

ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΕΛΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ FRP ΚΑΤΑ ΚΑΝ.ΕΠΕ.

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΤΟΥ ΕΛΠΙΔΑ
ΚΩΤΣΟΒΙΝΟΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ**

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο να εξετάσει τις παραμέτρους που συνδέονται με τη διαδικασία της καμπτικής ενίσχυσης δοκών (με μεταλλικά ελάσματα ή σύνθετα υλικά) και να παρουσιάσει το βαθμό επιρροής τους στη διαστασιολόγηση της ενίσχυσης. Ο στόχος αυτός θα επιτευχθεί, χρησιμοποιώντας ως σημείο αναφοράς, τον νέο Κανονισμό Επεμβάσεων 2012 (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) και τις παραγράφους που σχετίζονται με το θέμα αυτό. Η διερεύνηση αυτή είναι αναγκαία λόγω της πολύ πρόσφατης καθιέρωσης του κανονισμού, κάτι που συνεπάγεται την εύλογη δυσπιστία των μηχανικών της αγοράς αλλά κ το φόβο τους για την εφαρμογή των ενισχύσεων, λόγω της ελλιπής εμπειρίας στο αντικείμενο.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επισκευή – ενίσχυση των κτηρίων κέντριζε ανέκαθεν το ενδιαφέρον των μηχανικών αλλά η ελλείψεις γνώση του παρελθόντος, οδηγούσε στην «εύκολη λύση» της ανακατασκευής αν αυτή ήταν δυνατή (κυρίως για συνήθη κτήρια κατοικίας). Όμως με το πέρασμα των ετών, η ακαδημαϊκή κοινότητα μαζί με εταιρίες μπόρεσαν με συνεργασία θεωρίας κ πειραμάτων, να εφεύρουν πρακτικές κ οικονομικές (σχετικά) λύσεις, με ικανοποιητική γενικά αξιοπιστία αποτελεσμάτων. Το παραπάνω κ σε συνδυασμό με την οικονομική κ περιβαλλοντική κρίση των τελευταίων ετών, η οποία ασκεί πίεση για την διατήρηση των κατασκευών (αν αυτή είναι δυνατή), είχε ως αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της εφαρμογής των μεθόδων αποκατάστασης κ ενίσχυσης από τους μηχανικούς της αγοράς. Αυτό οδήγησε κ στην ανάγκη να παραχθεί ένας οδηγός – κανονισμός όπου θα επιβάλει κανόνες αλλά κ θα βοηθάει τους μηχανικούς, στην εφαρμογή της ενίσχυσης. Έτσι πρόσφατα παράχθηκε ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2012.

Για την ενημέρωση λοιπόν των μηχανικών, αλλά και την ενθάρρυνση της εμπιστοσύνης τους στον κανονισμό, η εργασία αυτή θα προσπαθήσει να απαντήσει σε εύλογα ερωτήματα που δημιουργούνται κατά την εφαρμογή των κανονισμών. Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στην εξωτερική ενίσχυση δοκών κ πιο συγκεκριμένα σε καμπτική ενίσχυση με χρήση ελασμάτων χάλυβα ή FRP. Έτσι λοιπόν τα ερωτήματα που θα επιχειρηθεί να απαντηθούν είναι τα παρακάτω:

Α) Ποιες παράμετροι των δομικών στοιχείων επηρεάζουν την διαστασιολόγηση της ενίσχυσης (δηλαδή το απαιτούμενο εμβαδόν = πάχος × πλάτος ελάσματος);

Β) Μπορεί να εκτιμηθεί σε τι κλίμακα επηρεάζει η κάθε μία;

Γ) Υπάρχουν κάποια μέγιστα στη διαστασιολόγηση; Και αν ναι, ποια είναι αυτά κ από πού πηγάζουν;

Δ) Υπάρχουν διαφορές μεταξύ σύνθετων κ μεταλλικών ελασμάτων και ποιες είναι αυτές; (Θα δοθεί έμφαση στις παραμέτρους διαστασιολόγησης αυτών κ όχι τόσο στη σύγκριση τους ως προς τον οικονομικό τομέα ή τον τομέα της ευκολίας στην εφαρμογή.)

ΣΤΟΧΟΣ: Τα παραπάνω συμπεράσματα αλλά κ οι αναλύσεις πίσω από αυτά, στοχεύουν στο να βοηθήσουν στην κατανόηση του μηχανικού στις διατάξεις του Καν.Επε. .Στοχεύουν όμως και στο να αποκτήσει ο αναγνώστης μερικά βασικά κριτήρια που θα μπορεί να χρησιμοποιεί για μια προσεγγιστική προμελέτη μίας ενίσχυσης. Σε συνεργασία με την κατανόηση και των άλλων στοιχείων που επηρεάζουν τις υπόλοιπες μεθόδους, θα μπορεί ειδικά στο αρχικό στάδιο προμελέτης, να διαλέξει μεταξύ των διαφόρων επιλογών ενίσχυσης και να αναγνωρίζει εύκολα τα όρια, τα θετικά και τις αδυναμίες αυτών.

2. ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕ ΕΛΑΣΜΑΤΑ

Πολλές φορές η επισκευή και ενίσχυση ενός υφιστάμενου κτιρίου ή ενός μεμονωμένου δομικού στοιχείου κρίνεται απαραίτητη και οικονομικότερη από την εύρεση μιας λύσης που προϋποθέτει την μόνωση μιας νέας κατασκευής. Η γνώση αυτού του γεγονότος οδηγεί σε ανάπτυξη του κλάδου των τομέα των ενισχύσεων. Οι κυριότεροι λόγοι που καθιστούν απαραίτητες τις ενισχύσεις είναι οι εξής:

- Αύξηση φορτίου σε υφιστάμενο μέλος
- Βλάβες δομικών στοιχείων (λόγω τυχατικών δράσεων όπως ο σεισμός ή η πυρκαγιά, κρουστικών φορτίων, γήρανσης των δομικών υλικών, διάβρωσης του οπλισμού, ελλιπούς συντήρησης)
- Βελτιώσεις της λειτουργικότητας των κτιρίων (μείωση βελών κάμψεως)
- Αλλαγή στατικού συστήματος της κατασκευής (πρόσθεση τοιχωμάτων για αύξηση δυσκαμψίας του κτιρίου, αφαίρεση υποστυλωμάτων κλπ)
- Προσαρμογή υφιστάμενων παλαιών κανονισμών σε νέους κανονισμούς
- Λάθη κατά τη μόνωση του φορέα

Για να αντιμετωπιστούν όλα τα παραπάνω έχουν αναπτυχθεί τεχνικές, που ικανοποιούν τις απαιτήσεις των στοιχείων και των κατασκευών για αυξημένες αντοχές είτε σε καμπτικό είτε σε διατμητικό επίπεδο. Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν οι τεχνικές καμπτικής ενίσχυσης δοκού στο εφελκόμενο πέλμα της. Παρακάτω περιγράφονται οι μέθοδοι που πραγματεύεται η εργασία, η ενίσχυση με επικολλητά ελάσματα χάλυβα και η ενίσχυση με ινοπλισμένα υφάσματα

Τα χαλύβδινα επικολλητά ελάσματα είναι λεπτά χαλύβδινα ελάσματα από ανοξείδωτο χάλυβα με σύνηθες πάχος 1-1.5 mm, τα οποία επικολλώνται στην εξωτερική επιφάνεια της προς ενίσχυση δοκού, και στοχεύουν στην αύξηση της ροπής αντοχής της. Το πάχος των ελασμάτων δεν ξεπερνά κατά κύριο λόγο τα 4 mm και είναι μικρότερο του 2% του πλάτους του ελάσματος. Τα ελάσματα επικολλούνται σε μία ή περισσότερες στρώσεις σε συνεχή στρώση με τη χρήση εποξειδικής κόλλας. Η αύξηση του πάχους πέραν των 4mm οδηγεί σε πρόωρη αστοχία τη δοκό, στη διεπιφάνεια επικόλλησης και ιδιαίτερα στην ακραία περιοχή αγκύρωσής τους. Με τη χρήση περισσότερων της μίας στρώσης (αντί της χρήσης παχύτερου ελάσματος), επιτυγχάνεται καλύτερα η μονολιθικότητα της διατομής καθώς ακολουθείται κάθε αλλαγή της επιπεδότητας του πέλματος χωρίς να εισάγονται πρόσθετες τοπικές τάσεις. Το πλάτος του ελάσματος διαφέρει ανάλογα με την απαίτηση οπλισμού. Το όριο διαρροής των ελασμάτων κυμαίνεται από 240 έως 400 Μpa. Όταν τα χαλύβδινα ελάσματα επικολλώνται στο εφελκόμενο πέλμα της δοκού αναλαμβάνουν ροπή κάμψεως έχοντας τη λειτουργία πρόσθετου συμπληρωματικού οπλισμού.

Με τον όρο ινοπλισμένα πολυμερή εννοούμε, σύνθετα υλικά που προκύπτουν ως συνδυασμός των ιδιοτήτων των διακριτών συστατικών υλικών τους, δηλαδή των ινών (άνθρακα, αραμιδίου, γυαλιού) και της μήτρας. Η σύνδεση και η συνεργασία των διαφορετικών υλικών επιτυγχάνεται μέσω εποξειδικών ρητινών. Οι ίνες στα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά μεγάλη εφελκυστική αντοχή και γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση. Ανάλογα με τον τύπο των ινών έχουμε ανθρακονήματα, υαλονήματα και ίνες αραμιδίου. Τα ανθρακονήματα χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερες αντοχές και μέτρα ελαστικότητας σε σύγκριση με τα υαλονήματα. Τα υλικά με ίνες άνθρακα και τα υλικά με ίνες αραμιδίου βρίσκονται ενδιάμεσα. Οι ίνες γυαλιού είναι πιο οικονομικές από τις υπόλοιπες. Οι ίνες υάλου ανάλογα με το αν αντέχουν ή όχι σε αλκαλικό περιβάλλον διακρίνονται σε τύπου E και Z. Οι ίνες αραμιδίου έχουν πολύ καλή συμπεριφορά σε κρουστικά φορτία. Τα υλικά αυτά διατίθενται με τη μορφή δύσκαμπτων λωρίδων πάχους 1 χιλιοστού ή εύκαμπτων υφασμάτων, πάχους της τάξεως του 0.1-0.4 χιλιοστών. Επικολλώνται

με τη διεύθυνση των ινών παράλληλα στο πέλμα της εφελκόμενης δοκού (παράλληλα στον άξονα του μέλους) ώστε να παραλαμβάνουν τις εφελκυστικές δυνάμεις λόγω κάμψης.

