Πειραματική Μελέτη Διεπιφανειών Σκυροδέματος σε Διάτμηση

Ο. ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΟΥ
Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ.

Β. Ν. ΚΟΤΣΟΓΛΟΥ
Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ.

Γ.Ε. ΘΕΡΜΟΥ
MSc, DIC, Πολ. Μηχανικός Δ.Π.Θ.

Α. ΣΑΒΒΑ
Επίκουρος Καθηγήτρια Δ.Π.Θ.

Σ. Ι. ΠΑΝΤΑΖΟΠΟΥΛΟΥ
Καθηγήτρια Δ.Π.Θ.

Περίληψη
Στην εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πειραματικής παραμετρικής διερεύνησης των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων κατά μήκος διεπιφανειών σκυροδέματος. Διεπιφάνειες δημιουργούνται στην επαφή τμημάτων στοιχείων που έχουν προκύψει από διαφορετικές σκυροδετήσεις (π.χ. σε μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα ή σε προκατασκευασμένα στοιχεία), όπως για παράδειγμα σε σεισμικές ενισχύσεις / επισκευές. Το πειραματικό πρόγραμμα περιελάμβανε 24 δοκίμια διπλής διεπιφάνειας με παραμέτρους μελέτης τη διάμετρο και το εμβαδόν των ράβδων οπλισμού κάθετα στη διεπιφάνεια, καθώς επίσης και την τραχύτητα των διεπιφανειών. Από τις πειραματικές παρατηρήσεις συνάγεται ότι η αύξηση της διαμέτρου των οπλισμών μειώνει αισθητά τη διαθέσιμη πλαστιμότητα της ένωσης, η δε αντοχή που μπορεί να αναπτυχθεί είναι συνάρτηση του διαθέσιμου μήκους αγκύρωσης των οπλισμών εκατέρωθεν της ένωσης. Για ερμηνεία της μηχανικής συμπεριφοράς διεπιφανειών σκυροδέματος σε διάτμηση, τα πειραματικά δεδομένα συσχετίσθηκαν με τα αναλυτικά μοντέλα της βιβλιογραφίας, με ιδιαίτερη έμφαση στις επιμέρους συνιστώσες που συνθέτουν τη συνολική διαθέσιμη διατμητική αντοχή. Μέσω των πειραμάτων επιβεβαιώνονται και οι τιμές που έχουν υιοθετηθεί από τον Ευρωκώδικα 8 [6] και τον Ο.Α.Σ.Π. [22] στις συστάσεις για αντισεισμικές ενισχύσεις / επισκευές κτιρίων από σκυρόδεμα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο μηχανισμός μεταφοράς δυνάμεων μέσω διάτμησης κατά μήκος ρωγμών και διεπιφανειών σκυροδέματος είναι ίσως ο πλέον δυσνόητος από τους βασικούς μηχανισμούς συμπεριφοράς του οπλισμένου σκυροδέματος. Ο κυριότερος λόγος είναι ότι το μηχανικό αυτό πρόβλημα εξαρτάται από μεγέθη, που δεν ποσοτικοποιούνται εύκολα, όπως για παράδειγμα η τραχύτητα των επιφανειών, που έρχονται σε επαφή, ο βαθμός χημικής πρόσφυσης που τυχόν υφίσταται, η σχέση ανοίγματος και ολίσθησης κατά μήκος της ρωγμής ή διεπιφάνειας, καθώς και οι πραγματικές συνθήκες συνάφειας των οπλισμών (βλήτρων), που διατρέχουν τη διεπιφάνεια. Η δυσκολία ποσοτικής περιγραφής της διατμητικής αντοχής διεπιφανειών και ρωγμών οφείλεται επίσης στην ποικιλομορφία των πειραματικών διατάξεων που έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί, αλλά και στον περιορισμένο αριθμό μετρήσεων που ανακοινώνονται στη σχετική βιβλιογραφία, γεγονός που καθιστά ενίοτε δύσκολη την εκ των υστέρων εκτίμηση της πραγματικής συμβολής των επιμέρους μηχανισμών συμπεριφοράς στην αντοχή της διεπιφάνειας (όπως συνοχή, δράση βλήτρου, αλληλεμπλοκή αδρανών).

Διεπιφάνειες δημιουργούνται στα σημεία επαφής τμημάτων στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, που έχουν κατασκευασθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (με διαφορετικές σκυροδετήσεις). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο αρμός σκυροδετήσης στην κεφαλή υποστυλωμάτων πλαισίων στη στάθμη της κάτω παρειάς των δοκών. Όμως λόγω βαρύτητας οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται σε αυτές τις διατομές είναι αρκετά σημαντικές ενώ το μήκος αγκύρωσης των διαμήκων οπλισμών του υποστυλώματος υπερεπαρκεί, ώστε να μην θεωρείται ασυνέχεια της διαθέσιμης διατμητικής αντοχής του στύλου σε αυτή τη θέση. Η ικανότητα της διεπιφάνειας για μεταφορά δυνάμεων αποκτά ιδιαίτερη σημασία στον τομέα των επισκευών και ενισχύσεων υφιστάμενων στοιχείων σκυροδέματος αλλά και στην προκατασκευή. Για παράδειγμα, με την προσθήκη μανδυών οπλισμένου σκυροδέματος σε υφιστάμενα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα η διεπιφάνεια εκτείνεται σε όλο το μήκος της παράπλευρης επιφάνειας του παλαιού στοιχείου, το οποίο πλέον καθίσταται πυρήνας του ενισχυμένου σύνθετου στοιχείου. Η ισοδύναμη μονολιθική διατομή με ίδια γεωμετρία με αυτήν της σύνθετης αποτελεί ένα ιδεατό βέλτιστο άνω όριο για τη συμπεριφορά του ενισχυμένου στοιχείου. Ο βαθμός μονολιθικότητας της σύνθετης διατομής εξαρτάται από την ικανότητα της διεπιφάνειας για την μεταφορά δυνάμεων μέσω διάτμησης κατά μήκος της ένωσης. Αντίστοιχος είναι και ο ρόλος των διεπιφανειών στην προκατασκευή. Σε κάθε περίπτωση, για βελτίωση της πρόσφυσης που μπορεί να αναπτυχθεί στη διεπιφάνεια, συνήθως γίνεται εκτράχυνση (π.χ. με αμμοβολή) της επιφάνειας του υφιστάμενου στοιχείου και χρησιμοποιούνται βλήτρα (οπλισμοί κάθετα στην ένωση).

Υποβλήθηκε: 29.8.2005 Έγινε δεκτή: 9.12.2005

Από άποψη μηχανικής συμπεριφοράς, οι διεπιφάνειες στο οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ισοδύναμες με υφιστάμενες ρωγμές μηδενικού αρχικού εύρους. Εφόσον δημιουργούνται με την τοποθέτηση νωπού σκυροδέματος σε σκληρυμένο σκυρόδεμα στις διεπιφάνειες αναπτύσσεται επιπλέον χημική πρόσφυση. Εάν θεωρηθεί ότι οι μοριακοί δεσμοί της γέλης αναπτύσσονται μονόπλευρα στη διεπιφάνεια, σε σύγκριση με τους αντίστοιχους δεσμούς που αναπτύσσονται στη μάζα του σκυροδέματος, είναι επόμενο η αρχική συνοχή στη διεπιφάνεια να είναι χαμηλότερη από τη χαρακτηριστική συνοχή του σκυροδέματος. Όπως και στην περίπτωση της ρωγμής, μετά την υπέρβαση της αρχικής πρόσφυσης οι βασικοί μηχανισμοί αντίστασης ενεργοποιούνται κατόπιν ολίσθησης κατά μήκος της ένωσης.

Κύριοι μηχανισμοί αντίστασης έναντι ολίσθησης κατά μήκος της ένωσης είναι, (1) η αλληλεμπλοκή των προεξοχών των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή – κατ' αντιστοιχία με την αλληλεμπλοκή των αδρανών κατά μήκος των συνήθων ρωγμών, (2) η τριβή που αναπτύσσεται παρουσία εγκάρσιας θλιπτικής πίεσης κατά μήκος της διεπιφάνειας, και (3) η δράση βλήτρου του οπλισμού που διατρέχει τη διεπιφάνεια. Ο οπλισμός ειδικά υποβοηθά την τριβή μέσω της δράσης σφιγκτήρα που αναπτύσσει έναντι σχετικής ολίσθησης.

Για την ποσοτική διερεύνηση των μηχανισμών αντίστασης διεπιφανειών διεξήχθη πειραματικό πρόγραμμα στο Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης [21] που περιελάμβανε 24 δοκίμια διεπιφανειών σκυροδέματος με ποικίλα χαρακτηριστικά. Παράμετροι της μελέτης ήταν ο βαθμός τραχύτητας της διεπιφάνειας, το ανηγμένο εμβαδόν οπλισμού κάθετα στη διεπιφάνεια καθώς και η διάμετρος των ράβδων. Για την ερμηνεία της μηχανικής συμπεριφοράς των διεπιφανειών τα πειραματικά αποτελέσματα συσχετίσθηκαν με τα κυριότερα αναλυτικά προσομοιώματα της διεθνούς βιβλιογραφίας. Σημειώνεται ότι η πλειοψηφία των διαθέσιμων αναλυτικών εκφράσεων συμπεριλαμβανομένων και αυτών που εμπεριέχονται σε Διεθνείς Κανονισμούς και Πρότυπα είναι εμπειρικές και ενίοτε στηρίζονται σε υπερ-απλουστεύσεις όσον αφορά στη συμμετοχή των επιμέρους μηχανισμών αντοχής.

2. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

$\tau_{fu,d}$: μέγιστη σχεδιαστική διατμητική τάση,
τ : διατμητική τάση,
V_n : τέμνουσα δύναμη,
V_R : τέμνουσα δύναμη
A_c : εμβαδόν διεπιφάνειας,
σ_{cd} : θλιπτική τάση σχεδιασμού σκυροδέματος,
f_{ctk} : χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος,
μ : συντελεστής τριβής,
A_{vf} : εμβαδόν οπλισμού που διαπερνά τη διεπιφάνεια,
ρ_v : ογκομετρικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού που διατρέχει τη διεπιφάνεια,
k : σταθερά,
f_c : θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος,
f'_c : το 85% της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος,
f_{yd} : σχεδιαστική τάση διαρροής του οπλισμού,
f_y : τάση διαρροής του οπλισμού,
f_{yl} : τάση διαρροής του κύριου εφελκυόμενου οπλισμού,
f_{cd} : σχεδιαστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος,
K_1 : σταθερά,
F : δρώσα θλιπτική δύναμη,
c : συνοχή του σκυροδέματος,
β_D : διορθωτικός συντελεστής,
F_D : μέγιστη αντίσταση λόγω της δράσης βλήτρου,
β_F : διορθωτικός συντελεστής,
F_u : μέγιστη αντίσταση λόγω τριβής (kN),
ε_{c1} : κύρια εφελκυστική παραμόρφωση του σκυροδέματος,
F_{du} : μέγιστη δύναμη λόγω δράσης βλήτρου,
K_I : αρχική δυσκαμψία λόγω της δράσης βλήτρου,
Δ : εύρος ρωγμής,
k_b : αριθμός ράβδων,
d_b : διάμετρος ράβδων,
A : λόγος επιβαλλόμενης αξονικής δύναμης προς δύναμη διαρροής της ράβδου,
E_s : μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος,
β : σταθερά.

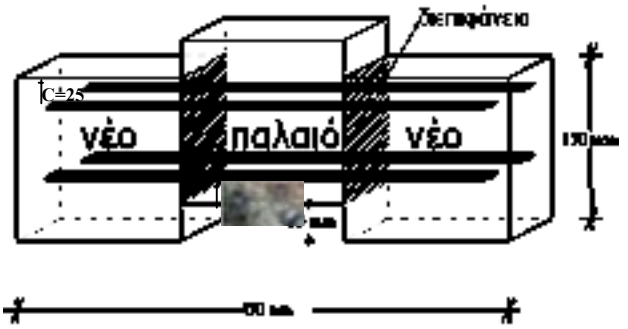
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Τα δοκίμια, που εξετάσθηκαν, αποτελούν εξιδανίκευση διεπιφανειών που δημιουργούνται σε επαφές παλαιού με νέο σκυρόδεμα. Σημειώνεται ότι η εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται σε αντίστοιχες διεπιφάνειες πραγματικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος (π.χ. σε διεπιφάνειες μανδυών), ενδέχεται να είναι πολύ περισσότερο σύνθετη από αυτήν που προσομοιώνεται στην παρούσα πειραματική έρευνα. Οι παράμετροι της πειραματικής διερεύνησης ήταν:

1) Η διάμετρος των ράβδων οπλισμού που διατρέχουν τη διεπιφάνεια.
2) Η τραχύτητα της διεπιφάνειας.
3) Το ποσοστό οπλισμού που διατρέχει τη διεπιφάνεια.

Συνολικά κατασκευάστηκαν 24 δοκίμια δηλαδή 8 ομάδες από 3 πανομοιότυπα δοκίμια. Κάθε δοκίμιο αποτελούνταν από τρεις κύβους διαστάσεων 150x150x150 mm. Αρχικά σκυροδετήθηκε ο μεσαίος κύβος με χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος 25 MPa και αντοχή κυλίνδρου κατά την περίοδο των δοκιμών ίση με 28.4 MPa. Οι δύο ακραίοι κύβοι σκυροδετήθηκαν ένα μήνα αργότερα με χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος 30MPa και αντοχή κυλίνδρου κατά την περίοδο των δοκιμών 36.1 MPa. Για να εξασφαλισθεί η ύπαρξη ολίσθησης και για να είναι εφικτή η μέτρησή της, ο μεσαίος κύβος ήταν υπερυψωμένος κατά 35mm σε σχέση με τους δύο ακραίους και οι διεπιφάνειες που δημιουργήθηκαν μεταξύ των κύβων είχαν ύψος 115 mm και εμβαδόν 17250 mm^2 η κάθε μια (σχήμα 1). Οι διεπιφάνειες διαπερνώνταν από διαμήκεις οπλισμούς σε

όσα δοκίμια προβλέπονταν, με καθαρή επικάλυψη μετρούμενη από την εφελκυόμενη πλευρά της κάθε ράβδου, 25 mm. Η τάση διαρροής του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε ήταν 500 MPa.



Σχήμα 1: Τυπικό δοκίμιο.
Figure : Typical specimen.

Τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων δίνονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 1. Τα δοκίμια χωρίσθηκαν σε τρεις ομάδες ανάλογα με τη διάμετρο του οπλισμού που έφεραν (Φ8, Φ10, Φ12) ενώ ξεχωριστή ομάδα αποτέλεσαν τα άοπλα δοκίμια. Σε κάθε ομάδα διακρίθηκαν δυο κατηγορίες με βάση τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα δοκίμια των οποίων η διεπιφάνεια δεν είχε υποστεί καμία επεξεργασία εκτράχυνσης (φυσική διεπιφάνεια, SN). Στη δεύτερη ομάδα ανήκουν τα δοκίμια των οποίων η διεπιφάνεια είχε υποστεί επεξεργασία, χρησιμοποιώντας σφυρί και καλέμι (τραχιά διεπιφάνεια, SR). Κάθε ομάδα περιελάμβανε 6 δοκίμια από τα οποία τα 3 είχαν φυσική διεπιφάνεια, ενώ τα υπόλοιπα 3 είχαν τραχιά διεπιφάνεια.

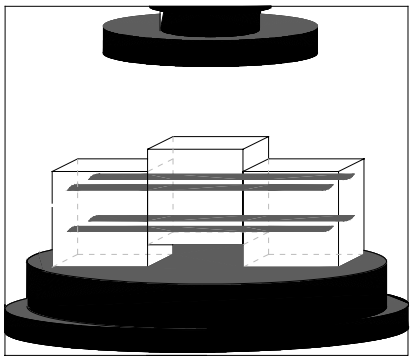
3.1. Κατασκευή δοκιμίων

Η κατασκευή των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε σε τρεις φάσεις. Η πρώτη φάση περιελάμβανε τη σκυροδέτηση του μεσαίου κύβου σε μήτρες μίας χρήσης διαστάσεων 150x150x150 mm, αφού τοποθετήθηκε ο οπλισμός σε όσα δοκίμια προβλέπονταν. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1, τοποθετήθηκαν ράβδοι οπλισμού στην άνω παρειά των εξωτερικών κύβων και στην κάτω παρειά του κεντρικού τμήματος του δοκιμίου. Άρα, για κάθε ράβδο που κάμπτεται σε σχήμα S μέσω της φόρτισης στη διεπιφάνεια, η επικάλυψη στην εφελκυόμενη παρειά της ράβδου είναι σημαντικά μικρότερη από την επικάλυψη στη θλιβόμενη παρειά, και άρα είναι η κρίσιμη επιφάνεια για την αστοχία του δοκιμίου. Σημειώνεται ότι ο μεσαίος κύβος αντιπροσωπεύει το παλαιό, ήδη υπάρχον σκυρόδεμα. Στη συνέχεια, έλαβε χώρα η επεξεργασία της διεπιφάνειας 12 δοκιμίων, τριών από κάθε ομάδα, μέχρι να φανούν τα αδρανή, με σκοπό να δημιουργηθεί τραχιά διεπιφάνεια (εικόνα 1). Το μέσο βάθος της εκτράχυνσης κυμαίνεται από 6 έως 8 mm. Η επαναληψιμότητα της διαδικασίας εκτράχυνσης εξασφαλίστηκε οπτικά με την λήψη ψηφιακής εικόνας της εκτραχυμένης επιφάνειας. Η επιφάνεια καθαρίστηκε και ακολούθησε η σκυροδέτηση των δύο ακραίων κύβων, που αντιπροσωπεύουν το νέο σκυρόδεμα, που θα συνδεθεί με το ήδη υπάρχον (παλαιό σκυρόδεμα). Πριν τη σκυροδέτηση κατασκευάσθηκε ξυλότυπος και επικολλήθηκαν τετραγωνικές πλάκες από φελιζόλ διαστάσεων 150x150 mm και πάχους 35 mm στο μέσον της βάσης του ξυλοτύπου στις θέσεις όπου θα τοποθετούνταν οι μεσαίοι κύβοι.

Εικόνα 1: Επεξεργασμένη (τραχιά) επιφάνεια
Picture 1: Chipped (rough) surface.

3.2. Λήψη πειραματικών δεδομένων

Η διάταξη (σχήμα 1) προσαρμόστηκε σε πρέσα που είχε ικανότητα επιβολής μέγιστου φορτίου 3000 kN (εικόνα 2). Κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε σε μονοτονικά αυξανόμενη φόρτιση (σύνθλιψη) με έλεγχο της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης. Για τον προσδιορισμό των μετακινήσεων χρησιμοποιήθηκε βελόμετρο LVDT που έφερε μαγνήτη και προσαρμόστηκε σε ένα από τα άκαμπτα πλευρικά τοιχώματα της πρέσας. Επίσης, εκατέρωθεν των διεπιφανειών ολίσθησης, τοποθετήθηκε κάνναβος κυκλικών στόχων 10 mm για την παρακολούθηση των σχετικών μετακινήσεων μέσω επεξεργασίας ψηφιακής εικόνας της επιφάνειας των δοκιμίων. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η εκτίμηση των παραμορφώσεων εντός επιπέδου του δοκιμίου λόγω διάνοιξης ρωγμών στις διεπιφάνειες (εύρος ρωγμών). Σε προχωρημένα στάδια φόρτισης οι εξωτερικοί κύβοι τείνουν να ολισθήσουν στην εγκάρσια κατεύθυνση, όμως η κίνηση αυτή παρεμποδίζεται μέσω τριβής της κάτω έδρας των εξωτερικών κύβων με τις πλάκες της μηχανής θλίψης.



