



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (ΔΠΜΣ)
"ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ"

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΡΙΒΗΣ ΥΠΟ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΔΡΑΣΗ
ΣΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
(βιβλιογραφική τεκμηρίωση)

ΕΚΠΟΝΗΣΗ: ΒΑΣΙΛΙΚΗ Ι. ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΘΕΟΔΟΣΙΟΣ Π. ΤΑΣΙΟΣ, ΟΜΟΤΙΜΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ – ΜΑΡΤΙΟΣ 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (ΔΠΜΣ)
"ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ"

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΡΙΒΗΣ ΥΠΟ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΔΡΑΣΗ
ΣΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
(βιβλιογραφική τεκμηρίωση)

ΕΚΠΟΝΗΣΗ: ΒΑΣΙΛΙΚΗ Ι. ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΘΕΟΔΟΣΙΟΣ Π. ΤΑΣΙΟΣ, ΟΜΟΤΙΜΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ – ΜΑΡΤΙΟΣ 2016

.....
Βασιλική Ι. Εμμανουήλ

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός ΕΜΠ

Copyright © Βασιλική Ι. Εμμανουήλ, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τη συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τη συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Επιβλέπων Καθηγητής

Θεοδόσιος Τάσιος, Ομότιμος Καθηγητής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Εξεταστική Επιτροπή

Ελισάβετ Βιντζηλαίου, Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Κωνσταντίνος Τρέζος, Αναπληρωτής Καθηγητής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το 2015, ξεκίνησε η προσπάθεια για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, με σκοπό τη διερεύνηση των μηχανισμών μεταφοράς τέμνουσας που επιστρατεύονται σε διεπιφάνειες επισκευασμένων/ενισχυμένων στοιχείων Ωπλισμένου Σκυροδέματος (Ω.Σ.) ή σε ρηγματωμένες διεπιφάνειες στοιχείων Ω.Σ., οι οποίες υποβάλλονται σε μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη δράση διάτμησης. Η μέχρι τώρα διερεύνηση επικεντρώθηκε στον μηχανισμό τριβής και συγκεκριμένα, μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, έγινε προσπάθεια περαιτέρω διερεύνησης και γενίκευσης της εξάρτησης των δεδομένων του νόμου εξέλιξης του μηχανισμού τριβής υπό μονοτονική δράση, από ορισμένες παραμέτρους.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω την αμέριστη ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα της παρούσας εργασίας, τον κ. Θεοδόσιο Τάσιο, Ομότιμο Καθηγητή ΕΜΠ, για την ευκαιρία που μου πρόσφερε να συνεργαστώ με έναν αξιόλογο άνθρωπο και επιστήμονα, για τη διερεύνηση ενός εξαιρετικά ενδιαφέροντος θέματος. Τον ευχαριστώ θερμά για την ωφέλιμη καθοδήγησή του και το διαρκές ενδιαφέρον του καθ' όλη τη διάρκεια προσπάθειας αναζήτησης δεδομένων πάνω στο θέμα, καθώς επίσης, για την εμπιστοσύνη και πολύτιμη υποστήριξη που μου πρόσφερε όλο αυτό το διάστημα.

Ακόμη, επιθυμώ να ευχαριστήσω θερμά την κ. Ισαβέλλα Βασιλοπούλου, Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για τη μέχρι τώρα βοήθειά της και το εξαιρετικό της ενδιαφέρον να συμβάλλει στο υπολογιστικό μέρος της εργασίας, το οποίο θα ακολουθήσει μετά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την αγάπη και βαθιά ευγνωμοσύνη στην οικογένειά μου, καθώς η διαρκής κατανόηση, συμπαράσταση και ενθάρρυνσή της, στάθηκαν πολύτιμη βοήθεια στη μέχρι τώρα ακαδημαϊκή μου πορεία.

Αθήνα, Μάρτιος 2016

Βασιλική Εμμανουήλ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	5
1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	7
1.3 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΤΡΙΒΗΣ ...	11
2.1 ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΡΙΒΗΣ	11
2.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΤΡΙΒΗΣ, ΥΠΟ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ	12
2.2.1 Η μηχανική της τριβής	12
2.2.2 Ο ρόλος της ορθής τάσης στη διαμόρφωση του συντελεστή τριβής	13
2.2.3 Θεωρητική διερεύνηση της σχέσης $\mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c}\right)^k = \mu_1$, για αδρομερή διεπιφάνεια σκυροδέματος προς σκυρόδεμα	14
2.2.4 Σχέση μεταξύ ολισθήσεως και ανοίγματος ρωγμής, υπό μονοτονική δράση (διαστολικότητα, «dilatancy»).....	19
2.2.5 Σχέση τ/s για αδρομερή διεπιφάνεια σκυροδέματος προς σκυρόδεμα, υπό ορθή τάση σ_c , για μονοτονική δράση	23
2.2.6 Εξέλιξη του ανοίγματος ρωγμής κατά την ανακύκληση των ολισθήσεων τριβής	24
2.2.7 Προσομοίωμα τριβής υπό ανακυκλιζόμενη επιβαλλόμενη ολίσθηση	26
2.3 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΡΩΓΜΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΡΙΒΗΣ, ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ Δ.Δ. ΤΗΣ Παλιεράκη (2014)	27
2.3.1 Το αντικείμενο της Διδακτορικής Διατριβής	27

2.3.2 Εξέλιξη του ανοίγματος ρωγμής κατά την ανακύκλιση και για αύξηση της επιβαλλόμενης ολίσθησης.....	28
2.3.3 Εξέλιξη του μηχανισμού τριβής κατά την ανακύκλιση και για αύξηση της επιβαλλόμενης ολίσθησης.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΥ ΝΟΜΟΥ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΡΙΒΗΣ, ΥΠΟ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΔΡΑΣΗ.....	36
3.1 ΟΙ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ.....	36
3.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΡΩΓΜΩΝ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ, ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΤΟΥ Walraven (1994) - ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΡΧΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΡΩΓΜΗΣ w_o ΣΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ μ_1 , ΜΕ ΒΑΣΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΑΠΟ ΤΟ fib Model Code 2010 - ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΙΤΙΩΝ ΥΠΑΡΞΗΣ ΑΡΧΙΚΟΥ w_o , ΠΑΡΑ ΤΗΝ ΕΚ ΤΩΝ ΥΣΤΕΡΩΝ ΑΣΚΗΣΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ σ_c ΣΕ ΠΡΟΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ.....	40
3.2.1 Συμπεριφορά ρωγμών υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, με βάση την έρευνα του Walraven (1994).....	40
3.2.2 Επίδραση του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o στη διαμόρφωση των τιμών του μ_1 , με βάση πληροφορίες από το fib Model Code 2010 - Διερεύνηση των αιτιών ύπαρξης αρχικού w_o , παρά την εκ των υστέρων άσκηση θλιπτικής τάσης σ_c σε προεφελκυσμένη ρηγματωμένη διεπιφάνεια.....	45
3.2.2.α Επίδραση του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o στη διαμόρφωση των τιμών του μ_1	45
3.2.2.β Διερεύνηση των αιτιών ύπαρξης αρχικού w_o , παρά την εκ των υστέρων άσκηση θλιπτικής τάσης σ_c σε προεφελκυσμένη ρηγματωμένη διεπιφάνεια.....	57
3.2.2.γ Διερεύνηση της σχέσης που συνδέει την ολίσθηση s_o με το αρχικό άνοιγμα ρωγμής w_o , με βάση τις σχέσεις (21), (22) και το διάγραμμα (Σχήμα 25) του fib Model Code 2010.....	63

3.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ μ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ μ_1 , ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΤΩΝ Fronteddu, Leger and Tinawi (1998).....	66
3.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΚΟΚΚΟΥ ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ D_{max} ΚΑΙ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΤΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ ΚΑΘΕΤΑ ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ, f_c/σ_c , ΣΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ s_u ΠΟΥ ΕΠΙΣΤΡΑΤΕΥΕΙ ΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΡΙΒΗΣ τ_u (ΓΙΑ ΤΡΑΧΕΙΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ), ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ Τάσιο (2006)	75
3.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ μ_1 - ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ $\tau_u = \mu_1 \cdot \sqrt[3]{f_c^2 \cdot \sigma_c}$, ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΤΩΝ Lin, Lu and Dong..	78
3.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΑΔΡΑΝΟΥΣ D_{max} ΣΤΙΣ ΤΑΣΕΙΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ τ ΚΑΙ ΤΙΣ ΟΡΘΕΣ ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΦΗΝΩΣΗΣ σ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΝΤΑΙ ΣΕ ΜΙΑ ΡΩΓΜΗ - ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ μ_1 ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ D_{max} - ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΚΦΡΑΣΗΣ (2) (σελ. 14) ΤΟΥ ΜΕΙΩΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΟΥ μ_1 , ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΤΩΝ Walraven and Reinhardt (1981)	87
3.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΡΧΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΡΩΓΜΗΣ ΣΤΙΣ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΟΨΕΩΝ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΚΑΙ ΚΑΘΕΤΑ ΣΤΗ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ - ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ $w = 0,6 \cdot s^{2/3}$, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΑΡΧΙΚΑ ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ ΡΩΓΜΗΣ, ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΤΩΝ Briseghella and Gori	96
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΧΑΛΥΒΑ ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	100
4.1 Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΓΝΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΧΑΛΥΒΑ ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, ΣΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΤΡΙΒΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΜΙΑΣ ΩΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	100

4.2 Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ (ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ).....	102
4.3 ΣΧΕΣΗ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ ΡΑΒΔΟΥ ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ - ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΗ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗ	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΔΡΑΣΗ ΒΛΗΤΡΟΥ.....	110
5.1 ΜΕΓΑΛΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗ ΡΑΒΔΟ	111
5.1.1 Τριαξονική συμπεριφορά του σκυροδέματος γύρω απ' τη ράβδο, για μηδενική γωνία τριβής	111
5.1.2 Υπολογισμός της αντοχής βλήτρου, D_u	112
5.1.3 Αποστάσεις βλήτρων	115
5.2 ΜΙΚΡΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΡΑΒΔΟΥ	116
5.3 Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΗΣΗΣ ΣΤΟΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΒΛΗΤΡΟΥ.....	117
5.4 ΑΛΛΗΛΟΔΡΑΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΒΛΗΤΡΟΥ (D) ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ (B).....	120
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	122
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	128
ΕΝΘΕΤΟ	

Όταν πραγματοποιείται επισκευή ή ενίσχυση σε στοιχεία υφιστάμενων κατασκευών Ωπλισμένου Σκυροδέματος (Ω.Σ.), η αποδοτικότητα της επέμβασης και συνεπώς, η βελτίωση της συμπεριφοράς του συνόλου της κατασκευής, καθορίζεται από την αποτελεσματική μεταφορά τέμνουσας στη διεπιφάνεια παλαιού – νέου σκυροδέματος που δημιουργείται. Επιπλέον, η παρουσία μηχανισμών μεταφοράς τέμνουσας είναι αναγκαία, σε περίπτωση εμφάνισης ρωγμής μέσα στη μάζα στοιχείων Ω.Σ., η οποία μειώνει δραστικά την αντίσταση έναντι διατμητικής δύναμης παράλληλης προς τη ρωγμή.

Αναγνωρίζοντας τη σημαντικότητα του θέματος, στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επιδιώκεται η διερεύνηση των μηχανισμών μεταφοράς τέμνουσας που επιστρατεύονται σε διεπιφάνειες επισκευασμένων/ενισχυμένων στοιχείων Ω.Σ. ή σε ρηγματωμένες διεπιφάνειες στοιχείων Ω.Σ., οι οποίες υποβάλλονται σε μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη δράση διάτμησης. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι, η τριβή, η οποία ενεργοποιείται κατά μήκος της διεπιφάνειας, εάν η διεπιφάνεια θλίβεται, και η αντίσταση βλήτρου των εγκάρσιων οπλισμών, εάν υπάρχουν. Η μέχρι τώρα διερεύνηση στην παρούσα εργασία, επικεντρώθηκε στον μηχανισμό τριβής και συγκεκριμένα, μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, έγινε προσπάθεια αύξησης της αξιοπιστίας των δεδομένων που διέπουν τον καταστατικό νόμο εξέλιξης του μηχανισμού τριβής υπό μονοτονική δράση, όπως διατυπώνεται από τον Τάσιο (2014).

Για την προσέγγιση του θέματος, αρχικά πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση για τους μηχανισμούς μεταφοράς τέμνουσας, μέσω πειραματικών και θεωρητικών στοιχείων που παρέχονται από τον Τάσιο (2014), και αφορούν σε μονοτονικές και ανακυκλιζόμενες δράσεις. Εν συνεχεία, αντλήθηκαν πληροφορίες για την εξέλιξη των μηχανισμών μεταφοράς τέμνουσας κατά μήκος ωπλισμένων διεπιφανειών παλαιού – νέου σκυροδέματος, υπό ανακυκλιζόμενες δράσεις, μέσα από τη Διδακτορική Διατριβή (Δ.Δ.) της Παλιεράκη (2014). Παράλληλα, όσον αφορά στους νόμους εξέλιξης των μηχανισμών, εντοπίστηκαν οι τροποποιήσεις που έγιναν στο πλαίσιο της Δ.Δ. της Παλιεράκη (2014) σε σύγκριση με τη διατύπωση των νόμων από τον Τάσιο (2014), οι οποίες επικεντρώνονται κυρίως στον μηχανισμό τριβής. Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, τελικά, μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, έγινε προσπάθεια διερεύνησης και γενίκευσης της εξάρτησης των δεδομένων του νόμου

εξέλιξης του μηχανισμού τριβής υπό μονοτονική δράση, από τις ακόλουθες παραμέτρους: τον βαθμό τραχύτητας της διεπιφάνειας, το αρχικό άνοιγμα ρωγμής w_0 , την ορθή θλιπτική τάση στη διεπιφάνεια σ_c , και το ονομαστικό μέγεθος μεγίστου κόκκου αδρανών D_{max} .

Επισημαίνεται, ότι οι πληροφορίες που παρέχονται στο παρόν κείμενο προέκυψαν από τη μέχρι τώρα διερεύνηση του θέματος, η οποία ωστόσο συνεχίζεται και επομένως, οι πληροφορίες που παρέχονται, κατά τη συνέχιση της διερεύνησης, θα ανανεώνονται και θα βελτιώνονται.

When a repair or strengthening in building elements of existing Reinforced Concrete (R.C.) structures is done, the efficiency of the intervention and thus, improving the response of the whole construction, is determined by the effective shear transfer at the created interface between existing and added concrete. Moreover, the presence of shear transfer mechanisms is necessary, when a crack appears in the mass of R.C. building elements, which drastically reduces the resistance to shear force imposed along the crack.

Recognizing the importance of the subject, this thesis intends to investigate the shear transfer mechanisms mobilized along interfaces between existing and added concrete (in case of repaired/strengthened R.C. building elements) or cracked interfaces of R.C. building elements, which are subjected to monotonic or cyclic shear action. These mechanisms are, the friction, which is mobilized along the interface, if the interface is submitted to compression, and the dowel resistance of transversal steel bars, if they exist. The up to now investigation in this thesis, focused on the friction mechanism and particularly, through the literature review, an effort was made to enhance the reliability of the data concerning the concrete - to - concrete friction constitutive law under monotonic action, as the law is proposed by Tassios (2014).

For the approach of the subject, initially literature review was performed for the shear transfer mechanisms, through experimental and theoretical data provided by Tassios (2014), which refer to monotonic and cyclic actions. Subsequently, information was extracted about the shear transfer mechanisms mobilized along reinforced interfaces between existing and added concrete, under cyclic actions, through the Doctoral Thesis (PhD) of Palieraki (2014). Furthermore, with regard to the relationships of constitutive laws of shear transfer mechanisms, the modifications made in the PhD of Palieraki (2014) were defined, in comparison with the relationships proposed by Tassios (2014), and mainly focus on friction mechanism. Considering the above, finally, through literature review, an effort was made to investigate and generalize the dependence of data of concrete - to - concrete friction constitutive law under monotonic action, from the following parameters: the degree of the interface roughness, the initial

crack opening w_o , the normal compressive stress at the interface σ_c , and the maximum aggregate size D_{max} .

It should be noted, that the information provided to this thesis resulted from the up to now research on the subject, which however continues and therefore, information provided, during the continuation of the investigation, will be updated and improved.

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Κάθε επέμβαση σε υφιστάμενη κατασκευή Ωπλισμένου Σκυροδέματος (Ω.Σ.), με ή χωρίς βλάβες, σκοπεί στην εξυπηρέτηση του στόχου ανασχεδιασμού, υλοποιείται δε με την προσθήκη νέων υλικών ή στοιχείων σε υφιστάμενα δομικά στοιχεία. Για να είναι αποδοτική η επέμβαση και συνεπώς, να βελτιωθεί η συμπεριφορά του συνόλου της κατασκευής, απαιτείται να είναι αποτελεσματική η μεταφορά τέμνουσας στη διεπιφάνεια παλαιού – νέου σκυροδέματος που δημιουργείται. Μέσω της προσθήκης νέων υλικών ή στοιχείων σε υφιστάμενα δομικά στοιχεία θεωρείται, ότι αποκαθίσταται οιοσδήποτε μονολιθική συνεργασία παλαιών και νέων υλικών. Παρά ταύτα, λόγω των (μικρών, έστω) σχετικών μετακινήσεων στις διεπιφάνειες παλαιών/νέων υλικών, η μονολιθικότητα ως προς την αντίσταση κρίσιμων περιοχών ή την παραμόρφωση δομικών στοιχείων, ενδέχεται να μην είναι πλήρης.

Για τον υπολογισμό της διατμητικής αντίστασης που ενεργοποιείται σε μια διεπιφάνεια παλαιού – νέου σκυροδέματος, για την ανεκτή τιμή σχετικής ολίσθησης στη διεπιφάνεια, υπολογίζονται οι αντιστάσεις οι οποίες επιστρατεύονται απ' το σύνολο των διαθέσιμων στη διεπιφάνεια μηχανισμών, δηλαδή κατά περίπτωση: συνοχή σκυροδέματος προς σκυρόδεμα, όπου επιτρέπεται να λαμβάνεται υπόψη, συνοχή σκυροδέματος προς ρητίνη, τριβή σκυροδέματος προς σκυρόδεμα στην θλιβόμενη διεπιφάνεια, αντίσταση βλήτρων, αντίσταση συνδέσμων μεταξύ παλαιών και νέων οπλισμών. Επιτρέπεται ο υπολογισμός της συνολικής αντίστασης, αθροίζοντας τις μέγιστες τιμές αντίστασης του κάθε διαθέσιμου μηχανισμού, μειωμένες μέσω κατάλληλων συντελεστών συμμετοχής σημαντικά μικρότερων της μονάδας (KAN.ΕΠΕ., 2012).

Επιπλέον, η παρουσία μηχανισμών μεταφοράς τέμνουσας είναι αναγκαία, σε περίπτωση εμφάνισης ρωγμής μέσα στη μάζα στοιχείων Ω.Σ., η οποία μειώνει δραστικά την αντίσταση έναντι διατμητικής δύναμης παράλληλης προς τη ρωγμή. Στην περίπτωση αυτή, η αντίσταση έναντι επιβαλλόμενης διατμητικής δύναμης στο επίπεδο της διεπιφάνειας, η οποία προκαλεί σχετική ολίσθηση s των όψεων της ρωγμής, οφείλεται στην τριβή κατά μήκος της διεπιφάνειας, εάν η διεπιφάνεια θλίβεται, και στην αντίσταση βλήτρου των εγκάρσιων οπλισμών, εάν υπάρχουν. Πρόκειται για δύο μηχανισμούς πολύ

σημαντικούς, δεδομένου ότι χάρις σ' αυτούς, τα στοιχεία διαθέτουν σημαντική απομένουσα διατμητική αντοχή κατά μήκος της ρωγμής και οι ρωγμές συμμετέχουν στην κατανάλωση ενέργειας, κατά τη διάρκεια του σεισμού (Τάσιος, 2014). Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι στην περίπτωση επιβολής ανακυκλιζόμενων δράσεων σε μια κατασκευή, όπως είναι η κρίσιμη για τη χώρα μας δράση του σεισμού, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η εξασθένηση των ανωτέρω μηχανισμών κατά τη διάρκεια της ανακύκλωσης, διότι οδηγεί σε σημαντική μείωση της διατμητικής αντίστασης της διεπιφάνειας.

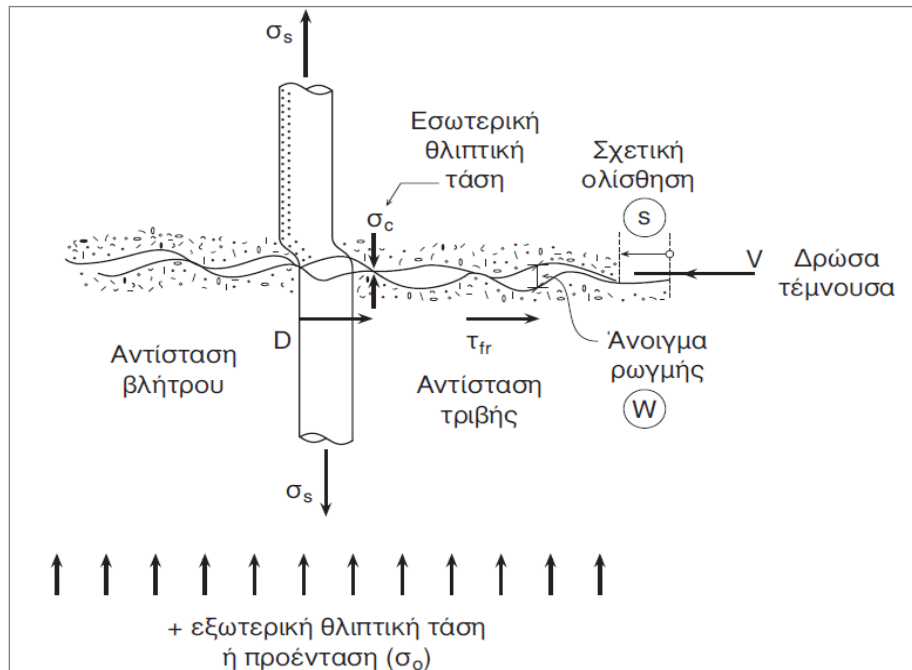
Για τη δημιουργία της καμπύλης αντιστάσεων τριβής σε σχέση με τις επιβαλλόμενες ολισθήσεις κατά μήκος μιας διατεμνόμενης ωπλισμένης διεπιφάνειας, σημαντική είναι η συμβολή της γνώσης του μηχανισμού συνάφειας χάλυβα και σκυροδέματος, μέσω της οποίας προκύπτει η εφελκυστική τάση των ράβδων οπλισμού συναρτήσει της εξόλκευσής τους, όταν στη διεπιφάνεια επιβάλλεται σχετική ολίσθηση s . Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι όταν στη διεπιφάνεια επιβάλλεται ολίσθηση s , οι εγκάρσιοι ράβδοι οπλισμού υποβάλλονται ταυτόχρονα σε τάσεις λόγω δράσης βλήτρου και εξόλκευσης, με αποτέλεσμα οι δύο μηχανισμοί να μην μπορούν να φθάσουν τις μέγιστες τιμές τους, οι οποίες θα ίσχυαν αν δρούσαν μόνοι τους. Στην περίπτωση αυτή, οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων βλήτρου και εξόλκευσης που μπορούν να αναλάβουν οι ράβδοι οπλισμού, υπολογίζονται από τη συνάρτηση αλληλόδρασης των μηχανισμών, όταν αυτή μοναδίζεται.

Στην παρούσα εργασία, αρχικά πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση για τους μηχανισμούς μεταφοράς τέμνουσας, μέσω πειραματικών και θεωρητικών στοιχείων που παρέχονται από τον Τάσιο (2014), και αφορούν σε μονοτονικές και ανακυκλιζόμενες δράσεις. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε μελέτη της εξέλιξης των μηχανισμών μεταφοράς τέμνουσας κατά μήκος ωπλισμένων διεπιφανειών παλαιού – νέου σκυροδέματος, υπό ανακυκλιζόμενες δράσεις, με βάση πληροφορίες που παρέχονται στη Δ.Δ. της Παλιεράκη (2014). Παράλληλα, όσον αφορά στους νόμους εξέλιξης των μηχανισμών, εντοπίστηκαν οι τροποποιήσεις που έγιναν στο πλαίσιο της Δ.Δ. της Παλιεράκη (2014) σε σύγκριση με τη διατύπωση των νόμων από τον Τάσιο (2014), οι οποίες επικεντρώνονται κυρίως στον μηχανισμό τριβής. Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, τελικά, μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, έγινε προσπάθεια περαιτέρω διερεύνησης και γενίκευσης της εξάρτησης των δεδομένων του νόμου εξέλιξης του μηχανισμού τριβής υπό μονοτονική δράση, από ορισμένες παραμέτρους.

Επισημαίνεται, ότι οι πληροφορίες που παρέχονται στο παρόν κείμενο προέκυψαν από τη μέχρι τώρα διερεύνηση του θέματος, η οποία ωστόσο συνεχίζεται

και επομένως, οι πληροφορίες που παρέχονται, κατά τη συνέχιση της διερεύνησης, θα ανανεώνονται και θα βελτιώνονται.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται μια ωπλισμένη διεπιφάνεια σκυροδέματος στην οποία επιβάλλεται διατμητική δύναμη, η οποία προκαλεί σχετική ολίσθηση s των όψεων της διεπιφάνειας, και έχει ως αποτέλεσμα την επιστράτευση της αντίστασης τριβής και της αντίστασης βλήτρου της εγκάρσιας ράβδου που διαπερνά τη διεπιφάνεια.



Σχήμα 1. Η επιστράτευση της αντίστασης τριβής και βλήτρου, όταν σε μια ωπλισμένη διεπιφάνεια σκυροδέματος επιβάλλεται διατμητική δύναμη (Τάσιος, 2014)

1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των μηχανισμών μεταφοράς τέμνουσας σε διεπιφάνειες στοιχείων Ω.Σ. που υποβάλλονται σε μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η μέχρι τώρα διερεύνηση επικεντρώθηκε στον μηχανισμό τριβής και συγκεκριμένα, μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, έγινε προσπάθεια αύξησης της αξιοπιστίας των δεδομένων που διέπουν τον καταστατικό νόμο εξέλιξης του μηχανισμού τριβής υπό μονοτονική δράση, όπως διατυπώνεται από τον Τάσιο (2014).

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση για τους μηχανισμούς που επιστρατεύονται σε διεπιφάνειες στοιχείων Ω.Σ. που υποβάλλονται σε διατμητική δράση, μέσω πειραματικών και θεωρητικών στοιχείων που παρέχονται

από τον Τάσιο (2014), και αφορούν σε μονοτονικές και ανακυκλιζόμενες δράσεις. Ακολούθως, αντλήθηκαν πληροφορίες για την εξέλιξη των μηχανισμών που ενεργοποιούνται σε ωπλισμένες διεπιφάνειες παλαιού – νέου σκυροδέματος κατά την ανακύκληση, μέσα από τη Δ.Δ. της Παλιεράκη (2014), και έγινε σύγκριση των νόμων που διέπουν την εξέλιξη των μηχανισμών, ανάμεσα στην περιγραφή τους από την Παλιεράκη (2014) και τη διατύπωσή τους από τον Τάσιο (2014). Οι τροποποιήσεις που έγιναν στο πλαίσιο της Δ.Δ. της Παλιεράκη (2014), επικεντρώνονται κυρίως στον μηχανισμό τριβής. Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, τελικά, μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, έγινε προσπάθεια περαιτέρω διερεύνησης της επίδρασης ορισμένων παραμέτρων στη διαμόρφωση του καταστατικού νόμου εξέλιξης του μηχανισμού τριβής, υπό μονοτονική δράση.

Η μέγιστη επιστρατευόμενη διατμητική τάση λόγω τριβής τ_u , στη γενική της μορφή, διατυπώνεται ως εξής: $\tau_u = \mu \cdot \sigma_c \Rightarrow \tau_u = \left[\mu_1 \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-k} \right] \cdot \sigma_c$, και ενεργοποιείται για ολίσθηση s_u . Με σχετική βιβλιογραφική αναζήτηση, έγινε προσπάθεια διερεύνησης και γενίκευσης της εξάρτησης των τιμών των σταθερών μ_1 , k και της ολίσθησης s_u , από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- τον βαθμό τραχύτητας,
- το αρχικό άνοιγμα ρωγμής w_o ,
- την ορθή θλιπτική τάση σ_c , και
- το ονομαστικό μέγεθος μεγίστου κόκκου αδρανών D_{max} .

Ακόμη, έγινε προσπάθεια διερεύνησης της σχέσης που περιγράφει την εξέλιξη του ανοίγματος ρωγμής w , σε σχέση με την επιβαλλόμενη ολίσθηση s , η οποία στη γενική της μορφή διατυπώνεται ως εξής: $w = w_1 \left(\frac{s}{s_1} \right)^\lambda$.

Η διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, αφορά στις εξής τρεις κατηγορίες διεπιφανειών σκυροδέματος:

- προεφελκυσμένες διεπιφάνειες που έχουν υποστεί ρηγμάτωση, λόγω δράσης εφελκυστικής δύναμης κάθετα στο επίπεδο ολίσθησης, στις οποίες επιβάλλεται κατόπιν μία ορθή θλιπτική τάση σ_c ,
- προδιατεμνόμενες διεπιφάνειες υπό σύγχρονη θλιπτική τάση σ_c , και
- απροδιάτμητες διεπιφάνειες παλαιού – νέου σκυροδέματος, στις οποίες επιβάλλεται ορθή θλιπτική τάση σ_c .

1.3 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία αποτελείται από έξι Κεφάλαια και στο τέλος της εργασίας επισυνάπτεται ένα ένθετο κείμενο. Το *Κεφάλαιο 1* περιλαμβάνει την Εισαγωγή, στην οποία προσεγγίζεται το θέμα της επιστράτευσης μηχανισμών μεταφοράς τέμνουσας σε διεπιφάνειες επισκευασμένων/ενισχυμένων στοιχείων Ω.Σ. ή σε ρηγματωμένες διεπιφάνειες στοιχείων Ω.Σ., οι οποίες υποβάλλονται σε μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη δράση διάτμησης. Επιπλέον, στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται ο σκοπός και η δομή της παρούσας εργασίας.

Στο *Κεφάλαιο 2*, περιγράφεται η διαδικασία ενεργοποίησης του μηχανισμού τριβής και παρέχονται πληροφορίες για τον μηχανισμό, μέσω πειραματικών και θεωρητικών στοιχείων που παρέχονται από τον Τάσιο (2014), και αφορούν σε μονοτονικές και ανακυκλιζόμενες δράσεις. Επιπλέον, παρέχονται πληροφορίες για την εξέλιξη του μηχανισμού τριβής κατά την ανακύκλιση, μέσα από τη Δ.Δ. της Παλιεράκη (2014).

Στο *Κεφάλαιο 3*, μέσω της βιβλιογραφικής διερεύνησης, επιδιώκεται η αύξηση της αξιοπιστίας των δεδομένων που διέπουν τον καταστατικό νόμο εξέλιξης του μηχανισμού τριβής υπό μονοτονική δράση, όπως διατυπώνεται από τον Τάσιο (2014). Λαμβάνονται υπόψη οι τροποποιήσεις που έγιναν στο πλαίσιο της Δ.Δ. της Παλιεράκη (2014), και επιδιώκεται η περαιτέρω διερεύνηση και γενίκευση της εξάρτησης των δεδομένων του νόμου, από τις ακόλουθες παραμέτρους: τον βαθμό τραχύτητας της διεπιφάνειας, το αρχικό άνοιγμα ρωγμής w_0 , την ορθή θλιπτική τάση στη διεπιφάνεια σ_c , και το ονομαστικό μέγεθος μεγίστου κόκκου αδρανών D_{max} .

Στο *Κεφάλαιο 4*, περιγράφεται η συμβολή της γνώσης του μηχανισμού της συνάφειας χάλυβα και σκυροδέματος, στη δημιουργία της καμπύλης αντιστάσεων τριβής σε σχέση με τις επιβαλλόμενες ολισθήσεις κατά μήκος μιας ωπλισμένης διεπιφάνειας. Επιπλέον, παρουσιάζεται η σχέση που συνδέει την εφελκυστική τάση μιας ράβδου οπλισμού με την εξόλκευσή της, και η εξέλιξη των εφελκυστικών τάσεων στην περίπτωση επιβολής σεισμικώς ετερόσημων μετακινήσεων.

Στο *Κεφάλαιο 5*, παρουσιάζεται η σχέση που προσδιορίζει τη μέγιστη αντίσταση βλήτρου και το διάγραμμα αντίστασης βλήτρου – σχετικής μετακίνησης. Ακόμη, παρουσιάζεται η επιρροή της ανακύκλισης στον μηχανισμό βλήτρου και το προσομοίωμα της συμπεριφοράς του μηχανισμού, κατά την επιβολή ανακυκλιζόμενων μετακινήσεων σταθερού εύρους. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στην αλληλόδραση των

δυνάμεων βλήτρου και εξόλκευσης των ράβδων οπλισμού που διαπερνούν τη διεπιφάνεια.

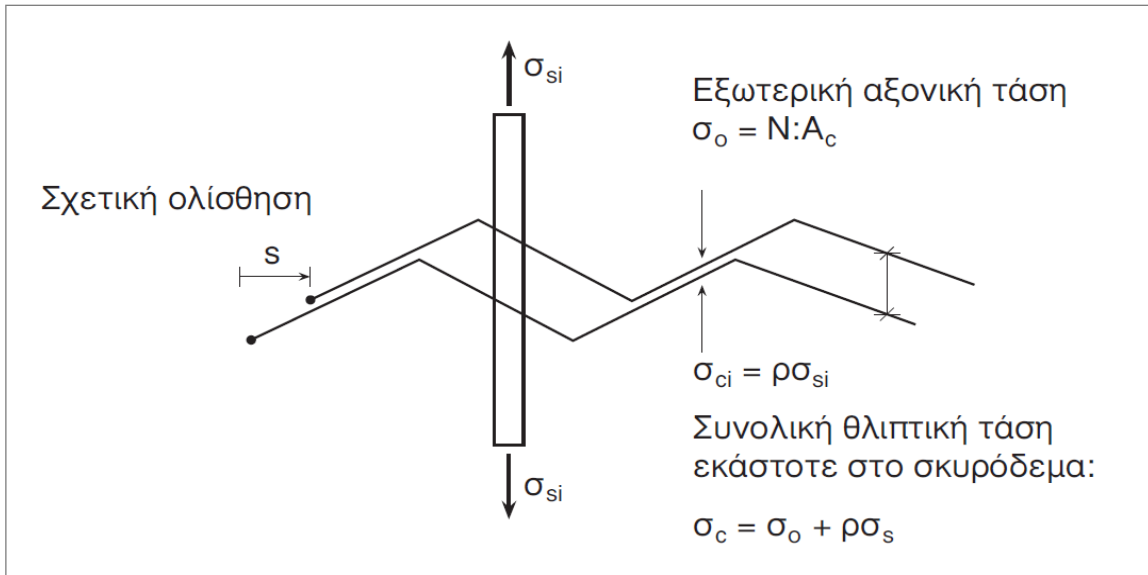
Το *Κεφάλαιο 6* περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μέχρι τώρα διερεύνηση του θέματος, η οποία ωστόσο συνεχίζεται.

Στο ένθετο κείμενο που επισυνάπτεται στο τέλος της εργασίας, πραγματοποιείται συνέχιση της διερεύνησης, και διατυπώνονται κάποιες προτάσεις για την υπολογιστική διερεύνηση του θέματος.

Όπως αναφέρθηκε στην Εισαγωγή, ο μηχανισμός τριβής αποτελεί τον έναν από τους δύο μηχανισμούς μεταφοράς τέμνουσας σε διεπιφάνειες στοιχείων Ω.Σ., κατά μήκος των οποίων επιβάλλεται διατμητική δύναμη. Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται η διαδικασία ενεργοποίησης του μηχανισμού τριβής και παρέχονται πληροφορίες για τον μηχανισμό, μέσω πειραματικών και θεωρητικών στοιχείων που αφορούν τόσο σε μονοτονικές, όσο και ανακυκλιζόμενες δράσεις. Επιπλέον, παρέχονται πληροφορίες για την εξέλιξη του μηχανισμού τριβής κατά την ανακύκληση, μέσα από τη Δ.Δ. της Παλιεράκη (2014). Λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες που αναφέρονται στο κεφάλαιο αυτό, εν συνεχεία, επιδιώκεται η διερεύνηση της επίδρασης ορισμένων παραμέτρων στη διαμόρφωση του καταστατικού νόμου που διέπει την εξέλιξη του μηχανισμού τριβής υπό μονοτονική δράση, όπως διατυπώνεται από τον Τάσιο (2014).

