



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΡΑΒΔΩΝ
ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΟΝΟΤΟΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Μπουγιούκας Ιωάννης

Επιβλέπων: Καττής Μαρίνος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2008

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT.....	4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΡΑΒΔΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	8
1.1 Αλληλεπίδραση ράβδου – σκυροδέματος.....	8
1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά συνάφειας	15
1.2.1 Γεωμετρία και επίπεδο τάσης του οπλισμού	15
1.2.2 Ποιότητα σκυροδέματος και το επίπεδο έντασης.....	19
1.2.3 Κατασκευαστικά στοιχεία και περιβαλλοντικές επιπτώσεις	22
1.2.4 Ιστορικό φόρτισης.....	26
1.3 Επίδραση της συνάφειας στην δομική συμπεριφορά (πλαστιμότητα)	29
1.4 Αστοχίες εξόλκευσης και απόσχισης.....	33
1.5 Ενεργή και παθητική περίσφιξη.....	35
1.6 Ράβδοι αγκύρωσης και προεντεταμένοι τένοντες.....	37
1.7 Πειράματα.....	38
1.7.1 Δοκίμια μικρού μήκους	40
1.7.2 Δοκίμια μεγάλου μήκους	49
1.8 Μοντελοποίηση	53
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ- ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΚΟΥ ΓΙΑ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟ FRP.	55
2.1 Η δοκιμή δοκού του εργαστηρίου Δομικής Μηχανικής της Σ.Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π.....	55
2.2 Ο τύπος και οι μηχανικές ιδιότητες των ράβδων FRP της δοκιμής.....	58
2.3 Η σύνθεση του σκυροδέματος της πειραματικής δοκιμής.....	60
2.4 Κατασκευή δοκιμίων και εκτέλεση πειραματικών δοκιμών	62
2.5 Κατασκευή διαγράμματος συνάφειας-ολίσθησης	64
2.6 Πειραματικές καμπύλες συνάφειας-ολίσθησης για μονότονη φόρτιση (κατασκευή διαγραμμάτων από τις πειραματικές μετρήσεις)	69
2.7 Συμπεράσματα	71
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	72

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που έχουν προκύψει για την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς της συνάφειας ράβδων οπλισμού σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, όπως αυτά έχουν καταγραφεί στην διεθνή βιβλιογραφία. Περιγράφονται οι πειραματικές μεθοδολογίες που έχουν προταθεί για τον ποσοτικό προσδιορισμό των βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν την συνάφεια. Στο δεύτερο μέρος της εργασίας παρουσιάζεται η πειραματική δοκιμή της δοκού για τον προσδιορισμό του καταστατικού νόμου συνάφειας - ολίσθησης, που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της Σ.Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π. και εφαρμόζεται τόσο στη περίπτωση της μονότονης όσο στην περίπτωση της ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Η πειραματική διάταξη αυτή, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των καμπύλων τάσης συνάφειας – ολίσθησης για συγκεκριμένους τύπους ράβδων FRP του εμπορίου, για την περίπτωση της μονότονης φόρτισης.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE BOND IN REINFORCED CONCRETE MEMBERS FOR MONOTONIC LOADING

The experimental results obtained on the bond-slip behavior of reinforcing bars in concrete published in the open literature during the last three decades are systematically presented and discussed. The experimental techniques developed to determine the parameters governing the bond-slip behavior of the reinforcing bars in concrete are described. In the second part of the present work, the beam test, which has been developed in the Structural Laboratory of the Rural and Surveying Department of NTUA to determine the local bond-slip curves of the reinforcing bars, for both monotonic and cyclic loading, is presented. In the framework of the present work, the above-mentioned beam test is applied to obtain the bond-slip curves for a specific type of FRP reinforcing bars subjected to monotonic loading.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά την καταπόνηση ενός δομικού στοιχείου οπλισμένου σκυροδέματος, ο βασικός μηχανισμός μεταφοράς δυνάμεων από το ένα υλικό στο άλλο για χαμηλό επίπεδο φόρτισης, είναι η πρόσφυση των δύο υλικών κατά μήκος της διεπιφάνειας τους. Λόγω της πρόσφυσης των δύο υλικών, αναπτύσσονται δεσμοί σύνδεσης κατά μήκος της διεπιφάνειας, που επιτρέπουν την μεταβίβαση διατμητικών δυνάμεων από το ένα υλικό στο άλλο. Τέλεια σύνδεση των δύο υλικών κατά μήκος της διεπιφάνειας σημαίνει ικανότητα των υπάρχουσών δεσμών σύνδεσης να μεταβιβάζουν δυνάμεις από το ένα υλικό στο άλλο και να συγκρατούν της δύο επιφάνειες “εν επαφή”, μη επιτρέποντας την σχετική τους μετακίνηση. Με την αύξηση του εξωτερικού φορτίου, αυξάνεται και το μέγεθος των διατμητικών δυνάμεων που μεταφέρονται από τους δεσμούς πρόσφυσης των δύο υλικών. Σε κάποια τιμή του μεγέθους αυτών των διατμητικών δυνάμεων, κάποιοι δεσμοί μπορεί να καταστραφούν, ή να υποβαθμισθεί η ικανότητα τους να συγκρατούν “εν επαφή” και αμετακίνητες τις δύο επιφάνειες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μιας ατελούς σύνδεσης των δύο υλικών, που συνοδεύεται από την εμφάνιση μιας σχετικής μετατόπισης των δύο επιφανειών που παραμένουν “εν επαφή”. Πέρα από την πρόσφυση, η ύπαρξη νευρώσεων ή άλλων επιφανειακών παραμορφώσεων στην ράβδο δημιουργεί μηχανισμούς αύξησης της ικανότητας μεταφοράς διατμητικών δυνάμεων. Σε αντίθεση με την πρόσφυση, οι μηχανισμοί αυτοί είναι μηχανικής φύσης και δημιουργούνται από την εισδοχή των νευρώσεων ή των επιφανειακών παραμορφώσεων των ράβδων στο σκυρόδεμα, και από την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο υλικών. Με την ενεργοποίηση των δύο αυτών μηχανισμών στο δομικό στοιχείο, παρατηρούνται τοπικά φαινόμενα ανύψωσης τάσεων με αποτέλεσμα την δημιουργία μικρορηγματώσεων είτε πάνω στην διεπιφάνεια, είτε ακτινικά στην ράβδο. Οι δημιουργούμενες αυτές υλικές ασυνέχειες εκτείνονται σε ένα μικρό σχετικά πάχος σκυροδέματος γύρω από την ράβδο, μέσα στο οποίο βρίσκονται και τα προϋπάρχοντα μικρο-κενά σκυροδέματος. Τα μικρο-κενά αυτά δημιουργούνται κατά την σκυροδέτηση από θύλακες νερού και συσσωρεύονται γύρω από τον οπλισμό και αποτελούν μια επιπρόσθετη εγγενή αιτία που συνεισφέρει στην παραπέρα υποβάθμιση του μηχανισμού μεταβίβασης των δυνάμεων. Εκτός από την σχετική ολίσθηση των δύο υλικών που συμβαίνει λόγω υποβαθμισμένης λειτουργίας ή μερικής καταστροφής των δεσμών πρόσφυσης των

δύο υλικών, η αύξηση του μεγέθους των δυνάμεων προξενεί μια επιπρόσθετη υποβάθμιση του μηχανισμού μεταφοράς τους που οφείλεται στην υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων μιας μικρής στρώσης σκυροδέματος γύρω από την ράβδο.

Η πλήρης περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς της σύνδεσης των δύο υλικών ανάγεται στον προσδιορισμό μιας πειραματικής σχέσης μεταξύ της διατμητικής τάσης που μεταβιβάζεται και της “σχετικής μετατόπισης” που προξενείται μεταξύ των δύο υλικών. Μια τέτοια σχέση αποτελεί, με την αυστηρή έννοια του όρου, ένα καταστατικό νόμο που περιγράφει την συμπεριφορά μιας συνεχούς ελατηριακής σύνδεσης που προσομοιώνει τον μηχανισμό μεταβίβασης των διατμητικών δυνάμεων από το ένα υλικό στο άλλο. Ο νόμος αυτός προσδιορίζεται είτε με την δοκιμή εξόλκευσης ή με την δοκιμή δοκού.

Οι τάσεις συνάφειας στα δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος αναπτύσσονται σε δύο διακριτές περιπτώσεις. Στην αγκύρωση των ράβδων οπλισμού στις παρειές των δομικών στοιχείων και στην κάμψη δομικών στοιχείων, όπου η αξονική δύναμη της ράβδου μεταβάλλεται λόγω της μεταβολής της καμπτικής ροπής κατά μήκος του στοιχείου. Η συνάφεια στην δεύτερη περίπτωση είναι γνωστή ως καμπτική συνάφεια.

Η τάση συνάφειας, σύμφωνα με την επιτροπή 408 του ACI (ACI Committee 408, 1992), αναφέρεται στην τάση που αναπτύσσεται κατά μήκος της διεπιφάνειας ράβδου-σκυροδέματος, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης κατά μήκος της ράβδου του χάλυβα μεταβιβάζοντας φορτίο μεταξύ ράβδου και σκυροδέματος.

Η ραγδαία ανάπτυξη και χρήση των ράβδων FRP ως εναλλακτικού οπλισμού στο σκυρόδεμα καθιστά εξαιρετικά χρήσιμη την πειραματική εμπειρία που έχει αποκτηθεί για τις ράβδους οπλισμού από χάλυβα. Η εμπειρία αυτή αποτελεί ουσιαστικά, παρά τις μεγάλες διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των δύο οπλισμών, την βάση για την διερεύνηση και διασαφήνιση της μηχανικής συμπεριφοράς που επιδεικνύει αυτός ο νέος οπλισμός στο σκυρόδεμα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται και συζητούνται οι βασικοί παράμετροι που επηρεάζουν την συνάφεια των ράβδων οπλισμού από χάλυβα, όταν αυτές οπλίζουν δομικά στοιχεία σκυροδέματος, όπως αυτές έχουν καταγραφεί στην διεθνή βιβλιογραφία τα τελευταία τριάντα περίπου χρόνια. Παράλληλα συζητούνται και οι πειραματικές μεθοδολογίες που έχουν προταθεί για τον ποσοτικό προσδιορισμό των παραμέτρων αυτών.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας παρουσιάζεται η πειραματική δοκιμή της δοκού για τον προσδιορισμό της συνάφειας, που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της Σ.Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π. και τα πειραματικά αποτελέσματα που αποκτήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, με την δοκιμή αυτή. Τα αποτελέσματα αφορούν τον προσδιορισμό της τοπικής καμπύλης συνάφειας-ολίσθησης του οπλισμού FRP με το σκυρόδεμα, για μονότονες συνθήκες φόρτισης και για συγκεκριμένους τύπους οπλισμού.

1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΡΑΒΔΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1.1 Αλληλεπίδραση ράβδου – σκυροδέματος

Σε μια κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα, η σύνδεση του χάλυβα με το σκυρόδεμα γίνεται με ένα σύνθετο μηχανισμό, μέσω του οποίου οι διαμήκεις αξονικές δυνάμεις του οπλισμού μεταφέρονται στο περιβάλλον σκυρόδεμα. Εξαιτίας αυτής της μεταφοράς, η δύναμη σε μια ράβδο οπλισμού μεταβάλλεται κατά μήκος της ράβδου και του εμπηγμένου σκυροδέματος. Οπουδήποτε οι παραμορφώσεις του χάλυβα διαφέρουν από τις παραμορφώσεις του σκυροδέματος εμφανίζεται μια σχετική μετατόπιση (ολίσθηση) μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος, η οποία μπορεί να οφείλεται στις πολύ υψηλές τοπικές παραμορφώσεις σε ένα στρώμα σκυροδέματος, που βρίσκεται πολύ κοντά στον οπλισμό (διεπιφάνεια).

Οι μηχανισμοί αντίστασης στους οποίους είναι βασισμένη η σύνδεση του χάλυβα με το σκυρόδεμα, είναι ήδη γνωστοί, λόγω των πολλών πειραματικών αποτελεσμάτων που έχουν συλλεχθεί και αναλυθεί τα τελευταία τριάντα χρόνια μέσω ποικιλίας πειραματικών δοκιμών και τεχνικών.

Οι ερευνητές, που έχουν συμβάλει στη γνώση των πολλών παραμέτρων της συνάφειας, συμφωνούν ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ του σκυροδέματος και μιας ράβδου που υποβάλλονται σε μια δύναμη εξόλκευσης χαρακτηρίζεται από τέσσερα διαφορετικά στάδια (Σχήμα 1.1α).

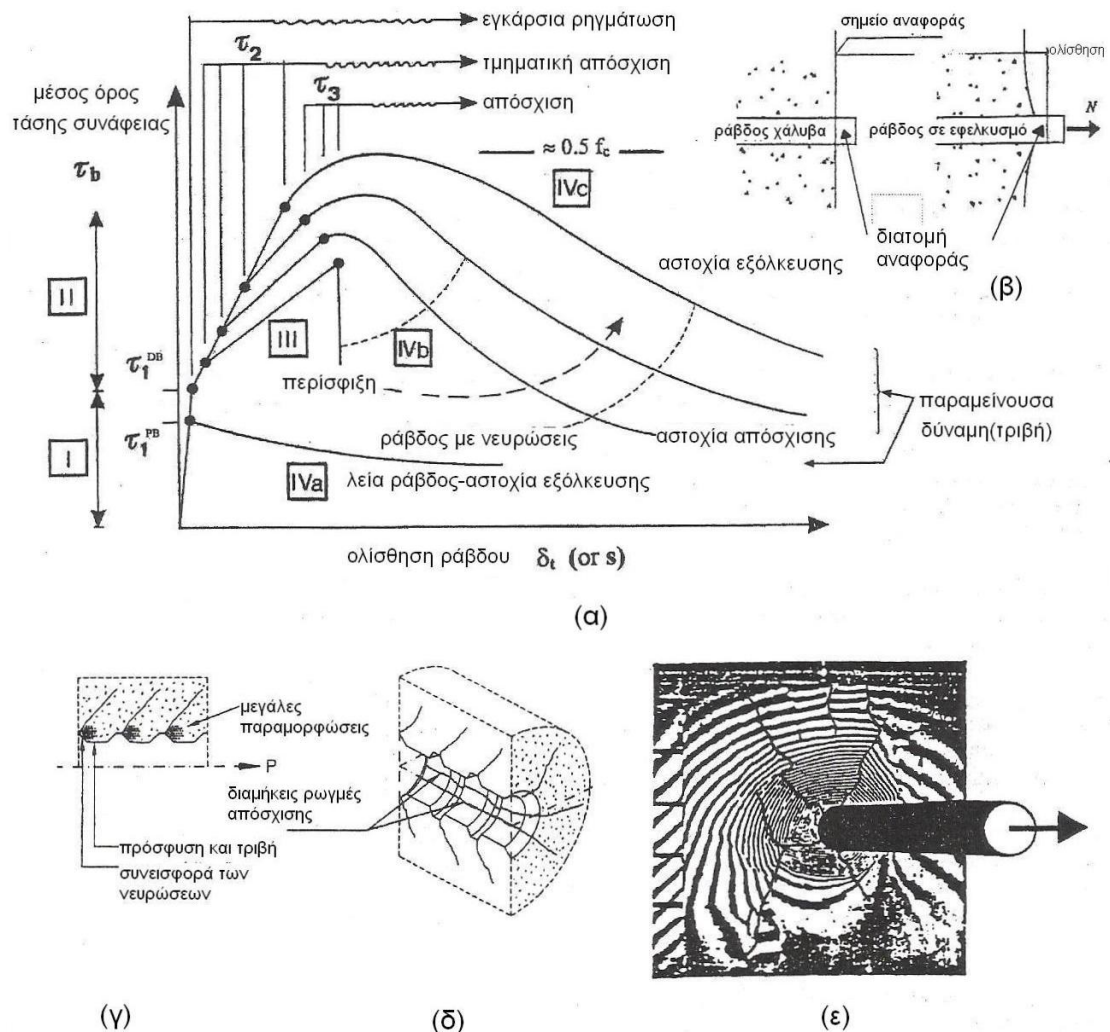
Στάδιο I (μη ρηγματωμένο σκυρόδεμα): για χαμηλές τιμές της τάσης συνάφειας, $\tau \leq \tau_1 = (0.2 \sim 0.8)f_{ct}$, η αποδοτικότητα της σύνδεσης οφείλεται στην χημική πρόσφυση, και δεν εμφανίζεται ολίσθηση της ράβδου, αλλά υψηλές τοπικές τάσεις αναπτύσσονται κοντά στις νευρώσεις (Σχήμα 1.2α ελαστική συμπεριφορά). Η χημική πρόσφυση συνοδεύεται επίσης από τη μικρομηχανική αλληλεπίδραση που συνδέεται με τη μικροσκοπική τραχύτητα της επιφάνειας του χάλυβα. Η χημική και φυσική πρόσφυση διαδραματίζει έναν δευτερεύοντα ρόλο, όπως επιβεβαιώνεται από την χαμηλή απόδοση σε συνάφεια που έχουν οι λείες ράβδοι, όπου η χημική πρόσφυση

και η μικροεμπλοκή ακολουθούνται σύντομα από την ολίσθηση των ράβδων (καθαρή τριβή, τέλος του σταδίου IVα, το οποίο επηρεάζεται ιδιαίτερα από την εγκάρσια τάση). Πρέπει να σημειωθεί ότι η σχετική μετατόπιση της ράβδου μετριέται πάντα σε σχέση με το αμετακίνητο σκυρόδεμα και αποτελείται από δύο μέρη, τη σχετική ολίσθηση στη διεπιφάνεια και τις διατμητικές παραμορφώσεις του σκυροδέματος (Σχήμα 1.1β). Επομένως, ακόμα κι αν δεν υπάρχει καμία ολίσθηση ράβδου, εμφανίζεται μια ορισμένη μετατόπιση εξ αιτίας των τοπικών παραμορφώσεων κοντά στη διεπιφάνεια. Αυτό εξηγεί την ολίσθηση στο στάδιο I.

Στάδιο II (αρχική ρηγμάτωση) : Για υψηλότερες τιμές της τάσης συνάφειας ($\tau > \tau_1$), η χημική πρόσφυση σπάει. Στις ράβδους με νευρώσεις, οι νευρώσεις προκαλούν μεγάλες θλιπτικές τάσεις στο σκυρόδεμα (p* Σχήμα 1.2β) με αποτέλεσμα να δημιουργούνται εγκάρσιες μικρορωγμές, που ξεκινούν από τις άκρες των νευρώσεων και επιτρέπουν στη ράβδο να ολισθήσει. Όμως η δράση βλήτρου των νευρώσεων δεν επιτρέπει την απόσχιση του σκυροδέματος (Σχήμα 1.2γ).

Στάδιο III: Για ακόμα υψηλότερες τάσεις συνάφειας $\tau > \tau(1 \sim 3)f_{ct}$, οι διαμήκειες ρωγμές (ρωγμές απόσχισης, Σχήματα 1.1δ,ε και 1.2γ) διαδίδονται ακτινικά, εξ αιτίας της δράσης βλήτρου, που ενισχύεται από το ρηγματωμένο σκυρόδεμα που βρίσκεται μπροστά από τις νευρώσεις. Η εξωτερική συνιστώσα της πίεσης (p** 1.2β) αντισταθμίζεται από τις ακτινικές τάσεις του περιβάλλοντος σκυροδέματος (Terfers, 1979): κατά συνέπεια, το περιβάλλον σκυρόδεμα ασκεί μια δράση περίσφιξης στη ράβδο, και η αντοχή συνάφειας και η ακαμψία εξασφαλίζονται κατά κύριο λόγο με την αλληλεμπλοκή κατά μήκος του οπλισμού, το σκυρόδεμα που περιβάλλει την ράβδο και τον μη κατεστραμμένο εξωτερικό δακτύλιο. Στην περίπτωση χαμηλού εγκάρσιου οπλισμού, το στάδιο αυτό τελειώνει μόλις η απόσχιση του σκυροδέματος φθάνει στην εξωτερική επιφάνεια της συγκεκριμένης. Κατόπιν, εμφανίζεται μια περισσότερο ή λιγότερο ξαφνική αστοχία ανάλογα με τον εγκάρσιο οπλισμό (στάδιο IVβ, αστοχία απόσχισης). Εντούτοις, στα σχετικά μεγάλα μήκη έμπηξης με μέτρια περίσφιξη συμβαίνει συνήθως μια αστοχία εξόλκευσης, ακόμα και μετά από απόσχιση, εξ αιτίας της ταυτόχρονης παρουσίας διαφορετικών σταδίων κατά μήκος του μήκους έμπηξης. Ως εκ τούτου, η αστοχία συνάφειας μπορεί να οριστεί ως «αστοχία εξόλκευσης που περιλαμβάνει απόσχιση». Στην περίπτωση μεγάλου ποσοστού εγκάρσιου οπλισμού ή μεγάλης επικάλυψης σκυροδέματος, η απόσχιση προλαμβάνεται άμεσα από την δράση περίσφιξης, και η απόσχιση του

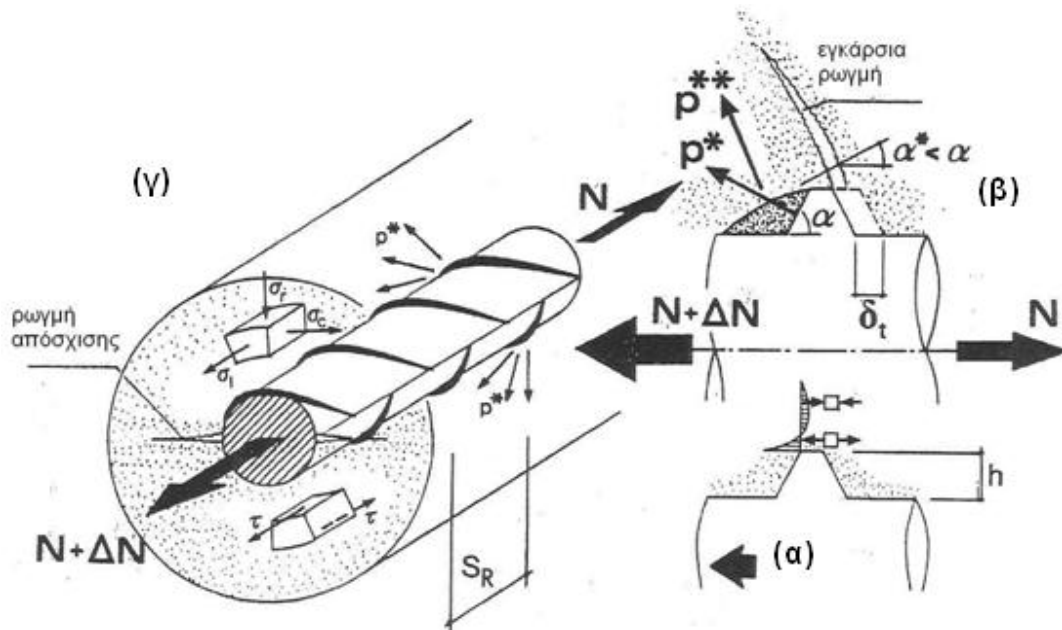
σκυροδέματος περιορίζεται στην ρηγματωμένη ζώνη γύρω από την ράβδο (στάδιο IVγ, αστοχία εξόλκευσης).



Σχήμα 1.1 - (α) Τοπικός κανόνας τάσης συνάφειας-ολίσθησης (δείτε επίσης Tassios 1979), (β) σχετική μετατόπιση της ράβδου (ολίσθηση), (γ) χημική πρόσφυση, δράση πίεσης και τριβής (όχι ταυτόχρονη δράση), (δ) εγκάρσιες ρωγμές και απόσχιση, και (ε) μερική απόσχιση (Baranek 1980, moiré holography).

Στάδιο IVα: Στις λείες ράβδους αυτό το στάδιο ακολουθεί αμέσως μετά την καταστροφή της χημικής πρόσφυσης. Η μεταφορά δύναμης γίνεται από την τριβή και επηρεάζεται έντονα από την εγκάρσια πίεση. Η τραχύτητα της ράβδου και η συστολή του σκυροδέματος ευνοούν την τριβή, ενώ η φθορά της διεπιφάνειας, κατά μήκος του επιπέδου ολίσθησης μειώνει τις ακτινικές θλιπτικές τάσεις, και στο τέλος μειώνεται η τάση συνάφειας.

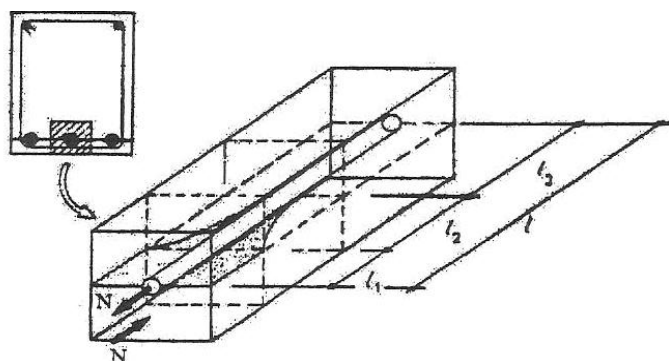
Στάδιο IVβ: στην περίπτωση των ράβδων με νευρώσεις, με χαμηλό, προς το μέσο εγκάρσιο, ποσοστό οπλισμού, οι διαμήκειες ρωγμές απόσχισης εκδηλώνονται σε όλη την επικάλυψη και το τμήμα ανάμεσα στις ράβδους, και η συνάφεια φαίνεται να πέφτει απότομα (Σχήμα 1.4γ). Από την άλλη πλευρά, ένα ικανοποιητικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού μπορεί να εξασφαλίσει την αποδοτικότητα της σύνδεσης έναντι απόσχισης, λόγω της δράσης περίσφιγξης που αναπτύσσεται από τον οπλισμό. Στο στάδιο IVβ, τιμές τάσης συνάφειας τόσο υψηλές όπως $(1/3 \sim 1/2)f_c$ μπορεί να αναπτυχθούν, με την αναπόφευκτη και συχνά απαράδεκτη παρενέργεια των υψηλών τιμών ολίσθησης (δ_t/d_b ή $s/\phi \geq 0.05$ με δ_t , ή s = ολίσθηση ράβδου στο φορτισμένο άκρο, και d_b ή ϕ = διάμετρος ράβδου).



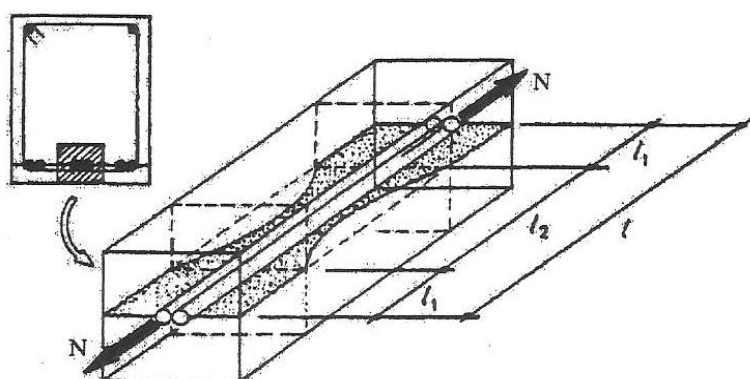
Σχήμα 1.2 - Συνάφεια και απόσχιση οπλισμένου σκυροδέματος (ράβδοι με νευρώσεις): (α) χαρακτηριστικές τιμές της τάσης στην ελαστική φάση, (β) ολίσθηση ράβδου-σκυροδέματος και δράση βλήτρου της ράβδου (Gambarova και Rosati 1996, (γ) βασικές παράμετροι.

Στις αυξημένες τιμές ολίσθησης, η αντοχή συνάφειας φθάνει στην μέγιστη τιμή της και αρχίζει έπειτα να μειώνεται (Σχήμα 1.1α), αλλά παραμένει ακόμα σημαντική ακόμη και σε πολύ μεγάλες τιμές ολίσθησης: $\tau_b/f_c = 0.15 \sim 0.30$ (Gambarova et al., 1989; Gambarova και Rosati, 1996: $\delta_t/d_b \geq 1/3$, $d_b = 18\text{mm}$). Στο τέλος, η

συμπεριφορά σε συνάφεια τείνει να γίνει του τύπου καθαρής τριβής (τύπος Coulomb), δεδομένου ότι τα τμήματα σκυροδέματος μεταξύ των νευρώσεων έχουν θρυμματιστεί ή αποκοπεί (Σχήματα 1.4α, β), και οι άκρες των νευρώσεων τρίβονται με το σκυρόδεμα χωρίς οποιαδήποτε αξιόλογη αύξηση της δράσης βλήτρου. Το Σχήμα 1.3 παρουσιάζει τα πιθανά διαφορετικά στάδια συνάφειας κατά μήκος μιας αγκύρωσης (Σχήμα 1.3α) και ενός ματίσματος (Σχήμα 1.3β).