Εικόνα 2: Πειραματική διάταξη – Πρέσα.
Picture 2: Experimental setup-Press.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. Τρόπος αστοχίας δοκιμίων

Άοπλα δοκίμια: Κατά την επιβολή του φορτίου άρχισε η ολίσθηση και εμφανίστηκαν οι πρώτες διαγώνιες ρωγμές από τις βάσεις των κύβων, με κλίση από 30º έως 45º. Στα δοκίμια των οποίων οι διεπιφάνειες είχαν υποστεί επεξεργασία εκτράχυνσης, οι ρωγμές σημειώθηκαν σε μέγεθος επιβαλλόμενου φορτίου 165.7 kN, ίσο με το 70% του μέγιστου φορτίου που μπορούσε να παραλάβει η διεπιφάνεια. Αντίστοιχα, στα δοκίμια χωρίς επεξεργασία διεπιφάνειας, οι πρώτες διαγώνιες ρωγμές εμφανίστηκαν σε μέγεθος επιβαλλόμενου φορτίου 182.7 kN, ίσο με το 88% του μέγιστου φορτίου λαμβάνοντας υπόψη μέσες τιμές. Παρατηρήθηκε απώλεια της επικάλυψης στο κάτω τμήμα των εξωτερικών κύβων όπως και στις δύο, παράλληλες με τον οπλισμό, όψεις του δοκιμίου. Η απώλεια αυτή έγινε εντονότερη με την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου. Τα άοπλα δοκίμια με φυσική διεπιφάνεια αστόχησαν κατά την αφαίρεση των ξυλοτύπων και εξετάστηκαν μόνο εκείνα των οποίων η διεπιφάνεια είχε υποστεί επεξεργασία. Στα άοπλα δοκίμια μελετάται μόνο η αλληλεμπλοκή των αδρανών καθώς είναι ο μόνος μηχανισμός μεταφοράς δυνάμεων μέσω της διεπιφάνειας.

Οπλισμένα δοκίμια: Στα δοκίμια με οπλισμό 4Φ8 ο οπλισμός έφτασε στη διαρροή όπου και προκλήθηκαν εντονότερες αποσχιστικές ρωγμές λόγω της συνεισφοράς της δράσης βλήτρου. Στα δοκίμια με οπλισμό 4Φ10 η δράση βλήτρου ήταν ασθενέστερη ενώ σε αυτά με οπλισμό 4Φ12 παρατηρήθηκε εξόλκευση των ράβδων του οπλισμού και θραύση του σκυροδέματος (ψαθυρή αστοχία). Στο τέλος της φόρτισης, η πλήρης απώλεια της επικάλυψης επήλθε στο σύνολο των δοκιμίων. Η δράση βλήτρου έγινε ορατή στα δοκίμια που έφεραν ράβδους μικρής διαμέτρου (Φ8) και περιορίστηκε με την αύξηση της διαμέτρου. Στα δοκίμια με οπλισμό 4Φ12, οι ράβδοι του οπλισμού είτε διατήρησαν τις αρχικές τους θέσεις είτε εμφάνισαν ελαφρές παραμορφώσεις μετά την εξόλκευσή τους. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές της διατμητικής τάσης που ελήφθησαν από το πείραμα. Στη συνέχεια, συζητείται η επίδραση κάθε παραμέτρου στην αντοχή των διεπιφανειών, όπως προκύπτει από τα πειραματικά δεδομένα.

4.2. Επίδραση της διαμέτρου του οπλισμού

Η αύξηση της διαμέτρου των οπλισμών είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέγιστης διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας (σχήματα 3-8). Η διατμητική δυσκαμψία δεν αυξήθηκε αναλογικά με την αύξηση του οπλισμού, γεγονός που ίσως οφείλεται στη μη επαρκή αγκύρωση των μεγαλύτερων, σε διάμετρο, ράβδων του οπλισμού. Στο στάδιο της διαρροής, η τιμή της σχετικής ολίσθησης ήταν αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου. Το εύρος των ρωγμών δεν παρουσίασε μεγάλες διακυμάνσεις σε σχέση με τη διάμετρο ενώ στα δοκίμια που έφεραν μεγαλύτερο ποσοστό οπλισμού παρατηρήθηκε αποχωρισμός των κύβων και διάνοιξη στο σημείο ασυνέχειας. Στο περιορισμένο, διαθέσιμο μήκος του δοκιμίου, οι οπλισμοί μικρότερης διαμέτρου ανέλαβαν την επιβαλλόμενη διάτμηση διατηρώντας πρακτικά αμείωτη την αντοχή σε μεγάλες τιμές σχετικής ολίσθησης. Τα δοκίμια με οπλισμό 4Φ8 παρουσίασαν εξαιρετικά πλάστιμη συμπεριφορά σε αντίθεση με τα δοκίμια με οπλισμό 4Φ12 που εμφάνισαν ψαθυρής μορφής αστοχία. Η συμπεριφορά των δοκιμίων με οπλισμό 4Φ10 εντοπίζεται μεταξύ των δύο αυτών ακραίων συμπεριφορών. Από τις παρατηρήσεις εξάγεται πως με την αύξηση της διαμέτρου των οπλισμών που διατρέχουν τη διεπιφάνεια των δύο σκυροδεμάτων, μειώνεται η διαθέσιμη πλαστιμότητα.

Εικόνα 3: Ολίσθηση, διαγώνιες αποσχιστικές ρωγμές.
Picture 3: Sliding, diagonal cracks.

Εικόνα 4: Τελική αστοχία δοκιμίου SN8-1.
Picture 4: Final failure SN8-1 Specimen.

Εικόνα 5: Τελική αστοχία δοκιμίου SN10-3.
Picture 5: Final failure SN10-3 specimen.

Εικόνα 6: Τελική αστοχία δοκιμίου SR12-3.
Picture 6: Final failure SR12-3 specimen.

4.3. Αλληλεμπλοκή των αδρανών

Η συμβολή της αλληλεμπλοκής των αδρανών ήταν πιο εμφανής στα άοπλα δοκίμια που είχαν υποστεί επεξεργασία εκτράχυνσης στη διεπιφάνεια. Είναι χαρακτηριστικό πως με την έναρξη της φόρτισης δε σχηματίστηκαν διαγώνιες ρωγμές και η αστοχία ήταν ψαθυρής μορφής, δηλαδή οι κύβοι αποχωρίστηκαν για πολύ μικρή τιμή επιβαλλόμενου φορτίου (72 kN, 92 kN) και ολίσθησης (0.71 mm, 0.64 mm) ενώ επίσης μικρές ήταν και οι τιμές της διατμητικής τάσης: 2.09 και 2.67 MPa αντίστοιχα. Εξαίρεση αποτέλεσε το δοκίμιο SR-1, το οποίο εμφάνισε πολύ μεγάλη διατμητική αντοχή (6.4 MPa) σε σχέση με τα υπόλοιπα της ίδιας ομάδας για τιμή ολίσθησης 1.77 mm (σχήμα 2). Στα δοκίμια που έφεραν οπλισμό η αλληλεμπλοκή των αδρανών είχε βασικό ρόλο κατά την έναρξη της φόρτισης και το σχηματισμό των πρώτων ρωγμών. Με αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου αυξήθηκε αισθητά και το εύρος των ρωγμών (εικόνα7).

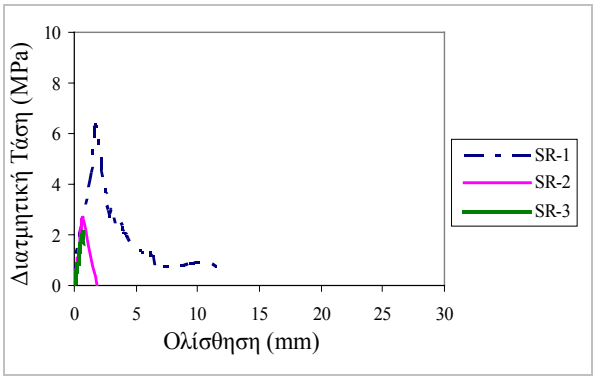
4.4. Επίδραση της διεπιφανειακής τραχύτητας

Όπως φαίνεται στα συγκριτικά διαγράμματα, τα δοκίμια με οπλισμό 4Φ8 που δεν είχαν υποστεί επεξεργασία ήταν πιο πλάστιμα σε σχέση με αυτά που είχαν υποστεί εκτράχυνση. Είναι πιθανό η διαφορά αυτή να οφείλεται στην στιγμιαία έκλυση μεγαλύτερης ενέργειας παραμόρφωσης που είχε συσσωρευτεί στα δοκίμια με εκτράχυνση, επειδή αυτά ανέπτυξαν και μεγαλύτερη διατμητική αντοχή. Στα δοκίμια με οπλισμό 4Φ10 και 4Φ12 η επεξεργασία της διεπιφάνειας δεν είχε σημαντική επίδραση στην πλαστιμότητα. Αυξήθηκε σημαντικά η μέγιστη διατμητική αντοχή, η οποία παρατηρήθηκε για ίδια περίπου τιμή ολίσθησης.