3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΔΟΚΟΥ

Σύμφωνα με τον Κανονισμό Επεμβάσεων, οι τρόποι αστοχίας μιας ενισχυμένης δοκού διακρίνονται σε:

1) Αστοχία του ίδιου του υλικού ενίσχυσης (εάν πρόκειται για χαλύβδινα ελάσματα αστοχία θεωρείται η διαρροή του, ενώ εάν εξετάζουμε ινοπλισμένα πολυμερή αστοχία θεωρείται η θραύση τους.)

2) Πρόωρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης λόγω ανεπάρκειας της σύνδεσης κατά μήκος του στοιχείου ή της αγκύρωσης των άκρων του

3) Πρόωρη διατμητική αστοχία του αρχικού στοιχείου στην περιοχή απόληξης του ελάσματος (ή υφάσματος)

Ο επιθυμητός τρόπος αστοχίας του στοιχείου, επιβάλλει το υλικό ενίσχυσης να φθάνει την συμβατική παραμόρφωση αστοχίας του, ενώ το σκυρόδεμα στη θλιβόμενη ζώνη να έχει παραμόρφωση $\leq 0,0035$. Υπό τις προϋποθέσεις αυτές, αποφεύγεται η τοποθέτηση υπερβολικά μεγάλης ποσότητας υλικού ενίσχυσης, η οποία θα οδηγούσε σε πρόωρη ψαθυρή αστοχία της θλιβόμενης ζώνης.

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να τονιστεί η διαφορά μεταξύ χαλύβδινων ελασμάτων και ινοπλισμένων πολυμερών. Στην κατάσταση οριακής φέρουσας ικανότητας ο οπλισμός ενίσχυσης (σύνθετων υλικών) δεν διαρρέει όπως ο χάλυβας, αλλά παραμορφώνεται ελαστικά φθάνοντας σε μεγάλη παραμόρφωση. Η παραμόρφωση αυτή εξαρτάται βασικά από την ικανότητα του σκυροδέματος (δηλαδή 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. Άρα ο δεσμός των σύνθετων υλικών-σκυροδέματος μπορεί να αστοχήσει πρόωρα, δηλαδή πριν να εξαντληθεί η καμπτική αντοχή του ενισχυμένου στοιχείου.

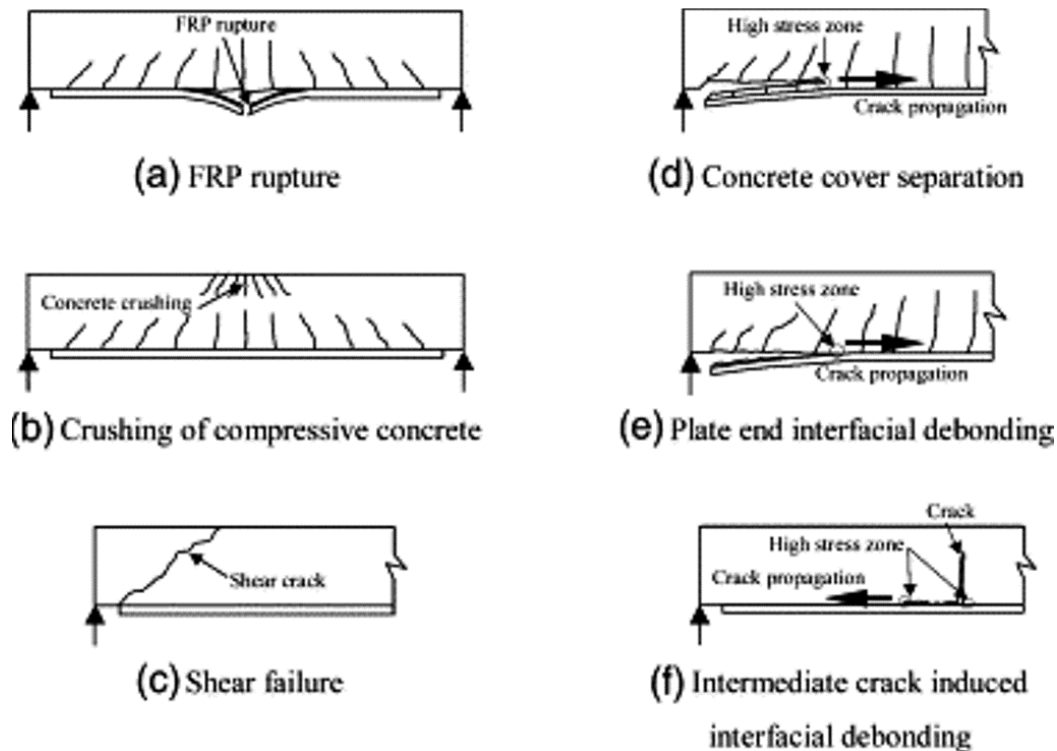
Παρόλο που η καμπτική αστοχία της ενισχυμένης με FRP δοκού είναι ψαθυρή, όπως και η διατμητική, επιθυμητός είναι ο καμπτικός τρόπος αστοχίας γιατί η δοκός είναι πιο όλκιμη. Όταν υπάρχει λοιπόν, περίπτωση να αυξηθεί παραπάνω η διατμητική δύναμη ιδιαίτερα στις περιοχές απόληξης των ελασμάτων, οι δοκοί ενισχύονται και διατμητικά. Οι πιθανοί τρόποι αστοχίας για μια δοκό οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένοι με FRP φαίνονται στο παρακάτω σχήμα [1].

Μηχανισμοί αστοχίας δοκού ενισχυμένης με χαλύβδινα ελάσματα:

Δύο είναι οι διακριτές μορφές αστοχίας:

Διατμητική απόσχιση: προκαλείται από τη δημιουργία διαγώνιων διατμητικών ρωγμών και σχετίζεται με τον γρήγορο διαχωρισμό του ελάσματος από τη δοκό. (Σχήμα [1])

Καμπτική απόσχιση: προκαλείται από την αύξηση της καμπυλότητας της δοκού και σχετίζεται με τον σταδιακό αποχωρισμό του ελάσματος από την δοκό. (Σχήμα [1])



Σχήμα 1: Τρόποι αστοχίας Ενισχυμένης με FRP δοκού Ο.Σ. [4]

1) Καμπτική αστοχία με θραύση του φύλλου FRP (εάν το φύλλο έχει αγκυρωθεί κατάλληλα στα άκρα, είναι δυνατόν να φτάσει η δοκός στην τελική καμπτική αντοχής της, με αστοχία του φύλλου σε εφελκυστική θραύση)

2) Καμπτική αστοχία με θραύση του θλιβόμενου σκυροδέματος (εάν το φύλλο έχει αγκυρωθεί κατάλληλα στα άκρα, είναι δυνατόν να φτάσει η δοκός στην τελική καμπτική αντοχής της, με αστοχία του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη)

3) Διατμητική αστοχία

4) Αποκόλληση της επικάλυψης του σκυροδέματος (όσο η απόληξη του φύλλου ενίσχυσης κινείται πλησιέστερα στην στήριξη, η διατμητική δύναμη γίνεται σημαντικότερη από την ροπή κάμψης στην απόληξη του στοιχείου, συνεπώς η αστοχία γίνεται πιο ψαθυρή και το φορτίο αστοχίας αυξάνεται)

5) Αποκόλληση του άκρου του φύλλου FRP στη διεπιφάνεια συγκολλητικής στρώσης-σκυροδέματος (πάνω στο φύλλο του FRP, παραμένει μια λεπτή στρώση σκυροδέματος, γεγονός που δείχνει πως η αστοχία επέρχεται λόγω υψηλών διεπιφανειακών διατμητικών και ορθών τάσεων που ξεπερνούν την αντοχή του πιο αδύναμου υλικού, δηλαδή του σκυροδέματος. Παρατηρείται κοντά στο άκρο της δοκού).

6) Ενδιάμεση καμπτική ρωγμή-πρόκληση διεπιφανειακής αποκόλλησης ή ενδιάμεση καμπτοδιατμητική ρωγμή-πρόκληση διεπιφανειακής αποκόλλησης

Οι τρόποι αστοχίας 4 και 5 αναφέρονται ως αστοχίες με αποκόλληση της απόληξης του στοιχείου ενίσχυσης, ενώ ο τρόπος αστοχίας 6 αναφέρεται ως ενδιάμεσες ρωγμές-πρόκληση αποκόλλησης στη διεπιφάνεια δοκού φύλλου.

4. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΔΟΚΟΥ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΚΑΤΑ ΚΑΝ.ΕΠΕ.2012

Για να φτάσουμε στο σημείο να εξετάσουμε τις παραμέτρους της διαστασιολόγησης, πρέπει πρώτα να δώσουμε την μεθοδολογία που ακολουθεί ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. για την καμπτική ενίσχυσή δοκού. Αυτό θα διευκολύνει την κατανόηση του αναγνώστη αλλά κ να αυξήσει την

αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται για χαλύβδινα αλλά και από συνθετικά ελάσματα.

Αρχικά γίνεται επίβλεψη των στοιχείων για να προσδιορισθεί ο υπάρχον οπλισμός (πριν την ενίσχυση) και έπειτα προσδιορίζεται η ροπή αντοχής. Η ροπή αντοχής μπορεί να υπολογισθεί μέσω της συνεργασίας του εφελκόμενου οπλισμού με το σκυρόδεμα ή το θλιβόμενο οπλισμό. Μπορεί όμως να γίνει κ προσεγγιστική εκτίμηση με καλή ακρίβεια με την παρακάτω μέθοδο [3] :

$$\omega = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{b_w \cdot d \cdot f_{cd}} \quad (1.1)$$

Όπου A_s ο παλιός οπλισμός και b_w, d οι διαστάσεις ανάλογα τη διατομή. f_{yd} και f_{cd} είναι οι αντοχές του χάλυβα (εσωτερικού οπλισμού) και η αντοχή του σκυροδέματος αντίστοιχα. Με γνωστό το ω , βρίσκω μ_{sd} και έπειτα την M_{rd} την υπάρχουσα.

$$\mu_{sd} = \frac{1 - (1 - 1.2\omega)^2}{2.4} \quad (1.2)$$

$$M_{rd}' = \frac{\mu_{sd} \cdot b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}}{10^6} \quad (1.3)$$

Έπειτα συγκρίνουμε τη ροπή αντοχής με την καινούρια ροπή που θα σχεδιαστεί για να παραλάβει η δοκός.

$$\Delta M_{d0} = |M_{sd} - M'_{rd}| \quad (1.4)$$

Προσοχή όμως: Για να εφαρμοστεί αυτός ο τρόπος ενίσχυσης πρέπει η αντοχή της δοκού πριν την ενίσχυση, να επαρκεί έστω για τα μόνιμα φορτία.