(α)

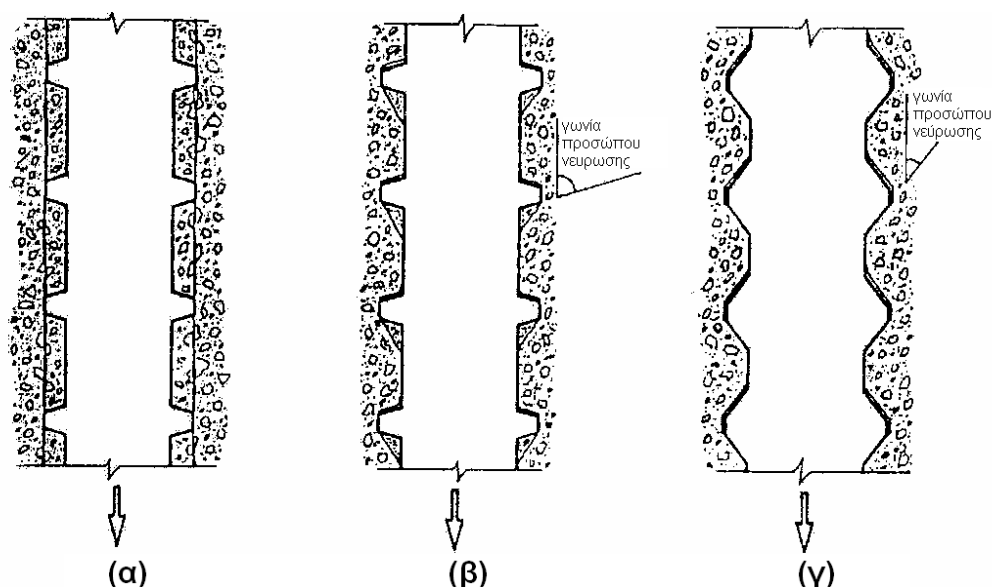


(β)

Σχήμα 1.3 - Χαρακτηριστική συμπεριφορά της συνάφειας (α) μιας αγκύρωσης και (β) ενός ματίσματος: πλήρης απόσχιση στο l_1 , μερική απόσχιση στο l_2 , εγκάρσια ρηγμάτωση ή χημική πρόσφυση στο l_3 (Gambarova et al. 1989).

Στάδιο IVγ: Στην περίπτωση ράβδων με νευρώσεις περισφιγμένες με υψηλό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού, δεν εμφανίζεται απόσχιση και η αστοχία προκαλείται από εξόλκευση των ράβδων. Ο μηχανισμός μεταφοράς δύναμης αλλάζει από την

αντίσταση των νευρώσεων σε τριβή, και ως κριτήριο για αυτήν την μετάβαση μπορεί να θεωρηθεί η διατμητική αντίσταση των τμημάτων σκυροδέματος ανάμεσα στις νευρώσεις (Σχήμα 1.4α). Κάτω από συνεχή φόρτιση, η διεπιφάνεια λειαιίνεται λόγω της φθοράς και της συμπίεσης, οδηγώντας σε μια περαιτέρω μείωση της τάσης συνάφειας.



Σχήμα 1.4 - Μορφή αστοχίας της συνάφειας: (α) εξόλκευση, (β) απόσχιση δημιουργούμενη από την εξόλκευση σε συνδυασμό με τον θρυμματισμό και/ή την διατμητική αστοχία του σκυροδέματος κάτω από τις νευρώσεις, και (γ) απόσχιση σε συνδυασμό με ολίσθηση στα πρόσωπα των νευρώσεων (Cairns 1992, Andreassen 1992).

Όσο διαδραματίζεται το στάδιο III, λόγω της σταδιακής ανάπτυξης της δράσης βλήτρου που ασκείται από τις ράβδους και της διάδοσης των ρωγμών απόσχισης, ενεργοποιούνται όλοι οι πιθανοί μηχανισμοί συνεισφοράς του οπλισμού περίσφιγξης στην συνολική διατμητική αντοχή: στην πραγματικότητα, η αποδοτικότητα της περίσφιγξης εξαρτάται από την επικάλυψη του σκυροδέματος και την απόσταση των ράβδων (Ferguson 1966; Edwards και Jannopoulos 1978; Ferguson et al. 1954; Morita και Kaku 1979), από τον εγκάρσιο οπλισμό (Ferguson 1966; Chinn et al. 1955; Orangun et al. 1977; Losberg και Olsson 1979; Kemp και Wilhelm 1979; Skorogobaton και Edwards 1979; Morita και Kaku 1979; Morita και Fujii 1982), από την εγκάρσια πίεση (Dörr 1978; Robins και Standish 1984) και, τελευταίο αλλά όχι

ασήμαντο, από τη συνοχή των ρωγμών, η οποία είναι ένα από τα πολλά στοιχεία της συμπεριφοράς θραύσης του σκυροδέματος (ανθεκτικότητα σκυροδέματος, δείτε Reinhardt και van der Veen 1990; Rosati και Schumm 1992; Gambarova et al. 1994; Noghabai 1995^a; McCabe και Pantazopoulou 1998).

Το στάδιο III είναι βεβαίως το πιο χαρακτηριστικό για τις αγκυρώσεις και τα ματίσματα στην κατάσταση φορτίων λειτουργικότητας, γι' αυτό, έχει αφιερωθεί μέχρι τώρα σε αυτό το στάδιο ιδιαίτερη προσοχή, ενώ το στάδιο IVβ έχει ερευνηθεί πολύ λιγότερο, αν και η εμφάνιση των ρωγμών απόσχισης σε ολόκληρη την επικάλυψη του σκυροδέματος και στο ελεύθερο τμήμα ανάμεσα στις ράβδους, μπορεί να οδηγήσει σε μια ψαθυρή κατάρρευση, η οποία μπορεί να αποτραπεί μόνο με τη βοήθεια κατάλληλου σχεδιασμού, τόσο της επικάλυψης του σκυροδέματος όσο και του εγκάρσιου οπλισμού.

Όσον αφορά την απόσχιση, η κατάσταση είναι ακόμα χειρότερη στο ελαφρύ σκυρόδεμα: δεδομένου ότι οι ρωγμές τείνουν να διαδοθούν ανάμεσα από τα αδρανή (που δεν αναστέλλουν πια την επέκταση των ρωγμών), οι ρωγμές απόσχισης είναι πιο αμβλείς και πιο ομαλές. Μία κάπως παρόμοια κατάσταση είναι επίσης παρούσα στα υψηλής αντοχής σκυροδέματα ($f_c = 80 \sim 120 \text{MPa}$), όπου πάλι οι ρωγμές διαδίδονται ανάμεσα από τα αδρανή, λόγω (α) του ισχυρού χημικού δεσμού μεταξύ του μίγματος των αδρανών και του κονιάματος, και (β) των πολύ καλών μηχανικών ιδιοτήτων του κονιάματος.

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, τα στάδια από το πρώτο ως το τέταρτο, αναφέρονται στην «τοπική» συμπεριφορά της συνάφειας (Σχήματα 1.1, 1.2 και 1.4), ενώ η γενική συμπεριφορά προκύπτει από την υπέρθεση των διάφορων σταδίων. Δεδομένου ότι η τοπική συμπεριφορά ισχύει για ένα ιδανικό τμήμα μιας ράβδου, και η γενική συμπεριφορά σε ολόκληρη τη ράβδο, οι δύο συμπεριφορές σε γενικές γραμμές πρέπει να αντιμετωπιστούν χωριστά. Εντούτοις, λόγω της αλληλεξάρτησης τους, οι δύο συμπεριφορές εξετάζονται ακολούθως μαζί, ακόμα κι αν οι ενότητες 1.1 και 1.4 αφορούν κυρίως την τοπική συμπεριφορά, οι ενότητες 1.2 και 1.3 τη γενική συμπεριφορά, και η ενότητα 1.5 και τις δύο συμπεριφορές.

Τέλος, πρέπει να θυμηθούμε ότι οι ιδιότητες και η συμπεριφορά της συνάφειας περιγράφονται συχνά με ένα σύνολο σχέσεων, οι οποίες θεωρούνται ως καταστατικοί νόμοι της διεπιφάνειας ράβδου-σκυροδέματος. Στην πραγματικότητα, αυτές οι σχέσεις αντιπροσωπεύουν μια «δομική» συμπεριφορά και όχι μια καταστατική

συμπεριφορά, και γενικά δεν εξετάζουν όλα τα στοιχεία που καθιστούν την πραγματική σύνδεση ράβδου-σκυροδέματος λιγότερο ή περισσότερο διαφορετική από ότι, οι εξιδανικευμένοι τύποι συνάφειας περιγράφουν.

1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά συνάφειας

Η συμπεριφορά συνάφειας εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες και παραμέτρους, οι οποίοι αφορούν βασικά τον οπλισμό (ράβδος, συρματόσχοινο, τένοντας), το σκυρόδεμα και το επίπεδο της τάσης, τόσο στον οπλισμό όσο και στο περιβάλλον σκυρόδεμα. Εντούτοις, την επηρεάζουν και πολλά κατασκευαστικά στοιχεία, όπως η επικάλυψη του σκυροδέματος, το καθαρό διάστημα μεταξύ των ράβδων, ο αριθμός στρώσεων των ράβδων και η ύπαρξη ομάδας ράβδων, η κατεύθυνση σκυροδέτησης σε σχέση με τον προσανατολισμό των ράβδων, και η θέση των ράβδων όσον αφορά την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού σκυροδέματος. Πρέπει επίσης να εξεταστούν άλλες λιγότερο προφανείς παράμετροι, όπως ο λόγος Poisson (που διαδραματίζει, για παράδειγμα, έναν σχετικό ρόλο στον μη μεταλλικό οπλισμό) και το μέγεθος των ράβδων, το οποίο συνοδεύεται από τα μη αμελητέα φαινόμενα μεγέθους (εξάρτηση της αντοχής στο μέγεθος του δοκιμίου) στις λείες ράβδους (η αντοχή συνάφειας μικραίνει στις ράβδους μεγάλης διαμέτρου, Bazant και Sener 1988; Bazant και Desmorat 1994; Bazant et al. 1995, Σχήμα 1.5ε). Εντούτοις, τα φαινόμενα μεγέθους μοιάζουν ανύπαρκτα στις καλά περισφιγμένες ράβδους με νευρώσεις και μόλις που παρατηρούνται στις επιρρεπείς σε απόσχιση αγκυρώσεις (Morita et al., 1993). Τέλος πρέπει να ληφθεί υπόψη το ιστορικό φόρτισης.

1.2.1 Γεωμετρία και επίπεδο τάσης του οπλισμού

Η γεωμετρία της ράβδου, και πιο συγκεκριμένα η γεωμετρία της νεύρωσης, επηρεάζει την συμπεριφορά της σύνδεσης σε υψηλό βαθμό και συμβάλλει στην εγγύηση μιας επαρκούς αντοχής συνάφειας.

Στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιούνται εκτενώς οι ράβδοι με νευρώσεις (συχνά με μια, κατά προσέγγιση, κυκλική διατομή). Σε αυτήν την

περίπτωση η καλύτερη συμπεριφορά της συνάφειας μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια ενός κατάλληλου συνδυασμού ύψους νευρώσεων (h), διαστήματος νευρώσεων (S_R), και διαμέτρου ράβδου (d_b). Ο αποκαλούμενος «δείκτης συνάφειας» ή το «σχετική περιοχή των νευρώσεων» (f_R) είναι ένας συντελεστής που περιέχει τις 3 προαναφερθείσες παραμέτρους (Σχήμα 1.2α, γ):

$$f_R = \frac{A_R}{\pi \cdot d_b \cdot S_R} \quad (1.1)$$

όπου το A_R είναι η προβολή της επιφάνεια μιας νεύρωσης (που αποτελείται συχνά από 2 νευρώσεις) στη εγκάρσια διατομή της ράβδου. Τα πειραματικά στοιχεία αποδεικνύουν ότι η συμπεριφορά της συνάφειας είναι λίγο πολύ η ίδια, υπό τον όρο ότι ο δείκτης συνάφειας και οι συνθήκες της επιφάνειας είναι οι ίδιοι, και ότι η γωνία των νευρώσεων είναι μεγαλύτερη από 30° (Σχήμα 1.4.2α). Οι γενικά αποδεκτές τιμές 0.05~0.10 αντιπροσωπεύουν ένα καλό συμβιβασμό για το f_R , όσον αφορά την οριακή αντοχή συνάφειας, την δυνατότητα απόσχισης, τις βιομηχανικές απαιτήσεις και την καλή συμπεριφορά σε φορτία λειτουργίας (περιορισμένη διάνοιξη ρωγμών και απόσχιση επικάλυψης). Ο Rehm (1969) διαπίστωσε ότι η αντοχή συνάφειας τείνει να είναι μια γραμμική συνάρτηση του f_R (Σχήμα 1.5α), αλλά οι πρόσφατες μελέτες σε πολύ καλά περισφιγμένα δοκίμια δοκών (Darwin και Graham, 1993) και σε ασθενώς οπλισμένα και αμφιέρειστα δοκάρια (Tholen και Darwin, 1998) οδηγούν σε κάπως αντιφατικά συμπεράσματα. Στην πρώτη περίπτωση, αυξήσεις στην σχετική περιοχή των νευρώσεων οδήγησαν σε σημαντική αύξηση της αντοχής της συνάφειας, ενώ στην τελευταία περίπτωση η σχετική περιοχή των νευρώσεων δεν είχε επιπτώσεις στην στροφική ικανότητα της πλαστικής άρθρωσης, η οποία σχετίζεται σημαντικά με τη συμπεριφορά της σύνδεσης ($f_R = 0.069$ και 0.119 , $A_S / bd = 1\%$ και 1.4% , δηλ. = 43% και 68% από το ποσοστό οπλισμού που αντιστοιχεί στην ισόρροπη διατομή). Εντούτοις, πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη η σημασία της περισφιγξης.

Στις κατασκευές προεντεταμένου σκυροδέματος, χρησιμοποιούνται εκτενώς οι τένοντες που αποτελούνται από πολλά συρματόσχοινα. Μολονότι, κατά κανόνα, χρησιμοποιούνται τα λεία συρματόσχοινα, τα οδοντωτά εγγυώνται την καλύτερη

συμπεριφορά σε συνάφεια (με ένα μικρότερο μήκος αγκύρωσης), αλλά με το κόστος μιας ισχυρότερης δράσης απόσχισης (επικίνδυνη στις λεπτές κατασκευές προεντεταμένου σκυροδέματος). Κατά γενική ομολογία, υψηλότερες αντοχές συνάφειας μπορούν να επιτευχθούν με την αύξηση της διαμέτρου των εξωτερικών συρματόσχοινων (έναντι αυτής του κεντρικού συρματόσχοινου) και μειώνοντας το βήμα έλικας των εξωτερικών συρματόσχοινων. Η σχέση τάσης συνάφειας-ολίσθησης για λείο και οδοντωτό τένοντα που αποτελείται από 7 συρματόσχοινα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.5β (Karlsson, 1985).

Όσον αφορά τις βασικές αρχές της συμπεριφοράς της τάσης συνάφειας-ολίσθησης που συζητήθηκαν ανωτέρω (Σχήμα 1.1α), υποτίθεται ότι η μη γραμμική συμπεριφορά εξαρτάται από την χαλάρωση του σκυροδέματος που περιβάλλει τη ράβδο. Αυτή η χαλάρωση εξαρτάται από την ρηγμάτωση γύρω από τις άκρες των νευρώσεων, τον τοπικό θρυμματισμό του σκυροδέματος, την διαδοχική ανάπτυξη ακτινικών και διαμήκων ρωγμών απόσχισης και τον σχηματισμό ρηγματωμένων διατμητικών επιπέδων (Σχήματα 1.4α και β). Η τοπική συμπεριφορά τάσης συνάφειας-ολίσθησης έχει μελετηθεί αρκετά, με πειράματα εξόλκευσης με μικρό μήκος έμπηξης. Χαρακτηριστικό αυτών των πειραμάτων είναι ότι η τάση στον χάλυβα κρατιέται σχετικά σε χαμηλό επίπεδο και δεν μπορεί να διαδραματίσει οποιοδήποτε σημαντικό ρόλο. Εντούτοις, στα μεγάλα μήκη έμπηξης, που είναι και ο κανόνας στις κατασκευές, οι τάσεις στον οπλισμό είναι σίγουρα υψηλότερες, αλλά ο ρόλος τους μπορεί ακόμα να αμεληθεί εφόσον, ο μηχανισμός μεταφοράς της δύναμης είναι, η αντίσταση των νευρώσεων (με τον θρυμματισμό του σκυροδέματος μπροστά από τις νευρώσεις, ή/και την απόσχιση της επικάλυψης). Στην πραγματικότητα, η σχέση της εγκάρσια παραμόρφωσης με τη διαμήκη τάση του χάλυβα είναι μικρή σε σύγκριση με το ύψος των νευρώσεων (επίδραση Poisson). Εντούτοις, όταν ο μηχανισμός μεταφοράς της δύναμης βασίζεται περισσότερο στην τριβή (όπως στις λείες ράβδους και τα προεντεταμένα συρματόσχοινα) δεν μπορεί να μην ληφθεί υπόψη η τοπική εγκάρσια παραμόρφωση της ράβδου, δεδομένου ότι η τραχύτητα της επιφάνειας και η εγκάρσια μείωση της διαμέτρου της ράβδου μπορούν να έχουν το ίδιο μέγεθος. Αυτή η εγκάρσια συστολή μπορεί να μειώσει αρκετά την ακτινική θλιπτική τάση και, ως εκ τούτου, την τάση συνάφειας της τριβής.

Για ράβδους με νευρώσεις, η επίδραση της τάσης του χάλυβα είναι μικρή εφόσον ο χάλυβας είναι στο ελαστικό φάσμα. Εντούτοις, πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η διαρροή έχει μια δραστική αρνητική επίπτωση στον μηχανισμό της

σύνδεσης με συνέπεια έναν μη γραμμικό κατίοντα κλάδο στη σχέση τάσης συνάφειας-ολίσθησης από την αρχή της διαρροής (Shima et al. 1987; Engström 1992; Bigaj 1995, δείτε το στάδιο II στο Σχήμα 1.4.4α). Ως εκ τούτου, η σχέση τάσης συνάφειας-ολίσθησης μπορεί να επηρεαστεί όχι μόνο με τη χαλάρωση του περιβάλλοντος σκυροδέματος, αλλά και με τη χαλάρωση του χάλυβα όταν διαρρέει.

Η επίδραση στην ανάπτυξη της τάσης συνάφειας-ολίσθησης, είναι παρόμοια με την επίδραση των ρωγμών απόσχισης, μέχρι την επικάλυψη του σκυροδέματος (IVβ στο Σχήμα 1.1α). Η επίδραση της διαρροής του χάλυβα δεν είναι, ακόμα, καλά διασαφηνισμένη. Στα στάδια II και III (Σχήμα 1.2α), η συνάφεια μεταφέρεται από έναν συνδυασμό θλιπτικών τάσεων από τις νευρώσεις και την τριβή. Λόγω της συστολής της χαλύβδινης ράβδου κατά και μετά την διαρροή, η εξωτερική συνιστώσα της πίεσης p^* ή p^{**} μπορεί να μειωθεί, με συνέπεια μια μειωμένη συμβολή από τη μακροτριβή. Επιπλέον, είναι δυνατό η διαρροή να έχει πρόσθετες επιπτώσεις στη γεωμετρία των νευρώσεων, με τη μείωση της επιφάνειας των προεξοχών των νευρώσεων και σχετικής περιοχής των νευρώσεων (δείκτης συνάφειας).

Στα προεντεταμένα συρματόσχοινα το φαινόμενο Poisson έχει ιδιαίτερη επίδραση στην τάση συνάφειας, όσο ακόμα ο χάλυβας είναι στην ελαστική περιοχή. Όπως αναφέρθηκε ήδη, η εγκάρσια παραμόρφωση του προεντεταμένου τένοντα εξαρτάται από την κατάσταση (μήκος μεταφοράς της αγκυρωμένης ζώνης), και διαφέρει για τον προεντεταμένο οπλισμό, και τον οπλισμό που εντείνεται μετά.

Όταν η εξωτερική δύναμη απελευθερώνεται, η διάμετρος ενός προεντεταμένου τένοντα αυξάνεται. Αυτό δημιουργεί τις ακτινικές θλιπτικές τάσεις και, ως εκ τούτου, συμβάλλει στην αντοχή της σύνδεσης μέσω τριβής. Αντιθέτως, η αντίσταση της σύνδεσης ενός τένοντα μειώνεται έντονα, όταν αυξάνεται η τάση του χάλυβα, λόγω της εγκάρσιας συστολής της διατομής της ράβδου. Κατά συνέπεια, δύο διαφορετικές καταστάσεις συνάφειας μπορούν να διακριθούν (δείτε επίσης την ενότητα 1.5, Σχήμα 1.14α, περιοχή μήκους έμπηξης, κατάσταση ώθησης, και το Σχήμα 1.14β, περιοχή καμπτικής συνάφειας, κατάσταση εξόλκευσης). Κατά μήκος του μήκους αγκύρωσης, οι τάσεις του χάλυβα μειώνονται, όταν ο προεντεταμένος τένοντας αποδεσμεύεται (χαλαρώνει). Αυτό προκαλεί μια αύξηση της διαμέτρου του τένοντα και συμβάλλει σε μια καλύτερη αντοχή συνάφειας. Από την άλλη μεριά, κάτω από καμπτική φόρτιση, η τάση του χάλυβα σε μια ρηγματωμένη διατομή

αυξάνεται, με συνέπεια την μείωση της διαμέτρου του τένοντα και χαμηλότερη αντοχή συνάφειας.

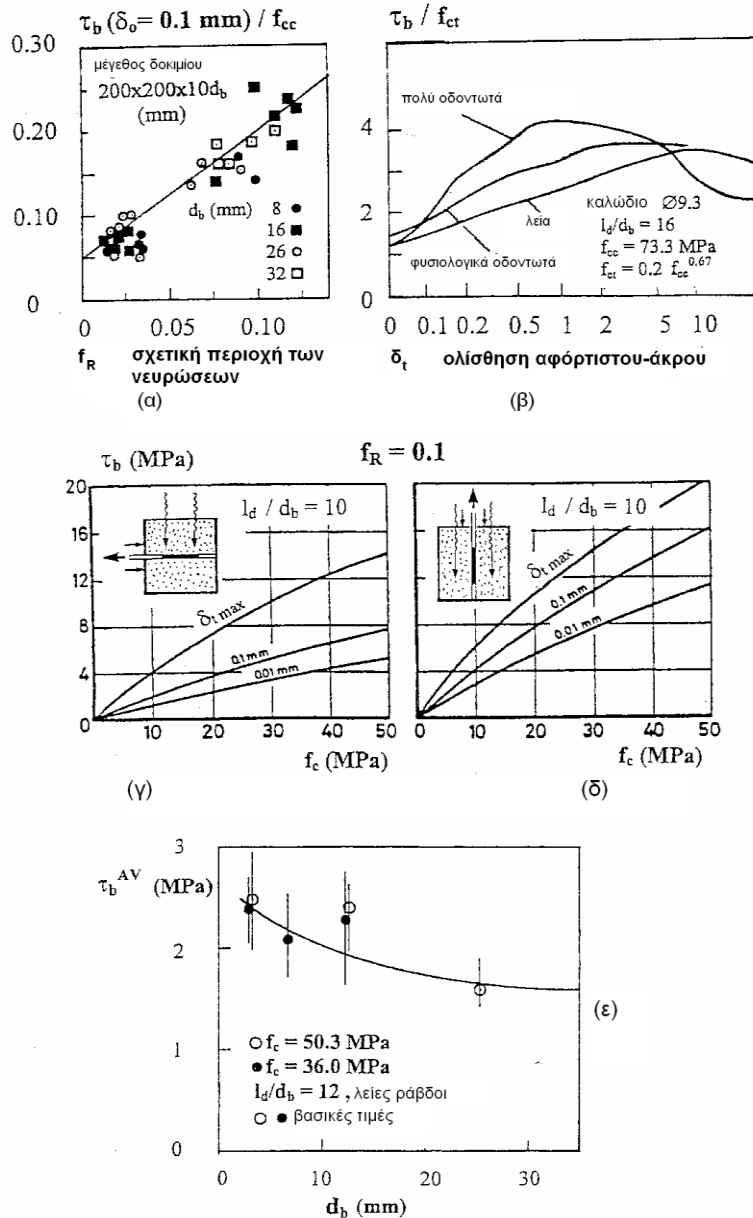
Όσον αφορά τον οπλισμό που εντείνεται μετά, η επίδραση της συστολής του τένοντα λόγω της επίδρασης Poisson μπορεί να εξηγηθεί με παρόμοιο τρόπο. Προφανώς το μέγεθος αυτής της επίδρασης εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας του τένοντα, η οποία είναι συνήθως αρκετά χαμηλότερη απ' ό,τι στην περίπτωση του συνηθισμένου οπλισμού με νευρώσεις. Εντούτοις, πρέπει να ληφθεί υπόψη, ότι το επίπεδο της τάσης στον προεντεταμένο χάλυβα, και, ως εκ τούτου, η σχετική εγκάρσια παραμόρφωση, είναι πολύ πιο υψηλό, απ' ό,τι στον συνηθισμένο οπλισμό.

Η επίδραση του επιπέδου της τάσης του οπλισμού στη συμπεριφορά της συνάφειας αναγνωρίζεται ρητά στο MC90 θεωρώντας μια υψηλότερη αντοχή συνάφειας κατά μήκος του μήκους αγκύρωσης των προεντεταμένων τενόντων.

1.2.2 Ποιότητα σκυροδέματος και το επίπεδο έντασης

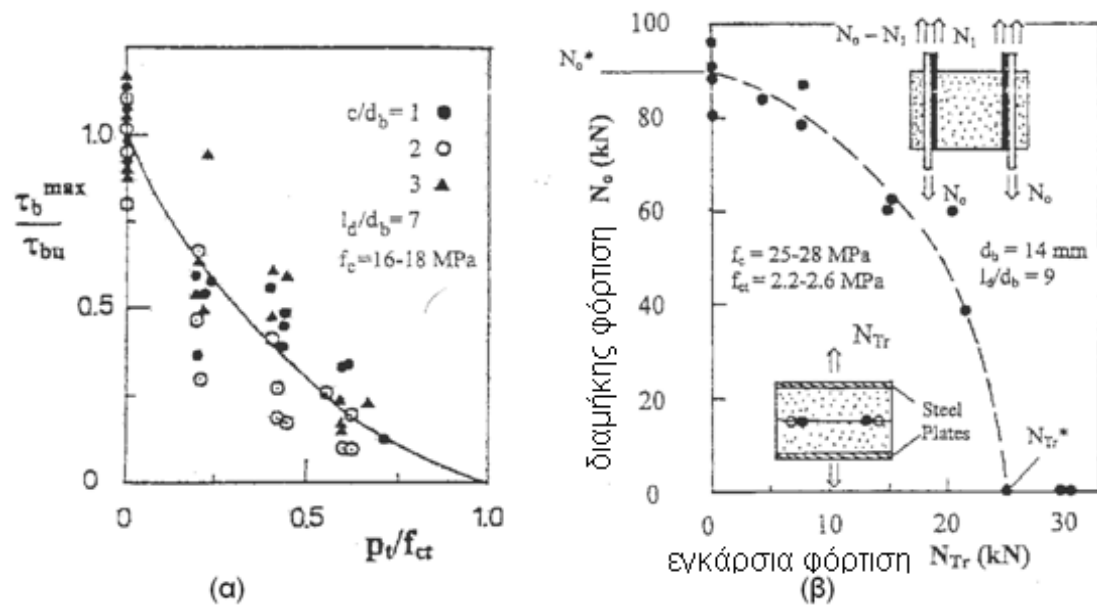
Η ποιότητα του σκυροδέματος είναι ύψιστης σημασίας για την συνάφεια, όσον αφορά, όχι μόνο την αντοχή του σκυροδέματος, αλλά και τα κατασκευαστικά στοιχεία που σχετίζονται με την σκυροδέτηση, τα οποία συχνά είναι σημαντικότερα από την ίδια την αντοχή του.

Δεδομένου ότι η συνάφεια προκύπτει από την τοπική θλίψη στο κάτω μέρος των νευρώσεων και συσχετίζεται άμεσα με τη διατμητική συνιστώσα των δυνάμεων της διεπιφάνειας, η συμπεριφορά της σύνδεσης εξαρτάται τόσο από την πολυαξονική συμπεριφορά του σκυροδέματος στη θλίψη (που δεν είναι πολύ ευαίσθητη σε σχέση με την μονοαξονική αντοχή του σκυροδέματος στη θλίψη, f_c) όσο και από την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος f_{ct} (που εξαρτάται λιγότερο από την θλιπτική αντοχή f_c , γραμμικά). Εντούτοις, οι f_c και f_{ct} διαδραματίζουν έναν σημαντικό ρόλο στις αστοχίες εξόλκευσης και απόσχισης, αντίστοιχα. Η λιγότερη γραμμική εξάρτηση της συνάφειας με την μονοαξονική αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη παρουσιάζεται στα Σχήματα 1.5γ, δ. Σημειώστε ότι, για τον ίδιο δείκτη συνάφειας ($f_R = 0.1$) και μήκος έμπηξης ($l_d / d_b = 10$), η θέση της ράβδου κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης είναι σημαντικότερη από την αντοχή του σκυροδέματος.



Σχήμα 1.5 - Απόκριση της συνάφειας σε σχέση με τις επιφανειακές παραμορφώσεις του οπλισμού (α, β), την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (γ, δ), και την διάμετρο της ράβδου (ε): (α) οπλισμένο σκυρόδεμα, ρόλος του δείκτη συνάφειας ή της σχετικής περιοχής των νευρώσεων (Rehm 1969: η διάταξη των ράβδων είναι σε ορθή γωνία σε σχέση με την κατεύθυνση της σκυροδέτησης), (β) προεντεταμένο σκυρόδεμα, επιδράσεις επιφανειακών παραμορφώσεων (Karlsson 1985), (γ, δ) πειράματα εξόλκευσης για διαφορετικές κατευθύνσεις σκυροδέτησης (Martin και Noakowski 1981: τάση συνάφειας σε σχέση με την αντοχή του σκυροδέματος για διαφορετικές τιμές ολίσθησης στο αφόρτιστο άκρο της ράβδου), (ε) φαινόμενα μεγέθους σε σχετικά μεγάλα μήκη έμπηξης (λείες ράβδοι, $d_b = 1, 1/2, 1/4$ και $1/8$ ίντσες, Bazant et al. 1995).

