

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΜΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΑ ΕΠΙΚΟΛΛΗΤΑ ΕΛΑΣΜΑΤΑ

**ΚΟΥΜΠΟΥΛΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ
ΠΑΠΑΠΟΣΤΟΛΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ**

Περίληψη

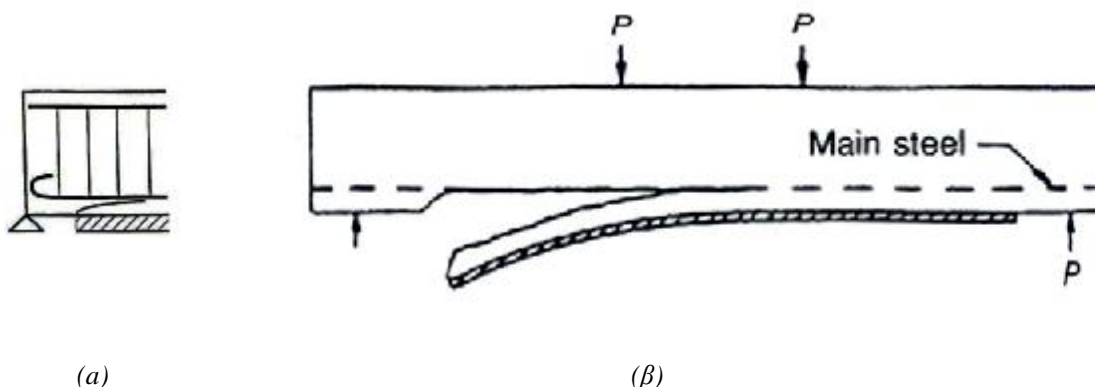
Η παρούσα εργασία επιδιώκει, κάνοντας εκτενή αναφορά στη διεθνή βιβλιογραφία, να παρουσιάσει τη μέθοδο ενίσχυσης δοκών με χαλύβδινα επικολλητά ελάσματα, δίνοντας έμφαση στο πρόβλημα της απόσχισης στις ακραίες περιοχές που αυτά παρουσιάζουν. Στις παρακάτω ενότητες περιγράφονται οι κύριες μορφές απόσχισης καθώς και οι αιτίες που τις προκαλούν, ενώ γίνεται αναφορά στον επιθυμητό τρόπο αστοχίας των ενισχυμένων δοκών. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η επιρροή του πάχους των χαλύβδινων ελασμάτων στην αντοχή, την πλαστιμότητα καθώς και στον τρόπο της αστοχίας. Εκτενή αναφορά γίνεται στις προτάσεις που έχουν δημοσιευθεί σε επίπεδο ελέγχου, οι οποίες έχουν σκοπό την πρόβλεψη για την αποφυγή του φαινομένου της πρόωρης αστοχίας λόγω απόσχισης και περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό των διατμητικών και καμπτικών τάσεων απόσχισης, των ορίων στα οποία αυτές κυμαίνονται καθώς και τις αλληλεπιδράσεις διατμητικής και καμπτικής έντασης. Τέλος γίνεται παρουσίαση και σύγκριση των προτεινόμενων μέτρων που πρέπει να ληφθούν κυρίως υπό τη μορφή αγκύρωσης.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αναστύλωση ή η αύξηση της φέρουσας ικανότητας μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα, ήταν πάντα μια δύσκολη διαδικασία και οι επαρκείς λύσεις συχνά συνεπάγονται εκτεταμένες εργασίες. Έτσι η χρήση των εξωτερικών ενισχύσεων αντιπροσωπεύει μεγάλη πρόοδο στον τομέα αυτό. Μια τέτοια αξιόπιστη και ιδιαίτερα ανεπτυγμένη μέθοδος καμπτικής ενίσχυσης δοκών, είναι η τεχνική των χαλύβδινων επικολλητών ελασμάτων συγκολλημένων με κατάλληλη εποξειδική ρητίνη. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου όπως το χαμηλό κόστος, η ευκολία της εφαρμογής της (ακόμα και αν το κτίριο είναι σε χρήση), η ελάχιστη όχληση, η ασήμαντη αύξηση του ύψους της δοκού, η ταχύτητα εκτέλεσης της εργασίας, είναι οι λόγοι που την καθιστούν ευρέως εφαρμόσιμη. Σημειώνεται ότι μετά από περίοδο μόλις επτά ημερών το συγκολλητικό υλικό φθάνει στην τελική του αντοχή και το σύνθετο στοιχείο μπορεί να φορτιστεί. Ακόμα αρκετές πειραματικές έρευνες απέδειξαν ότι η εφαρμογή της μεθόδου έχει σημαντικά αποτελέσματα, όχι μόνο στην αύξηση της καμπτικής ικανότητας και της ακαμψίας, αλλά και στη μείωση των παραμορφώσεων και της αναμενόμενης ρηγμάτωσης [2]. Έδειξαν ακόμα ότι η τεχνική αυτή, έχει την ίδια αποτελεσματικότητα σε στοιχεία που έχουν υποστεί βλάβες και ότι η καμπτική αντοχή και η ακαμψία των επισκευασμένων και ενισχυμένων στοιχείων είναι μεγαλύτερη από αυτή του αρχικού[2,4].

Το μεγαλύτερο πρόβλημα της μεθόδου εντοπίζεται στις ακραίες περιοχές των ελασμάτων, όπου παρατηρείται ιδιαίτερα αυξημένη συγκέντρωση ορθών και διατμητικών τάσεων οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε πρόωρη αστοχία του ενισχυμένου μέλους, πριν δηλαδή εξαντλήσει την καμπτική του φέρουσα ικανότητα ακόμα και σε μεγέθη σχεδιασμού. Τέτοια μορφή αστοχίας δεν απαντάται σε συνηθισμένες -μη ενισχυμένες- δοκούς και συνοδεύεται από έντονη ρηγμάτωση που ξεκινά από το σημείο πέρατος του ελάσματος και συνεχίζεται οριζόντια στο επίπεδο των εσωτερικών ράβδων οπλισμού του στοιχείου (σχήμα 1). Σε πολλές

περιπτώσεις η εξέλιξη της ρηγματώσης λαμβάνει χώρα ταχύτατα με αποτέλεσμα να μην 'προειδοποιεί' για την επερχόμενη αστοχία ,γεγονός που είναι ανεπιθύμητο.



(α) Αρχή της ρηγματώσης (β) αστοχία στο επίπεδο του διαμήκους εσωτερικού οπλισμού

2.ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Πριν αναφερθούν οι κυριότερες μορφές αστοχίας λόγω απόσχισης του σύνθετου στοιχείου, θεωρήθηκε χρήσιμο να προσδιορισθεί ο επιθυμητός τρόπος αστοχίας και να αναλυθεί ο μηχανισμός του.

Το ενισχυμένο μέλος επιδιώκεται να παρουσιάζει καμπτική αστοχία ανάλογη με αυτή των μη ενισχυμένων δοκών εξαντλώντας την αντοχή του σε κάμψη τόσο σε επίπεδο σχεδιασμού όσο και σε επίπεδο τελικής κατάστασης αστοχίας. Η ρηγματώση πρέπει να είναι ομοιόμορφα διανεμημένη, παρουσιάζοντας κατακόρυφες καμπτικές ρωγμές (φωτ. 1), και το εξωτερικό επικολητό έλασμα πρέπει να παραμορφώνεται παράλληλα με το εφελκόμενο πέλμα της δοκού παρουσιάζοντας όλκιμη συμπεριφορά .Ανάλογη συμπεριφορά πρέπει να παρουσιάζουν και οι εσωτερικοί ράβδοι οπλισμού. Ιδιαίτερα ανεπιθύμητοι είναι η αστοχία στη διεπιφάνεια ελάσματος-δοκού, το “ξεκόλλημα” δηλαδή και η απομάκρυνση του ελάσματος από τη δοκό. Γίνεται επομένως αντιληπτό ότι η ενίσχυση θεωρείται επιτυχής όταν το σύνθετο στοιχείο παρουσιάζει απόλυτα ομοιόμορφη συμπεριφορά σαν να ήταν “ένα σώμα”.