2.1 ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΡΙΒΗΣ

Ο μηχανισμός τριβής επιστρατεύεται είτε χάρη σε θλιπτικό φορτίο ασκούμενο κάθετα στη ρωγμή (ή χάρη σε δύναμη προεντάσεως), είτε χάρη στην εμποδιζόμενη διόγκωση, w , των χειλέων της ρωγμής (Σχήμα 2): Πράγματι, λόγω της τραχύτητας των χειλέων της «ρωγμής» (η οποία οφείλεται σε προεξέχοντα τμήματα τσιμεντοπολτού και σε προεξέχοντα αδρανή), οποιαδήποτε σχετική ολίσθηση των δύο επιφανειών της ρωγμής προκαλεί και μια απομάκρυνσή τους, αυξάνοντας έτσι το άνοιγμα της ρωγμής, w . Όμως, η αύξηση του ανοίγματος της ρωγμής (άρα και η μήκυνση των εγκάρσιων ράβδων που τη διαπερνούν), προκαλεί την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων, σ_s , στις ράβδους του οπλισμού. Επομένως, επειδή το σύστημα ισορροπεί, ασκούνται στο σκυρόδεμα (στη γειτονιά των ράβδων) και θλιπτικές τάσεις $\sigma_c (= \rho\sigma_s)$. Αυτές οι θλιπτικές τάσεις, πολλαπλασιαζόμενες μ' ένα συντελεστή τριβής « μ » (χαρακτηριστικό της τραχύτητας της διεπιφάνειας), δίνουν πρόσθετη τ_{fr} , η οποία αποτελεί τη συμμετοχή του μηχανισμού στη μεταφορά της τέμνουσας (Τάσιος, 2014).



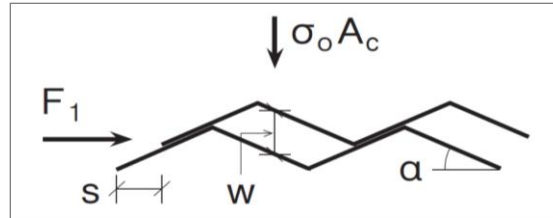
Σχήμα 2. Επιστράτευση του μηχανισμού τριβής, χάρη στην εξωτερική θλιπτική τάση και την εμποδιζόμενη διόγκωση w των χηλίων της ρωγμής (Τάσιος, 2014)

2.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΤΡΙΒΗΣ, ΥΠΟ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ

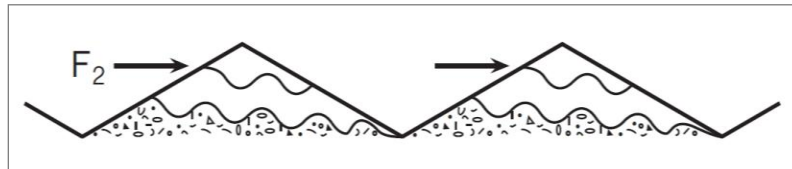
2.2.1 Η μηχανική της τριβής

Κατά την ολίσθηση στη διεπιφάνεια, καταναλίσκεται έργο δύο κατηγοριών (Τάσιος, 2014):

- Έργο διαστολικότητας, κατά την κινηματική υπέρβαση των εξαρμάτων (θεωρουμένων ως απολύτως στερεών) (Σχήμα 3). Το έργο της διατμητικής δύναμης F_1 , είναι ίσο με το έργο της αξονικής δύναμης $\sigma_o A_c$. Στην αρχή ($s <$), έως ότου να υπερπηδηθούν μικροεξάρματα, η ενεργός γωνία « α » είναι μεγαλύτερη. Αργότερα ($s >$), μετά από κάποιο σημείο, η ενεργός γωνία « α » αμβλύνεται σταδιακά.
- Έργο διατμητικής παραμόρφωσης και θραύσης των εξαρμάτων (Σχήμα 4).



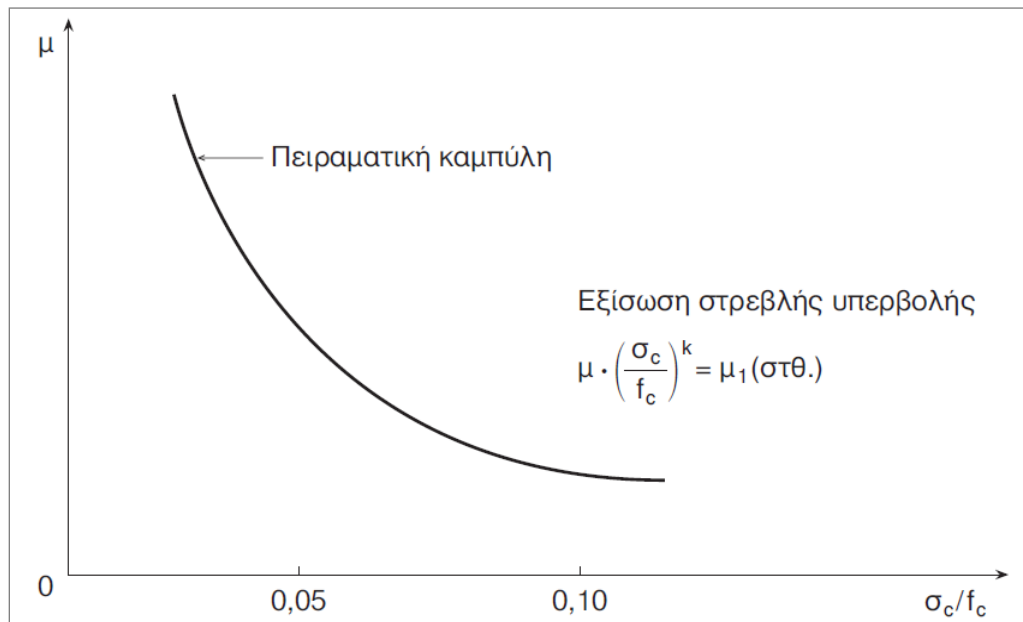
Σχήμα 3. Έργο διαστολικότητας (Τάσιος, 2014)



Σχήμα 4. Έργο διατμητικής παραμόρφωσης (Τάσιος, 2014)

2.2.2 Ο ρόλος της ορθής τάσης στη διαμόρφωση του συντελεστή τριβής

Η αύξηση της ορθής τάσης προκαλεί θραύσεις αιχμών (διάτμηση και σύνθλιψη), δηλαδή μείωση της «γωνίας αδρότητας», «α». Άρα, ο συντελεστής τριβής μειώνεται γρήγορα με την αύξηση της ορθής τάσης, σ_c , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5 (Τάσιος, 2014).



Σχήμα 5. Μείωση του συντελεστή τριβής μ , με την αύξηση της ορθής τάσης σ_c (Τάσιος, 2014)

2.2.3 Θεωρητική διερεύνηση της σχέσης $\mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c}\right)^k = \mu_1$, για αδρομερή διεπιφάνεια σκυροδέματος προς σκυρόδεμα

Θα μπορούσε καταρχήν να γίνει δεκτό ότι, για $\sigma_c = f_c$, το σκυρόδεμα θραύεται τοπικώς και «λειοτριβείται» – οπότε, συμπεριφερόμενο τοπικώς σαν λεπτή άμμος, $\varphi \approx 25^\circ$, παρουσιάζει συντελεστή τριβής $\mu_1 = \tan 25^\circ \approx 0,44$, τιμή που μετρήθηκε πειραματικά για «λείες» διεπιφάνειες σκυροδέματος. Προσδιορίστηκε λοιπόν έτσι, η τιμή της πρώτης σταθεράς μ_1 . Επομένως, γενικότερα (Τάσιος, 2014):

$$\mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c}\right)^k \cong 0,44 \quad (1)$$

Εδώ, ωστόσο, είναι αναγκαία μια ουσιώδης παρατήρηση: Η τιμή του μ_1 οφείλει να περιγράφει και την κατάσταση αδρομέρειας της διεπιφάνειας. Προς τούτο, για διεπιφάνειες που προκαλούνται από «εσωτερικές» ρωγμές σκυροδέματος (ή για αμμοβολημένες εξωτερικές επιφάνειες σκυροδέματος που θα δεχθούν στρώση νέου σκυροδέματος), η κύρια αιτία διαφοροποίησης αδρότητας είναι το μέγεθος των κόκκων των αδρανών που προεξέχουν εν μέρει. Ελλείψει ακριβέστερων πειραματικών δεδομένων, θα γίνει δεκτό ότι ο σχετικός μειωτικός συντελεστής του μ_1 για σκυροδέματα με μέγιστο κόκκο αδρανούς D_{max} , ισούται χοντρικά με:

$$\sqrt[4]{\frac{D_{max}}{D_o}} \leq 1 \quad (2)$$

όπου: $D_o = 30 \text{ mm}$.

Η επιβεβαίωση της ανωτέρω έκφρασης διερευνήθηκε μέσω του Σχήματος 43 (σελ. 89), με αποτελέσματα έρευνας των Walraven and Reinhardt (1981), για διάμετρο μέγιστου αδρανούς $D_{max} = 16 \text{ mm}$, αρχικό άνοιγμα ρωγμής $w_o = 0,2$ έως $0,5 \text{ mm}$ και επιστρατευόμενη διατμητική τάση $\tau = 2$ έως 5 MPa . Η διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, παρουσιάζεται στις σελ. 94, 95.

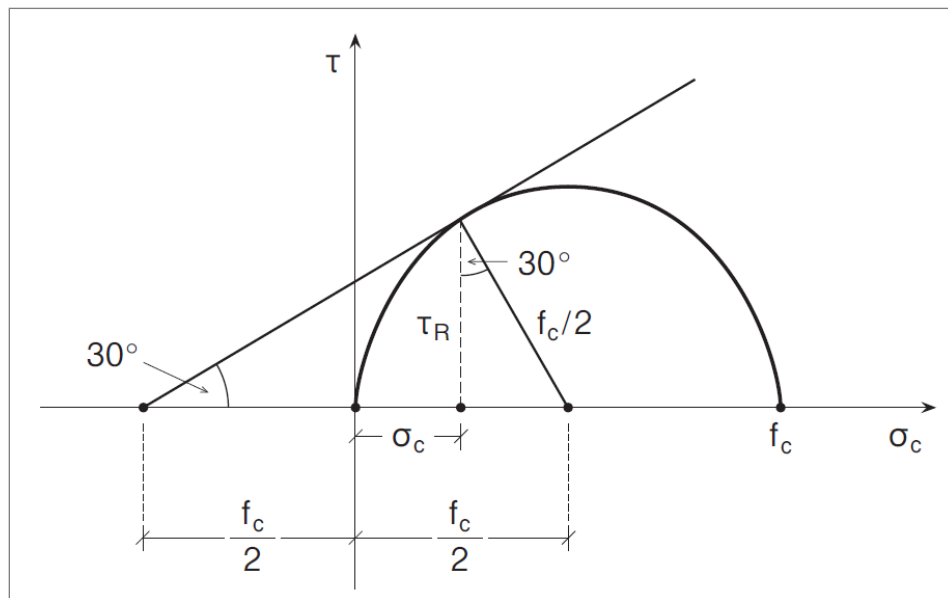
(Σημείωση: Μια ορθότερη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε για την επίδραση της διαμέτρου του μέγιστου κόκκου αδρανούς D_{max} στις τιμές του μ_1 , παρουσιάζεται στο ένθετο κείμενο.)

Θεωρώντας, τώρα, για το στερεό σκυρόδεμα γωνία τριβής τουλάχιστον ίση με $\varphi = 30^\circ$, υπολογίζεται, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6, η κρίσιμη διατμητική τάση:

$$\tau_R = \frac{f_c}{2} \cos 30^\circ = 0,44f_c \quad (3)$$

και η αντίστοιχη επί της κρίσιμης επιφάνειας, δρώσα ορθή τάση:

$$\sigma_c = \frac{f_c}{2} - \frac{f_c}{2} \sin 30^\circ = 0,25f_c \quad (4)$$



Σχήμα 6. Υπολογισμός της κρίσιμης διατμητικής τάσης, τ_R και της αντίστοιχης δρώσας ορθής τάσης, σ_c , για γωνία τριβής ίση με $\varphi = 30^\circ$ (Τάσιος, 2014)

Αναζητούνται όμως ασφαλείς τιμές αντίστασης τριβής πριν απ' αυτή τη θραύση. Υιοθετείται λοιπόν, μια μειωμένη μέγιστη τιμή τριβής («διατμητικής αντίστασης») στην κρίσιμη διεπιφάνεια, η τιμή $\tau_u \cong \frac{2}{3} \tau_R = 0,3f_c$, οπότε:

$$\mu_R = \tau_u : \sigma_c = 0,3f_c : 0,25f_c = 1,2 \quad (5)$$

Επομένως, απ' την εξίσωση $\mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c}\right)^k = 0,44$, προκύπτει:

$$1,2 \left(\frac{0,25f_c}{f_c}\right)^k = 0,44 \quad \text{ή} \quad 0,25^k = 0,37 \quad \text{ή} \quad k \approx \frac{2}{3} \quad (6)$$

Άρα, τελικώς, μια ασφαλής συσχέτιση « μ » και « σ_c » μπορεί να δοθεί απ' την έκφραση (Τάσιος, 2014):

$$\mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c}\right)^{2/3} = 0,44 \quad (7)$$

η οποία έχει επιβεβαιωθεί και πειραματικώς (Tassios T., Vintzileou E.: «Concrete-to-concrete friction», ASCE, Str. Eng., April 1987). Ωστόσο, η έκφραση αυτή δεν μπορεί να έχει απόλυτη γενικότητα, διότι οι τιμές των μ_1 και k παρουσιάζουν ποικιλότητα για κάθε κατηγορία και σύνθεση σκυροδέματος. Πράγματι, στα προηγούμενα έχουν γίνει υποθέσεις, οι οποίες δεν μπορούν να έχουν «γενική» ισχύ:

- Γωνία τριβής θραυσμένου σκυροδέματος (όταν $\sigma_c = f_c$): Δεν είναι κατ' ανάγκη ακριβής η τιμή $\varphi_u = 25^\circ$,
- Γωνία τριβής ακέραιου σκυροδέματος: Η τιμή $\varphi_o = 30^\circ$ είναι μάλλον μικρή,
- Αλλά και ο συντελεστής ασφαλείας που λήφθηκε, $\gamma_o = 1,5 (= 3/2)$, έχει έναν βαθμό αυθαιρεσίας.

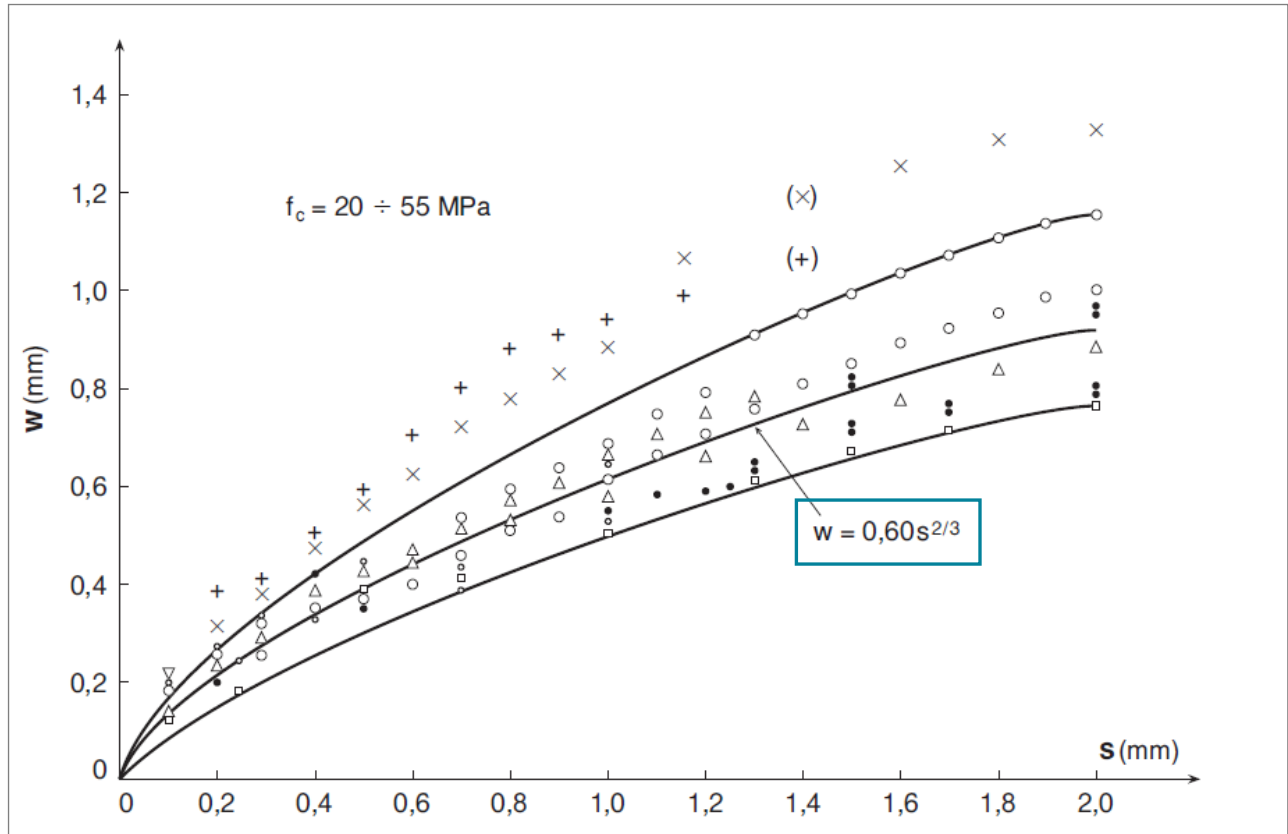
Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε μια διερεύνηση για $\varphi_u = 25 - 30^\circ$, $\varphi_o = 30 - 40^\circ$ και $\gamma_o = 1,5 - 2$, η οποία παρέχει ενδείξεις αντίστοιχου εύρους τιμών των μ_1 και k , στη θεωρητική τους φάση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

φ_u (σε °)	φ_o (σε °)	γ_o	μ_1	τ_R/f_c	σ_c/f_c	τ_u/f_c	μ_R	k (δεκαδική μορφή)	k (κλασματική μορφή)
25	30	1,5	0,47	0,43	0,25	0,29	1,15	0,654	2/3
25	32	1,5	0,47	0,42	0,24	0,28	1,20	0,654	2/3
25	34	1,5	0,47	0,41	0,22	0,28	1,25	0,654	2/3
25	36	1,5	0,47	0,40	0,21	0,27	1,31	0,653	2/3
25	38	1,5	0,47	0,39	0,19	0,26	1,37	0,652	2/3
25	40	1,5	0,47	0,38	0,18	0,26	1,43	0,650	2/3
25	30	2,0	0,47	0,43	0,25	0,22	0,87	0,447	4/9
25	32	2,0	0,47	0,42	0,24	0,21	0,90	0,456	1/2
25	34	2,0	0,47	0,41	0,22	0,21	0,94	0,464	1/2
25	36	2,0	0,47	0,40	0,21	0,20	0,98	0,471	1/2
25	38	2,0	0,47	0,39	0,19	0,20	1,03	0,478	1/2
25	40	2,0	0,47	0,38	0,18	0,19	1,07	0,483	1/2
28	30	1,5	0,53	0,43	0,25	0,29	1,15	0,559	5/9
28	32	1,5	0,53	0,42	0,24	0,28	1,20	0,564	4/7
28	34	1,5	0,53	0,41	0,22	0,28	1,25	0,567	4/7
28	36	1,5	0,53	0,40	0,21	0,27	1,31	0,570	4/7
28	38	1,5	0,53	0,39	0,19	0,26	1,37	0,572	4/7
28	40	1,5	0,53	0,38	0,18	0,26	1,43	0,574	4/7
28	30	2,0	0,53	0,43	0,25	0,22	0,87	0,352	1/3
28	32	2,0	0,53	0,42	0,24	0,21	0,90	0,365	3/8
28	34	2,0	0,53	0,41	0,22	0,21	0,94	0,377	3/8
28	36	2,0	0,53	0,40	0,21	0,20	0,98	0,388	2/5
28	38	2,0	0,53	0,39	0,19	0,20	1,03	0,398	2/5
28	40	2,0	0,53	0,38	0,18	0,19	1,07	0,407	2/5

φ_u (σε °)	φ_o (σε °)	γ_o	μ_1	τ_R/f_c	σ_c/f_c	τ_u/f_c	μ_R	k (δεκαδική μορφή)	k (κλασματική μορφή)
30	30	1,5	0,58	0,43	0,25	0,29	1,15	0,500	1/2
30	32	1,5	0,58	0,42	0,24	0,28	1,20	0,507	1/2
30	34	1,5	0,58	0,41	0,22	0,28	1,25	0,513	1/2
30	36	1,5	0,58	0,40	0,21	0,27	1,31	0,518	1/2
30	38	1,5	0,58	0,39	0,19	0,26	1,37	0,523	1/2
30	40	1,5	0,58	0,38	0,18	0,26	1,43	0,526	1/2
30	30	2,0	0,58	0,43	0,25	0,22	0,87	0,292	2/7
30	32	2,0	0,58	0,42	0,24	0,21	0,90	0,308	1/3
30	34	2,0	0,58	0,41	0,22	0,21	0,94	0,323	1/3
30	36	2,0	0,58	0,40	0,21	0,20	0,98	0,336	1/3
30	38	2,0	0,58	0,39	0,19	0,20	1,03	0,348	1/3
30	40	2,0	0,58	0,38	0,18	0,19	1,07	0,359	1/3

Πίνακας 1. Υπολογισμός εύρους τιμών των μ_1 και k , για ορισμένες τιμές των γωνιών τριβής θραυσμένου φ_u και ακέραιου φ_o σκυροδέματος, και του συντελεστή ασφαλείας γ_o

2.2.4 Σχέση μεταξύ ολισθήσεως και ανοίγματος ρωγμής, υπό μονοτονική δράση (διαστολικότητα, «dilatancy»)



Σχήμα 7. Σχέση μεταξύ ολισθήσεως και ανοίγματος ρωγμής, υπό μονοτονική δράση (Τάσιος, 2014)

Για την χάραξη του διαγράμματος του Σχήματος 7 χρησιμοποιήθηκαν αποτελέσματα από διάφορες πηγές (Βιντζηλαίου, 1978).

Παρατηρείται μικρή σχετικώς διασπορά των αποτελεσμάτων. Η σχέση μεταξύ ολισθήσεως και ανοίγματος ρωγμής μοιάζει να είναι μια «σταθερά» των διεπιφανειών, εξαρτώμενη απ' την τραχύτητά τους (Τάσιος, 2014), και ανεξάρτητη από παραμέτρους, όπως:

- η γεωμετρία των δοκιμίων,
- ο τρόπος φορτίσεως,
- η αντοχή του σκυροδέματος (εντός των ορίων που αναφέρονται στο Σχήμα 7), κ.λπ.

Από το ανωτέρω διάγραμμα, προσδιορίστηκαν οι εξισώσεις των καμπυλών που προσαρμόζονται στα σημεία (x) και (□), ώστε να υπάρχει μια αντίληψη των αναμενόμενων μεταβολών των σταθερών της έκφρασης που περιγράφει την εξέλιξη του ανοίγματος ρωγμής w , σε σχέση με την επιβαλλόμενη ολίσθηση s , η οποία στη γενική της μορφή, διατυπώνεται ως εξής:

$$w = w_1 \left(\frac{s}{s_1} \right)^\lambda \quad (8)$$

Οι τιμές του ανοίγματος ρωγμής w , σε σχέση με την επιβαλλόμενη ολίσθηση s , οι οποίες προέκυψαν γραφικά από το ανωτέρω διάγραμμα για τα σημεία (x) και (□), παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Σημείο (x)			Σημείο (□)		
A/A	s (mm)	w (mm)	A/A	s (mm)	w (mm)
1	0,20	0,31	1	0,10	0,12
2	0,29	0,38	2	0,25	0,18
3	0,40	0,47	3	0,50	0,39
4	0,50	0,56	4	0,70	0,41
5	0,60	0,62	5	1,00	0,50
6	0,70	0,72	6	1,30	0,61
7	0,80	0,77	7	1,50	0,67
8	0,90	0,83	8	1,70	0,71
9	1,00	0,88	9	2,00	0,77
10	1,16	1,06			
11	1,40	1,19			
12	1,60	1,26			
13	1,80	1,31			
14	2,00	1,32			

Πίνακας 2. Οι τιμές του ανοίγματος ρωγμής w , σε σχέση με την επιβαλλόμενη ολίσθηση s , για τα σημεία (x) και (□) του Σχήματος 7

Οι εξισώσεις των καμπυλών που προσαρμόζονται στα δεδομένα του ανωτέρω πίνακα (σημεία (x) και (□)), και περιγράφουν την τάση αύξησης του ανοίγματος ρωγμής w , σε σχέση με την επιβαλλόμενη ολίσθηση s , διατυπώνονται ακολούθως, μέσω των σχέσεων (9) και (10). Το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών των τιμών του ανοίγματος ρωγμής w , που προκύπτουν μεταξύ των ακόλουθων σχέσεων και από τον Πίνακα 2, για τα σημεία (x) και (□), είναι αντίστοιχα $\sum_{i=1}^{14}(v_i)^2 = 0,023 \text{ mm}^2$ και $\sum_{i=1}^9(v_i)^2 = 0,007 \text{ mm}^2$.

- Σημείο (x):

$$w \cong 0,9 \cdot s^{2/3}$$

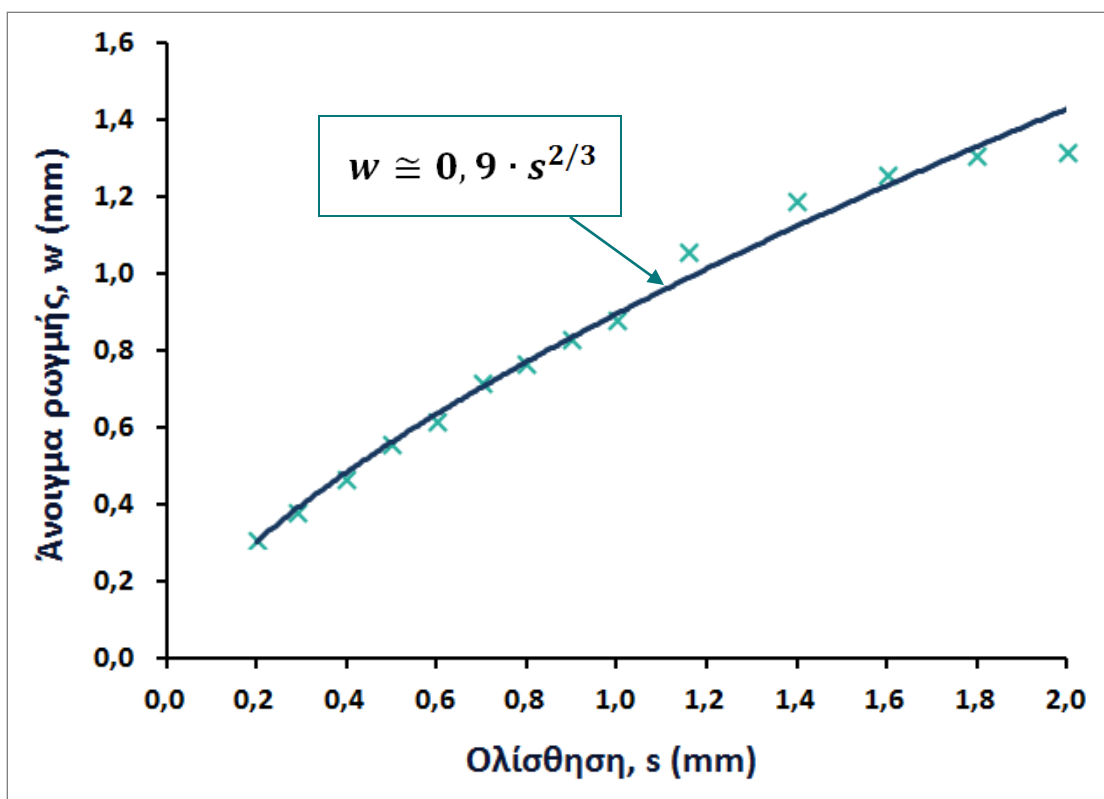
(9)

- Σημείο (□):

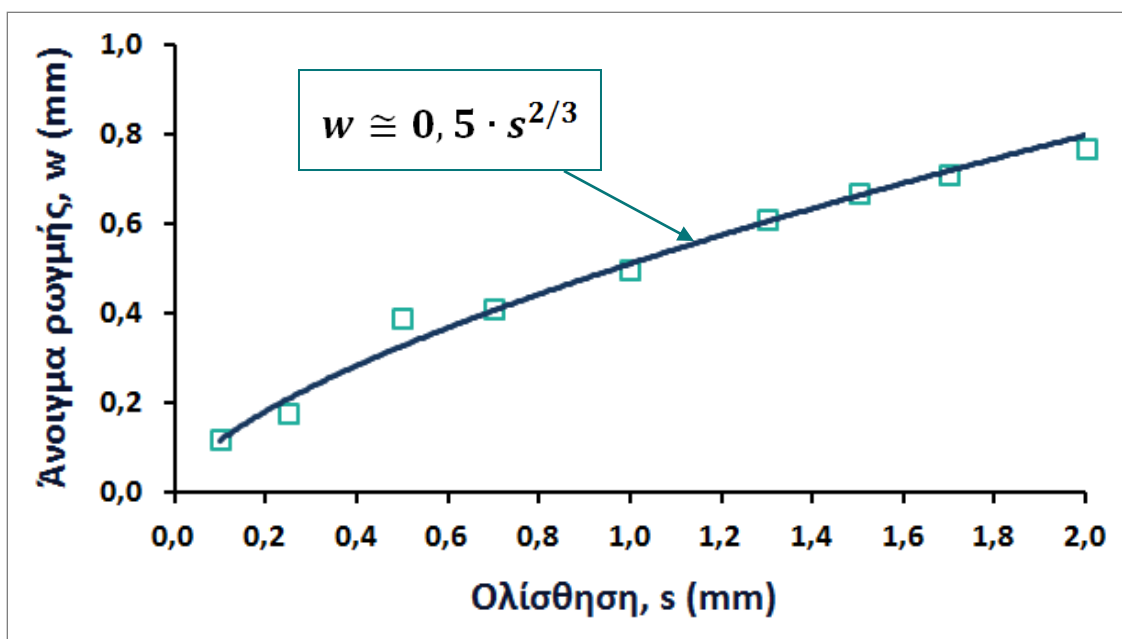
$$w \cong 0,5 \cdot s^{2/3}$$

(10)

Η μεταβολή των τιμών του ανοίγματος ρωγμής w , σε σχέση με την επιβαλλόμενη ολίσθηση s , για τα δύο σύνολα δεδομένων παρουσιάζεται γραφικά στα Σχήματα 8 και 9.

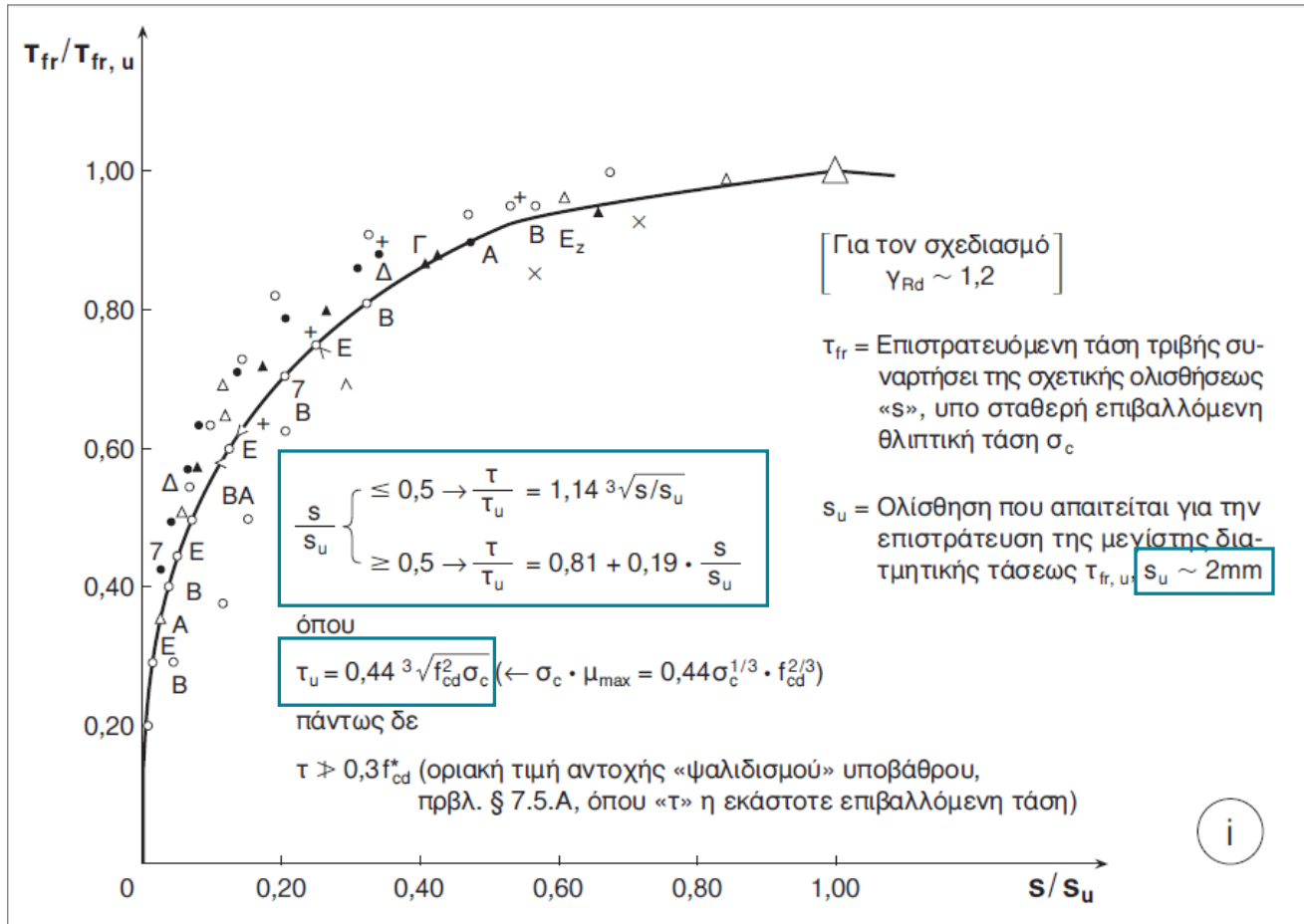


Σχήμα 8. Γραφική απεικόνιση της μεταβολής των τιμών του ανοίγματος ρωγμής w , σε σχέση με την επιβαλλόμενη ολίσθηση s , για τα σημεία (x)



Σχήμα 9. Γραφική απεικόνιση της μεταβολής των τιμών του ανοίγματος ρωγμής w , σε σχέση με την επιβαλλόμενη ολίσθηση s , για τα σημεία (\square)

2.2.5 Σχέση τ/s για αδρομερή διεπιφάνεια σκυροδέματος προς σκυρόδεμα, υπό ορθή τάση σ_c , για μονοτονική δράση



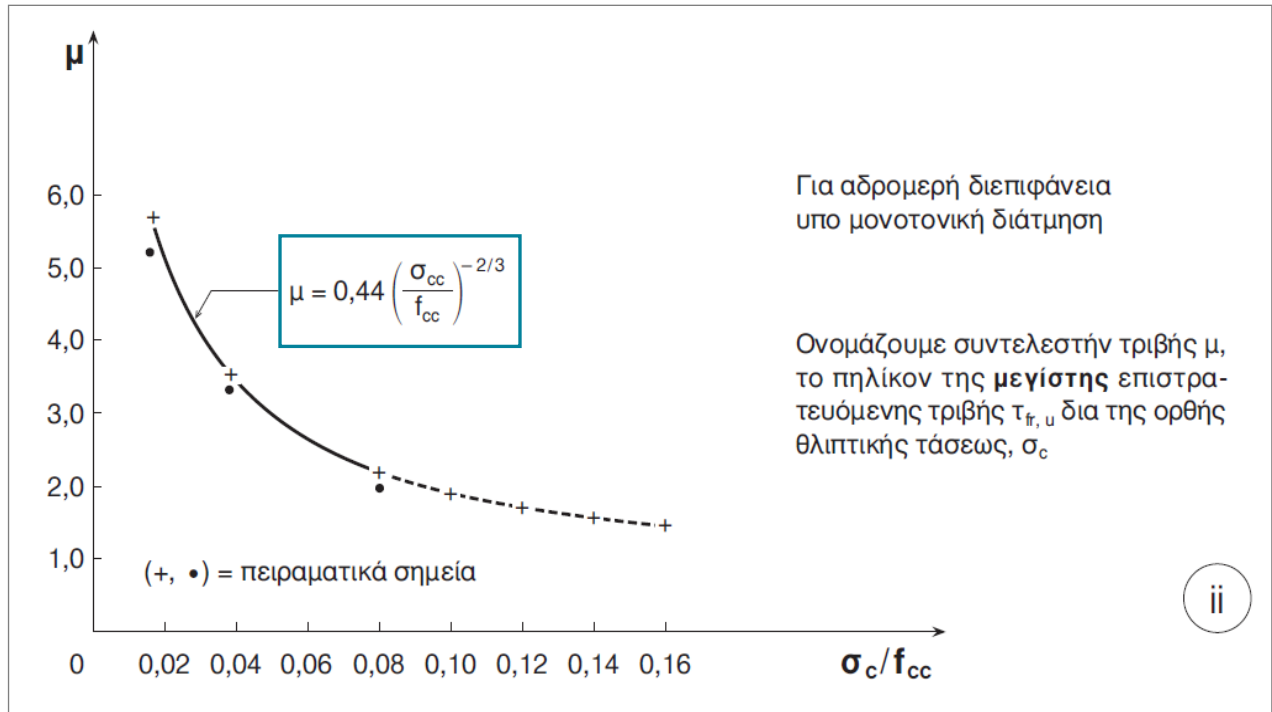
Σχήμα 10. Υπολογισμός της επιστρατευόμενης τάσης τριβής τ συναρτήσει της σχετικής ολίσθησεως s , για αδρομερή διεπιφάνεια, υπό ορθή τάση σ_c , για μονοτονική δράση (Τάσιος, 2014)

Στην αναλυτική διερεύνηση που θ' ακολουθήσει στην παρούσα εργασία, η βασική εξίσωση:

$$\text{για } \frac{s}{s_u} \leq 0,5 \rightarrow \frac{\tau}{\tau_u} = a \cdot \sqrt[3]{s/s_u}, \quad (11)$$

$$\text{και } \tau_u = \mu_1 \cdot f_c^k \cdot \sigma_c^{1-k}, \quad (12)$$

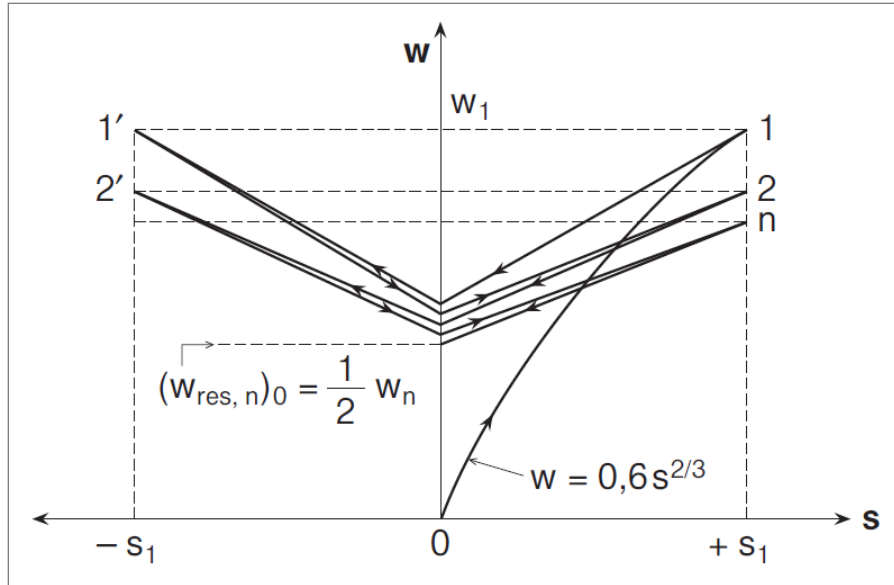
θα εφαρμοσθεί για συνδυασμούς τιμών a, μ_1, k .