Στην πραγματικότητα, η συνάφεια είναι καλύτερη στις οριζόντιες ράβδους που τοποθετούνται στο κάτω μέρος του καλουπιού, και στις κάθετες ράβδους που φορτίζονται αντίθετα από την κατεύθυνση της σκυροδέτησης (και στις δύο περιπτώσεις οι νευρώσεις ωθούν ένα λιγότερο πορώδες κονίαμα). Το αντίθετο ισχύει για τις οριζόντιες ράβδους που τοποθετούνται αρκετά παραπάνω από το κατώτατο σημείο του καλουπιού (μικρό-φουσαλίδες νερού προσκολλώνται στο τμήμα της ράβδου) και για τις κάθετες ράβδους που φορτίζονται στην κατεύθυνση της σκυροδέτησης (οι νευρώσεις ωθούν ένα πιο πορώδες κονίαμα).



Σχήμα 1.6 - Επίδραση του εγκάρσιου εφελκυσμού στην αντοχή συνάφειας: (α) ο ρόλος της επικάλυψης του σκυροδέματος σε μικρή αγκύρωση, που υποβάλλεται σε μια εγκάρσια τάση (p_t , Nagatomo και Kaku 1992), και (β) περιβάλλουσα αστοχίας ενός ματίσματος που υποβάλλεται σε μια εγκάρσια εφελκυστική δύναμη, παρουσιάζοντας μια αστοχία απόσχισης στο επίπεδο που περιέχει τις ράβδους (N_{Tr} , Reuter Eligehausen 1992, $N_1 = 0.38N_0$)

Το επίπεδο έντασης στο σκυρόδεμα που περιβάλλει μία ράβδο επιδρά σημαντικά στην σύνδεση. Οι εγκάρσιες εφελκυστικές δυνάμεις οδηγούν τη συμπεριφορά των αγκυρώσεων και των ματισμάτων προς την αστοχία απόσχισης, και μπορούν ακόμη και να μετατρέψουν μια αστοχία εξόλκευσης σε αστοχία απόσχισης. Και στις δύο

περιπτώσεις η κατάσταση είναι ακόμα χειρότερη, εάν επιπλέον εφελκυστικές τάσεις, είναι παρούσες, εξ αιτίας των επιδράσεων της θερμοκρασίας και της συστολής.

Στο Σχήμα 1.6α παρουσιάζονται οι αρνητικές επιδράσεις των εγκάρσιων εφελκυστικών τάσεων σε μια μικρή αγκύρωση, για τρεις διαφορετικές τιμές της επικάλυψης του σκυροδέματος. Σημειώστε ότι η αύξηση της επικάλυψης δεν βοηθά σημαντικά, σε μια κατάσταση, επιρρεπή στην απόσχιση. Το Σχήμα 1.6β αναφέρεται σε μια σειρά δοκιμών που αντιπροσωπεύουν το εξωτερικό μέρος ενός ματίσματος. Η περιβάλλουσα αστοχίας δείχνει την μηχανική υποβάθμιση που προκαλείται από μια εγκάρσια δύναμη.

Οι εγκάρσιες θλιπτικές δυνάμεις ευνοούν τη συνάφεια, ανάλογα με τη φύση τους (ενεργή ή παθητική περίσφιγξη, δείτε επίσης την ενότητα 1.4). Η ενεργή περίσφιγξη είναι πάντα ευνοϊκή, ιδιαίτερα σε μια κατάσταση που τείνει να οδηγήσει σε απόσχιση, αλλά γίνεται σχεδόν ουδέτερη σε μια κατάσταση τριβής με μεγάλες τιμές επικάλυψης. Η παθητική περίσφιγξη απαιτεί ένα ορισμένο ποσό ολίσθησης και ανοίγματος ρωγμών για να ενεργοποιηθεί, και είναι χρήσιμη μετά από την απόσχιση της επικάλυψης. Τέλος, πρέπει να παρατηρηθεί ότι μια κατάσταση εφελκυσμού στο σκυρόδεμα και παράλληλα στον οπλισμό (όπως προβλήματα εφελκυστικής ακαμψίας), εμφανώς εξασθενίζει σημαντικά την αποδοτικότητα της συνάφειας.

1.2.3 Κατασκευαστικά στοιχεία και περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Ένας αριθμός κατασκευαστικών παραμέτρων επιδρά στη συμπεριφορά της σύνδεσης. Αυτές οι παράμετροι συσχετίζονται εν μέρει με το σκυρόδεμα (ανάμιξη και μέγιστο μέγεθος αδρανών), και εν μέρει με τον οπλισμό (ελεύθερο κενό μεταξύ των ράβδων, αριθμός στρώσεων ράβδων, διάμετρος ράβδων και τύπος του υλικού).

Όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι πιο χαρακτηριστικές είναι:

- α) οξείδωση,
- β) διάβρωση χάλυβα,
- γ) υποβάθμιση της συνάφειας λόγω υψηλής θερμοκρασίας, και
- δ) βελτίωση συνάφειας λόγω χαμηλής θερμοκρασίας.

Εξ αιτίας της πολυπλοκότητας των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, υπενθυμίζονται και σχολιάζονται εδώ μόνο μερικά στοιχεία πειραματικών δοκιμών.

- *Οξείδωση ράβδων*

Αρχικά η οξείδωση των ράβδων, εξ αιτίας της έκθεσης του χάλυβα στο περιβάλλον, (εναλλαγή της θερμοκρασίας με φυσικό τρόπο ή από την κατάσβεση με νερό) ή των ατμοσφαιρικών συνθηκών (όπως η υγρασία, η υγροποίηση και η ρύπανση), αποτελείται από ένα λεπτό επίστρωμα οξειδίου του σιδήρου $0.3 \sim 1.5 \text{ g} / \text{dm}^2$ (δείτε αναφορές στον Morgan 1998), που δεν εξασθενίζει τις ιδιότητες της σύνδεσης, αλλά μπορεί ακόμη και να βελτιώσει τη συμπεριφορά σε συνάφεια όσον αφορά τις ράβδους νέου τύπου (Σχήμα 1.7 α).

Όσον αφορά τη μείωση της διαμέτρου των ράβδων, οι τιμές που βρίσκονται συχνά στην βιβλιογραφία κυμαίνονται από 0.008 έως 0.04 mm., με μια απώλεια της διατομής μέχρι 1% στις ράβδους μικρότερης διαμέτρου, έναντι της ευρέως-αποδεκτής κατασκευαστικής ανοχής της τάξεως του 6~10% στα περισσότερα πρότυπα προϊόντων.

Εν περιλήψει, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι :

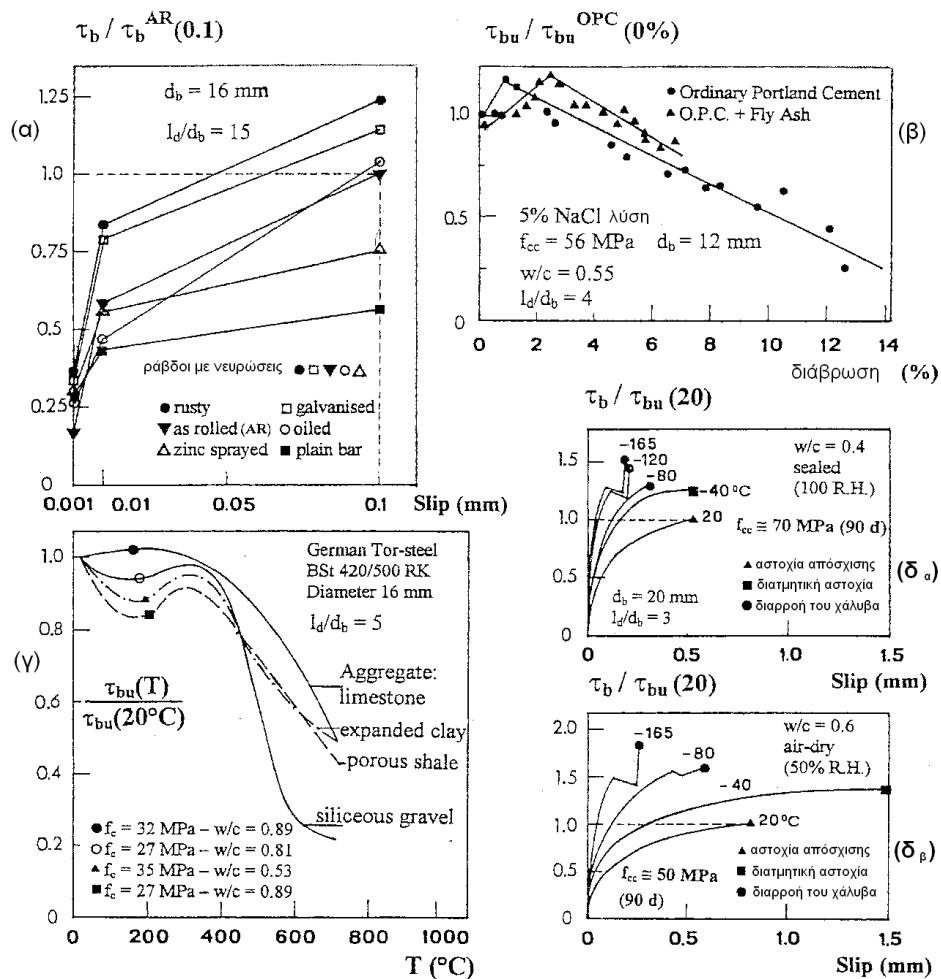
- (α) η αντοχή της σύνδεσης ενισχύεται γενικά από την παρουσία παραμένουσας οξείδωσης, ενδεχομένως μέχρι το σημείο, όπου οι διαστάσεις των νευρώσεων γίνονται κρίσιμες,
- (β) η παρουσία οξείδωσης μπορεί να εμποδίσει την περαιτέρω διάβρωση του χάλυβα σε σκυρόδεμα καλής ποιότητας, και
- (γ) η επίδραση της απώλειας διατομής είναι πάρα πολύ μικρή για να είναι σημαντική, δεδομένου ότι είναι σύμφωνη με τις κατασκευαστικές ανοχές μεγέθους.

- *Διάβρωση ράβδων*

Τα ιόντα και τα αέρια του χλωριδίου (όπως το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα) μπορούν να διαπεράσουν το πορώδες σκυρόδεμα πολύ εύκολα, και μόλις φτάσουν στον οπλισμό από χάλυβα, να αποσταθεροποιήσουν το λεπτό στρώμα επικάλυψης του οξειδίου του σιδήρου, το οποίο προστατεύει τις ράβδους από τη διάβρωση. Κατά συνέπεια, εμφανίζεται μια αυξανόμενη απώλεια της επιφάνειας εγκάρσιας διατομής του χάλυβα και μια αποδυνάμωση της σύνδεσης ράβδου-σκυροδέματος, εξ αιτίας της σταδιακής ανάπτυξης των συνεπειών της διάβρωσης στη διεπιφάνεια, καθώς επίσης και της απόσχισης της επικάλυψης και του θρυμματισμού.

Τα πειράματα εξόλκευσης που εκτελούνται από διάφορους ερευνητές (δείτε για παράδειγμα Carrera και Ghoddoussi 1992), που εκμεταλλεύονται τις επιταχυνόμενες

διαδικασίες που είναι βασισμένες στα ηλεκτροχημικά συστήματα, δείχνουν ότι η αντοχή της σύνδεσης αυξάνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό διάβρωσης μέχρις ενός μεγίστου (Σχήμα 1.7β, διάλυμα NaCl 5%), αλλά περαιτέρω αύξηση προκαλεί σημαντική μείωση της αντοχής της σύνδεσης (το ποσοστό διάβρωσης στο Σχήμα 1.7β είναι η επί τοις εκατό απώλεια του βάρους έναντι του αρχικού βάρους του σπλισμού).



Σχήμα 1.7 - Επίδραση των ποικίλων επιφανειακών συνθηκών της απόκρισης της τάσης συνάφειας-ολίσθησης σε ένα πείραμα εξόλκευσης, (α) (Morgan 1988: $\tau_b^{AR}(0.1) = 10 \sim 11$ MPa = τιμή της τάσης για ολίσθηση μήκους 0.1 χιλιοστού, όπως ολισθαίνει, (β) επίδραση της απώλειας του όγκου της ράβδου (διάβρωση) σύμφωνα με τους Gabrera και Ghoddoussi (1992: $\tau_{bu}^{OPC}(0\%)$ = αντοχή συνάφειας στο Ordinary Portland Cement χωρίς διάβρωση της ράβδου), (γ) αντοχή συνάφειας σε υψηλή θερμοκρασία (Schneider 1985), και (δ) σχέση τάσης συνάφειας/ολίσθησης για διαφορετικές χαμηλές θερμοκρασίες (van der Veen 1992): $\tau_{bu}(20^\circ C) \approx 0.5 f_{cc}$

Η αρχική αύξηση έχει αποδοθεί στην επιθετική φύση των οξειδίων του σιδήρου, ενώ η επόμενη μείωση συσχετίζεται με τη συγκέντρωση ενός μαλακού στρώματος των χαλαρών προϊόντων διάβρωσης στη διεπιφάνεια της ράβδου-σκυροδέματος.

Στο Σχήμα 1.7β η καλύτερη συμπεριφορά που επιτυγχάνεται με την εισαγωγή της ιπτάμενης τέφρας αποδίδεται στην αυξανόμενη πυκνότητα, με συνέπεια σε ένα χαμηλότερο ποσοστό διάβρωσης και σε μια καλύτερη προστασία των ράβδων.

- *Επιπτώσεις υψηλής θερμοκρασίας*

Αφού οι πειραματικές δοκιμές σε υψηλές θερμοκρασίες είναι ένας δύσκολος στόχος, τα περισσότερα πειράματα που εξετάζουν τις ιδιότητες της συνάφειας έχουν εκτελεστεί στη θερμοκρασία δωματίου, μετά από έναν ενιαίο θερμικό κύκλο σε υψηλή θερμοκρασία ($T=100\sim 800^{\circ}\text{C}$, θερμαίνοντας, έως μια προεπιλεγμένη θερμοκρασία, και ψύχοντας, ημισταθερές συνθήκες). Κατά αυτόν τον τρόπο μελετήθηκαν, οι υπολειπόμενες ιδιότητες της συνάφειας, αλλά, δεδομένου ότι οι υπολειπόμενες μηχανικές ιδιότητες είναι γενικά χειρότερες από εκείνες σε υψηλή θερμοκρασία (Schneider et al. 1985), η υπολειπόμενη συμπεριφορά είναι ένας «ασφαλής-δευτερεύων» δείκτης της συνάφειας, κάτω από συνθήκες θερμότητας. Εντούτοις, οι συμπεριφορές συνδέσεων σε κατάσταση υψηλής θερμοκρασίας, που μειώνεται έως ότου φτάσει σε θερμοκρασία δωματίου, είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, και χαρακτηρίζονται από μια σημαντική αλλοίωση πέρα των 400°C (Σχήμα 1.7γ).

Τα κύρια χαρακτηριστικά που ερευνήθηκαν ήταν:

1. ποσοστά ανάμιξης και τύπος αδρανών υλικών
2. συνθήκες συντήρησης και μορφή του δοκιμίου
3. τύπος οπλισμού, συνθήκες επιφάνειας και διάμετρος ράβδου
4. πειραματική διαδικασία.

Από τα πειράματα μπορούν να προέλθουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. οι λείες ράβδοι είναι σίγουρα πιο ευαίσθητες από τις ράβδους με νευρώσεις σε υψηλές θερμοκρασίες
2. η διάμετρος των ράβδων έχει μικρή ή αμελητέα επίδραση στη συμπεριφορά της σύνδεσης
3. η επίδραση της αντοχής του σκυροδέματος είναι ακανόνιστη, και η επίδραση της αναλογίας w/c (λόγος νερού προς σκυρόδεμα) δεν έχει εξακριβωθεί
4. ο τύπος των αδρανών είναι ο κύριος παράγοντας στην εξασφάλιση μιας υψηλής αντοχής της σύνδεσης, επειδή όσο υψηλότερη είναι η θερμική ευαισθησία των αδρανών, τόσο μικρότερη είναι η θερμική βλάβη στο

σκυρόδεμα, εξαιτίας των χαμηλών διαφορικών θερμικών παραμορφώσεων σε υψηλή θερμοκρασία.

5. τα συντηρημένα σε υγρό περιβάλλον, δοκίμια έχουν χαμηλότερη αντοχή συνάφειας σε υψηλή θερμοκρασία, ή μετά από έναν κύκλο σε υψηλή θερμοκρασία.

- *Επιπτώσεις χαμηλής θερμοκρασίας*

Οι πληροφορίες για τη συμπεριφορά της συνάφειας σε χαμηλή θερμοκρασία ($T = -50/-150^{\circ}\text{C}$) είναι μάλλον περιορισμένες, αλλά όχι και τόσο χρήσιμες, αφού θερμοκρασίες κάτω των -50°C δεν είναι σύνηθες φαινόμενο και αναμένονται στο αρκτικό περιβάλλον και σε κρυογόνες συνθήκες.

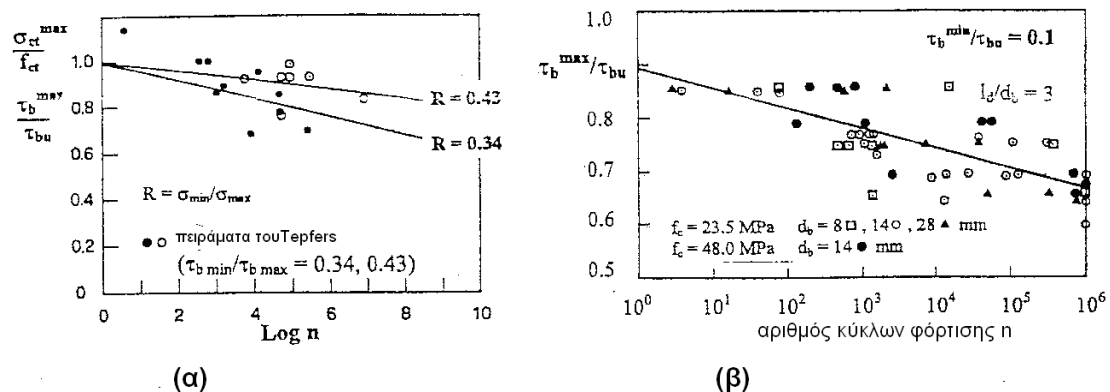
Εκτός από τη θερμοκρασία, το ποσοστό υγρασίας διαδραματίζει τον σχετικότερο ρόλο (κορεσμένο σε νερό σκυρόδεμα, στεγανοποιημένο σκυρόδεμα, σκυρόδεμα ξηρό από αέρα).

Σύμφωνα με τα πειράματα του van der Veen (1992, πειράματα εξόλκευσης, Σχήμα 1.8δ), τα δοκίμια από σκυρόδεμα που δεν περιέχουν αέρα δίνουν τη χαμηλότερη αντοχή συνάφειας, καθώς και τα, κορεσμένα με νερό, δοκίμια. Εντούτοις, η μέγιστη αντοχή συνάφειας σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι πάντα μεγαλύτερη απ' ό,τι στη θερμοκρασία δωματίου, δεδομένου ότι οι εφελκυστικές και θλιπτικές αντοχές του σκυροδέματος αυξάνουν σε χαμηλές θερμοκρασίες. Κατά συνέπεια, η μορφή αστοχίας στα πειράματα εξόλκευσης του Van der Veen μετατοπίζεται από την απόσχιση ($+20^{\circ}\text{C}$) στην διάτμηση (-40°C) και στην διαρροή της ράβδου ($<-80^{\circ}\text{C}$). Δυστυχώς, η καταστατική συμπεριφορά κατασκευής επισκιαζεται από την δομική συμπεριφορά των δοκιμίων στο Σχήμα 1.7δ. Εντούτοις, οι ευνοϊκές επιδράσεις των χαμηλών θερμοκρασιών στην συνάφεια είναι πλήρως γνωστές. Σημειώστε ότι η ξαφνική αύξηση της ολίσθησης στις χαμηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να προκληθεί με τη διαρροή της ράβδου, που ακολουθείται από τη σκλήρυνση του χάλυβα.

1.2.4 Ιστορικό φόρτισης

Η συμπεριφορά της σύνδεσης, και συγκεκριμένα η σχέση συνάφειας-ολίσθησης, εξαρτάται, από την επανάληψη της φόρτισης (κόπωση υψηλών και χαμηλών κύκλων: Rehm και Eligehausen 1979; Eligehausen et al. 1983; Balazs 1986 και 1991), το

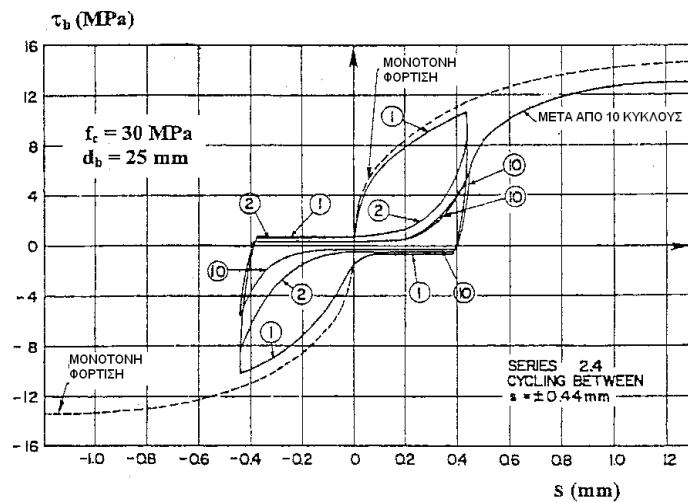
ρυθμό (Vos και Reinhardt, 1982), την συχνότητα (Adrouche και Lorrain 1987) και την δράση μακράς διάρκειας της φόρτισης (Franke 1976), δεδομένου ότι αυτές οι δράσεις, οι οποίες σχετίζονται με το χρόνο, έχουν μια σημαντική επίδραση στην αντοχή του σκυροδέματος και στην ικανότητα παραμόρφωσής του, οι οποίες, διαδοχικά, έχουν επιπτώσεις στην συμπεριφορά σε συνάφεια. Κατά συνέπεια, όχι μόνο η σχέση συνάφειας-τάσης, αλλά και οι μορφές αστοχίας (χημική πρόσφυση, απόσχιση και εξόλκευση), επηρεάζονται με κάποιο τρόπο από το ιστορικό της φόρτισης.



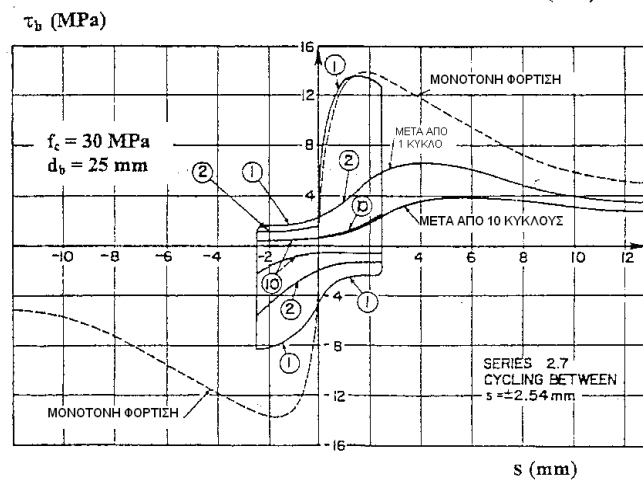
Σχήμα 1.8 - καμπύλες του Wöhler: εξασθένηση αντοχής συνάφειας (α) σε μικρές αγκυρώσεις επιρρεπείς στην απόσχιση και σύγκριση με εφελκόμενο σκυρόδεμα (Tepfers 1973), και (β) σε δοκίμια εξόλκεσης (Eligehausen 1979 δείτε Σχήμα 1.5δ $l_d/d_b = 3$).

Δεδομένου ότι η αστοχία απόσχισης συσχετίζεται, συνήθως, με την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, τα αποτελέσματα κόπωσης, εκ των προτέρων είναι τα ίδια που παρατηρούνται και τελικά (δείτε τις καμπύλες Wöhler στο Σχήμα 1.8). Όσον αφορά την αστοχία εξόλκεσης, που συσχετίζεται συνήθως με το θρυμματισμό του σκυροδέματος στο κάτω μέρος των νευρώσεων και με την αστοχία διάτμησης που ακολουθεί κατά μήκος μιας επιφάνειας ολίσθησης (εντός μίας στρώσης σκυροδέματος που βρίσκεται κοντά στον σπλισμό), οι επιδράσεις της κόπωσης στην συνάφεια είναι παρόμοιες με εκείνες που παρατηρούνται στα κεντρικά-φορτιζόμενα δοκίμια έγχυτου σκυροδέματος (κόπωση μικρής και μεγάλης διάρκειας). Φυσικά, η ανακυκλιζόμενη φόρτιση είναι πιο επιβλαβής από την επαναλαμβανόμενη.

Ο ρυθμός φόρτισης έχει μια σημαντική επίδραση στην ακαμψία και την αντοχή συνάφειας: όσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός φόρτισης ($d\tau_b/dt = 0.3 \cdot 10^{-3} \sim 40 \text{MPa/ms}$) και όσο χαμηλότερη η αντοχή του σκυροδέματος ($f_c = 20 \sim 60 \text{MPa}$), τόσο καλύτερες είναι οι μηχανικές ιδιότητες της σύνδεσης στις ράβδους με νευρώσεις (τ_{bu} μέχρι 2.5 φορές την αντοχή της σύνδεσης σε κανονικές εργαστηριακές συνθήκες με $d\tau_b/dt = 0.3 \text{MPa/s}$, Vos and Reinhardt 1982).



(α)



(β)

Σχήμα 1.9 - Ανακυκλιζόμενη φόρτιση υπό τις επιβληθείσες μετακινήσεις : (α) σε χαμηλές τάσεις συνάφειας ($\tau_b < 0.8\tau_{bu}$, πρώτος κύκλος), και (β) σε υψηλές τάσεις συνάφειας ($\tau_b \approx \tau_{bu}$, πρώτος κύκλος) μετά τον Eligehausen et al. (1983).

Τέλος έχει αποδειχθεί ότι η ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε χαμηλή τάση συνάφειας, υποβαθμίζει την συμπεριφορά σε συνάφεια κατά την διάρκεια της φόρτισης, αλλά όχι

απόλυτα (Σχήμα 1.9α). Αντιθέτως, η ανακυκλιζόμενη φόρτιση (πάνω από 80% της στατικής αντοχής συνάφειας) οδηγεί σε μια απότομη μείωση (Σχήμα 1.9β).

1.3 Επίδραση της συνάφειας στην δομική συμπεριφορά (πλαστιμότητα)

Η συνάφεια είναι απαραίτητη όχι μόνο για να εξασφαλίσει ένα επαρκές επίπεδο ασφάλειας, επιτρέποντας τα δύο υλικά (σκυρόδεμα και χάλυβας) να συνεργάζονται, αλλά και για να ελεγχθεί η δομική συμπεριφορά, με την παροχή ενός επαρκούς επιπέδου ολκιμότητας.

Ενώ η ασφάλεια απαιτεί, να έχει η σύνδεση καλές μηχανικές ιδιότητες σε τοπικό επίπεδο, η ολκιμότητα απαιτεί, να αποτρέψει η σύνδεση μεγάλες παραμορφώσεις του αγκυρωμένου οπλισμού, προκειμένου να αφήσει τις παραμορφώσεις να αναπτυχθούν μεταξύ δύο παρακείμενων καμπτικών ρωγμών, και να ευνοήσει το σχηματισμό των πυκνών δευτεροβάθμιων ρωγμών στο σκυρόδεμα.

Παραδόξως, οι πολύ καλές ιδιότητες της σύνδεσης μπορεί να είναι σε αντίθεση με τις απαιτήσεις ολκιμότητας. Αυτό ισχύει ακόμη περισσότερο σήμερα, λόγω της τάσης προς τη χρησιμοποίηση λιγότερο όλκιμων χαλύβων στην παραγωγή των ράβδων ψυχρής έλασης. Στην πραγματικότητα, εναποτίθεται στην μετά-ελαστική συμπεριφορά του χάλυβα να εξασφαλίσει μια ικανοποιητική δομική ολκιμότητα σε κάμψη, δεδομένου ότι η ολκιμότητα δεν μπορεί να εξασφαλισθεί μόνο από τις μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κοντά στις καμπτικές ρωγμές, ενώ η σκλήρυνση του χάλυβα επιτρέπει στην ράβδο που διαρρέει να διαδοθεί κατά μήκος του μήκους έμπηξης μεταξύ δύο παρακείμενων ρωγμών. Αυτές οι μεγάλες διανεμημένες παραμορφώσεις εξασφαλίζουν στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος ικανοποιητική ολκιμότητα (Manfredi και Pecce 1996; Eligehausen et al. 1998).