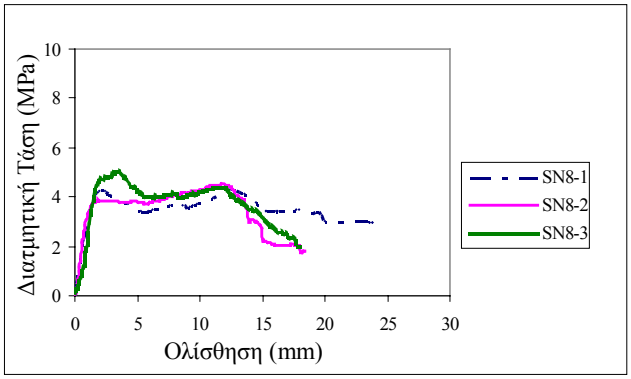
Τα διαγράμματα που απεικονίζουν την αστοχία των δοκιμίων με τραχιά διεπιφάνεια είναι μετατοπισμένα κατά βέλος u, σε σχέση με τα διαγράμματα των ανεπεξέργαστων δοκιμίων, ίσο με την αύξηση που προκαλείται στη μέγιστη διατμητική τάση εξαιτίας της επεξεργασίας της διεπιφάνειας.

Το βέλος αυτό είναι αρκετά μεγάλο στα δοκίμια με οπλισμό 4Φ8 (2.82MPa) και 4Φ12 (2.59MPa) ενώ είναι πολύ μικρότερο για τα δοκίμια με οπλισμό 4Φ10 (0.56MPa) όπως φαίνεται στα σχετικά διαγράμματα (σχήμα 9). Χαρακτηριστικό είναι πως στα άοπλα δοκίμια η επεξεργασία της διεπιφάνειας ήταν αυτή που έδωσε ένα βαθμό συνοχής στα δύο σκυροδέματα ικανό να τα εξασφαλίσει, ώστε να μην αστοχήσουν κατά την αφαίρεση των ξυλοτύπων και να εμφανίσουν μια υποτυπώδη αντοχή σε διάτμηση πράγμα που δεν επετεύχθη στα άοπλα δοκίμια με φυσική επιφάνεια.

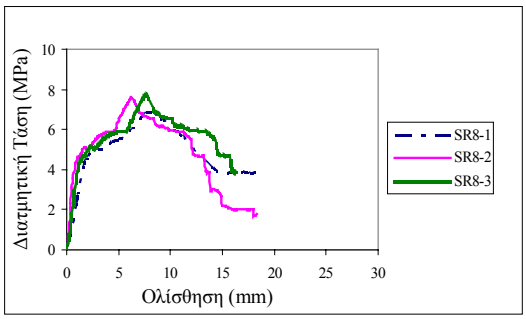
Εικόνα 7: Αστοχία δοκιμίων με επεξεργασία στη διεπιφάνεια.
Picture 7: Failure mode of specimens with chipped (rough) surface.



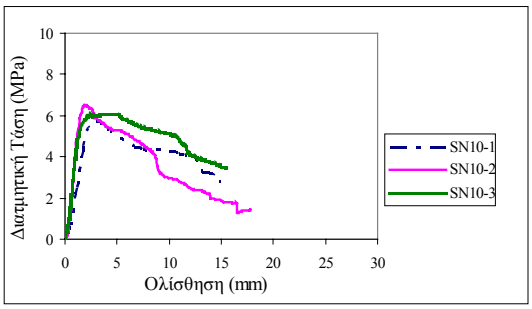
Σχήμα 2: Διατμητική τάση- Ολίσθηση άοπλων δοκιμίων.
Figure 2: Shear stress- Sliding of un- reinforced specimens.



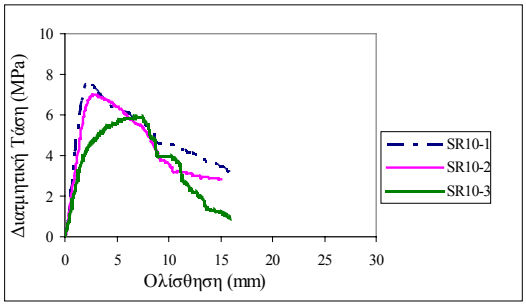
Σχήμα 3: Διατμητική τάση-Ολίσθηση (SN8).
Figure 3: Shear stress- Sliding (SN8).



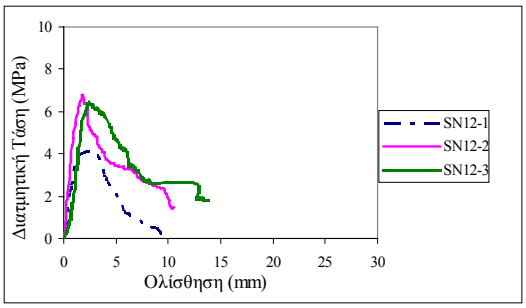
Σχήμα 4: Διατμητική τάση-Ολίσθηση (SR8).
Figure 4: Shear stress-Sliding (SR8).



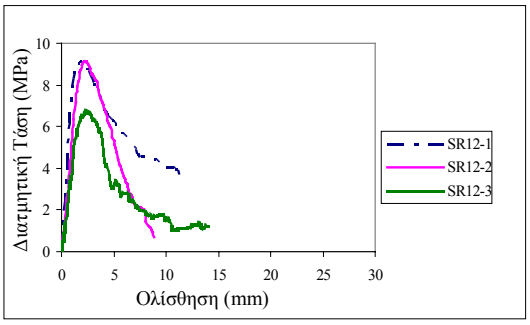
Σχήμα 5: Διατμητική τάση-Ολίσθηση (SN10).
Figure 5: Shear stress- Sliding (SN10).



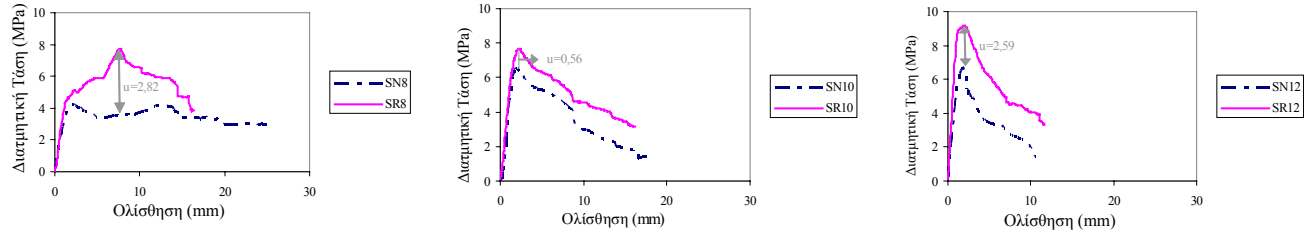
Σχήμα 6: Διατμητική τάση-Ολίσθηση (SR10).
Figure 6: Shear stress- Sliding (SR10).



Σχήμα 7: Διατμητική τάση-Ολίσθηση (SN12).
Figure 7: Shear stress- Sliding (SN12).



Σχήμα 8: Διατμητική τάση-Ολίσθηση (SR12).
Figure 8: Shear stress- Sliding (SR12).



Σχήμα 9: Επίδραση της επεξεργασίας της διεπιφάνειας στα δοκίμια με οπλισμό 4Φ8, 4Φ10, 4Φ12.
Figure 9: Effect of surface preparation in specimens having 4Φ8, 4Φ10, 4Φ12 dowels.

Πίνακας 1: Συγκεντρωτικός πίνακας πειραματικού προγράμματος.
Table 1: Summary of experimental program.

	Δοκίμιο	Επεξεργασία διεπιφάνειας	Οπλισμός	Ποσοστό Οπλισμού ανά διεπιφάνεια(%)	Διατμητική τάση διαρροής (MPa)
1η ομάδα	**SN8-1**	καμία	4Ø8	1.17%	4.26
	SN8-2	καμία	4Ø8	1.17%	4.50
	SN8-3	καμία	4Ø8	1.17%	4.90
	SR8-1	εκτράχυνση	4Ø8	1.17%	4.70
	SR8-2	εκτράχυνση	4Ø8	1.17%	5.00
	SR8-3	εκτράχυνση	4Ø8	1.17%	4.90
2η ομάδα	**SN10-1**	καμία	4Ø10	1.82%	5.68
	SN10-2	καμία	4Ø10	1.82%	6.52
	SN10-3	καμία	4Ø10	1.82%	7.68
	SR10-1	εκτράχυνση	4Ø10	1.82%	7.68
	SR10-2	εκτράχυνση	4Ø10	1.82%	7.00
	SR10-3	εκτράχυνση	4Ø10	1.82%	5.88
3η ομάδα	**SN12-1**	καμία	4Ø12	2.62%	4.14
	SN12-2	καμία	4Ø12	2.62%	6.75
	SN12-3	καμία	4Ø12	2.62%	6.40
	SR12-1	εκτράχυνση	4Ø12	2.62%	9.20
	SR12-2	εκτράχυνση	4Ø12	2.62%	9.16
	SR12-3	εκτράχυνση	4Ø12	2.62%	6.70
4η ομάδα	**SN-1**	καμία	άοπλο	-	-
	SN-2	καμία	άοπλο	-	-
	SN-3	καμία	άοπλο	-	-
	SR-1	εκτράχυνση	άοπλο	-	6.40*
	SR-2	εκτράχυνση	άοπλο	-	2.09*
	SR-3	εκτράχυνση	άοπλο	-	2.67*

** Διατμητική τάση θραύσης*

5. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Η έρευνα που έχει γίνει μέχρι σήμερα και αφορά στη μεταφορά δυνάμεων στις διεπιφάνειες οπλισμένου σκυροδέματος είναι εξαιρετικά περιορισμένη. Αναλυτικά μοντέλα και σχέσεις έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές, οι περισσότερες από τις οποίες είτε είναι εμπειρικές, είτε στηρίζονται σε απλουστεύσεις όσον αφορά στη λειτουργία του οπλισμένου σκυροδέματος, όπως για παράδειγμα οι σχέσεις που αναπτύσσονται με βάση το κριτήριο των Mohr-Coulomb [5].