Σχήμα 11. Υπολογισμός του συντελεστή τριβής μ , για αδρομερή διεπιφάνεια, υπό μονοτονική διάτμηση (Τάσιος, 2014)

2.2.6 Εξέλιξη του ανοίγματος ρωγμής κατά την ανακύκλωση των ολισθήσεων τριβής

Όταν επιβάλλεται ανακυκλιζόμενη δράση, κατά την αναστροφή της ολίσθησης, το τριμμένο υλικό που έχει συγκεντρωθεί μέσα στη ρωγμή, παραμένει παγιδευμένο. Έτσι, έστω κι όταν μηδενισθεί η ολίσθηση, η ρωγμή παρουσιάζει «παραμένον» άνοιγμα $w_{res} \approx w/2$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12.



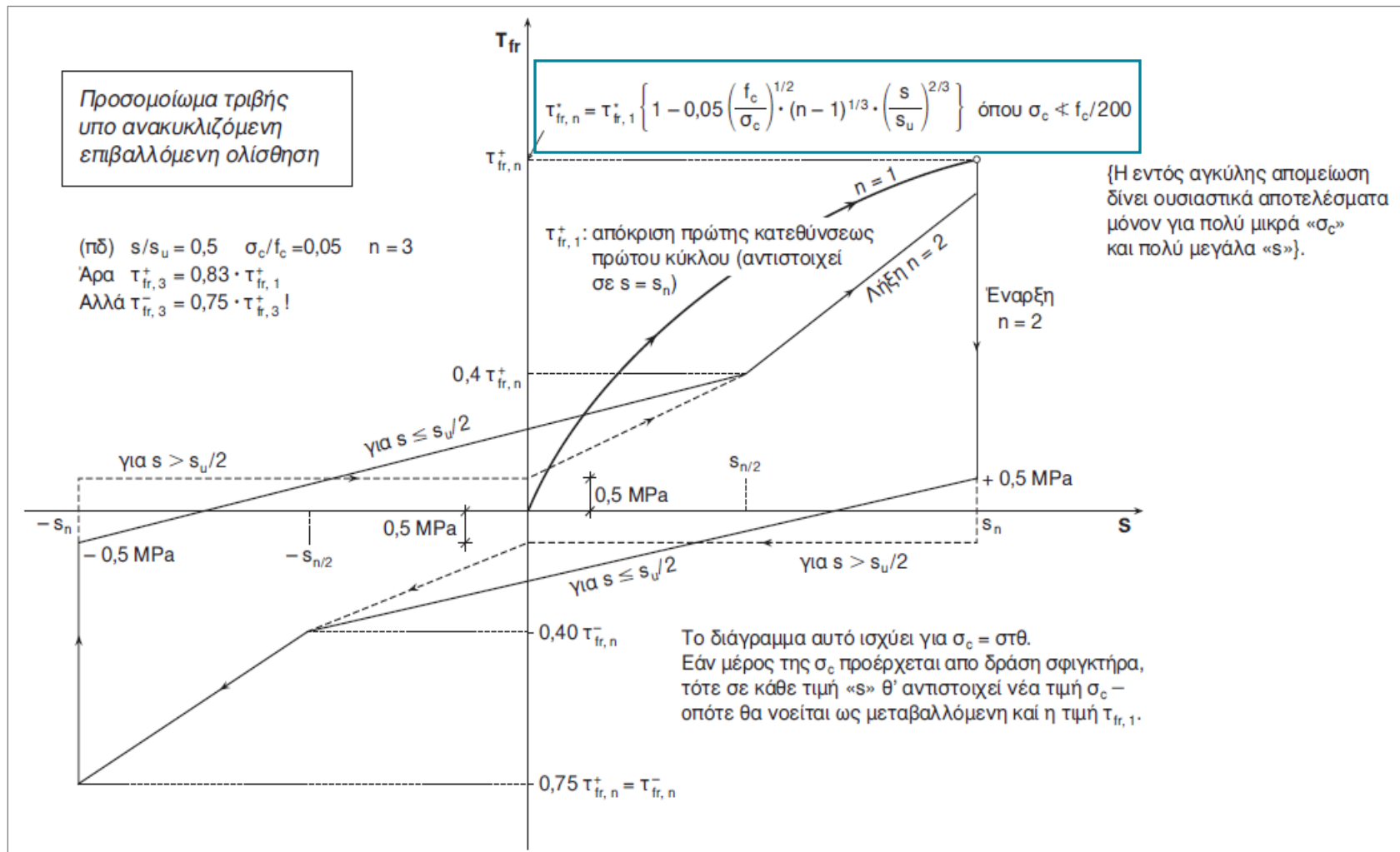
Σχήμα 12. Παραμένον άνοιγμα ρωγμής κατά την ανακύκλωση των ολισθήσεων τριβής (Τάσιος, 2014)

Απλοποιητικά, για κάθε κύκλο « n » είναι δυνατό να λαμβάνεται (Τάσιος, 2014):

$$(w_{res,n})_s = w_1(0,50 - 0,04\sqrt{n-1}) \cdot (1 + \frac{s}{s_1}) \quad (13)$$

Γίνεται έτσι φανερό, ότι η τάση εξόλκευσης του εγκάρσιου οπλισμού, θα παραμένει εφελκυστική – ακόμη κι όταν αναιρείται τελείως η αρχική ολίσθηση « s_1 ».

2.2.7 Προσομοίωμα τριβής υπό ανακυκλιζόμενη επιβαλλόμενη ολίσθηση



Σχήμα 13. Προσομοίωμα τριβής υπό ανακυκλιζόμενη επιβαλλόμενη ολίσθηση (Τάσιος, 2014)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 13, όταν επιβάλλεται ανακυκλιζόμενη δράση, η απόκριση κατά τη δεύτερη διεύθυνση φόρτισης, είναι μικρότερη κατά τον πρώτο κύκλο. Επιπλέον, υπάρχει σημαντική μείωση της απόκρισης με την ανακύκλιση, ιδίως μεταξύ 1^{ου} και 2^{ου} κύκλου. Με την αποφόρτιση, η μείωση της ολίσθησης είναι πρακτικώς μηδενική, δηλαδή ο κλάδος αποφόρτισης « $\tau \rightarrow 0$ » είναι κατακόρυφος (Τάσιος, 2014).

2.3 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΡΩΓΜΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΡΙΒΗΣ, ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ Δ.Δ. ΤΗΣ Παλιεράκη (2014)

2.3.1 Το αντικείμενο της Διδακτορικής Διατριβής

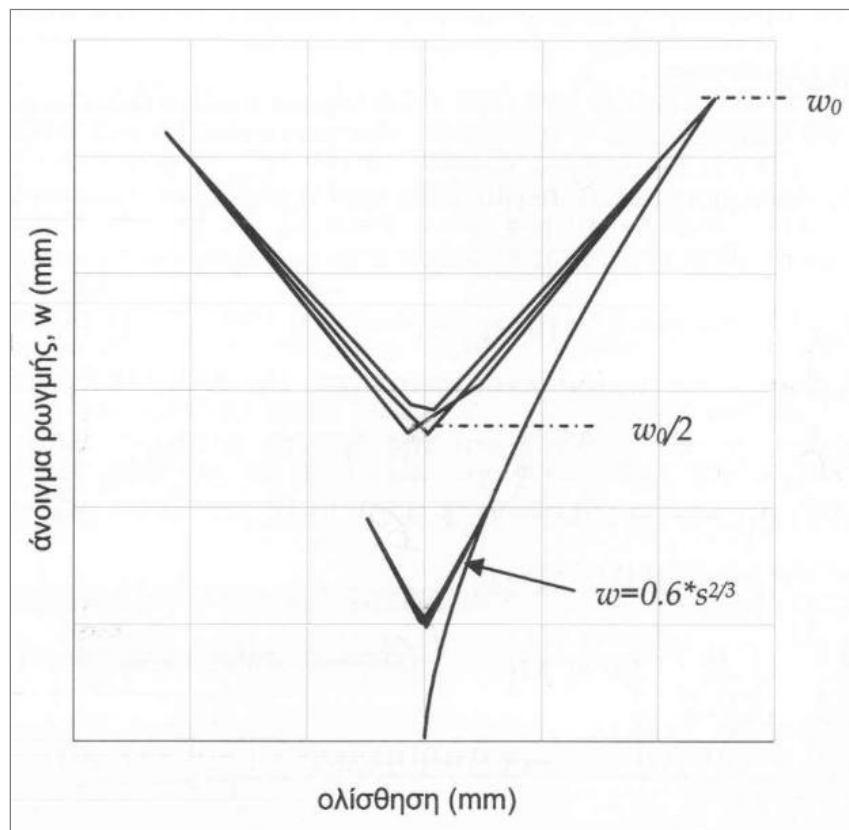
Το αντικείμενο της Δ.Δ. είναι η μελέτη των μηχανισμών (τριβή και δράση βλήτρου του οπλισμού που τέμνει τη διεπιφάνεια), οι οποίοι επιστρατεύονται στη διεπιφάνεια μεταξύ παλαιού και νέου σκυροδέματος, υπό σεισμικές δράσεις. Πρόκειται για διεπιφάνειες σε στοιχεία υφιστάμενων κατασκευών Ω.Σ. μετά από την επισκευή ή την ενίσχυσή τους.

Η εργασία επικεντρώθηκε σε μια συστηματική (σε βάθος και έκταση) πειραματική μελέτη της ταυτόχρονης δράσης των μηχανισμών για τη μεταφορά τέμνουσας κατά μήκος διεπιφανειών Ω.Σ., για ανακυκλιζόμενες δράσεις. Προσφέρονται οι βάσεις για μια μέθοδο σχεδιασμού ενισχυμένων στοιχείων από Ω.Σ. (ιδίως υπό ανακυκλιζόμενη τέμνουσα), με βάση τα αποτελέσματα της ως άνω πειραματικής διερεύνησης. Διατυπώθηκε καταστατικός νόμος, μέσω του οποίου είναι δυνατό να προβλεφθεί η μέγιστη απόκριση της διεπιφάνειας, η μείωση της απόκρισης με την ανακύκλιση της ολίσθησης και το πλήρες διάγραμμα φορτίου – ολίσθησης. Ο νόμος αυτός είναι αρκετά απλός, ώστε να είναι δυνατό να τροφοδοτήσει αναλυτικά προσομοιώματα επισκευασμένων / ενισχυμένων στοιχείων Ω.Σ., μέσω των οποίων θα καταστεί δυνατή η εκτίμηση της συνεισφοράς της επέμβασης που επελέγη, καθώς και των χαρακτηριστικών της διεπιφάνειας στη συνολική συμπεριφορά των στοιχείων.

Σ' αυτά που ακολουθούν, παρουσιάζεται η εξέλιξη του ανοίγματος της ρωγμής και του μηχανισμού τριβής, με την επιβολή ανακυκλιζόμενων ολισθήσεων και για αύξηση της επιβαλλόμενης ολίσθησης, όπως διατυπώνονται στη Δ.Δ. της Παλιεράκη (2014).

2.3.2 Εξέλιξη του ανοίγματος ρωγμής κατά την ανακύκλωση και για αύξηση της επιβαλλόμενης ολίσθησης

Η εξέλιξη του ανοίγματος της ρωγμής με την ολίσθηση λαμβάνεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 14, και είχε προταθεί από τη Βιντζηλαίου (1986). Η αύξηση της επιβαλλόμενης ολίσθησης οδηγεί σε αύξηση του ανοίγματος της ρωγμής. Όταν σε κάποιο κύκλο επιβάλλεται μεγαλύτερη ολίσθηση από αυτήν που είχε επιβληθεί κατά τον προηγούμενο, το άνοιγμα της ρωγμής εξελίσσεται σε να μην είχε προηγηθεί ανακύκλωση, δηλαδή με το νόμο: $w = 0,60 * s^{2/3}$.



Σχήμα 14. Εξέλιξη του ανοίγματος της ρωγμής με την επιβαλλόμενη ολίσθηση (Παλιεράκη, 2014)

2.3.3 Εξέλιξη του μηχανισμού τριβής κατά την ανακύκλιση και για αύξηση της επιβαλλόμενης ολίσθησης

Η τριβή σκυροδέματος με σκυρόδεμα λαμβάνεται από τη Βιντζηλαίου (1986), κάνοντας κάποιες τροποποιήσεις στο πλαίσιο της Δ.Δ. της Παλιεράκη (2014).

Όσον αφορά στον αρχικό κλάδο της εξέλιξης του μηχανισμού τριβής, ισχύουν οι ίδιες σχέσεις που αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.2.5, δηλαδή:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau(s) = 1,14(s/s_u)^{1/3}\tau_u, \quad \text{για τιμές } s/s_u \leq 0,5 \quad \text{και} \\ \tau(s) = \tau_u(0,81 + 0,19(s/s_u)), \quad \text{για τιμές } s/s_u \geq 0,5 \end{array} \right\} \quad (14.1)$$

$$(14.2)$$

Ορισμένες τροποποιήσεις που έγιναν στο πλαίσιο της Δ.Δ., παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- *1^η τροποποίηση*

Η πρώτη τροποποίηση που έγινε, αφορά στη σχέση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέγιστης αντίστασης του μηχανισμού τριβής. Λόγω της αλληλεπίδρασης των μηχανισμών της τριβής και της δράσης βλήτρου, και εξαιτίας της μικρότερης τραχύτητας των διεπιφανειών παλαιού – νέου σκυροδέματος σε σχέση με την τραχύτητα φυσικών ρωγμών, η συνεισφορά του μηχανισμού τριβής λαμβάνεται υπόψη μειωμένη. Η μέγιστη αντίσταση του μηχανισμού τριβής τ_u , υπολογίζεται από την εξίσωση που δόθηκε στην ενότητα 2.2.5, αλλά ο συντελεστής 0,44 αντικαθίσταται από το συντελεστή 0,33, δηλαδή η εξίσωση διαμορφώνεται ως εξής: $\tau_u = 0,33 \cdot \sqrt[3]{f_c^2 \cdot \sigma_c}$. Αυτή η μετατροπή οδηγεί σε μείωση της συνεισφοράς του μηχανισμού τριβής ίση με 25%. Τελικά, οι εξισώσεις που διατυπώνονται για τον υπολογισμό της μέγιστης αντίστασης του μηχανισμού τριβής, αναφέρονται για κάθε περίπτωση στον Πίνακα 3.

Θλιπτική δύναμη κάθετα στη διεπιφάνεια, προερχόμενη από τον εφελκυσμό των ράβδων κάθετα σε αυτήν	Παρουσία εξωτερικής θλιπτικής δύναμης κάθετα στη διεπιφάνεια
$\tau_u = 0,33 \cdot \sqrt[3]{f_c^2 \cdot \sigma_c}$	$\tau_u = 0,44 \cdot \sqrt[3]{f_c^2 \cdot \sigma_c}$

Πίνακας 3. Σχέσεις υπολογισμού της μέγιστης δυνατής αντίστασης του μηχανισμού τριβής για κάθε περίπτωση (Παλιεράκη, 2014)

- 2^η τροποποίηση

Μία ακόμη τροποποίηση που έγινε, αφορά στην τιμή της ολίσθησης s_u που απαιτείται για την επιστράτευση της μέγιστης διατμητικής τάσης τ_u . Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα της Δ.Δ., αλλά και της Βιβλιογραφίας, και δεδομένου ότι σχεδόν για όλες τις δοκιμές η μέγιστη αντίσταση επιστρατεύτηκε για τιμές της επιβαλλόμενης διατμητικής ολίσθησης, οι οποίες δεν ήταν μεγαλύτερες από 1,00 mm, η τιμή $s_u = 2,00 \text{ mm}$, αντικαταστάθηκε από την τιμή $s_u = 1,00 \text{ mm}$.

$$s_u = 2,00 \text{ mm} \xrightarrow{\text{αντικατάσταση από}} s_u = 1,00 \text{ mm}$$

- 3^η τροποποίηση

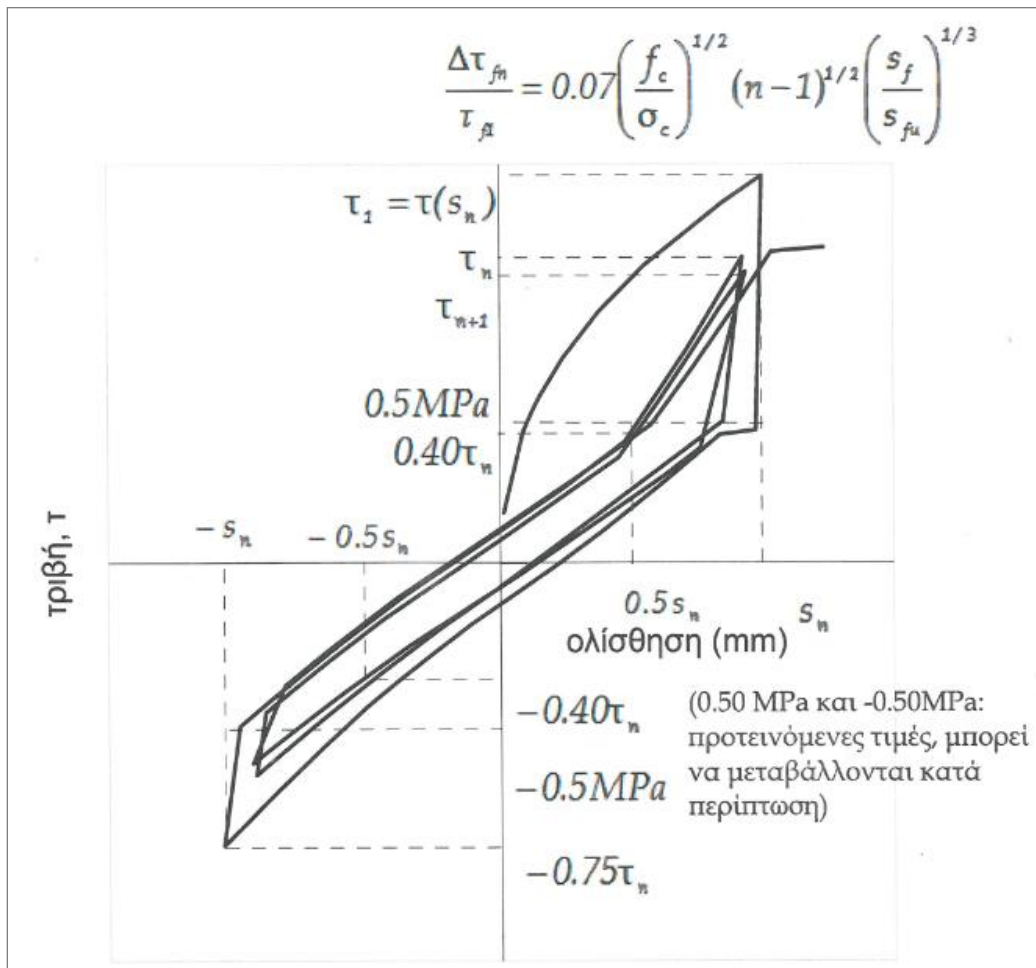
Η μείωση της απόκρισης του μηχανισμού τριβής υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη εξίσωση, η οποία τροποποιεί την εξίσωση που προτείνεται από τον Κανονισμό Επεμβάσεων σε υπάρχουσες κατασκευές Ωπλισμένου Σκυροδέματος (ΚΑΝ.ΕΠΕ., 2012):

$$\frac{\Delta\tau_{fn}}{\tau_{f1}} = 0,07 \left(\frac{f_c}{\sigma_c}\right)^{1/2} (n-1)^{1/2} \left(\frac{s_f}{s_{fu}}\right)^{1/3} \quad (\text{σε } N, \text{ mm}) \quad (15)$$

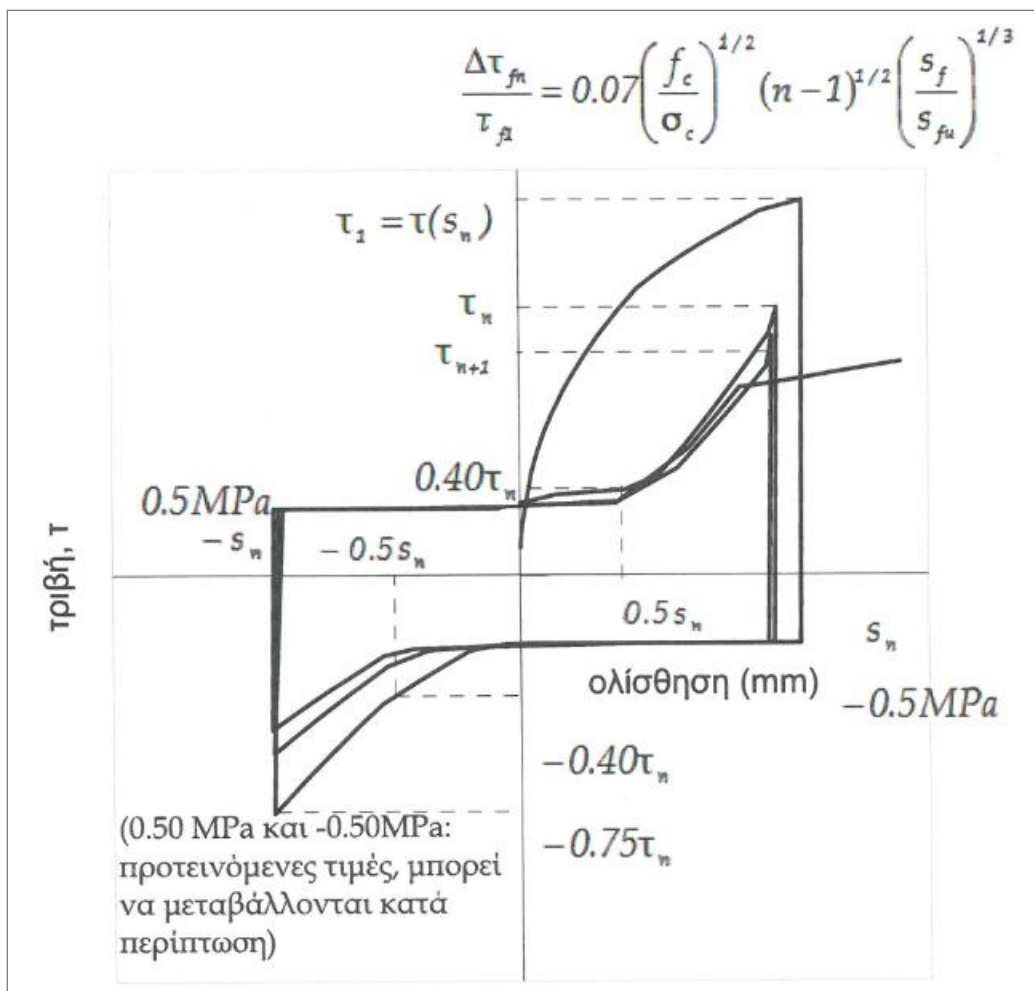
όπου: τ_{f1} και τ_{fn} , είναι η αντίσταση του μηχανισμού τριβής κατά τον πρώτο και το n -οστό κύκλο αντίστοιχα, και s_f αντιστοιχεί στη μέγιστη επιβαλλόμενη ολίσθηση κατά αυτούς τους κύκλους.

Η διαφορά της ανωτέρω σχέσης σε σύγκριση με τη σχέση του ΚΑΝ.ΕΠΕ., είναι ο συντελεστής 0,07 έναντι του συντελεστή 0,05. Σημειώνεται, ότι για μικρές τιμές της σ_c , για ανακύκλωση σε τιμές της ολίσθησης $s > s_u$, και ενώ έχουν προηγηθεί κύκλοι σε μικρότερες ολισθήσεις, η παραπάνω σχέση μπορεί να δώσει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο συντελεστής 0,07 μειώνεται σταδιακά, σε κάθε σετ τριών κύκλων.

Η εξέλιξη του μηχανισμού τριβής, για ανακύκλωση σε στάθμες ολίσθησης $s_n < s_u$ και $s_n > s_u$, παρουσιάζεται στα Σχήματα 15α και 15β, αντίστοιχα.



(α)

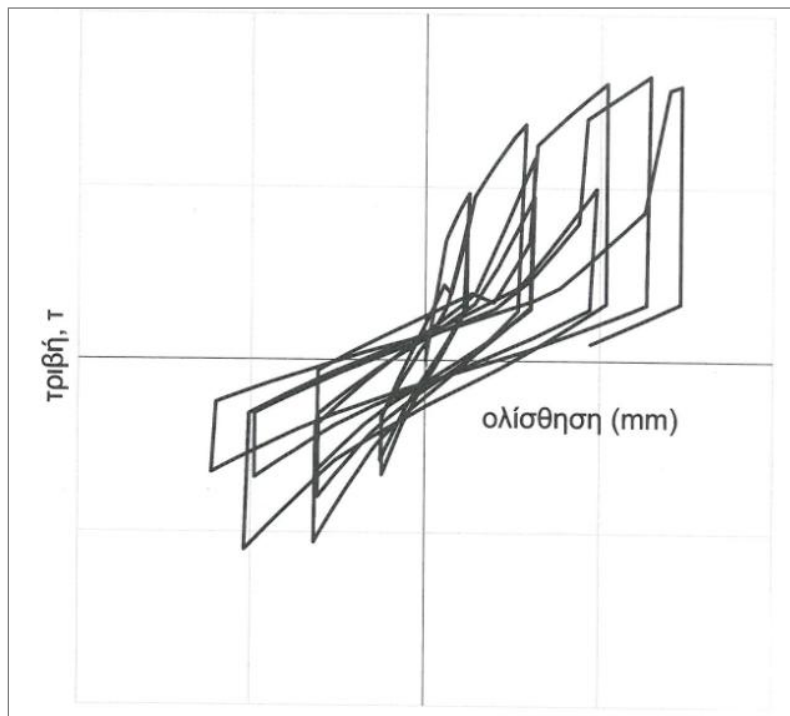


Σχήμα 15. Εξέλιξη του μηχανισμού τριβής, για ανακύκλωση σε στάθμη ολίσθησης
(α) $s_n < s_u$ και **(β)** $s_n > s_u$ (Παλιεράκη, 2014)

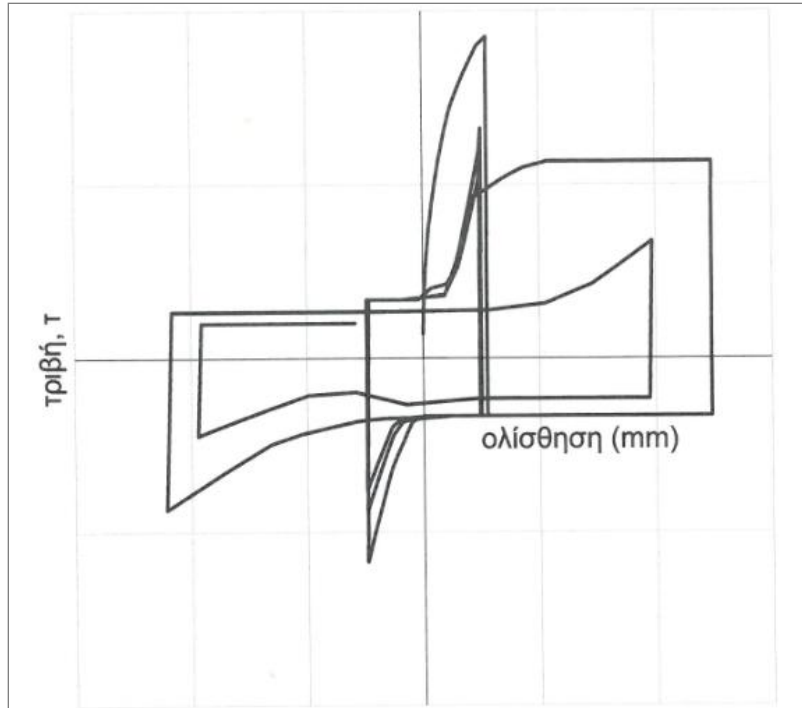
- 4^η τροποποίηση

Ιδιαίτερα σημαντική συνεισφορά της Δ.Δ. είναι, ότι το προτεινόμενο προσομοίωμα επεκτείνεται προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς διεπιφανειών για αυξανόμενες τιμές της επιβαλλόμενης ολίσθησης. Προκειμένου να υπολογιστεί η απόκριση του μηχανισμού για αυξανόμενες τιμές της επιβαλλόμενης ολίσθησης, για διεπιφάνειες ωπλισμένες με ράβδους επαρκούς μήκους αγκύρωσης, καθώς και για διεπιφάνειες στις οποίες ασκείται εξωτερική θλιπτική δύναμη, στην περίπτωση που η αρχική ολίσθηση είναι μικρότερη από s_u , τιμή για την οποία

επιτυγχάνεται η μέγιστη αντίσταση της διεπιφάνειας, η απόκριση του μηχανισμού τριβής αυξάνεται σα να μην είχε προηγηθεί ανακύκλωση για μικρότερες τιμές της ολίσθησης, και η μέγιστη τιμή της περιορίζεται από την αλληλεπίδραση μεταξύ της τάσης λόγω της εξόλκευσης των ράβδων και της δράσης βλήτρου (λόγος $\lambda = 1$ για $s = s_{crit}$) και από το νόμο μεταβολής της τριβής, όπως αυτός δίνεται παραπάνω. Η εξέλιξη του μηχανισμού τριβής, για αυξανόμενες τιμές της επιβαλλόμενης ολίσθησης, μικρότερες και μεγαλύτερες από s_u , παρουσιάζεται στα Σχήματα 16α και 16β, αντίστοιχα.



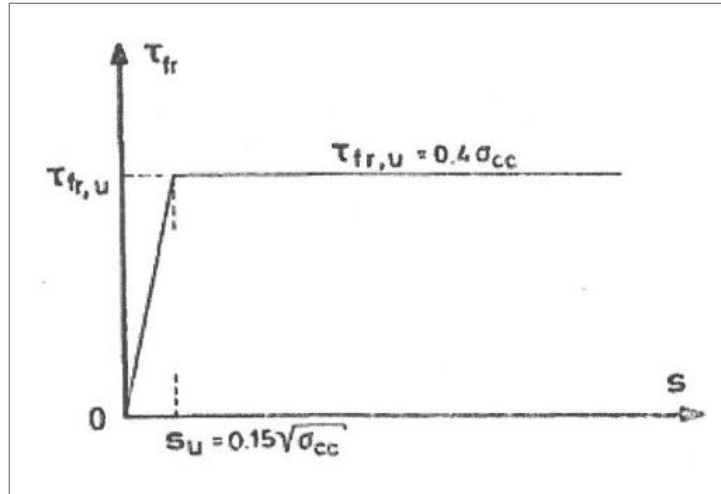
(α)



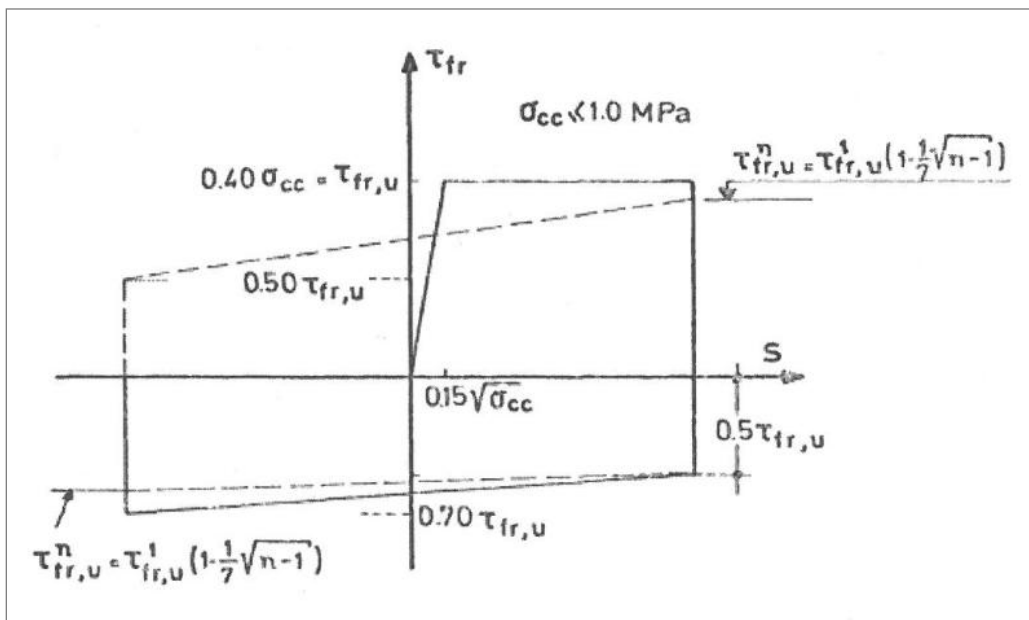
(β)

Σχήμα 16. Εξέλιξη του μηχανισμού τριβής, για αυξανόμενες τιμές της επιβαλλόμενης ολίσθησης, (α) μικρότερες από s_u και (β) μεγαλύτερες από s_u (Παλιεράκη, 2014)

Για την τριβή στη λεία διεπιφάνεια χρησιμοποιήθηκαν οι νόμοι που προτείνονται από τη Βιντζηλαίου (1986), χωρίς τροποποιήσεις (Σχήματα 17, 18).



Σχήμα 17. Φορμαλιστικό μοντέλο για τον μηχανισμό τριβής σε λεία διεπιφάνεια, υπό μονοτονική φόρτιση (Βιντζηλαίου, 1986)



Σχήμα 18. Φορμαλιστικό μοντέλο για τον μηχανισμό τριβής σε λεία διεπιφάνεια, υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, όταν η ορθή θλιπτική τάση είναι μικρή (Βιντζηλαίου, 1986)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΥ ΝΟΜΟΥ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΡΙΒΗΣ, ΥΠΟ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΔΡΑΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, μέσω της βιβλιογραφικής διερεύνησης, επιδιώκεται η αύξηση της αξιοπιστίας των δεδομένων που διέπουν τον καταστατικό νόμο εξέλιξης του μηχανισμού τριβής υπό μονοτονική δράση, όπως διατυπώνεται από τον Τάσιο (2014) (βλ. Σχήμα 10). Λαμβάνονται υπόψη οι τροποποιήσεις που έγιναν στο πλαίσιο της Δ.Δ. της Παλιεράκη (2014), και επιδιώκεται η περαιτέρω διερεύνηση και γενίκευση της εξάρτησης των δεδομένων του νόμου, από ορισμένες παραμέτρους που περιγράφονται στη συνέχεια.

3.1 ΟΙ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Η διερεύνηση αφορά στις εξής τρεις κατηγορίες διεπιφανειών σκυροδέματος:

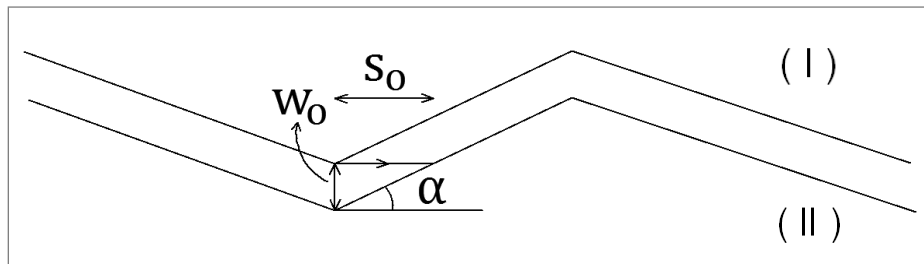
- προεφελκυσμένες διεπιφάνειες που έχουν υποστεί ρηγμάτωση, λόγω δράσης εφελκυστικής δύναμης κάθετα στο επίπεδο ολίσθησης, στις οποίες επιβάλλεται κατόπιν μία ορθή θλιπτική τάση σ_c ,
- προδιατεμνόμενες διεπιφάνειες υπό σύγχρονη θλιπτική τάση σ_c , και
- απροδιάτμητες διεπιφάνειες παλαιού – νέου σκυροδέματος, στις οποίες επιβάλλεται ορθή θλιπτική τάση σ_c .