Για να μελετηθεί η επίδραση που έχουν, η διαρροή της ράβδου και οι μεγάλες παραμορφώσεις στην εφελκυστική ακαμψία (μείωση της τάσης του οπλισμού στο διάστημα μεταξύ των ρωγμών λόγω συνάφειας, που είναι ένα δομικό στοιχείο της σύνδεσης), έχει ερευνηθεί η ακαμψία των εφελκυσόμενων κατασκευών, αναφέροντας ένα ερευνητικό πρόγραμμα που εκτελέστηκε στη Στουτγάρδη (Mayer και

Eligehausen 1998). Στο πρόγραμμα αυτό, εξετάστηκε η αστοχία μιας σειράς πρισματικών δοκιμών οπλισμένου σκυροδέματος που επιμηκύνθηκαν, με διαφορετικό ποσοστό οπλισμού, διάμετρο ράβδων (4 ράβδοι) και κατηγορία ολκιμότητας χάλυβα (B, A και S σύμφωνα με CEB-FIP MC90). Οι συνδετήρες τοποθετήθηκαν σε διαστήματα ίσα με την απόσταση ρωγμών που υπολογίστηκε σύμφωνα με το MC90. Σε τέσσερα πειράματα με το χάλυβα θερμής έλασης ($f_{st} / f_{sy} = 1.13$ και $\varepsilon_{su} \approx 88\lambda$, $d_b = 16mm$, Σχήμα 1.10α) τοποθετήθηκαν γύρω στα 30 μετά-ελαστικά μηκυνσιόμετρα σε προσχηματισμένα αυλάκια που σχηματίστηκαν με μηχανικό τρόπο σε μια από τις 4 διαμήκειες ράβδους κάθε στοιχείου που επρόκειτο να υποστεί εφελκυσμό, προκειμένου να ληφθούν οι αναλυτικές πληροφορίες της τοπικής συμπεριφοράς του οπλισμού με νευρώσεις, στο μετελαστικό φάσμα.

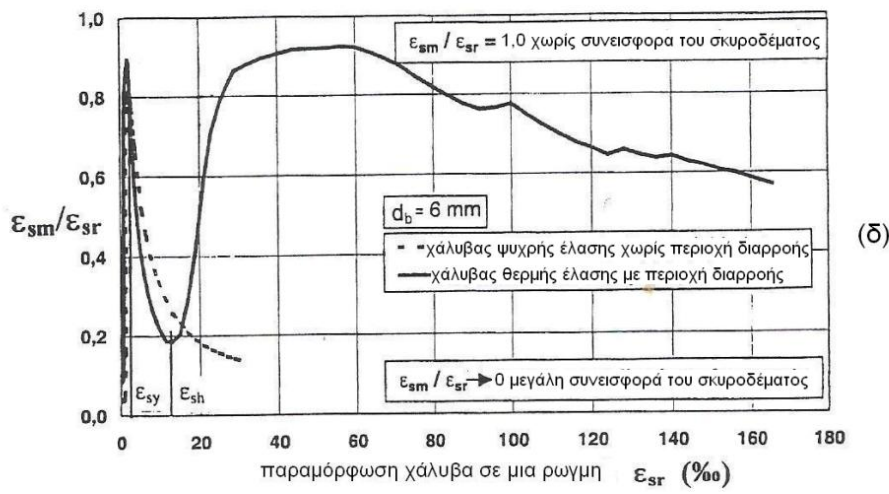
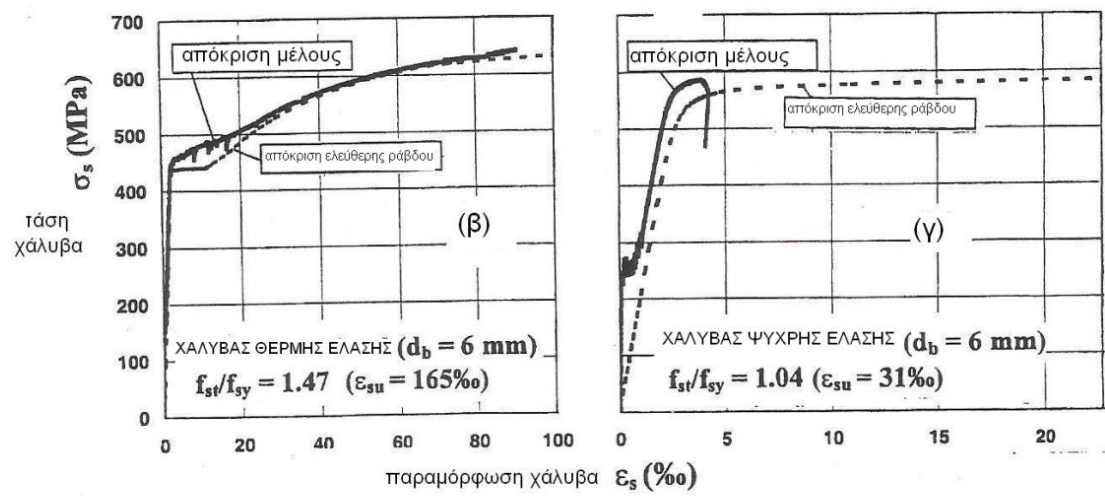
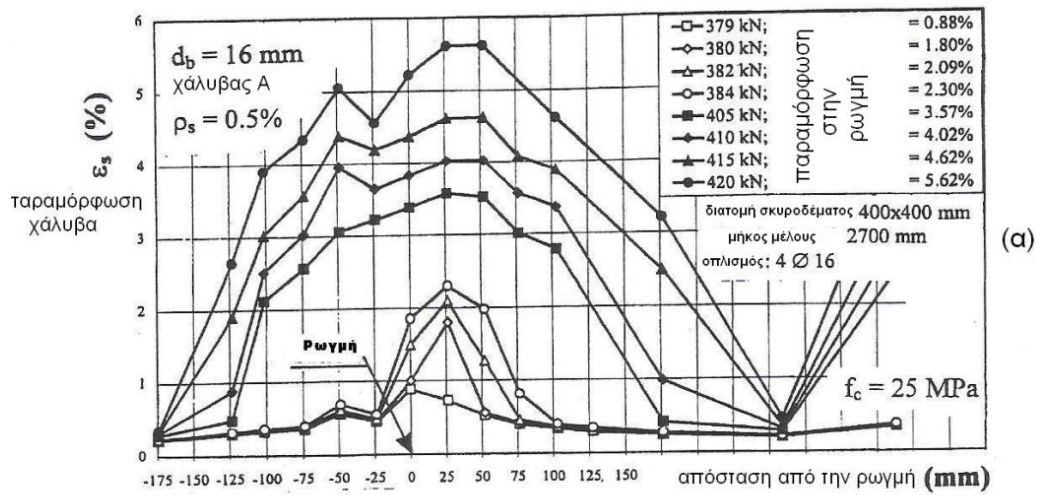
Η μετελαστική συμπεριφορά περιγράφηκε με τη απόκτηση των τοπικά μετρούμενων παραμορφώσεων και με τη χρησιμοποίηση του λόγου ($\varepsilon_{sm} / \varepsilon_{sr}$) μεταξύ της μέσης παραμόρφωσης ε_{sm} του χάλυβα και της παραμόρφωσης ε_{sr} του χάλυβα στα επίπεδα που έχουμε ρηγμάτωση, για να αξιολογηθεί η συμβολή του σκυροδέματος μεταξύ των ρωγμών. Στο Σχήμα 1.10β οι μετρημένες παραμορφώσεις του χάλυβα σχεδιάζονται ως συνάρτηση της απόστασης από μια ρωγμή, για διαφορετικά επίπεδα φόρτισης. Αφότου η παραμόρφωση στη ρωγμή φθάνει στο όριο διαρροής, έχουμε την ανάπτυξη μεγάλης παραμόρφωσης στη γειτονιά της ρωγμής μέχρι το επίπεδο φόρτισης που αντιστοιχεί στην αρχή της σκλήρυνσης ($\varepsilon_{sr} = 0.88$ έως 2.30%). Με την περαιτέρω αύξηση του φορτίου (παραμόρφωση στη ρωγμή $\varepsilon_{sr} = 3.57$ έως 5.62%) η πλαστικοποιημένη ζώνη αρχίζει να επεκτείνεται, και η κλίση παραμόρφωσης κοντά στις ρωγμές να μειώνεται. Αυτά τα αποτελέσματα εμφανίζονται σαφώς εάν ο λόγος $\varepsilon_{sm} / \varepsilon_{sr}$, απεικονιστεί σαν συνάρτηση ε_{sr} (Σχήμα 1.10δ). Υιοθετήθηκαν δύο μέθοδοι για την αποτίμηση του $\varepsilon_{sm} / \varepsilon_{sr}$. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν η γενική επιμήκυνση και τα μετρημένα φορτία (τάσεις), όπως φαίνεται στα Σχήματα 1.10β και γ (απόκριση κατασκευών). Αφετέρου, οι τοπικά μετρημένες παραμορφώσεις υπολογίστηκαν, κατά μέσο όρο, μέσω μιας απόστασης ίσης με την απόσταση των ρωγμών για να πάρουμε την ε_{sm} και η τοπική παραμόρφωση μετρήθηκε σε μια ρωγμή που υπήρχε (ε_{sr}). Τα αποτελέσματα και των δύο μεθόδων αποδείχθηκαν ότι είναι σε συμφωνία σε ολόκληρο το εύρος παραμόρφωσης του χάλυβα. Επομένως, η πρώτη προσέγγιση

(βασισμένη στη γενική επιμήκυνση) μπορεί να χρησιμοποιηθεί, χωρίς την ανάγκη τοποθέτησης μηκυνσιόμετρων.

Στα Σχήματα 1.10β και γ φαίνονται τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα θερμής και ψυχρής έλασης: πρέπει να είναι γνωστή η έννοια της παραμόρφωσης ε_s του χάλυβα (λ), που είναι η τοπική παραμόρφωση της απόκρισης της ελεύθερης ράβδου, και η μέση παραμόρφωση της απόκρισης του στοιχείου (σε αυτήν την περίπτωση συμπεριλαμβάνεται η εφελκυστική ακαμψία (μείωση της τάσης του οπλισμού στο διάστημα μεταξύ των ρωγμών λόγω συνάφειας)). Κατά συνέπεια, στο Σχήμα 1.10β η περιοχή διαρροής της ελεύθερης ράβδου ουσιαστικά εξαφανίζεται στην απόκριση της κατασκευής, δεδομένου ότι οι πλαστικές παραμορφώσεις στην αγκυρωμένη ράβδο περιορίζονται στις περιοχές κοντά στις κύριες ρωγμές και συμβάλλουν ελάχιστα στη γενική επιμήκυνση. Η σύγκριση της απόκρισης μεταξύ κατασκευής και ελεύθερης ράβδου (πλήρεις και διακεκομμένες καμπύλες) δείχνει την μεγάλη επίδραση της συμπεριφοράς της τάσης-παραμόρφωσης του οπλισμού στην εφελκυστική ακαμψία, στην μετελαστική περιοχή του χάλυβα. Ενώ οι κατασκευές που ήταν οπλισμένες με χάλυβα ψυχρής έλασης παρουσιάζουν μια μάλλον ψαθυρή συμπεριφορά (Σχήμα 1.10γ, $\varepsilon_{\max} \approx 0.15\varepsilon_{su}$), οι κατασκευές που είναι οπλισμένες με χάλυβα θερμής έλασης είναι πιο όλκιμες (Σχήμα 1.10β, $\varepsilon_{\max} \approx 0.53\varepsilon_{su}$).

Η γενική συμπεριφορά του οπλισμού μπορεί να περιγραφεί ως εξής (Σχήμα 1.10δ): εφόσον το σκυρόδεμα δεν είναι ρηγματωμένο (και κυρίως ελαστικό), και η σύνδεση είναι τέλεια (καμία ολίσθηση), ο λόγος $\varepsilon_{sm} / \varepsilon_{sr}$ πρέπει να είναι ίσος με 1, ενώ πρέπει να μειώνεται μεταξύ της πρώτης ρωγμής και της διαρροής της ράβδου. Μια τέτοια συμπεριφορά επιβεβαιώνεται στο Σχήμα 1.10δ ($\varepsilon_{sm} / \varepsilon_{sr} \approx 0.9$ διαρροή ράβδου, $\varepsilon_{sr} = \varepsilon_{sy}$, λόγος χάλυβα $\rho_s = 0.8 \sim 1.5\%$).

Πέρα από την ε_{sy} και μέχρι το τέλος της περιοχής διαρροής (εάν υπάρχει οποιαδήποτε περιοχή διαρροής, όπως στον χάλυβα θερμής έλασης), ο λόγος $\varepsilon_{sm} / \varepsilon_{sr}$ μειώνεται σημαντικά, έως ότου ενεργοποιηθεί η σκλήρυνση ($\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{sh}$, $\varepsilon_{sm} / \varepsilon_{sr} \approx 0.20$). Η απότομη μείωση προκαλείται από τη ανάπτυξη της πλαστικής παραμόρφωσης ε_{sr} κοντά στις ρωγμές κάμψης, ενώ οι παραμορφώσεις μεταξύ των ρωγμών είναι ακόμα ελαστικές και αναπτύσσουν υψηλές κλίσεις.



Σχήμα 1.10 - (α) Παραμόρφωση του χάλυβα ως συνάρτηση της απόστασης του από την ρωγμή, για διαφορετικά επίπεδα φόρτισης, (β, γ) εφελκόμενες κατασκευές και αποκρίσεις ελεύθερης ράβδου, και (δ) πειραματικά αποτελέσματα χαρακτηριστικών εφελκόμενων κατασκευών (Mayer και Eligehausen 1998).

Μετά από την αρχή της σκλήρυνσης, που εξαρτάται από τον λόγο σκλήρυνσης (f_{st} / f_{sy}) από το ποσοστό οπλισμού και την πιθανή διαμήκη ρηγμάτωση, ο λόγος $\varepsilon_{sm} / \varepsilon_{sr}$ αρχίζει να αυξάνεται μέχρι να επιτευχθούν τιμές κοντά στην μονάδα, δεδομένου ότι ολόκληρη η ράβδος μεταξύ δύο παρακείμενων ρωγμών είναι, είτε στην πλαστική περιοχή, είτε στην περιοχή σκλήρυνσης, και οι παραμορφώσεις διανέμονται σχεδόν ομοιόμορφα. Μετά από μια μέγιστη τιμή, ο λόγος $\varepsilon_{sm} / \varepsilon_{sr}$ μειώνεται πάλι, επειδή η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης της ράβδου τείνει να σταθεροποιηθεί μακριά από τις υψηλές τιμές παραμόρφωσης.

Για τον χάλυβα ψυχρής έλασης, η πολύ περιορισμένη σκλήρυνση είναι η αιτία της συνεχούς μείωσης του $\varepsilon_{sm} / \varepsilon_{sr}$, πέρα από την διαρροή του χάλυβα ($\varepsilon_{sr} = \varepsilon_{sy}$) και μέχρι την αστοχία του ($\varepsilon_{sr} = \varepsilon_{su}$).

Συνοψίζοντας, μόνο αρκετά όλκιμες ράβδοι μπορούν να εγγυηθούν μια επαρκή ολκιμότητα στις δομικές κατασκευές (Mayer και Eligehausen 1998, δείτε επίσης CEB, 1998).

1.4 Αστοχίες εξόλκευσης και απόσχισης

Κάτω από αυξανόμενη φόρτιση εμφανίζεται αναπόφευκτα εγκάρσια ρηγμάτωση και απόσχιση, ανάλογα με ποικίλους φυσικούς και μηχανικούς παράγοντες, όπως η τάση περίσφιγξης, η επικάλυψη του σκυροδέματος, ο εγκάρσιος οπλισμός και η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, με την τελευταία να είναι η βάση της συνοχής των ρωγμών. Φυσικά η διαμήκης απόσχιση μπορεί να περιοριστεί στο σκυρόδεμα κοντά στη ράβδο (μερική απόσχιση), εάν ένας, ή περισσότεροι από τους προαναφερθέντες παράγοντες είναι αρκετά ικανοποιητικοί ώστε να αποτρέψουν την απόσχιση σε όλη την έκταση.

Ανάλογα με τον τύπο αλληλεπίδρασης μεταξύ της ράβδου και του σκυροδέματος, δύο τύποι αστοχίας συνάφειας έχουν παραδοσιακά αναγνωριστεί: η αστοχία εξόλκευσης και η αστοχία απόσχισης.

Στην πρώτη περίπτωση, η αστοχία συνάφειας οφείλεται συνήθως στην διατμητική αστοχία των τμημάτων του σκυροδέματος που βρίσκονται ανάμεσα σε κάθε ζευγάρι νευρώσεων (Σχήμα 1.4α, Cairns και Abdullah 1995), και η αστοχία, από την φύση

της, συσχετίζεται με έναν «τοπικό μηχανισμό» (κατάρρευση διεπιφανειών), ακόμα κι αν περιλαμβάνεται ολόκληρη η ράβδος (μικρά μήκη έμπηξης και ματίσματα).

Στην δεύτερη περίπτωση, η αστοχία συνάφειας οφείλεται συνήθως στην διαμήκη απόσχιση του σκυροδέματος που περιβάλλει τη ράβδο (Σχήματα 1.4β και γ, Cairns και Jones 1995α), και η ικανότητα της σύνδεσης καταστρέφεται μόλις οι ακτινικές ρωγμές φτάσουν στην εξωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Η αστοχία συσχετίζεται με κάποια μικρή «δομική κατάρρευση», δεδομένου ότι εμφανίζονται δομικές παράμετροι εκτός από εκείνες που σχετίζονται με την συνάφεια.

Μόνο στα εργαστηριακά πειράματα όπου επιτυγχάνονται μικρά μήκη έμπηξης και ματίσματα, μπορεί οι δύο τύποι αστοχίας να μελετηθούν ξεχωριστά, δεδομένου ότι στις πραγματικές κατασκευές εμφανίζεται μια λίγο ή πολύ εκτεταμένη απόσχιση. Επίσης, στα πειράματα εξόλκευσης, μπορεί να εμφανιστεί μια περιορισμένη απόσχιση, που παρατηρείται συχνά δύσκολα, αλλά οι απότομες και τριχοειδείς επιφανειακές ακτινικές ρωγμές, όπως εκείνες που παρατηρούνται από τον Baranek 1980 (Σχήμα 1.1δ), δεν εξασθενίζουν σχεδόν καθόλου την αποδοτικότητα της σύνδεσης, και η συμπεριφορά της συνάφειας στην οριακή κατάσταση συνοδεύεται κυρίως από εξόλκευση (μικτή αστοχία, δείτε επίσης Σχήμα 1.4β).

Όσον αφορά την αστοχία απόσχισης, τα μοντέλα ανάλυσης της οριακής κατάστασης (δείτε για παράδειγμα Terfers, το 1979 και το 1982) δείχνουν ότι υπάρχει μια κρίσιμη επέκταση ρωγμών (στην ακτινική κατεύθυνση) που μεγιστοποιεί την αντοχή της συνάφειας (με άλλα λόγια, υπό ορισμένες συνθήκες η απόσχιση έχει ευνοϊκά αποτελέσματα στην αντοχή της συνάφειας).

Τέλος, τα πραγματικά μήκη έμπηξης και ματίσματα, που είναι συνήθως «μεγάλα» ($l/\phi > 10 \sim 20$), παρουσιάζουν πιο σύνθετες μορφές αστοχίας, οι οποίοι μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- *Αστοχία εξόλκευσης* με ή χωρίς μερική απόσχιση του σκυροδέματος (μη ορατές ρωγμές απόσχισης): υψηλή περίσφιγξη και/ή μεγάλη επικάλυψη του σκυροδέματος, διατμητική αστοχία των τμημάτων του σκυροδέματος, ανάμεσα στις νευρώσεις.
- *Αστοχία εξόλκευσης* που προκαλείται από μερική ή ολική απόσχιση (ορατές ρωγμές απόσχισης): μέτρια περίσφιγξη και/ή περιορισμένη επικάλυψη του σκυροδέματος, διατμητική αστοχία των τμημάτων του σκυροδέματος

ανάμεσα στις νευρώσεις που συνοδεύονται από ολίσθηση του σκυροδέματος στο μέτωπο των νευρώσεων.

- *Αστοχία απόσχισης που προκαλείται από τον θρυμματισμό της επικάλυψης: καμία περίσφιγξη και/ή πολύ περιορισμένη επικάλυψη και ολίσθηση της ράβδου στο μέτωπο των νευρώσεων.*

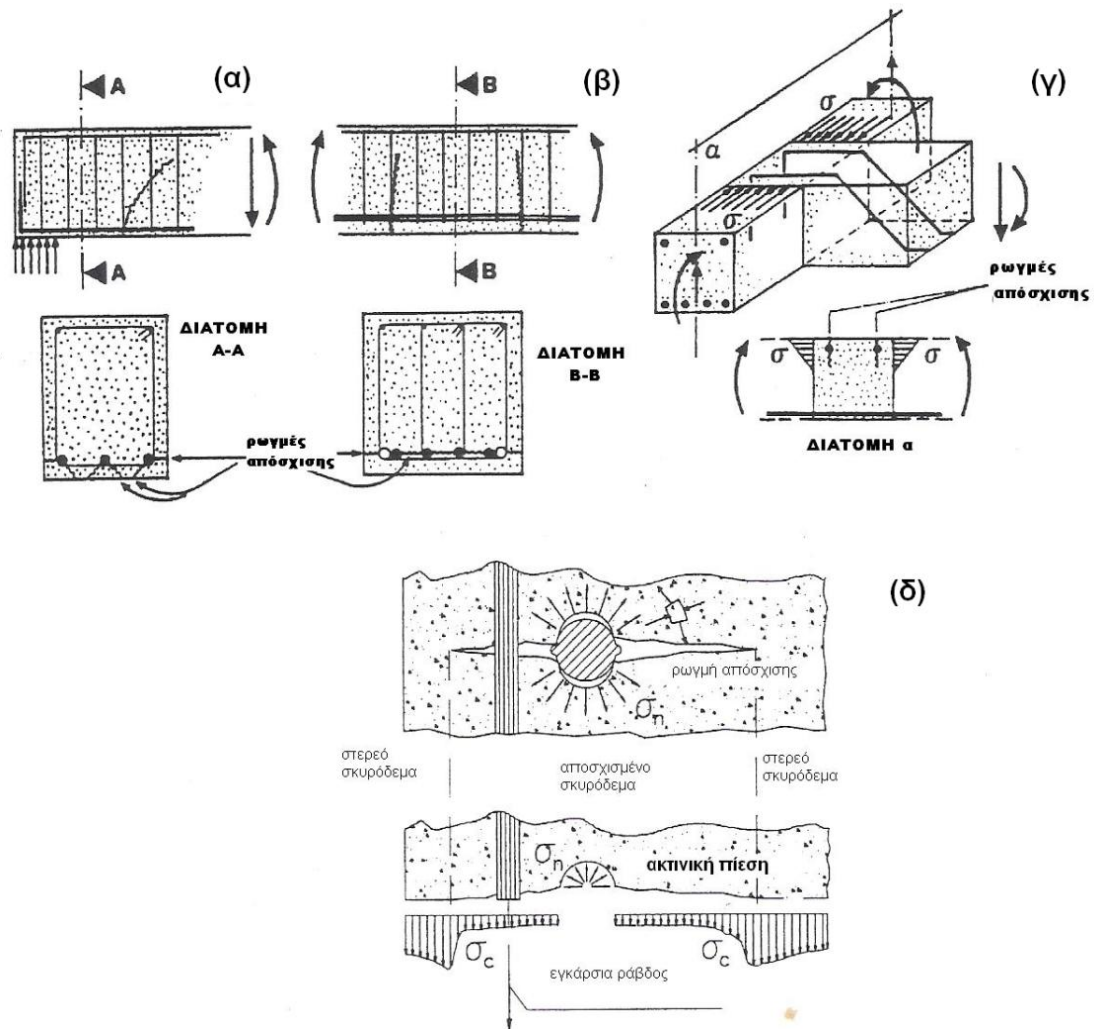
1.5 Ενεργή και παθητική περίσφιγξη

Όπως ήδη αναφέρθηκε, μεταξύ των παραμέτρων που επηρεάζουν την αποδοτικότητα της σύνδεσης, η περίσφιγξη (ενεργή ή παθητική) διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο (Σχήματα 1.11α, β, γ). Φυσικά, η ενεργή περίσφιγξη (ως αποτέλεσμα μιας άμεσης υποστήριξης ή από τη συνέχεια ενός υποστυλώματος σε μια άρθρωση δοκού-υποστυλώματος) είναι αποδοτικότερη, ιδιαίτερα σε μια κατάσταση επιρρεπή στην απόσχιση, δεδομένου ότι η αποτελεσματικότητά της δεν εξαρτάται από την τάση συνάφειας που ενεργοποιείται. Αντίθετα, η παθητική περίσφιγξη (που αναπτύσσεται γενικά από την επικάλυψη και τους συνδετήρες) είναι λιγότερο αποδοτική, δεδομένου ότι προέρχεται από την διόγκωση του σκυροδέματος, η οποία συνοδεύει το σχηματισμό ρωγμών και συσχετίζεται αυστηρά με την ενεργή τάση συνάφειας.

Όσον αφορά την παθητική περίσφιγξη, το σημαντικότερο πρόβλημα είναι το πώς να ελεγχθεί η απόσχιση (δείτε το Σχήμα 1.22) και να υπολογιστεί ο ελάχιστος εγκάρσιος οπλισμός, προκειμένου να αποτραπεί μια απότομη απώλεια συνάφειας στην αρχή της απόσχισης. Ο Giuriani et al. (1991) όρισαν ως ελάχιστο οπλισμό την αναλογία συνδετήρων, η οποία συγχρόνως (α) περιλαμβάνει την διαρροή των συνδετήρων, και (β) οδηγεί σε ένα προκαθορισμένο πλάτος τις ρωγμές απόσχισης (όπως απαιτείται, για παράδειγμα, από την αντοχή), λαμβάνοντας υπόψη τη συνοχή των ρωγμών, η οποία συμβάλλει στην επίδραση της περίσφιγξης, Σχήμα 1.11δ.

Όσον αφορά την ενεργή περίσφιγξη, το σημαντικό θέμα είναι η αβέβαιη μετάβαση από μια αστοχία εξόλκευσης σε μια αστοχία απόσχισης, με την τελευταία να επηρεάζεται σημαντικά από διάφορες δομικές παραμέτρους (Terpfers, 1973; Eligehausen 1979; Nagatomo και Kaku 1992, δείτε το Σχήμα 1.12). Η αντοχή της συνάφειας (δηλ. η τάση στο μέγιστο της καμπύλης τάσης συνάφειας-ολίσθησης) είναι μια, κυρίως, γραμμική συνάρτηση της εγκάρσιας πίεσης, της οποίας η θετική

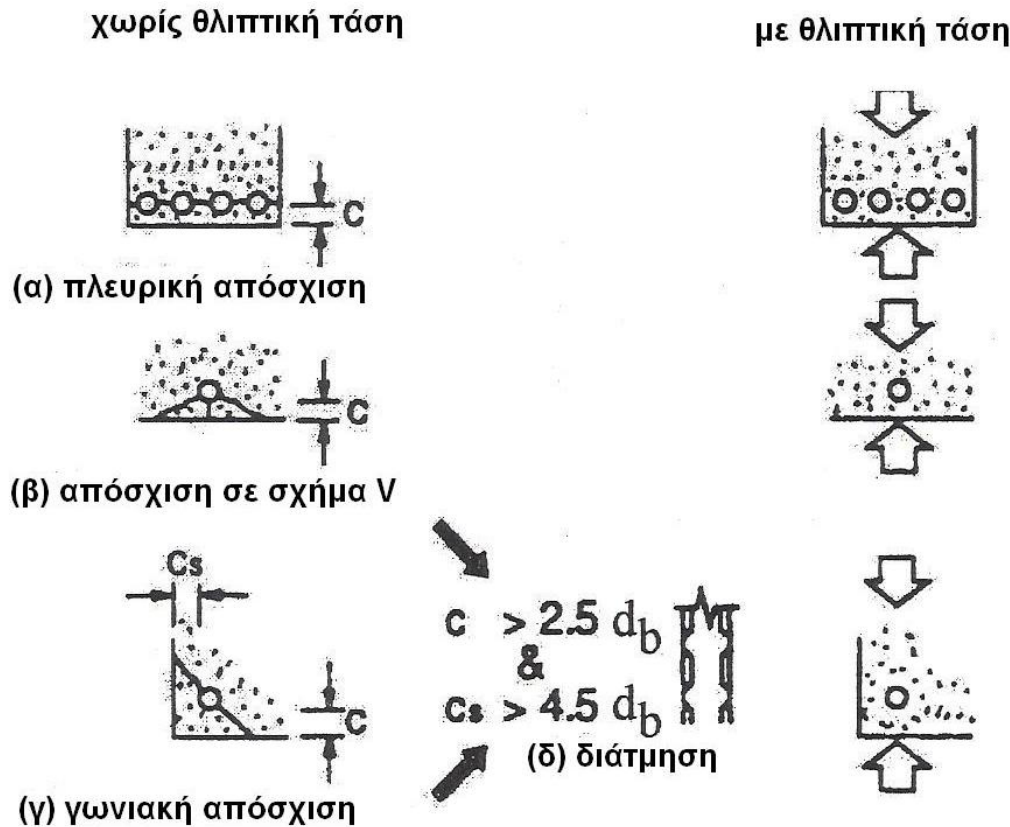
επίδραση αυξάνει με την αύξηση της επικάλυψης του σκυροδέματος στην βάση και τις πλευρές (Gambarova και Rosati 1997, Σχήμα 1.13; Malvar 1992, Σχήμα 1.18; Modena 1992, Σχήμα 1.21; Gambarova et al. 1994).