Το εμβαδόν λοιπόν του πρόσθετου οπλισμού δίνεται προσεγγιστικά από τον τύπο:

$$A_j = \frac{\Delta M_{d0}}{z \cdot \sigma_{jd}} \quad (\text{ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση } \Sigma 8.2) \quad (1.5)$$

Ποια είναι όμως η τάση σχεδιασμού του υλικού ενίσχυσης σ_{jd} ;

Εξαρτάται από τον τρόπο αστοχίας:

Θραύση(ή διαρροή) του υλικού ενίσχυσης

$$\sigma_{jd} = \frac{1}{\gamma_m} \cdot f_{jk} \quad (\text{ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση } 8.6) \quad \text{όπου } \gamma_m=1.2 \text{ και} \quad (1.6)$$

f_{jk} η ονομαστική αντοχή του χάλυβα

Πρόωρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης (στα άκρα ή σε ενδιάμεσες θέσεις)

$$\sigma_j = \frac{\sigma_{j,crit}}{\gamma_{Rd}} \quad (\text{ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση } 8.7) \quad \text{όπου } \gamma_{Rd}=1.2 \quad (1.7)$$

$$\sigma_{j,crit} = \beta \cdot \frac{\tau_b^{αποκ.}}{t_j} \cdot L_e \quad (\text{ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση } \Sigma 8.3) \quad (1.8)$$

Με διορθωτικό συντελεστή β

$$\beta = \beta_w \cdot \beta_L \quad (\text{ΚΑΝ.ΕΠΕ. (§8.2.1.3 α) ν}): \quad (1.9)$$

(β_w : Επιρροή πλάτους οπλισμού ενίσχυσης, β_L : Επιρροή διατιθέμενου μήκους αγκύρωσης)

$$L_e = \sqrt{\frac{E_j \cdot t_j}{2 \cdot f_{ctm}}} \quad (\text{ΚΑΝ.ΕΠΕ. εξίσωση } \Sigma 8.4) \quad \text{Ενεργό μήκος αγκύρωσης} \quad (1.10)$$

Όπου για πολλές στρώσεις υλικού ισχύει προσεγγιστικά:

$$t_j = \psi \cdot k \cdot t_{j1}, \quad t_{j1} = \text{πάχος στρώσης} \quad (1.11)$$

$$\text{και } \psi = k^{-1/4} \text{ για } k \geq 4 \text{ (KAN.EΠE. §6.2.3)} \quad (1.12)$$

Ειδικός Έλεγχος Πρόωρης Διατμητικής Αστοχίας στην περιοχή απόληξης του ελάσματος

Επίσης λόγω της διακοπής του ελάσματος σε κάποιο σημείο, αναπτύσσεται τέμνουσα δύναμη στο άκρο του ελάσματος και πρέπει να εξετάζεται αν επαρκεί η αντοχή του σκυροδέματος για να την παραλάβει ή χρειάζεται επιπλέον διατμητικό εξωτερικό οπλισμό.

Η τέμνουσα που θα πρέπει να παραλάβει ο οπλισμός αυτός θα είναι:

$$V_{sdj} = \frac{A_j \cdot \sigma_{jd}}{A_{so} \cdot f_{ydo} + A_j \cdot \sigma_{jd}} \cdot V_{sd, \text{απόλ.}} \quad (\text{KAN.EΠE. εξίσωση Σ8.5}) \quad (1.13)$$

Διαδικασία Διαστασιολόγησης

Η μέθοδος είναι επαναληπτική. Με γνωστή την καινούρια επιθυμητή ροπή αντοχής, υποθέτουμε ένα πάχος ελάσματος t_j και χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις (1.5) έως (1.12) και βρίσκουμε ένα καινούριο t_j . Για s_j παίρνουμε το ελάχιστον των (1.6)-(1.7). Εάν το καινούριο πάχος έχει διαφορά από το προηγούμενο κάτω από 10% τότε σταματάει η διαδικασία. Διαφορετικά, γίνεται ξανά υπόθεση ενός t_j , αυτή τη φορά πιο κοντά στο καινούριο πάχος ελάσματος k επαναλαμβάνονται τα βήματα έως ούτε ικανοποιείται το παραπάνω κριτήριο σύγκλισης.

5. ΒΑΣΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΙΣΗΣ

Αφού αναλύθηκε νωρίτερα η διαδικασία υπολογισμού του αναγκαίου πάχους ελάσματος ενίσχυσης, σε αυτή την ενότητα θα προσπαθήσουμε να προσδιορίσουμε τις παραμέτρους που επηρεάζουν την διαστασιολόγηση αυτής. Παράλληλα θα επιδιώξουμε να προσδιορίσουμε είτε ποιοτικά είτε αριθμητικά, το μέγεθος της επιρροής του καθ' ενός εξ αυτών.

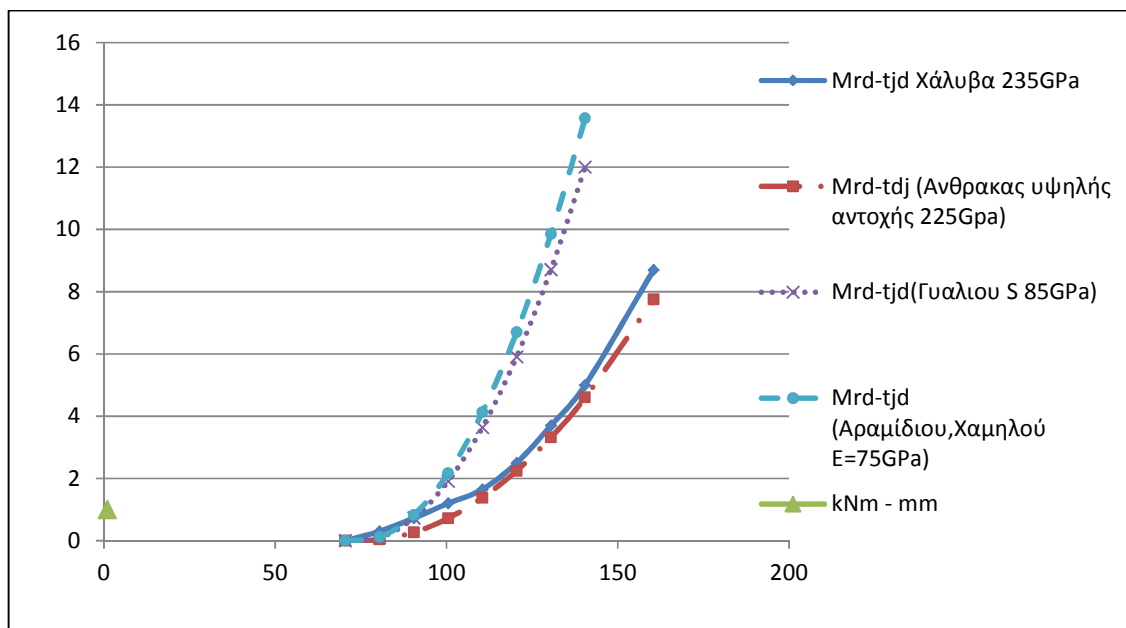
Αρχικά από τους τύπους του Καν.Επε. k μόνο, μπορούμε να διακρίνουμε τις παραμέτρους που περιέχονται σε αυτούς k να βγάλουμε μερικά πρώτα συμπεράσματα για το που πρέπει να εστιάσουμε την προσοχή μας. Παράμετροι όπως ο αρχικός οπλισμός, οι διαστάσεις της διατομής, η επιλογή του πλάτους του ελάσματος, το υλικό ενίσχυσης (αντοχή k μέτρο ελαστικότητας), η ποιότητα του σκυροδέματος αλλά k το διατιθέμενο μήκος αγκύρωσης, φαίνεται εκ πρώτης όψης να επηρεάζουν. Είναι όμως αυτή η πραγματικότητα; Και αν ναι, σε ποια βαθμό επηρεάζει το καθένα; Οι ερωτήσεις αυτές θα γίνει απόπειρα να απαντηθούν, κάνοντας πειραματική (αριθμητικά) έρευνα για διάφορες περιπτώσεις δοκών.

Το στατικό σύστημα μας είναι μια αμφιέριστη δοκός με μήκος 4 μέτρα.
Για όσα στοιχεία δεν αναφέρεται σύνθετο υλικό, έχει χρησιμοποιηθεί χάλυβας 235GPa.
Επίσης πάλι αν δεν αναφέρεται κάτι άλλο, έχει αναλυθεί δοκός 250x500mm.
Αναλυτικότερα:

5.1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ Κ ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Για μια δοκό με τα παρακάτω στοιχεία, το διάγραμμα ροπής αντοχής-πάχους ελάσματος για έλασμα πλάτους ίσο με το πλάτος της δοκού, είναι: M_{rd} (αρχική)=70.5 kNm

$$L=4\text{m} \quad b=250\text{mm} \quad h=500\text{mm} \quad c=16/20 \quad d_1=40\text{mm} \quad S400\text{Ανθρακας}$$



Διάγραμμα 1α: Σχέση ενισχυμένης ροπής αντοχής (αύξηση φορτίων)(χ) με το πάχος της ενίσχυσης

Παρατηρούμε στο [διάγραμμα 1α] ότι δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά συμπεριφοράς στα δύο υλικά, σε σχέση με την αύξηση του φορτίου. Η αύξηση του πάχους είναι όμοια και πιο έντονη στα σύνθετα υλικά από Γυαλί S και Αραμίδιου Χαμηλού E. Αυτό όπως φαίνεται έχει να κάνει με το μέτρο ελαστικότητάς τους. Όμοια συμπεριφορά ως προς την αναγκαιότητα μεγαλύτερου πάχους έχουν και ο χάλυβας με τον άνθρακα υψηλής αντοχής, αφού και αυτά τα υλικά έχουν σχεδόν ίσα μέτρα ελαστικότητας.