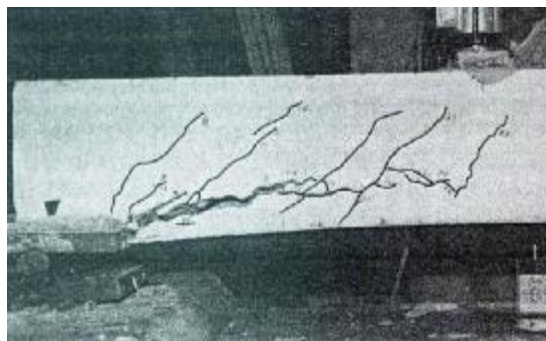


Φωτο1: Επιθυμητή καμπτική αστοχία της ενισχυμένης δοκού

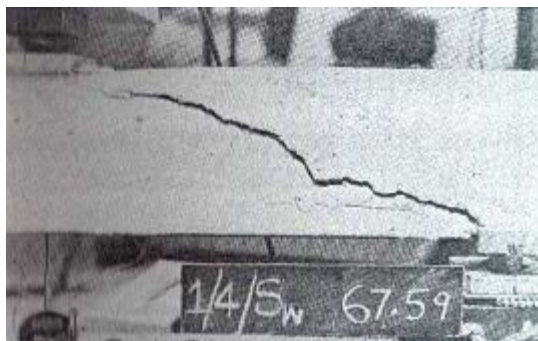
Το φαινόμενο της απόσχισης περιγράφεται στη βιβλιογραφία [6,7] με δύο κύριες μορφές αστοχίας α) διατμητική απόσχιση και β) καμπτική απόσχιση.

Ο διατμητικός τύπος απόσχισης είναι η πιο επικίνδυνη μορφή αστοχίας και οφείλεται σε έντονα διατμητικές τάσεις που συγκεντρώνονται στις περιοχές πέρατος των ελασμάτων λόγω

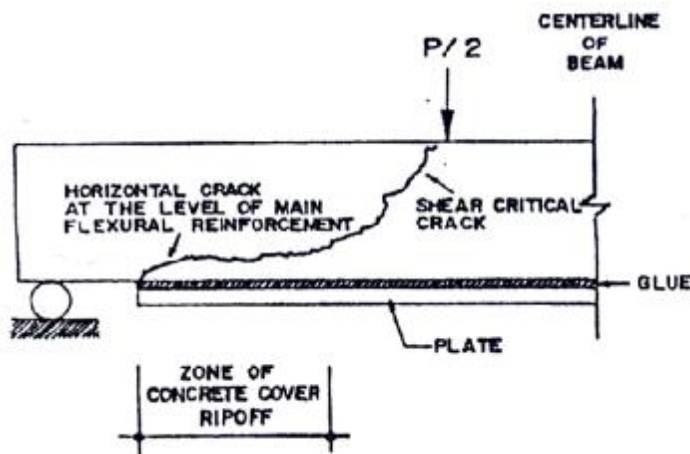
σχετικά ισχυρής τέμνουσας. Επομένως τέτοια μορφή αστοχίας αναμένεται σε σχετικά χαμηλές τιμές του λόγου M/V (καμπτικών ροπών/διατμητικών δυνάμεων) και ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της είναι η ταχύτατη ανάπτυξη εκτεταμένων διαγώνιων διατμητικών ρωγμών, που ξεκινούν από την περιοχή ρηγμάτωσης απόσχισης (φωτ. 2 και 3) και που τελικά οδηγούν σε διατμητική αστοχία της δοκού.



Φωτ. 2: Διατμητική απόσχιση με εκτεταμένες διαγώνιες ρωγμές.



Φωτ. 3: Διατμητική απόσχιση με μία κύρια διαγώνια ρωγή.

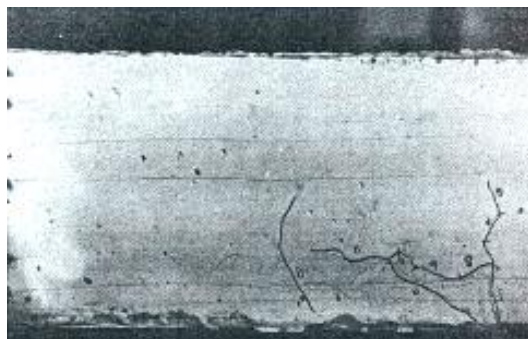


Σχήμα 2: Σχηματική αναπαράσταση του διατμητικού τύπου απόσχισης

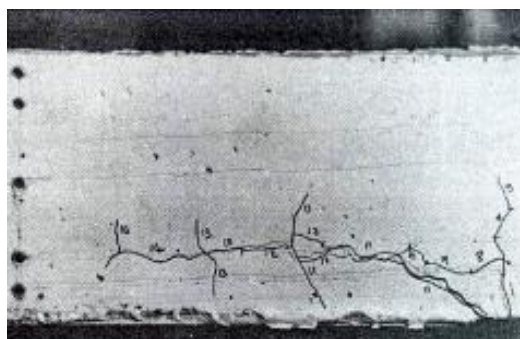
Ο καμπτικός τύπος απόσχισης αντίστοιχα, εμφανίζεται σε συνθήκες έντονης κάμψης με σχετικά μεγάλες τιμές του λόγου M/V και συνοδεύεται με έντονες κατακόρυφες καμπτικές ρωγμές, που ξεκινούν από την περιοχή ρηγμάτωσης λόγω απόσχισης και επεκτείνονται προοδευτικά με την αύξηση του φορτίου έως την τελική καμπτική αστοχία του ενισχυμένου μέλους. Στις φωτογραφίες 4, 5 και 6 φαίνεται η προοδευτική αστοχία δοκού στην καμπτική μορφή απόσχισης.

Στη βιβλιογραφία [8] αναφέρεται και μια άλλη μορφή πρόωρης αστοχίας, η οποία αν και δεν συνιστά απόσχιση, αλλά αποτυχία της συγκόλλησης, αξίζει να αναφερθεί. Τέτοια μορφή αστοχίας λαμβάνει χώρα στη διεπιφάνεια δοκού-ελάσματος και έχει σαν αποτέλεσμα την γρήγορη αποκόλληση του τελευταίου. Αυτή η μορφή είναι εξαιρετικά ανεπιθύμητη γιατί όταν συμβαίνει χάνεται η ενίσχυση που παρέχει το έλασμα στο στοιχείο και η δοκός

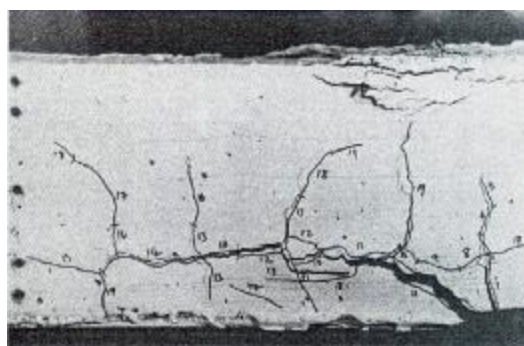
συμπεριφέρεται σαν απλή. Με την κατάλληλη όμως επιλογή του συγκολλητικού υλικού αλλά και του πάχους του ελάσματος, όπως θα δειχθεί αργότερα, το φαινόμενο μπορεί να αποφευχθεί.



Φωτ. 4: Ρηγματώση δοκού ακριβώς πριν τη μέγιστη απόσχιση



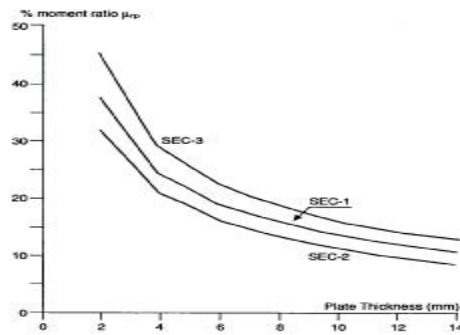
Φωτ. 5: Η ίδια δοκός ακριβώς μετά τη μέγιστη ροπή απόσχισης



Φωτ. 6: Καμπτική μορφή απόσχισης τη στιγμή της αστοχίας

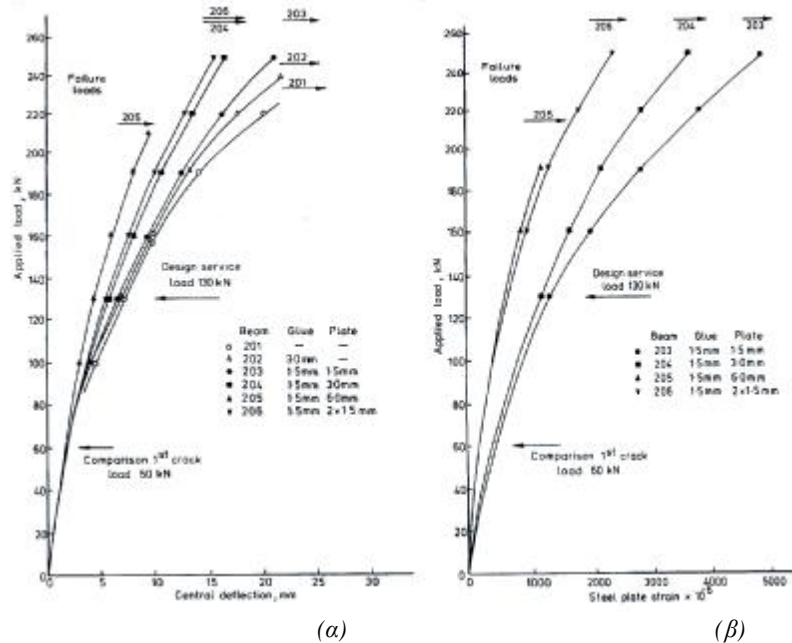
3.ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ

Όλες οι πειραματικές έρευνες [1,2,3,8,11,12] όπου μελετήθηκε και αναλύθηκε η συμπεριφορά ενισχυμένων δοκών με διάφορα πάχη ελάσματος, απέδειξαν ότι η επιλογή του πάχους είναι ένα κρίσιμο σημείο καθώς οι μεταβολές του επηρεάζουν σημαντικά το μέγεθος των τάσεων στη περιοχή πέρατος ,το μέγεθος των παραμορφώσεων αλλά και τον τρόπο της αστοχίας. Συγκεκριμένα διαπιστώθηκε ότι όσο αυξάνει το πάχος του ελάσματος αυξάνουν οι διατμητικές κυρίως τάσεις της διεπιφάνειας στις ακραίες περιοχές, με αποτέλεσμα να μειώνεται η μέγιστη αντοχή της δοκού σε πρόωρη αστοχία. Αυτό φαίνεται καθαρά στο διάγραμμα του σχήματος 3 όπου ο κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύει τον λόγο της μέγιστης ροπής που μπορεί να υποστεί η δοκός πριν παρουσιάσει απόσχιση προς τη θεωρητικά υπολογιζόμενη μέγιστη καμπτική ροπή αντοχής της σύνθετης διατομής ενώ ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει το πάχος του ελάσματος. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι για διάφορες περίπτωση δοκών όσο αυξάνει το πάχος του ελάσματος μειώνεται η αντοχή σε απόσχιση [12], ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι ο παραπάνω λόγος των ροπών μειώθηκε κατά 36% με την αύξηση του πάχους από 4 σε 8mm.



Σχήμα 3

Στη περίπτωση της επίδρασης στη παραμορφωσιακή κατάσταση της σύνθετης δοκού βρέθηκε ότι τα βέλη κάμψης και οι παραμορφώσεις των ελασμάτων και των ράβδων οπλισμού μειώθηκαν με την αύξηση του πάχους [2,11]. Αυτό όμως καθιστά το στοιχείο λιγότερο πλάστιμο ενώ αυξάνει την πιθανότητα αποκόλλησης του ελάσματος γεγονός που είναι ανεπιθύμητα. Τα παραπάνω φαίνονται στα διαγράμματα του σχήματος 4 όπου για διάφορες τιμές του πάχους του έχουν καταγραφεί τα βέλη κάμψης της δοκού (α) και οι παραμορφώσεις του ελάσματος (β) ως την αστοχία. Από το διάγραμμα (β) φαίνεται ότι σχετικά λεπτά ελάσματα της τάξεως 1,5-3,0 mm ανέπτυξαν εκτεταμένη διαρροή.



Σχήμα 4: Επίδραση του πάχους του ελάσματος διαφόρων δοκών στα βέλη κάμψης (α) και στην παραμόρφωση των ελασμάτων (β) που έχουν φορτιστεί ως την αστοχία

Όσον αφορά τον τρόπο της αστοχίας, αποδείχθηκε ότι με την αύξηση του πάχους του ελάσματος η μορφή της αστοχίας άλλαξε διαδοχικά από την επιθυμητή καμπτική σε απόσχιση και σε αποκόλληση στο επίπεδο συγκόλλησης [2,3,11]. Συγκεκριμένα αποτελέσματα πειραμάτων [2] έδειξαν ότι δοκοί με 1,5mm έλασμα αστόχησαν όλες καμπτικά με παράλληλη διαρροή των ράβδων οπλισμού και της εξωτερικής ενίσχυσης. Δοκοί με 3 mm έλασμα εμφάνισαν μεν ρηγμάτωση απόσχισης αλλά ο τελικός τύπος της αστοχίας ήταν καμπτικός και διαπιστώθηκε διαρροή στους ράβδους οπλισμού και στην

εξωτερική ενίσχυση ενώ σχεδόν εξάντλησαν όλη την θεωρητικά υπολογιζόμενη καμπτική αντοχή τους. Αντίθετα δοκοί με 6 mm έλασμα εμφάνισαν όλες πρόωρη αστοχία λόγω απόσχισης χωρίς καμία διαρροή των μεταλλικών στοιχείων.

4.ΕΛΕΓΧΟΙ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε η αστοχία απόσχισης οφείλεται στη συγκέντρωση τάσεων στη περιοχή πέρατος των ελασμάτων. Γίνεται αντιληπτή λοιπόν η αναγκαιότητα μιας μεθόδου προσδιορισμού των μέγιστων διατμητικών κυρίως αλλά και των κύριων τάσεων που μπορούν να αναπτυχθούν και να θεσπιστούν έλεγχοι ώστε να μην ξεπεραστούν. Στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί τρεις μέθοδοι ο οποίοι αναπτύσσονται παρακάτω.

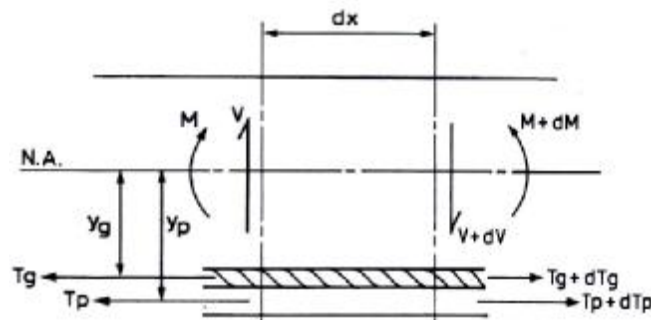
Α)Η πρώτη αρκετά ολοκληρωμένη μέθοδος [3] κάνοντας απλή ελαστική θεώρηση στοχεύει στον προσδιορισμό μέγιστης διατμητικής τάσης στη περιοχή απόσχισης ώστε να ελέγχεται αν αυτή ξεπερνά την μέγιστη διατμητική αντοχή. Θεωρείται μια απλά εδραζόμενη δοκός ενισχυμένη με χαλύβδινο έλασμα στην εφελκύμενη παρειά. Οι δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ δυο διαδοχικών διατομών που απέχουν απόσταση dx όπως φαίνεται στο Σχήμα 5 θα ισούνται με το διατμητικό φορτίο στη διεπιφάνεια στο μήκος dx . Έτσι ισχύει η παρακάτω ισοροπία:

$$T_p + dT_p - T_p = \tau_{bp} b dx$$

Όπου ο όρος $\tau_{bd} b dx$ εκφράζει το διατμητικό φορτίο στη διεπιφάνεια ρητίνης ελάσματος. Απο την παραπάνω σχέση προκύπτει:

$$\tau_{bd} = \frac{1}{b} \frac{dT_p}{dx} \quad (1)$$

που τ_{bd} είναι η τάση κατά μήκος της διεπιφάνειας ρητίνης-ελάσματος και b είναι το πλάτος του ελάσματος.



Σχήμα 5: Οι δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των δύο διεπιφανειών του ελάσματος

Σύμφωνα με τη θεωρία της κάμψης ισχύει ότι:

$$\frac{dT_p}{A_p a_p} = \frac{dM y_p a_p}{I} = \frac{V d_x y_p}{I}$$

Από την παραπάνω ισότητα προκύπτει:

$$t_{bd} = \frac{VA_p y_p a_p}{I}$$

Όπου A_p είναι η διατομή του ελάσματος, a_p είναι ο λόγος των μέτρων ελάσματος προς σκυροδέματος $E_{ελασμ.}/E_{σκυροδ.}$ (ο οποίος ισούται περίπου με 8) και I είναι η ροπή αδράνειας της σύνθετης διατομής.

Για τη διεπιφάνεια ρητίνης-σκυροδέματος θεωρώντας ότι το πλάτος του στρώματος της ρητίνης είναι ίδιο με αυτό του ελάσματος b από τη σχέση (1) προκύπτει:

$$t_{bc} = \frac{dT_p + dT_g}{bdx} \quad (2)$$

Και

$$dT_g = \frac{A_g a_g V y_g dx}{I}$$

που a_g είναι ο λόγος $E_{ρητιν.}/E_{σκυροδ.}$ ο οποίος για διάφορους συνδυασμούς των περιπτώσεων ρητίνης σκυροδέματος κυμαίνεται μεταξύ 0,03-0,3 . Επομένως αφού ο λόγος a_p είναι πολύ μεγαλύτερος από τον λόγο a_g και ισχύει ακόμα ότι $y_p > y_g$ μπορεί να θεωρηθεί ότι η επιρροή της δύναμης dT_g στη σχέση (2) είναι μηδενική και μπορεί να αγνοηθεί και έτσι $\tau_{bp} = \tau_{bc} = \tau$.