Σχήμα 1.11 - (α, β, γ) Παραδείγματα αλληλεπίδρασης συνάφειας-περίσφιγξης: (α) αγκύρωση ράβδου (τμηματική ενεργή και παθητική περίσφιγξη), (β) μάτισμα (παθητική περίσφιγξη από συνδετήρες), (γ) αγκύρωση ράβδου σε ένα πλάγιο υποστήριγμα (ενεργή περίσφιγξη), και (δ) ρωγμή απόσχισης και δράσεις περίσφιγξης γύρω από μια ράβδο με νευρώσεις.

Εντούτοις, το πάχος της επικάλυψης και η εγκάρσια πίεση βοηθούν, εφόσον η αστοχία συνάφειας ελέγχεται από την απόσχιση του σκυροδέματος (οι υπερβολικές επικαλύψεις είναι άσκοπες και ακυρώνουν την εγκάρσια πίεση).

Τελικά, η ευνοϊκή επίδραση της εγκάρσιας πίεσης σταθεροποιείται σε ένα επίπεδο κάτω από $0.25 \sim 0.30 f_c$, όπως φαίνεται από πολλά πειραματικά αποτελέσματα είτε για στερεά δοκίμια είτε για δοκίμια που έχουν ήδη αποσχιθεί (Nagatomo και Kaku 1992; Malvar 1992 ; Modena 1992; Gambarova και Rosati 1997).



Σχήμα 1.12 - Παραδείγματα πιθανών μορφών αστοχίας, που περιλαμβάνουν απόσχιση, σε μια αγκύρωση. Παρόμοιες μορφές αστοχίας συμβαίνουν και στα ματίσματα.

1.6 Ράβδοι αγκύρωσης και προεντεταμένοι τένοντες

Ο ίδιος οπλισμός αγκύρωσης χάλυβα συμπεριφέρεται διαφορετικά ανάλογα με τις συνθήκες της κατασκευής: μια ράβδος αγκύρωσης σε μία κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος δεν συμπεριφέρεται όπως ένα προεντεταμένο συρματόσχοινο μετά από την απελευθέρωση της προέντασης! Ξέχωρα από μερικές σημαντικές λεπτομέρειες όπως η τραχύτητα και η μορφή της επιφάνειας, στην πρώτη περίπτωση

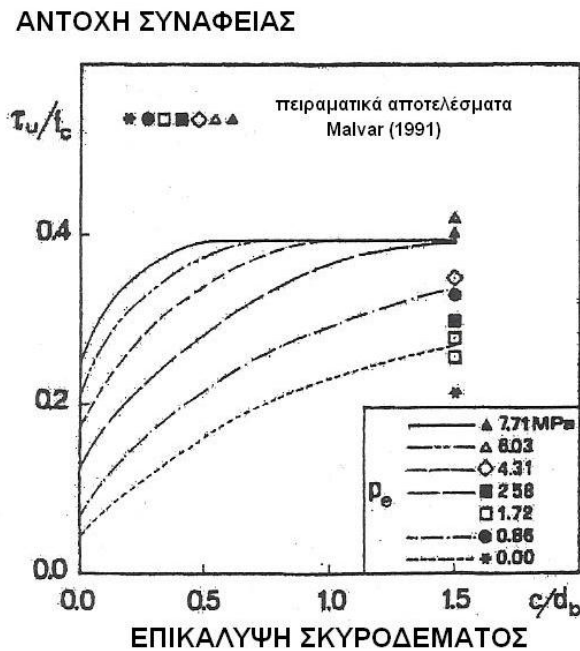
η ράβδος αγκύρωσης είναι σε μια κατάσταση εξόλκευσης, ενώ στην δεύτερη το συρματόσχοινο αγκύρωσης είναι σε μια «push-in» κατάσταση ώθησης (η διατομή τείνει να αυξηθεί εγκάρσια, εξ αιτίας του φαινομένου Poisson, Den Uijl 1992). Επιπλέον, ένα προεντεταμένο συρματόσχοινο στην περιοχή του «μήκους μεταφοράς» στις άκρες των δοκών μιας αμφιέριστης δοκού (Σχήμα 1.14α) είναι σε διαφορετικές συνθήκες από αυτές που επικρατούν στην περιοχή της καμπτικής συνάφειας (Σχήμα 1.14β), όπου η κάμψη επικρατεί, και ισχύει η αρχή της επιπεδότητας των διατομών με ή χωρίς ρηγμάτωση.

1.7 Πειράματα

Πριν την εισαγωγή των μοντέλων συνάφειας, αξίζει να θυμηθούμε τη στρατηγική, η οποία επιτρέπει σε κάποιον να προχωρήσει από την κατανόηση ενός προβλήματος (συνάφεια στην περίπτωση μας), στη μοντελοποίηση και τις εφαρμογές. Η στρατηγική είναι βασισμένη σε τέσσερα βήματα (Terpfers και Olsson 1992):

- *Τα αρχικά πειράματα:* για να κατανοήσουμε τους μηχανισμούς που εμπλέκονται στη συνάφεια, αυτά τα πειράματα είναι συνήθως ποιοτικά, είναι όμως οργανικά στον προσδιορισμό των κύριων παραμέτρων και στην αξιολόγηση της σημασίας τους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα πειράματα στα μεγάλα μήκη έμπηξης και ματίσματα.
- *Θεωρητική προσομείωση:* μόλις προσδιοριστούν οι κύριες παράμετροι, δημιουργούνται μοντέλα βάσει μερικών θεμελιωδών θεωρήσεων, με στόχο την περιγραφή του μηχανισμού αντίστασης, ή την τοπική σχέση τάσης συνάφειας-ολίσθησης της ράβδου. Σε αυτή τη φάση, η αναφορά γίνεται γενικά σε ένα τμήμα μιας αγκυρωμένης ράβδου, και όχι σε ολόκληρο το μήκος έμπηξης ή ματίσματος: μια χαρακτηριστική περίπτωση είναι ένας στενά εγκλωβισμένος δακτύλιος σκυροδέματος που υποβάλλεται σε μια εσωτερική υδροστατική πίεση που προσομοιώνει τη δράση βλήτρου μιας ράβδου.
- *Πειραματική επαλήθευση:* οι συνθήκες που θεωρούνται στα θεωρητικά μοντέλα ξαναδημιουργούνται σε ένα εργαστηριακό πείραμα προκειμένου να αξιολογηθεί το μοντέλο και να ερευνηθούν τα όριά του, μεταβάλλοντας για

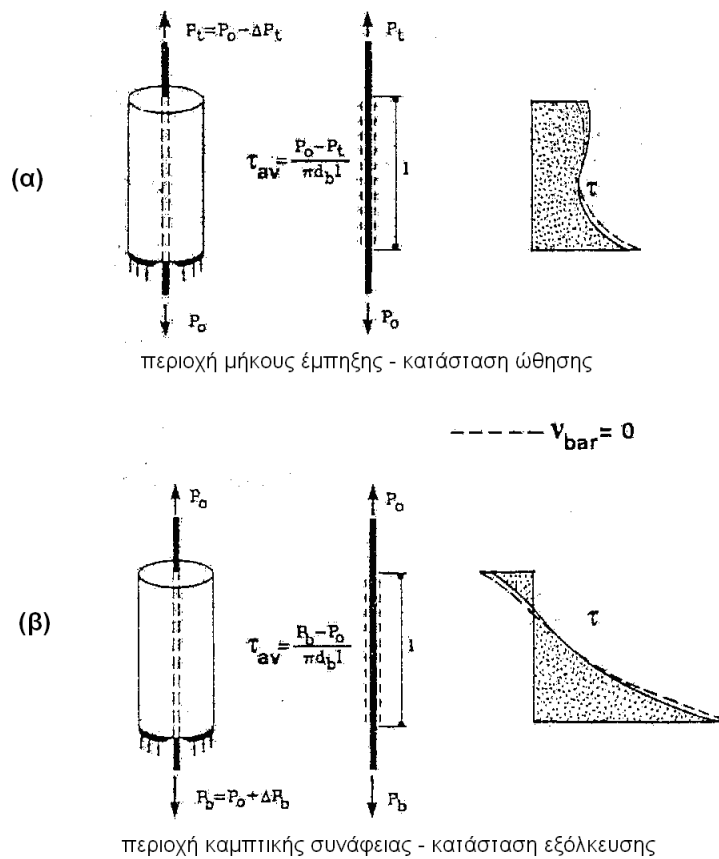
παράδειγμα, σημαντικές παραμέτρους όπως η αντοχή και ο τύπος του σκυροδέματος (HSCs και FRCs έναντι NSCs), και να μελετηθούν οι σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων που περιλαμβάνονται άμεσα στο μοντέλο, αλλά και εκείνων που δεν έχουν εισαχθεί (για παράδειγμα, η σχέση μεταξύ της τάσης συνάφειας και της πίεσης ράβδου-σκυροδέματος, στα δοκίμια που αστοχούν σε απόσχιση).



Σχήμα 1.13 - Επιδράσεις της επικάλυψης του σκυροδέματος (c) και εξωτερική τάση (p_e), στην αντοχή συνάφειας τ_u σύμφωνα με το Ελαστικό - Ρηγματωμένο – Συνεκτικό Μοντέλο (Elastic - Cracked - Cohesive Model) (Gambarova και Rosati 1997, $f_c = 40 \sim 44 \text{ MPa}$, $E_c = 28 \text{ GPa}$, $f_c / f_{ct} = 8.5$, αριθμός ακτινικών ρωγμών $n = 4$).

- *Αριθμητική προσομοίωση*: μόλις διατυπωθούν οι νόμοι συμπεριφοράς σχετικά με τις κύριες παραμέτρους με τη βοήθεια ενός κατάλληλου μοντέλου, η εφαρμογή τους σε ένα ειδικά-κατανοητό πρόγραμμα ή σε κανονισμούς γενικής χρήσης μας επιτρέπει, όχι μόνο να δοθεί βαθύτερη έρευνα στη δομική συμπεριφορά (ράβδος + περιβάλλον σκυροδέμα), αλλά και να επεκταθεί η ανάλυση στις διαφορετικές δομικές συνθήκες και στα προβλήματα σχεδιασμού (πλήρη μήκη έμπτηξης και ματίσματα, με ή χωρίς την επίδραση της επικάλυψης και των ελεύθερων διαστημάτων μεταξύ των ράβδων).

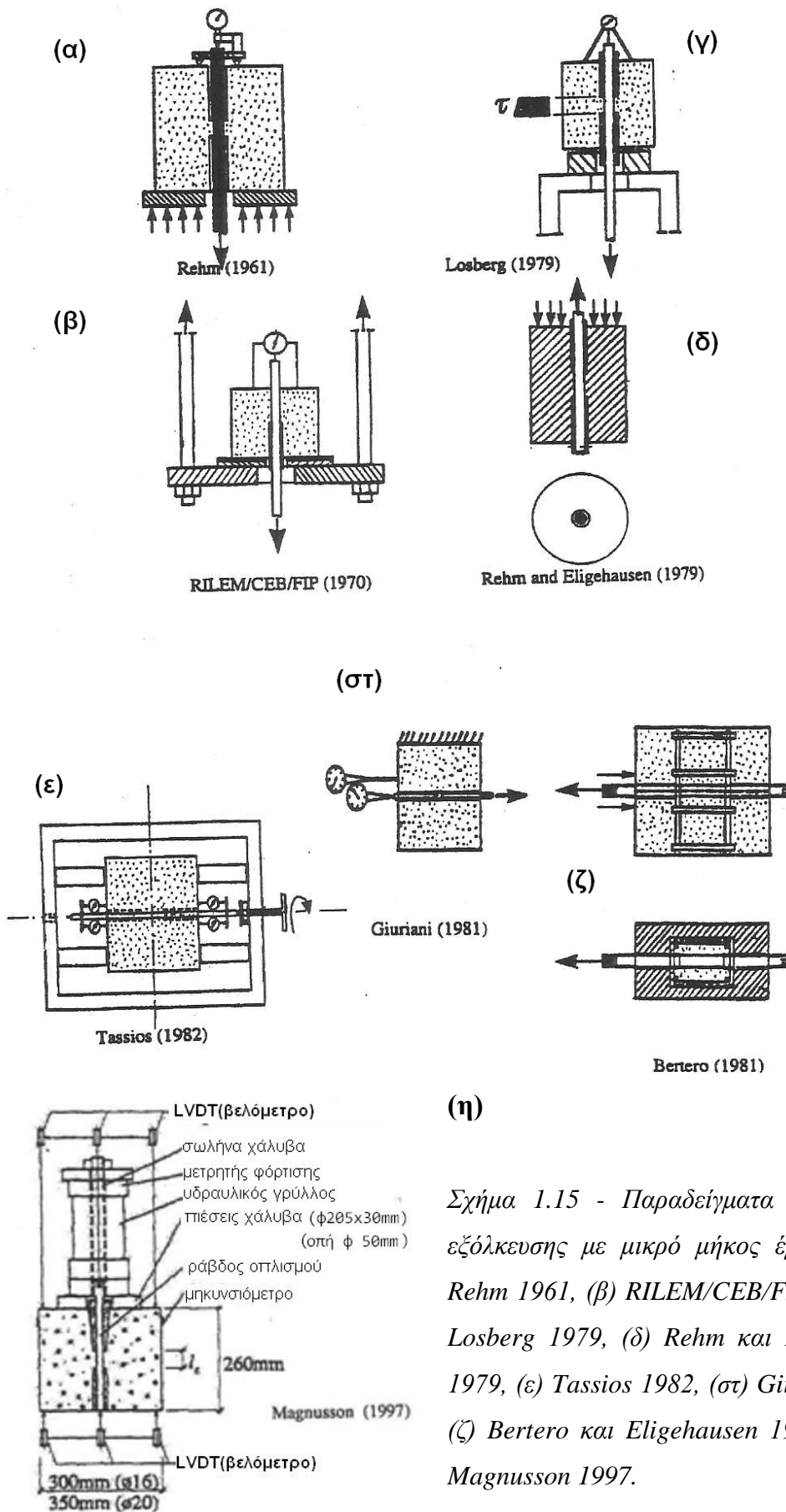
Λόγω της σημασίας των πειραμάτων και, πιο συγκεκριμένα, της πειραματικής επαλήθευσης, τα σχετικότερα πειραματικά δοκίμια αναφέρονται εν συντομία ακολούθως.



Σχήμα 1.14 - Πειραματική τεχνική για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της συνάφειας σε διαφορετικά πεδία (Abrishami και Mitchell 1992).

1.7.1 Δοκίμια μικρού μήκους

Οι περισσότερες δοκιμές επινοούνται για να δημιουργήσουν μια ομοιόμορφη κατανομή της τάσης συνάφειας κατά μήκος της ράβδου, και για αυτόν τον σκοπό υιοθετούνται γενικά μικρά μήκη έμπτυξης ($l/\phi \leq 5$). Κατά αυτόν τον τρόπο, λαμβάνονται οι καμπύλες τάσης-μετατόπισης (που αντιπροσωπεύουν τον τοπικό νόμο συνάφειας-ολίσθησης).



Σχήμα 1.15 - Παραδείγματα πειραμάτων εξόλκευσης με μικρό μήκος έμπεξης: (α) Rehm 1961, (β) RILEM/CEB/FIP 1970, (γ) Losberg 1979, (δ) Rehm και Eligehausen 1979, (ε) Tassios 1982, (στ) Giuriani 1981, (ζ) Bertero και Eligehausen 1981, και (η) Magnusson 1997.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.15, υιοθετήθηκε η πρόταση του Rehm από τις αρχές της δεκαετίας του '60 (χωρίς σημαντικές παραλλαγές) και από άλλους μελετητές, στη δεκαετία του '70 και τη δεκαετία του '80.

Δεδομένου ότι τα αδύνατα σημεία του πειράματος του Rehm ήταν η τριβή μεταξύ του κυβικού δοκιμίου και της βάσης αντίστασης και η δράση-τόξου στην κεντρική περιοχή (κοντά στο αγκυρωμένο τμήμα της ράβδου, του Σχήματος 1.15α), στο τυποποιημένο πείραμα εξόλκευσης RILEM/ CEB/ FIP (Σχήμα 1.15β), το μήκος έμπηξης απομακρύνθηκε από την κεντρική περιοχή με την παρεμβολή ενός πέλματος από λάστιχο ανάμεσα στο δοκίμιο και την πλάκα αντίστασης, για την εξουδετέρωση της τριβής.

Στο πείραμα του Losberg (Σχήμα 1.15γ) η δράση-τόξου μειώθηκε με τη μείωση της εκκεντρότητας της διανεμημένης δύναμης αντίδρασης, σε σχέση με τον άξονα της ράβδου (ένα είδος δαχτυλιδιού παρεμβλήθηκε μεταξύ του δοκιμίου και της βάσης αντίστασης).

Προς το τέλος της δεκαετίας του '70, το αυθεντικό πείραμα του Rehm βελτιώθηκε εκτενώς από τους Rehm και Eligehausen (Σχήμα 1.1.15δ), με την υιοθέτηση των σχετικά στενόμακρων κυλίνδρων, όπου η επίδραση τριβής και τόξου μειώθηκαν σημαντικά.

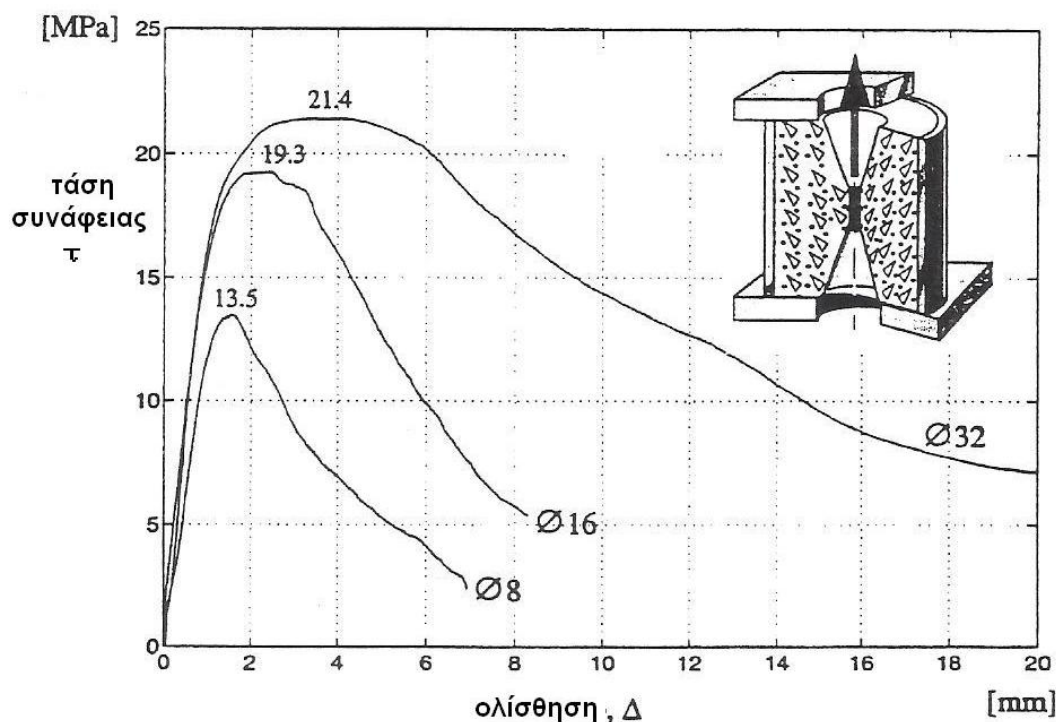
Στο πείραμα του Tassios (Σχήμα 1.15ε) μια ειδική μονάδα φόρτισης καθιστά δυνατή την αντιστροφή της φόρτισης, με τη βοήθεια ενός συνόλου κατασκευών που σπρώχνουν και τραβούν.

Σε όλα τα δοκίμια, μόνο ένα περιορισμένο τμήμα της ράβδου είχε αγκυρωθεί στο σκυρόδεμα, το υπόλοιπο τμήμα «απενεργοποιείται» με τη βοήθεια πλαστικών σωλήνων, ή ταινίας ή λεπτών στρωμάτων παραφίνης. Σε όλα τα δοκίμια δεν υπήρχε εγκάρσιος οπλισμός και η συνάφεια θεωρήθηκε ότι θα αστοχούσε λόγω εξόλκευσης (αστοχία διατμητικού τύπου).

Μια παραλλαγή του πειράματος του Rehm είναι τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν από τον Giuriani (Σχήμα 1.15στ), που προσομοίωσε την τοπική συμπεριφορά μιας αγκυρωμένης ράβδου σε μια ρηγματωμένη δοκό που υποβάλλεται σε κάμψη. Οι δύο κάθετες ελεύθερες επιφάνειες εμφανίζουν πολλές ρωγμές κάμψης, ενώ η κατώτατη επιφάνεια είναι το κατώτατο τμήμα της δοκού και ο περιορισμός της κίνησης της κορυφής προσομοιώνει τις συνοριακές συνθήκες με την περιοχή θλίψης στο πάνω τμήμα της δοκού. Στα πειράματα μεταβάλλονται οι επικαλύψεις των

πλευρών και της κάτω παρειάς. Πάλι τα πειράματα επινοήθηκαν, για την μελέτη των αστοχιών εξόλκευσης.

Καθόσον μας ενδιαφέρει η παθητική περίσφιγξη, πρέπει να αναφέρουμε ξανά τα πειράματα των Bertero και Eligehausen (Σχήμα 1.15ζ) και του Noghabai (Σχήμα 1.16). Στα πρώτα πειράματα, εξετάστηκε η εξόλκευση κάτω από επαναλαμβανόμενη φόρτιση κατά διαστήματα, καθώς και πρισματικά δοκίμια με μια ράβδο και μεγάλο ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού (για να αποφευχθεί απόσχιση του σκυροδέματος ή να περιοριστεί η έκτασή της).

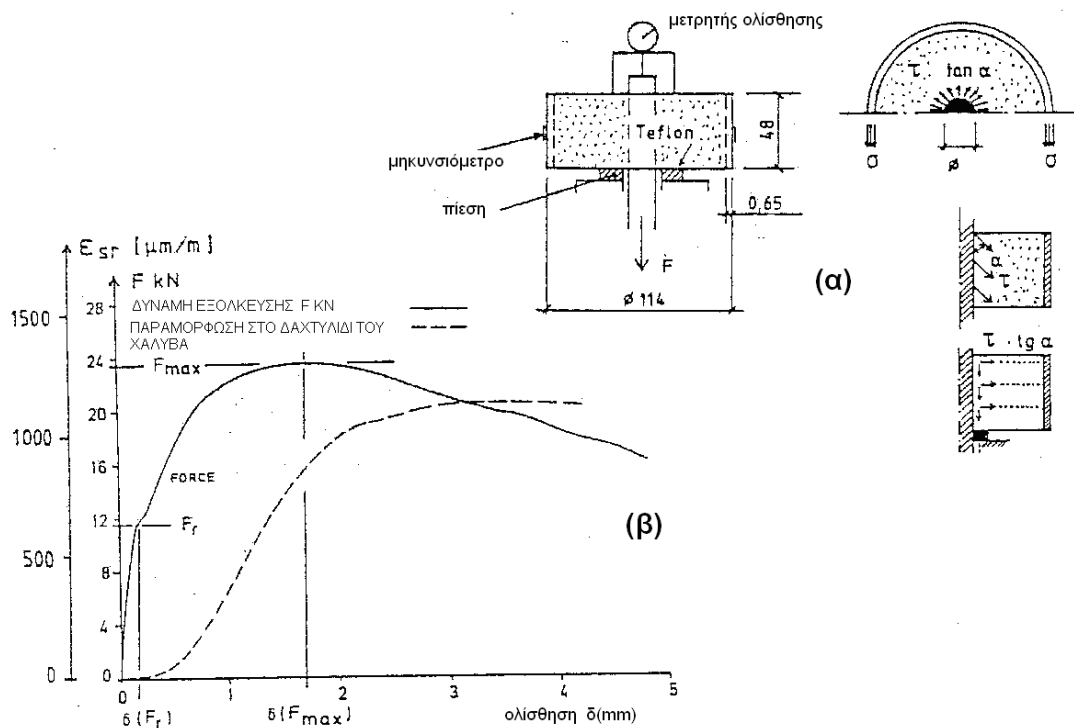


Σχήμα 1.16 - Χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης συνάφειας – ολίσθησης (πειράματα εξόλκευσης, άκαμπτη περίσφιγξη, Noghabai 1995), $f_c = 36\text{MPa}$, μήκος έμπηξης/ διάμετρος ράβδου=2.5, πάχος σωλήνα χάλυβα=10 mm, ολική διάμετρος δοκιμίου=219 mm, ύψος δοκιμίου=184, 192, 196 mm.

Στα πειράματα του Noghabai, η δράση περίσφιγξης εξασφαλιζόταν από ένα μεταλλικό σωλήνα: στο Σχήμα 1.16 (Noghabai, 1995) παρουσιάζονται, ένα τυπικό πειραματικό δοκίμιο και οι καμπύλες τάσης συνάφειας-ολίσθησης. Δυστυχώς, σε μερικά από τα πειράματα που εκτελέστηκαν από τους Bertero-Eligehausen και από τον Noghabai, εμφανίστηκε απόσχιση του σκυροδέματος (ράβδοι μεγάλης

διαμέτρου). Επομένως, πρέπει να είμαστε προσεκτικοί, όταν αναφερόμαστε σε αυτά τα αποτελέσματα, λόγω των διαφορετικών τύπων αστοχίας.

Μια μεγαλύτερη ποικιλία πειραμάτων έχει χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης συνάφειας-απόσχισης, όπως απαιτείται από τον πολύ μεγάλο αριθμό γεωμετρικών παραμέτρων, οι οποίες ενεργοποιούνται.



Σχήμα 1.17 - Πείραμα δακτυλιδιού (Terfers και Olsson 1992, (α) τυπικό δοκίμιο, και (β) γραφικές παραστάσεις φόρτισης και περιφερειακής παραμόρφωσης (στο δακτυλίδι), σε συνάρτηση με την ολίσθηση της ράβδου.

Αφού οι ρωγμές απόσχισης διαδραματίζουν έναν βασικό ρόλο στη μείωση της αντοχής και της ακαμψίας συνάφειας, έχουν υιοθετηθεί εκτενώς στο παρελθόν, αρχικά αρηγμάτωτα, δηλαδή στερεά δοκίμια, για να μελετηθεί η υποβάθμιση της σύνδεσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας απόσχισης και η θετική συνεισφορά της πλευρικής περίσφιγξης. Από την άλλη, αφού η απόσχιση μπορεί να προκληθεί και από άλλα περιστατικά εκτός από την φόρτιση (για παράδειγμα, διάβρωση ράβδων, συστολή σκυροδέματος, ή προηγούμενη φόρτιση), έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές φορές δοκίμια που έχουν υποστεί από πριν απόσχιση, για να μελετηθεί η συμπεριφορά της συνάφειας μετά την απόσχιση του σκυροδέματος.

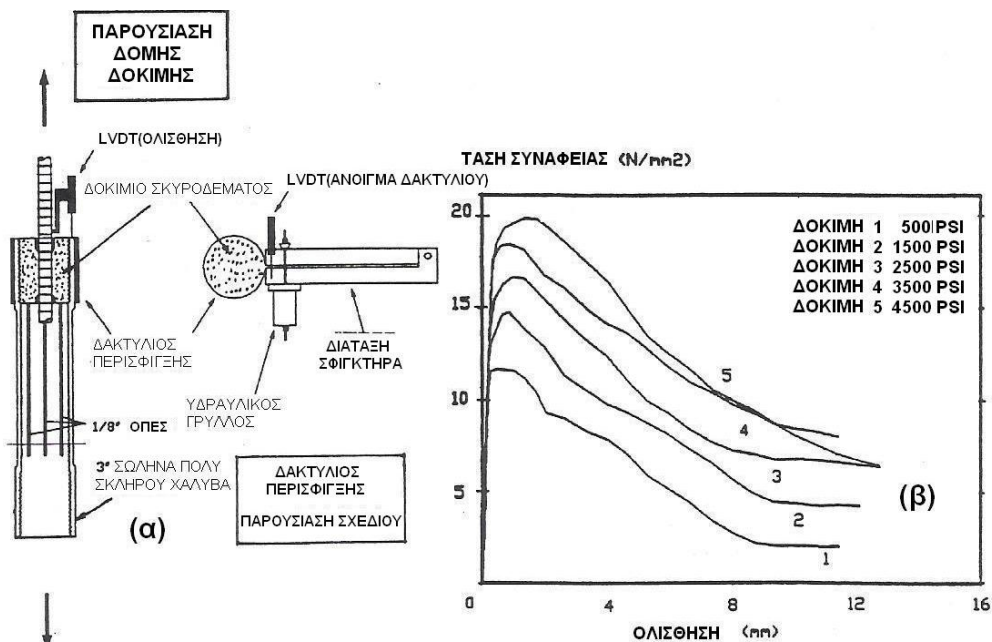
Στην πραγματικότητα, η ενδιαφέρουσα πλευρά οποιασδήποτε έρευνας στις επιδράσεις, που προκαλούνται από την απόσχιση στην συνάφεια, είναι ο διαχωρισμός των δύο συνιστωσών των δυνάμεων που δρουν στη συνάφεια, δηλαδή της διατμητικής συνιστώσας (που είναι το αποτέλεσμα των τάσεων συνάφειας που δρουν κατά μήκος της ράβδου), και της ορθής συνιστώσας, κάθετη στην ράβδο, που είναι το αποτέλεσμα των ακτινικών τάσεων που δρουν στην ράβδο (Σχήμα 1.17α).