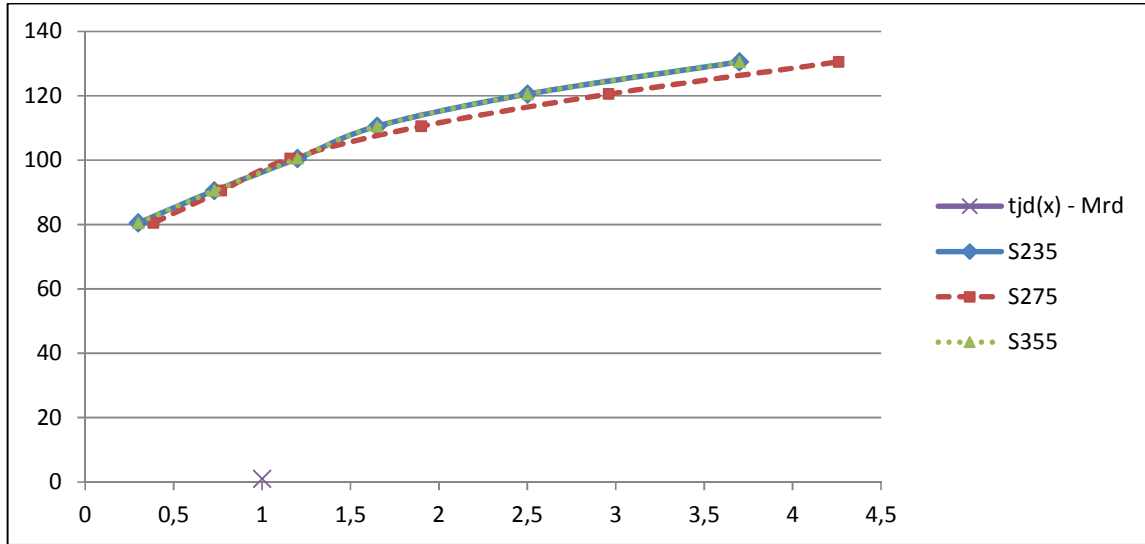
Φυσικά το t_j (το πάχος του ελάσματος) του διαγράμματος είναι το ολικό t_j . Αν θυμηθούμε λοιπόν ότι το πάχος κάθε στρώσης των σύνθετων υλικών κυμαίνεται από 0.1-0.4 mm και του χάλυβα από 1-4 mm, τότε μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι για να καλύψει την ίδια ανάγκη ενίσχυσης ο άνθρακας, πρέπει να χρησιμοποιήσει πολλαπλές στρώσεις, κάτι που οδηγεί σε μείωση αντοχής άρα ακόμη περισσότερες στρώσεις ($\psi = k^{-1/4}$ για $k \geq 4$) (ΚΑΝ.ΕΠΕ. §6.2.3). Για το λόγο αυτό, αργότερα θα φανεί ότι τα σύνθετα υλικά είναι αποδοτικά μόνο για μικρή αύξηση αντοχής.

Επιλογή χάλυβα διαφορετικής αντοχής

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 1β, αλλάζοντας την αντοχή του χάλυβα, δεν προέκυψε κάποια σημαντική αλλαγή στο απαιτούμενο πάχος ελάσματος της ενίσχυσης.

Συμπέρασμα:

Για να έχει νόημα η επιλογή ενός καλύτερου χάλυβα με αυξημένη τάση διαρροής, θα πρέπει γνωρίζουμε ότι υπάρχει ήδη ικανοποιητική αντοχή αποκόλλησης του σκυροδέματος ώστε να μπορούν ταυτόχρονα οι δύο τάσεις να δώσουν μεγαλύτερο πάχος. Διαφορετικά, όσο κι αν αυξάνουμε την αντοχή του χαλύβδινου ελάσματος, θα σπάει το σκυρόδεμα πρώτο μάλιστα και με την ίδια σχεδόν ταχύτητα.



Διάγραμμα 1β: Σχέση πάχους(χ) – ροπής αντοχής για 3 τύπους χάλυβα

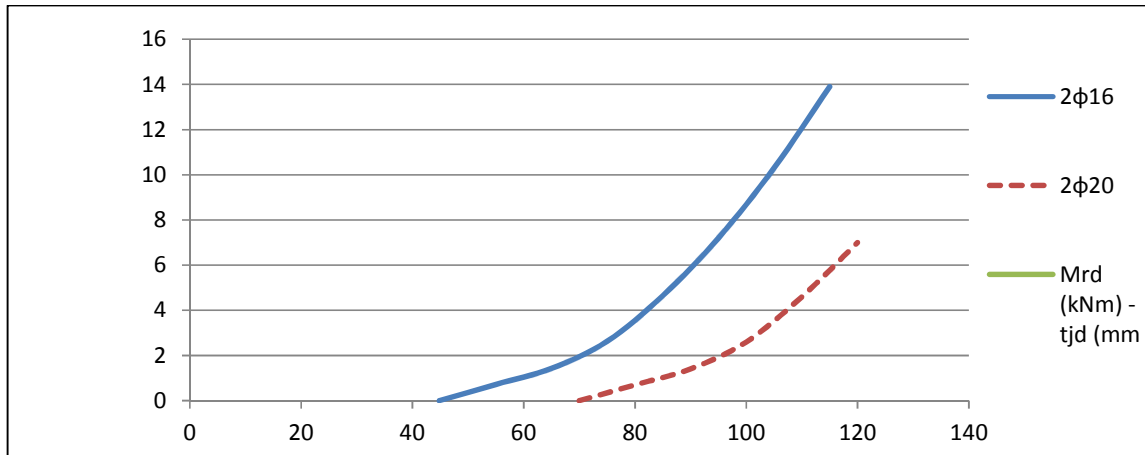
5.2 ΑΛΛΑΓΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΔΟΚΟΥ

Δοκοί ίδιων διαστάσεων με διαφορετικούς εσωτερικούς οπλισμούς

α) L=4m b=200mm h=400mm c=16/20 d1=40mm S235 4φ16

β) L=4m b=200mm h=400mm c=16/20 d1=40mm S235 4φ20

Για πλάτος ελάσματος ίσο με αυτό της δοκού:



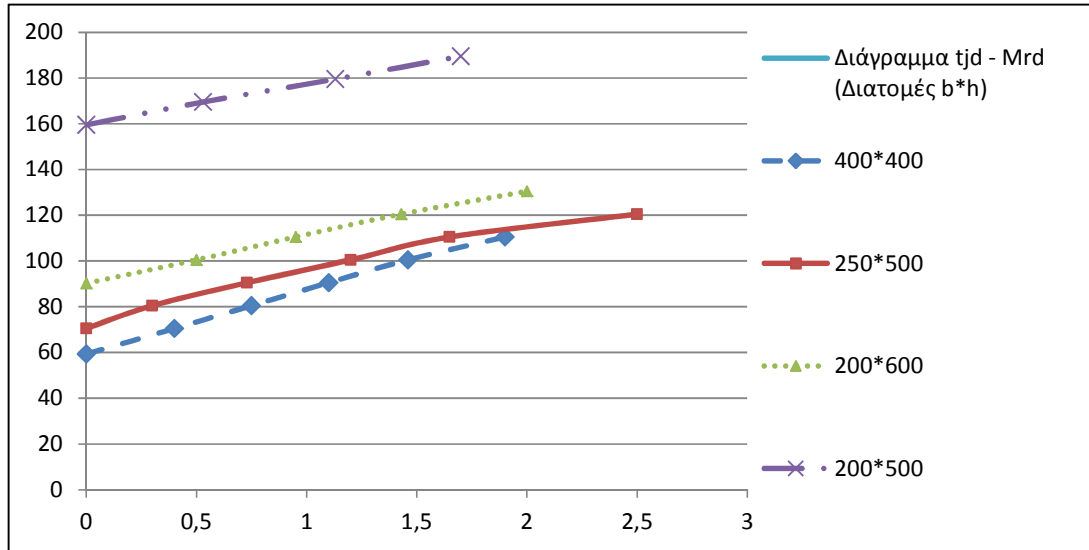
Διάγραμμα 2: Σχέση της ροπής αντοχής (χ) με πάχος ενίσχυσης για 2 αρχικούς οπλισμούς

Παρατηρούμε στο [διάγραμμα 2] ότι ο αρχικός οπλισμός επηρεάζει τη μέγιστη ροπή αντοχής. Αυτό όμως δεν συμβαίνει γιατί βοηθάει την ενίσχυση αλλά γιατί για μία συγκεκριμένη απαιτούμενη αντοχή δοκού, μία δοκός με αρκετό οπλισμό, χρειάζεται μικρότερη αύξηση αντοχής για να την αποκτήσει άρα κ μικρότερο πάχος. Όμως ως προς την καθαρή αύξηση της αντοχής, όπως φαίνεται κ στον τύπο (1.5), η διαστασιολόγηση της ενίσχυσης βασίζεται κυρίως στη διαφορά απαιτούμενης ροπής και υπάρχουσας. Άρα έπρεπε να περιμένουμε στο διάγραμμα ότι οι καμπύλες αυτές θα είναι ουσιαστικά «παράλληλες».

Ο υπάρχων οπλισμός μπορεί να επηρεάσει την ενίσχυση μόνο έμμεσα και μέσω του τρίτου τρόπου αστοχίας (διατμητική αστοχία στο άκρο), και αυτό γιατί επηρεάζει την διατμητική αντοχή του σκυροδέματος. Το ρ_1 είναι το ποσοστό οπλισμού άρα:

$$V_{cd} = V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot \min(2, 1.2 + 40 \cdot \rho_1) \cdot \max(1, 1.6 - d)] \cdot b \cdot d \quad [3] \quad (2.1)$$

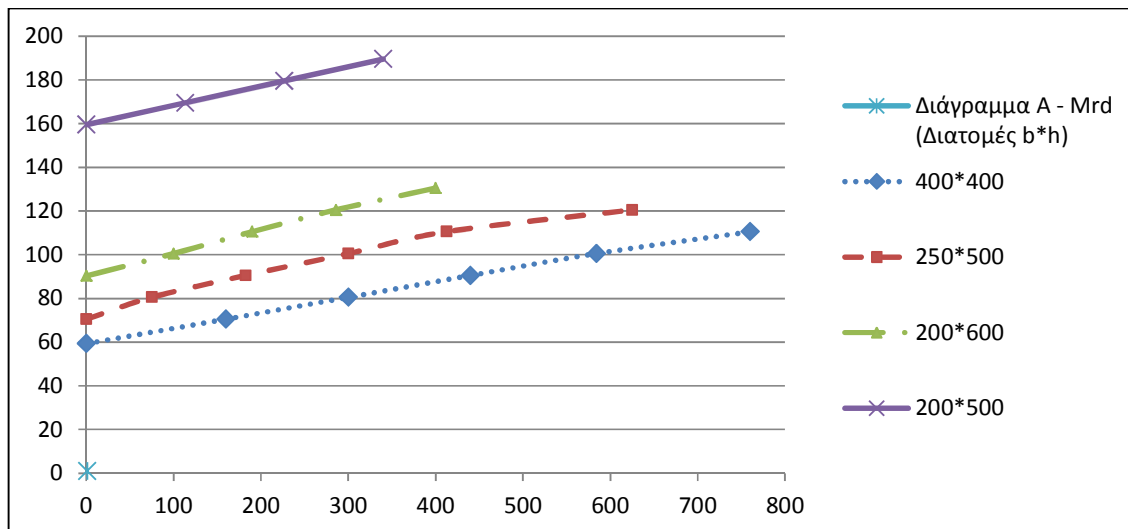
Διαστάσεις Διατομής Δοκού



Διάγραμμα 3: Σχέση πάχους t_{jd} (χ) και M_{rd} για διάφορες διατομές

Στο [διάγραμμα 3] (κοιτάμε την αύξηση, άσχετα από την αρχική τιμή) που δείχνει το πάχος του ελάσματος, μπορεί να φαίνεται μια πολύ μικρή αλλαγή μεταξύ των στοιχείων, κ αυτό μάλλον οφείλεται στο ότι το πλάτος του ελάσματος είναι κάθε φορά ίσο με το πλάτος της διατομής. Οι διατομές όμως μεταβάλλονται. Το πλάτος του ελάσματος παίζει ρόλο στην ενίσχυση όπως θα δούμε στη συνέχεια.