Στην περίπτωση της προεφελκυσμένης ρηγματωμένης διεπιφάνειας, αρχικά υπάρχει ένα άνοιγμα ρωγμής w_0 , το οποίο μόλις επιβληθεί θλιπτική τάση κάθετα στη διεπιφάνεια, μηδενίζεται ή έστω γίνεται ίσο με ένα μικρό ποσοστό του αρχικού ανοίγματος, τούτο δε εξαιτίας του υλικού λειοτριβήσεως της διεπιφάνειας που παραμένει παγιδευμένο μέσα στη ρωγμή. Η επιβολή θλιπτικής τάσης σ_c φέρνει σε επαφή τα χείλη της ρωγμής και, συνεπώς, ενεργοποιεί την διατμητική αντίσταση λόγω τριβής. Έτσι, στην περίπτωση επιβολής ορθής θλιπτικής τάσης σε ρηγματωμένη διεπιφάνεια,

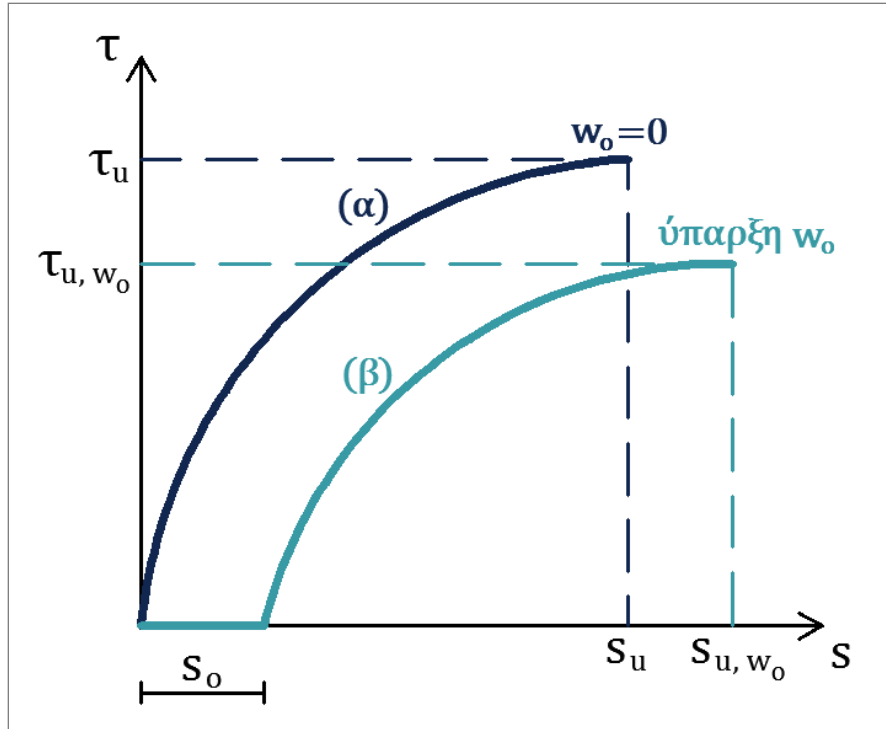
δεν απαιτείται σχετική ολίσθηση των όψεων της ρωγμής προκειμένου αυτές να έρθουν σε επαφή. Επομένως, η εξέλιξη της διατμητικής τάσης τ λόγω τριβής σε σχέση με την επιβαλλόμενη σχετική ολίσθηση s των όψεων της ρωγμής, έχει τη μορφή της καμπύλης (α) του Σχήματος 20.

Αντίθετα, στην περίπτωση που τα δύο τμήματα σκυροδέματος της προεφελκυσμένης ρηγματωμένης διεπιφάνειας δεν δέχονται θλίψη, προκειμένου η διάτμηση να φέρει τα χείλη της ρωγμής σε επαφή, απαιτείται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 19, η σχετική μετακίνηση των όψεων της ρωγμής κατά απόσταση s_0 . Επομένως, στην περίπτωση αυτή, η διατμητική τάση λόγω τριβής αρχίζει να αναπτύσσεται μόνον αφού οι όψεις της ρωγμής μετακινηθούν σχετικά η μία ως προς την άλλη κατά απόσταση s_0 και έρθουν σε επαφή, όπως παρουσιάζεται με την καμπύλη (β) του Σχήματος 20, και υπό την προϋπόθεση, ότι εντωμεταξύ θα ασκηθεί κάποια θλιπτική τάση.

Στην παρούσα εργασία, διερευνάται η περίπτωση ρηγματωμένης διεπιφάνειας, όπου επιβάλλεται ορθή θλιπτική τάση, η οποία μηδενίζει το άνοιγμα της ρωγμής (καμπύλη (α) Σχήματος 20), διότι η περίπτωση αυτή συναντάται στην πραγματικότητα στις κατασκευές, όπου τα προρηγματωμένα δομικά στοιχεία υπόκεινται σε εξωτερική θλίψη, η οποία προκαλεί πρακτικώς μηδενισμό του ανοίγματος της ρωγμής.



Σχήμα 19. Απαιτούμενη σχετική μετακίνηση των όψεων της ρωγμής κατά απόσταση s_0 , με σκοπό να έρθουν σε επαφή και να ενεργοποιηθεί η τριβή, στην περίπτωση κατακορύφως αμετακίνητων σωμάτων σκυροδέματος I και II



Σχήμα 20. Εξέλιξη της διατμητικής τάσης τ λόγω τριβής, σε σχέση με τη σχετική ολίσθηση s των όψεων της ρωγμής, για την περίπτωση (α) μηδενισμού του αρχικού ανοίγματος ρωγμής λόγω επιβολής ορθής θλιπτικής τάσης, και (β) σχετικής διατμητικής μετακίνησης των όψεων της ρωγμής, προκειμένου να έρθουν σε επαφή

Χαρακτηριστικό σημείο της καμπύλης (α) του ανωτέρω διαγράμματος $\tau - s$, είναι το σημείο που αντιστοιχεί στην ολίσθηση s_u που απαιτείται για την επιστράτευση της μέγιστης διατμητικής τάσης τ_u . Όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα, η μέγιστη διατμητική τάση τ_u , στη γενική της μορφή, διατυπώνεται ως εξής:

$$\tau_u = \mu \cdot \sigma_c \quad \Rightarrow \quad \tau_u = \left[\mu_1 \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{-k} \right] \cdot \sigma_c \quad (16)$$

$$\text{ή} \quad \mu_1 = \mu \cdot \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^k \quad (17)$$

όπου: μ = ο συντελεστής τριβής,

σ_c = η ορθή θλιπτική τάση κάθετα στη διεπιφάνεια,

f_c = η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, και

μ_1, k = σταθερές.

Για την ολίσθηση s_u , είχε στο παρελθόν διατυπωθεί η ακόλουθη υπόθεση εργασίας:

$$s_u = c_1 \cdot d_{max} \cdot \left(c_2 + c_3 \cdot \frac{f_c}{\sigma_c} \right) \quad (18)$$

όπου: d_{max} = ένα ονομαστικό μέγεθος μεγίστου κόκκου αδρανών,

σ_c = η ορθή θλιπτική τάση κάθετα στη διεπιφάνεια,

f_c = η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, και

c_1, c_2, c_3 = σταθερές.

Με σχετική βιβλιογραφική αναζήτηση, επιδιώκεται η διερεύνηση και η γενίκευση της εξάρτησης των τιμών των σταθερών μ_1, k και της ολίσθησης s_u , από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- τον βαθμό τραχύτητας,
- το αρχικό άνοιγμα ρωγμής w_o ,
- την ορθή θλιπτική τάση σ_c , και
- το ονομαστικό μέγεθος μεγίστου κόκκου αδρανών D_{max} .

Ακόμη, πραγματοποιείται διερεύνηση της σχέσης που περιγράφει την εξέλιξη του ανοίγματος ρωγμής w , σε σχέση με την επιβαλλόμενη ολίσθηση s , η οποία στη γενική της μορφή διατυπώνεται ως εξής: $w = w_1 \left(\frac{s}{s_1} \right)^\lambda$.

Στα επόμενα, παρουσιάζονται οι ερευνητικές εργασίες από τις οποίες αντλήθηκαν σχετικές πληροφορίες.

3.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΡΩΓΜΩΝ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ, ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΤΟΥ Walraven (1994) – ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΡΧΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΡΩΓΜΗΣ w_o ΣΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ μ_1 , ΜΕ ΒΑΣΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΑΠΟ ΤΟ fib Model Code 2010 – ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΙΤΙΩΝ ΥΠΑΡΞΗΣ ΑΡΧΙΚΟΥ w_o , ΠΑΡΑ ΤΗΝ ΕΚ ΤΩΝ ΥΣΤΕΡΩΝ ΑΣΚΗΣΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ σ_c ΣΕ ΠΡΟΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

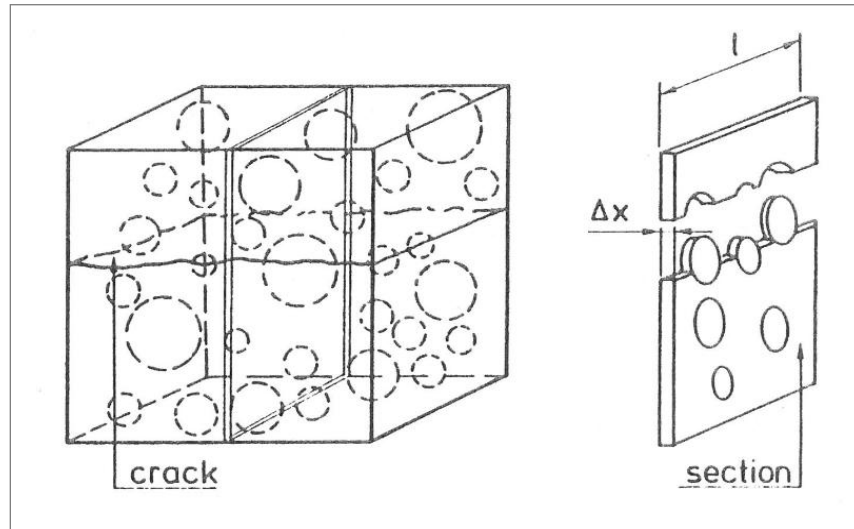
Στα επόμενα, αναφέρονται πληροφορίες από την έρευνα που πραγματοποίησε ο Walraven (1994). Ακολουθως, παρέχονται πληροφορίες από το fib Model Code 2010, οι οποίες βασίζονται στην έρευνα του Walraven, με σκοπό τη διερεύνηση των συνεπειών του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o στη διαμόρφωση των τιμών του μ_1 . Επιπλέον, διερευνώνται τα αίτια που συντελούν στην ύπαρξη αρχικού w_o , παρά την εκ των υστέρων άσκηση θλιπτικής τάσης σε προεφελκυσμένη ρηγματωμένη διεπιφάνεια.

3.2.1 Συμπεριφορά ρωγμών υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, με βάση την έρευνα του Walraven (1994)

Ο Walraven (1994), μελέτησε τη συμπεριφορά ρωγμών που υπόκεινται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, η οποία χαρακτηρίζεται από σημαντική, μη αναστρέψιμη καταστροφή των όψεων της ρωγμής. Επομένως, δίνεται ιδιαίτερη σημασία στη γνώση των αποτελεσμάτων της φόρτισης που έχει προηγηθεί, προκειμένου να περιγραφεί καλά η απόκριση των ρωγμών σε δράσεις με εναλλασσόμενη φορά. Ο συγγραφέας προτείνει ένα προσομοίωμα, προκειμένου να μπορεί να ερμηνευθεί και να προβλεφθεί η συμπεριφορά ρωγμών που υπόκεινται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Αναφέρει, ότι γενικά, τα αδρανή παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή και ακαμψία σε σχέση με τη μήτρα που συνίσταται από τσιμέντο. Ωστόσο, η επιφάνεια επαφής ανάμεσα στα δύο υλικά σε μη ρηγματωμένο σκυρόδεμα, η οποία αποτελεί την περιοχή δεσμού των δύο υλικών, είναι ο πιο αδύναμος σύνδεσμος του συνόλου. Επομένως, η ρηγματώση συμβαίνει συνήθως δια μέσου της μήτρας, περιμετρικά των αδρανών. Τα αδρανή που προεξέχουν από την επιφάνεια μιας ρωγμής, δρουν ως εμπόδια έναντι των διατμητικών ολισθήσεων. Σε μια διατμητική ολίσθηση, σχηματίζονται πολυάριθμες περιοχές επαφής ανάμεσα στα αδρανή της μίας πλευράς της ρωγμής και την τσιμεντένια μήτρα της αντίθετης πλευράς. Τα φυσικά αδρανή έχουν βεβαίως ακανόνιστο σχήμα.

Ωστόσο, για τη δημιουργία του προσομοιώματος, τα αδρανή θεωρήθηκαν σφαιρικού σχήματος, κατανεμημένα τυχαία στο σύνολο του όγκου του σκυροδέματος. Μία πρόσθετη απλοποίηση έγινε, θεωρώντας μια αντιπροσωπευτική τομή του όγκου με περιορισμένο πάχος Δx , έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί μια δισδιάστατη (2D) ανάλυση (Σχήμα 21).



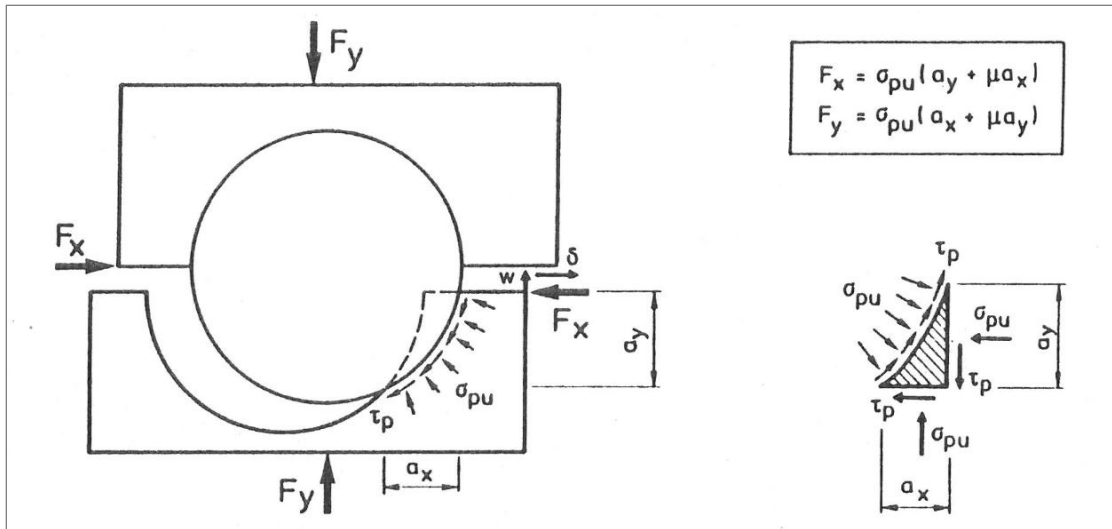
Σχήμα 21. Αντιπροσωπευτική τομή του ρηγματωμένου όγκου σκυροδέματος (Walraven, 1994)

Στο Σχήμα 22 παρουσιάζεται η συμπεριφορά μιας ρωγμής κατά τη διάρκεια μιας διατμητικής ολίσθησης, για μια συγκεκριμένη τομή αδρανούς. Η τσιμεντένια μήτρα θεωρείται τελείως εύθραυστη, με αντοχή σύνθλιψης σ_{pu} . Κατά τη διάρκεια της διείδυσης του αδρανούς μέσα στη μήτρα, δεν συμβαίνει μόνο σύνθλιψη της μήτρας, αλλά ταυτόχρονα αναπτύσσεται τριβή ανάμεσα στο αδρανές και τη μήτρα. Για την περιοχή επαφής ισχύει η σχέση $\tau_p = \mu\sigma_{pu}$, όπου μ είναι ο συντελεστής τριβής. Οι τάσεις στην περιοχή επαφής μπορούν να μετατραπούν στις δυνάμεις F_x , F_y , οι οποίες δίνονται από τις σχέσεις:

$$F_x = \sigma_{pu}(\alpha_y + \mu\alpha_x) \quad (19.1)$$

$$F_y = \sigma_{pu}(\alpha_x - \mu\alpha_y) \quad (19.2)$$

όπου, σ_{pu} και μ = σταθερά χαρακτηριστικά του υλικού,
 α_x και α_y = οι προβολές των περιοχών επαφής.

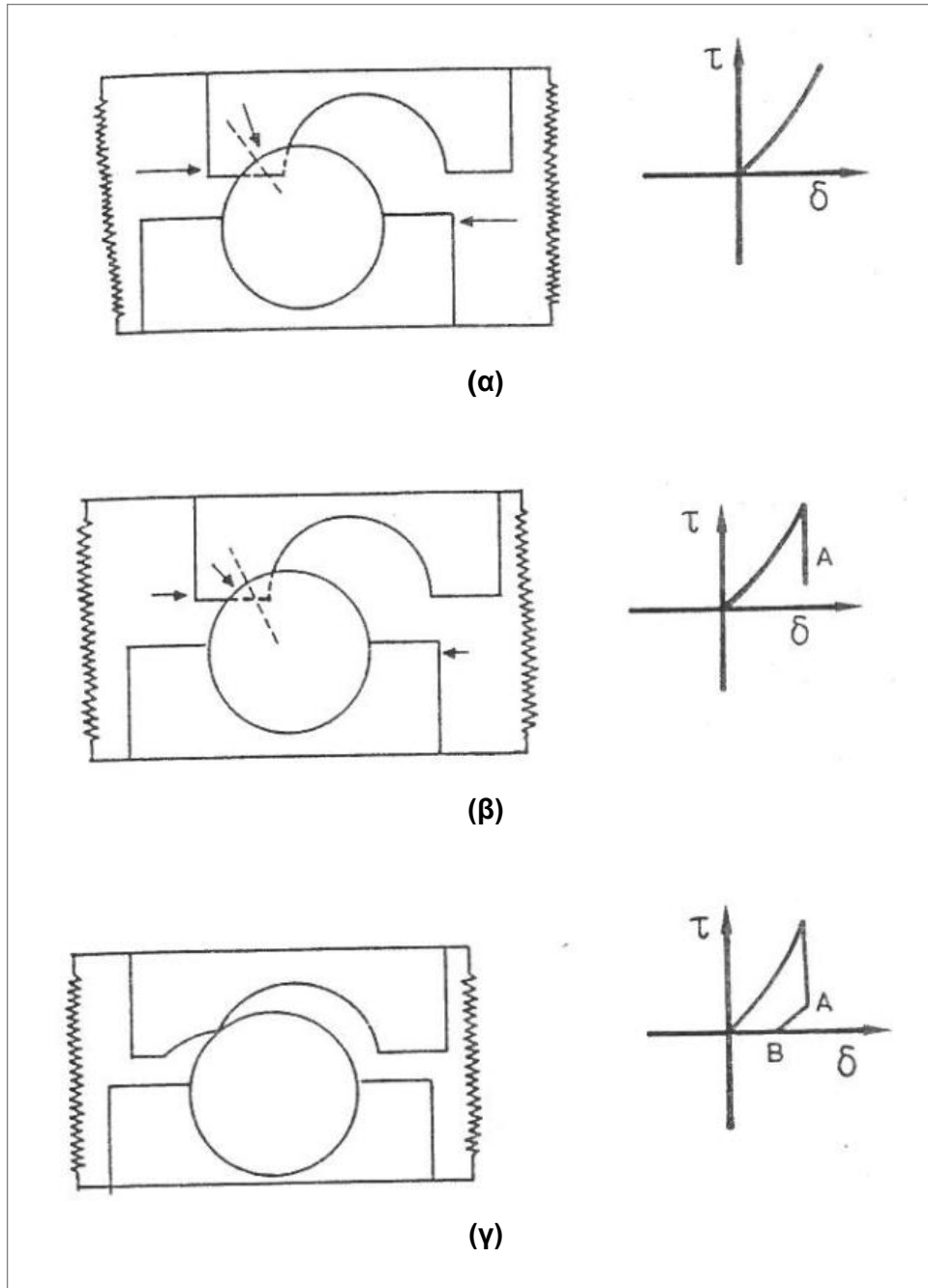


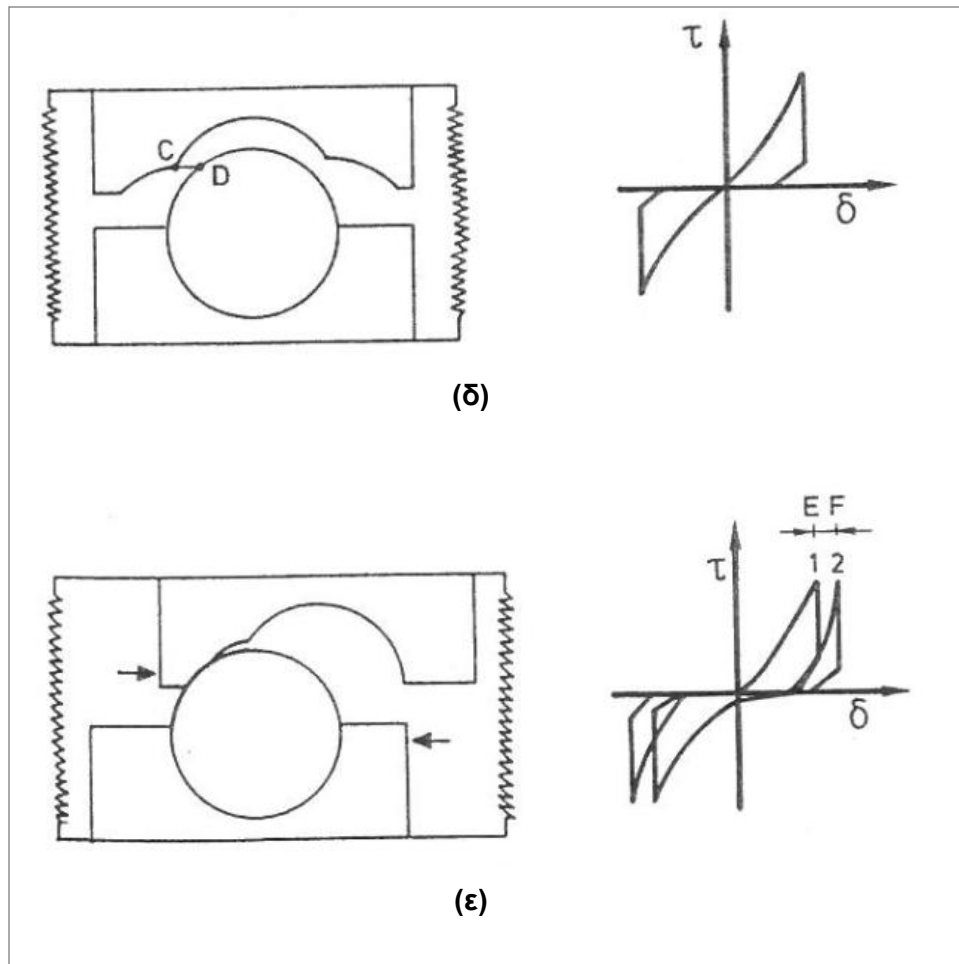
Σχήμα 22. Ο μηχανισμός στην περιοχή επαφής αδρανούς και τσιμεντένιας μήτρας για μια διατμητική ολίσθηση (Walraven, 1994)

Τα στάδια φθοράς της όψης μιας ρωγμής λόγω επιβολής ανακυκλιζόμενης φόρτισης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 23. Αρχικά, τα αδρανή διεισδύουν μέσα στην εύθραυστη τσιμεντένια μήτρα, διαμορφώνοντας το νέο όριο της όψης της ρωγμής. Αφότου η διατμητική τάση τ φθάσει τη μέγιστη τιμή για τον κύκλο φόρτισης (Σχήμα 23α), συμβαίνει η αποφόρτιση. Ωστόσο, δεν συμβαίνει αμέσως κίνηση των όψεων της ρωγμής ξεκινώντας μια μείωση της διατμητικής τάσης τ , εξαιτίας της τριβής που αναπτύσσεται στην περιοχή επαφής του αδρανούς με τη μήτρα. Η κίνηση στην προς τα πίσω κατεύθυνση μπορεί να συμβεί μόνο εάν ξεπεραστεί η μέγιστη δυνατή τριβή στην αντίθετη κατεύθυνση. Η έναρξη της ολίσθησης στην προς τα πίσω κατεύθυνση, αντιστοιχεί στο σημείο A του Σχήματος 23β. Από τη γεωμετρία της όψης της ρωγμής μπορεί να υπολογιστεί για ποια τιμή της ολίσθησης δ δεν υπάρχει επαφή μεταξύ των όψεων της ρωγμής, η οποία αντιστοιχεί στο σημείο B του Σχήματος 23γ.

Στη συνέχεια, η διαδικασία επαναλαμβάνεται για μια διατμητική τάση στην αντίθετη κατεύθυνση. Αφότου τα αδρανή διεισδύσουν στην τσιμεντένια μήτρα που δεν έχει φθαρεί, η σχέση $\tau - \delta$ που προκύπτει, είναι αντιστρόφως συμμετρική με την προηγούμενη (Σχήμα 23δ). Ακολούθως, για τους επόμενους κύκλους φόρτισης, επειδή οι όψεις της ρωγμής έχουν υποστεί φθορά, τα δύο τμήματα πρέπει να διανύσουν μεγαλύτερη απόσταση για να έρθουν σε επαφή, η οποία αντιστοιχεί στην απόσταση CD του Σχήματος 23δ. Η πλήρης επαφή στη συνέχεια επιτυγχάνεται, μετά από μια μικρή πρόσθετη διατμητική ολίσθηση, η οποία αντιστοιχεί στην απόσταση EF

του Σχήματος 23ε. Κατά τη διάρκεια αύξησης της διαμητικής τάσης, η όψη της ρωγμής φθείρεται περισσότερο. Σε κάθε επιπλέον κύκλο φόρτισης, συμβαίνει πρόσθετη φθορά της όψης της ρωγμής.





Σχήμα 23. Στάδια φθοράς της όψης μιας ρωγμής, λόγω επιβολής ανακυκλιζόμενης φόρτισης (Walraven, 1994)

Μέχρι τώρα έχει θεωρηθεί, ότι το αδρανές είναι τόσο ισχυρό, που κανένα αδρανές υπόκειται σε θραύση κατά τη διάρκεια της ρηγμάτωσης του σκυροδέματος, έτσι ώστε όλα τα αδρανή στη ρωγμή να συμβάλλουν στο μηχανισμό αλληλεμπλοκής αδρανών. Κατά πόσο η ιδανική αυτή κατάσταση συμβαίνει, εξαρτάται από την αναλογία ανάμεσα στην αντοχή του αδρανούς και την αντοχή της μήτρας. Σε σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, ένα σημαντικό μέρος των αδρανών θραύεται και δεν συνεισφέρει στην αντίσταση λόγω αλληλεμπλοκής αδρανών. Το ίδιο συμβαίνει για ένα μέσης αντοχής σκυρόδεμα με χαμηλής αντοχής αδρανή. Για να ληφθεί υπόψη η επίπτωση αυτή, εισάγεται ο συντελεστής θραύσης, C_f : τώρα, οι προβολές των περιοχών επαφής

εκφράζονται ως $C_f \Sigma \alpha_x$ και $C_f \Sigma \alpha_y$, και για τις εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή της ρωγμής, διατυπώνονται οι σχέσεις (Walraven, 1994):

$$\tau = C_f \cdot \sigma_{pu} (\Sigma \alpha_y + \mu \Sigma \alpha_x) \quad (20.1)$$

$$\sigma = C_f \cdot \sigma_{pu} (\Sigma \alpha_x - \mu \Sigma \alpha_y) \quad (20.2)$$

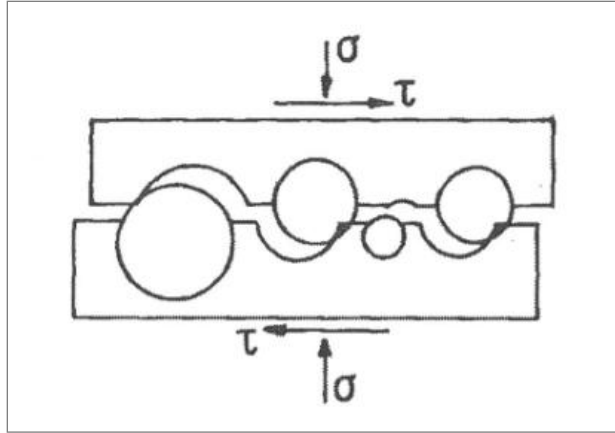
όπου, $0 < C_f < 1$ και $\Sigma \alpha_x$, $\Sigma \alpha_y =$ συναρτήσεις του ανοίγματος ρωγμής w , της διατμητικής ολίσθησης δ , και της ιστορίας της φόρτισης.

Πρέπει να αναφερθεί, ότι στη διερεύνηση που πραγματοποίησε ο Walraven, δεν ασκούσαν εξωτερική θλιπτική τάση στη ρηγματωμένη διεπιφάνεια σκυροδέματος, αλλά η θλιπτική τάση σ παράγονταν σταδιακώς ως αντίδραση στη διόγκωση λόγω επιβαλλόμενης ολίσθησης στη ρηγματωμένη διεπιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα, τα ελατήρια που απεικονίζονται στο Σχήμα 23 αντιπροσωπεύουν εξωτερικές εγκάρσιες στη διεπιφάνεια ράβδους οπλισμού, οι οποίες λειτουργούν ως σφιγκτήρες, δηλαδή, όταν στη ρηγματωμένη διεπιφάνεια επιβάλλεται ολίσθηση, αναπτύσσεται εφελκυστική τάση στις ράβδους λόγω διόγκωσης, η οποία παράγει ως αντίδραση, ισοδύναμη θλιπτική τάση σ στη διεπιφάνεια.

3.2.2 Επίδραση του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o στη διαμόρφωση των τιμών του μ_1 , με βάση πληροφορίες από το fib Model Code 2010 – Διερεύνηση των αιτιών ύπαρξης αρχικού w_o , παρά την εκ των υστέρων άσκηση θλιπτικής τάσης σ_c σε προεφελκυσμένη ρηγματωμένη διεπιφάνεια

3.2.2.α Επίδραση του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o στη διαμόρφωση των τιμών του μ_1

Σύμφωνα με το fib Model Code 2010, αν σ' ένα άνοιγμα ρωγμής η μια όψη της ρωγμής υπόκειται σε σχετική ολίσθηση ως προς την άλλη, αναπτύσσονται τάσεις αντίστασης σε διάτμηση και ορθές θλιπτικές τάσεις σφήνωσης κάθετα στη διεπιφάνεια, ως αποτέλεσμα της τραχύτητας των επιφανειών της ρωγμής (Σχήμα 24).



Σχήμα 24. Η αρχή του μηχανισμού τριβής σε ρηγματωμένη διεπιφάνεια σκυροδέματος (fib Model Code 2010)

Η αντίσταση σε διάτμηση τ (MPa) και η ορθή θλιπτική τάση σ (MPa), μπορεί να υπολογίζονται από τις ακόλουθες γενικές σχέσεις:

$$\tau = C_f \{-0,04f_c + [1,8w^{-0,8} + (0,292w^{-0,7} - 0,25)f_c]\delta\} \quad (21)$$

$$\sigma = C_f \{-0,06f_c + [1,35w^{-0,63} + (0,242w^{-0,55} - 0,19)f_c]\delta\} \quad (22)$$

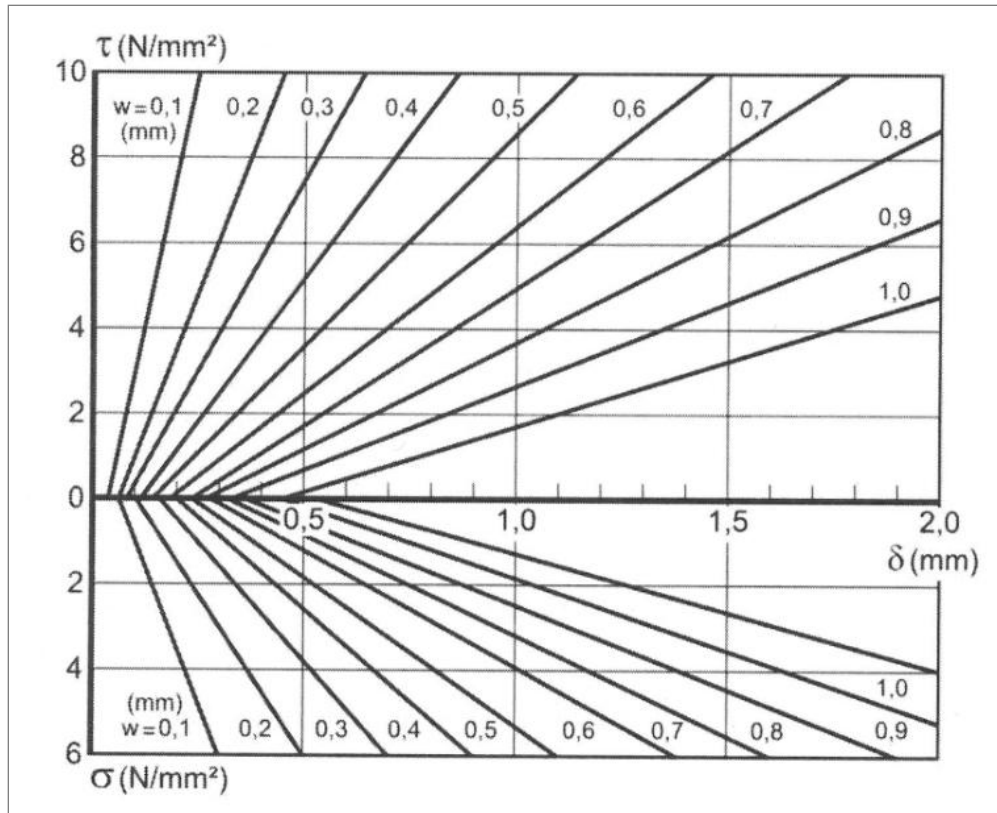
όπου: δ , είναι η σχετική ολίσθηση (σε mm),

w , είναι το άνοιγμα της ρωγμής (σε mm),

f_c , είναι η αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου σκυροδέματος (σε MPa).

Ο συντελεστής C_f εξαρτάται από το ποσοστό των αδρανών που θραύονται και είναι ίσος με 1,0, αν τα αδρανή δεν θραύονται κατά τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος. Για σκυρόδεμα με αδύναμα αδρανή ή υψηλή αντοχή σκυροδέματος (με ισχυρό τσιμεντοπολτό), όπου τα περισσότερα αδρανή θραύονται, για το συντελεστή C_f λαμβάνεται μια τιμή περίπου ίση με 0,35. Περισσότερο ακριβείς τιμές για το συντελεστή C_f , μπορούν να βρεθούν πραγματοποιώντας δοκιμή διάτμησης.

Η τροχιά του ανοίγματος ρωγμής (ανάπτυξη σχετικής ολίσθησης σε σχέση με το άνοιγμα της ρωγμής) μπορεί να προκύψει από διαγράμματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 25. Αν δίνεται η σχέση μεταξύ της ορθής θλιπτικής τάσης σ και του ανοίγματος της ρωγμής w (αναλογία με την ακαμψία ελατηρίου), οι αντίστοιχες τιμές δ και τ μπορεί να διαβαστούν στο διάγραμμα.



Σχήμα 25. Διάγραμμα που εκφράζει τις σχέσεις (21), (22), για $f_c = 30 \text{ MPa}$ (fib Model Code 2010)

(Σημείωση: Στις ανωτέρω πληροφορίες που προέρχονται από το fib Model Code 2010, το αρχικό άνοιγμα ρωγμής συμβολίζεται με w . Επειδή όμως στην παρούσα εργασία συμβολίζεται με w_o , στη συνέχεια διατηρείται αυτός ο συμβολισμός.)