Έτσι η τελική έκφραση για τη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια ελάσματος δοκού μπορεί να γράφει ως εξής [4]:

$$t = \frac{VAy}{Ib}$$

Όπου τ είναι η διατμητική τάση ελάσματος δοκού, V είναι η μέγιστη τέμνουσα σχεδιασμού, A είναι το ανηγμένο σε σκυρόδεμα εμβαδό διατομής του ελάσματος ($=A_{ελασμ} E_{ελασμ.}/E_{σκυροδ.}$), y είναι η απόσταση του κέντρου βάρους του ελάσματος από τον ουδέτερο άξονα της σύνθετης διατομής, I είναι η ροπή αδράνειας της σύνθετης διατομής και b είναι το πλάτος του ελάσματος.

Η ίδια μελέτη προτείνει ότι η μέγιστη διατμητική τάση στις ακραίες περιοχές των ελασμάτων προσεγγιστικά ισούται με 2τ ενώ η μέγιστη διατμητική αντοχή να θεωρείται ίση με $\sqrt{2}$ χεφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος.

Έτσι πρέπει να ελέγχεται ότι η μέγιστη διατμητική τάση τ_{max} πρέπει να είναι μικρότερη από μέγιστη διατμητική αντοχή σχεδιασμού f_{ctd} :

$$t_{max} < \sqrt{2} f_{ctd}$$

Για την ολοκλήρωση της παραπάνω μεθόδου έλεγχου πρέπει να αναφερθούν οι προτάσεις της ίδιας ομάδας μελετητών που αφορούν τις διαστάσεις των ελασμάτων [2], οι οποίες

προέκυψαν από σχετική πειραματική έρευνα. Συγκεκριμένα προτείνεται το μεγαλύτερο πάχος των ελασμάτων που μπορεί να εφαρμοσθεί να είναι της τάξεως των 3mm ενώ ο λόγος πλάτους προς πάχος να μην είναι μικρότερος του 50. Ακόμα από την ίδια αναφορά έχει προταθεί ως κριτήριο σχεδιασμού, το αδιάστατο ύψος της θλιβόμενης ζώνης x/d να μην ξεπερνά το 0,4 .

Β)Μια άλλη προσέγγιση του θέματος [8] η οποία στηρίζεται σε ανάλυση με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, έχει σκοπό να αποτελέσει μια ολοκληρωμένη πρόταση για σχεδιασμό και έλεγχο δοκών με χαλύβδινα επικολητά ελάσματα. Έτσι διατυπώνονται τρεις έλεγχοι σχεδιασμού που πρέπει να τηρούνται για το ενισχυμένο μέλος: α)προτείνεται μια μέθοδος υπολογισμού του πάχους του ελάσματος, (ώστε αυτό να αστοχεί σε κάμψη με ταυτόχρονη διαρροή του ελάσματος) και του μέγιστου πάχους ώστε να γίνεται έλεγχος, β)ελέγχονται οι ορθές και διατμητικές τάσεις της διεπιφάνειας στα άκρα ώστε να εξασφαλίζεται ότι δεν θα προκύψει αποκόλληση του ελάσματος, και υπολογίζεται η μέγιστη απόσταση από το σημείο στήριξης ως το άκρο του ελάσματος, γ)ελέγχεται η διατμητική ικανότητα της ενισχυμένης δοκού ώστε να μην συμβαίνει αστοχία λόγω απόσχισης, στην ακραία περιοχή.

Ο πρώτος έλεγχος αναφέρει ότι το εφαρμοζόμενο πάχος σχεδιασμού d_p του ελάσματος μπορεί να προσδιορισθεί από την παρακάτω σχέση:

$$d_p = \frac{-A_2 + \sqrt{A_2^2 - 4A_1A_3}}{2A_1}$$

Με:

$$A_1 = \frac{b_p f_{yp}}{2} \left[1 - \frac{b_p f_{yp}}{0.85 f_c b_c} \right] \quad A_2 = b_p f_{yp} \left[h_c + d_c - \frac{A_s f_{ys}}{0.85 f_c b_c} \right]$$

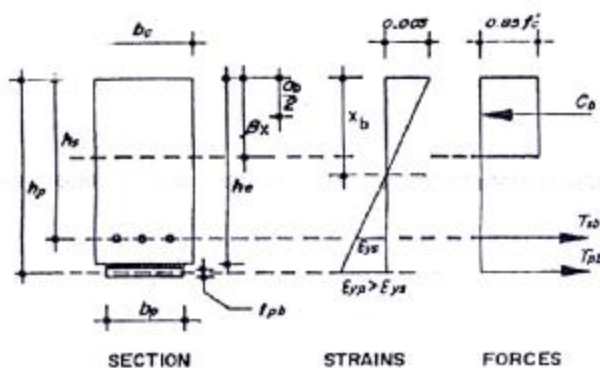
$$A_3 = \left[A_s f_{ys} \left(d_s - \frac{A_s f_{ys}}{2(0.85) f_c b_c} \right) - \frac{M_u}{0.9} \right]$$

Όπου b_p το πλάτος του ελάσματος , f_{ys}, f_{yp} η τάση διαρροής των εσωτερικών ράβδων οπλισμού και του ελάσματος αντίστοιχα, f_c η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, b_c το πλάτος της δοκού, h_c το ύψος της δοκού, d_c το ύψος της δοκού, A_s το εμβαδόν του χάλυβα οπλισμού, d_s το στατικό ύψος της δοκού (απόσταση από άνω παρειά ως το άξονα του εσωτερικού οπλισμού) και M_u η μέγιστη ροπή σε οριακή κατάσταση αστοχίας.

Στη συνέχεια ελέγχεται αν $d_p \leq t_{pb}$ όπου t_{pb} το μέγιστο ύψος του ελάσματος που μπορεί να εφαρμοσθεί ώστε να εξασφαλιστεί η κατάλληλη καμπτική αστοχία και ορίζεται ως εξής :

$$t_{pb} = \frac{\beta x_b (0.85 f_c) b_c - A_s f_{ys}}{b_p f_{yp}}$$

Όπου β είναι το ύψος του ουδέτερου άξονα και x_b είναι το ύψος από το θλιβόμενο πέλμα της δοκού ως το σημείο μηδενισμού των παραμορφώσεων όπως φαίνεται στο σχήμα 6.



Σχήμα 6

Ο δεύτερος έλεγχος που προτείνεται αναφέρεται στις μέγιστες ορθές (σ_o) και μέγιστες διατμητικές (τ_o) τάσεις στη διεπιφάνεια δοκού-ελάσματος και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tau_o + \sigma_o \tan 28^\circ \leq c_{all} \quad (3)$$

Όπου c_{all} αναφέρεται ως ο συντελεστής της ανεκτής διατμητικής συνοχής (αντοχή συνάφειας) σε MPa της επιφάνειας. Η μέγιστη διατμητική τάση αναφέρεται ως :

$$\tau_o = a_1 f_t \left(\frac{C_{R1} V_o}{f_c} \right)^{\frac{5}{4}} \quad (4)$$

Όπου:

$$C_{R1} = \left[1 + \left(\frac{K_s}{E_p b_p d_p} \right)^{\frac{1}{2}} a^* \right] \frac{b_p d_p}{I b_a} (h_p - h)$$

Όπου a_1 είναι ένας εμπειρικά προσδιορισμένος συντελεστής ασφάλειας ίσος με 35, f_t είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος σε MPa, V_o είναι η συνολική διατμητική δύναμη στην άκρη του ελάσματος, $a^* = M_o / V_o$, M_o είναι η συνολική καμπτική ροπή, I είναι η ροπή αδράνειας της ανηγμένης σε σκυροδέμα διατομής του ελάσματος, $K_s = G_a (b_a / d_a)$ όπου G_a , b_a , d_a είναι το μέτρο διάτμησης, το πλάτος και το μήκος του συγκολλητικού υλικού αντίστοιχα, h_p είναι το στατικό ύψος της σύνθετης δοκού σύμφωνα με το σχήμα 6 και h είναι η απόσταση από το άνω πέλμα ως τον ουδέτερο άξονα ανηγμένης σύνθετης διατομής.

Η μέγιστη ορθή τάση στη διεπιφάνεια αναφέρεται ως :

$$\sigma_o = a_2 C_{R2} \tau_o \quad (5)$$

Όπου:

$$C_{R2} = d_p \left(\frac{K_n}{4 E_p I_p} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Όπου α_2 είναι ένας εμπειρικά προσδιορισμένος συντελεστής ασφάλειας ίσος με 1.10, I_p είναι η ροπή αδράνειας του ελάσματος, $K_n = E_a(b_w/d_w)$ όπου E_a είναι το μέτρο ελαστικότητας του συγκολλητικού υλικού.

Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι τα παραπάνω μεγέθη της διατμητικής και της ορθής τάσης έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία [5] με παραδοχή ελαστικότητας των υλικών ως :

$$\tau_o = C_{R1} V_o \quad \text{και} \quad \sigma_o = C_{R2} \tau_o$$

Ακόμα αν θεωρηθεί a η απόσταση της άκρης του ελάσματος από τη γειτονική στήριξη, τότε για ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου (w_s) σε ένα απλό άνοιγμα (αμφιέριστη δοκός), αυτή προτείνεται να υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$\left[1 + \left(\frac{K_s}{E_p b_p d_p} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{La - a^2}{L - 2a} \right) \right] w_s \left(\frac{L}{2} - a \right) = f_c \left[\frac{C_{all}}{(1 + a_2 C_{R2} \tan 28^\circ) a_1 f_t} \right]^{\frac{4}{5}} \frac{I b_a}{b_p d_p (h_p - h)}$$

Η παραπάνω πολύπλοκη σχέση προκύπτει με αντικατάσταση των εξισώσεων (4) και (5) στην εξίσωση (3) και μπορεί να λυθεί με δόκιμες. Η τιμή επομένως της απόστασης a είναι για την οριακή κατάσταση δηλαδή είναι η μέγιστη δυνατή (α_{max}) και προτείνεται ο παρακάτω έλεγχος

$$\frac{a_{max}}{h_c} \leq 3.0$$

Η διατμητική ικανότητα των ενισχυμένων δοκών V_{up} υπολογίζεται με την παρακάτω διαδικασία:

$$V_{up} = (V_c + k V_s)$$

$$V_c = \frac{1}{6} \left(\sqrt{f_c} + 100 \quad r_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yst} d}{s}$$

$$k = 2.4 e^n$$

$$n = -0.08 C_{R1} C_{R2} 10^6$$

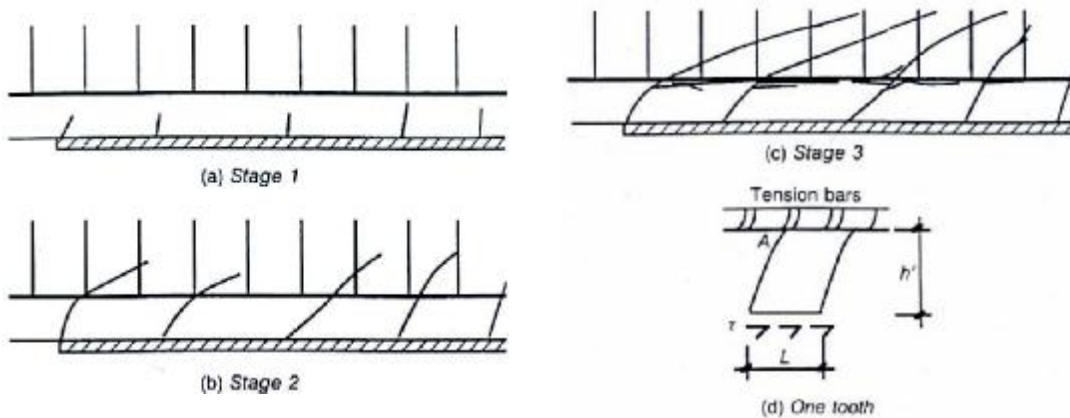
Όπου ρ_w το ποσοστό οπλισμού, V_u , M_u είναι η τέμνουσα και η ροπή στην κρίσιμη περιοχή ενώ ο λόγος $V_u d / M_u$ θεωρείται ίσος με τη μονάδα, b_w , d είναι το πλάτος και το στατικό ύψος της δοκού, A_v το εμβαδό των σκελών του οπλισμού διάτμησης, f_{yst} είναι η τάση διαρροής του οπλισμού διάτμησης και s η απόσταση των συνδετήρων.

Ο συντελεστής k δεν πρέπει να ξεπερνά τη μονάδα εφόσον θεωρείται ότι αγνοείται η αύξηση της διατμητικής ικανότητας λόγω του ελάσματος.

Γ)Μια άλλη πρόταση [9,10] που στηρίζεται σε θεωρητικό μοντέλο χωρίς να κάνει χρήση πειραματικά προσδιοριζόμενων συντελεστών έχει στόχο να προσεγγίσει τα όρια στα οποία κυμαίνονται οι ορθές και διατμητικές τάσεις. Η μέθοδος υποθέτει ομοιόμορφη διανομή των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια ελάσματος σκυροδέματος και στηρίζεται στον προσδιορισμό της διακύμανσης των καμπτικών ρωγμών που αναπτύσσονται στην επικάλυψη του εσωτερικού οπλισμού στη περιοχή πέρατος των ελασμάτων. Ο παραπάνω μηχανισμός ανάπτυξης της ρηγμάτωσης περιγράφεται στο σχήμα 7 όπου όπως αναφέρεται οι πρώτες ρωγμές είναι σχεδόν κατακόρυφες ενώ η απόσχιση αρχίζει με την ανάπτυξη νέων οριζόντιων ρωγμών στο επίπεδο των ράβδων οπλισμού. Σύμφωνα με την αναφερόμενη θεώρηση οι τάσεις στη διεπιφάνεια εξαρτώνται από την απόσταση l μεταξύ δυο διαδοχικών ρωγμών τα όρια της οποίας l_{max} και l_{min} μπορούν να προσδιορισθούν από τις παρακάτω σχέσεις:

$$l_{min} = \frac{A_e f_t}{u \left(\sum O_{bars} + b_l \right)} \quad l_{max} = 2 l_{min}$$

όπου A_e είναι το εμβαδό της εφελκόμενης διατομής της δοκού, f_t είναι η εφελκυστική αντοχή θραύσης του σκυροδέματος, $\sum O_{bars}$ είναι η συνολική περίμετρος των ράβδων οπλισμού και b_l είναι το πλάτος του ελάσματος, u είναι η μέση αντοχή συνάφειας μεταξύ χάλυβα οπλισμού και σκυροδέματος όπου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση $u=0.28\sqrt{f_{cu}}$ όπου f_{cu} θλιπτική αντοχή κύβου του σκυροδέματος.



σχήμα 7: Στάδια ανάπτυξης της ρηγμάτωσης όπου φαίνεται η διακύμανση των κατακόρυφων ρωγμών που οδηγούν σε απόσχιση

Θεωρείται ότι ένα μεμονωμένο ‘δόντι’ [σχήμα 7 (d)] μεταξύ δυο διαδοχικών ρωγμών συμπεριφέρεται σαν πρόβολος και υπόκειται σε εγκάρσια διατμητική τάση στην περιοχή μεταξύ του ελάσματος και της εφελκόμενης ίνας. Αν αγνοηθούν οι αντιδράσεις από τα γειτονικά ‘δόντια’ και θεωρηθεί ελαστική συμπεριφορά τότε ισχύει:

$$\sigma_A = \frac{M_A(L/2)}{I_A} \quad M_A = tLb_1h$$

όπου σ_A είναι η εφελκυστική τάση στην άνω ίνα του θεωρούμενου προβόλου (δοντιού), M_A είναι η καμπτική ροπή στην ίδια περιοχή, $I_A=bL^3/12$ όπου b είναι το πλάτος της δοκού, L

είναι το μήκος του προβόλου, t είναι η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια ελάσματος-δοκού, b_1 είναι το πλάτος του ελάσματος και h είναι το ύψος της επικάλυψης των ράβδων οπλισμού.

Από τις παραπάνω σχέσεις αντικαθιστώντας $\sigma_A = \text{εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος}$ f_t που ισχύει στην οριακή κατάσταση προκύπτει ότι:

$$t = \frac{f_t L}{6 h} \frac{b}{b_1}$$

Αντικαθιστώντας στη τελευταία έτσι τις παραπάνω φράσεις των I_{\max} και I_{\min} που κυμαίνεται το μήκος L προκύπτουν οι εκφράσεις για το άνω και κάτω όριο της διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια:

$$t_{\max} = \frac{f_t I_{\min}}{3h} \frac{b}{b_1} \quad t_{\min} = \frac{f_t I_{\max}}{6h} \frac{b}{b_1}$$

Για μια απλή αμφιέριστη δοκό υπό κάμψη με δυο κατακόρυφα συγκεντρωμένα φορτία (σχήμα 1) που απέχουν απόσταση L_p από το σημείο στήριξης η ορθή τάση στη διεπιφάνεια εκφράζεται από τη σχέση $\sigma_s = t L_p / t$ όπου t το πάχος του ελάσματος. Αντικαθιστώντας τις παραπάνω εκφράσεις για τα όρια των διατμητικών τάσεων προκύπτουν τα όρια για τις ορθές τάσεις στη διεπιφάνεια:

$$s_{\min} = \frac{f_t I_{\min} b L_p}{6 h b_1 t} \quad s_{\max} = 2 s_{\min}$$

Στις παραπάνω εκφράσεις θεωρήθηκε ομοιόμορφη διανομή για τις διατμητικές τάσεις εφόσον υποτέθηκε απλή δοκός κάτω από ένταση δυο συγκεντρωμένων φορτίων, γεγονός που δεν ισχύει στην πράξη, γι αυτό προτάθηκε το μήκος L_p να υπολογίζεται από την παρακάτω έκφραση [10]:

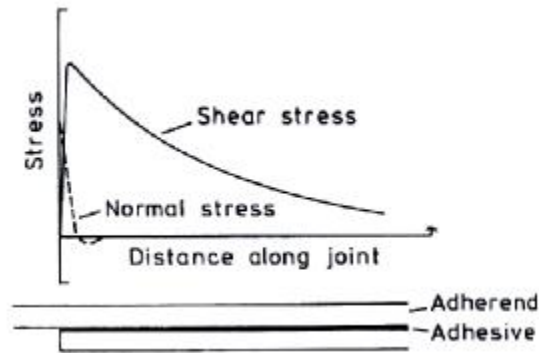
$$L_p = l_{\min} (21 - 0.25 l_{\min}) \quad \text{αν } l_{\min} \leq 72$$

Και
$$L_p = 3 l_{\min} \quad \text{αν } l_{\min} > 72$$

Η παραπάνω προσέγγιση των ορίων, η οποία έχει καθαρά θεωρητικό υπόβαθρο, συγκρίθηκε με ένα μεγάλο εύρος πειραματικών δεδομένων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία και βρέθηκε πολύ καλή ταύτιση των αποτελεσμάτων, ιδιαίτερα στην περίπτωση των κατώτερων ορίων όπου σχεδόν όλα τα δείγματα βρέθηκαν κοντά αλλά πάνω από το υπολογιζόμενο όριο [10]. Έτσι η συγκεκριμένη αναφορά προτείνει να χρησιμοποιούνται τα παραπάνω όρια στους έλεγχοι των ορθών και διατμητικών τάσεων κατά τη φάση της μελέτης.

5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ-ΚΑΜΠΤΙΚΩΝ ΡΟΠΩΝ

Οι έλεγχοι που παρουσιάστηκαν παραπάνω αναφέρονται στον προσδιορισμό των διατμητικών τάσεων που παρουσιάζουν μεγάλη ένταση στην ακραία περιοχή των ελασμάτων όπως φαίνεται στο σχήμα 8 ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις αναφέρονται και στις ορθές τάσεις.



Σχήμα 8: Ορθές (*normal*) και διατμητικές (*shear*) τάσεις στις ακραίες περιοχές

Πάραυτα όπως φαίνεται και από τις μορφές αστοχίας, όπου για μικρές σχετικά τιμές του λόγου M/V υπερισχύει η διάτμηση ενώ για σχετικά μεγάλες τιμές υπερισχύει η κάμψη, το φαινόμενο είναι πιο σύνθετο και οφείλεται σε συνδυασμό διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών (κυρίως για ενδιάμεσες τιμές του λόγου M/V) [7]. Έτσι ένας ακόμα έλεγχος έχει προταθεί στη βιβλιογραφία [7] αφορά αυτή ακριβώς την αλληλεπίδραση και εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

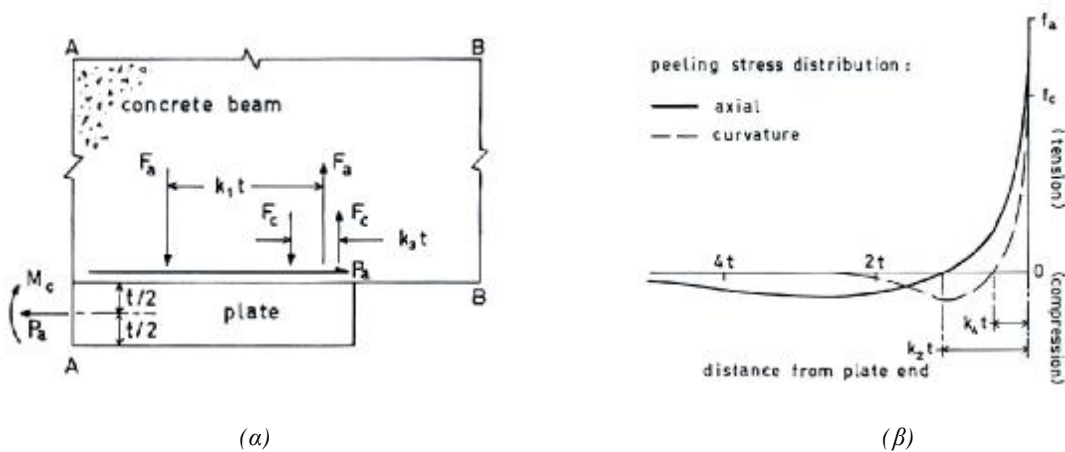
$$\frac{M}{M_{up}} + \frac{V}{V_{uc}} \leq 1.17 \quad (6)$$

Όπου M είναι η ροπή στην άκρη του ελάσματος μειωμένη κατά τη ροπή που υφίσταται η δοκός τη στιγμή της ενίσχυσης, V είναι η τέμνουσα στην άκρη του ελάσματος, V_{uc} είναι η χαρακτηριστική τέμνουσα αντοχής για σκυροδέμα χωρίς σπλισμό διάτμησης και M_{up} είναι η χαρακτηριστική ροπή αντοχής σε απόσχιση και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$M_{up} = \frac{(EI)_{cp} f_b}{0.9 E_s t_p} \quad (7)$$

όπου $(EI)_{cp}$ είναι η καμπτική ακαμψία της ρηγματωμένης διατομής η οποία βασίζεται σε γραμμική ελαστική ανάλυση με την υπόθεση ότι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος είναι μηδέν, E_s είναι το μέτρο ελαστικότητας του ελάσματος, t_p είναι το πάχος του ελάσματος και f_b είναι η αντοχή σχεδιασμού σε διάρρηξη και προτείνεται να υπολογίζεται από την σχέση: $f_b = 0,16 f_{ck} 2/3$ όπου f_{ck} η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος [Δρίτσος 2000]. Ο παραπάνω έλεγχος αν και προέκυψε από πειραματικά αποτελέσματα αφορά τη φάση σχεδιασμού και έτσι στα παραπάνω μεγέθη πρέπει να λαμβάνονται σε τιμές σχεδιασμού.

Η παραπάνω έκφραση της χαρακτηριστικής ροπής M_{up} προσδιορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία [6]. Εφαρμόζοντας μόνο καμπτικά φορτία σε μια ενισχυμένη δοκό τότε μεταξύ δυο διατομών προκαλείται μια ροπή M_c και μια δύναμη F_c όπως φαίνεται στο σχήμα 9(α). Η κατανομή των τάσεων μεταξύ των δύο διατομών θεωρείται ότι είναι γραμμική και οι δυνάμεις F_a και P_a θεωρείται ότι προκαλούνται από τις αξονικές τάσεις της δοκού. Η διανομή των τάσεων λόγω κάμψης και λόγω αξονικών δυνάμεων κατά μήκος της δοκού φαίνονται στο σχήμα 9(β) .



σχήμα 9: κατανομή καμπτικών και αξονικών δυνάμεων μεταξύ δυο διατομών(α) και κατανομή των τάσεων κατά μήκος της διεπιφάνειας (β)

Οι μέγιστες αξονικές τάσεις απόσχισης f_a του σχήματος 9(β) προκαλούνται από τις αξονικές παραμορφώσεις ε_a καθορίζονται από την ισορροπία των αξονικών δυνάμεων P_a και F_a :

$$P_a t = 2 F_a k_1 t$$

όπου E_s είναι το μέτρο ελαστικότητας του ελάσματος, b_p , t είναι το πλάτος και το πάχος του ελάσματος αντίστοιχα. Αντικαθιστώντας

$$P_a = E_s \varepsilon_a b_p t \quad \text{και} \quad F_a = s_a k_2 t b_p f_a$$

όπου s_a είναι ο λόγος της μέσης προς την μέγιστη εφελκυστική τάση απόσχισης στη περιοχή $k_2 t$ [σχήμα 9(β)]. Αντικαθιστώντας $\varepsilon_a = h\varphi$ όπου φ το βέλος κάμψης του ελάσματος και h η απόσταση από τον ουδέτερο άξονα προκύπτει:

$$f_a = k_a E_s h \varphi \quad \text{όπου ο συντελεστής } k_a \text{ είναι:} \quad k_a = (2 k_1 k_2 s_a)^{-1}$$

Οι μέγιστες καμπτικές τάσεις απόσχισης f_c προκαλούνται από την κάμψη φ (βέλος κάμψης) καθορίζονται από την ισορροπία των M_c και F_c :

$$M_c = F_c k_3 t$$

Αντικαθιστώντας $M_c = (EI)_s \varphi$ όπου $(EI)_s$ είναι η καμπτική ακαμψία του ελάσματος και $F_c = s_a k_2 t b_p f_a$ προκύπτει:

$$f_c = k_c E_s t \varphi \quad \text{όπου ο συντελεστής } k_c \text{ είναι:} \quad k_c = (12 k_3 k_4 s_c)^{-1}$$