Αντιθέτως, η ορθή συνιστώσα ενεργεί ως εξωτερική πίεση στο σκυρόδεμα και ισορροπεί με τις δακτυλιοειδείς (εφελκυστικές) τάσεις, οι οποίες είναι η απειλή (το «φόβητρο») ολόκληρης της επιχείρησης! Μόνο με το χωρισμό των δύο συνιστωσών, μπορούν οι δυνάμεις συνάφειας να μελετηθούν (Terfers και Olsson, 1992). Όσον αφορά αυτό το σημείο, έχουν καταβληθεί πρόσφατα ιδιαίτερες προσπάθειες από διάφορους ερευνητές, και μερικές πειραματικές διαδικασίες και αποτελέσματα αναφέρονται παρακάτω.

Ένας πολύ απλός και αποδοτικός τρόπος ώστε να υπάρξουν βασικά δεδομένα όσον αφορά την απόσχιση, προσφέρεται από την μέθοδο του «πείραματος δακτυλιδιού» από τους Olsson και Terfers (Σχήμα 1.17, Terfers και Olsson 1992): η διατμητική συνιστώσα των δυνάμεων της σύνδεσης εξισορροπείται από την αντίδραση που διαβιβάζεται από μια κυκλική λωρίδα από τεφλόν, η οποία είναι πολύ κοντά στο φορτιζόμενο άκρο της ράβδου (έτσι η δράση-τόξου ελαχιστοποιείται), ενώ η ακτινική συνιστώσα εξουδετερώνεται από τις κυκλικές τάσεις του στερεού σκυροδέματος, μέχρι να αποσχιθεί, και κατόπιν από ένα μεταλλικό δαχτυλίδι (ή ζώνη). Τοποθετούνται όργανα μέτρησης στην περιφέρειά του μεταλλικού δακτυλιδιού, το οποίο είναι ένα αναπόσπαστο τμήμα του δοκιμίου. Σχηματικά διαγράμματα της εφαρμοζόμενης δύναμης και της περιφερειακής παραμόρφωσης σχεδιάζονται σαν συνάρτηση της ολίσθησης ράβδου στο Σχήμα 1.17. Το πείραμα του δακτυλιδιού ενδείκνυται για τη μέτρηση των τάσεων απόσχισης, ανάλογα με τον τύπο σκυροδέματος και τον τύπο των νευρώσεων των ράβδων. Εντούτοις, αξίζει να αναφερθεί ότι οι τοπικές δυνάμεις απόσχισης μπορούν δύσκολα να ποσοτικοποιηθούν, δεδομένου ότι μετρούνται μόνο οι μέσες παραμορφώσεις μακριά από την αγκυρωμένη επιφάνεια (στην κατεύθυνση του μεταλλικό δακτυλιδιού).

Πιο επιμελημένα πειράματα, που στοχεύουν στη μελέτη της εξέλιξης της απόσχισης, με/χωρίς παθητική/ενεργή περίσφιγξη, έχουν πραγματοποιηθεί από τους Malvar (1992) και Noghabai (1995). Και στις δύο περιπτώσεις περιλαμβάνονταν κύλινδροι από σκυρόδεμα. Στην πρώτη περίπτωση (Σχήμα 1.18), τα δοκίμια

φορτίστηκαν μέχρι την πλήρη απώλεια της συνάφειας, με τη βοήθεια μιας καινοτόμου συναρμολόγησης που αποτελείται από ένα διασπασμένο μεταλλικό περίβλημα, που είναι σε επαφή με το οπλισμένο δοκίμιο. Το μεταλλικό περίβλημα πιέζει το δοκίμιο μέσω ενός δαχτυλιδιού περισφιγξης, το οποίο σφίχτηκε από ένα υδραυλικό γρύλο. Στην τελευταία περίπτωση (Σχήμα 1.19) πραγματοποιήθηκαν, τόσο τα πειράματα απόσχισης μεμβρανών, όπου εφαρμόστηκε μια κατάλληλη πίεση σε όλη την οπή αντιπροσωπεύοντας τον όγκο της ράβδου, όσο και πειράματα απόσχισης με εξόλκευση ράβδου (με μια πραγματική ράβδο που εξολκεύτηκε από το δοκίμιο σκυροδέματος), με και χωρίς περισφιγξη (παθητική περισφιγξη εξασφαλίζεται από μια εμπηγμένη σπείρα χάλυβα). Ο αριθμός των ρωγμών απόσχισης ήταν από 1 έως 6, έναντι 2 έως 4 στα πειράματα του Malvar.

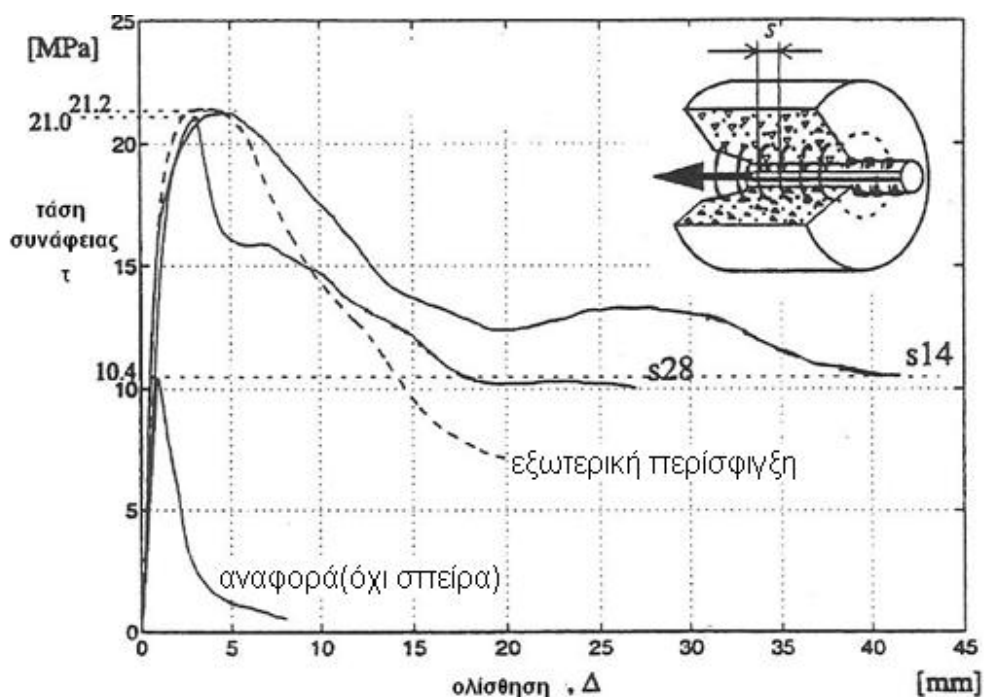


Σχήμα 1.18 - Πειράματα εξόλκευσης με αστοχία απόσχισης (Malvar 1992), σε ποικίλα επίπεδα περισφιγξης: (α) διάταξη πειράματος, και (β) καμπύλες τάσης συνάφειας-ολίσθησης, $f_c = 38 \sim 40 \text{MPa}$, μήκος έμπηξης/διάμετρος ράβδου=3.5, διάμετρος ράβδου=19 mm, διάμετρος δοκιμίου (σκυρόδεμα)=75 mm, μήκος δοκιμίου=100 mm.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.19, σύμφωνα με τα πειράματα του Noghabai, μια δυνατή εξωτερική περισφιγξη (μεταλλικός σωλήνας) και μια εμπηγμένη σπείρα επιφέρει την ίδια μέγιστη αντοχή, και μόνο οριακές διαφορές στον κατιόντα κλάδο. Επιπλέον, η σχέση μεταξύ της οριακής τάσης συνάφειας και της τάσης περισφιγξης

φαίνεται να ακολουθεί το κριτήριο Mohr-Coulomb (μια γραμμική εξάρτηση, με μια περιορισμένη συνοχή).

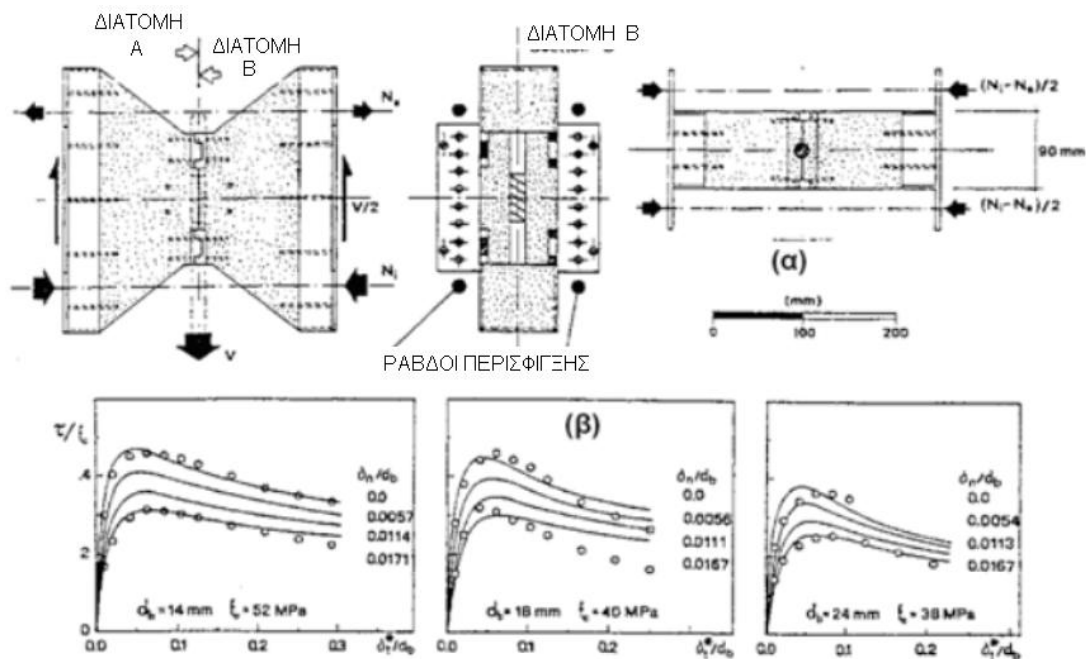
Τέλος, οι Gambarova (1989); Gambarova και Rosati (1996, 1997); Modena (1992); Plizzari et al. (1998) υιοθέτησαν απολύτως διαφορετικές προσεγγίσεις, εξετάζοντας ειδικά-σχεδιασμένες οπλισμένες πλάκες, αποσχισμένες από πριν ή αρχικά αρηγμάτωτες, με ή χωρίς εγκάρσιο οπλισμό.



Σχήμα 1.19 - Χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης συνάφειας/ολίσθησης (πειράματα απόσχισης, άκαμπτη περίσφιγξη, Noghabai 1995): $f_c = 40\text{MPa}$, μήκος έμπηξης/διάμετρος ράβδου=3.75, διάμετρος ράβδου=32 mm, σπειροειδής οπλισμός $\phi 6\text{ mm}$, διάμετρος σπείρας=81 mm, βήμα σπείρας=14 mm και 28 mm, διάμετρος δοκιμίου=313 mm, ύψος δοκιμίου=175 mm. Δείτε Σχήμα 1.16 για εξωτερική περίσφιγξη.

Στα, από πριν, αποσχισμένα δοκίμια (Σχήμα 1.20α), η τεχνητή ρωγμή «απόσχισης» επιτεύχθηκε με την είσοδο ειδικών διαχωριστών στο καλούπι, παράλληλα με την ράβδο, πριν τη σκυροδέτηση. Τα πειράματα του Gambarova et al. (1989) και των Gambarova και Rosati (1996, 1997) πραγματοποιήθηκαν με τον περιορισμό ότι το άνοιγμα της ρωγμής παραμένει σταθερό σε όλη τη διαδικασία

φόρτισης (τέσσερις διαφορετικές τιμές του δ_n/d_b), ενώ στα πειράματα του Modena (1992) κρατήθηκε σταθερή η δύναμη περισφίγξης. Σε όλα τα πειράματα ελέγχονταν οι μετατοπίσεις. Εκτός από τις καμπύλες τάσης συνάφειας και διατμητικής τάσης σε συνάρτηση με την ολίσθηση της ράβδου (Σχήμα 1.20β), μελετήθηκαν επίσης οι καμπύλες συνάφειας-περισφίγξης, καθώς επίσης και η πορεία-εξάρτηση της συνάφειας, η οποία αποδείχθηκε αρκετά περιορισμένη κάτω από δυνατή περισφίγξη.

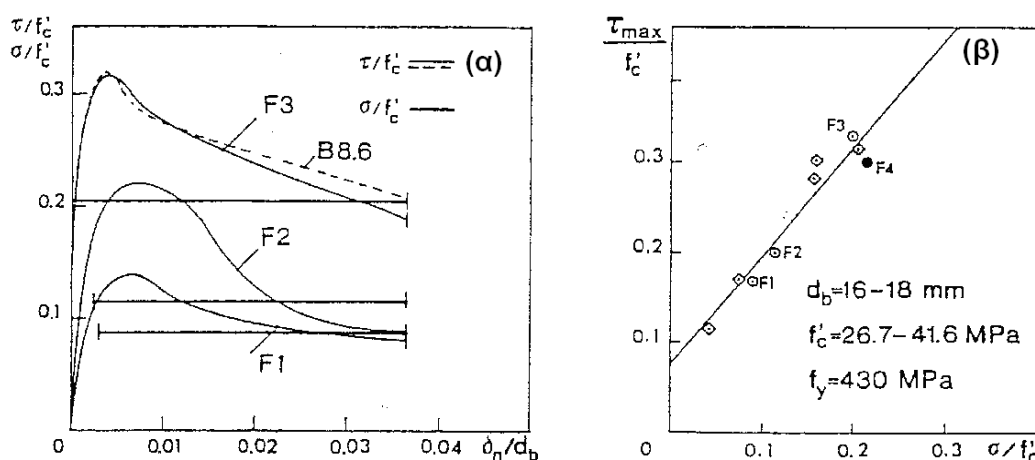


Σχήμα 1.20 - Πειράματα εξόλκευσης σε δοκίμια που έχουν ήδη υποστεί απόσχιση (Gambarova et al. 1989, 1996, 1997) για μεγάλο εύρος ρωγμών: (α) γεωμετρία των δοκιμίων, και (β) καμπύλες τάσης συνάφειας-ολίσθησης ράβδου (πλήρης διαγράμμιση = κανόνες συμπεριφοράς, τελείες = αποτελέσματα πειράματος). Μήκος έμπηξης /διάμετρος ράβδου = 3.0, 2.9, 2.4, διάμετρος ράβδου = 14, 18, 24 mm, πάχος δοκιμίου/διάμετρος ράβδου = 4.3, 5.0, 3.8, διαστάσεις δοκιμίου 300 x 300 x 60-90 mm.

Τα πειράματα εξόλκευσης είναι βεβαίως ένας από τους απλούστερους τρόπους να εξεταστούν τα μήκη έμπηξης αλλά δεν πρέπει να υποτιμηθεί η επίδραση που έχει η τριβή μεταξύ του δοκιμίου και των πλακών στήριξης στην περισφίγξη, ακόμα περισσότερο δε, αφού μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του ίδιου πειράματος και διαφέρει από πείραμα σε πείραμα (Losberg και Olsson, 1979). Προκειμένου να αποφευχθούν αυτές οι ανεπιθύμητες επιδράσεις, εισήχθη από τον Plizzari et al.

(1998), μια ειδική διάταξη, στην ιδέα των Giuriani και Plizzari (1985). Η δύναμη εξόλκευσης που δρα στο δοκίμιο εξισορροπείται από δύο μπλοκ αντίδρασης που επιτρέπουν στην κύρια ρωγμή απόσχισης να ανοίξει (δείτε επίσης το Σχήμα 1.22α, δοκίμια μεγάλου μήκους).

Στο Σχήμα 1.21 φαίνονται μερικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με σταθερή περίσφιγξη από τον Modena (1992) και τους Gambarova-Rosati (1996) και δείχνουν ότι η ικανότητα της σύνδεσης (= μέγιστη τάση των καμπυλών τάσης-μετατόπισης) είναι σχεδόν μια γραμμική συνάρτηση της περίσφιγξης (καθαρή τριβή, δείτε επίσης την ενότητα 1.5).



Σχήμα 1.21 - Πειράματα εξόλκευσης σε δοκίμια που έχουν ήδη υποστεί απόσχιση με σταθερή περίσφιγξη: (α) καμπύλες απόκρισης, (β) ικανότητα συνάφειας έναντι περίσφιγξης. Πειράματα F1-F4 από τους Gambarova και Rosati 1996, πείραμα B8.6 και ρόμβοι από τον Modena 1992.

1.7.2 Δοκίμια μεγάλου μήκους

Όπως ήδη αναφέρθηκε, πειράματα με μικρά μήκη έμψηξης συμβάλλουν στη σύναψη της σχέσης τάσης συνάφειας-ολίσθησης, και γι' αυτό, τόσο η τάση συνάφειας όσο και η μετατόπιση της διεπιφάνειας (ολίσθηση) πρέπει να διανεμηθούν όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα (δοκίμια μικρού μήκους). Εντούτοις είναι πιθανές και έχουν υιοθετηθεί επιτυχώς για πολλά χρόνια και άλλες προσεγγίσεις, όπως η περίπτωση των μεγάλων μηκών έμψηξης και ματισμάτων, όπου η μέτρηση της επιμήκυνσης του οπλισμού

δίνει χρήσιμες πληροφορίες για τη γενική συμπεριφορά συνάφειας (δοκίμια μεγάλου μήκους).

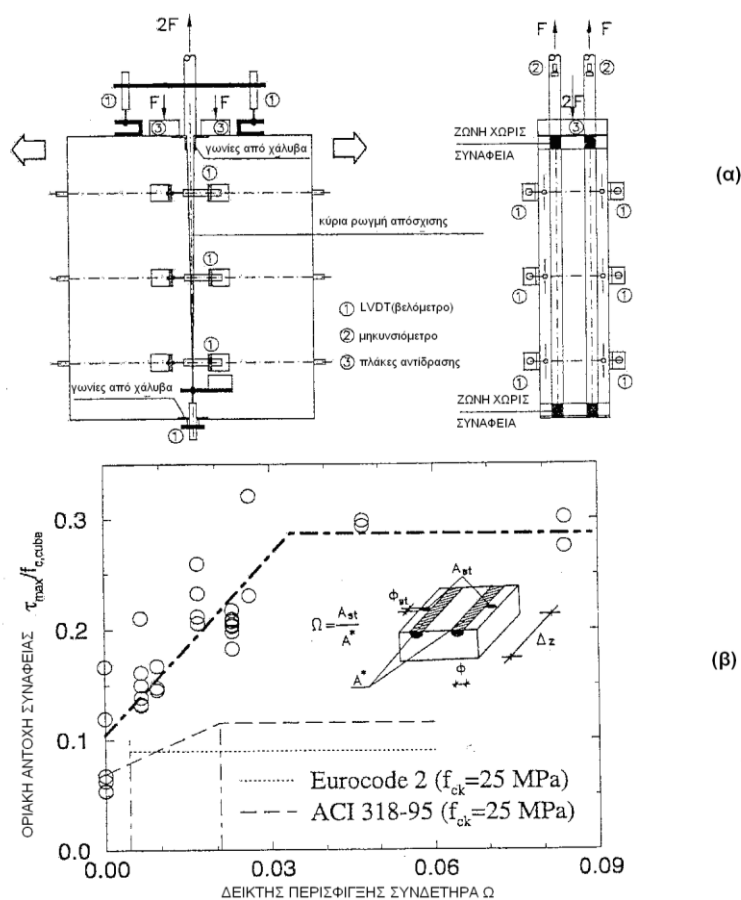
Αυτά τα πειράματα:

- (α) παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για την συμπεριφορά των μηκών έμπηξης,
- (β) καθιστούν πιθανή την μελέτη της διανομής της τάσης συνάφειας κατά μήκος μιας αγκυρωμένης ράβδου ή ενός ματίσματος, και
- (γ) είναι μια αναφορά για τη μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία.

Για παράδειγμα, στο πανεπιστήμιο Durham, ο Scott et al. (1996) υιοθέτησαν και βελτίωσαν πρόσφατα μια ήδη γνωστή τεχνική για την μέτρηση της παραμόρφωσης (επιμήκυνσης) του οπλισμού και την διανομή της τάσης συνάφειας, η οποία περιλαμβάνει εσωτερική διαμέτρηση της παραμόρφωσης (επιμήκυνσης) του οπλισμού με μηκυσιόμετρα ηλεκτρικών-αντιστάσεων (μέχρι 100 μηκυσιόμετρα). Αυτή η προσέγγιση αποφεύγει την διάσπαση των χαρακτηριστικών της συνάφειας γύρω από την επιφάνεια της ράβδου, η οποία λαμβάνει χώρα με τη χρήση των επιφανειακά-τοποθετημένων μηκυσιομέτρων. Κάθε ράβδος με μηκυσιόμετρο κατασκευάζεται με επεξεργασία δύο στερεών ράβδων, χωρισμένων στη μέση, πριονίζοντας ένα διάμηκες κανάλι στο κέντρο και κατά μήκος κάθε μισής ράβδου. Έπειτα εγκαθίστανται τα μηκυσιόμετρα στα κανάλια και η καλωδίωση (χαρακτηριστική διατομή 4×4 χιλ.) και τα δύο μισά ενώνονται για να δώσουν την εμφάνιση μιας φυσιολογικής στερεάς ράβδου. Η ράβδος έπειτα τοποθετείται στο σκυρόδεμα ως κανονικός οπλισμός. Οι παραλλαγές στην τάση συνάφειας κατά μήκος της ράβδου μπορούν να αναλυθούν από τις διαφορές στις διαμήκεις παραμορφώσεις (επιμηκύνσεις). Η τεχνική αυτή, έχει χρησιμοποιηθεί για να εξεταστεί η συμπεριφορά των ματισμάτων συνεχών ράβδων και των μηκών έμπηξης, των άγκιστρων και των κάμψεων, των συνδέσεων υποστηλωμάτων/δοκών, και των συνδέσεων. Έχει λάβει χώρα, αξιοσημείωτη ανάπτυξη αυτής της τεχνικής, με αναφορά σε όλα τα μεγέθη ράβδων από 6 έως 32 χιλ. διάμετρο και μηκών έμπηξης μέχρι 4 μ.

Στη μελέτη από τον Plizzari et al. (1996α, β και 1998), μελετήθηκε η συμπεριφορά των σχετικά μεγάλων μηκών έμπηξης (Σχήμα 1.22, $l_a / d_b \approx 20$) με τη βοήθεια ειδικών δοκιμίων που αποτελούνται από μία ή δύο ράβδους, που αγκυρώθηκαν κατά μήκος του μέσου εγκάρσιου επιπέδου μιας αρκετά παχιάς πλάκας σκυροδέματος (Σχήμα 1.22α). Τα δοκίμια ήταν είτε αρηγμάτωτα είτε, είχαν υποστεί,

από πριν, απόσχιση, σε παραπάνω επίπεδο, και τα περισσότερα οπλίστηκαν εγκαρσίως (3 δίμητοι συνδετήρες).



Σχήμα 1.22 - Πειράματα εξόλκευσης για σχετικά μεγάλες αγκυρώσεις (μήκος έμπηξης/διάμετρος ράβδου = 9, Plizzari et al. 1996a και 1998): (α) διάγραμμα θέσης μιας αγκύρωσης δύο ράβδων (με 6 εγκάρσιες ράβδους αντί 3 δίμητων συνδετήρων), (β) διάγραμμα ικανότητας συνάφειας έναντι δείκτη περίσφιγξης συνδετήρων. Κύριος οπλισμός 1-2 ράβδοι $\phi 20$, εγκάρσιος οπλισμός 6 ράβδοι $\phi 5/\phi 10$, πάχος δοκιμίου 80~120 mm, $f_c = 23 \sim 30 \text{MPa}$.

Ο στόχος των πειραμάτων ήταν τριπλός:

- α) να έχουμε πληροφορίες για την εξέλιξη της διαδικασίας απόσχισης σε ένα σχετικά μεγάλο μήκος έμπηξης που υποβάλλεται σε παθητική περίσφιγξη ή χωρίς περίσφιγξη,
- β) να αξιολογηθεί η δράση περίσφιγξης που προκαλείται από τη συνοχή των ρωγμών, και

γ) να διευκρινιστεί η εξάρτηση της ικανότητας της συνάφειας από την ποσότητα των συνδετήρων.

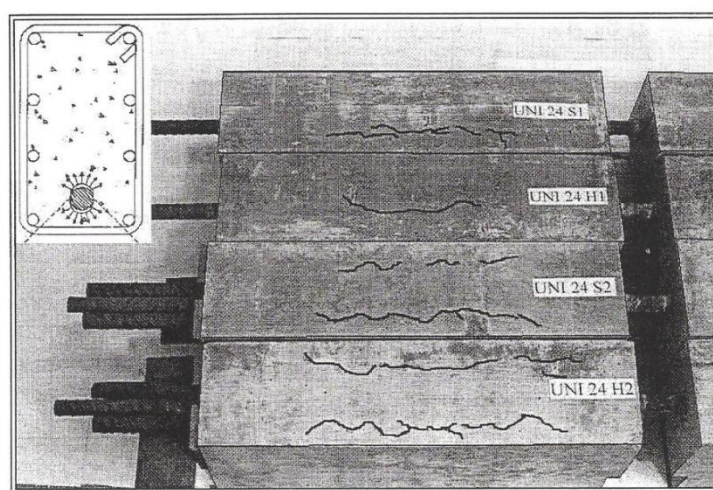
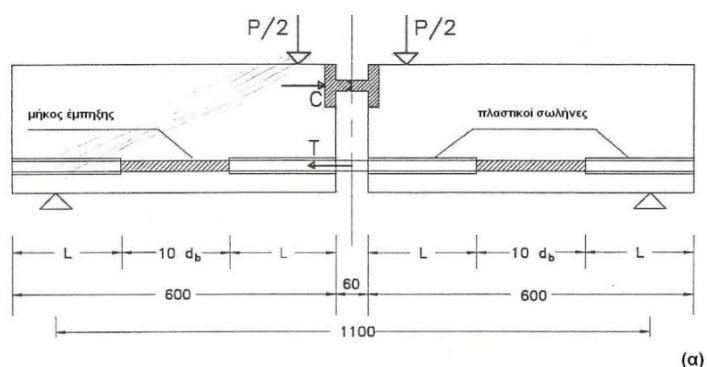
Στην πραγματικότητα, το Σχήμα 1.22β δείχνει ότι, πέρα από μια ορισμένη τιμή του δείκτη περίσφιγξης των συνδετήρων, η προσθήκη συνδετήρων είναι άσκοπη (το Σχήμα 1.22β παρουσιάζει επίσης τις σχεδιαστικές τιμές της συνάφειας που προτείνονται από το Eurocode No. 2, 1991, και ACI -318/95, 1995, τα τελευταία συμπεριλαμβάνουν τους συνδετήρες που προκαλούν περίσφιγξη).

Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν τέσσερις κύριοι λόγοι για την αρκετά μεγάλη διαφορά μεταξύ των διατάξεων των κανονισμών και των πειραματικών στοιχείων:

- (α) οι συντελεστές ασφαλείας που συνιστούν οι κανονισμοί,
- (β) η ανάγκη επικάλυψης τόσο των μηκών έμπηξης όσο και των ματισμάτων,
- (γ) η διαφορετική περίσφιγξη των γωνιακών και εσωτερικών ράβδων που υφίστανται στις πραγματικές δοκούς και κατασκευές, και
- (δ) το μήκος έμπηξης ($l_d/d_b = 9$ στα πειράματα και $l_d/d_b > 20 \sim 30$ στα πραγματικά μήκη έμπηξης, όπου η ονομαστική αντοχή συνάφειας μειώνεται αρκετά σε περίπτωση απόσχισης). Εξετάζοντας τα προηγούμενα στοιχεία, ο EC2 μάλλον συμφωνεί αρκετά με τα αποτελέσματα του πειράματος.

Τέλος, πρέπει να αναφερθούν επίσης, το γνωστό «πείραμα δοκού» (Σχήμα 1.23α) για την αξιολόγηση της σχετικής περιοχής των νευρώσεων (που τυποποιείται από RILEM, 1978), και το «πείραμα beam-ends» που χρησιμοποιείται συχνά στην ανάλυση της σύνδεσης μέσα σε ένα δομικό πλαίσιο. Δυστυχώς, η χρησιμότητα των «πειραμάτων δοκών» περιορίζεται στη σύγκριση μεταξύ των ράβδων που έχουν την ίδια ονομαστική διάμετρο και διαφορετικούς τύπους νευρώσεων, δεδομένου ότι τα αποτελέσματα του πειράματος δίνουν μικτές πληροφορίες τόσο για την καταστατική συμπεριφορά της σύνδεσης όσο και για την δομική συμπεριφορά του δοκιμίου. Στην πραγματικότητα, ο εγκάρσιος οπλισμός αποτρέπει την απόσχιση επικάλυψης στην περίπτωση ράβδων μικρής διαμέτρου ($d_b = 10 \sim 14mm, \Omega = 0.113 \sim 0.081\%$), αλλά όχι στην περίπτωση ράβδων μεγάλης διαμέτρου ($d_b = 16 \sim 32mm, \Omega = 0.196 \sim 0.098\%$): μόνο οι συνδετήρες που διανεμήθηκαν στο μήκος έμπηξης της ράβδου $= 10d_b$ λήφθηκαν υπόψη στην αξιολόγηση του Ω . Στο Σχήμα 1.23β, οι τριχοειδείς ρωγμές απόσχισης, που απλώνονται ακτινικά και με γωνία 45 μοιρών γύρω από τις ράβδους μεγάλης διαμέτρου ($d_b = 24mm$), προκύπτουν από μια τοπική διατμητική αστοχία, η οποία προκαλείται από το συνδυασμό μιας

περιορισμένης επικάλυψης και μιας ανεπαρκούς περίσφιγξης που παρέχεται από τους συνδετήρες.