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις (21), (22) και χρησιμοποιώντας το ανωτέρω διάγραμμα, υπολογίστηκαν οι τιμές του συντελεστή τριβής μ και του $\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c}\right)^k$, για τιμές του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o που μεταβάλλονται από 0,1 μέχρι 1,0 mm, λαμβάνοντας τις εξής τιμές επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης: $\tau = 4, 7, 10 \text{ MPa}$, και τιμές του συντελεστή C_f : $C_f = 1$ και 0,8. Επιπλέον, λήφθηκε $f_c = 30 \text{ MPa}$ και $k = 2/3$. Για τον υπολογισμό των συντελεστών τριβής μ , για τη δεδομένη τιμή επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης, βρέθηκαν για κάθε άνοιγμα ρωγμής οι αντίστοιχες τιμές της ολίσθησης δ , ακολούθως υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές

της ορθής θλιπτικής τάσης σ , και τελικά, οι συντελεστές τριβής προέκυψαν από τη σχέση $\mu = \frac{\tau}{\sigma}$. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις τέσσερις διαφορετικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν:

- **Δοκιμή 1^η:** $\tau = 10 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

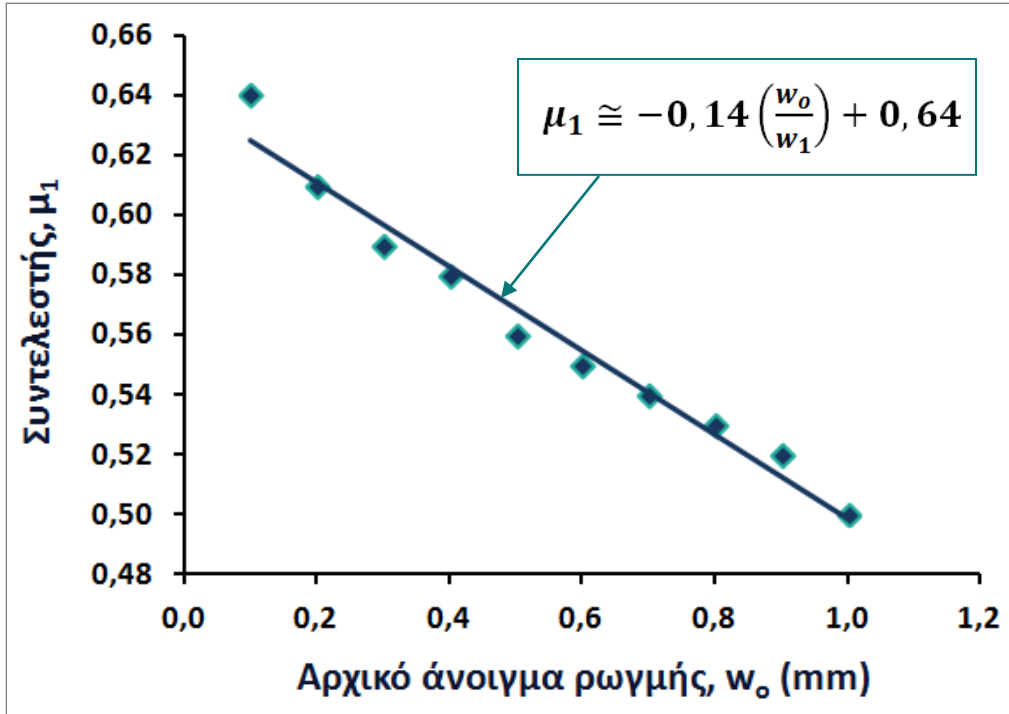
Οι τιμές του συντελεστή τριβής μ και του $\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c}\right)^k$ που προέκυψαν στην περίπτωση αυτή, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Παρατηρείται, ότι καθώς αυξάνεται το αρχικό άνοιγμα ρωγμής w_o , μειώνεται η τιμή των συντελεστών μ και μ_1 . Η μεταβολή των τιμών του μ_1 συναρτήσει των τιμών του w_o , παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 26. Στα δεδομένα του γραφήματος προσαρμόζεται μία ευθεία, η οποία περιγράφει την τάση μείωσης του συντελεστή μ_1 με την αύξηση του w_o . Η τάση που υπάρχει στη σχέση των δύο μεταβλητών διατυπώνεται ακολούθως, μέσω της σχέσης (23). Το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών των τιμών του μ_1 , που προκύπτουν μεταξύ της σχέσης (23) και από τον Πίνακα 4, είναι $\sum_{i=1}^{10} (v_i)^2 = 0,0005$. Στη σχέση (23), προκειμένου η τιμή του συντελεστή μ_1 να προκύπτει αδιάστατος αριθμός, το αρχικό άνοιγμα ρωγμής w_o διαιρείται με $w_1 = 1 \text{ mm}$.

$$\mu_1 \cong -0,14 \left(\frac{w_o}{w_1}\right) + 0,64 \quad (23)$$

όπου: w_1 είναι σταθερά αδιαστασιοποίησης, ίση με 1 mm .

Υπολογισμός τιμών του μ_1 , για $\tau = 10 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$ και $k = 2/3$					
$w_o \text{ (mm)}$	$\tau \text{ (MPa)}$	$\delta \text{ (mm)}$	$\sigma \text{ (MPa)}$	$\mu = \frac{\tau}{\sigma}$	$\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{2/3}$
0,1	10,00	0,23	4,25	2,35	0,64
0,2	10,00	0,43	4,91	2,04	0,61
0,3	10,00	0,64	5,38	1,86	0,59
0,4	10,00	0,87	5,78	1,73	0,58
0,5	10,00	1,14	6,17	1,62	0,56
0,6	10,00	1,45	6,57	1,52	0,55
0,7	10,00	1,82	7,00	1,43	0,54
0,8	10,00	2,29	7,50	1,33	0,53
0,9	10,00	2,88	8,10	1,24	0,52
1,0	10,00	3,66	8,85	1,13	0,50

Πίνακας 4. Η επίδραση του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o στη διαμόρφωση των τιμών του μ_1 , για $\tau = 10 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$ και $k = 2/3$



Σχήμα 26. Γραφική απεικόνιση της μεταβολής των τιμών του μ_1 , συναρτήσει των τιμών του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o , για $\tau = 10 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

- **Δοκιμή 2^η:** $\tau = 7 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

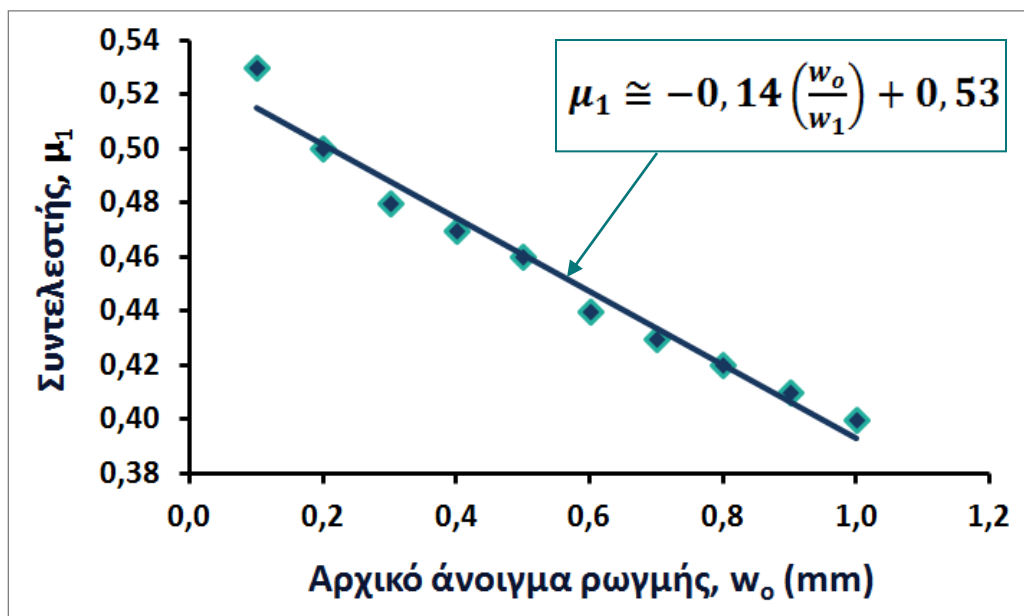
Οι τιμές του συντελεστή τριβής μ και του $\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^k$ που προέκυψαν στην περίπτωση αυτή, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Παρατηρείται, ότι οι τιμές του μ_1 προσεγγίζουν ικανοποιητικά έως και ταυτίζονται με την τιμή 0,44. Η μεταβολή των τιμών του μ_1 συναρτήσει των τιμών του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o , παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 27. Η τάση μείωσης του συντελεστή μ_1 με την αύξηση του w_o , διατυπώνεται ακολούθως, μέσω της σχέσης (24). Το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών των τιμών του μ_1 , που προκύπτουν μεταξύ της σχέσης (24) και από τον Πίνακα 5, είναι $\sum_{i=1}^{10} (v_i)^2 = 0,0005$.

$$\mu_1 \cong -0,14 \left(\frac{w_o}{w_1} \right) + 0,53 \quad (24)$$

όπου: $w_1 = 1 \text{ mm}$.

Υπολογισμός τιμών του μ_1 , για $\tau = 7 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$ και $k = 2/3$					
$w_o \text{ (mm)}$	$\tau \text{ (MPa)}$	$\delta \text{ (mm)}$	$\sigma \text{ (MPa)}$	$\mu = \frac{\tau}{\sigma}$	$\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{2/3}$
0,1	7,00	0,17	2,63	2,66	0,53
0,2	7,00	0,31	3,12	2,25	0,50
0,3	7,00	0,47	3,46	2,03	0,48
0,4	7,00	0,64	3,75	1,87	0,47
0,5	7,00	0,83	4,03	1,74	0,46
0,6	7,00	1,06	4,33	1,62	0,44
0,7	7,00	1,34	4,64	1,51	0,43
0,8	7,00	1,68	5,01	1,40	0,42
0,9	7,00	2,11	5,44	1,29	0,41
1,0	7,00	2,68	6,00	1,17	0,40

Πίνακας 5. Η επίδραση του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o στη διαμόρφωση των τιμών του μ_1 , για $\tau = 7 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$ και $k = 2/3$



Σχήμα 27. Γραφική απεικόνιση της μεταβολής των τιμών του μ_1 , συναρτήσει των τιμών του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o , για $\tau = 7 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

- **Δοκιμή 3^η:** $\tau = 4 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

Οι τιμές του συντελεστή τριβής μ και του $\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c}\right)^k$ που προέκυψαν στην περίπτωση αυτή, παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. Παρατηρείται, ότι οι τιμές του μ_1 προσεγγίζουν ικανοποιητικά έως και ταυτίζονται με την τιμή 0,33, την οποία λαμβάνει υπόψη η Παλιεράκη (2014) για διεπιφάνειες παλαιού – νέου σκυροδέματος (βλ. σελ. 29, 30). Η μεταβολή των τιμών του μ_1 συναρτήσει των τιμών του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o , παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 28. Η τάση μείωσης του συντελεστή μ_1 με την αύξηση του w_o , διατυπώνεται ακολούθως, μέσω της σχέσης (25). Το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών των τιμών του μ_1 , που προκύπτουν μεταξύ της σχέσης (25) και από τον Πίνακα 6, είναι $\sum_{i=1}^{10} (v_i)^2 = 0,0006$.

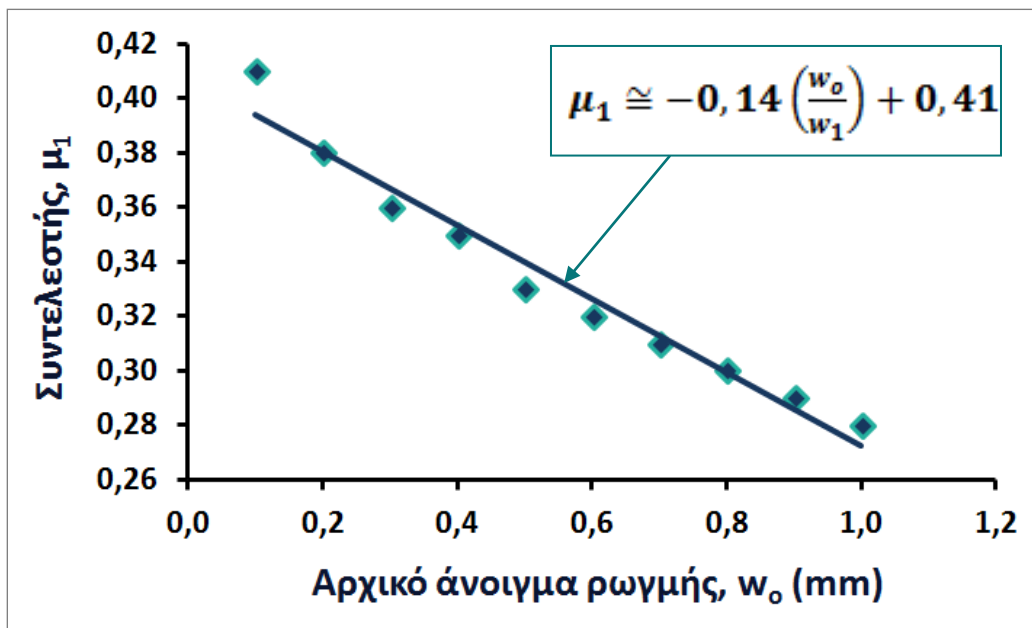
$$\mu_1 \cong -0,14 \left(\frac{w_o}{w_1}\right) + 0,41 \quad (25)$$

όπου: $w_1 = 1 \text{ mm}$.

Σημειώνεται, ότι η χρήση των σχέσεων (21), (22) του fib Model Code 2010 που αφορούν σε ρηγματωμένη διεπιφάνεια σκυροδέματος, ανταποκρίνεται στην απόδειξη της τιμής $\mu_1 = 0,33$ που αφορά σε διεπιφάνεια παλαιού – νέου σκυροδέματος, θεωρώντας, ότι η τελευταία αποτελεί ρηγματωμένη διεπιφάνεια με μικρή διάμετρο αδρανούς. Η παρατήρηση αυτή γίνεται, διότι η τράχυνση της διεπιφάνειας των δοκιμίων στα πειράματα της Παλιεράκη (2014) έγινε με χρήση μηχανικών μέσων (καλέμι – ματσακόνι), και επομένως, ο μειωμένος βαθμός επεξεργασίας της διεπιφάνειας συντέλεσε σε μικρή έκδηλη διάμετρο αδρανούς και στην εκδήλωση μικρότερου βαθμού τραχύτητας. Έτσι, μπορεί να θεωρηθεί, ότι η διεπιφάνεια παλαιού – νέου σκυροδέματος των δοκιμίων, προσεγγίζει μια ρηγματωμένη διεπιφάνεια με μικρή διάμετρο αδρανούς.

Υπολογισμός τιμών του μ_1 , για $\tau = 4 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$ και $k = 2/3$					
$w_o \text{ (mm)}$	$\tau \text{ (MPa)}$	$\delta \text{ (mm)}$	$\sigma \text{ (MPa)}$	$\mu = \frac{\tau}{\sigma}$	$\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{2/3}$
0,1	4,00	0,11	1,01	3,96	0,41
0,2	4,00	0,20	1,32	3,04	0,38
0,3	4,00	0,30	1,53	2,61	0,36
0,4	4,00	0,40	1,72	2,33	0,35
0,5	4,00	0,53	1,90	2,11	0,33
0,6	4,00	0,67	2,08	1,92	0,32
0,7	4,00	0,85	2,29	1,75	0,31
0,8	4,00	1,06	2,52	1,59	0,30
0,9	4,00	1,34	2,79	1,43	0,29
1,0	4,00	1,70	3,15	1,27	0,28

Πίνακας 6. Η επίδραση του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o στη διαμόρφωση των τιμών του μ_1 , για $\tau = 4 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$ και $k = 2/3$



Σχήμα 28. Γραφική απεικόνιση της μεταβολής των τιμών του μ_1 , συναρτήσει των τιμών του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o , για $\tau = 4 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

Συμπερασματικά, από τα αποτελέσματα των ανωτέρω δοκιμών διαπιστώνεται, ότι για τιμές επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης γύρω στα $\tau = 7 \text{ MPa}$, οι τιμές του συντελεστή μ_1 προσεγγίζουν ή ταυτίζονται με την τιμή 0,44. Καθώς μειώνεται η τιμή της τ , παρατηρείται μείωση των τιμών του μ_1 , και για τιμές της επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης γύρω στα $\tau = 4 \text{ MPa}$, οι τιμές του συντελεστή μ_1 προσεγγίζουν ή ταυτίζονται με την τιμή 0,33.

Αν υποθεθεί ότι στις πειραματικές δοκιμές που πραγματοποίησε η Παλιεράκη (2014), η μέση τιμή του αρχικού ανοίγματος διατμητικής ρωγμής ήταν $w_o \sim 0,2 \text{ mm}$ και η διάμετρος του μεγίστου κόκκου αδρανών ήταν $D_{max} = 16 \text{ mm}$, τότε προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές του μ_1 , λαμβάνοντας υπόψη την αδρομέρεια της ρηγματωμένης διεπιφάνειας και την επίδραση του w_o στο μ_1 , όπως περιγράφεται από τις σχέσεις $\mu_1 = \mu_1(w_o)$ που προέκυψαν από τις ανωτέρω δοκιμές:

Δοκιμή 1^η: $\tau = 10 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

$$\mu_1 \cong \left(0,64 - 0,14 \cdot \frac{w_o}{w_1}\right) \cdot \sqrt[4]{\frac{D_{max}}{D_o}} = \left(0,64 - 0,14 \cdot \frac{0,2}{1}\right) \cdot \sqrt[4]{\frac{16}{30}} = \mathbf{0,52}$$

Δοκιμή 2^η: $\tau = 7 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

$$\mu_1 \cong \left(0,53 - 0,14 \cdot \frac{w_o}{w_1}\right) \cdot \sqrt[4]{\frac{D_{max}}{D_o}} = \left(0,53 - 0,14 \cdot \frac{0,2}{1}\right) \cdot \sqrt[4]{\frac{16}{30}} = \mathbf{0,43}$$

Δοκιμή 3^η: $\tau = 4 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

$$\mu_1 \cong \left(0,41 - 0,14 \cdot \frac{w_o}{w_1}\right) \cdot \sqrt[4]{\frac{D_{max}}{D_o}} = \left(0,41 - 0,14 \cdot \frac{0,2}{1}\right) \cdot \sqrt[4]{\frac{16}{30}} = \mathbf{0,33}$$

Με βάση τα ανωτέρω αποτελέσματα διαπιστώνεται, ότι λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_0 και την αδρομέρεια της ρηγματωμένης διεπιφάνειας (χοντρικά το D_{max} των αδρανών), για επιστρατευόμενη διατμητική τάση $\tau = 4 \text{ MPa}$, η τιμή του συντελεστή μ_1 προκύπτει περίπου ίση με 0,33, όπως λαμβάνεται από την Παλιεράκη (2014).

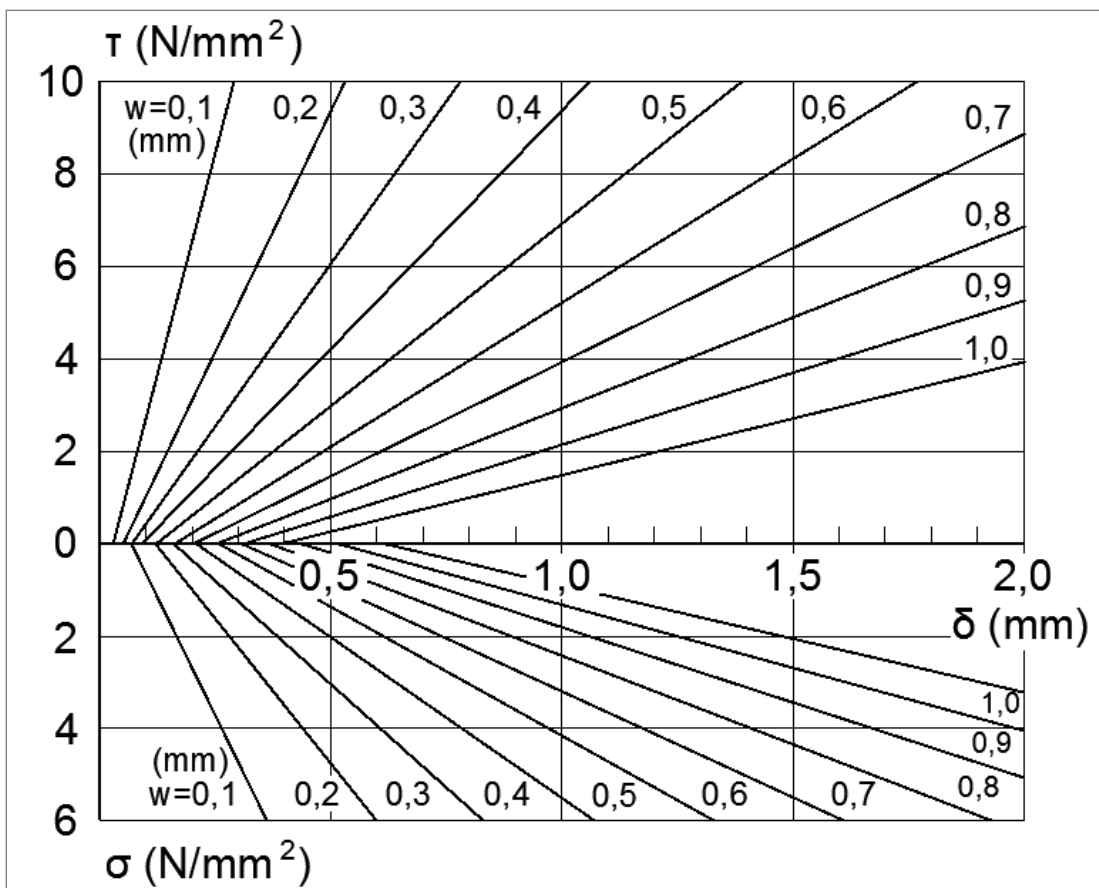
- **Δοκιμή 4^η:** $\tau = 10 \text{ MPa}$, $C_f = 0,8$, $f_c = 30 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

Στην περίπτωση αυτή, εφαρμόζοντας τις σχέσεις (21), (22), υπολογίστηκαν οι τιμές του συντελεστή τριβής μ και του $\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^k$, λαμβάνοντας $C_f = 0,8$, δηλαδή θεωρώντας ότι το 20% των αδρανών θραύεται. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για $\tau = 10 \text{ MPa}$, παρουσιάζονται στον Πίνακα 7. Επιπλέον, υλοποιήθηκε ένα διάγραμμα (Σχήμα 29), στο οποίο για $C_f = 0,8$, παρουσιάζεται η εξέλιξη της επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης τ και της ορθής θλιπτικής τάσης σ , συναρτήσει της σχετικής ολίσθησης δ , για τιμές του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_0 από 0,1 μέχρι 1,0 mm. Όσον αφορά στο συντελεστή τριβής μ και το συντελεστή μ_1 , από τις τιμές του Πίνακα 7 παρατηρείται, ότι λαμβάνουν ελάχιστα μικρότερες τιμές σε σχέση με την περίπτωση που θεωρήθηκε $C_f = 1$ (Πίνακας 4).

(Σημείωση: Μια περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης του συντελεστή θραύσης αδρανών C_f στις τιμές του μ_1 , παρουσιάζεται στο ένθετο κείμενο.)

Υπολογισμός τιμών του μ_1 , για $\tau = 10 \text{ MPa}$, $C_f = 0,8$, $f_c = 30 \text{ MPa}$ και $k = 2/3$					
$w_o \text{ (mm)}$	$\tau \text{ (MPa)}$	$\delta \text{ (mm)}$	$\sigma \text{ (MPa)}$	$\mu = \frac{\tau}{\sigma}$	$\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{2/3}$
0,1	10,00	0,29	4,48	2,23	0,63
0,2	10,00	0,53	5,13	1,95	0,60
0,3	10,00	0,78	5,59	1,79	0,58
0,4	10,00	1,06	5,98	1,67	0,57
0,5	10,00	1,39	6,36	1,57	0,56
0,6	10,00	1,77	6,75	1,48	0,55
0,7	10,00	2,23	7,17	1,39	0,54
0,8	10,00	2,80	7,66	1,31	0,53
0,9	10,00	3,52	8,24	1,21	0,51
1,0	10,00	4,48	8,98	1,11	0,50

Πίνακας 7. Η επίδραση του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o στη διαμόρφωση των τιμών του μ_1 , για $\tau = 10 \text{ MPa}$, $C_f = 0,8$, $f_c = 30 \text{ MPa}$ και $k = 2/3$



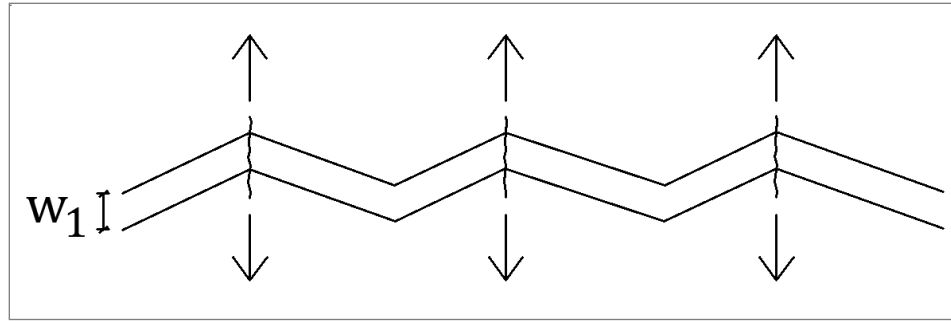
Σχήμα 29. Διάγραμμα εξέλιξης της επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης τ και της ορθής θλιπτικής τάσης σ , συναρτήσει της σχετικής ολίσθησης δ , για $C_f = 0,8$ και $f_c = 30 \text{ MPa}$

3.2.2.β Διερεύνηση των αιτιών ύπαρξης αρχικού w_o , παρά την εκ των υστέρων άσκηση θλιπτικής τάσης σ_c σε προεφελκυόμενη ρηγματωμένη διεπιφάνεια

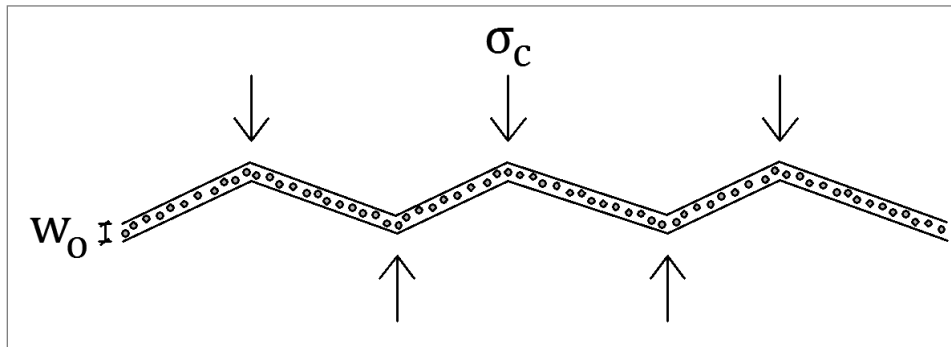
Δύο αίτια συνεπάγονται την ύπαρξη αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o , παρά την εκ των υστέρων άσκηση θλιπτικής τάσης σ_c σε προεφελκυόμενη ρηγματωμένη διεπιφάνεια σκυροδέματος, τα οποία αναφέρονται ακολούθως.

1) Περίπτωση άοπλης διατομής

Στην περίπτωση αυτή, το εγκλωβισμένο (ολίγον, έστω) υλικό φθοράς εμποδίζει το κλείσιμο της ρωγμής, με αποτέλεσμα να παραμένει κάποιο αρχικό άνοιγμα w_o (Σχήμα 30β).



(α)



(β)

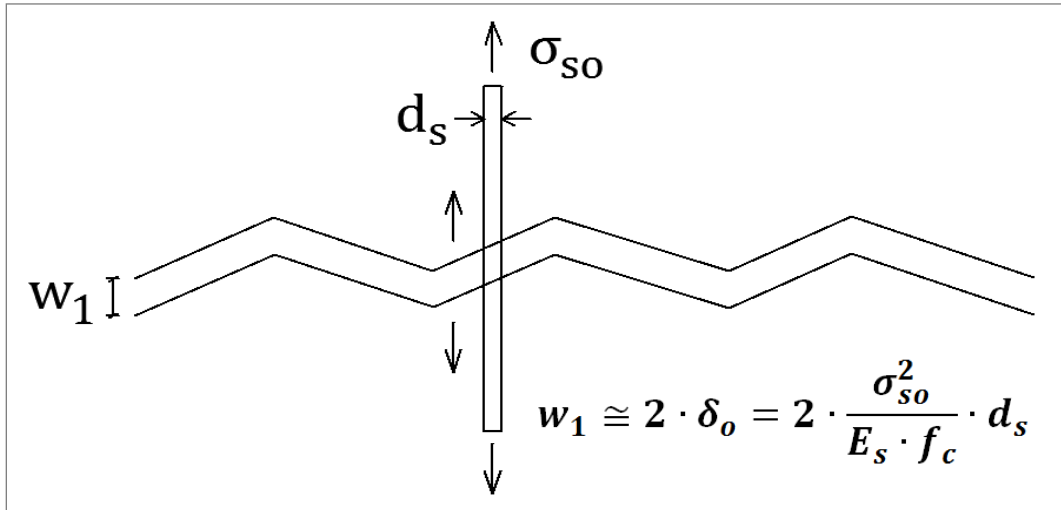
Σχήμα 30. (α) Δημιουργία ανοίγματος ρωγμής w_1 , λόγω δράσης εφελκυστικής δύναμης κάθετα στο επίπεδο ολίσθησης και (β) παραμένον άνοιγμα ρωγμής w_o , λόγω του εγκλωβισμένου υλικού φθοράς μέσα στη ρωγμή

2) Περίπτωση ωπλισμένης διατομής

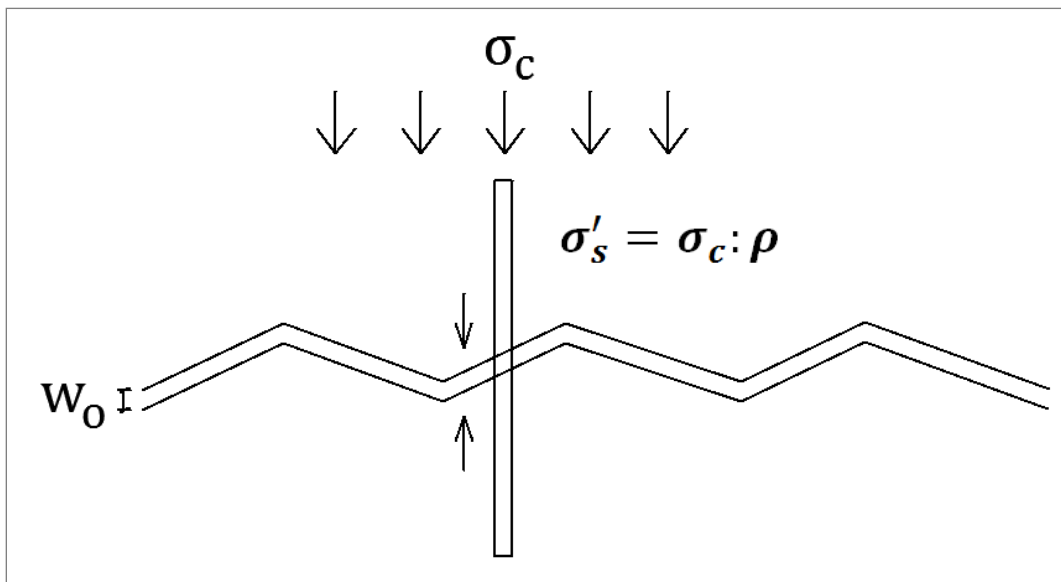
Στην περίπτωση αυτή, η επιβαλλόμενη θλιπτική τάση σ_c δεν είναι ικανή να μηδενίσει το αρχικό άνοιγμα w_1 , και το παραμένον άνοιγμα ρωγμής w_o υπολογίζεται, όπως περιγράφεται σε αυτά που ακολουθούν.

Αρχικά, λόγω δράσης εφελκυστικής δύναμης κάθετα στο επίπεδο ολίσθησης, δημιουργείται άνοιγμα ρωγμής w_1 και ταυτόχρονα, αναπτύσσεται εφελκυστική τάση σ_{s0} στη ράβδο οπλισμού διαμέτρου d_s που διαπερνά τη διεπιφάνεια (Σχήμα 31α). Το άνοιγμα ρωγμής w_1 ισούται με τη μήκυνση της ράβδου που τέμνει τη ρωγμή, και ισχύει $w_1 = 2 \cdot \delta_o$, όπου δ_o είναι η εξόλκευση της ράβδου σε κάθε άκρο της, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση $\delta_o = \frac{\sigma_{s0}^2}{E_s \cdot f_c} \cdot d_s$, όπως αναφέρεται

στο Σχήμα 54 (σελ. 105). Κατόπιν, όπου επιβάλλεται στη διατομή θλιπτική τάση σ_c (Σχήμα 31β), αναπτύσσεται στον οπλισμό θλιπτική τάση $\sigma'_s = \sigma_c \cdot \rho$, όπου ρ είναι το γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού της διεπιφάνειας. Στην κατάσταση αυτή, η εξόγκωση της ράβδου είναι δ' και το άνοιγμα ρωγμής ισούται με $w_o = 2 \cdot \delta'$.



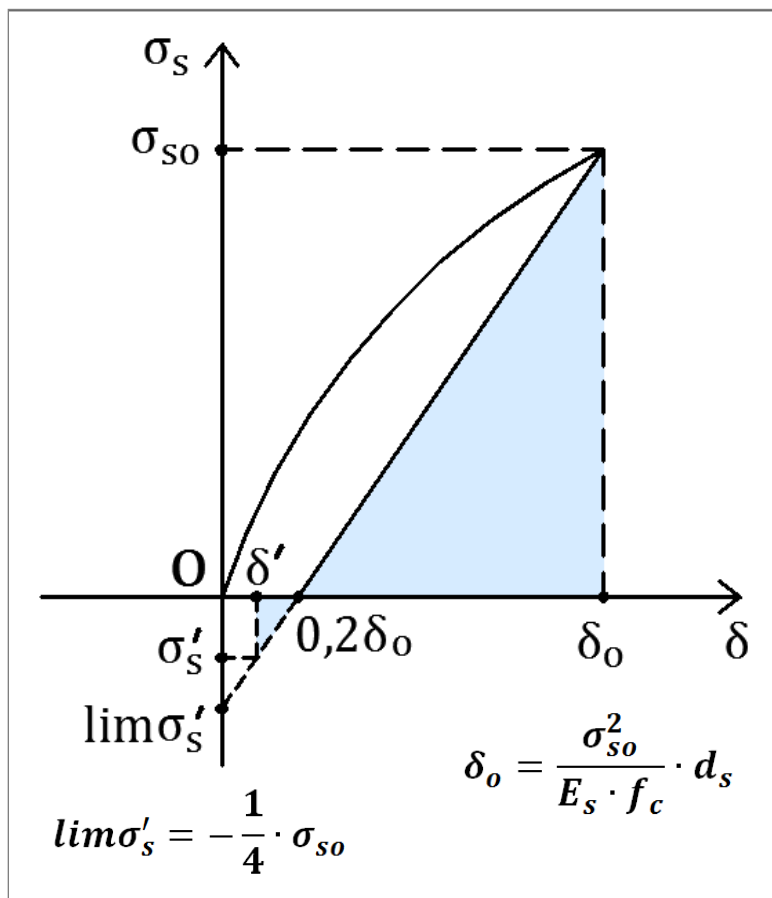
(α)



(β)

Σχήμα 31. (α) Δημιουργία ανοίγματος ρωγμής w_1 , λόγω δράσης εφελκυστικής δύναμης κάθετα στο επίπεδο ολίσθησης και (β) παραμένον άνοιγμα w_o , λόγω αδυναμίας της θλιπτικής τάσης σ_c να μηδενίσει το αρχικό άνοιγμα w_1

Οι ανωτέρω φάσεις, κατά τις οποίες η ράβδος οπλισμού της διεπιφάνειας υπόκειται αρχικά σε εφελκυσμό και κατόπιν σε θλίψη, περιγράφονται μέσω του Σχήματος 32. Αρχικά, η εφελκυστική τάση σ_s της ράβδου αυξάνεται με την αύξηση της εξόλκευσής της. Στη συνέχεια, η τάση του χάλυβα μειώνεται και παράλληλα μειώνεται η εξόλκευση της ράβδου, μέχρις ότου η παραμένουσα εξόλκευση γίνει ίση με $\delta_{o,res} = 0,2 \cdot \delta_o$. Ακολούθως, πραγματοποιείται εμπειρική προέκταση του κλάδου, έως ότου για $\delta = 0$, η τάση του χάλυβα γίνει ίση με $\lim \sigma'_s = -\frac{1}{4} \cdot \sigma_{so}$.



Σχήμα 32. Προσομοίωμα συμπεριφοράς ράβδου που υπόκειται σε εφελκυσμό λόγω δράσης εφελκυστικής δύναμης κάθετα στο επίπεδο ολισθήσης, και στη συνέχεια σε θλίψη, λόγω επιβολής θλιπτικής τάσης σ_c

Εφαρμόζοντας την ομοιότητα των χρωματισμένων (με γαλάζιο χρώμα) τριγώνων του ανωτέρω Σχήματος, το παραμένον άνοιγμα ρωγμής w_o για επιβαλλόμενη θλιπτική τάση σ_c , προκύπτει:

$$\frac{(0,2 \cdot \delta_o) - \delta'}{0,8 \cdot \delta_o} = \frac{\sigma'_s}{\sigma_{so}} \Rightarrow$$

$$\frac{(0,2 \cdot \delta_o) - \left(\frac{w_o}{2}\right)}{0,8 \cdot \delta_o} = \frac{\sigma'_s}{\sigma_{so}} \Rightarrow$$

$$\boxed{w_o = 1,6 \cdot \frac{\sigma_{so}^2}{E_s \cdot f_c} \cdot d_s \cdot \left(0,25 - \frac{\sigma_c}{\rho \cdot \sigma_{so}}\right)} \quad (26)$$

Επιλύοντας ένα αριθμητικό παράδειγμα εφαρμογής της σχέσης (26), θέτοντας πιθανές τιμές στις παραμέτρους της σχέσης και λαμβάνοντας τη θλιπτική τάση $\sigma_c = 0$, το μέγιστο άνοιγμα ρωγμής προκύπτει:

$$\max w_o = 0,4 \cdot \frac{(400 \text{ MPa})^2}{(200000 \text{ MPa}) \cdot (20 \text{ MPa})} \cdot (20 \text{ mm}) \approx 0,3 \text{ mm}$$

Ζήτημα δηλαδή είναι, αν για πολύ μικρές τιμές $\sigma_c < 1 \text{ MPa}$, μπορεί να είναι $w_o < 0,2 \text{ mm}$.