Στον πίνακα 3, τα μοντέλα αυτά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη, ανήκουν εκείνα τα οποία, αγνοώντας τη συμμετοχή της αλληλεμπλοκής των αδρανών, θεωρούν ότι το σύνολο των δυνάμεων παραλαμβάνεται αποκλειστικά από τον οπλισμό, ενώ στη δεύτερη, εκείνα τα οποία περιέχουν δύο όρους, συμπεριλαμβάνουν δηλαδή κι έναν όρο συνοχής όπως το κριτήριο των Mohr-Coulomb [5]. Αυτός ο όρος συνοχής διαφέρει στα μοντέλα της δεύτερης κατηγορίας.

Έτσι, στη θεωρία του διαγώνιου θλιπτικού πεδίου [17], τον όρο συνοχής αποτελεί η αλληλεμπλοκή των αδρανών ενώ στο μοντέλο της fib [15], αυτός συντίθεται από τη δύναμη της τριβής καθώς και τις τάσεις περίσφιγξης που δημιουργούνται από τους συνδετήρες. Στα υπόλοιπα μοντέλα της κατηγορίας ο όρος συνοχής αντιπροσωπεύεται μόνον από τη δύναμη της τριβής, που δημιουργείται κατά μήκος της διεπιφάνειας.

Εφαρμόζοντας τις παραμέτρους του πειράματος στις εναλλακτικές σχέσεις που προτείνονται από τα μοντέλα αυτά, προκύπτουν αποτελέσματα, τα οποία συγκρινόμενα με τις ληφθείσες από το πείραμα τιμές, πιστοποιούν την ικανότητα πρόβλεψης της τελικής αντοχής σε διάτμηση. Σημειώνεται πως για τη συγκριτική παράθεση των μοντέλων αυτών, οι σχέσεις τους τροποποιήθηκαν κατάλληλα, ώστε τα εξαγόμενά τους να εκφράζονται σε όρους διατμητικής τάσης ($\tau_{fu}=V_n/A_c$). Κύριο ρόλο στις σχέσεις αυτές έχει ο οπλισμός, που διατρέχει τη διεπιφάνεια καθώς και η τάση διαρροής του. Ωστόσο για να αναπτύξει ο οπλισμός την τάση αυτή, θα πρέπει να διαθέτει το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης. Το τυπικό δοκίμιο είχε συνολικό μήκος 450 mm και επικάλυψη c=25 mm.Το ελάχιστο απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης για ράβδο Φ8 είναι 322.06 mm (περιοχή Ι: ευνοϊκές συνθήκες συνάφειας) ενώ το μέγιστο απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης

για ράβδο Φ12 είναι 690.14 mm (περιοχή ΙΙ: μη ευνοϊκές συνθήκες συνάφειας) .

Πίνακας 2: Πραγματικές τάσεις οπλισμών.
Table : Actual steel reinforcement stresses.

$f_{max}=4L_b f_{bd}/\Phi$				
(MPa)	f_{bd}	$f_{max(\Phi 8)}$	$f_{max(\Phi 10)}$	$f_{max(\Phi 12)}$
Περιοχή Ι	3.00	195.0	156.0	130.0
Περιοχή ΙΙ	2.10	136.5	109.2	91.0

Με δεδομένη τη γεωμετρία των δοκιμίων είναι σαφές ότι σε καμία περίπτωση δεν ήταν δυνατόν να αναπτυχθεί η ονομαστική τάση διαρροής των ράβδων (δηλ. τα 500 MPa). Για το λόγο αυτό κατά την εφαρμογή των αναλυτικών σχέσεων στα δεδομένα του πειραματικού προγράμματος, χρησιμοποιήθηκε στη θέση της f_y η μέγιστη τάση που μπορεί να αναπτύξει το διαθέσιμο μήκος αγκύρωσης (130 mm σε κάθε ακραίο κύβο), f_{max} (πίνακας 2). Στα συγκριτικά διαγράμματα (σχήματα 10,11) παρουσιάζονται οι τιμές της διατμητικής τάσης που δίνουν όλα τα αναλυτικά προσομοιώματα σε τελικό στάδιο για κάθε ομάδα δοκιμίων, συγκρινόμενα με τις μετρηθείσες από το πείραμα τιμές.

Από τα μοντέλα της πρώτης κατηγορίας η εξίσωση που προτείνεται από το ACI [1,2,3] δίνει πολύ συντηρητικές τιμές. Τα μοντέλα των Birkeland, Loov και Walraven [4,7,20], εμφανίζοντας παρόμοια αποτελέσματα, δίνουν πιο ικανοποιητικές προβλέψεις με τις μικρότερες αποκλίσεις να εμφανίζονται στα δοκίμια με οπλισμό 4Φ8 και τις μεγαλύτερες στα δοκίμια με οπλισμό 4Φ10. Έτσι για τα δοκίμια με οπλισμό 4Φ8 η σύγκλιση των τιμών που δίνουν τα τρία παραπάνω μοντέλα και των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι πολύ καλή αλλά καθώς αυξάνεται η διάμετρος του οπλισμού, παρατηρείται και αύξηση της απόκλισης.

Τα μοντέλα της δεύτερης κατηγορίας, η οποία περιλαμβάνει δύο όρους, παρουσιάζουν μεγαλύτερη ικανότητα πρόβλεψης σε σχέση με αυτά της πρώτης κατηγορίας, αφού οι τιμές που δίνουν για τη διατμητική αντοχή στη διεπιφάνεια είναι πιο ρεαλιστικές. Η εξίσωση της fib, δίνει την τάση λόγω τριβής και περίσφιγξης. Οι τιμές είναι συντηρητικές, λαμβάνοντας υπόψη την ιδιαιτερότητα του πειράματος, στο οποίο δεν υπάρχει σταθερός όρος (σ_{cd}=0) γι' αυτό και δεν συμπεριλαμβάνεται στο συγκριτικό διάγραμμα των μοντέλων της κατηγορίας αυτής (σχήμα 11). Η εξίσωση που προτείνεται από τους Mattock et al. [9-11] για προρηγματωμένες επιφάνειες παρουσιάζει το μηχανισμό της αλληλεμπλοκής των αδρανών να παραλαμβάνει περίπου το ήμισυ της τέμνουσας και η δράση βλήτρου το υπόλοιπο. Η σύγκλιση των τιμών που παρατηρείται για τα δοκίμια με οπλισμό 4Φ8, είναι πολύ καλή αλλά καθώς αυξάνεται η διάμετρος του οπλισμού αυξάνεται και το ποσοστό απόκλισης από τα πειραματικά αποτελέσματα. Η θεωρία της διατμητικής τριβής, η οποία ποσοτικοποιεί την επίδραση της επεξεργασίας της διεπιφάνειας, δίνει υπερβολικά μεγάλες τιμές για τα δοκίμια που είχαν υποστεί εκτράχυνση και μπορεί να προβλέψει σε ικανοποιητικό βαθμό τη συμπεριφορά σε διάτμηση των δοκιμίων με μη επεξεργασμένες διεπιφάνειες. Τόσο στο μοντέλο αυτό όσο και σε αυτό που προτείνεται από τους Tassios et al. [14-16,18,19] η αλληλεμπλοκή των αδρανών λειτουργεί σε μικρότερο βαθμό. Εντούτοις οι εκτιμήσεις του μοντέλου των Tassios et al., πλησιάζουν πολύ τα πειραματικά αποτελέσματα. Η σχέση λαμβάνει υπόψη της την τριβή, τη δράση βλήτρου και τις τάσεις περίσφιγξης. Απλοποιητικά, υπό μονοτονική φόρτιση και για επιφάνειες που έχουν υποστεί εκτράχυνση, η αντίσταση των μηχανισμών που παραλαμβάνουν τη διάτμηση μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση στον πίνακα 3. Η σύγκλιση είναι εξαιρετική καθώς το μοντέλο έχει ευαισθησία και στην επεξεργασία της διεπιφάνειας. Το μοντέλο του τροποποιημένου διαγώνιου θλιπτικού πεδίου, δίνει τις λιγότερο ικανοποιητικές προβλέψεις από τα υπόλοιπα μοντέλα της κατηγορίας για τη διατμητική αντοχή στη διεπιφάνεια καθώς εμφανίζει αποκλίσεις σε όλες τις ομάδες των δοκιμίων.

Χαρακτηριστικό είναι πως στο προσομοίωμα αυτό η αλληλεμπλοκή των αδρανών λαμβάνεται μεν υπόψη, το ποσοστό συμμετοχής της όμως είναι πολύ χαμηλότερο από εκείνο στα υπόλοιπα μοντέλα της κατηγορίας. Για τα δοκίμια με φυσική διεπιφάνεια οι προβλέψεις που δίνει πλησιάζουν εκείνες του ACI και της fib, είναι δηλαδή συντηρητικές ενώ για τα δοκίμια που έχουν υποστεί επεξεργασία στη διεπιφάνεια η σύγκλιση είναι καλύτερη. Οι τιμές που προβλέπονται είναι ως επί το πλείστον χαμηλότερες από της μετρηθείσες. Το μοντέλο του τροποποιημένου διαγώνιου θλιπτικού πεδίου είναι η πλέον αποδεκτή θεωρία για τους μηχανισμούς παραλαβής τέμνουσας. Οι Vecchio και Collins [17] πρότειναν μια συνάρτηση για την αλληλεμπλοκή των αδρανών αντιστρόφως ανάλογη προς το εύρος w της ρωγμής. Οι Martin- Perez και Pantazopoulou [8] τροποποίησαν την εν λόγω σχέση αντικαθιστώντας το εύρος w της ρωγμής με τη μέση κύρια εφελκυστική παραμόρφωση ε_1 και χρησιμοποιώντας μόνο το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος για την περιγραφή του, όπως φαίνεται στον πίνακα 3. Οι Millard και Johnson [12,13] πρότειναν μια συνάρτηση, η οποία βασίζεται στη θεώρηση πως οι ράβδοι του οπλισμού του σκυροδέματος μετά τη ρηγμάτωση συμπεριφέρονται ως μια δοκός σε ελαστική θεμελίωση. Άρα με βάση τη θεωρία του τροποποιημένου διαγώνιου θλιπτικού πεδίου μπορεί η αντοχή στη διεπιφάνεια να υπολογιστεί ως το άθροισμα των δύο αυτών όρων.