Όταν όμως βλέπουμε το [διάγραμμα 4], παρατηρούμε ότι το ολικό εμβαδόν γενικά δεν μεταβάλλει πολύ τη ενίσχυση. Επιφυλασσόμαστε για αυτό. Διότι ίσως η ενίσχυση δεν έφτασε στα όρια του το σκυρόδεμα, στο οποίο λαμβάνει μεγαλύτερη σημασία το πλάτος του ελάσματος απ ότι όταν αστοχεί πρώτα ο χάλυβας.

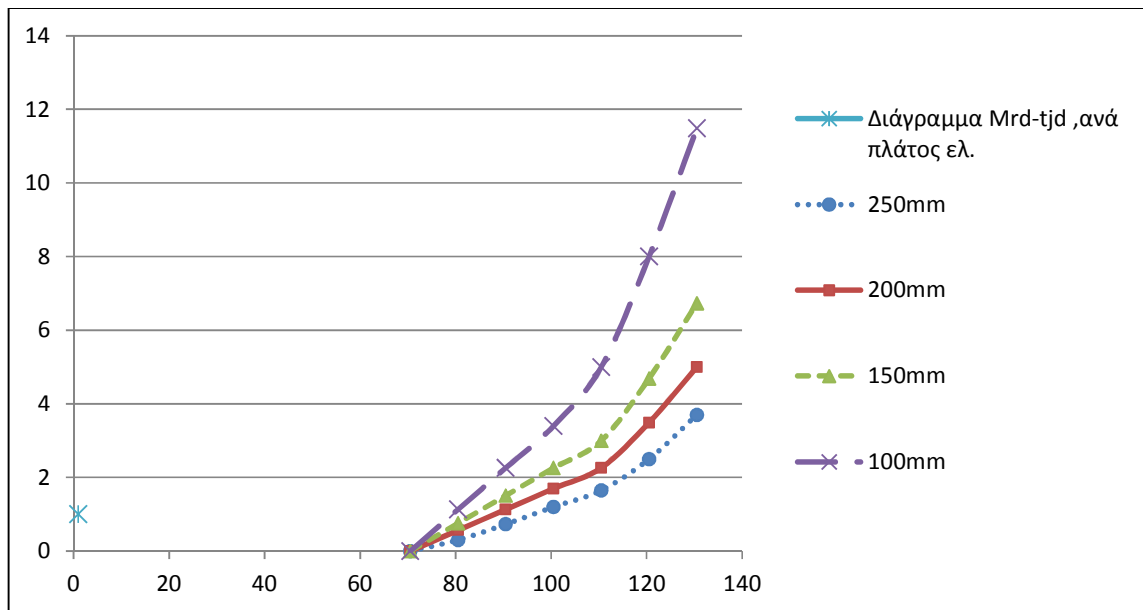


Διάγραμμα 4: Σχέση εμβαδού A_j (χ) και M_{rd} για διάφορες διατομές

Πλάτος Ελασμάτων

Όπως φαίνεται κ από τους τύπους της ενίσχυσης από τον Καν.Επε., το πλάτος του ελάσματος έχει σημασία για την σ_{jcrit} , δηλαδή την αντοχή στην αποκόλληση. Όσο

μεγαλύτερο είναι το πλάτος, τόσο μεγαλύτερη αντοχή έχει. Οδηγείται η ενίσχυση πιο γρήγορα στην αποκόλληση. Η σημασία του πλάτους γίνεται περισσότερο έντονη όταν περνάει το σκυροδέμα στην αποκόλληση. Κάτι που μας δείχνει κ το [διάγραμμα 5]



Διάγραμμα 5: Σχέση $M_{rd} - t_{jd}$ με αλλαγή του πλάτους των ελασμάτων

Πλακοδοκός

Μία ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι η πλακοδοκός εμπίπτει κυρίως στην κατηγορία της παραμέτρου ‘Πλάτος Ελάσματος’ και όχι στην κατηγορία ‘Διατομή Δοκού’. Αρχικά αυτό μπορεί να φαντάζει μη λογικό αλλά η παρακάτω ανάλυση θα πείσει για το αντίθετο.

Φυσικά εξηγήθηκε παραπάνω ότι η παράμετρος ‘Διατομή Δοκού’ σχετίζεται με την ‘Πλάτος Δοκού’ γιατί η αλλαγή της διατομής ουσιαστικά έμμεσα αλλάζει το μέγιστο δυνατό πλάτος ελάσματος. Αυτό όμως είναι ως προς το μέγιστο πλάτος. Ενώ η κατηγορία του ‘πλάτους’ επικεντρώνεται στην άμεση αλλαγή του πλάτους για μία σταθερή διατομή.

(Για την παρακάτω διαδικασία, βλ. σελ.183,184,191 [3])

Είναι γνωστόν από τη θεωρία του οπλισμένου σκυροδέματος ότι ο οπλισμός μίας πλακοδοκού υπολογίζεται με τον εξής τρόπο: Υπάρχουν 3 περιπτώσεις.

- 1) Αν η θλιβόμενη ζώνη είναι εντός της πλάκας, τότε λαμβάνεται υπόψη το b_{ef} . Στον υπολογισμό θεωρείται ως μια δοκός με διατομή ορθογωνική με $b=b_w = b_{ef}$
- 2) Αν η θλιβόμενη ζώνη περιχει όλη την πλάκα κ μέρος του κορμού, τότε ο οπλισμός υπολογίζεται από ένα πίνακα με τα ω πλακοδοκού. (βλ.σελ.191 πιν.4.5 [3])
- 3) Αν η θλιβόμενη ζώνη είναι μόνο στον κορμό τότε αγνοείται η πλάκα και ο οπλισμός υπολογίζεται από ορθογωνική δοκό με $b= b_w$.

Στις περιπτώσεις 1,2 η αντοχή της διατομής αυξάνεται λόγω το b_{ef} αλλά ουσιαστικά είναι μικρή η αλλαγή. Άρα έχοντας μικρή αλλαγή στην αντοχή της δοκού, δεν μπορεί να περιλαμβάνεται στην κατηγορία ‘Διατομής’ για την καμπτική ενίσχυση.

Για την περίπτωση 3 αφού η θλιβόμενη ζώνη είναι στον κορμό, αυτό συνεπάγεται ότι η εφελεκόμενη ζώνη είναι στην πλάκα. Αυτό δεν επηρεάζει καθόλου την αρχική αντοχή ώστε να συμπεριληφθεί στην κατηγορία της ‘Διατομής’ αλλά η ύπαρξη της πλάκας δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί πλάτος ελάσματος ενίσχυσης σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό του κορμού της δοκού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη αύξηση της αντοχής αποκόλλησης του σκυροδέματος, κ σε συνδυασμό με τη χρήση ενός ελάσματος με

σημαντική αντοχή (άρα προτιμούνται τα σύνθετα υλικά) , μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη αύξηση της υπάρχουσας ροπής αντοχής. Προσοχή! Αυτή η μεγάλη αύξηση όμως ίσως απαιτήσει μεγάλο μήκος ελάσματος και προσθέτοντας το μήκος αγκύρωσης, να μην επαρκεί το μήκος της δοκού για αγκύρωση. Άρα ενώ θα είναι αυξάνεται η ενίσχυση από μία παράμετρο, θα ελαττώνεται από το μειωμένο του μήκος αγκύρωσης (βλ. εξ. 1.9 και Καν.Επε.).

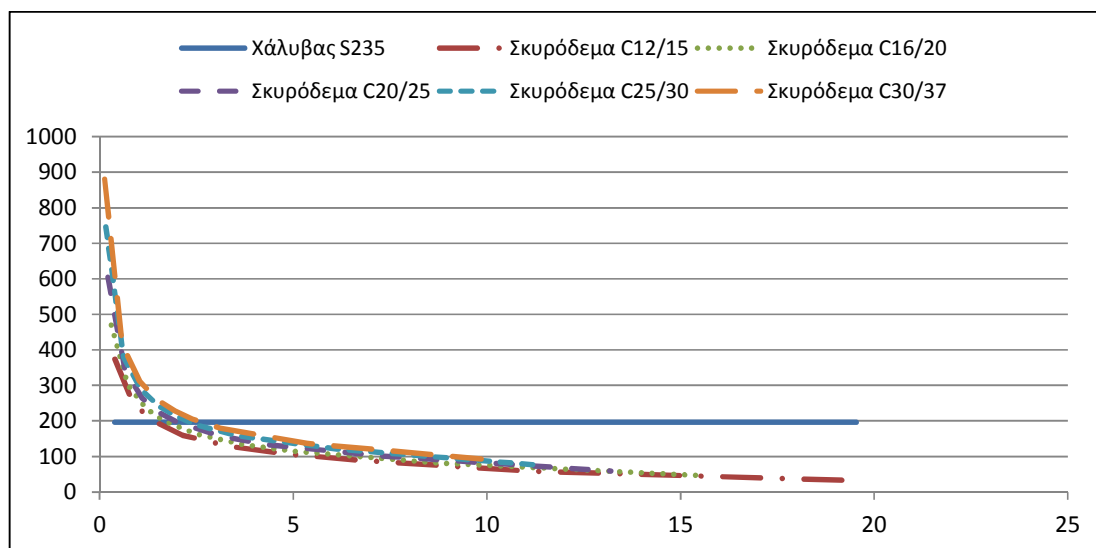
Ποιότητα Σκυροδέματος

Η ποιότητα του σκυροδέματος είναι μία παράμετρος που αναμενόμενο να παίζει σημαντικό ρόλο στην διαστασιολόγηση της ενίσχυσης. Εύκολα φαίνεται αυτό από τους μαθηματικούς τύπους της ενίσχυσης (βλ. εξ. 1.10 → 1.8 → 1.7). Στα παρακάτω διαγράμματα αποτυπώνονται μερικές χρήσιμες πληροφορίες για την καμπτική ενίσχυση. Εξετάσθηκαν πέντε(5) τύποι σκυροδέματος από 12 ως 30 Μpa .