Βεβαίως, αν έχει προηγηθεί διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα, τότε το διάγραμμα (σ_s/δ) γίνεται όπως στο Σχήμα 33, όπου λ.χ. η παραμένουσα εξόλκευση μετά τον μηδενισμό της σ_s γίνεται $\delta_{r,1} \approx 0,5 \cdot \delta_1$ (αντί $\delta_{o,res} = 0,2 \cdot \delta_o$, όταν $\sigma_s < f_{sy}$) – που και η τιμή δ_1 είναι σαφώς μεγαλύτερη της δ_o . Επομένως, όταν ασκηθεί $\sigma_s < 0$ (θλιπτική, λόγω της σ_c), θα κλείνει μεν μέρος του ανοίγματος της ρωγμής, υπάρχει όμως πολύ περιθώριο για μεγάλες τιμές $\delta' = w_o/2$.

Επομένως:

$$\mu_1 \cong \left(b - a \cdot \frac{w_o}{w_1} \right) \cdot \sqrt[4]{\frac{D_{max}}{D_o}} \quad (27)$$

όπου: $a, b =$ σταθερές, $w_1 = 1 \text{ mm}$ και $D_o = 30 \text{ mm}$.

(Σημείωση: Μια περαιτέρω διερεύνηση για τη διατύπωση μιας γενικής έκφρασης του μ_1 , η οποία περιγράφει την εξάρτηση του μ_1 από το αρχικό άνοιγμα ρωγμής w_o , το λόγο της επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης / τη θλιπτική αντοχή σκυροδέματος τ/f_c , και τη διάμετρο του μέγιστου κόκκου αδρανών D_{max} , παρουσιάζεται στο ένθετο κείμενο.)

3.2.2.γ Διερεύνηση της σχέσης που συνδέει την ολίσθηση s_o με το αρχικό άνοιγμα ρωγμής w_o , με βάση τις σχέσεις (21), (22) και το διάγραμμα (Σχήμα 25) του *fib Model Code 2010*

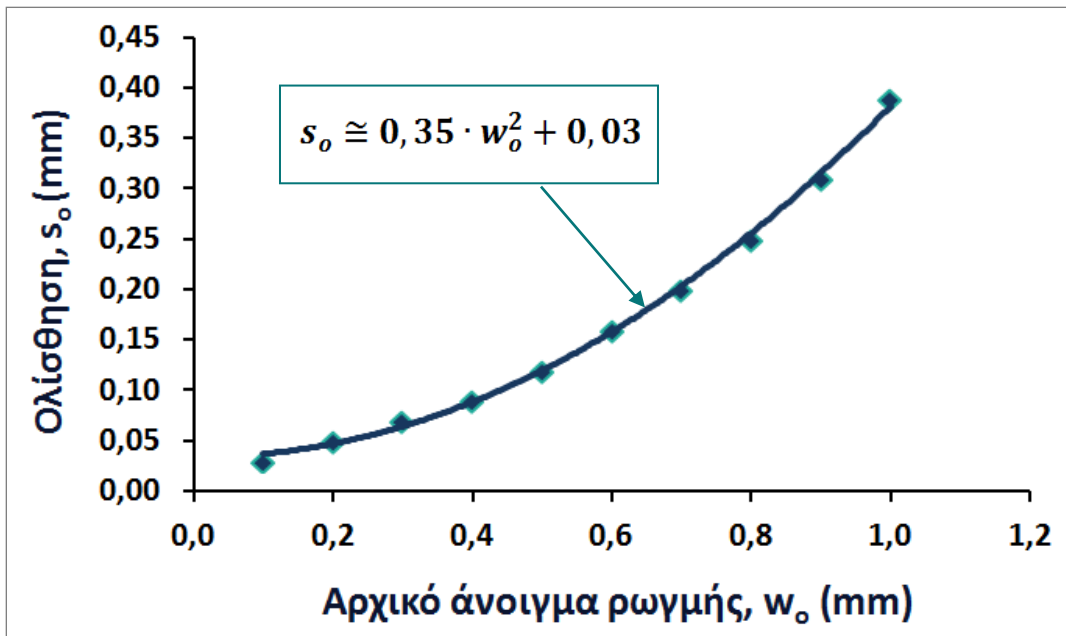
Μια παρατήρηση που γίνεται στο Σχήμα 25 είναι, ότι καθώς το αρχικό άνοιγμα ρωγμής w_o αυξάνεται, απαιτείται μεγαλύτερη ολίσθηση s_o προκειμένου τα χείλη της ρωγμής να έρθουν σε επαφή και να αναπτυχθεί διατμητική αντίσταση λόγω τριβής τ και ορθή θλιπτική τάση σ . Οι τιμές της ολίσθησης s_o που απαιτούνται προκειμένου να ενεργοποιηθεί η διατμητική αντίσταση λόγω τριβής, για κάθε άνοιγμα ρωγμής, παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.

w_o (mm)	s_o (mm)	w_o (mm)	s_o (mm)
0,1	0,03	0,6	0,16
0,2	0,05	0,7	0,20
0,3	0,07	0,8	0,25
0,4	0,09	0,9	0,31
0,5	0,12	1,0	0,39

Πίνακας 8. Η επίδραση του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o , στις τιμές της ολίσθησης s_o που απαιτούνται για την ενεργοποίηση της διατμητικής αντίστασης λόγω τριβής τ

Η μεταβολή των τιμών της ολίσθησης s_o συναρτήσει των τιμών του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o , παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 34. Στα δεδομένα του γραφήματος προσαρμόζεται μία καμπύλη, η οποία περιγράφει την τάση αύξησης της ολίσθησης s_o με την αύξηση του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o . Η τάση που υπάρχει στη σχέση των δύο μεταβλητών διατυπώνεται ακολούθως, μέσω της σχέσης (28). Το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών των τιμών της ολίσθησης s_o , που προκύπτουν μεταξύ της σχέσης (28) και από τον Πίνακα 8, είναι $\sum_{i=1}^{10}(v_i)^2 = 0,0003 \text{ mm}^2$.

$$s_o \cong 0,35 \cdot w_o^2 + 0,03 \quad (28)$$



Σχήμα 34. Γραφική απεικόνιση της μεταβολής των τιμών της ολίσθησης s_o , συναρτήσει των τιμών του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o

Σημειώνεται, ότι η χρήση του Σχήματος 34 και της σχέσης (28), οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα στην περίπτωση που διατίθενται δύο τμήματα σκυροδέματος αμετακίνητα κατακορύφως, όπου απαιτείται σχετική ολίσθηση s_0 των όψεων της ρωγμής προκειμένου να έρθουν σε επαφή, με σκοπό την ενεργοποίηση της διατμητικής αντίστασης λόγω τριβής.

Στην παρούσα εργασία όμως, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, διερευνάται η περίπτωση ρηγματωμένης διεπιφάνειας, στην οποία επιβάλλεται ορθή θλιπτική τάση που μηδενίζει το άνοιγμα της ρωγμής, διότι η περίπτωση αυτή συναντάται στην πραγματικότητα στις κατασκευές, όπου τα ρηγματωμένα δομικά στοιχεία υπόκεινται σε εξωτερική φόρτιση, η οποία οδηγεί πρακτικώς σε μηδενισμό του ανοίγματος της ρωγμής. Ο, πρακτικώς, μηδενισμός του ανοίγματος ρωγμής λόγω επιβολής ορθής θλιπτικής τάσης, έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη διατμητικής αντίστασης λόγω τριβής, χωρίς να απαιτείται σχετική ολίσθηση των όψεων της ρωγμής.

Ωστόσο, πρέπει να παρατηρηθεί ότι (λόγω του ανισοκατανεμημένου υλικού φθοράς ανάμεσα στα χείλη της ρωγμής) μάλλον παραμένει κάποιο αρχικό άνοιγμα w_0 , παρά την άσκηση θλιπτικής τάσης. Για πολύ μικρές σ_c , επομένως, θα αναμέναμε ίσως μεγαλύτερα w_0 και επομένως, μικρότερες τιμές μ_1 . Η φυσική αυτή αιτία ενδέχεται να αμβλύνει κάπως την ταχύτατη αύξηση του μ λόγω μικρών σ_c (εξαιτίας του ρόλου του παράγοντα $\left(\frac{\sigma_c}{f_c}\right)^{-2/3}$). Δυστυχώς, η κατάσταση των ερευνών δεν επιτρέπει ακριβέστερα συμπεράσματα. Κάνει πάντως εντύπωση, ότι η διεθνής έρευνα έχει τόσο σημαντικές ελλείψεις σε βασικά δεδομένα. Επομένως, λαμβάνεται υπόψη μόνον το ακόλουθο ποιοτικό συμπέρασμα: Η τιμή του μ_1 φαίνεται ότι μειώνεται συναρτήσεως του αρχικού ανοίγματος της ρωγμής, δευτερευόντως δε όταν μειώνεται η αναπτυσσόμενη θλιπτική τάση.

3.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΙΒΗΣ μ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ μ_1 , ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΤΩΝ Fronteddu, Leger and Tinawi (1998)

Οι Fronteddu, Leger and Tinawi (1998), πραγματοποίησαν δοκιμές, στις οποίες επέβαλαν σχετικές ολισθήσεις σε διεπιφάνειες σκυροδέματος που χαρακτηρίζονται από διαφορετικό τρόπο προετοιμασίας, με σκοπό να συγκρίνουν τη συμπεριφορά τους, μεταξύ των καταστάσεων επιβολής δυναμικής και στατικής φόρτισης.

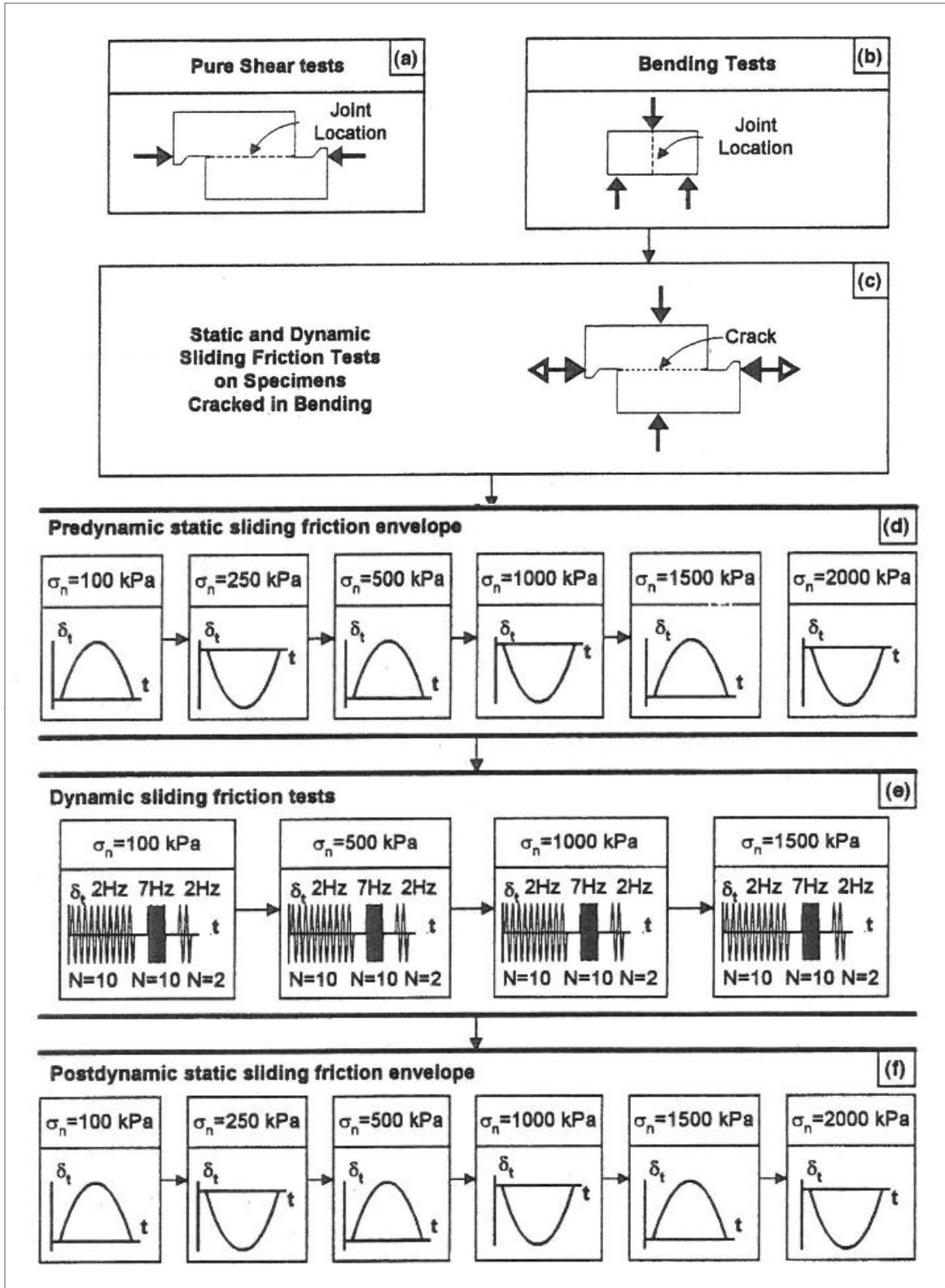
Η διεπιφάνεια των δοκιμών δεν είναι ωπλισμένη. Τα δοκίμια διαχωρίζονται στις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες, με βάση τον τρόπο προετοιμασίας της διεπιφάνειας:

- Δοκίμια, τα οποία σκυροδετούνται σε μία φάση,
- Δοκίμια, των οποίων οι επιφάνειες του αρμού τραχύνονται με υδροβολή, 6 ώρες μετά τη σκυροδέτηση,
- Δοκίμια, των οποίων οι επιφάνειες του αρμού δεν υπόκεινται σε επεξεργασία, και
- Δοκίμια, των οποίων ο αρμός συνίσταται από δύο ανεξάρτητες λείες επιφάνειες σκυροδέματος.

Η διαδικασία της δοκιμής παρουσιάζεται στο Σχήμα 35 και περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια. Αρχικά, τα δοκίμια ρηγματώθηκαν στο επίπεδο της διεπιφάνειας με την επιβολή, είτε διατμητικής δύναμης, είτε κάμψης σε τρία σημεία. Τα δοκίμια των οποίων οι επιφάνειες τραχύνθηκαν με υδροβολή και τα δοκίμια των οποίων οι επιφάνειες δεν υπέστησαν επεξεργασία, έφτασαν το 82% και 45% αντίστοιχα, της αντίστασης σε ρηγμάτωση των μονολιθικών δοκιμών. Τα δύο τμήματα των ρηγματωμένων δοκιμών, στη συνέχεια ήρθαν πάλι σε επαφή, προκειμένου να επιβληθούν οι στατικές και δυναμικές φορτίσεις.

Σε πρώτο βήμα, πραγματοποιήθηκε η στατική φόρτιση. Επιβλήθηκε ολίσθηση στο ανώτερο τμήμα του δοκιμίου για έναν κύκλο στον οποίο επιβάλλεται συγκεκριμένη τιμή ορθής θλιπτικής τάσης. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για έξι επίπεδα θλιπτικής τάσης: $\sigma_n = 100, 250, 500, 1000, 1500$ και 2000 kPa. Οι κύκλοι για $\sigma_n = 100, 500$ και 1500 kPa, χαρακτηρίζονται forward – backward (θετική ολίσθηση δ_t), ενώ οι κύκλοι για $\sigma_n = 250, 1000$ και 2000 kPa, χαρακτηρίζονται backward – forward (αρνητική ολίσθηση δ_t). Σε δεύτερο βήμα, πραγματοποιήθηκε η δυναμική φόρτιση. Για συγκεκριμένη τιμή ορθής τάσης, πραγματοποιήθηκαν 10 κύκλοι στα 2 Hz,

10 κύκλοι στα 7 Hz και 2 κύκλοι στα 2 Hz. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για τέσσερα επίπεδα θλιπτικής τάσης: $\sigma_n = 100, 500, 1000$ και 1500 kPa. Στο τελευταίο βήμα, επαναλήφθηκε η διαδικασία της στατικής φόρτισης. Οι μέγιστες επιβαλλόμενες ολισθήσεις επιλέχθηκαν σύμφωνα με το μέγεθος του αδρανούς: κάποιες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν επιβάλλοντας μέγιστη ολίσθηση ίση με το μισό του μεγέθους του αδρανούς, ενώ άλλες πραγματοποιήθηκαν επιβάλλοντας μέγιστη ολίσθηση ίση με το μέγεθος του αδρανούς. Τα αδρανή προέρχονταν από θραύση ασβεστόλιθου με μέγιστο μέγεθος τα 20 mm.



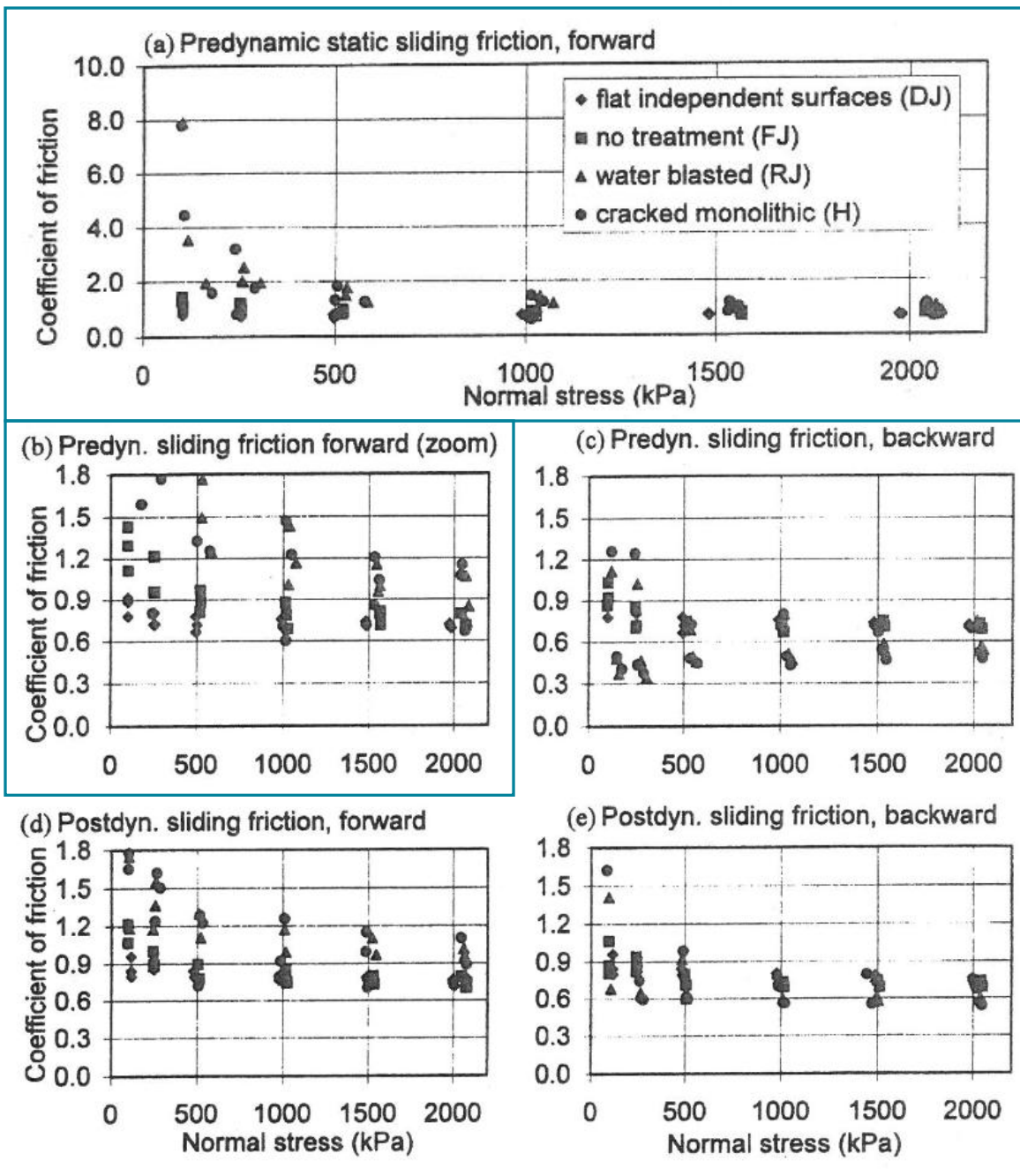
Σχήμα 35. Η διαδικασία ρηγμάτωσης των δοκιμίων και επιβολής στατικής και δυναμικής φόρτισης (Fronteddu, Leger and Tinawi, 1998)

Στα γραφήματα του Σχήματος 36, παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή τριβής των διεπιφανειών των διαφορετικών τύπων δοκιμίων, για τα επίπεδα θλιπτικής τάσης που επιβλήθηκαν, για τις καταστάσεις πριν και μετά την επιβολή δυναμικής φόρτισης. Οι μέγιστες τιμές του συντελεστή τριβής που προκύπτουν από τα γραφήματα και αφορούν στην κατάσταση πριν την επιβολή δυναμικής φόρτισης και για την κατεύθυνση forward, συνοψίζονται στον Πίνακα 9. Με βάση τις τιμές του συντελεστή τριβής μ , υπολογίστηκαν οι τιμές του συντελεστή $\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^k$, λαμβάνοντας $k = 2/3$ και $f_c = 27,9 \text{ MPa}$, οι οποίες συνοψίζονται στον Πίνακα 10.

Από τα δεδομένα των πινάκων διαπιστώνεται, ότι η διεπιφάνεια που προέκυψε από τη ρηγμάτωση των μονολιθικών δοκιμίων παρουσιάζει τους μεγαλύτερους συντελεστές τριβής μ , διότι χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο βαθμό τραχύτητας, και ακολουθεί η διεπιφάνεια που προέκυψε από τη ρηγμάτωση των δοκιμίων που προετοιμάστηκαν με υδροβολή. Μικρότερους συντελεστές τριβής παρουσιάζει η διεπιφάνεια που προέκυψε από τη ρηγμάτωση των δοκιμίων που δεν υπέστησαν επεξεργασία, και τις μικρότερες τιμές παρουσιάζουν οι λείες, ανεξάρτητες επιφάνειες σκυροδέματος, οι οποίες διαθέτουν μικρό βαθμό τραχύτητας. Παρατηρείται, ότι με το πέρας της στατικής ανακυκλιζόμενης φόρτισης, οι συντελεστές τριβής των διεπιφανειών μειώνονται, με τη μεγαλύτερη μείωση να παρουσιάζεται στα δοκίμια που διαθέτουν μεγαλύτερο βαθμό τραχύτητας. Αυτό οφείλεται στη φθορά και την αλλοίωση της τραχύτητας της διεπιφάνειας με την ανακύκλιση, η οποία είναι εντονότερη για τις διεπιφάνειες με μεγαλύτερο βαθμό τραχύτητας. Συνεπώς, η διαφορά των συντελεστών τριβής των διεπιφανειών σε σχέση με την τραχύτητά τους, μειώνεται με το πέρας της στατικής ανακυκλιζόμενης φόρτισης.

Όσον αφορά στις τιμές του συντελεστή μ_1 παρατηρείται, ότι αυξάνονται καθώς αυξάνεται ο βαθμός τραχύτητας των διεπιφανειών. Οι τιμές του συντελεστή μ_1 κρίνονται αρκετά μικρές για όλους τους τύπους δοκιμίων και αποκλίνουν πολύ από την τιμή 0,44. Ωστόσο, οι τιμές αυτές δεν λαμβάνονται υπόψη στη διερεύνηση του καταστατικού νόμου εξέλιξης του μηχανισμού τριβής υπό μονοτονική δράση, διότι στις δοκιμές, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εφαρμόστηκε μια υπερβολικά μεγάλη ολίσθηση με μέγιστη τιμή έως και 20 mm, ενώ στην παρούσα εργασία γίνεται αναφορά σ' έναν καταστατικό νόμο που οι ολισθήσεις είναι γενικά μικρότερες από 1 mm.

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στην έρευνα δεν είναι αντιπροσωπευτικές των καταστάσεων που επιδιώκεται να περιγραφούν στην παρούσα εργασία και αφορούν στις πραγματικές κατασκευές.



Σχήμα 36. Οι συντελεστές τριβής των διεπιφανειών των διαφορετικών τύπων δοκιμίων, για τις καταστάσεις πριν και μετά την επιβολή δυναμικής φόρτισης (Fronteddu, Leger and Tinawi, 1998)

Τιμές του συντελεστή τριβής μ , για κάθε τύπο δοκιμίου και τιμή θλιπτικής τάσης, κατά τη διάρκεια της στατικής ανακυκλιζόμενης φόρτισης						
Ορθή θλιπτική τάση (σε MPa)	0,10	0,25	0,5	1	1,5	2
Μονολιθικά δοκίμια (ρηγματωμένα) (cracked monolithic)	7,8	3,2	1,8	1,5	1,2	1,15
Επεξεργασία με υδροβολή (water blasted)	3,5	2,4	1,75	1,4	1,1	1,05
Καμία επεξεργασία (no treatment)	1,45	1,2	0,95	0,9	0,8	0,8
Λείες επιφάνειες (flat independent surfaces)	0,9	0,7	0,8	0,75	0,75	0,7

Πίνακας 9. Τιμές του συντελεστή τριβής μ , για κάθε τύπο δοκιμίου και τιμή θλιπτικής τάσης, κατά τη διάρκεια της στατικής ανακυκλιζόμενης φόρτισης

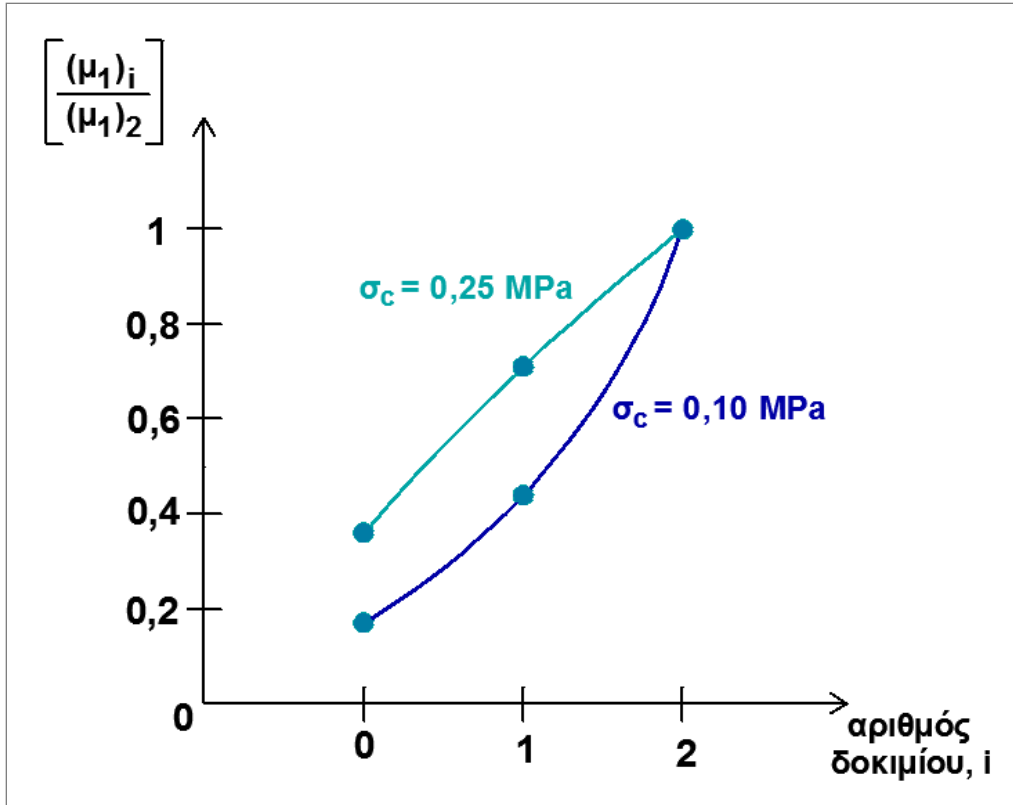
Τιμές του συντελεστή $\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c}\right)^{2/3}$, για κάθε τύπο δοκιμίου και τιμή θλιπτικής τάσης, κατά τη διάρκεια της στατικής ανακυκλιζόμενης φόρτισης						
Ορθή θλιπτική τάση (σε MPa)	0,10	0,25	0,5	1	1,5	2
Μονολιθικά δοκίμια (ρηγματωμένα) (cracked monolithic)	0,18	0,14	0,12	0,16	0,17	0,2
Επεξεργασία με υδροβολή (water blasted)	0,08	0,10	0,12	0,15	0,16	0,18
Καμία επεξεργασία (no treatment)	0,03	0,05	0,07	0,10	0,11	0,14
Λείες επιφάνειες (flat independent surfaces)	0,02	0,03	0,05	0,08	0,11	0,12

Πίνακας 10. Τιμές του συντελεστή μ_1 , για κάθε τύπο δοκιμίου και τιμή θλιπτικής τάσης, κατά τη διάρκεια της στατικής ανακυκλιζόμενης φόρτισης

Για τα δοκίμια των οποίων η διεπιφάνεια προετοιμάστηκε με υδροβολή και τα δοκίμια που δεν υπέστησαν επεξεργασία, υπολογίστηκε ο λόγος των τιμών του συντελεστή μ_1 ως προς την τιμή του μ_1 των ρηγματωμένων μονολιθικών δοκιμίων, για τιμές θλιπτικής τάσης 0,10 και 0,25 MPa. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 11 και απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 37. Παρατηρείται, ότι για τα δοκίμια των οποίων η διεπιφάνεια προετοιμάστηκε με υδροβολή, οι τιμές του συντελεστή μ_1 αποτελούν μεγαλύτερο ποσοστό των τιμών του μ_1 των ρηγματωμένων μονολιθικών δοκιμίων, σε σχέση με τα δοκίμια που δεν υπέστησαν επεξεργασία, το οποίο οφείλεται στο μεγαλύτερο βαθμό τραχύτητας των πρώτων. Οι υπολογισμοί δεν πραγματοποιήθηκαν για μεγαλύτερες τιμές θλιπτικής τάσης, διότι κατά τη διάρκεια της ανακύκλισης αλλοιώνεται η τραχύτητα της διεπιφάνειας, και επομένως δεν μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα για τη συσχέτιση του βαθμού τραχύτητας της διεπιφάνειας με τις τιμές του συντελεστή μ_1 .

Τιμές του λόγου $\left[\frac{(\mu_1)_i}{(\mu_1)_2} \right]$, όπου i ο αριθμός των δοκιμίων, με $i = 0, 1, 2$			
Αριθμός δοκιμίου, i	Κατηγορία δοκιμίου	Ορθή θλιπτική τάση (σε MPa)	
		0,10	0,25
2	Μονολιθικά δοκίμια (ρηγματωμένα) (cracked monolithic)	1	1
1	Επεξεργασία με υδροβολή (water blasted)	0,44	0,71
0	Καμία επεξεργασία (no treatment)	0,17	0,36

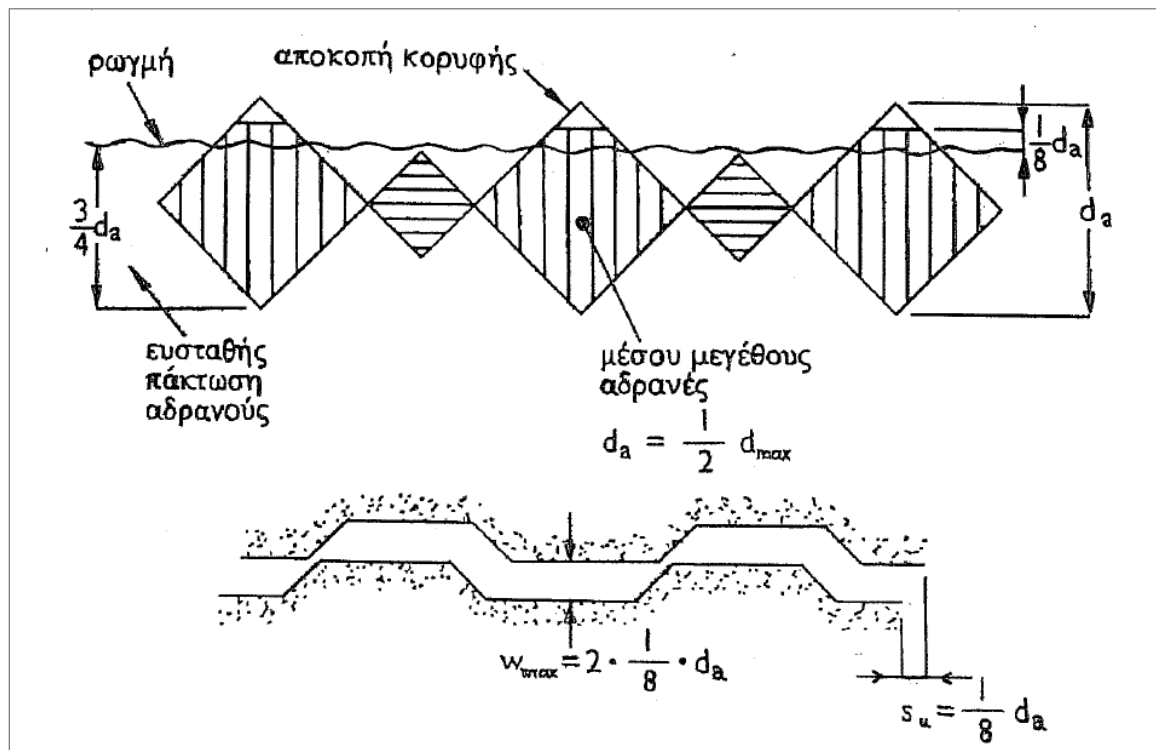
Πίνακας 11. Τιμές του λόγου του συντελεστή μ_1 διεπιφανειών με διαφορετικό βαθμό τραχύτητας, ως προς το μ_1 των ρηγματωμένων μονολιθικών δοκιμίων



Σχήμα 37. Γραφική απεικόνιση των τιμών του λόγου του συντελεστή μ_1 διεπιφανειών με διαφορετικό βαθμό τραχύτητας, ως προς το μ_1 των ρηγματωμένων μονολιθικών δοκιμίων

3.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΚΟΚΚΟΥ ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ D_{max} ΚΑΙ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΤΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΟΡΘΗ ΤΑΣΗ ΚΑΘΕΤΑ ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ, f_c/σ_c , ΣΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ s_u ΠΟΥ ΕΠΙΣΤΡΑΤΕΥΕΙ ΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΡΙΒΗΣ τ_u (ΓΙΑ ΤΡΑΧΕΙΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ), ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ Τάσιο (2006)

- Εξάρτηση απ' το μέγεθος των αδρανών του σκυροδέματος



Σχήμα 38. Η "ολίσθηση μεγίστου", s_u , εξαρτώμενη απ' το μέγεθος των αδρανών του σκυροδέματος (Τάσιος, 2006)

Σχηματοποιημένα, μια πιθανή μέση τιμή της "ολίσθησης μεγίστου" θα ήταν:

$$s_u \approx \frac{1}{8} d_a \approx \frac{1}{16} d_{max} \approx 0,06 d_{max} \quad (29)$$

Είναι όμως προφανές, ότι η αριθμητική αυτή πρόβλεψη περιέχει πολύ μεγάλες αβεβαιότητες. Είναι παρά ταύτα αναγκαία, προκειμένου να διατίθενται ορισμένες (προσεγγιστικές, έστω) τιμές για τους υπολογισμούς.

- Εξάρτηση απ' την ορθή τάση σ_c

Για σχετικώς μικρές συνολικές τάσεις σ_c (< 3 MPa λ.χ.), είναι δυνατό να χρησιμοποιείται η χοντρική προσέγγιση $s_u \cong 2mm$ (συνήθη αδρανή, $d_{max} = 30mm$) ανεξαρτήτως της τιμής της σ_c . Στην πραγματικότητα, για σκυροδέματα με $d_{max} = 30mm$ διατίθενται πειραματικές ενδείξεις ([Βιντζηλαίου, 1984], με μεγάλο σκεδασμό, είναι αλήθεια) κατά τις οποίες η τιμή s_u αυξάνεται συναρτήσει του λόγου $f_c : \sigma_c$ (≥ 3).

