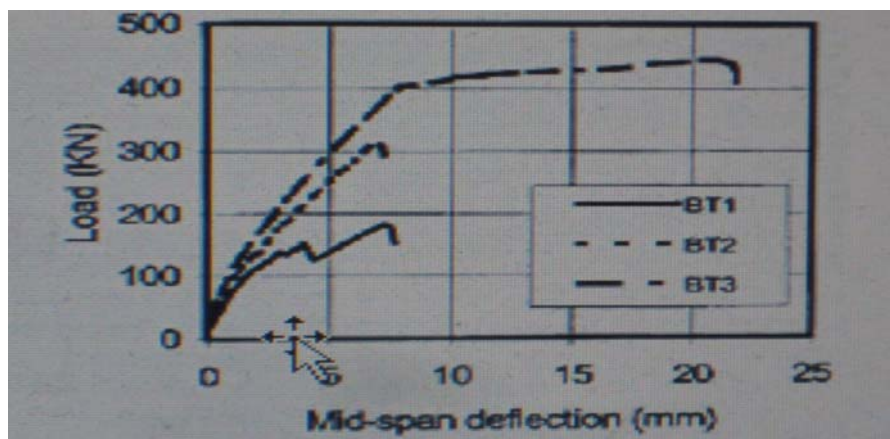
Η αντοχής σε διάτμηση της δοκού αυξήθηκε κατά 72% με την ενίσχυση των FRP χωρίς αγκύρωση. Ακόμη, η μέγιστη παραμόρφωση που παρατηρήθηκε στο FRP έφτασε τα 0,0045 mm/mm, που αντιστοιχεί στο 28% της ικανότητας του FRP σε παραμόρφωση. Με άλλα λόγια η απλή ενίσχυση της δοκού χωρίς αγκύρωση οδήγησε σε πρόωρη αστοχία, ενώ τα FRP δεν κατάφεραν να βελτιώσουν την διατμητική αντοχή του δομικού μέλους σε επίπεδα για τα οποία έχουν σχεδιαστεί. [4],[5],[6],[7]

Οι δοκοί που αγκυρώθηκαν στα πλαίσια του ίδιου πειράματος στόχευαν στην αποφυγή αυτής της πρόωρης αποκόλλησης. Πράγματι, σημειώθηκε σημαντική αύξηση της αντοχής σε

διάτμηση της δοκού ενώ παράλληλα η μορφή αστοχίας άλλαξε από αποκόλληση σε καμπτική αστοχία. Η μέγιστη παραμόρφωση που παρατηρήθηκε στο FRP αυτή τη φορά έφτασε στα 0,0063mm/mm ή αλλιώς 40% της ικανότητας σε παραμόρφωση του υλικού.



Σχήμα 25: Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης FRP για αγκυρωμένη(τρεις καμπύλες προς τα πάνω) και μη δοκό(τρεις υπόλοιπες καμπύλες προς τα κάτω) [5]



Σχήμα 26 :Πειραματικά αποτελέσματα για τη βύθιση στο μέσο άνοιγμα με BT1=μη ενισχυμένη δοκός, BT2=ενισχυμένη με FRP δοκός,BT3=αγκυρωμένη,ενισχυμένη δοκός [5]

Το μέγιστο φορτίο στην περίπτωση της αγκυρωμένης-ενισχυμένης δοκού αυξάνεται κατά 145% σε σχέση με τη μη ενισχυμένη δοκό, και κατά 42% σε σχέση με την ενισχυμένη δοκό χωρίς αγκύρωση. Παράλληλα όπως μπορεί να διακρίνει κανείς και στα παραπάνω σχήματα η αντοχή και η ολκιμότητα βελτιώθηκαν στην περίπτωση της αγκυρωμένης δοκού. Αυτή η αύξηση της ολκιμότητας πιθανότατα οφείλεται στην αλλαγή του τρόπου αστοχίας της ενισχυμένης δοκού (από αποκόλληση του CFRP σε καμπτική αστοχία). Μην ξεχνάμε πάντα ότι η εκτροπή στο άνοιγμα ήταν 3 φορές μεγαλύτερη στην αγκυρωμένη με NSM δοκό.