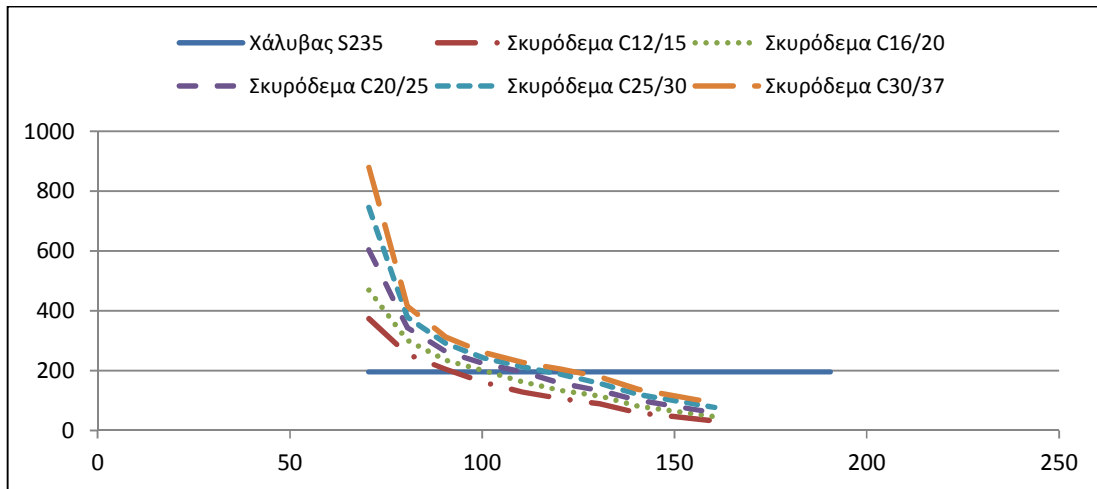
Στα [διαγράμματα 6-7] βλέπουμε ότι σε αρχικά μικρό πάχος, η τάση αποκόλλησης του σκυροδέματος επηρεάζεται πολύ από την ποιότητα του σκυροδέματος. Όμως, η επιρροή αυτή στην τάση του σκυροδέματος, χάνεται γρήγορα μετά από ένα πάχος 1-2 mm. Βέβαια έπειτα από το σημείο εκείνο, με αύξηση του απαιτούμενου πάχους ελασμάτων, σταδιακά οι τάσεις αντοχής του σκυροδέματος για αποκόλληση, εξισώνονται. Δηλαδή το σκυροδέμα χάνει την επιρροή της αντοχής του, ως προς την ενίσχυση.

Προσοχή όμως! Φαίνεται ξεκάθαρα στο [διάγραμμα 8] ότι για τα απαιτούμενα πάχη ελάσματος ισχύει το αντίστροφο. Δηλαδή όσο καθώς μεγαλώνει η ροπή αντοχής, οι διαφορές στα απαιτούμενα πάχη, μεγαλώνουν . Μέχρι το σημείο όπου $t_j = 1-2$ περίπου, η αύξηση της διαφοράς είναι μικρή. Άλλα καθώς μεγαλώνει η ροπή αντοχής, η διαφορά στο απαιτούμενο πάχος κάθε τύπου σκυροδέματος, όλο και αυξάνεται με πιο γρήγορο ρυθμό.

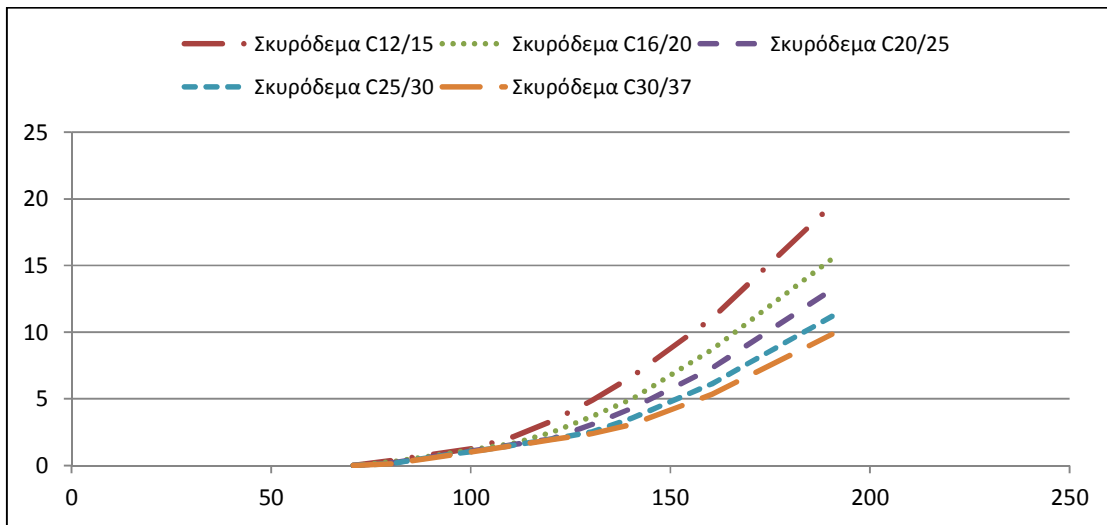
Αν συγκρίνουμε ταυτόχρονα και το πάχος του ελάσματος που χρειάζεται μία δοκός για να αποκτήσει μια συγκεκριμένη αντοχή, τότε βλέπουμε πάλι αυξανόμενες διαφορές καθώς μεγαλώνει η επιθυμητή ροπή αντοχής. Ενδεικτικά δίνεται ο παρακάτω [πίνακας 1] όπου δείχνει την μεταβολή πάχους μεταξύ των τύπων σκυροδέματος , για μια σειρά από ροπές αντοχής. Η σύγκριση γίνεται ως προς το συνηθισμένο τύπο οπλισμένου σκυροδέματος c16/20.



Διάγραμμα 6: Σχέση πάχους ελάσματος t_{jd} (χ) με σ_j σκυροδέματος για διάφορους τύπους σκυρ.



Διάγραμμα 7: Σχέση ροπής αντοχής (χ) με σ_{τ} σκυρ. για διάφορους τύπους σκυρ.



Διάγραμμα 8: Σχέση ροπής αντοχής (χ) με πάχος ελάσματος διάφορους τύπους σκυρ.

Ποσοστό πάχους ελάσματος (ως προς το c16/20)				
Mrd	c=12/15	c=20/25	c=25/30	c=30/37
70,5	0%	0%	0%	0%
80,5	9%	-9%	-14%	-17%
90,5	11%	-8%	-11%	-15%
100,5	9%	-10%	-15%	-17%
110,5	49%	-10%	-13%	-16%
120,5	85%	-50%	-52%	-56%
130,5	120%	-60%	-117%	-131%
140,5	170%	-70%	-143%	-190%

Πίνακας 1

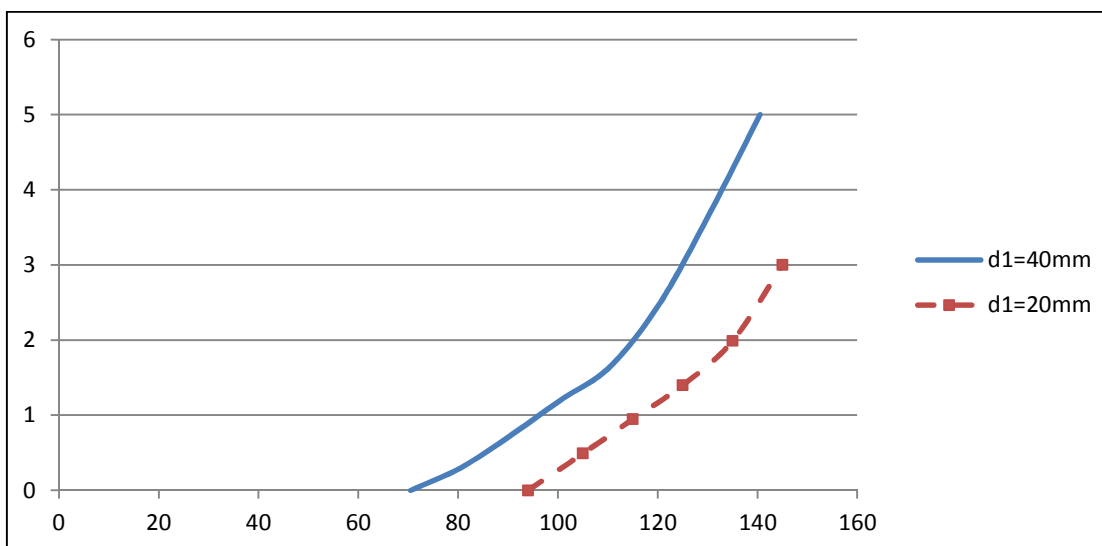
Τελικό συμπέρασμα;

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι όσο είναι μικρές οι ροπές αντοχής και ακόμη είναι η διαρροή του υλικού ενίσχυσης, η κρίσιμη αστοχία που είναι καθοριστική, το ποσοστό διαφοράς είναι μικρό. Όταν όμως ξεπερασθεί η τάση αποκόλλησης του σκυροδέματος, τότε αυξάνεται

απότομα η συμβολή της αντοχής του σκυροδέματος για την διαστασιολόγηση του πάχους των ελασμάτων.

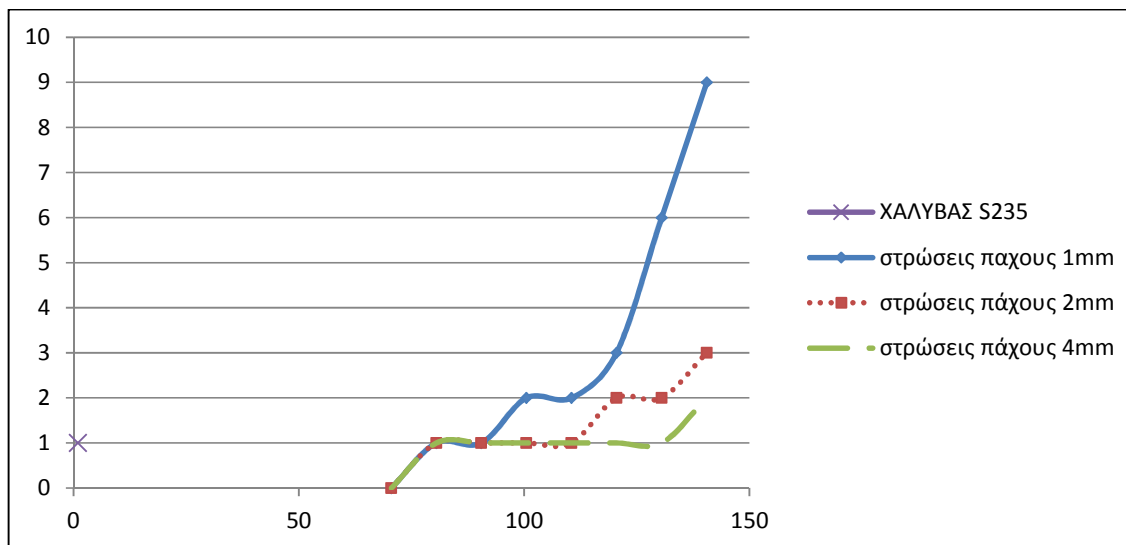
Επικάλυψη εσωτερικού οπλισμού

Όπως βλέπουμε κ στο [διάγραμμα 9] το πάχος της επικάλυψης δεν επηρεάζει την ενίσχυση άμεσα. Ουσιαστικά το η δοκός συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο. Η καμπύλη αύξησης του πάχους ελάσματος της δοκού με το μεγαλύτερο πάχος επικάλυψης $d1$, είναι “παράλληλη” με την καμπύλη της άλλης δοκού. Μοιάζει σαν να είναι η ίδια δοκός, απλά έχει με διαφορετική αρχική αντοχή.