Σχήμα 1.23 - (α) Γεωμετρία δοκιμίου πειράματος δοκών από RILEM, και (β) επιφανειακές ρωγμές απόσχισης κατά μήκος της βάσης ενός δοκιμίου πειράματος δοκών ($d_b = 24mm$, Plizzari και Franchi 1996).

1.8 Μοντελοποίηση

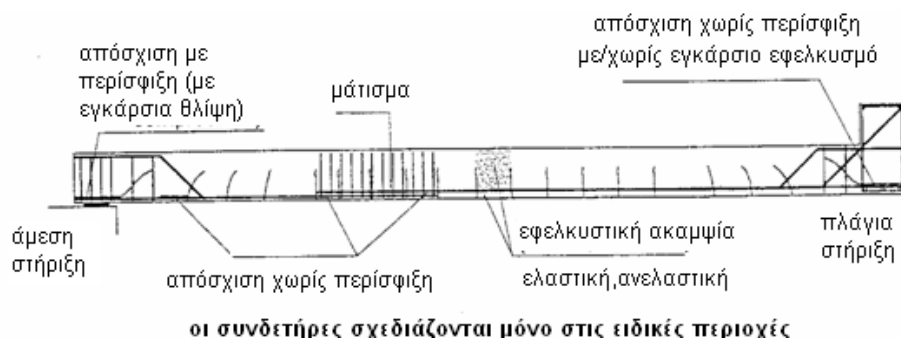
Ο μεγάλος αριθμός των πειραματικών αποτελεσμάτων, αποτελεί την βάση της μαθηματικής μοντελοποίησης, και θα πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη, εάν τα θεωρητικά μοντέλα που πρόκειται να διατυπωθούν θα πρέπει να συμπεριλάβουν τα κρυμμένα και δυσνόητα στοιχεία της σύνδεσης (Shima et al., 1987β). Ξεκινώντας από τις βασικές ιδιότητες και τους θεμελιώδεις μηχανισμούς (μικρο-επίπεδο) που

διέπουν το φαινόμενο, μπορεί να διατυπωθούν οι καταστατικοί νόμοι, ή οι νόμοι συμπεριφοράς με έναν συνεπή τρόπο (μεσο-επίπεδο), προκειμένου να εισαχθούν στην ανάλυση (μακρο-επίπεδο). Επιπλέον, μόνο με τη γνώση του ρόλου της κάθε, λίγο ή πολύ σημαντικής, παραμέτρου (αλλά ποιος ξέρει πριν το πείραμα;) μπορεί να παραληφθούν μερικές παράμετροι, και να απλοποιηθούν νόμοι και εξισώσεις, προς όφελος του μελετητή, αλλά χωρίς βλάβη στην ορθότητα της ανάλυσης.

Η συνοπτική και, βεβαίως, μη πλήρης παρουσίαση των φαινομενολογικών στοιχείων της συνάφειας καθιστά πιθανή την αναγνώριση ότι τα μοντέλα της συνάφειας πρέπει πάντα να περιλαμβάνουν, με κάποιο τρόπο, τα ακόλουθα:

- τον τύπο αστοχίας (αστοχία εξόλκευσης και απόσχισης της συνάφειας)
- την γεωμετρία του οπλισμού (σχετική περιοχή των νευρώσεων = δείκτης συνάφειας)
- τον τύπο φόρτισης (μονοτονικές, κυκλικές, ανακυκλιζόμενες φορτίσεις κ.λ.π.)
- την δράση περίσφιξης (ενεργή/παθητική περίσφιξη)
- τα φαινόμενα μεγέθους
- τον τύπο σκυροδέματος (HSC, NSC, FRC)
- το περιβάλλον και τις επιδράσεις του στην συνάφεια (διάβρωση ράβδων, υψηλές/χαμηλές θερμοκρασίες)
- τους περιορισμούς ορίου και
- τις συγκεκριμένες απαιτήσεις των κατασκευών προεντεταμένου σκυροδέματος.

Μερικά από τα προαναφερθείσα στοιχεία της συνάφειας παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.24.

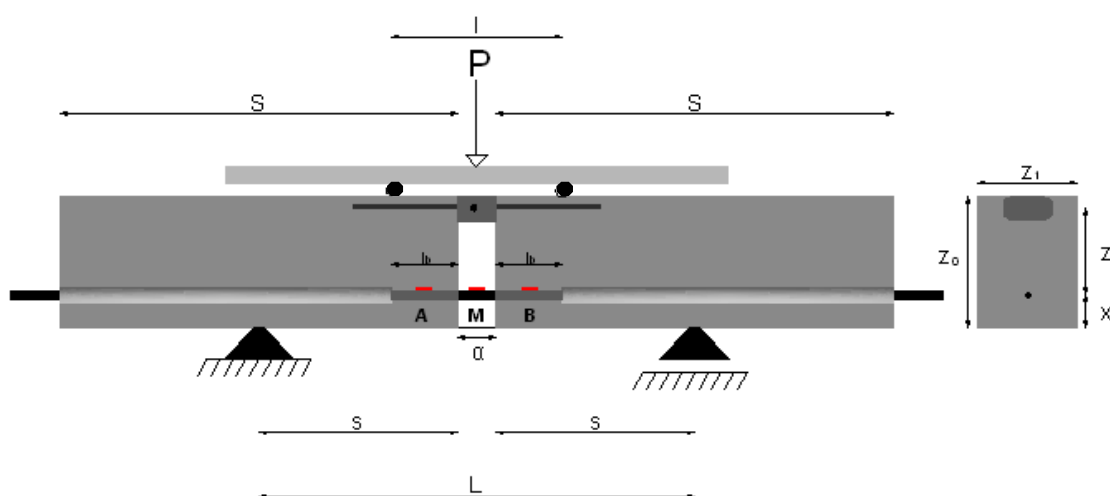


Σχήμα 1.24 - Χαρακτηριστικά προβλήματα συνάφειας σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ-ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΚΟΥ ΓΙΑ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟ FRP.

2.1 Η δοκιμή δοκού του εργαστηρίου Δομικής Μηχανικής της Σ.Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π.

Με την μέθοδο αυτή προσδιορίζονται πειραματικά οι τάσεις συνάφειας που αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια οπλισμού-σκυροδέματος συναρτήσει της ολίσθησης που συμβαίνει στην ράβδο οπλισμού. Στην παρούσα διπλωματική εργασία προσδιορίστηκε η πειραματική σχέση συνάφειας-ολίσθησης συγκεκριμένων ράβδων CFRP και GFRP σε σκυρόδεμα, για μονότονη φόρτιση. Στην διπλωματική αυτή εργασία εκτελέστηκε μια πειραματική δοκιμή για κάθε τύπο FRP που εξετάστηκε.



Σχήμα 2.1 - Πειραματική διάταξη δοκιμίου.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Η επιλογή των διαστάσεων και η διάταξη των στοιχείων της προέκυψαν μετά από εκτεταμένη παραμετρική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία για τις δυνάμεις που θα την καταπονήσουν κατά την διάρκεια των δοκιμών. Τα βασικά κριτήρια σχεδιασμού των δοκών ήταν η αποφυγή τοπικών αστοχιών στα υλικά, η απάλειψη φαινομένων

αλληλεπίδρασης δυνάμεων, και η ελαχιστοποίηση του μεγέθους των ανεπιθύμητων εντάσεων στην άμεση γειτονιά των αγκυρωμένων τμημάτων των ράβδων.

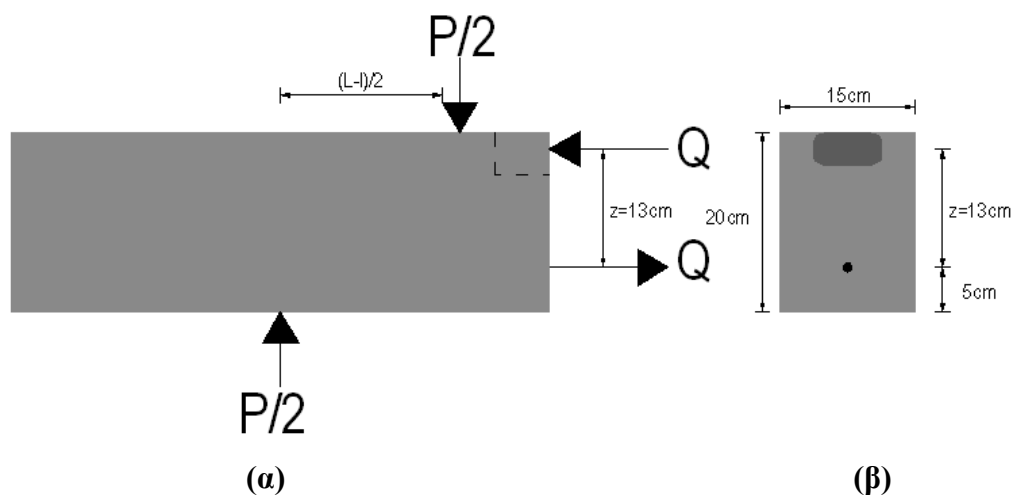
Οι δοκοί αποτελούνται από δύο ίδια συνδεδεμένα πρισματικά τμήματα σκυροδέματος που έχουν μήκος 60 cm και ορθογώνια διατομή διαστάσεων 15X20 cm. Η σύνδεση των δύο τμημάτων γίνεται στο πάνω μέρος, με μια μεταλλική άρθρωση, και με μία ράβδο οπλισμού FRP στο κάτω μέρος. Το υλικό των μεταλλικών αρθρώσεων είναι χάλυβας υψηλής αντοχής, οι δε διαστάσεις τους επιλέχθηκαν έτσι ώστε οι αναπτυσσόμενες τάσεις σε σκυρόδεμα-άρθρωση να μπορούν να παραληφθούν, και η εντατική κατάσταση στην γειτονιά του αγκυρωμένου τμήματος κάθε ράβδου να επηρεάζεται ελάχιστα από την γεωμετρία και φόρτιση των δοκών (Σχήμα 2.2). Επιπλέον, οι αρθρώσεις αγκυρώθηκαν επαρκώς στα δύο τμήματα του σκυροδέματος για να μην υπάρχει κίνδυνος αποκόλλησης τους από το σκυρόδεμα κατά την φάση εφελκυσμού τους. Οι ράβδοι FRP είναι αγκυρωμένες μερικώς στα δύο τμήματα κάθε δοκού. Τα αγκυρωμένα τμήματα των ράβδων έχουν μήκος $l_b = 10cm$, τα δε ασύνδετα τμήματα τους βρίσκονται σε δύο πλαστικούς σωλήνες, που ενσωματώνονται στις δοκούς κατά την φάση σκυροδέτησής τους. Για την αποφυγή διατμητικών αστοχιών, τα δύο τμήματα κάθε δοκού οπλίζονται με κατακόρυφους συνδετήρες διαμέτρου 6 mm με τον απαιτούμενο οπλισμό μοντάζ.



Σχήμα 2.2 - Η μεταλλική άρθρωση τοποθετημένη στο καλούπι.

Οι δοκοί σκυροδετούνται σε κατάλληλα προκατασκευασμένα ξύλινα καλούπια. Πριν την σκυροδέτηση των δοκών τοποθετούνται και στερεώνονται σε κάθε ένα από αυτά η ράβδος FRP, η μεταλλική άρθρωση, οι πλαστικοί σωλήνες και οι μεταλλικοί

συνδετήρες με τον οπλισμό μοντάζ. Στις ράβδους FRP επικολλώνται σε κατάλληλες θέσεις τρία μηχανοσκόπια για την μέτρηση των παραμορφώσεων, και στον μέσον του καλουπιού, πριν την σκυροδέτηση, τοποθετείται συμπιεσμένο χαρτί πάχους 6 mm για να δημιουργηθούν τα δύο τμήματα των δοκών. Μετά τον απαιτούμενο χρόνο σκλήρυνσης του σκυροδέματος, οι δοκοί μεταφέρονται και τοποθετούνται καλουπωμένοι στην μηχανή κάμψης, όπου ξεκαλουπώνονται.



Σχήμα 2.3 – (α) Διάγραμμα Ελεύθερου Σώματος του ορθογωνίου τμήματος της δοκού, (β) Διατομή της πειραματικής δοκού.

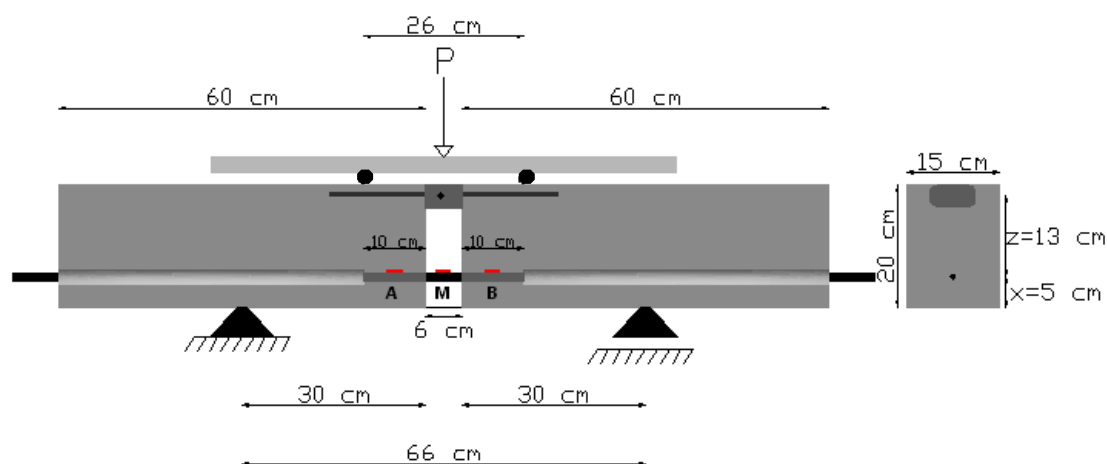
Οι δοκοί φορτίζονται από την μηχανή με δύο κατακόρυφες και ίσες δυνάμεις μεγέθους $P/2$ που απέχουν μία απόσταση l . Η απόσταση l στην περίπτωση της μονότονης φόρτισης είναι μικρότερη του ανοίγματος L της δοκού (Σχήμα 2.1). Με αυτόν τον τρόπο φόρτισης και παίρνοντας υπόψη τις αντιδράσεις στηρίξεων, έχουμε συνθήκες κάμψης δοκού τεσσάρων σημείων. Στην περίπτωση αυτή, μεταξύ των δύο δυνάμεων το διάγραμμα ροπών είναι σταθερό. Αυτό σημαίνει ότι μέσω της άρθρωσης, στα δύο τμήματα κάθε δοκού μεταβιβάζεται μία θλιπτική δύναμη Q ίση με την εφελκυστική δύναμη, που αναπτύσσεται στην ράβδο FRP (Σχήμα 2.3α).

Από την ισορροπία προκύπτει :

$$Q = P \frac{L-l}{4z} \quad (2.1)$$

όπου z είναι ο μοχλοβραχίονας των δύο δυνάμεων, που ισούται με την απόσταση του κέντρου βάρους της άρθρωσης από το κέντρο βάρους της διατομή της ράβδου (Σχήμα 2.3β).

Για την καταγραφή των διαμηκών παραμορφώσεων της ράβδου χρησιμοποιούνται τρία μηκυσιόμετρα (strain gages) και δύο βελόμετρα (LVDT). Τα δύο μηκυσιόμετρα επικολλούνται στα αγκυρωμένα τμήματα της ράβδου στις θέσεις A και B που απέχουν 5 cm από τις εσωτερικές παρειές των τμημάτων της δοκού, ενώ το τρίτο επικολλάται στο μεσαίο σημείο M του μη αγκυρωμένου τμήματος της ράβδου. Τα δύο βελόμετρα (LVDT) τοποθετούνται στις εσωτερικές παρειές των τμημάτων της δοκού για την καταγραφή της μεταβολής του μήκους α. Η γεωμετρία της δοκού και η θέση των μηκυσιομέτρων φαίνονται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 - Γεωμετρία των δοκιμίων της δοκού κατά την εκτέλεση των δοκιμών.

Από τις μετρήσεις που έγιναν και με την κατάλληλη ανάλυση που θα εκτεθεί παρακάτω μπορούν να κατασκευαστούν οι σχέσεις συνάφειας-ολίσθησης που περιγράφουν την μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας FRP-σκυροδέματος για τις δύο δοκούς.

2.2 Ο τύπος και οι μηχανικές ιδιότητες των ράβδων FRP της δοκιμής

Οι ράβδοι οπλισμού FRP που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ράβδοι άνθρακα (CFRP) της εταιρίας Mac Beton Hellas SA και ράβδοι γυαλιού (GFRP) της Αμερικάνικης εταιρίας με την επωνυμία Concrete Protection Products Incorporation.

Οι ράβδοι αποτελούνται από συνεχείς διαμήκεις ίνες άνθρακα και γυαλιού αντίστοιχα, οι οποίες κατά την παραγωγή τους ενώθηκαν με ρητίνη (Σχήμα 2.5). Οι ράβδοι αυτές, όπως όλες οι ράβδοι FRP, παρουσιάζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι την θραύση τους. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι CFRP με ονομαστική διάμετρο 7.8 mm και ράβδοι GFRP με ονομαστική διάμετρο 12.7 mm, ενώ σύμφωνα με τα στοιχεία των δύο εταιριών η μέθοδος για την κατασκευή των ράβδων είναι η διαδικασία της ψυχρής έλασης. Λόγω αυτής της διαδικασίας, οι ράβδοι παρουσιάζουν μία λεία επιφάνεια, επομένως για να επιτευχθεί η απαιτούμενη αύξησης της συνάφειας, η επιφάνεια αυτή επικαλύπτεται με ένα επίστρωμα κόκκων άμμου συγκεκριμένου μεγέθους και δημιουργούνται αυλακώσεις στην εξωτερική επιφάνεια, πριν να στεγνώσει η ρητίνη που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους.



Σχήμα 2.5 - (α) Η ράβδος CFRP, (β) Ράβδοι GFRP με τα τρία strain gages.

Τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των ράβδων FRP που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και που παρέχονται από τις εταιρείες παραγωγής, έχουν προκύψει μετά από εκτεταμένες πειραματικές έρευνες. Η ονομαστική διάμετρος των ράβδων είναι 7.8 mm για τις ράβδους CFRP και 12.7 mm για τις ράβδους GFRP, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, το εμβαδόν διατομής είναι 47.8 mm² και 126.7 mm², το ειδικό βάρος των δύο κατηγοριών είναι 75 g/m και 271,4 g/m, αντίστοιχα. Η εφελκυστική αντοχή των ράβδων CFRP είναι 2300 MPa, το μέτρο ελαστικότητας είναι 130 GPa, και η μέγιστη παραμόρφωση είναι 1.8 %. Αντίστοιχα για τις ράβδους GFRP η εφελκυστική αντοχή είναι 788 MPa, το μέτρο ελαστικότητας

είναι 43.9 GPa και η μέγιστη παραμόρφωση είναι 1.79%, ενώ η αντίστοιχη παραμόρφωση ράβδου χάλυβα κατά τη διαρροή είναι 2%. Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των ράβδων αυτών συγκεντρώνονται στον πίνακα 2.1.

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ GFRP		ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ CFRP	
Ονομαστική Εφελκυστική αντοχή, MPa	788	Ονομαστική Εφελκυστική αντοχή, MPa	2300
Ονομαστικό Μέτρο Ελαστικότητας για Εφελκυσμό, GPa	43.9	Ονομαστικό Μέτρο Ελαστικότητας για Εφελκυσμό, GPa	130
Ονομαστική Διατμητική αντοχή, MPa	220	Ονομαστική Διατμητική αντοχή, MPa	150
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής στην Διαμήκη Διεύθυνση, K ⁻¹	5.5 · 10 ⁻⁶	Συντελεστής Θερμικής Διαστολής στην Διαμήκη Διεύθυνση, K ⁻¹	0.7 · 10 ⁻⁶
Συντελεστής Θερμικής Διαστολής στην Εγκάρσια Διεύθυνση, K ⁻¹	36 · 10 ⁻⁶	Συντελεστής Θερμικής Διαστολής στην Εγκάρσια Διεύθυνση, K ⁻¹	30 · 10 ⁻⁶
Μέγιστη Εφελκυστική παραμόρφωση, %	1.79	Μέγιστη Εφελκυστική παραμόρφωση, %	1.8
ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ GFRP		ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ CFRP	
Ονομαστική διάμετρος, mm	12.7	Ονομαστική διάμετρος, mm	7.8
Εμβαδόν διατομής, mm ²	126.7	Εμβαδόν διατομής, mm ²	47.8
Ειδικό βάρος, g/m	271.4	Ειδικό βάρος, g/m	75

(α)

(β)

Πίνακας 2.1 - Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες ράβδων, α) GFRP και β) CFRP.

2.3 Η σύνθεση του σκυροδέματος της πειραματικής δοκιμής

Για την σκυροδέτηση των δοκών του πειράματος χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland με μέγιστη διάμετρο αδρανών 12mm, και λόγος νερού προς τσιμέντο 0.5. Η

σύνθεση του σκυροδέματος των δοκιμίων έγινε με την αναλογία υλικών ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος που δίνεται στον πίνακα 2.2. Οι δοκοί, μετά την σκυροδέτησή τους, καταβρέχονταν με νερό για τριάντα μέρες, και διατηρήθηκαν σε μια θερμοκρασία 20 °C και σε μια σχετική υγρασία που δεν ξεπερνούσε το 90 %.

ΣΥΝΘΕΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ / m ³	
ΝΕΡΟ (N)	118 kg
ΤΣΙΜΕΝΤΟ (T)	236 kg
ΑΜΜΟΣ	919 kg
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	1249 kg
ΑΕΡΑΣ	2%

Πίνακας 2.2 - Αναλογία υλικών για την παρασκευή του σκυροδέματος ανά m³.

Για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος, πάρθηκαν τέσσερα κυβικά δοκίμια 150X150X150 mm και υποβλήθηκαν σε δοκιμή θλίψης (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6 - Η δοκιμή θλίψης των κυβικών δοκιμίων.

Η μέση θλιπτική αντοχή των 28 ημερών του σκυροδέματος προσδιορίστηκε στην τιμή των 30 MPa.

2.4 Κατασκευή δοκιμίων και εκτέλεση πειραματικών δοκιμών

Η σκυροδέτηση των δοκιμίων δοκού πραγματοποιήθηκε μέσα σε ξύλινα καλούπια από 'μπετοφόρμ' που κατασκευάστηκαν για τον σκοπό αυτόν (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7 - Οι πειραματικές δοκοί σε ξύλινα καλούπια.



Σχήμα 2.8 - Πειραματική δοκός στην μηχανή κάμψης.

Τα δύο τμήματα των δοκών δημιουργήθηκαν με την τοποθέτηση κομματιών συμπιεσμένου χαρτιού στο κέντρο του καλουπιού, ώστε να δημιουργηθεί κενό 6 cm όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Μετά από 30 ημέρες, οι δοκοί μεταφέρθηκαν και

τοποθετήθηκαν στην μηχανή κάμψης του εργαστηρίου, και αφού ξεκαλουπώθηκαν, υποβλήθηκαν σε μονότονη κάμψη τεσσάρων σημείων.

Στο Σχήμα 2.8 δείχνεται μία πειραματική δοκός, κατά την δοκιμή. Από την καταγραφή των παραμορφώσεων στο σημείο M και υπολογίζοντας την δύναμη Q της ράβδου που τις προκαλεί μπορούμε να κατασκευάσουμε το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για κάθε ράβδο FRP, και στην συνέχεια, μπορούμε να εκτιμήσουμε το μέτρο ελαστικότητας E της κάθε ράβδου. Οι πειραματικές μετρήσεις αυτής της διαδικασίας επιβεβαίωσαν τη γραμμική συμπεριφορά του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων της ράβδου FRP. Το μέτρο ελαστικότητας των ράβδων υπολογίστηκε ίσο με $E = 118$ GPa για την ράβδο CFRP και $E = 45$ GPa για την ράβδο GFRP, που είναι κοντά στην ονομαστική τιμή που παρέχει η κάθε εταιρία.



(α)



(β)

Σχήμα 2.9 – Αστοχία δοκών μετά την διεξαγωγή των πειραμάτων: (α) με την ράβδο GFRP, (β) με την ράβδο CFRP.

Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η αστοχία των πειραματικών δοκών μετά την διεξαγωγή των πειραμάτων. Όπως παρατηρούμε η αστοχία της συνάφειας ράβδου-σκυροδέματος προήλθε από αστοχία απόσχισης για την δοκό με την ράβδο GFRP και από αστοχία εξόλκευσης για την δοκό με την ράβδο CFRP.

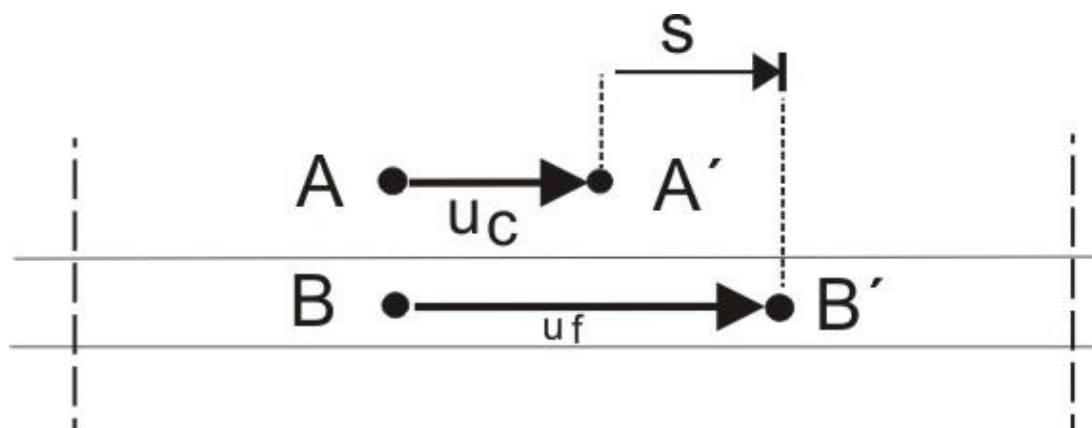
2.5 Κατασκευή διαγράμματος συνάφειας-ολίσθησης

Το διάγραμμα συνάφειας-ολίσθησης για ένα συγκεκριμένο τύπο ράβδων FRP, θα κατασκευαστεί, στηριζόμενοι στην ανάλυση που γίνεται παρακάτω, από τις καταγραφές των μηκυνσιομέτρων που έχουν επικολληθεί στην ράβδο FRP, και από την καταγραφή της μεταβολής Δl_u της απόστασης των δύο τμημάτων της δοκού στο ύψος της ράβδου. Η ανάλυση που θα γίνει θα στηριχθεί σε απλουστευτικές παραδοχές και υποθέσεις, αναφορικά με την μηχανική συμπεριφορά των υλικών και την κατανομή των αναπτυσσόμενων τάσεων κατά μήκος των αγκυρωμένων τμημάτων της ράβδου.

Η ολίσθηση της ράβδου FRP σε σχέση με το σκυρόδεμα που την περιβάλλει παρέχεται από την σχέση :

$$s = u_f - u_c \quad (2.2)$$

όπου u_f και u_c είναι οι διαμήκεις μετατοπίσεις των δύο συνδεδεμένων επιφανειών σκυροδέματος και ράβδων FRP (Σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10 - Οι διαμήκεις παραμορφώσεις u_f και u_c σε αγκυρωμένο τμήμα της ράβδου FRP

Από την σχέση (2.2) προκύπτει

$$\varepsilon_f - \varepsilon_c = \frac{ds}{dx} , \quad (2.3)$$

όπου

$$\varepsilon_f = \frac{du_f}{dx}, \quad \varepsilon_c = \frac{du_c}{dx} \quad (2.4)$$

είναι οι παραμορφώσεις που υφίστανται η ράβδος και το σκυρόδεμα, αντίστοιχα.

Αν γνωρίζουμε την κατανομή παραμόρφωσης $\varepsilon_f = \varepsilon_f(x)$ κατά μήκος τμήματος MN της ράβδου, από την σχέση (2.3) έχουμε

$$\int_M^A du_f = \int_M^A \varepsilon_f(x) dx \quad (2.5)$$

από όπου :

$$u_{f,A} - u_{f,M} = \int_M^A \varepsilon_f(x) dx \quad (2.6)$$

όπου $u_{f,A}$ και $u_{f,M}$ είναι ολισθήσεις των σημείων A και M, αντίστοιχα.

Η πραγματική κατανομή των διαμηκών παραμορφώσεων κατά μήκος της ράβδου FRP δείχνεται στο Σχήμα 2.11. Για μικρό μήκος έμπηξης l_b μπορούμε να υποθέσουμε ότι η μεταβολή των παραμορφώσεων μεταξύ των σημείων A και M είναι γραμμική.