Γενικά, στην πλειονότητά τους τα μοντέλα παρουσίασαν μικρές αποκλίσεις όσον αφορά στα δοκίμια με οπλισμό 4Φ8. Τα μοντέλα της δεύτερης κατηγορίας, δηλαδή αυτά που λαμβάνουν υπόψη δύο μηχανισμούς παραλαβής τέμνουσας, μπορούν να προβλέψουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τη διατμητική αντοχή στη διεπιφάνεια για κάθε ομάδα δοκιμίων. Ωστόσο διαφαίνεται πως ο μηχανισμός της αλληλεμπλοκής των αδρανών παραλαμβάνει μικρό ποσοστό της συνολικής τέμνουσας και πως τα μοντέλα δεν είναι αρκετά ευαίσθητα στην επεξεργασία της διεπιφάνειας.

6. ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 8 ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ Ο.Α.Σ.Π.

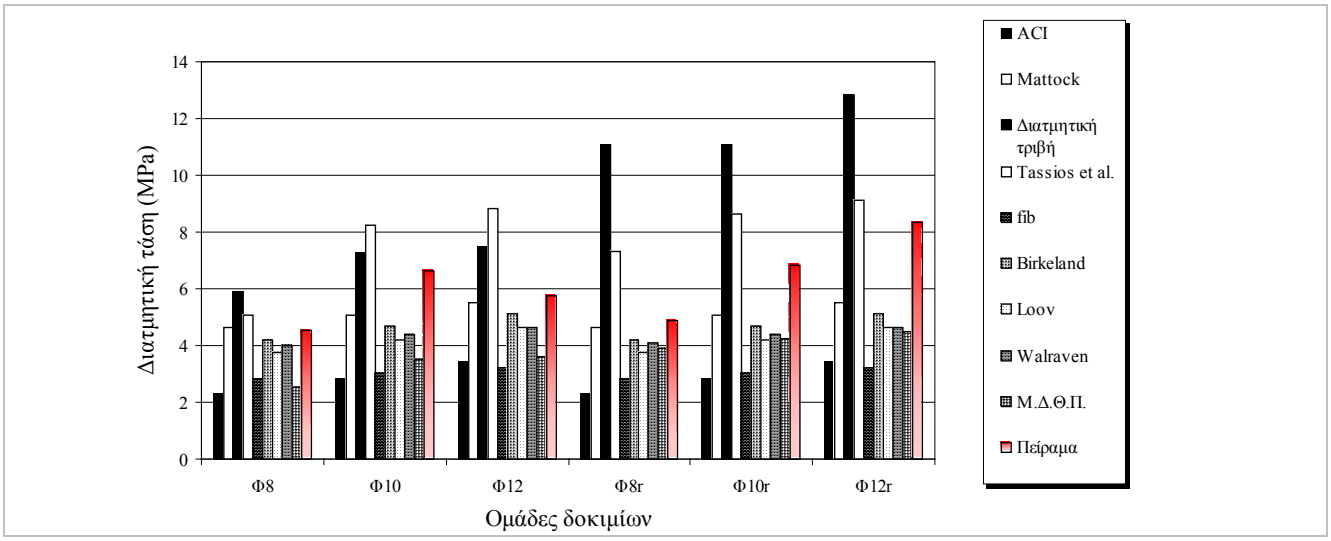
Σύμφωνα με τις προβλέψεις του Ευρωκώδικα 8 [6] και τις Συστάσεις του Ο.Α.Σ.Π. [22] η μέγιστη τιμή συνοχής επιστρατεύεται για τιμές της σχετικής ολίσθησης κατά μήκος της διεπιφάνειας από 0.01mm έως 0.02mm, ενώ διατηρείται πρακτικώς αμείωτη για τιμές της σχετικής ολίσθησης μέχρι 0.50 mm. Η τιμή της συνοχής για λείες επιφάνειες σκυροδέματος, χωρίς να έχει προηγηθεί καμία επεξεργασία μπορεί να λαμβάνεται ίση με $0.25f_{ctk.}$ Όταν πρόκειται για επιφάνειες που έχουν υποστεί τεχνητή τράχυνση πριν από τη χύτευση του νέου σκυροδέματος τότε η τιμή της συνοχής λαμβάνεται ίση με $0.75f_{ctk}$. Στη δεύτερη περίπτωση f_{ctk} είναι η χαρακτηριστική τιμή της εφελκυστικής αντοχής του ασθενέστερου από τα δύο σκυροδέματα.

$0.25 \cdot f_{ctk} = 0.25 \cdot 2.5 = 0.625$ MPa

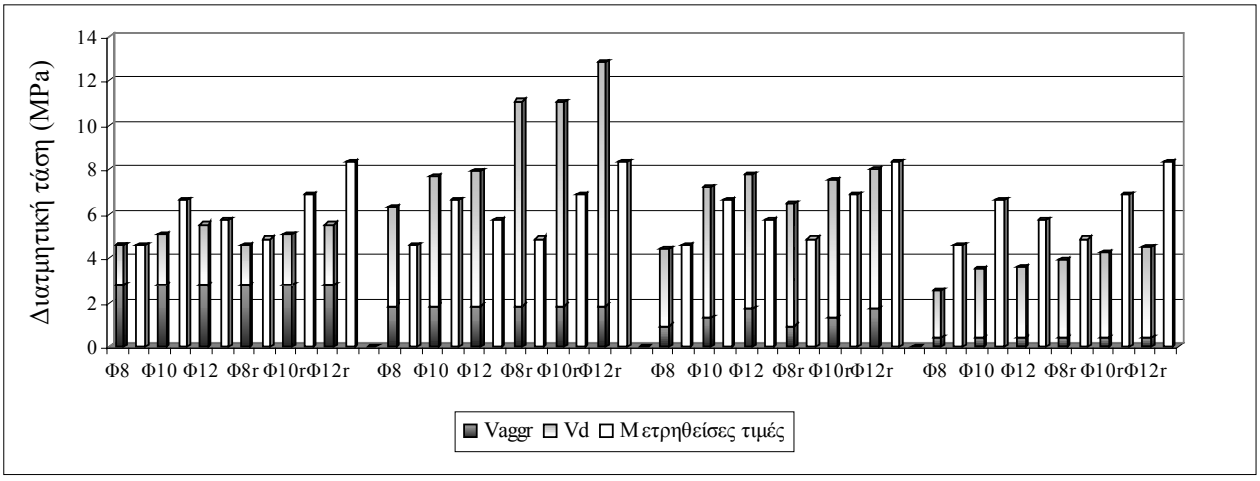
$0.75 \cdot f_{ctk} = 0.75 \cdot 2.5 = 1.875$ MPa

Συμπεραίνεται λοιπόν, πως οι τιμές που προτείνονται είναι ρεαλιστικές και προς τη μεριά της ασφάλειας. Εάν εξαιρεθεί η τιμή του δοκιμίου SR-1 (6.4MPa), οι τιμές συνοχής για τα άλλα δύο δοκίμια είναι 2.67MPa και 2.09MPa αντίστοιχα και βρίσκονται πολύ κοντά στα όρια που θέτουν οι Συστάσεις.

Όσον αφορά στην τριβή μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος όπως και στη μεταφορά από χάλυβα σε σκυρόδεμα και από σκυρόδεμα σε σκυρόδεμα μέσω βλήτρων οι σχέσεις που υιοθετούνται από τις Συστάσεις είναι αυτές που έχουν προκύψει κατά κύριο λόγο από τις εργασίες των Τάσιου, Βιντζηλαίου και Βασιλοπούλου [14-16,18,19] οι οποίες όπως παρουσιάσθηκε πιο πάνω δίνουν πολύ ικανοποιητικές προβλέψεις σε κάθε στάδιο της φόρτισης.



Σχήμα 10: Σύγκριση της μέγιστης μετρηθείσας διατμητικής τάσης με τις τιμές που δίνουν οι εξισώσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας.
Figure 10: Comparison between recorded peak shear stress and values given by the equations of the literature.



Σχήμα 11: Σύγκριση μέγιστης μετρηθείσας διατμητικής τάσης με τις τιμές που δίνουν οι εξισώσεις της δεύτερης κατηγορίας.
Figure 11: Comparison between recorded peak shear stress and values given by the equations of the second category.

Πίνακας 3: Κατάταξη μοντέλων που εξετάζουν τη μεταφορά της διατμητικής ροής σε διεπιφάνειες σκυροδέματος σε κατηγορίες- προτεινόμενες σχέσεις.
Table 3: Classification of models testing shear flow transfer in concrete interfaces in categories- proposed equations.