όπου s_c είναι ο λόγος της μέσης προς την μέγιστη εφελκυστική τάση απόσχισης στη περιοχή $k_4 t$ [σχήμα 9(β)]. Όταν οι ποσότητες f_a και f_c φτάσουν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος f_t καθώς το φορτίο αυξάνει τότε θα εμφανιστεί απόσχιση. Έτσι την στιγμή της αστοχίας ισχύει ότι $f_a + f_c = f_t$ και αντικαθιστώντας τις προηγούμενες εκφράσεις για τις τάσεις f_a και f_c καθώς και $\varphi = M_p / (EI)_b$ όπου M_p η ροπή απόσχισης και $(EI)_b$ είναι η καμπτική ακαμψία της δοκού προκύπτει ότι:

$$M_p = \frac{(EI)bf_t}{k_c E_{st} + k_a E_{sh}}$$

Οι συντελεστές k_a και k_c θα μπορούσαν να προσδιορισθούν με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων αλλά τα αποτελέσματα δεν θα ανταποκρίνονταν σε πραγματικές συνθήκες (εφόσον για την παραπάνω ανάλυση θεωρήθηκε απλά εδραζόμενη δοκός) γι' αυτό και ο προσδιορισμός τους προέκυψε πειραματικά. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων αρκετών δοκιμών (όπου οι παραπάνω καμπτικές ακαμψίες προσδιορίστηκαν με την υπόθεση ότι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος είναι μηδενική) προέκυψε ότι η επιρροή του συντελεστή k_a είναι ασήμαντη και μπορεί να παραληφθεί, ενώ η τιμή του συντελεστή k_c είναι 0.827 για την ροπή εμφάνισης απόσχισης ενώ για τη μέγιστη ροπή αντοχής είναι 0.474. Έτσι για την τιμή σχεδιασμού που χρησιμοποιείται στη σχέση (7) μπορεί να υποτεθεί μια τιμή της τάξεως του 0.9.

Η σχέση (6) προέκυψε με πειραματική ανάλυση [7] όπου ένας ικανός αριθμός δοκιμών φορτίστηκε μέχρι αστοχίας. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων φαίνονται στον πίνακα του σχήματος 10 όπου οι τιμές για τις ροπές αντοχής M_{up} προσδιορίστηκαν με τη σχέση (7) (με $k_c = 0.474$ και όχι 0.9 που αναφέρεται στην τιμή σχεδιασμού). Από τον πίνακα φαίνεται ότι για ενδιάμεσες τιμές του λόγου M/V όπου έχουμε αλληλεπίδραση διατμητικής και καμπτικής έντασης και για τις διάφορες μορφές απόσχισης, το άθροισμα των στηλών 11 και 13 που εκφράζουν τους όρους της σχέσης (6) είναι της τάξεως του 1.17 και άνω. Έτσι σύμφωνα με τη συγκεκριμένη αναφορά [7] η σχέση (6) πρέπει να προστεθεί στους έλεγχους κατά τον σχεδιασμό δοκών ενισχυμένων με χαλύβδινα επικολλητά ελάσματα.

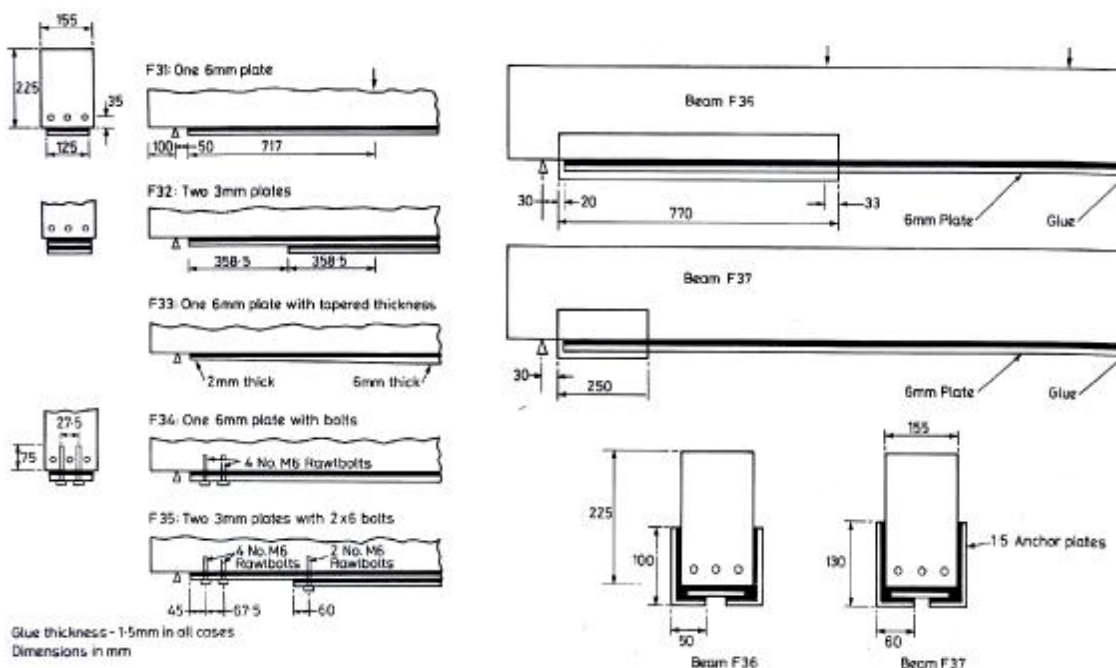
Specimen number (1)	d_{st} (mm) (2)	d_{st} (mm) (3)	Stirrups (4)	V_{max} (kN) (5)	V_p (kN) (6)	Type of failure (7)	V_p (kN) (2)	M_p (kN m) (3)	V_{uc} (kN) (4)	V_p/V_{uc} (5)	M_{up} (kN m) (6)	M_p/M_{up} (7)
(a) Group 1				(a) Group 1								
1/1/N	550	> d_{st}	minimal	41.0	—	shear	—	—	41.0*	—	13.59	—
1/2/S	550	100	minimal	29.7	29.6	shear	29.6	2.96	29.7*	0.977	13.59	0.218
1/2/N	550	150	minimal	32.5	32.5	shear	32.5	4.88	32.5*	1.000	13.59	0.359
1/3/S	550	250	minimal	41.6	25.8	shear	25.8	6.45	41.6*	0.620	13.59	0.475
1/3/N	550	400	minimal	34.6	23.1	shear	23.1	9.24	34.6*	0.668	13.59	0.680
1/4/S	550	50	minimal	41.0	41.0	shear	41.0	2.05	41.0*	1.000	13.59	0.151
(b) Group 2				(b) Group 2								
2/1/N	550	300	minimal	44.0	26.1	flexure	26.1	7.83	38.4	0.680	20.09	0.390
2/1/S	550	75	minimal	40.1	40.1	shear	40.1	3.01	40.1*	1.000	20.09	0.150
2/2/N	550	300	4 mm/75	43.8	24.9	flexure	24.9	7.47	38.4	0.648	20.09	0.372
2/2/S	550	75	4 mm/75	43.8	42.5	flexure	42.5	3.19	38.4	1.107	20.09	0.159
2/3/N	550	300	6 mm/75	44.9	27.9	flexure	27.9	8.37	38.4	0.727	20.09	0.417
2/3/S	550	75	6 mm/75	45.2	39.3	flexure	39.3	2.95	38.4	1.023	20.09	0.147
2/4/N	550	300	6 mm/45	46.1	32.2	flexure	32.2	9.66	38.4	0.839	20.09	0.481
2/4/S	550	75	6 mm/45	44.9	41.3	flexure	41.3	3.10	38.4	1.076	20.09	0.154
(c) Group 5				(c) Group 5								
5/1/N	550	400	6 mm/45	45.9	24.0	flexure	24.0	9.60	39.0	0.615	20.25	0.474
5/1/S	550	150	6 mm/45	43.9	37.3	flexure	37.3	5.60	39.0	0.936	20.25	0.277
(d) Group 6				(d) Group 6								
6/1-	925	625	minimal	25.0	19.3	flexure	19.3	12.1	39.7	0.486	18.46	0.655
6/2-	925	625	minimal	25.5	20.8	flexure	20.8	13.0	39.7	0.524	18.46	0.704
6/3-	1,125	825	minimal	21.4	15.1	flexure	15.1	12.5	39.7	0.380	18.46	0.677
6/4-	1,225	825	minimal	21.1	15.9	flexure	15.9	13.1	39.7	0.401	18.46	0.710
(e) Group 7				(e) Group 7								
7/1/N	1,400	1,000	minimal	—	10.3	—	10.3	10.3	39.4	0.261	13.5*	0.763
7/1/S	1,400	1,000	minimal	17.5	11.0	flexure	11.0	11.0	39.4	0.279	13.5*	0.815
7/2*	1,000	1,150	minimal	23.8	13.5	flexure	—	13.5	39.4	—	13.5*	—
(f) Group 8				(f) Group 8								
8/1/N	1,700	1,300	minimal	—	9.65	—	9.65	12.6	36.6	0.264 ^m	12.9*	0.977
8/1/S	1,700	1,300	minimal	14.8	9.54	flexure	9.54	12.4	36.6	0.261	12.9*	0.961
8/2*	775	900	minimal	32.0	16.6	flexure	—	12.9	36.6	—	12.9*	—

σχήμα 10 : πειραματικά αποτελέσματα ενισχυμένων δοκών σε αλληλεπίδραση διατμητικής καμπτικής έντασης.