Διάγραμμα 9: Σχέση ροπής αντοχής(χ) με πάχος ελάσματος για 2 πάχη επικάλυψης εσωτ. οπλισμού

Αριθμός Στρώσεων



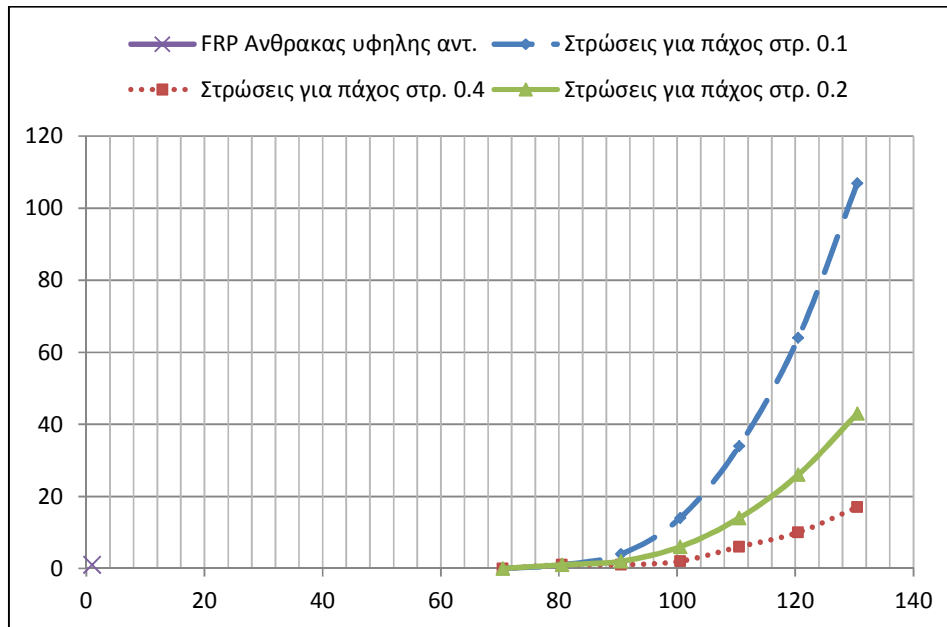
Διάγραμμα 10: Σχέση ροπής αντοχής(χ) με αριθμό στρώσεων, για διαφορετικά πάχη στρώσεων Χάλυβα

Ο αριθμός των στρώσεων είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας κ όπως θα φανεί πιο κάτω, μπορεί να είναι και καθοριστικός για αδυναμία περεταίρω ενίσχυσης ενός στοιχείου.

Όπως φαίνεται και από το [διάγραμμα 10], ο αριθμός των στρώσεων πρέπει να μεριμνάται διότι όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, περισσότερες από 3 στρώσεις μειώνουν την αντοχή της ενίσχυσης άρα απαιτούν ακόμη περισσότερες στρώσεις. Για το λόγο αυτό φαίνεται η ξαφνική αλματώδης αύξηση του χάλυβα με πάχος στρώσης 1mm.

Το ίδιο βλέπουμε και στο [διάγραμμα 11] όπου παρουσιάζεται όμοια διάγραμμα με διάφορες επιλογές πάχους στρώσεων FRP άνθρακα υψηλής αντοχής. Και εδώ φαίνεται οι στρώσεις να αυξάνονται με γεωμετρική πρόοδο. Κάτι που θα έπρεπε να είναι αναμενόμενο, αν εξετάσουμε τους τύπους (1.11-1.12).

Προσοχή!!!! Το [διάγραμμα 11] έχει πολύ μεγάλο αριθμό στρώσεων και παρατίθεται κυρίως για να αναδειχθεί το πρόβλημα αυτό. Προφανώς και δε θα μπορούσε να εφαρμοστεί στην πραγματικότητα, μιας κ βλέπουμε ότι μόλις για αύξηση αντοχής 40 kNm, ο αριθμός των στρώσεων για πάχος στρώσης 0.1mm, φτάνει τις 40 περίπου στρώσεις. Αυτό φυσικά είναι τελείως αδύνατο να συμβεί. Γι' αυτό και ειδικά με τα σύνθετα, πρέπει να γίνεται καλός έλεγχος των παραμέτρων ώστε να μπορεί ο μελετητής από την αρχή και εύκολα να αποφασίσει το κατάλληλο υλικό αλλά κ να αναγνωρίσει ποιες είναι οι ρεαλιστικές δυνατότητες αύξησης της καμπτικής αντοχής ενός στοιχείου με αυτή τη μέθοδο.

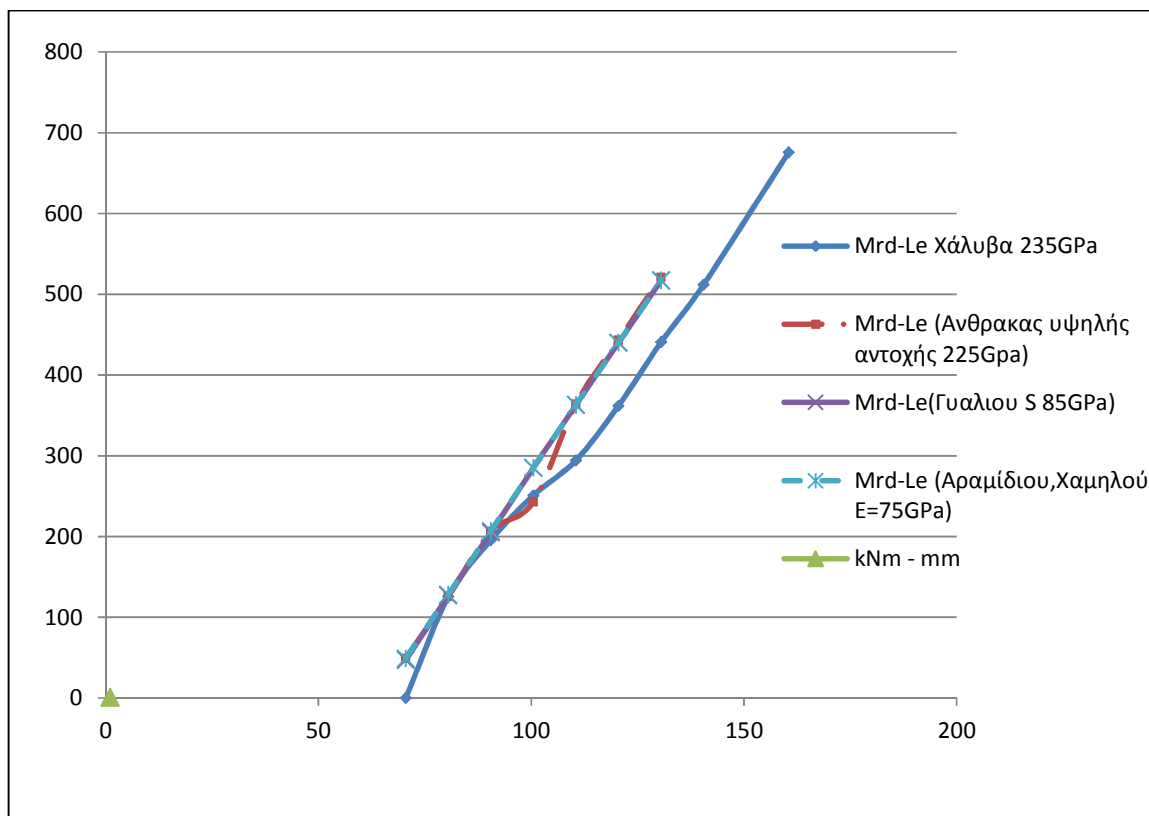


Διάγραμμα 11: Σχέση ροπής αντοχής(χ) με αρ. στρώσεων , για διαφορετικά πάχη στρώσεων Άνθρακα υψηλής αντοχής

5.3 ΑΛΛΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ (ΜΕΓΙΣΤΑ,ΣΧΕΣΕΙΣ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΑΠ)

Μήκος αγκύρωσης L_e (Μεταξύ υλικών)

Στο παρακάτω [διάγραμμα 12] ροπής αντοχής – μήκους αγκύρωσης, παρατηρούμε ότι μεταξύ των σύνθετων υλικών δεν υπάρχει ουσιαστική μεταβολή του L_e , παρά την διαφορά στο μέτρον ελαστικότητας τους (δε μπορεί ούτε να ξεχωρίσει η κάθε καμπύλη). Αυτό σε καμία περίπτωση, δεν θα μπορούσε να προκύψει κοιτάζοντας μόνο τον τύπο του L_e (1.10). Άρα αποδεικνύεται ότι το L_e εξαρτάται έμμεσα κ από άλλα μεγέθη που δεν φαίνονται αμέσως. Αυτό είναι ένα από τα παραδείγματα όπου μας δείχνουν ότι απαιτείται έρευνα κ μελέτη για τη διαστασιολόγηση της ενίσχυσης γιατί υπάρχουν κρυφές παράμετροι που την επηρεάζουν.



Διάγραμμα 12: Σχέση ροπής αντοχής κ ενεργού μήκους αγκύρωσης L_e ,για χάλυβα κ σύνθετα

Μέγιστα

Υπάρχουν θεωρητικά δύο μέγιστα όρια για την εφαρμογή της μεθόδου και ένα πρακτικό - κατασκευαστικό.

A) Η θραύση του σκυροδέματος στην θλιβόμενη ζώνη.