1η κατηγορία	*ACI* $V_n = \mu \cdot A_{vf} \cdot f_{y1}$ (KN) *Birkeland* $V_n = 2.78 \cdot \sqrt{\rho_v \cdot f_y}$ (KN) *Loov* $V_n = k \cdot \sqrt{\rho_v \cdot f_y \cdot f'_c}$ (KN) *Walraven* $V_n = C_1 \cdot (\rho_v \cdot f_y)^{C_2}$ (KN)	**Επεξηγήσεις όρων** $C_1 = 0.878 \cdot f_c^{'0.406}, C_2 = 0.167 \cdot f_c^{'0.303}$ $K_1 = 0.1 \cdot f_c'$ $F_D = k_b \cdot 1.3 \cdot d_b^2 \cdot \sqrt{f_y \cdot f_c}$
2η κατηγορία	*Mattock* $V_n = 0.8 \cdot A_{vf} \cdot f_y + A_c \cdot K_1$ (KN) *Διατμητική τριβή Tassios et al.* $V_n = \mu \cdot F + c \cdot A_C$ (KN) $V_R = \beta_D \cdot F_D + \beta_F \cdot F_u$ (KN) *M.C.F.T** $\tau = \frac{0.1 \cdot \sqrt{f_c}}{1 + \frac{\varepsilon_{c1}}{0.0005}} + \frac{F_{du} \cdot \left[1 - \exp(\frac{K_i \cdot \Delta}{F_{du}})\right]}{A_c}$ (MPa) *fib* $\tau_{fu,d} = 0.25 \cdot f^{2/3}_{cd} \cdot (\sigma_{cd} + \rho_{sw} \cdot f_{yd})^{1/3}$ (MPa)	$F_u = 0.44 \cdot \sqrt[3]{f_c^2 \cdot \sigma_c} \cdot A_c$ $\sigma_c = \nu \cdot f_c + \rho \cdot f_{sy}$ $\beta_D = 0.6 \sim 0.7$ $\beta_F = 0.4 \sim 0.8$ $F_{du} = 1.3 \cdot d_b^2 \cdot \sqrt{f_c \cdot f_y \cdot (1 - A^2)}$ $K_i = 0.166 \cdot K_f^{0.75} \cdot d_b^{1.75} \cdot E_s^{0.25}$ $K_i = 127 \cdot \beta \cdot \sqrt{f_c} \cdot \left(\frac{1}{d_b}\right)^{2/3}$ $\beta = 0.6 \sim 1.0$ *Μέθοδος του Διαγώνιου Θλιπτικού Πεδίου

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έγινε πειραματική παραμετρική διερεύνηση των μηχανισμών μεταφοράς των δυνάμεων κατά μήκος διεπιφανειών οπλισμένου σκυροδέματος. Κατασκευάστη-καν 24 δοκίμια διπλής διεπιφάνειας με παραμέτρους πειράματος τη διάμετρο των οπλισμών που τις διατρέχουν, το εμβαδόν των ράβδων του οπλισμού καθώς και την τραχύτητα των διεπιφανειών.

Η επεξεργασία της διεπιφάνειας σε όλους τους τύπους δοκιμίων δημιούργησε καλύτερες συνθήκες συνοχής και παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες τιμές διατμητικής τάσης. Στα άοπλα δοκίμια η επεξεργασία της διεπιφάνειας απέτρεψε την αστοχία κατά την αφαίρεση των τύπων, γεγονός που δεν επετεύχθη στα άοπλα δοκίμια με φυσική διεπιφάνεια. Απουσία οπλισμού η δοκιμή τους ποσοτικοποιεί την ικανότητα του μηχανισμού της αλληλεμπλοκής των αδρανών να παραλάβει την τέμνουσα και αποδεικνύεται πως η συνεισφορά του είναι μικρή.

Ο ρόλος της αλληλεμπλοκής των αδρανών στα οπλισμένα δοκίμια δεν μπορεί να οριοθετηθεί μέσα σε σαφή πλαίσια. Στα δοκίμια όπου οι κύβοι αποχωρίζονται, η συμβολή του είναι μειωμένη ενώ σε αυτά όπου οι κύβοι παραμένουν σε επαφή είναι ευεργετική.

Τα δοκίμια με οπλισμό 4Φ8 παρουσιάζουν εξαιρετικά πλάστιμη συμπεριφορά. Αντίθετα, τα δοκίμια με οπλισμό 4Φ12 εμφανίζουν ψαθυρή μορφή αστοχίας. Η συμπεριφορά των δοκιμίων με οπλισμό 4Φ10 εντοπίζεται μεταξύ των δύο αυτών ακραίων συμπεριφορών.

Για την ερμηνεία της μηχανικής συμπεριφοράς των διεπιφανειών, τα πειραματικά δεδομένα συσχετίστηκαν με τα αναλυτικά μοντέλα της βιβλιογραφίας με ιδιαίτερη έμφαση στις συνιστώσες που συνθέτουν τη συνολική διαθέσιμη διατμητική αντοχή. Από την εργασία προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Η επεξεργασία της διεπιφάνειας προκαλεί αύξηση της μέγιστης διατμητικής τάσης που μπορεί να αναπτυχθεί.
- Η αλληλεμπλοκή των αδρανών παραλαμβάνει ένα πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής τέμνουσας.
- Αύξηση της διαμέτρου των οπλισμών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαθέσιμης πλαστιμότητας και την αύξηση της μέγιστης διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας. Καθίσταται όμως κρίσιμη η επικάλυψη και το μήκος αγκύρωσης εκατέρωθεν της διεπιφάνειας.
- Τα μοντέλα τα οποία περιλαμβάνουν δύο όρους, συμπεριλαμβάνουν δηλαδή κι έναν όρο συνοχής, μπορούν να προβλέψουν καλύτερα και πιο ρεαλιστικά τη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας.
- Γενικά, η χρήση οπλισμών μικρής διαμέτρου οδηγεί σε αύξηση της διαθέσιμης πλαστιμότητας. Έτσι, στα πλαίσια του ικανοτικού σχεδιασμού των κατασκευών, θα πρέπει να επιδιώκεται η χρήση περισσότερων ράβδων μικρής διαμέτρου έναντι λιγότερων ράβδων μεγαλύτερης διαμέτρου.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ACI Committee 318, **"Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95) and Commentary ACI 318 R-95"**, American Concrete Institute, Detroit, 1995, pp.16-1 ÷16-10.

2. ACI Committee 318, **"Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-99) and Commentary ACI 318 R-99"**, American Concrete Institute, Detroit, 1999, pp.133 – 142.

3. ACI Committee 318, **"Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-02) and Commentary ACI 318 R-02"**, American Concrete Institute, Detroit, 2002, pp.139–154.

4. Birkeland, P. W. and Birkeland, H. W., **"Connections in precast concrete construction"** Journal of American Concrete Institute, V. 63, No. 3, Mar. 1966, pp. 345-368.

5. Climaco, J.C.T.S., Regan, P. E., **"Evaluation of bond strength between old and new concrete in structural repairs"**, magazine of Concrete Research, V. 53, No. 6, December 2001, pp. 377-390.

6. Eurocode 8, **"Design provisions for earthquake resistance of structures"**, ENV 1998-1-4, European Prestandard, CEN, January 1996.

7. Loov, E. R. and Patnaik, K. A., **"Horizontal shear strength of composite concrete beams with a rough interface"**, PSI Journal, January-February 1994, pp. 48-69.

8. Martin-Perez, B. and Pantazopoulou, S. J. **"Effect of bond, aggregate interlock and dowel action on the shear strength degradation of reinforced concrete"**, Engineering Structures, V. 23, No. 2, February 2001, pp. 214-227.

9. Mattock, H. A. and Hawkins, M. N. **"Shear transfer in reinforced concrete- recent research"**, PCI Journal, March-April 1972, pp. 55-75.

10. Mattock, H. A., Li, K. W. and Wang, C. T., **"Shear transfer in lightweight reinforced concrete"**, PCI Journal, January-February 1976, pp. 20-39.

11. Mattock, H. A., **"Shear friction and high-strength concrete"**, ACI Structural Journal, V. 98, No. 1, January- February 2001, pp. 50-59.

12. Millard, S. G. and Johnson, P. R., **"Shear transfer across cracks in reinforced concrete due to aggregate interlock and to dowel action"**, Magazine of Concrete Research, V. 36, No. 126, Mar. 1984, pp. 9-21.

13. Millard, S. G. and Johnson, P. R., **"Shear transfer in cracked reinforced concrete"**, Magazine of Concrete Research, V. 37, No. 130, Mar. 1985, pp. 3-15.

14. Tassios T. P. and Vassilopoulou I., **"ΔΑΙΔΑΛΜΑΤΑ επιλογή από το έργο του Τάσιου"**, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2000, pp. 405-414.

15. Tassios T. S., **"Fundamental mechanisms of force-transfer across reinforced concrete critical interfaces"**, CEB Workshop/ West Germany, November 1986, pp. 381-397, 19-21.

16. Tassios, T. S. **"Physical and mathematical models for re-design damaged structures"**, πρακτικά από το συμπόσιο της Βενετίας, 1983, pp. 264-294.

17. Vecchio, F. J. and Collins, M. P., **"The modified compression-filed theory for reinforced concrete elements subjected to shear"**, ACI Journal, V. 83, No. 2, Mar.- Apr. 1986, pp. 219-581.

18. Vintzeleou, N. E. and Tassios, P. T., **"Behavior of dowels under cyclic deformations"**, ACI Structural Journal, November-December 1987, pp. 398-410.

19. Vintzeleou, N. E. and Tassios, P. T., **"Concrete-to- concrete Friction"**, Journal of Structural Eng. ASCE, April 1987, pp. 411-428.

20. Walraven, J. C., **"Fundamental analysis of aggregate interlock"**, Structural Division ASCE, V. 107, No. ST11, November 1981, pp. 2245-2270.

21. Δημητριάδου Ολυμπία και Κοτσόγλου Βασιλική, **"Πειραματική διερεύνηση της συμβολής βλήτρου και της αλληλεμπλοκής των αδρανών στην αντοχή διεπιφανειών οπλισμένου σκυροδέματος έναντι ολισθήσεως"**, Διπλωματική εργασία, Δ.Π.Θ.,2004.

22. **Συστάσεις για προσεισμικές και μετασεισμικές επεμβάσεις στα κτίρια**, Εκδόσεις Ο.Α.Σ.Π., 2001.