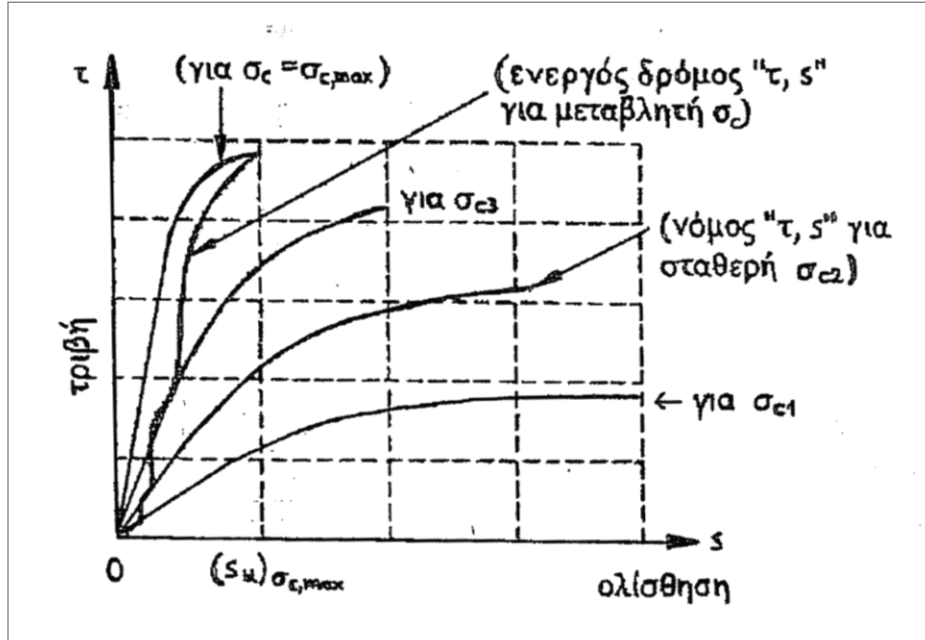
Όταν, τώρα, η συνολική σ_c αναπτύσσεται σταδιακώς (μέσω σφικτήρων) κατά τη διάρκεια της διατμητικής ολίσθησης s ($s \rightarrow w \rightarrow \delta \rightarrow \sigma_{so} \rightarrow \sigma_c = \rho \sigma_{so}$), τότε ο καταστατικός νόμος " τ, s " μεταβάλλεται σταδιακώς:

- ως προς το $\tau_u = 0,44 \sqrt[3]{f_c^2 \sigma_c}$, και
- ως προς το s_u

Επομένως, ο ενεργός καταστατικός δρόμος " τ, s " τείνει μάλλον προς την (κατά προσέγγιση) ευθεία:

$$\tau = \frac{s}{(s_u)_{\sigma_c, max}} \cdot (\tau_u)_{\sigma_c, max} \quad (30)$$

κατά το ακόλουθο ποιοτικό Σχήμα 39. Η παρατήρηση αυτή θα επέτρεπε ίσως και μια αντίστοιχη απλοποίηση στους υπολογισμούς.



Σχήμα 39. Ενεργός καταστατικός δρόμος "τ, s", για μεταβλητή τάση σ_c (Τάσιος, 2006)

Αντιθέτως, για πρακτικώς σταθερή τιμή σ_c (όταν ασκείται μεγάλη εξωτερική θλιπτική δύναμη στη διεπιφάνεια, κι είναι μικρό το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού σφικτήρων), ο ενεργός καταστατικός νόμος "τ, s" δίνεται από το Σχήμα 10.

- *Εμπειρική πρόβλεψη της "ολίσθησης μεγίστου" της τριβής*

Τελικώς, μία (ομολογουμένως μικρής ποσοτικής αξιοπιστίας) εμπειρική πρόβλεψη της "ολίσθησης μεγίστου" της τριβής, θα μπορούσε να γίνει μέσω της έκφρασης (Τάσιος, 2006):

$$s_u \approx 0,06 \cdot d_{max} \cdot (1,2 + 0,025 \frac{f_c}{\sigma_c}) \quad (31)$$

όπου: d_{max} , είναι το ονομαστικό μέγεθος μεγίστου κόκκου αδρανών, ενώ, πάντως, λαμβάνεται $\sigma_c \geq 0,5 \text{ MPa}$.

Εν πάση περιπτώσει, για τις συνήθεις εφαρμογές μπορεί να λαμβάνεται $s_u \cong 2 \text{ mm}$, άνευ ετέρου.

3.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ μ_1 – ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ $\tau_u = \mu_1 \cdot \sqrt[3]{f_c^2 \cdot \sigma_c}$, ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΤΩΝ Lin, Lu and Dong

- *Ο σκοπός της έρευνας*

Οι Lin, Lu and Dong, πραγματοποίησαν δοκιμές σε 12 δοκίμια για τη διερεύνηση της ικανότητας μεταφοράς τέμνουσας και σε 12 δοκίμια, για τη μελέτη των μηχανισμών που συμβάλλουν στη διατμητική αντίσταση. Ο σκοπός της έρευνας είναι να παρουσιαστούν οι μηχανισμοί που συμβάλλουν στη διατμητική αντίσταση, να περιγραφεί ποσοτικά η εξέλιξή τους, και να προβλεφθεί η ικανότητα μεταφοράς τέμνουσας των αρχικά μη ρηγματωμένων, των πλήρως και των μερικώς προρηγματωμένων δοκιμίων ωπλισμένου σκυροδέματος. Συνεπώς, η έρευνα αυτή προτείνει εκφράσεις που βασίζονται στους μηχανισμούς διατμητικής αντίστασης, οι οποίες, να προβλέπουν την ικανότητα μεταφοράς τέμνουσας και για τους τρεις τύπους δοκιμίων ωπλισμένου σκυροδέματος.

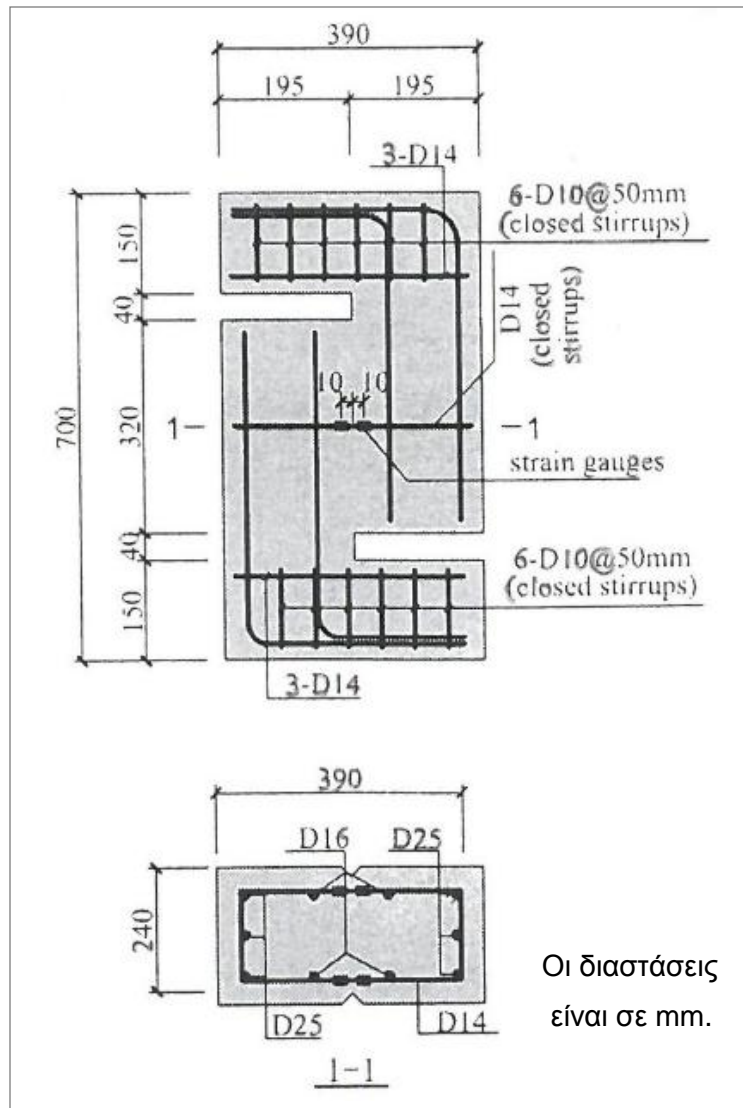
- *Πειραματικό μέρος*

Όσον αφορά στο πειραματικό μέρος της έρευνας, τα δοκίμια ταξινομήθηκαν σε δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει 12 δοκίμια μορφής Z, τα οποία σχεδιάστηκαν για τη διερεύνηση της ικανότητας μεταφοράς τέμνουσας σε αρχικώς μη ρηγματωμένα, σε μερικώς και πλήρως προρηγματωμένα δοκίμια ωπλισμένου σκυροδέματος. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων, που αφορούν στα διαφορετικά ποσοστά οπλισμού του επιπέδου διάτμησης και τα μήκη ρωγμής, παρουσιάζονται στον Πίνακα 12. Στο Σχήμα 40 απεικονίζεται για παράδειγμα, η γεωμετρία και η διάταξη του οπλισμού του δοκιμίου Z-B1-C0.

Δοκίμιο	Οπλισμός* (ποσοστό οπλισμού)	Μήκος ρωγμής, mm	Τελική φέρουσα ικανότητα μεταφοράς τέμνουσας, kN
Z-B1-C0		0	433
Z-B1-C1	2-D14	136	325
Z-B1-C2	(0,46%)	177	408
Z-B1-C3		320	175
Z-B2-C0		0	446
Z-B2-C1	2-D16	154	336
Z-B2-C2	(0,60%)	180	319
Z-B2-C3		320	260
Z-B3-C0		0	567
Z-B3-C1	4-D14	110	565
Z-B3-C2	(0,92%)	179	519
Z-B3-C3		320	364

*Ο οπλισμός 2-D14 σημαίνει δύο ράβδους οπλισμού με διάμετρο 14 mm, κλπ.

Πίνακας 12. Χαρακτηριστικά των δοκιμών της πρώτης ομάδας (Lin, Lu and Dong)



Σχήμα 40. Γεωμετρία και διάταξη οπλισμού του δοκιμίου Z-B1-C0 (Lin, Lu and Dong)

Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει 6 δοκίμια μορφής Z και 6 δοκίμια μορφής κουτιού. Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των δοκιμών μορφής Z, τα οποία έχουν την ίδια γεωμετρία με τα δοκίμια της πρώτης ομάδας. Χρησιμοποιήθηκαν τρία μη ωπλισμένα δοκίμια με διαφορετικά μήκη ρωγμής και τρία άλλα δοκίμια για να ενεργοποιηθεί η δράση βλήτρου. Στον Πίνακα 14 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των μη ωπλισμένων δοκιμών μορφής κουτιού. Χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια με λείες διεπιφάνειες και τρία δοκίμια με τραχείες διεπιφάνειες. Οι τραχείες διεπιφάνειες δημιουργήθηκαν, προκαλώντας ρηγμάτωση στα δοκίμια σκυροδέματος. Τα επίπεδα διάτμησης της δεύτερης ομάδας δοκιμών ήταν ίδια με της πρώτης ομάδας, για να αποφευχθεί η επιρροή του μεγέθους του υλικού. Πριν τη δοκιμή επιβολής διατμητικής

δύναμης στις διεπιφάνειες των δοκιμίων, τα δοκίμια μορφής κουτιού υποβλήθηκαν σε διαφορετικές θλιπτικές δυνάμεις, οι οποίες αντιστοιχούν στα φορτία διαρροής των οπλισμών 2-D14, 2-D16 και 4-D14. Η τάση διαρροής για τις ράβδους οπλισμού διαμέτρου 14 mm και 16 mm, ήταν 468 MPa και 516 MPa, αντίστοιχα. Ωστόσο, οι τιμές των θλιπτικών δυνάμεων που αναφέρονται στον Πίνακα 14, είναι διαφορετικές από τα φορτία διαρροής των οπλισμών, όπως υπολογίζονται ακολούθως:

- 2-D14 $\rightarrow N = f_y \cdot A_s = (468 \text{ MPa}) \cdot (307,88 \text{ mm}^2) = 144 \text{ kN}$, αντί για 130 kN
- 2-D16 $\rightarrow N = f_y \cdot A_s = (516 \text{ MPa}) \cdot (402,12 \text{ mm}^2) = 207 \text{ kN}$, αντί για 188 kN
- 4-D14 $\rightarrow N = f_y \cdot A_s = (468 \text{ MPa}) \cdot (615,75 \text{ mm}^2) = 288 \text{ kN}$, αντί για 260 kN

Επιπλέον, κρίνεται, ότι αντί για τους όρους "αλληλεμπλοκή αδρανών", "συνάφεια" και "άνοιγμα ρωγμής (διαστολικότητα)" που αναφέρονται ως μηχανισμοί μεταφοράς τέμνουσας στους Πίνακες 13, 14, καταλληλότερη θα ήταν η χρήση του όρου "τριβή", η οποία περιγράφει τη διατμητική αντίσταση που αναπτύσσεται τόσο στις λείες, όσο και στις τραχείες διεπιφάνειες. Ο βαθμός ενεργοποίησης της διατμητικής αντίστασης λόγω τριβής εξαρτάται από την τραχύτητα της διεπιφάνειας, δηλαδή είναι μεγαλύτερος για τις τραχείες διεπιφάνειες και μικρότερος για τις λείες. Όσον αφορά στο άνοιγμα ρωγμής (διαστολικότητα), δεν αποτελεί μηχανισμό μεταφοράς τέμνουσας, είναι απλώς μια εγκάρσια παραμόρφωση μέσω της οποίας ενεργοποιείται η διατμητική αντίσταση λόγω τριβής, ως εξής: Όταν επιβάλλεται διατμητική ολίσθηση s σε μια ρηγματωμένη διεπιφάνεια, αναπτύσσεται ταυτόχρονα εγκάρσιο άνοιγμα ρωγμής w . Συγχρόνως, αν δρα μια ορθή θλιπτική τάση σ_c στη διεπιφάνεια διατομής A_c , τότε ενεργοποιείται δύναμη αντίστασης σε διάτμηση F , με βάση την ακόλουθη εξίσωση ανταλλαγής ενέργειας:

$$F \cdot s = (\sigma_c \cdot A_c) \cdot w \quad (32)$$

όπου, το άνοιγμα ρωγμής w εξαρτάται από την επιβαλλόμενη ολίσθηση s , μέσω της γενικής σχέσης (8) (σελ. 20), η οποία εξαρτάται κυρίως από τη γεωμετρία της τραχύτητας της ρηγματωμένης διεπιφάνειας.

Στο Σχήμα 41 παρουσιάζεται η διάταξη των δοκιμών για τα δοκίμια μορφής Z και μορφής κουτιού.

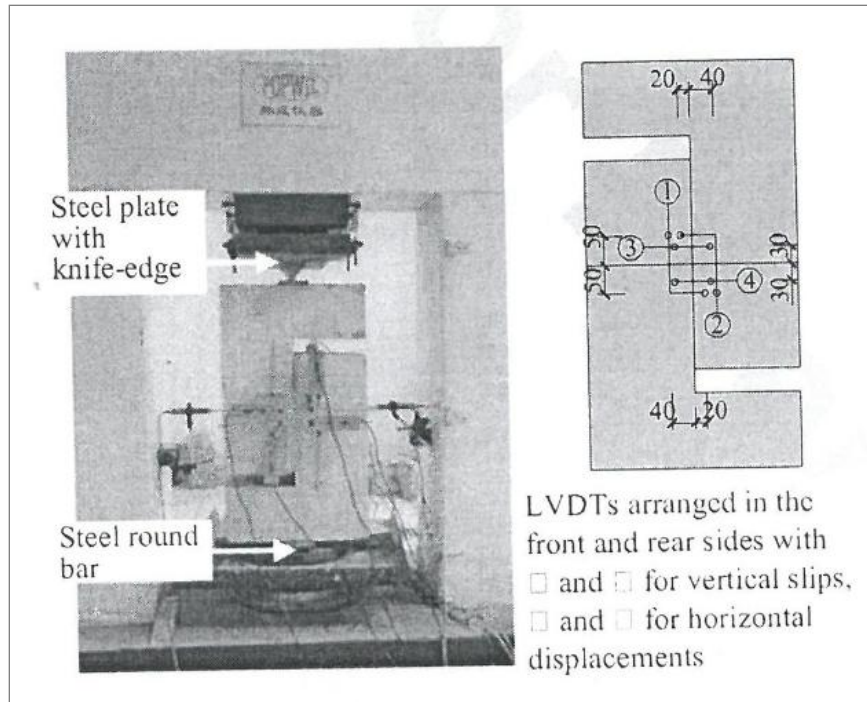
Δοκίμιο	Οπλισμός (ποσοστό οπλισμού)	Μήκος ρωγμής, mm	Μηχανισμός μεταφοράς τέμνουσας	Τελική φέρουσα ικανότητα μεταφοράς τέμνουσας, kN
Z-B0-C0	0 (0)	0	Αλληλεμπλοκή αδρανών και συνάφεια	283
Z-B0-C1		200		147
Z-B0-C2		227		132
Z-B1-DA	2-D14 (0,46%)	-	Δράση βλήτρου*	74
Z-B2-DA	2-D16 (0,60%)			90
Z-B3-DA	4-D14 (0,92%)			150

*Η δράση βλήτρου ενεργοποιήθηκε, χρησιμοποιώντας PTFE για να διαχωριστούν οι διεπιφάνειες σκυροδέματος.

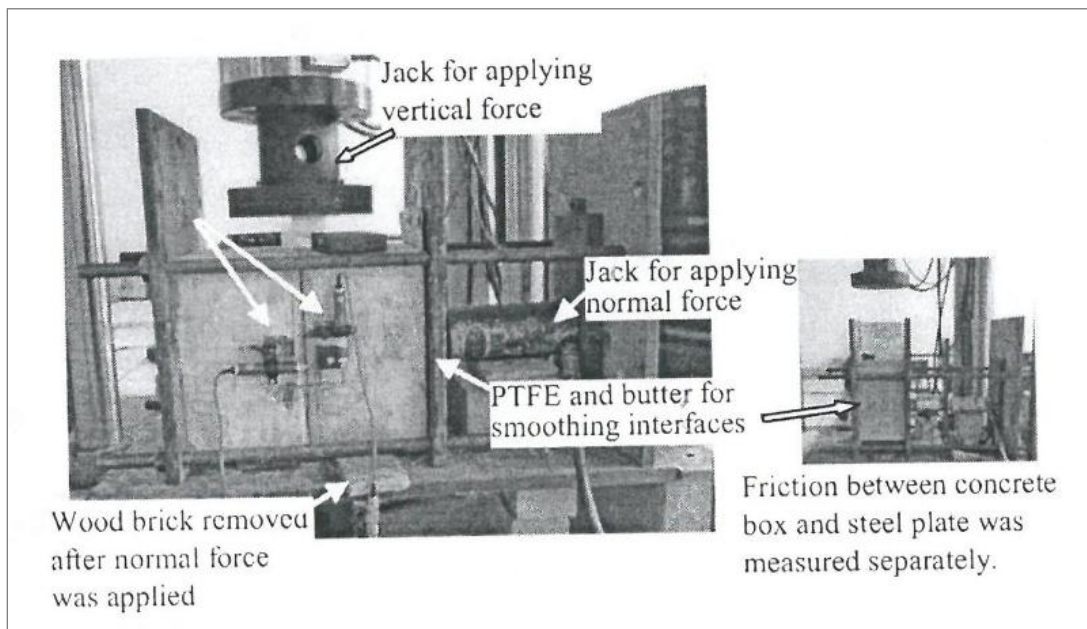
Πίνακας 13. Χαρακτηριστικά των δοκιμών μορφής Z της δεύτερης ομάδας
(Lin, Lu and Dong)

Δοκίμιο	Διαστάσεις, mm	Διεπιφάνειες	Θλιπτική δύναμη, kN	Μηχανισμός μεταφοράς τέμνουσας	Συντελεστής τριβής	Μέσος συντελεστής τριβής
B-S-L1	320×240×195 με αυλακώσεις	Λείες διεπιφάνειες	130	Τριβή	0,59	0,59
B-S-L2			188		0,59	
B-S-L3			260		0,59	
B-R-L1		Τραχείες διεπιφάνειες	130	Τριβή, αλληλεμπλοκή αδρανών και άνοιγμα ρωγμής (δια- στολικότητα)	2,59	2,50
B-R-L2			188		2,51	
B-R-L3			260		2,39	

Πίνακας 14. Χαρακτηριστικά των δοκιμών μορφής κουτιού της δεύτερης ομάδας
(Lin, Lu and Dong)



(α)



(β)

Σχήμα 41. Διάταξη των δοκιμών για τα δοκίμια (α) μορφής Z και (β) μορφής κουτιού (Lin, Lu and Dong)

- *Αποτελέσματα δοκιμών*

Όσον αφορά στα αποτελέσματα των δοκιμών της πρώτης ομάδας δοκιμών, παρατηρήθηκε αστοχία μεταφοράς τέμνουσας, διότι συνέβη μια σχετικά μεγάλη ολίσθηση κατά μήκος του επιπέδου διάτμησης για κάθε δοκίμιο μορφής Z, όταν αστόχησε. Στα αρχικώς μη ρηγματωμένα δοκίμια, η ρωγμή ξεκίνησε να εμφανίζεται στη μεσαία περιοχή του επιπέδου διάτμησης, λόγω της παρουσίας μεγάλης διατμητικής τάσης. Στα μερικώς προρηγματωμένα δοκίμια, η ρωγμή ξεκίνησε από την άκρη της προϋπάρχουσας ρωγμής και εξελίχθηκε σε μια πιο πλήρη ρωγμή. Η φέρουσα ικανότητα των δοκιμών καταγράφεται στην τελευταία στήλη του Πίνακα 12. Βρέθηκε, ότι γενικά, η ικανότητα μεταφοράς τέμνουσας βελτιώθηκε με τη μείωση του αρχικού μήκους ρωγμής και με την αύξηση του ποσοστού οπλισμού. Όπως αναμενόταν, η φέρουσα ικανότητα ενός μερικώς προρηγματωμένου δοκιμίου βρίσκεται ανάμεσα στη φέρουσα ικανότητα ενός πλήρως προρηγματωμένου και ενός αρχικά αρηγματώτου δοκιμίου, με το ίδιο ποσοστό οπλισμού.

Σχετικά με τη δεύτερη ομάδα δοκιμών, για τα δοκίμια μορφής Z που δε διαθέτουν οπλισμό στο επίπεδο διάτμησης, παρατηρήθηκε ένας ξαφνικός διαχωρισμός, χωρίς προειδοποίηση, κατά μήκος του επιπέδου διάτμησης. Στον Πίνακα 13 καταγράφεται η φέρουσα ικανότητα των δοκιμών μορφής Z, και στον Πίνακα 14 παρουσιάζονται οι συντελεστές τριβής των δοκιμών μορφής κουτιού. Ο συντελεστής τριβής των λείων και των τραχειών διεπιφανειών, προέκυψε κατά μέσο όρο 0,59 και 2,50, αντίστοιχα. Στα δοκίμια με λείες διεπιφάνειες, για την πλήρη ενεργοποίηση της τριβής, απαιτήθηκε μια σχετική ολίσθηση της τάξης των 0,25 – 0,29 mm.

- *Επίδραση του βαθμού τραχύτητας στις τιμές του μ_1 - Διερεύνηση της σχέσης*

$$\tau_u = \mu_1 \cdot \sqrt[3]{f_c^2 \cdot \sigma_c}$$

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο συντελεστής τριβής των λείων και των τραχειών διεπιφανειών, προέκυψε κατά μέσο όρο 0,59 και 2,50, αντίστοιχα. Επιπλέον, από τα δεδομένα του Πίνακα 14 παρατηρείται, ότι για τις λείες διεπιφάνειες, η αύξηση της θλιπτικής δύναμης δεν επέφερε μεταβολή του συντελεστή τριβής. Για τις τραχείες διεπιφάνειες, η αύξηση της θλιπτικής δύναμης επέφερε μείωση του συντελεστή τριβής, το οποίο οφείλεται στην αλλοίωση της τραχύτητας της διεπιφάνειας με την αύξηση της θλιπτικής δύναμης, λόγω αποκοπής των κορυφών των αδρανών.

Με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 14, υπολογίστηκε ο συντελεστής $\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c}\right)^k$ για $k = 2/3$, για τις λείες και τραχείες διεπιφάνειες, για κάθε τιμή θλιπτικής δύναμης, και τα αποτελέσματα που προέκυψαν, συνοψίζονται στον Πίνακα 15. Η επιφάνεια του επιπέδου διάτμησης λήφθηκε, $A_c = 320 \times 210 = 67200 \text{ mm}^2$ και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, $f_c = 34 \text{ MPa}$. Παρατηρείται, ότι ο συντελεστής μ_1 λαμβάνει μικρότερες τιμές για τις λείες σε σχέση με τις τραχείες διεπιφάνειες. Για τις τραχείες διεπιφάνειες, οι τιμές του συντελεστή μ_1 πλησιάζουν την τιμή 0,44, ενώ για τις λείες διεπιφάνειες, αποκλίνουν πολύ απ' αυτή.

Ακόμη, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της σχέσης $\tau_u = \mu_1 \cdot \sqrt[3]{f_c^2 \cdot \sigma_c}$ για τα δοκίμια με τραχεία διεπιφάνεια. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε μια σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη σχέση θέτοντας στο μ_1 τις τιμές του Πίνακα 15 και των πειραματικών αποτελεσμάτων που αφορούν στη φέρουσα ικανότητα των δοκιμίων. Η ίδια σύγκριση πραγματοποιήθηκε, θεωρώντας ότι ο συντελεστής μ_1 είναι ίσος με $\mu_1 = 0,44$. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 16. Διαπιστώνεται, ότι η σχέση $\tau_u = \mu_1 \cdot \sqrt[3]{f_c^2 \cdot \sigma_c}$ προσεγγίζει ικανοποιητικά τα πειραματικά αποτελέσματα και για τις δύο ανωτέρω περιπτώσεις, και ειδικότερα για την περίπτωση που στο συντελεστή μ_1 τέθηκαν οι τιμές του Πίνακα 15. Αυτό ήταν αναμενόμενο, διότι οι τιμές του συντελεστή μ_1 του Πίνακα 15 προέκυψαν, θέτοντας στις παραμέτρους της σχέσης τις πραγματικές τιμές των δοκιμών.

Δοκίμιο	Ορθή θλιπτική δύναμη, (N)	Θλιπτική τάση σ_c , (MPa)	Συντελεστής τριβής, μ	Συντελεστής, $\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c}\right)^{2/3}$
B-S-L1	$130 \cdot 10^3$	1,93	0,59	0,09
B-S-L2	$188 \cdot 10^3$	2,80	0,59	0,11
B-S-L3	$260 \cdot 10^3$	3,87	0,59	0,14
B-R-L1	$130 \cdot 10^3$	1,93	2,59	0,38
B-R-L2	$188 \cdot 10^3$	2,80	2,51	0,48
B-R-L3	$260 \cdot 10^3$	3,87	2,39	0,56

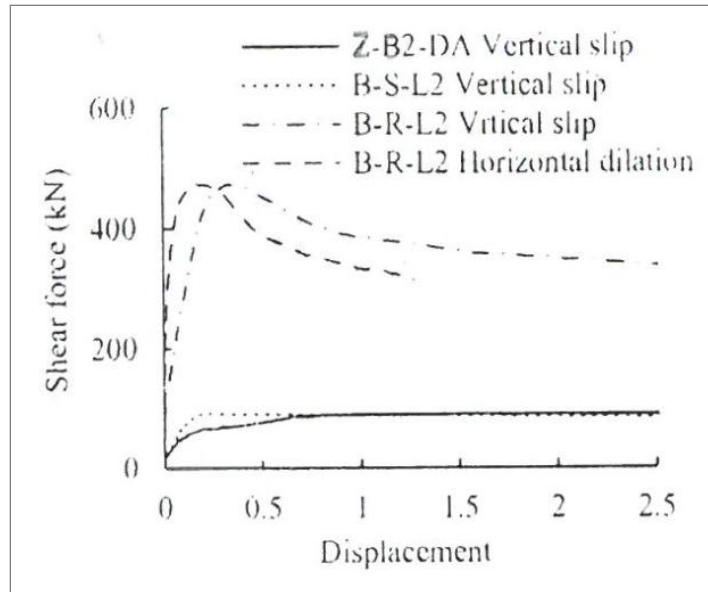
Πίνακας 15. Η επίδραση του βαθμού τραχύτητας στις τιμές του μ_1

Δοκίμιο	Θλιπτική τάση σ_c , (MPa)	$\tau_u = \mu_1 \cdot \sqrt[3]{f_c^2 \cdot \sigma_c}$		$\tau_u = 0,44 \cdot \sqrt[3]{f_c^2 \cdot \sigma_c}$		Φέρουσα ικανότητα από δοκιμές	
		μ_1	τ_u (MPa)	μ_1	τ_u (MPa)	σε όρους δύναμης, (N)	σε όρους τάσης, (MPa)
B-R-L1	1,93	0,38	4,97	0,44	5,75	$297 \cdot 10^3$	4,42
B-R-L2	2,80	0,48	7,10		6,51	$470 \cdot 10^3$	6,99
B-R-L3	3,87	0,56	9,23		7,25	$589 \cdot 10^3$	8,76

Πίνακας 16. Σύγκριση των τιμών της μέγιστης διατμητικής τάσης λόγω τριβής τ_u που προκύπτουν από τη σχέση $\tau_u = \mu_1 \cdot \sqrt[3]{f_c^2 \cdot \sigma_c}$, με τα πειραματικά αποτελέσματα

- Τιμές της ολίσθησης s_u για την οποία ενεργοποιείται η μέγιστη διατμητική αντίσταση λόγω τριβής, για τα μη ωπλισμένα δοκίμια μορφής κουτιού της δεύτερης ομάδας

Στο Σχήμα 42 παρουσιάζονται οι καμπύλες διατμητικής αντίστασης – ολίσθησης για ορισμένα από τα δοκίμια της δεύτερης ομάδας (βλ. Πίνακες 13, 14). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στα δοκίμια με λείες διεπιφάνειες, για την πλήρη ενεργοποίηση της τριβής απαιτήθηκε μια σχετική ολίσθηση της τάξης των 0,25 – 0,29 mm. Από τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών, για τα δοκίμια B-R-L1, B-R-L2 και B-R-L3, οι τιμές της ολίσθησης s_u προέκυψαν 0,26 mm, 0,30 mm και 0,28 mm, αντίστοιχα.



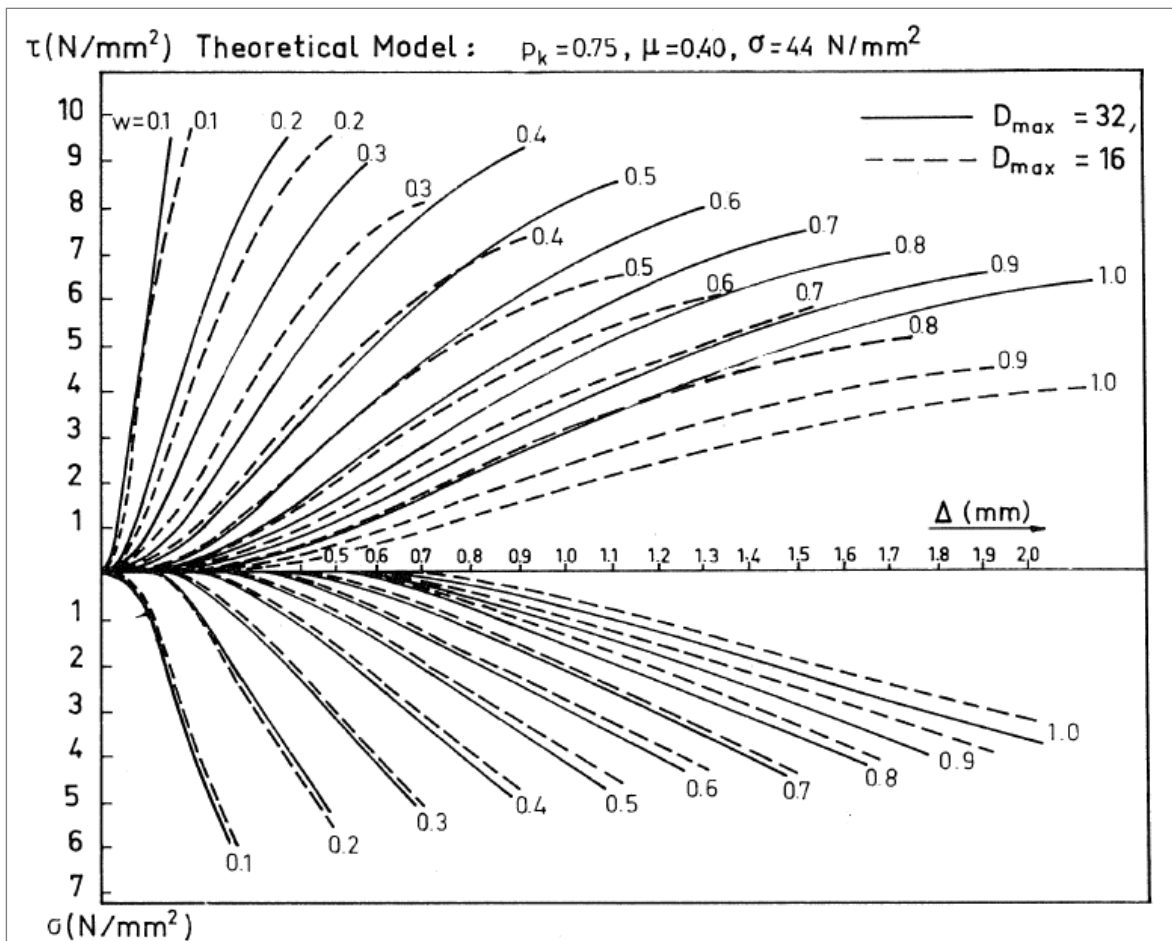
Σχήμα 42. Καμπύλες διατμητικής αντίστασης – ολίσθησης, για ορισμένα από τα δοκίμια της δεύτερης ομάδας (Lin, Lu and Dong)

3.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΑΔΡΑΝΟΥΣ D_{max} ΣΤΙΣ ΤΑΣΕΙΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ τ ΚΑΙ ΤΙΣ ΟΡΘΕΣ ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΦΗΝΩΣΗΣ σ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΝΤΑΙ ΣΕ ΜΙΑ ΡΩΓΜΗ – ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ μ_1 ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ D_{max} – ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΚΦΡΑΣΗΣ (2) (σελ. 14) ΤΟΥ ΜΕΙΩΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΟΥ μ_1 , ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΤΩΝ Walraven and Reinhardt (1981)

Οι Walraven and Reinhardt (1981), πραγματοποίησαν θεωρητική και πειραματική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς ρωγμών και ωπλισμένων διεπιφανειών σκυροδέματος που υπόκεινται σε διατμητική φόρτιση. Μία από τις παραμέτρους που διερεύνησαν, είναι η επίδραση της διαμέτρου του μέγιστου αδρανούς στις τάσεις που αναπτύσσονται σε μια ρωγμή. Για τον σκοπό αυτό, συγκρίθηκαν δύο μίγματα σκυροδέματος που είχαν τις ίδιες ιδιότητες, εκτός από τη διάμετρο του μέγιστου αδρανούς, η οποία ήταν 16 mm και 32 mm αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 43. Φαίνεται, ότι η ορθή θλιπτική τάση σφήνωσης σ δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη μεταβολή της διαμέτρου, σε αντίθεση με την επιστρατευόμενη διατμητική τάση τ , η οποία για τη μικρότερη διάμετρο αδρανούς

παρουσιάζει μικρότερες τιμές, τάση η οποία γίνεται πιο έντονη όταν το άνοιγμα ρωγμής μεγαλώνει. Σημειώνεται, ότι η τάση $\sigma = 44 \text{ N/mm}^2$ που αναφέρεται στο Σχήμα 43, σημαίνει την τάση διαρροής σ_{pu} της τσιμεντένιας μήτρας της ρηγματωμένης διεπιφάνειας, για την οποία η μήτρα εισέρχεται στην πλαστική περιοχή παραμορφώσεων, όταν συμβαίνει διατμητική ολίσθηση κατά μήκος της ρηγματωμένης διεπιφάνειας και τα αδρανή δεισδύουν στην τσιμεντένια μήτρα.

Επιπλέον, παρατηρείται, ότι για μικρότερη διάμετρο αδρανούς αυξάνεται η ολίσθηση για την οποία επιτυγχάνεται μια τιμή διατμητικής τάσης, η οποία για μεγαλύτερη διάμετρο αδρανούς παρουσιάζεται για μικρότερη τιμή ολίσθησης. Η τάση αυτή γίνεται πιο έντονη όταν το άνοιγμα ρωγμής μεγαλώνει. Ωστόσο, η παρατήρηση αυτή δεν αποτελεί συμπέρασμα για τη συσχέτιση της διαμέτρου του μέγιστου αδρανούς με την ολίσθηση που απαιτείται για την επιστράτευση μιας τιμής διατμητικής τάσης. Η παρατήρηση οφείλεται στο ότι, για μικρότερη διάμετρο αδρανούς η κατακόρυφη μετακίνηση είναι μικρή και επομένως η αντίστοιχη τάση σφήνωσης είναι μικρή, με αποτέλεσμα να προκύπτει και η αντίσταση τριβής μικρότερη. Για το λόγο αυτό προκύπτει η διαφορά μεταξύ της πλήρους και διακεκομμένης γραμμής του Σχήματος 43, και επομένως, δεν αποτελεί ερμηνεία της συσχέτισης μεταξύ της διαμέτρου του μέγιστου αδρανούς και της ολίσθησης για την οποία επιστρατεύεται μια τιμή διατμητικής τάσης.



Σχήμα 43. Επίδραση του μέγιστου μεγέθους αδρανούς στη μεταφορά τάσεων σε μια ρωγή. Ουλιπτική αντοχή σκυροδέματος $f_{cc} = 32$ N/mm², μέγιστη διάμετρος αδρανούς $D_{max} = 16$ και 32 mm (Walraven and Reinhardt, 1981)

Με τη χρήση του ανωτέρω διαγράμματος υπολογίστηκαν οι τιμές του συντελεστή τριβής μ και του $\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^k$, για τις δύο περιπτώσεις όπου διαφοροποιείται η διάμετρος του μέγιστου αδρανούς, $D_{max} = 32$ και 16 mm, χρησιμοποιώντας τις συνεχείς και διακεκομμένες γραμμές του διαγράμματος, αντίστοιχα. Οι τιμές των μ και μ_1 σε κάθε περίπτωση υπολογίστηκαν, λαμβάνοντας για κάθε τιμή αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_0 , τη μέγιστη επιστρατευόμενη διατμητική τάση τ που παρουσιάζεται στο διάγραμμα. Η αντοχή του σκυροδέματος λήφθηκε $f_c = 32$ MPa και θεωρήθηκε $k = 2/3$. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις δύο περιπτώσεις διαμέτρου μέγιστου αδρανούς, $D_{max} = 32$ και 16 mm.