Σε μια άλλη σειρά πειραμάτων, οι ράβδοι NSM τοποθετήθηκαν πριν και μετά τη γωνία στην κορυφή της δοκού όπως φαίνεται και στο σχήμα 19. Παρατηρήθηκε, από τα πειραματικά αποτελέσματα ότι όταν η αγκύρωση γίνεται μετά την κρίσιμη γωνία η παραμόρφωση της δοκού αυξάνεται κατά 40% σε σχέση με την παραμόρφωση της δοκού όπου η αγκύρωση πραγματοποιείται πριν την γωνία. Από τη συγκέντρωση τάσεων που σημειώνεται ίσως προκύπτει αυτή την πειραματική διαπίστωση.

Σε άλλη πειραματική διάταξη, δοκοί ενισχύθηκαν όπως συνήθως και στη συνέχεια αγκυρώθηκαν με ράβδους διαφόρων διαμέτρων κάθε φορά. Προέκυψε μείωση συγκέντρωσης τάσεων που οδηγεί σε αύξηση της ικανότητας αγκύρωσης. όσο η διάμετρος

του αυλακίου αυξήθηκε από 15 έως 24 mm. Μια ακόμα ενδιαφέρουσα αν και αμφιλεγόμενη διαπίστωση από το ίδιο πείραμα προκύπτει αν στο αυλάκι δεν τοποθετηθεί ράβδος NSM, και το κενό καλυφθεί με εποξειδική ρητίνη. Οπότε έχουμε 24,2% αύξηση αντοχής σε σχέση με τη δοκό όπου τοποθετήθηκε ράβδος στο αυλάκι.[4],[5],[6],[7]

Ακόμη από το πείραμα μας προέκυψε $K_v=0,75$ και $K_m=1,25$ έως 2,50 ο μειωτικός συντελεστής έναντι κάμψης και διάτμησης αντίστοιχα που προτάθηκε από τον Αμερικανικό Κανονισμό Σκυροδέματος, τιμές που θεωρούνται επιτρεπτές και αναμενόμενες.

Από την διεθνή βιβλιογραφία μελετήσαμε την εργασία μιας επιστημονικής ομάδας που πραγματοποίησε πειράματα φόρτισης δοκών ενισχυμένων με FRP και αγκυρωμένων με spike anchors διαμέτρου 10 mm ώστε να εκτιμηθεί η διατμητική αντοχή και το κατά πόσο η αγκύρωση μπορεί να καθυστερήσει την αστοχία του δομικού στοιχείου.

Τοποθετήθηκαν αγκύρια σε μία ή δύο σειρές σε κάθε πλευρά της δοκού. Σε κάποιες από τις δοκούς τοποθετήθηκε και μια ειδική ταινία στην εξωτερική επιφάνεια της αγκύρωσης που θεωρητικά θα βελτιώνει την αντοχή της δοκού. Παράλληλα, το βάθος της αγκύρωσης κυμάνθηκε στα διάφορα πειράματα από 50-75 mm για να εκτιμηθεί το βέλτιστο βάθος έμπηξης. Η φόρτιση των δοκιμών έδειξε ότι οι δοκοί που αγκυρώθηκαν με spike anchors οδηγήθηκαν σε ψαθυρή αστοχία με αποκόλληση του FRP από την επιφάνεια του σκυροδέματος, ενώ οι δοκοί που όχι μόνον αγκυρώθηκαν αλλά προστάτευαν τα spike anchors με την προαναφερθείσα ειδική ταινία οδηγήθηκαν σε μη ψαθυρή αστοχία(σταδιακή) με μη αποκόλληση του CFRP από το σκυρόδεμα. Η παραμόρφωση που προέκυψε μετά την αγκύρωση της δοκού έφτασε στο 25% της μέγιστης παραμόρφωσης του FRP. Καμία αλλαγή στην παραμόρφωση των δοκών δεν προέκυψε από τα δοκίμια με τα διαφορετικά βάθη έμπηξης της αγκύρωσης.