Συνεπώς, από την σχέση (2.6) προκύπτει

$$u_{f,M} = u_{f,A} - \frac{\varepsilon_{f,A} + \varepsilon_{f,M}}{2} \cdot L_{AM} \quad (2.7)$$

όπου

$$u_{f,A} = -\varepsilon_{f,A} l_u \quad (2.8)$$

όπου οι δείκτες A και B μετά το κόμμα δηλώνουν τις θέσεις των αντίστοιχων μεγεθών στην ράβδο. Η κατανομή των τάσεων συνάφειας (διατμητικών τάσεων) κατά μήκος της διεπιφάνειας των αγκυρωμένων τμημάτων της ράβδου FRP δείχνεται στο Σχήμα 2.11γ. Το διάγραμμα ελεύθερου σώματος του τμήματος AM της ράβδου δείχνεται στο Σχήμα 2.11δ.

Από την συνθήκη ισορροπίας του τμήματος αυτού προκύπτει ότι

$$F_A = T + F_M, \quad (2.9)$$

Όπου

$$T = \int_A^M \tau_f(x) dx, \quad (2.10)$$

δηλώνει την συνισταμένη δύναμη των τάσεων συνάφειας στην επιφάνεια του τμήματος AM της ράβδου. Οι δυνάμεις F_A και F_M υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$F_A = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sigma_{f,A} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot E_f \cdot \varepsilon_{f,A} \quad (2.11)$$

$$F_M = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sigma_{f,M} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot E_f \cdot \varepsilon_{f,M} \quad (2.12)$$

Θα υποθέσουμε τώρα ότι η διατμητική τάση διανέμεται ομοιόμορφα στο τμήμα MA και ισούται με τ_{ave} . Συνεπώς

$$T = \pi \cdot D \cdot L_{AM} \tau_{ave} \quad (2.13)$$

Από τον συνδυασμό των εξισώσεων (2.9) έως (2.13) προκύπτει ότι

$$\tau_{ave} = \frac{D \cdot E_f}{4L_{AM}} \cdot (\varepsilon_{f,A} - \varepsilon_{f,M}) \quad (2.14)$$

Έτσι η σχέση (2.14) παρέχει την τάση μέσης συνάφειας (τάσης) τ_{ave} .

Η ολίσθηση που αντιστοιχεί σε αυτή την τάση θα θεωρηθεί η μέση ολίσθηση του τμήματος AM, δηλαδή

$$s_{ave} = \frac{1}{2}(s_A + s_M) \quad (2.15)$$

Από το διάγραμμα $P - \Delta l_u$, σε μια τιμή της φόρτισης P αντιστοιχεί μια τιμή Δl_u που δηλώνει την σχετική μετατόπιση των δύο τμημάτων της δοκού στην θέση της ράβδου. Συνεπώς η μετατόπιση του σκυροδέματος στην θέση A είναι γνωστή σε κάθε στάθμη φόρτισης P και είναι ίση με

$$u_{c,A} = -\frac{\Delta l_u}{2} \quad (2.16)$$

Συνεπώς η ολίσθηση στη θέση A θα είναι

$$s_A = u_{f,A} - u_{c,A} \quad (2.16)$$

Από την σχέση αυτή παίρνοντας υπόψη τις (2.8 και 2.16) έχουμε

$$s_A = \frac{1}{2} \Delta l_u - \varepsilon_{f,A} l_u \quad (2.17)$$

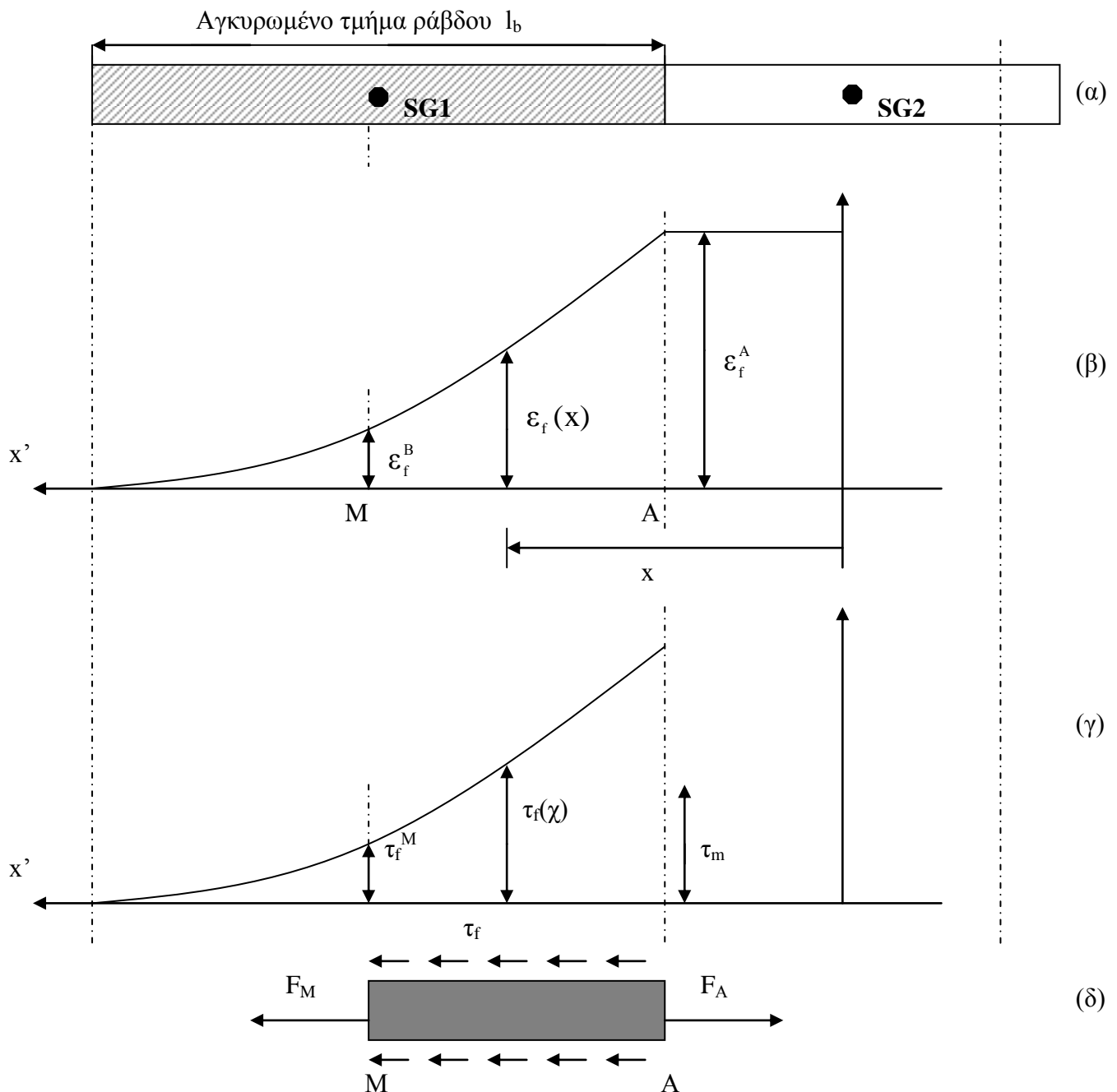
Η ολίσθηση της ράβδου στην θέση M υπολογίζεται από την σχέση

$$s_M = u_{c,M} - u_{f,M} \quad (2.18)$$

όπου η μετατόπιση $u_{f,M}$ παρέχεται από την σχέση (2.7) και

$$u_{c,M} = -\frac{\Delta l_u}{2} \quad (2.19)$$

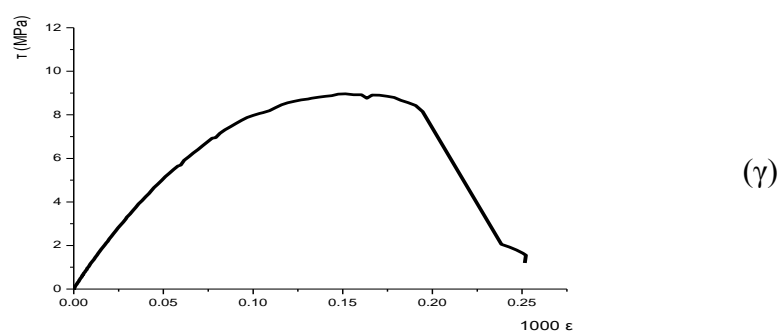
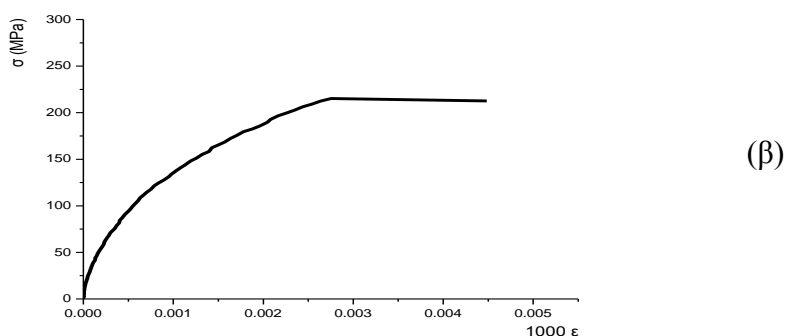
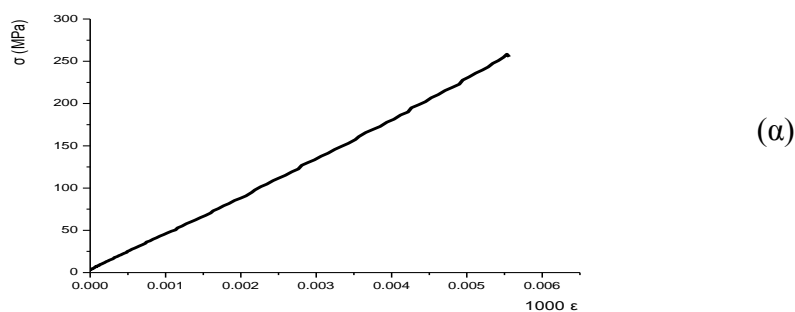
λόγω της άκαμπτης συμπεριφοράς του σκυροδέματος.



Σχήμα 2.11 - (α) Η ράβδος FRP της πειραματικής δοκού, (β) Η κατανομή των παραμορφώσεων κατά μήκος της ράβδου, (γ) Η κατανομή των διατμητικών τάσεων συνάφειας κατά μήκος του αγκυρωμένου τμήματος της ράβδου FRP, (δ) Το διάγραμμα ελεύθερου σώματος του τμήματος AM της ράβδου FRP.

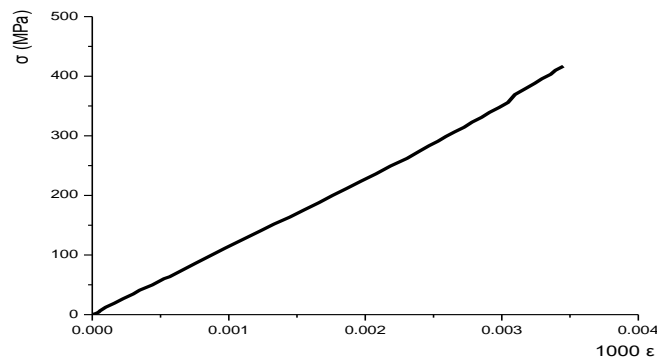
2.6 Πειραματικές καμπύλες συνάφειας-ολίσθησης για μονότονη φόρτιση (κατασκευή διαγραμμάτων από τις πειραματικές μετρήσεις)

Για το δοκίμιο με την ράβδο GFRP διαμέτρου 12.7 mm, παρουσιάζονται παρακάτω τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης της ελεύθερης ράβδου, τάσης-παραμόρφωσης της εμπηγμένης ράβδου και το διάγραμμα τάσης συνάφειας-ολίσθησης (Σχήμα 2.12). Το μέτρο ελαστικότητας της ράβδου που προκύπτει είναι ίσο με $E \cong 45 \text{ GPa}$.

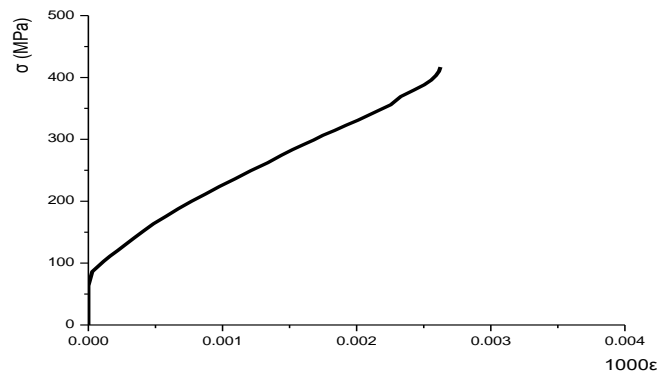


Σχήμα 2.12 - (δοκίμιο με ράβδο GFRP) - (α) διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης της ελεύθερης ράβδου (β) διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης της εμπηγμένης ράβδου, (γ) καμπύλη τάσης συνάφειας-ολίσθησης της εμπηγμένης ράβδου.

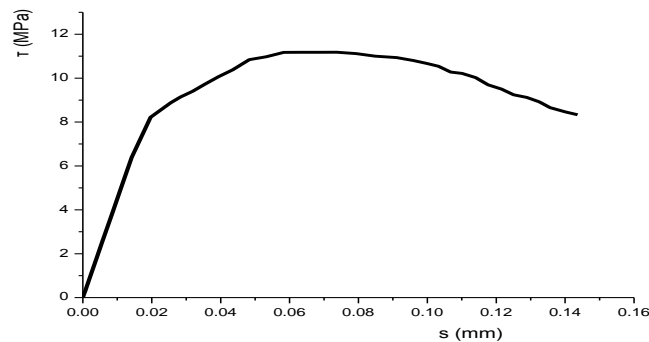
Για το δοκίμιο με την ράβδο CFRP διαμέτρου 7.8 mm, το διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης της ελεύθερης ράβδου, τάσης παραμόρφωσης της εμπηγμένης ράβδου καθώς και το διάγραμμα τάσης συνάφειας-ολίσθησης φαίνονται στο Σχήμα 2.13. Το μέτρο ελαστικότητας της ράβδου που προκύπτει είναι ίσο με $E \cong 118 \text{ GPa}$.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 2.13 - (δοκίμιο με ράβδο CFRP) - (α) διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης της ελεύθερης ράβδου, (β) διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης της εμπηγμένης ράβδου, (γ) καμπύλη τάσης συνάφειας-ολίσθησης της εμπηγμένης ράβδου.

2.7 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας:

- Έγινε μια συστηματική παρουσίαση των σημαντικότερων ερευνητικών πειραματικών αποτελεσμάτων, που έχουν δημοσιευθεί τα τελευταία περίπου τριάντα χρόνια, πάνω στην μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς της σύνδεσης του οπλισμού χάλυβα με σκυρόδεμα, σε δομικά στοιχεία. Επίσης, παρουσιάστηκαν οι πειραματικές μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό των τοπικών καμπυλών τάσεων συνάφειας σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος.
- Εκπονήθηκε ένα πειραματικό πρόγραμμα για τον προσδιορισμό της πειραματικής καμπύλης τάσεων συνάφειας-ολίσθησης, για συγκεκριμένους τύπους ράβδων FRP του εμπορίου εφαρμόζοντας την δοκιμή της δοκού, στο εργαστήριο Δομικής Μηχανικής της Σ.Α.Τ.Μ. του Ε.Μ.Π.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abrishami H.H., Mitchell D., A new approach for studying bond characteristics, Proc. Int. Conf. "Bond in Concrete: From Research to Practice", CEB-RTU (Riga Technical University), Riga (Latvia), 1992, pp. 1.28-1.37.

Adrouche K., Lorrain M., Influence des paramètres constitutifs de l' association acier-béton sur la résistance de l' adhérence aux chargements cycliques lents (Influence of the constitutive parameters for steel-concrete association on bond strength under slow cycling loading), Materials and Structures, RILEM, 1987, pp. 20, 315-320.

Andreasen B.S., Anchorage of ribbed reinforcing bars, Proc. Int. Conf. "Bond in Concrete: from Research to Practice", CEB-RTU, (Riga Technical University), Riga (Latvia), 1992, pp. 1.18-1.27.

Balazs, G., Bond behavior under repeated loads, Studi e Richerche, School for the Design of R/C Structures, Milan University of Technology, 8, Milan (Italy), 1986, pp. 395-430.

Baranek W.J., IBBC-TNO, Afd. Experimentele Mechanica, Delft, 1980.

Bazant Z.P., Li Z., Thoma M., Identification of stress-slip law for bar or fiber pull-out by size-effect test, ASCE J. Engrg. Mech. 121(5), 1995, pp. 620-625.

Bazant Z.P., Desmorat R., Size-effect in fiber or bar pull-out with interface fracture and softening slip, ASCE J. Engrg. Mech. 120(9), 1994, pp. 1945-1962.

Bazant Z.P., Sener S., Size effects in pull-out tests, ACI Materials J., 85(4), 1988, pp. 347-351.

Bigaj A.J., Bond behavior of deformed bars in NSC and HSC: experimental study, Delft University of Technology, Dept. of Civil Engineering, N. 25-5-95-II, September, 1995.

Cairns J., Design of concrete structures using fusion bonded epoxy coated reinforcement, Proc. Inst. Of Civil Engineers: Structures & Buildings 94(1), 1992, pp. 93-102.

Cairns J., Abdullah R., An evaluation of bond pull-out tests and their relevance to structural performance, The Structural Engineer 73(1), 1995, pp. 179-185.

Cairns J., Jones K. (a), The splitting forces generated by bond, Magazine of Concrete Research 47, 1995, pp. 153-165.

Carrera J.P., Ghoddoussi P., The effect of reinforcement corrosion on the strength of steel/concrete bond, Proc. Int. Conf. "Bond in Concrete: from Research to Practice", CEB-RTU (Riga Technical University), Riga (Latvia), 1992, pp. 10.11-10.24.

Ciampi V., Eligehausen R., Bertero V.V., Popov E.P., Analytical model for deformed-bar bond under generalized excitations, Trans. IABSE Colloquium on Advanced Mechanics of Reinforcement Concrete, Delft, Netherlands, 1981.

Chinn J., Ferguson P.M., Thompson J.M., Lapped splices in reinforced concrete beams, ACI Journal 52(15), 1955, pp. 201-213.

Darwin D., Graham E.K., Effect of deformation height and spacing on bond strength of reinforcing bars, ACI Structural Journal 90(6), 1993, pp. 646-657.

Den Uijl J.A., Bond and splitting action of prestressing strand, Proc. Int. Conf. "Bond in Concrete: from Research to Practice", CEB-RTU (Riga Technical University), Riga (Latvia), 1992, pp. 2.79-2.88.

Dörr K., Bond-behaviour of rib reinforcement under transversal pressure, Proceedings of IASS Symposium of Nonlinear Behaviour of Reinforced Concrete Spatial Structures, Darmstadt, 1, edited by G. Mehlhorn, H. Rühle and W. Zerna, Werner-Verlag, Düsseldorf (Germany), 1978, pp. 13-24.

Edwards A.D., Jannopoulos P.J., Local bond stress-slip relationship under repeated loading, Magazine of Concrete Research 30(103), 1978, pp. 62-72.

Eligehausen R., Lapped splices of ribbed bars with straight ends (in German), Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (301), 1979.

Eligehausen R., Popov E.P., Bertero V.V., Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations, Report No. UCB/EERC 83-23, Univ. of California, Berkeley (Ca, USA), 1983.

Eligehausen R., Ozbolt J., Mayer U., Contribution of concrete between cracks at inelastic steel strains and conclusions for the optimization of bond, ACI-International SP-180 "Bond and Development of Reinforcement: a tribute to Dr. Peter Gergely", Ed. by R. Leon, 1998, pp. 45-80.

Engström B., Ductility of tie connections in precast structures, PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg (Sweden), 1992.

Ferguson P.M., bond stress, the state of art, Report by ACI Committee 408, ACI journal 63(11), 1966, pp. 408.1-408.22.

Ferguson P.M., Turpin R.D., Thompson J.N., Minimum bar spacing as a function of bond and shear strength, ACI Journal 50(10), 1954, pp. 869-888.

Franke L., Influence of long-term loads on steel-concrete bond (in German), Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (268), 1976.

Gambarova P.G., Rosati G.P., Zasso B., steel-concrete bond after concrete splitting: (I) test results; (II) constitutive laws and interface deterioration, Materials and Structures, RILEM, 1989, pp. 22, 35-47, and 347-356.

Gambarova P.G., Rosati G.P., Schumm, C.E., an elasto-cohesive model for steel-concrete bond, Proc. Europe-US Workshop on Fracture and Damage in Quasibrittle

Structures, Ed. by Z. Bazant, Z. Bittnar, M. Jirasek and J. Mazars, Prague (Czech Republic), 1994, pp. 557-566.

Gambarova P.G., Rosati G.P., Bond and splitting in reinforcement concrete: test results on bar pull-out, *Materials and Structures*, RILEM 29, 1996, pp. 267-276.

Gambarova P.G., Rosati G.P., Bond and splitting in bar pull-out: Behavioral laws and concrete-cover role, *Magazine of Concrete Research* 49(179), 1997, pp.99-110.

Ghandehari M., Krishnaswamy S., Shah S., Technique for evaluating kinematics between rebar and concrete, *ASCE J. Struct. Engrg.*, 125(2), 1999, pp. 234-241.

Giuriani E., Experimental investigation on the bond-slip law of deformed bars in concrete, *IABSE Colloquium on Advanced Mechanics of Reinforcement Concrete*, Final Report, Delft, The Netherlands, 1981, pp. 121-142.

Giuriani E., Plizzari G.A., Schumm C., Role of stirrups and residual tensile strength of cracked concrete on bond, *ASCE, J. Struct. Engrg.* 117(1), 1991, pp. 1-18.

Giuriani E., Plizzari G.A., Local bond-slip law after splitting of concrete, *Studi e Ricerche*, School for the Design of R/C Structures, Milan University of Technology, 7, Milan (Italy), 1985, pp. 57-118. (In Italian)

Karlsson D., Bond between strands and concrete in hollow-core slabs, *Nordic Seminar: Bond and Anchorage of Reinforcement in Concrete*, Chalmers University, 1985.

Kemp E.L., Wilhelm W.J., Investigation of the parameters influencing bond cracking, *ACI Journal* 76(1), 1979, pp. 47-71.

Losberg A., Olsson P.A., Bond failure of deformed reinforcing bars based on the longitudinal splitting effect of the bars, *ACI Journal* 76(1), 1979, pp. 5-18.

Magnusson J., Bond and anchorage of deformed bars in high-strength concrete, Chalmers University of Technology, division of concrete structure, Goteborg, Publ. 97/1, 1997, pp.234.

Malvar L.J., Bond of reinforcement under controlled confinement, ACI Materials Journal 89(6), 1992, pp. 593-601.

Manfredi G., Pecce M., Behavior of bond between concrete and steel in a large post-yielding field, Materials and Structures, RILEM, 29, 1996, pp.506-513.

Martin H., Noakowski P., Bond behavior in reinforced concrete (in German), Research Report IV, München Technical University, 1981.

Mayer U., Eligehausen R., bond behavior of ribbed bars at inelastic steel strains, Proc. 2nd Int. PhD Symposium in Civil Engineering, Ed by G.L. Balázs, Technical Univ. of Budapest (Hungary), 1998, pp.39-46.

McCabe S.L., Pantazopoulou S.J., evaluation of bond performance in R/C structures, ACI-International SP-180. "Bond and development of reinforcement; a tribute to Dr. Gergely", Ed by R. Leon, 1998, pp. 1-21.

Modena C., Bond behavior with longitudinal cracks of normal and epoxy-coated deformed bars, Proc. Int. Conf. "Bond in Concrete: from Research to Practice", CEB-RTU, (Riga Technical University), Riga (Latvia), 1992, pp. 5.31-5.40.

Morgan E., The effect of rust on reinforcement, Concrete (1), 1998, pp. 25-27.

Morita S., Fujii S., Bond capacity of deformed bars due to splitting of surrounding concrete, in "Bond in Concrete", Edited by P. Bartos, Applied Science Publishers, London, 1982, pp. 331-341.

Morita S., Kaku T., Splitting bond failures of large deformed bars, ACI Journal 76(1), 1979, pp. 93-110.

Nagatomo K., Kaku T., Bond behavior of deformed bars under lateral compressive and tensile stress, Proc. Int. Conf. "Bond in Concrete: from Research to Practice", CEB-RTU, (Riga Technical University), Riga(Latvia), 1992, pp. 1.69-1.78.

Noghabai K., (a) Splitting of concrete in the anchoring zone of deformed bars: a fracture-mechanics approach to bond, PhD Thesis, Div. Struct. Engrg., Lulea University of Technology, Lulea (Sweden), 1995, pp. 131.

Noghabai K., (b) Splitting of concrete covers – A fracture mechanics approach, Proc. 2nd Int. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete Struct., Ed by F.H. Wittmann, Aedificatio Publ., Zurich(CH), 1995, pp. 1575-1584.

Orangun C.O., Jirsa J.O., Breen J.E., Re-evaluation of test data on development length and splices, ACI Journal 74(3), 1977, pp. 114-122.

Plizzari G.A., Deldossi M.A., Giuriani E. (a), Experimental study of splitting and flexural cracks in a R/C beam with overlapped splices, Material and Structures, RILEM, 29, 1996, pp. 19-27.

Plizzari G.A., Deldossi M.A., Massimo S. (b), Experimental study on anchored bars in R/C elements with transverse reinforcement, Material and Structures, RILEM, 29, 1996, pp. 534-542.

Plizzari G.A., Deldossi M.A., Massimo S., Transverse reinforcement effects on anchored deformed bars, Magazine of Concrete Research, 50(2), 1998, pp. 161-177.

Plizzari G.A., Franchi A., Bond testing according to various European National Codes (in Italian), Technical Report 5-4/96, Department of Civil Engineering, University of Brescia, 1996.

Rehm G., On the fundamentals of steel-concrete bond (in German), Deutscher Ausschuss für Stahlbeton(138), 1961, pp. 1-59.

Rehm G., Evaluation criteria for high-bond rebars (in German), Festschrift Rüschi, 1969.

Rehm G., Eligehausen R., Bond of ribbed bars under high-cycle repeated loads, *ACI Journal* 76(2), 1979, pp. 297-309.

Reinhardt H.W., Van der Veen C., Splitting failure of a strain-softening material due to bond stresses, *Applications of Fracture Mechanics to Reinforced Concrete*, Ed. By A. Carpinteri, Elsevier Applied Science, 1990, pp. 333-346.

Reuter M., Eligehausen R., On the influence that the load introduction by means of fastening devices has on the load-bearing capacity of R/C members (in German), *Bauingenieur* (67), 1992, pp. 461-474.

Robins P.J., Standish I.G., The influence of lateral pressure upon anchorage bond, *Magazine of Concrete Research* 36(129), 1984, pp.195-202.

Rosati G.P., Schumm C.E., Modeling of local bar-to-concrete bond in R/C beams, *Proc. Int. Conf. "Bond in Concrete: from research to Practice"*, CEB-RTU (Riga Technical University), Riga (Latvia), 1992, pp. 12.34-12.43.

Schneider U. (Editor), *Properties of materials at high temperature – Concrete*, RILEM Committee 44-PHT, Gesamthochschule – Kassel Universität, Kassel (Germany), 1985, pp.131.

Scott R.H., Intrinsic mechanisms in reinforced concrete beam-column connection behavior, *ACI Structural Journal* 93(3), 1996, pp. 336-346.

Shima H., Chou L.L., Okamura H. (a), Bond characteristics in post-yield range of deformed bars, *Concrete Library of JSCE*, 10, 1987, pp. 113-124.

Shima H., Chou L.L., Okamura H. (b), Micro and macro models for bond in reinforced concrete, *J. of the Faculty of Engrg., University of Tokio*, 39(2), 1987, pp. 133-194.

Skorogobatov S.M., Edwards A.D., The influence of the geometry of deformed steel bars on their bond strength in concrete, Proc. Instn Civil Engrs. Part 2 (67), 1979, pp. 327-339.

Tassios T.P., Properties of bond between concrete and steel under load cycles idealizing seismic actions, Proc. AICAP-CEB Symposium, Rome, CEB Bulletin No. 131, 1979, pp. 67-122.

Tepfers R., A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars, Chalmers University of Technology, Goteborg, Publ. 73/2, 1973, pp. 328.

Tepfers R., Cracking of concrete cover along anchored deformed bars, Magazine of Concrete Research 31(106), 1979, pp. 3-12.

Tepfers R., Lapped tensile reinforcement splices, ASCE, J. Struct. Div. 108 (1), 1982, pp. 283-301.

Tepfers R., Olsson P.A., Ring test for evaluation of bond properties of reinforcing bars, Proc. Int. Conf. "Bond in Concrete: From Research to Practice", CEB-RTU (Riga Technical University), Riga (Latvia), 1992, pp. 1.89-1.99.

Tholen M.L., Darwin D., Effect of reinforcing bar deformation pattern of Flexural ductility, ACI Structural J. 95(1), 1998, pp. 37-42.

Van der Veen C., Cryogenic bond behavior and tension stiffening, Proc. Int. Conf. "Bond in Concrete: From Research to Practice", CEB-RTU (Riga Technical University), Riga (Latvia), 1992, pp. 1.1-1.8.

Vos E., Reinhardt H.W., Influence of loading rate on bond behavior of reinforcing steel and prestressing strands, Material and Structures, RILEM 15(85), 1982, pp. 3-10.