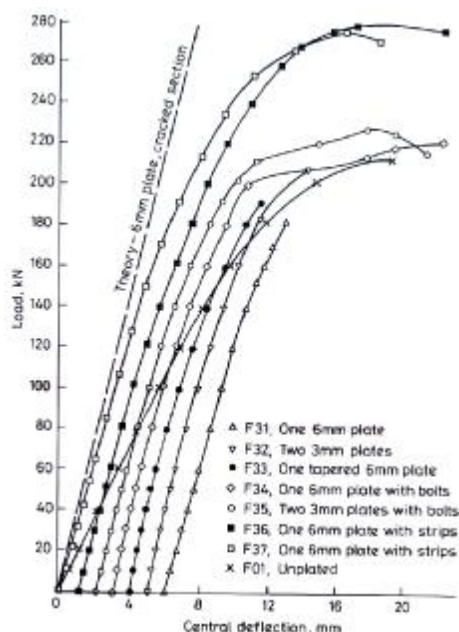
6. ΑΓΚΥΡΩΣΗ ΤΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

Όλες οι παραπάνω προτάσεις για τον έλεγχο σε απόσχιση προέκυψαν από πειραματικές έρευνες σε απλές δοκούς ενώ το θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε (αρκετό μέρος του οποίου παρουσιάστηκε παραπάνω) στηρίχτηκε σε διάφορες παραδοχές. Επομένως γίνεται αντιληπτή η ανάγκη για περισσότερη γνώση και έρευνα στο τομέα αυτό και έτσι για την ασφαλέστερη εφαρμοσιμότητα τους σε πραγματικές συνθήκες είναι αναγκαία η θέσπιση κάποιων κανόνων αγκύρωσης των ελασμάτων ώστε να ενισχυθεί η ευαίσθητη περιοχή και να αποφευχθεί η πρόωρη αστοχία. Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά σχετική πειραματική έρευνα που σκοπεύει να προσδιορίσει την ευμενέστερη μέθοδο αγκύρωσης [3].

Στο σχήμα 11 φαίνονται οι διάφορες διατάξεις που δοκιμάστηκαν και συγκρίθηκαν όπως: δοκοί με σχετικά μεγάλο πάχος ελάσματος (6mm), δοκοί με δυο άνισου μήκους ελάσματα, δοκοί με ελάσματα βαθμιαία μειούμενου πάχους προς τα άκρα, δοκοί με ένα ή δυο ελάσματα αγκυρομένα με βλήτρα στις περιοχές πέρατος, όπως και δοκοί με ειδικά επικολλητά ελάσματα αγκύρωσης διαφόρων διαστάσεων (μικρού μήκους με σχετικά μεγάλο ύψος ή μεγαλύτερου μήκους και μικρότερου ύψους). Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι για τις διατάξεις χωρίς βλήτρα ή επικολλητά ελάσματα η απόσχιση δεν αποφεύχθηκε ενώ μεταξύ βλήτρων και ελασμάτων αγκύρωσης τα δεύτερα αποδείχτηκαν καταλληλότερα όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 12 καθώς παρουσίασαν ικανοποιητική αντοχή και πλαστιμότητα. Ειδικότερα η περίπτωση των γωνιακών ελασμάτων με μικρό μήκος (που καλύπτει όμως την περιοχή έντασης) και μεγαλύτερο ύψος παρουσίασε την καλύτερη αντοχή και πλαστιμότητα και σε συνδυασμό της ελάχιστης διαφοράς κόστους με τις άλλες διατάξεις, είναι αυτά που προτείνονται.



σχήμα 11: διάφορες διατάξεις ικολλητών ελασμάτων όπου συγκρίθηκε η αποτελεσματικότητα τους στην αποφυγή της αστοχίας λόγω απόσχισης.



σχήμα 12: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης για τις δοκούς του σχήματος 11 όπου φορτίστηκαν μέχρι αστοχίας.

7.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος ενίσχυσης με χαλύβδινα επικολλητά ελάσματα μπορεί υπό προϋποθέσεις να αποτελέσει αξιόπιστη μέθοδο καμπτικής ενίσχυσης δοκών. Πάραυτα όλες οι μέθοδοι έλεγχου για αποφυγή του φαινομένου της απόσχισης στηρίζονται σε εμπειρικές και ημιεμπειρικές σχέσεις και περισσότερη έρευνα απαιτείται στον τομέα αυτό σε πιο πραγματικές συνθήκες φόρτισης. Ακόμα περισσότερες γνώσεις απαιτούνται στον προσδιορισμό παραγόντων που μπορεί να επηρεάζουν τη συμπεριφορά των ελασμάτων (εκτός του κρίσιμου παράγοντα του πάχους του ελάσματος) καθώς από τη βιβλιογραφία δεν αποσαφηνίζεται πλήρως η επιρροή παραγόντων όπως η συνεισφορά του οπλισμού κάμψης και διάτμησης. Ακόμα προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή της κόλλας καθώς αυτή πρέπει να παρουσιάζει μεγάλη συγκολλητική ικανότητα και πλαστιμότητα ώστε να ευνοεί την ανάπτυξη παραμορφώσεων. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου μπορεί να αναφερθεί η μειωμένη αντοχή σε πυρκαγιά ενώ προσοχή πρέπει να δοθεί στον τομέα της διάβρωσης των ελασμάτων καθώς αυτά δεν καλύπτονται από το σκυρόδεμα όπως ο εσωτερικός οπλισμός και ανάλογα μέτρα προστασίας πρέπει να ληφθούν. Τέλος ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί κατά την εφαρμογή της μεθόδου ώστε να αποφευχθούν οι κακοτεχνίες ενώ πρέπει να γίνει ανάλογη προετοιμασία των διεπιφανειών πριν τη συγκόλληση.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Under- and Over-Reinforced Concrete Beams With Glued Steel Plates**, Jones R., Swamy R.N., Ang T.H., The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol 4, No 1, pp. 19-32, 1982
2. **Structural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates**, Swamy R.N., Jones R., Bloxham J.W., The Structural Engineer, Vol 65A, No 2, pp. 59-68, 1987
3. **Plate Separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates**, Jones R., Swamy R.N., Sharif A., The Structural Engineer, Vol 66, No 5, pp. 85-94, 1988
4. **The Effect of External Plate Reinforcement on the Strengthening of Structurally Damaged RC Beams**, Jones R., Swamy R.N., Sharif A., The Structural Engineer, Vol 67, No 3, pp. 45-56, 1989
5. **Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentrations in the Adhesive Layer of Plated RC Beams**, Roberts T.M., The Structural Engineer, Vol. 67, No 12, pp. 229-233, 1989
6. **Premature Failure of Externally Plated Reinforced Concrete Beams**, Oehlers D.J., Moran J.P., J. Structural Eng., ASCE, Vol. 116, No 4, pp. 978-995, 1990
7. **Reinforced Concrete Beams with Plates Glued to Their Soffits**, Oehlers D.J., J. Structural Eng., ASCE, Vol 118, No 8, pp. 2023-2037, 1992
8. **Guidelines Toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates**, Ziraba Y.N., Baluch M.H., Basunbul I.A., Sharif A.M., Azad A.K., Al-Sulaimani G.J., ACI Structural J., Vol 91, No 6, pp. 639-646, 1994
9. **Prediction of Peeling Failure of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Steel Plates**, Zhang S., Raouf M., Wood L.A., Proc. Inst. Civil Eng. Structures and Buildings, Vol 110, Issue 3, pp. 257-268, 1995
10. **An Insight Into the Structural Behaviour of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Plates**, Raouf M., Zhang S., Proc. Inst. Civil Eng. Structures and Buildings, Vol 122, Issue 4, pp. 477-492, 1997
11. **Peeling and Diagonal Tension Failures in Steel Plated R/C Beams**, Ashrafuddin M., Baluch M.H., Sharif A.M., Ghazi J., Al-Sulaimani G.J., Azad A.K., Khan A.R., Constructions and Building Materials, Vol 12, No 8, pp. 459-467, 1999
12. **Theoretical and Experimental Study on Externally Plated R/C Beams**, Raouf M., El-Rimawi J.A., Hassanen M.A.H., Engineering Structures, Vol. 22, pp. 85-101, 2000