Μόνο στην περίπτωση της επικάλυψης εξωτερικά με την ειδική ταινία ,το μεγαλύτερο βάθος αγκύρωσης οδήγησε σε 10% αύξηση της αντοχής σε σχέση με το μικρότερο βάθος των 50mm.

Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιήθηκαν δύο σειρές αγκυρώσεων η μέγιστη παραμόρφωση έφτασε σε διπλάσιες τιμές σε σχέση με τις δοκούς μονής σειράς αγκύρωσης (200% αύξηση διατμητικής αντοχής).

Συμπερασματικά, ο μειωτικός συντελεστής που προτείνει η ACI γι' αυτό το είδος της αγκύρωσης παίρνει τιμές K_v από 0,23 έως 0,50 διακύμανση που εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό των αγκυρίων, ενώ τα πειράματα που αναφέρθηκαν εκτίμησαν τον μειωτικό συντελεστή K_m ίσο με 1,20, τιμή που θεωρείται επιτρεπτή.

Για εφαρμογή της μεθόδου στη πράξη προτείνεται ελάχιστη διάμετρος αγκυρίων ίση με 10mm,ελάχιστο βάθος έμπηξης ίσο με 50mm ενώ θα πρέπει τουλάχιστον 1 και το πολύ δύο αγκύρια να τοποθετούνται σε κάθε 225cm^2 της ενισχυμένης περιοχής.

Συμπερασματικά, συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους NSM καταλήγουμε στο ότι η πρώτη μέθοδος είναι αποτελεσματικότερη όταν η ράβδος NSM τοποθετείται μετά τη γωνία και η διάμετρος της κυμαίνεται από 15 έως 24mm και υπερέρχει έναντι της δεύτερης μεθόδου αγκύρωσης. Μάλιστα, η ενίσχυση με spike anchors κατά τη γνώμη μας βελτιώνει την αντοχή της ενίσχυσης μόνον όταν συνδυάζεται με την προσθήκη εξωτερικής ειδικής ταινίας ενώ παράλληλα τα αγκύρια διατάσσονται σε δυο σειρές.[4],[5],[6],[7]

8.Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΓΚΥΡΩΣΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΔΟΚΩΝ

Ο Κανονισμός Επεμβάσεων αναφέρεται στις ενότητες §8.2.1.3 και 8.2.2.2 στις επεμβάσεις στην εφελκυστική ζώνη έναντι ορθής τάσης και στις επεμβάσεις με στόχο την αύξηση της φέρουσας ικανότητας έναντι τέμνουσας αντίστοιχα. Και στα δυο προαναφερθέντα χωρία γίνεται λόγος ακροθιγώς για την αγκύρωση της ενισχυμένης δοκού.

Στην πρώτη ενότητα, αφού δίνεται αναλυτικότερα η σχέση για την απαιτούμενη διατομή οπλισμού ενίσχυσης δοκού, η τιμή σχεδιασμού της ενεργούς τάσεως(κατά το φαινόμενο της αστοχίας του υλικού ενίσχυσης και κατά την πρόωρη αποκόλληση του FRP) αναφέρει απλά στο εδάφιο §8.2.1.3(α.vi) ότι απαιτείται ειδικός έλεγχος για την περίπτωση διατμητικής αστοχίας στην περίπτωση απόληξης του υφάσματος ενίσχυσης .Η διαδικασία ελέγχου τεκμηριώνεται με χρήση αξιόπιστων τιμών της βιβλιογραφίας ή με ένα κριτήριο που δίνεται για μια προσεγγιστική εφαρμογή. Τελικά, αφού δίνεται και ο τύπος της τέμνουσας που καλείται να παραλάβει ο εξωτερικός οπλισμός διάτμησης αλλά και οι κατασκευαστικές του διατάξεις γίνεται επιστητό ότι η αγκύρωση του FRP πρέπει να γίνεται πέραν του σημείου μηδενισμού των ροπών(στην περιοχή υπό θλίψη).Γι' αυτό στην περίπτωση ενίσχυσης στην περιοχή ανοίγματος το FRP επεκτείνεται και αγκυρώνεται κοντά στις στηρίξεις, ενώ στην περίπτωση ενίσχυσης στις στηρίξεις ,το FRP επεκτείνεται και αγκυρώνεται στις θλιβόμενες περιοχές σε μήκος 1m εντός αυτών.[15]