Η μέθοδος καμπτικής ενίσχυσης που εξετάζεται σε αυτήν την εργασία, έχει ως στόχο την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής της διατομής και δεν μεριμνά για την θλίψη του σκυροδέματος. Για το λόγο λοιπόν αυτό θέλει πολύ προσοχή στις μελέτες, να λαμβάνεται υπόψη η παράμετρος αυτή. Έτσι όπως σπλίζουμε λοιπόν μία δοκό αλλά προσέχουμε να μην εξαντλήσουμε τις αντοχές θλίψης του σκυροδέματος, έτσι και σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να το έχουμε συνέχεια στο νου μας. Η βασική διαφορά όμως είναι ότι στη περίπτωση που εξετάζουμε, δεν έχουμε την δυνατότητα, (ή διαφορετικά ο κανονισμός δεν μας δίνει τη δυνατότητα μόνο με τη χρήση ελασμάτων) να αυξήσουμε την θλιπτική αντοχή με θλιβόμενο οπλισμό. Παρά μόνο τον ήδη υπάρχοντα μέσα στο δοκάρι. Άρα η θλιπτική δύναμη που θα πάρει η διατομή από την κάμψη της δοκού, δεν μπορεί να ξεπερνάει την θλιπτική αντοχή της. Για να ευρεθεί αυτό το μέγιστο όριο, αρκεί να βρούμε τη μέγιστη ροπή αντοχής που μπορεί να πάρει η διατομή, λόγω της θλιβόμενης περιοχής. Έχοντας τον θλιβόμενο οπλισμό και την ποιότητα του σκυροδέματος, μέσω πινάκων οπλισμένου σκυροδέματος, μπορούμε να βρούμε την μ_{sd} της διατομής άρα κ την M_{Rd} (ροπή αντοχής) και θα πρέπει να προσέξουμε να μην την ξεπεράσουμε. Έτσι δίνεται ένα ανώτατο όριο και η γνώση για το ποιες είναι οι δυνατότητες της διατομής για καμπτική ενίσχυση με ελάσματα, χωρίς να χρειαστεί να την ενισχύσουμε με περισσότερους τρόπους.

B) Όριο για Διαρροή του χάλυβα πριν την αποκόλληση του σκυροδέματος.

Σε αντίθεση με το όριο της θλίψης του σκυροδέματος, το όριο αυτό δεν είναι υποχρεωτικό αλλά είναι ευεργετικό για τη σχεδίαση. Μη υπερβαίνοντας αυτό το όριο, εξασφαλίζεται πάντα η διαρροή του χάλυβα να γίνει πριν από την αποκόλληση του σκυροδέματος. Το

θετικό αυτού του ορίου, είναι ότι η αστοχία που θα προκληθεί, θα είναι πλαστική και όχι ψαθυρή. Γενικά στις κατασκευές, η εξασφάλιση της πλαστικής αστοχίας είναι πολύ σημαντική για το σχεδιασμό κ τη μελέτη.

Φυσικά αυτό το όριο ισχύει μόνο για την καμπτική ενίσχυση με χαλύβδινα ελάσματα γιατί μόνο αυτά έχουν πλαστική συμπεριφορά. Με την χρήση σύνθετων υλικών, χάνουμε την δυνατότητα για σχεδιασμό πλαστικής αστοχίας, λόγω της μεγάλης ψαθυρότητας των σύνθετων αυτών υλικών. Άρα δεν έχει και λόγο να υπάρχει αυτό το όριο σχεδιασμού.

Γ) Όριο πρακτικά μικρών αριθμός στρώσεων

Το όριο αυτό δεν έχει θεωρητικό υπόβαθρο. Μόνο πρακτικό και κατασκευαστικό για το μελετητή. Από τη στιγμή που τα ελάσματα(κυρίως τα σύνθετα, λόγω μικρού πάχους στρώσης) χάνουν την αντοχής αν χρησιμοποιηθούν πολλές στρώσεις, άρα από ένα σημείο κ μετά, δεν έχει πρακτικό νόημα η χρήση τους.

Ειδικός έλεγχος πρόωρης διατμητικής αστοχίας του αρχικού στοιχείου στην περιοχή απόληξης του ελάσματος

Δεν έγινε εκτενής ανάλυση σε αυτή την κατηγορία αστοχίας, διότι είναι ειδικής φύσεως αλλά και δεν σχετίζεται άμεσα με τις άλλες δύο μορφές αστοχίας(παρά μόνο με την ροπή αντοχής που θα επιλεγεί στη μελέτη). Ταυτόχρονα η διαστασιολόγηση της είναι πολύ απλή αλλά ο τύπος της δεν είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων. Πρέπει όμως η αστοχία αυτή πάντα να εξετάζεται, ειδικά για μεγάλες ενισχύσεις ροπών αντοχής, διότι αυτός ο τρόπος αστοχίας είναι ο πιο απότομος κ επικίνδυνος.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Μετά από την αριθμητική και παραμετρική έρευνα που στόχευε η παρούσα εργασία, κατάφεραν να βγουν μερικά σημαντικά συμπεράσματα για τα ερωτήματα της εισαγωγής και γενικά με τις παραμέτρους που εμπεριέχονται στην καμπτική ενίσχυση δοκών με ελάσματα ή FRP. Εδώ θα παρατεθούν σε συντομία τα πιο κρίσιμα τα συμπεράσματα αυτά, καθώς αναλυτικότερη περιγραφή έχει δοθεί στα προηγούμενα βήματα της εργασίας.

Γενικά η διαστασιολόγηση της καμπτικής ενίσχυσης με ελάσματα βασίζεται στην διαφορά υπάρχουσας και επιθυμητής αντοχής. Το σημαντικότερο συμπέρασμα είναι ότι η καμπτική ενίσχυση με ελάσματα ή FRP είναι πρακτικά χρήσιμη μόνο για μικρές αυξήσεις αντοχής, ειδικά για σκυροδέματα πολύ μικρής αντοχής. (στα δικά μας δεδομένα, πρακτικά δεν ξεπερνούσε 50 περίπου kNm).

Απαντώντας λοιπόν στα αρχικά ερωτήματα, ακολουθούν τα εξής:

Οι σημαντικότεροι παράγοντες είναι:

- 1) Πλάτος του ελάσματος. Η αύξηση του, αυξάνει πολύ την αντοχή. Αρκεί να γίνει χρήση υλικού ενίσχυσης μεγάλης αντοχής και ταυτόχρονα να δίνεται αρκετό ελεύθερο μήκος δοκού ώστε να μπορεί να αγκυρωθεί η μεγάλη ροπή, χωρίς κίνδυνο αποκόλλησης του σκυροδέματος
- 2) Ποιότητα του σκυροδέματος. Με την αύξηση της, υπάρχει βελτίωση της αντοχής της ενίσχυσης. Για χάλυβα,(δηλαδή μικρή αντοχή), μέχρι την διαρροή του, το ποσοστό βελτίωσης είναι της τάξης του -20% πάχος ελάσματος από c16/20 σε c30/37. Όταν όμως γίνει κρίσιμη η αστοχία αποκόλλησης του σκυροδέματος τότε, η επιρροή της ποιότητας του, αυξάνεται απότομα. Μπορεί να φτάσει κ το -200% πάχους ελάσματος από c16/20 σε c30/37. Για σύνθετα υλικά, ο βαθμός επιρροής είναι μεγάλος ακόμη κ σε μικρή ενίσχυση, γιατί είναι συνεχώς κρίσιμη η αστοχία του σκυροδεματος,
- 3) Αριθμός στρώσεων. Ο αριθμός στρώσεων επηρεάζει κατά πολύ την πρακτικά δυνατή ενίσχυση καμπτικής αντοχής με ελάσματα. Ειδικά για τα σύνθετα υλικά, λόγω του μικρού τους πάχους(0.1-0.4mm), φαίνονται απαγορευτικά για μεγάλες αυξήσεις

αντοχής γιατί απαιτούν πάρα πολλές στρώσεις. Για μικρές αυξήσεις όμως είναι ευνοϊκές(μείωση απαιτούμενου πάχους). Αντίθετα ο χάλυβας είναι ευνοϊκότερος για μεγαλύτερες αυξήσεις αντοχής.

- 4) Μέτρο Ελαστικότητας. Παρατηρήθηκε σημαντική επιρροή του μέτρου ελαστικότητας (E) του υλικού ενίσχυσης , στην διαστασιολόγηση αυτής. Όσο μειώνεται το E, αυξάνεται το απαιτούμενο πάχος. Για τα σύνθετα υλικά φαίνεται το E να μην επηρεάζει το ενεργό μήκος αγκύρωσης (Le).
- 5) Μέγιστα. Τα μέγιστα όρια είναι 3.Το όριο θραύσης του σκυροδέματος από θλίψη, είναι το πιο σημαντικό γιατί δε υπάρχει δυνατότητα να ξεπερασθεί. Επίσης υπάρχει το όριο αποκόλλησης του σκυροδέματος πριν το χάλυβα (μόνο για χρήση χαλύβδινων ελασμάτων), όπου αν συνεκτιμηθεί, τότε εξασφαλίζεται η πλαστική αστοχία του χάλυβα κ γενικά του στοιχείου. Τέλος υπάρχει το όριο των στρώσεων. Πρακτικά μέγιστο 3 στρώσεις για το χάλυβα κ 5 για τα σύνθετα. Κ αυτό γιατί η εφαρμογή του μειώνεται με κάθε στρώση. Άρα η αντοχή μειώνεται. Και πρακτικά δεν μπορούν να τοποθετηθούν μεγάλος αριθμός στρώσεων.

ΣΤΟΧΟΣ: Τα παραπάνω συμπεράσματα αλλά κ οι αναλύσεις πίσω από αυτά, στοχεύουν στο να βοηθήσουν στην κατανόηση του μηχανικού στις διατάξεις του Καν.Επε. .Στοχεύουν όμως και στο να αποκτήσει ο αναγνώστης μερικά βασικά κριτήρια που θα μπορεί να χρησιμοποιεί για μια προσεγγιστική προμελέτη μίας ενίσχυσης. Σε συνεργασία με την κατανόηση και των άλλων στοιχείων που επηρεάζουν τις υπόλοιπες μεθόδους, θα μπορεί ειδικά στο αρχικό στάδιο προμελέτης, να διαλέξει μεταξύ των διαφόρων επιλογών ενίσχυσης και να αναγνωρίζει εύκολα τα όρια, τα θετικά και τις αδυναμίες αυτών.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2012
- [2] Δρίτσος Σ. “ Ενισχύσεις και Επισκευές Κατασκευών Οπλισμένου σκυροδέματος”, Πάτρα 2011
- [3] Φαρδής Μ. “ Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος”, Πάτρα 2011
- [4] www.sciencedirect.com
- [5] www.episkeves.civil.upatras.gr/