Ο. Δημητριάδου
Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ., Μ. Ανδρόνικου 14, 691 00 Κομοτηνή.
Β. Ν. Κοτσόγλου
Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ., Κωστή Παλαμά 12, 551 33 Καλαμαριά, Θεσσαλονίκη.
Γ. Ε. Θερμού
MSc, DIC, Υποψήφια Διδάκτωρ Δ.Π.Θ, Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Βασ. Σοφίας 12, 671 00 Ξάνθη.
Α. Σάββα
Επίκουρος Καθηγήτρια Δ.Π.Θ., Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Βασ. Σοφίας 12, 671 00, Ξάνθη.
Σ. Ι. Πανταζοπούλου
Καθηγήτρια Δ.Π.Θ., Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Βασ. Σοφίας 12, 671 00 Ξάνθη.

Extended Summary

Experimental Study of Concrete Interfaces in Sliding Shear

O. DIMITRIADOU
Civil Engineer D.U.TH.

V. N. KOTSOGLOU
Civil Engineer D.U.TH.

G. E. THERMOU
MSc, DIC, Civil Engineer D.U.TH.

A. SAVVA
Assistant Professor D.U.TH.

S. J. PANTAZOPOULOU
Professor D.U.TH.

Abstract
This paper presents results of an experimental parametric investigation of shear transfer mechanisms across concrete interfaces. Interfaces are created in the connection between existing concrete elements and new concrete cast against their lateral surface, such as in seismic retrofits or repairs (e.g. reinforced concrete jackets or connection of prefabricated elements with cast concrete). The experimental program comprised 24 double-interface specimens. Test variables included the amount and bar size of interface reinforcement (dowels) and interface roughness. Test results indicate that increasing the bar diameter causes a prominent reduction in the available ductility of the connection. Furthermore, strength is related to the available depth of embedment of the interface reinforcement. In order to understand the mechanical behavior of reinforced concrete interfaces in shear, the experimental data were correlated with the analytical models found in the literature, with an emphasis on evaluating the components of the available shear strength. The experimental trends confirm the EC8 and E.P.P.O. (Earthquake Planning and Protection Organisation) recommended values for interface design strengths in seismic retrofits/ repairs of reinforced concrete buildings.

1. INTRODUCTION

Shear transfer mechanisms across r.c (reinforced concrete) cracks and interfaces are one of the least understood aspects of basic concrete mechanics. A primary reason is that this mechanical problem depends on physical variables that cannot be easily quantified. Another difficulty in deriving quantitative relations is due to the diversity of form of the experimental setups used by the researchers in conducting tests. Evaluation of the true contribution of each mechanism of resistance (cohesion, dowel action, aggregate interlock) is hampered further by the lack of reported information on the state of deformation measured during the tests.

Transmitting forces across interfaces is the underlying basis of jacketing repair/strengthening solutions. The degree of monolithic action of the jacketed member depends on the interface shear transfer capacity along the joint. From the mechanics point of view, r.c. interfaces are equivalent to zero width pre-existing cracks. Since they are created by casting new against hardened concrete, some degree of chemical adhesion also may be depended upon.

When sliding occurs along the joint, once the initial adhesion is exceeded the basic resistance mechanisms are mobilised. These are of a frictional nature: (1) Asperities (owing to surface roughness) interlock along the contact surfaces – similar to aggregate interlock in the common cracks. (2) Shear friction develops in the presence of any normal compression along the interface, including the clamping action of any reinforcement crossing the interface. (3) Dowel action (flexural kinking) of reinforcement crossing the interface, which, however, depends on the development capacity (bond) of the embedded length of the dowel.

2. EXPERIMENTAL PROGRAM

The variables studied included:
1) Diameter of reinforcing bars crossing the interface
2) Interface roughness
3) Amount of interface reinforcement

Twenty-four specimens were constructed and tested to investigate the interface shear strength towards sliding. Each specimen comprised three cubes modeling an r.c. jacket, in which the inner cube represented the hardened (old) concrete and the symmetric external cubes represented new concrete. Test specimen layout and dimensions are shown in figure 1. To enable sliding during the test, the inner cube was elevated, creating two interfaces of 17,250 mm^2 and 115 mm height each. Reinforcement crossing the interface had a 25 mm cover. Specimen characteristics are shown in Table 1 and are

Submitted: Aug. 29, 2005 Accepted: Dec. 9, 2005

separated in four groups according to the reinforcement and in two categories depending on the surface preparation (N: natural, R: rough).

2.1. SPECIMEN PREPARATION

Specimen construction was realized in three phases. First, the inner cube was cast with the reinforcement placed as needed. A month later the lateral surface of twelve specimens was roughened by hand-chipping using a pickaxe in order to achieve a 6-8 mm depth of surface roughness to the extent that aggregate was exposed. The roughened surface is shown in picture 1.

2.2. Experimental data recording

Each specimen was loaded monotonically in a 3000 kN standard compression machine; the upper platen was seated on the central cube (old concrete), whereas the two outer cubes were seated on the lower platen. Upon relative displacement of the platens the contact surfaces were stressed in pure shear. Applied load and relative displacements between the inner and outer cubes were recorded electronically with both an LVDT and with digital imaging of the specimens' surfaces.

3. TEST RESULTS

The first diagonal cracks were observed when sliding began at an inclination of 30 to 45 degrees. Cover loss became more intense with increasing load. Permanent kinking deformations in reinforcement differed depending on the diameter. The amount of sliding resistance owing to aggregate interlock was assessed from the non-reinforced specimens. Measured shear strengths are listed in Table 1.

3.1. Effect of bar diameter

Increasing bar diameter resulted in a direct increase of interface shear capacity. Shear stiffness did not increase in proportion with the reinforcement ratio. This was attributed to the poorer anchorage of the larger diameter bars. Note that the maximum force developed by a dowel is controlled by its embedded length rather than by its sectional area. At the same time, for the same amount of relative sliding smaller bars generate far less pressure on the cover concrete due to their reduced stiffness as compared to larger size bars; the result is that cover spalls at lower slip levels for larger size dowels. In the present study no clear correlation was found between crack width and bar diameter.

Specimens with four #8 dowels maintained their shear strength to a large level of interface sliding, demonstrating remarkable ductility. In contrast, specimens with four #12 dowels experienced splitting failure. The behavior of specimens reinforced with four #10 dowels fell between the two limits. The stress-slip response curves of specimens with different amounts of interface reinforcement are shown in figures 3-8.

3.2. Effect of aggregate interlock

The contribution of aggregate interlock is gauged by comparing the response of non-reinforced specimens (figure 2) with and without prior contact surface preparation. In specimens with a natural contact surface splitting occurred instantaneously upon load application without a notable process of crack development.

In the reinforced specimens, aggregate interlock had a notable function in the beginning of the loading phase up to the formation of the initial cracks. As the load was increased, cracks opened up and the aggregate interlock diminished, whereas forces were transmitted basically through dowel action.

3.3. Effect of interface roughness

Figure 9 illustrates that specimens with four #8 dowels subjected to contact surface preparation (roughening) were more ductile than those having a natural contact surface. In specimens having four #10 and #12 dowels, surface preparation did not have a remarkable effect on ductility. However, it influenced the shear strength, which was higher than the corresponding values obtained from identical specimens with a natural contact surface. In the un-reinforced specimens, surface preparation protected them against cube separation when removing from the moulds (this happened in non-reinforced specimens without contact surface preparation).

4. DISCUSSION

Of the alternative analytical expressions to assess interface strength, most are empirical or represent simplifications of the Mohr-Coulomb failure criterion. Models are classified in two broad categories: (1) ignoring the aggregate interlock contribution, reinforcement is considered as the only

shear transfer mechanism; (2) two sources of strength are considered, a steel contribution term and a cohesion term, which is calculated with a variety of approaches.

In Table 3, the available models were evaluated against the experimental data. Models belonging to the first category were found to be very conservative. Accounting for cohesion clearly leads to more realistic values. Excellent correlation was observed with the analytical model proposed by Tassios and co-workers. In general, most models had small deviations when correlated with test results from specimens with four #8 dowels. It was noted that although the aggregate interlock mechanism represents a relatively small fraction of the total shear capacity, the available models are insensitive to surface roughness characteristics.

5. EUROCODE 8 AND E.P.P.O. RECOMMENDATIONS

Test results were also used to evaluate the relevant EC8 and E.P.P.O. recommendations, whereby the maximum adhesion is considered to occur slip values of about 0.01-0.02 mm, remains practically constant up to a slip of about 0.5 mm. Monotonic adhesive strength is taken as 0.25 f_{ctk} for smooth, untreated interfaces and 0.75 f_{ctk} for interfaces that have been intentionally roughened. The values proposed comply with the test results.

6. CONCLUSIONS

- Surface preparation increases shear strength of contact joints against sliding.
- Aggregate interlock has a small contribution to the total resistance.
- An increase in bar diameter reduces the available ductility and increases the strength of the interface. However, cover and depth of embedment are critical on both sides of the interface.
- Models containing two terms, namely a steel contribution and a cohesion term, consistently provide a more realistic estimate of the interface's shear strength.
- In general, using small diameter bars for dowels leads to higher ductility of the joint and should be preferred in design applications.

O. Dimitriadou
Civil Engineer D.U.Th., 14 M. Andronikou Str., 691 00 Komotini.
V. N. Kotsoglou
Civil Engineer D.U.Th., 12 Kosti Palama Str., 551 33 Kalamaria, Thessaloniki.
G. E. Thermou
Ph.D. Candidate D.U.Th., Laboratory of Reinforced Concrete, Department of Civil Engineering, School of Engineering, 12 Vas. Sofias Str., 671 00 Xanthi.
A. Savva
Assistant Professor D.U.Th., Laboratory of Materials, Department of Civil Engineering, School of Engineering, 12 Vas. Sofias Str., 671 00 Xanthi.
S. J. Pantazopoulou
Professor D.U.Th., Laboratory of Reinforced Concrete, Department of Civil Engineering, School of Engineering, 12 Vas. Sofias Str., 671 00 Xanthi