Στην δεύτερη ενότητα, ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. προτείνει τη χρήση κλειστών ενισχύσεων ώστε να αυξηθεί η φέρουσα ικανότητα έναντι διάτμησης. Στις δοκούς όπου κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό, απαιτείται η πλήρης αγκύρωση του διατμητικού οπλισμού με πρόσθετα στοιχεία σύνδεσης, με επαρκή ικανότητα για τη μεταφορά των δυνάμεων στο αρχικό στοιχείο. Μάλιστα, αναφέρεται ρητά ότι δεν επιτρέπονται ανοικτές ενισχύσεις με ανεξάρτητα ελάσματα ή FRP επικολλημένα στις παρειές του στοιχείου, παρά μόνον υπό μορφή U. Κατά παρέκκλιση, επιτρέπεται η εφαρμογή ανοικτών ενισχύσεων με αγκύρωση χωρίς πρόσθετα ακραία στοιχεία σύνδεσης, αλλά μόνο μέσω εποξειδικής κόλλας υπό προϋποθέσεις. Η ενότητα αυτή ολοκληρώνεται με τη παράθεση της σχέσης της τέμνουσας αντοχής σχεδιασμού λόγω οπλισμού διάτμησης στη σελ 8_26.

Καταλήγοντας, ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. δίνει αναλυτικά τις σχέσεις για τον υπολογισμό της συνεισφοράς της ενίσχυσης με FRP ενώ παράλληλα τονίζει την αναγκαιότητα της αγκύρωσης στη δοκό. Όμως, δε δίνονται ούτε περιγράφονται σε κανένα σημείο οι πιθανοί τρόποι αγκύρωσης του FRP στη προυπάρχουσα δοκό. Αντιθέτως, όπως διατυπώθηκε και παραπάνω η μελέτη αξιόπιστων πηγών της βιβλιογραφίας είναι ο μόνος μέσος για την εύρεση του κατάλληλου τρόπου αγκύρωσης της ενισχυμένης δοκού που μας ενδιαφέρει σε κάθε περίπτωση.[15]

9.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας μελετήθηκαν πολλοί τρόποι αγκύρωσης σε κάμψη και σε διάτμηση. Τα περισσότερα πειράματα που λήφθηκαν υπόψη για τη παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν βάσει του Αμερικανικού Κανονισμού. Συγκρίνοντας τα χαρακτηριστικά της καθεμίας παρατηρούμε ότι υπάρχει μεγάλος αριθμός παραγόντων που συντελούν στην επιλογή της κατάλληλης μεθόδου αγκύρωσης έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή ενίσχυση.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Σ.Η. Δρίτσος, “Ενισχύσεις / Επισκευές Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα”, Πάτρα 2007
- [2] Α.Χ.Τριανταφύλλου, “Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας Με Σύνθετα Υλικά”, Πάτρα 2006
- [3] M.J. Chajes, W.W. Finch, Jr., and H.W. Shenton, “Enhanced End Anchorage of Bonded FRP Repairs”, ACI Structural Journal, SP-230-25, July-August 1991, page 427-440, <http://www.quakewrap.com/frp%20papers/EnhancedEndAnchorageofBondedFRPRepairs.pdf>
- [4] A.Bruckner, R.Ortlepp, M.Curbach, “Anchoring of TRC Shear Strengthening For T-Beams”, FRPRCS-8, University of Patras, 2007, page 1-10, http://www.smie.org.mx/Draft_Program_FRPRCS8.pdf
- [5] A.Khalifa, T.Alkhrdaji, A.Nanni, S.Lansburg, “Anchorage of Surface Mounted FRP Reinforcement”, ACI Structural Journal, October 1999, page 49-54, www.concrete.org
- [6] N.Eshwar, A.Nanni, T.J.Ibell, “Performance of two Anchor Systems of Externally Bonded FRP Laminates” ACI Materials Journal January-February 2008, Title no.105-M09, page 72-80, <http://opus.bath.ac.uk/12996/>
- [7] A.Rizzo, L.de Lorenzis, “Behaviour and capacity of RC Beams Strengthened in shear with NSM FRP Reinforcement, Construction and Building Materials 23, 2009, page 1555-1567, www.sciencedirect.com
- [8] A.Prota, K.Yong tan, A.Nanni, M.Pecce, G.Manfredi, “Performance of Shallow RC Beams with Externally Bonded Steel-Reinforced Polymer”, ACI Structural Journal, title no.103-S17, March -April 2006, page 163-170, <http://wpage.unina.it/gamanfre/paper/Performance%20of%20RC%20shallow%20beams%20externally%20bonded%20with%20steel%20reinforced%20polymers.%20ACI%20Structural%20Journal.pdf>
- [9] S.Unjo, H.Okamoto, D.Kato, T.Shimomura, “Seismic Rehabilitation of Concrete Structures”, ACI Bookstore, 2007, <http://www.concrete.org/bookstorenet/ProductDetail.aspx?ItemID=IPS2>
- [10] Carlo Pellegrino, Claudio Modena, “Flexural Strengthening of real-scale RC and PRC Beams with end-anchored pretensioned FRP Laminates”, ACI Structural Journal/May-June 2009, Title no.106-S31, page 319-328
- [11] Sarah L. Orton, James O. Jirsa, P.E. Oguzhan Bayrak, “Design Considerations of Carbon Fiber Anchors”, Journal of Composites for Construction, ASCE, Volume 12, Issue 6, pp. 608-616, November/December 2008, <http://scitation.aip.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=JCCOF2000012000006000608000001&idtype=cvips&gifs=yes&ref=n>
- [12] C. B. Demakos, “Investigating the Influence of FRP Sheet Anchorage to Structural Response of Reinforced Concrete Beams”, Συνέδριο : 30/05/2008 in Athens, Τόμος IV. Sustainable Development Session, Friday, 30/05/2008 http://synenergy.teipir.gr/papers/IV_5.pdf
- [13] Huang Yue, Experimental and Finite Element Study of Hybrid Bonding of FRP to Structures, Department of Building and Construction in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Philosophy, Chapter 5, page 71-107, December 2007, <http://lbms03.cityu.edu.hk/theses/abt/mphil-bc-b22687415a.pdf>
- [14] Lawrence C. Bank, “Composites for Construction, Structural Design with FRP Materials, Chapter 11, page 316-358, 2006, Publishers : **JOHN WILEY & SONS, INC.**

and Hoboken, New Jersey.,

http://www.google.com/books?hl=el&lr=&id=1B2mTpDtUoAC&oi=fnd&pg=PA1&dq=COMPOSITES+FOR+CONSTRUCTION:Structural+Design+with+FRP+Materials&ots=7iLAuKcFE&sig=1NoGsl_3v-MYi5jmtPSctNs57qM#v=onepage&q=&f=false

[15]Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.), Τελικό Σχέδιο Κειμενου-3, Ο.Α.Σ.Π., Φεβρουάριος 2009