- Περίπτωση 1^η: $D_{max} = 32 \text{ mm}$

Οι τιμές του συντελεστή τριβής μ και του $\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c}\right)^k$ που προέκυψαν στην περίπτωση αυτή, παρουσιάζονται στον Πίνακα 17. Η μεταβολή των τιμών του μ_1 συναρτήσει των τιμών του w_o , παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 44. Η τάση μείωσης του συντελεστή μ_1 με την αύξηση του w_o , διατυπώνεται ακολούθως, μέσω της σχέσης (33). Το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών των τιμών του μ_1 , που προκύπτουν μεταξύ της σχέσης (33) και από τον Πίνακα 17, είναι $\sum_{i=1}^{10} (v_i)^2 = 0,0038$.

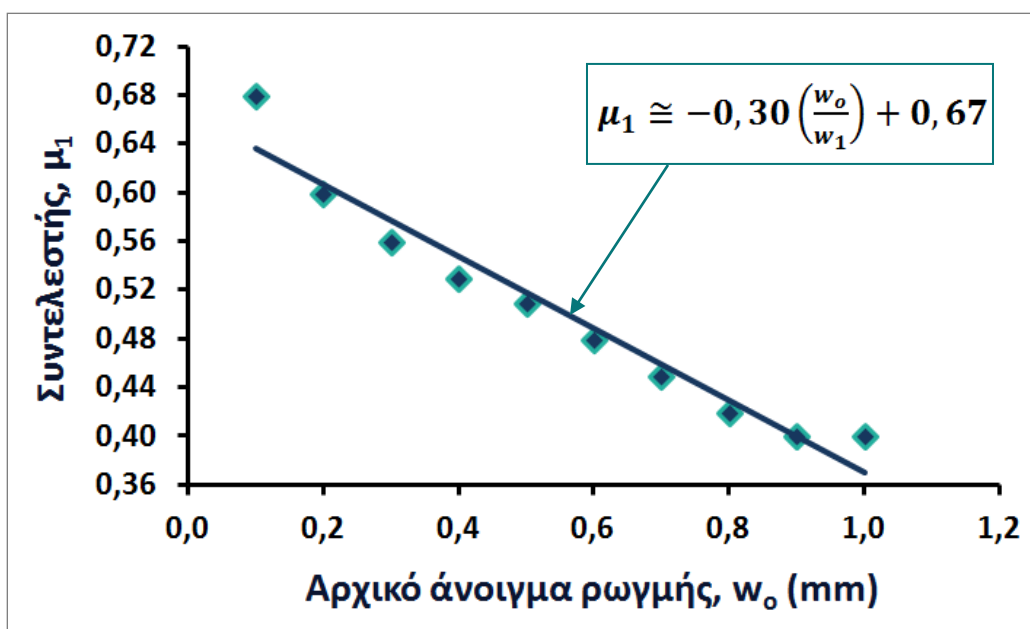
Από τον Πίνακα 17 παρατηρείται, ότι οι τιμές του συντελεστή μ_1 βρίσκονται ανάμεσα στις τιμές που προέκυψαν από την εφαρμογή των σχέσεων (21), (22) του fib Model Code 2010, για επιστρατευόμενη διατμητική τάση $\tau = 10$ και 7 MPa (βλ. Δοκιμή 1^η και 2^η, σελ. 48 – 51). Αυτό παρατηρείται, διότι στη συγκεκριμένη περίπτωση οι διατμητικές τάσεις τ κυμαίνονται από 6,45 μέχρι 9,5 MPa . Επιπλέον, παρατηρείται και εδώ, ότι για επιστρατευόμενη διατμητική τάση τ γύρω στα 7 MPa (συγκεκριμένα, από 6,45 μέχρι 8 MPa), οι τιμές του μ_1 προσεγγίζουν την τιμή 0,44.

$$\mu_1 \cong -0,30 \left(\frac{w_o}{w_1}\right) + 0,67 \quad (33)$$

όπου: $w_1 = 1 \text{ mm}$.

Υπολογισμός τιμών του μ_1 , για $D_{max} = 32 \text{ mm}$, $f_c = 32 \text{ MPa}$ και $k = 2/3$				
w_o (mm)	τ (MPa)	σ (MPa)	$\mu = \frac{\tau}{\sigma}$	$\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{2/3}$
0,1	9,50	2,65	3,58	0,68
0,2	9,50	3,95	2,41	0,60
0,3	8,90	4,00	2,23	0,56
0,4	9,25	5,10	1,81	0,53
0,5	8,60	4,80	1,79	0,51
0,6	8,00	4,60	1,74	0,48
0,7	7,50	4,65	1,61	0,45
0,8	7,00	4,45	1,57	0,42
0,9	6,60	4,50	1,47	0,40
1,0	6,45	4,00	1,61	0,40

Πίνακας 17. Η μεταβολή των τιμών του μ_1 συναρτήσει του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o , για $D_{max} = 32 \text{ mm}$, $f_c = 32 \text{ MPa}$ και $k = 2/3$



Σχήμα 44. Γραφική απεικόνιση της μεταβολής των τιμών του μ_1 , συναρτήσει των τιμών του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o , για $D_{max} = 32 \text{ mm}$, $f_c = 32 \text{ MPa}$ και $k = 2/3$

- Περίπτωση 2^η: $D_{max} = 16 \text{ mm}$

Οι τιμές του συντελεστή τριβής μ και του $\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c}\right)^k$ που προέκυψαν στην περίπτωση αυτή, παρουσιάζονται στον Πίνακα 18. Η μεταβολή των τιμών του μ_1 συναρτήσει των τιμών του w_o , παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 45. Η τάση μείωσης του συντελεστή μ_1 με την αύξηση του w_o , διατυπώνεται ακολούθως, μέσω της σχέσης (34). Το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών των τιμών του μ_1 , που προκύπτουν μεταξύ της σχέσης (34) και από τον Πίνακα 18, είναι $\sum_{i=1}^{10} (v_i)^2 = 0,0077$.

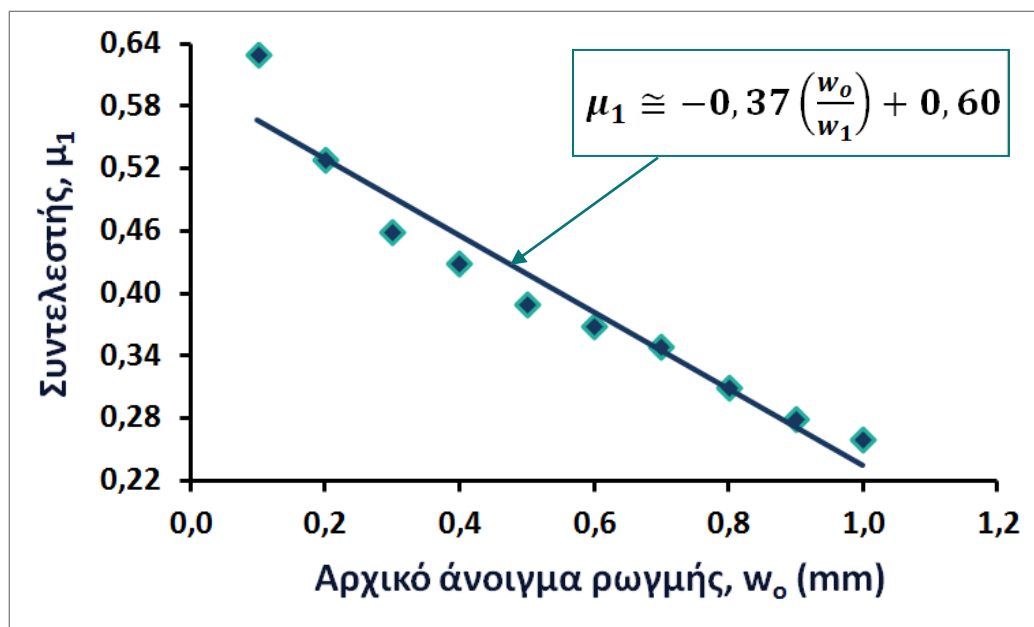
Από τον Πίνακα 18 παρατηρείται, ότι για επιστρατευόμενη διατμητική τάση τ γύρω στα 7 MPa (συγκεκριμένα, από $6,5$ μέχρι $8,10 \text{ MPa}$), οι τιμές του μ_1 πλησιάζουν την τιμή $0,44$, ενώ για διατμητική τάση τ γύρω στα 5 MPa (από 4 μέχρι $6,05 \text{ MPa}$), πλησιάζουν την τιμή $0,33$. Παρόμοια συμπεράσματα προέκυψαν από την εφαρμογή των σχέσεων (21), (22) του fib Model Code 2010, για επιστρατευόμενη διατμητική τάση $\tau = 7$ και 4 MPa (βλ. Δοκιμή 2^η και 3^η, σελ. 50 – 53). Επιπλέον, συγκρίνοντας τις τιμές των μ και μ_1 που προέκυψαν μεταξύ των δύο περιπτώσεων ($D_{max} = 32 \text{ mm}$ και $D_{max} = 16 \text{ mm}$), παρατηρείται, ότι προκύπτουν μικρότερες για τη μικρότερη διάμετρο αδρανούς, το οποίο οφείλεται στο μικρότερο βαθμό τραχύτητας της διεπιφάνειας στην περίπτωση αυτή.

$$\mu_1 \cong -0,37 \left(\frac{w_o}{w_1}\right) + 0,60 \quad (34)$$

όπου: $w_1 = 1 \text{ mm}$.

Υπολογισμός τιμών του μ_1 , για $D_{max} = 16 \text{ mm}$, $f_c = 32 \text{ MPa}$ και $k = 2/3$				
$w_o \text{ (mm)}$	$\tau \text{ (MPa)}$	$\sigma \text{ (MPa)}$	$\mu = \frac{\tau}{\sigma}$	$\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{2/3}$
0,1	9,70	3,65	2,66	0,63
0,2	9,50	5,55	1,71	0,53
0,3	8,10	5,15	1,57	0,46
0,4	7,40	4,80	1,54	0,43
0,5	6,50	4,60	1,41	0,39
0,6	6,05	4,45	1,36	0,37
0,7	5,80	4,60	1,26	0,35
0,8	5,20	4,40	1,18	0,31
0,9	4,40	4,00	1,10	0,28
1,0	4,00	3,55	1,13	0,26

Πίνακας 18. Η μεταβολή των τιμών του μ_1 συναρτήσει του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o , για $D_{max} = 16 \text{ mm}$, $f_c = 32 \text{ MPa}$ και $k = 2/3$



Σχήμα 45. Γραφική απεικόνιση της μεταβολής των τιμών του μ_1 , συναρτήσει των τιμών του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o , για $D_{max} = 16 \text{ mm}$, $f_c = 32 \text{ MPa}$ και $k = 2/3$

Μέσω του Σχήματος 43, διερευνήθηκε η επιβεβαίωση της έκφρασης (2) (σελ. 14) που αφορά στο μειωτικό συντελεστή του μ_1 σε σχέση με την αδρομέρεια της διεπιφάνειας (χοντρικά τη διάμετρο του μέγιστου αδρανούς, D_{max}). Η διερεύνηση έγινε για διάμετρο μέγιστου αδρανούς $D_{max} = 16 \text{ mm}$, αρχικό άνοιγμα ρωγμής $w_o = 0,2$ έως $0,5 \text{ mm}$ και επιστρατευόμενη διατμητική τάση $\tau = 2$ έως 5 MPa . Υποθέτοντας, ότι ο συντελεστής μ_1 για διάμετρο αδρανούς $D_o = 30 \text{ mm}$ είναι $\mu_{1,30} = 0,44$, για διάμετρο $D_{max} = 16 \text{ mm}$, θα είναι:

$$\mu_{1,16} = \mu_{1,30} \cdot \sqrt[4]{\frac{D_{max}}{D_o}} = 0,44 \cdot \sqrt[4]{\frac{16}{30}} = 0,38.$$

Στον Πίνακα 19 παρουσιάζονται οι τιμές του μ_1 που προέκυψαν με βάση το Σχήμα 43. Το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών των τιμών του μ_1 , μεταξύ του πίνακα και της τιμής 0,38, είναι $\sum_{i=1}^{16} (v_i)^2 = 0,0492$.

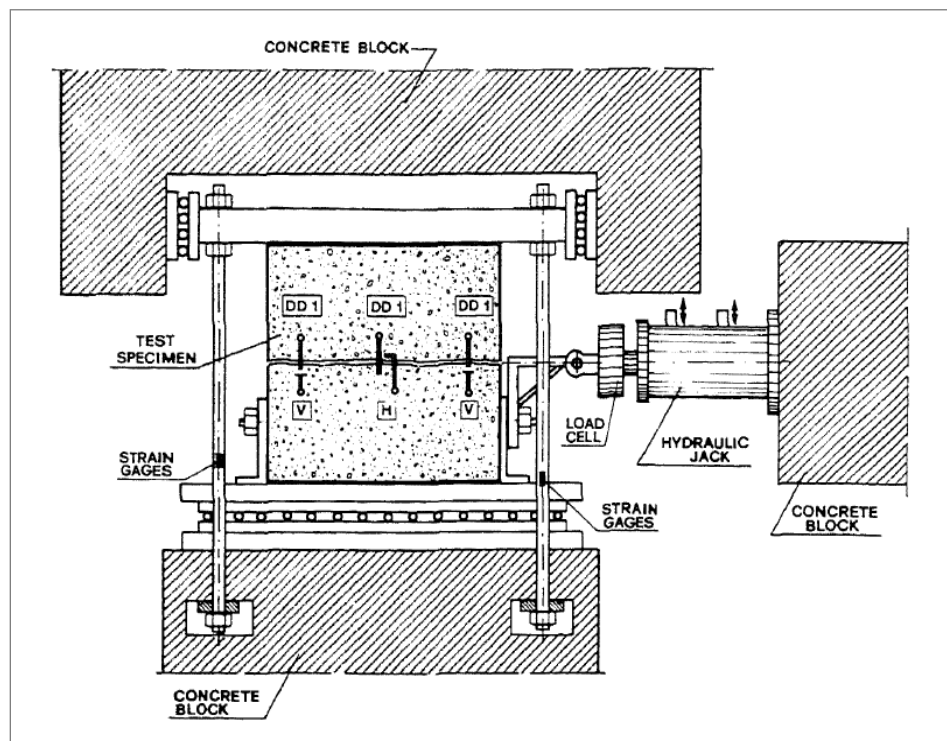
(Σημείωση: Μια ορθότερη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε για την επίδραση της διαμέτρου του μέγιστου κόκκου αδρανούς D_{max} στις τιμές του μ_1 , παρουσιάζεται στο ένθετο κείμενο, διότι η παρούσα διερεύνηση στηρίχτηκε σε μια αυθαίρετη υπόθεση, ότι για $D_o = 30 \text{ mm}$ είναι $\mu_{1,30} = 0,44$.)

Υπολογισμός τιμών του μ_1 , για $D_{max} = 16 \text{ mm}$, $f_c = 32 \text{ MPa}$ και $k = 2/3$				
$w_o \text{ (mm)}$	$\tau \text{ (MPa)}$	$\sigma \text{ (MPa)}$	$\mu = \frac{\tau}{\sigma}$	$\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{2/3}$
0,2	2,00	0,10	20,00	0,43
	3,00	0,35	8,57	0,42
	4,00	0,65	6,15	0,46
	5,00	1,20	4,17	0,47
0,3	2,00	0,30	6,67	0,30
	3,00	0,60	5,00	0,35
	4,00	1,05	3,81	0,39
	5,00	1,60	3,13	0,42
0,4	2,00	0,30	6,67	0,30
	3,00	0,70	4,29	0,34
	4,00	1,20	3,33	0,37
	5,00	2,00	2,50	0,39
0,5	2,00	0,35	5,71	0,28
	3,00	0,75	4,00	0,33
	4,00	1,45	2,76	0,35
	5,00	2,30	2,17	0,38

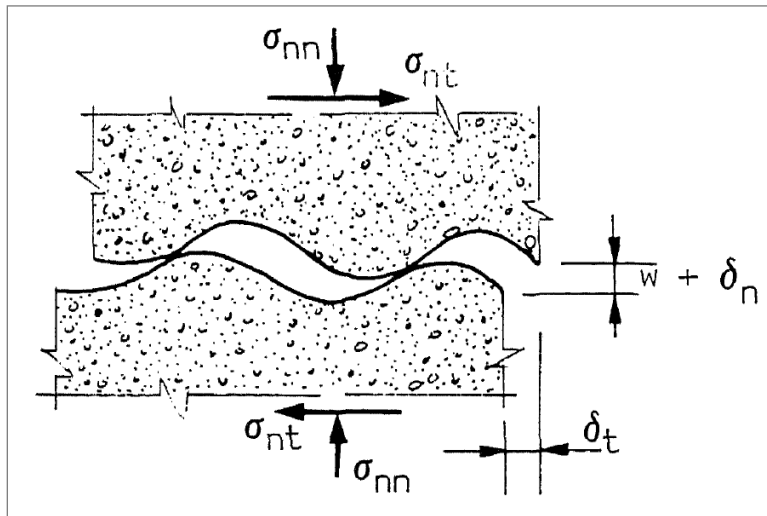
Πίνακας 19. Οι τιμές του μ_1 με βάση το Σχήμα 43, για διάμετρο μέγιστου αδρανούς $D_{max} = 16 \text{ mm}$, αρχικό άνοιγμα ρωγμής $w_o = 0,2$ έως $0,5 \text{ mm}$ και επιστρατευόμενη διατμητική τάση $\tau = 2$ έως 5 MPa

3.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΡΧΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΡΩΓΜΗΣ ΣΤΙΣ ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΤΩΝ ΟΨΕΩΝ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΚΑΙ ΚΑΘΕΤΑ ΣΤΗ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ – ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ $w = 0,6 \cdot s^{2/3}$, ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΑΡΧΙΚΑ ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ ΡΩΓΜΗΣ, ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΤΩΝ Briseghella and Gori

Οι Briseghella and Gori, πραγματοποίησαν πειραματική διερεύνηση σε ρωγμές δοκιμίων σκυροδέματος που υπόκεινται σε μονοτονικές, επαναλαμβανόμενες και ανακυκλιζόμενες δράσεις διάτμησης. Η πειραματική διάταξη των δοκιμών παρουσιάζεται στο Σχήμα 46. Οι διεπιφάνειες των δοκιμίων δεν είναι ωπλισμένες και η ορθή θλιπτική τάση ασκείται στις διεπιφάνειες, μέσω νιζών που βρίσκονται εκτός αυτών. Η ρωγμή δημιουργείται στα δοκίμια μέσω δοκιμής εφελκυσμού, διέρχεται δια μέσου του στρώματος τσιμέντου και επιπλέον, προκαλεί τη θραύση πολλών στοιχείων από χαλίκι. Στο Σχήμα 47 παρουσιάζεται ο ορισμός των τάσεων και των μετατοπίσεων που αναπτύσσονται στη ρηγματωμένη διεπιφάνεια σκυροδέματος.



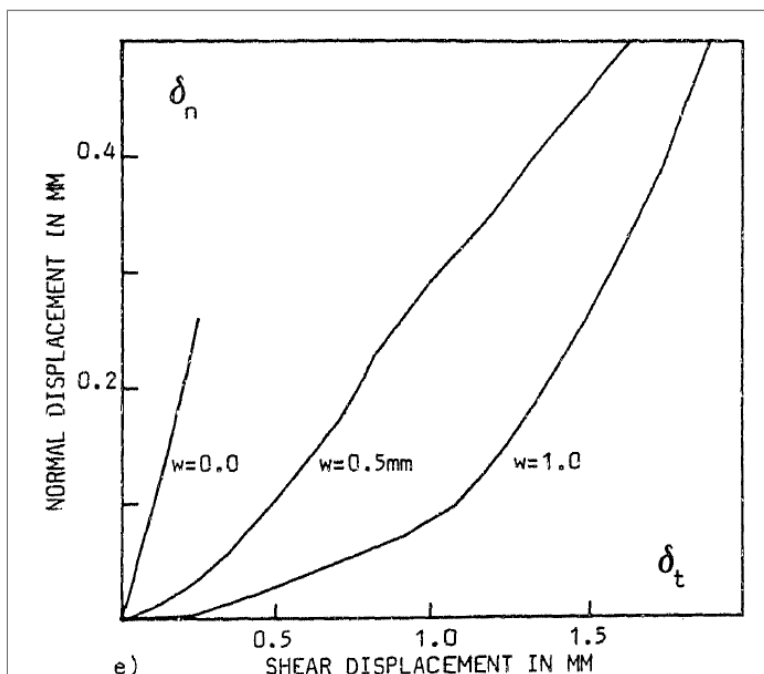
Σχήμα 46. Η πειραματική διάταξη των δοκιμών (Briseghella and Gori)



Σχήμα 47. Ορισμός των τάσεων και των μετατοπίσεων που αναπτύσσονται στη ρηγματωμένη διεπιφάνεια σκυροδέματος (Briseghella and Gori)

Όσον αφορά στις δοκιμές μονοτονικής δράσης, στο Σχήμα 48 παρουσιάζεται το διάγραμμα σχετικής μετακίνησης των όψεων της ρωγμής κάθετα στη διεπιφάνεια σε σχέση με τη διατμητική ολίσθηση, για αρχικά ανοίγματα ρωγμής $w = 0,0, 0,5$ και $1,0 \text{ mm}$. Παρατηρείται, ότι καθώς αυξάνεται το αρχικό άνοιγμα ρωγμής, προκύπτουν μεγαλύτερες σχετικές μετακινήσεις των όψεων της ρωγμής παράλληλα και κάθετα στη ρηγματωμένη διεπιφάνεια.

Ακόμη, με βάση το Σχήμα 48, υπολογίστηκαν οι τιμές του ανοίγματος ρωγμής για διάφορες τιμές διατμητικής ολίσθησης, για αρχικά ανοίγματα ρωγμής $w = 0,0, 0,5$ και $1,0 \text{ mm}$, και έγινε σύγκριση με τις τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή της σχέσης $w = 0,6 \cdot s^{2/3}$. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 20. Παρατηρείται, ότι όσο μειώνεται το αρχικό άνοιγμα ρωγμής, οι τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή της ανωτέρω σχέσης, πλησιάζουν περισσότερο τις τιμές που προκύπτουν από το διάγραμμα.

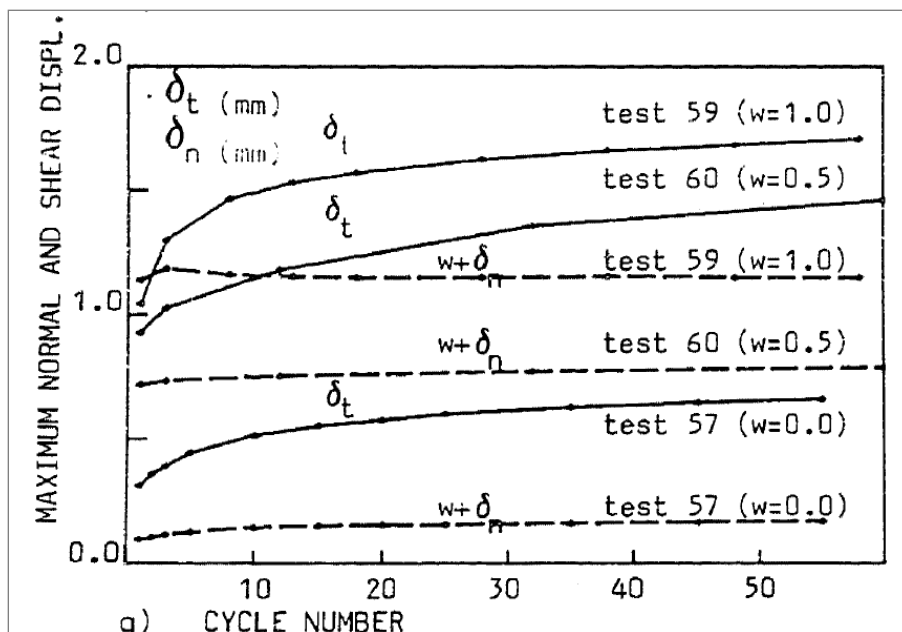


Σχήμα 48. Διάγραμμα σχετικής μετακίνησης των όψεων της ρωγμής κάθετα στη διεπιφάνεια σε σχέση με τη διατμητική ολίσθηση, για μονοτονική δράση (Briseghella and Gori)

Αρχικό άνοιγμα ρωγμής, w (mm)	Επιβαλλόμενη ολίσθηση, s (mm)	Σχετική μετακίνηση κάθετα στη διεπιφάνεια, δ_n (mm) (Σχήμα 48)	Άνοιγμα ρωγμής, $w + \delta_n$ (mm)	Άνοιγμα ρωγμής, από σχέση $w = 0,6 \cdot s^{2/3}$ (mm)
0,0	0,11	0,1	0,1	0,14
	0,19	0,2	0,2	0,20
0,5	0,5	0,1	0,6	0,38
	1,0	0,29	0,79	0,6
1,0	1,5	0,45	0,95	0,79
	0,5	0,03	1,03	0,38
1,0	1,0	0,08	1,08	0,6
	1,5	0,26	1,26	0,79

Πίνακας 20. Τιμές του ανοίγματος ρωγμής για διάφορες τιμές διατμητικής ολίσθησης, για αρχικά ανοίγματα ρωγμής $w = 0,0, 0,5$ και $1,0$ mm, με βάση το Σχήμα 48 και τη σχέση $w = 0,6 \cdot s^{2/3}$

Επιπλέον, με βάση το Σχήμα 49, προσδιορίστηκαν οι μέγιστες τιμές του ανοίγματος ρωγμής και της διατμητικής ολίσθησης, για μονοτονική δράση, η οποία αντιστοιχεί στον πρώτο κύκλο του διαγράμματος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, συνοψίζονται στον Πίνακα 21. Παρατηρείται και εδώ, ότι για μεγαλύτερο αρχικό άνοιγμα ρωγμής, προκύπτουν μεγαλύτερες τιμές σχετικής μετακίνησης των όψεων της ρωγμής, παράλληλα και κάθετα στη ρηγματωμένη διεπιφάνεια.



Σχήμα 49. Μέγιστες τιμές ανοίγματος ρωγμής και διατμητικής ολίσθησης, για ανακυκλιζόμενη δράση, και αρχικά ανοίγματα ρωγμής $w = 0,0, 0,5$ και $1,0 \text{ mm}$ (Briseghella and Gori)

Αρχικό άνοιγμα ρωγμής, $w \text{ (mm)}$	Μέγιστο άνοιγμα ρωγμής, $w + \delta_n \text{ (mm)}$	Μέγιστη διατμητική ολίσθηση, $\delta_t \text{ (mm)}$
0,0	0,10	0,31
0,5	0,71	0,93
1,0	1,14	1,04

Πίνακας 21. Μέγιστες τιμές του ανοίγματος ρωγμής και της διατμητικής ολίσθησης, για μονοτονική δράση, και αρχικά ανοίγματα ρωγμής $w = 0,0, 0,5$ και $1,0 \text{ mm}$

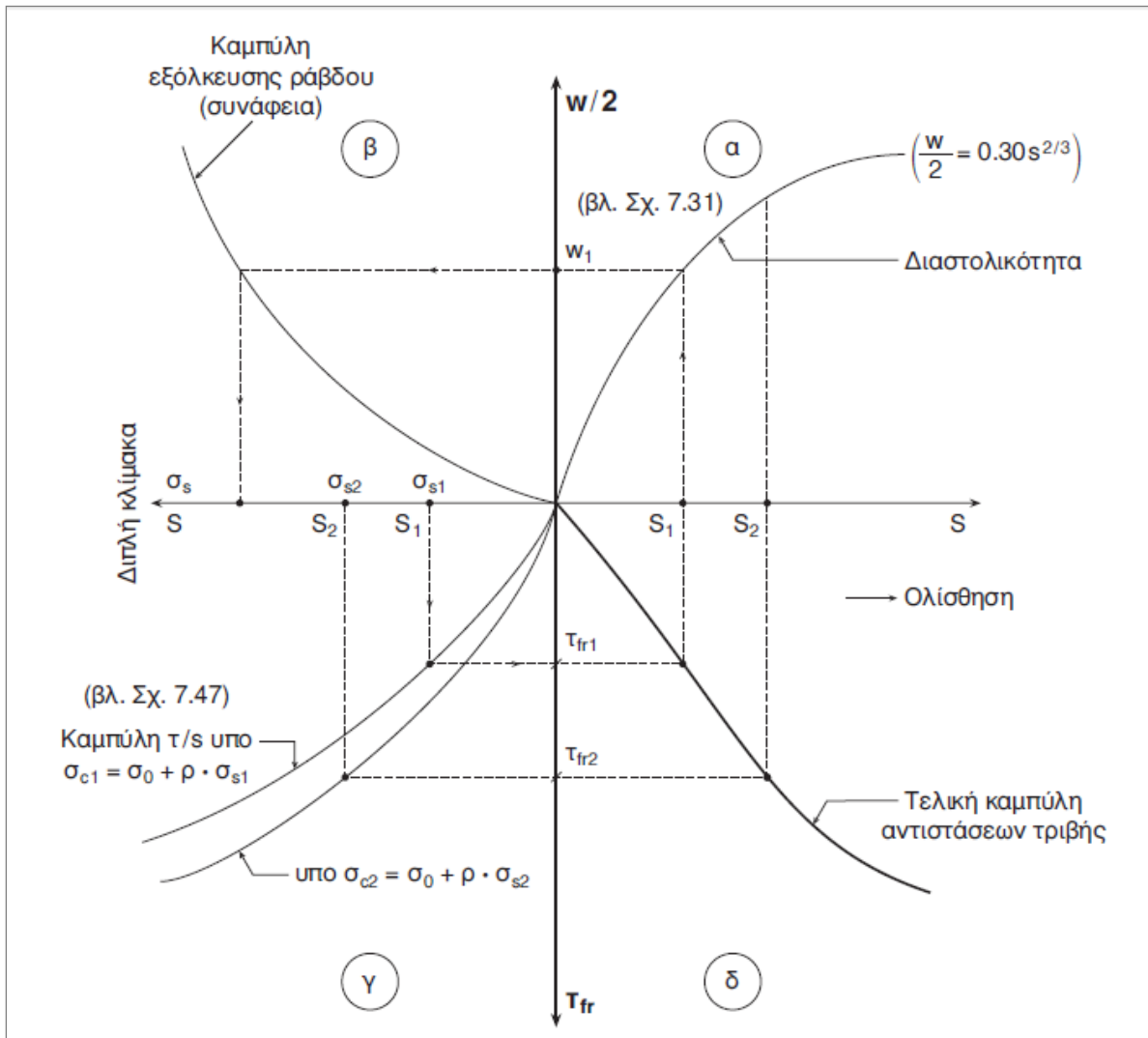
Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται η συμβολή της γνώσης του μηχανισμού της συνάφειας χάλυβα και σκυροδέματος, στη δημιουργία της καμπύλης αντιστάσεων τριβής σε σχέση με τις επιβαλλόμενες ολίσθησεις κατά μήκος μιας ωπλισμένης διεπιφάνειας, η οποία περιγράφει τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας. Επιπλέον, παρουσιάζεται η σχέση τοπικής τάσης συνάφειας – τοπικής ολίσθησης στην περίπτωση μονοτονικής δράσης και η εξέλιξη του μηχανισμού στην περίπτωση ανακυκλιζόμενης δράσης. Ακόμη, παρουσιάζεται η σχέση που συνδέει την εφελκυστική τάση μιας ράβδου οπλισμού με την εξόλκευσή της, και η εξέλιξη των εφελκυστικών τάσεων στην περίπτωση επιβολής σεισμικώς ετερόσημων μετακινήσεων.

4.1 Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΓΝΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΧΑΛΥΒΑ ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, ΣΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΤΡΙΒΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΜΙΑΣ ΩΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Αν και η συνάφεια μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος δεν αποτελεί μηχανισμό μεταφοράς τέμνουσας, η γνώση της είναι πολύ σημαντική για τον υπολογισμό της τάσης τριβής $\tau_{fr,1}$, η οποία επιστρατεύεται όταν στη διεπιφάνεια επιβάλλεται ολίσθηση s_1 , και τελικώς, για τη δημιουργία της καμπύλης αντιστάσεων τριβής που προκύπτει από διάφορες τιμές επιβαλλόμενης ολίσθησης s .

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 50, εάν είναι γνωστοί οι νόμοι μεταβολής του ανοίγματος της ρωγμής συναρτήσει της ολίσθησης (διάγραμμα «α»), συνάφειας χάλυβα και σκυροδέματος (διάγραμμα «β»), καθώς και της εξέλιξης των τάσεων τριβής σε μια διεπιφάνεια υπό σταθερή επιβαλλόμενη θλιπτική τάση (διάγραμμα «γ»), τότε είναι δυνατό να παραχθεί η σχέση $\tau_{fr} - s$, η οποία περιγράφει την συμπεριφορά μιας διατεμνόμενης ωπλισμένης διεπιφάνειας: Για μια τιμή s_1 της σχετικής ολίσθησης, είναι γνωστό το άνοιγμα ρωγμής w_1 από το διάγραμμα «α» και ισούται με τη μήκυνση των ράβδων που τέμνουν τη ρωγμή. Έτσι, ο νόμος της συνάφειας (διάγραμμα «β») οδηγεί

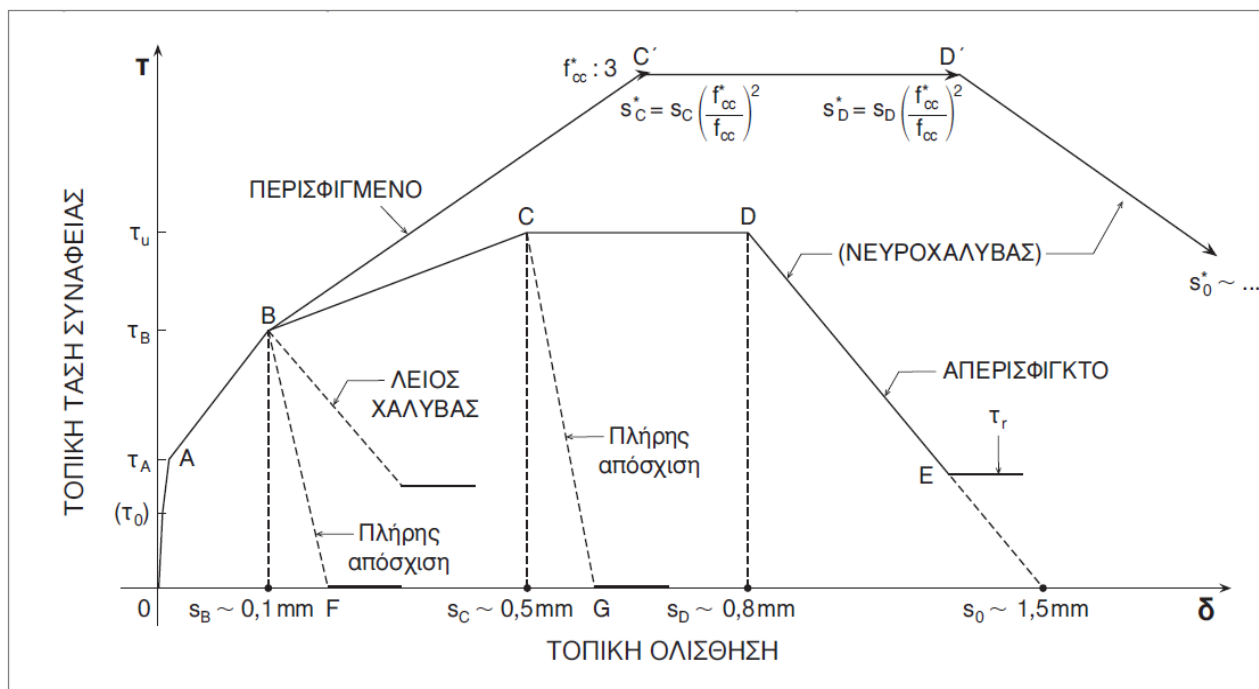
στην εφελκυστική τάση σ_{s1} που αναπτύσσεται στις ράβδους. Η αντίστοιχη θλιπτική τάση στο σκυρόδεμα, σ_{c1} , βρίσκεται μέσω πολλαπλασιασμού της σ_{s1} με το γεωμετρικό ποσοστό ρ του οπλισμού που τέμνει τη ρωγμή. Έτσι, για τη δεδομένη s_1 (και χρησιμοποιώντας την κατάλληλη καμπύλη $\tau_{fr} - s$ που αντιστοιχεί σε $\sigma_c = \sigma_o + \sigma_{c1}$), προκύπτει απ' το διάγραμμα «γ» η τάση τριβής $\tau_{fr,1}$, η οποία επιστρατεύεται όταν στη διεπιφάνεια επιβάλλεται ολίσθηση s_1 . Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία, για διάφορες τιμές s , παράγεται το τελικώς ζητούμενο διάγραμμα «δ» (Τάσιος, 2014).



Σχήμα 50. Δημιουργία τελικής καμπύλης αντιστάσεων τριβής, γνωρίζοντας τις καμπύλες $w - s$, εξόλκευσης ράβδου (συνάφεια), και $\tau_{fr} - s$ που αντιστοιχεί σε σταθερή επιβαλλόμενη θλιπτική τάση σ_c (Τάσιος, 2014)

4.2 Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ (ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ)

Η σχέση μεταξύ τοπικής τάσης συνάφειας και τοπικής ολίσθησης, στην περίπτωση μονοτονικής δράσης, παρουσιάζεται στο Σχήμα 51.

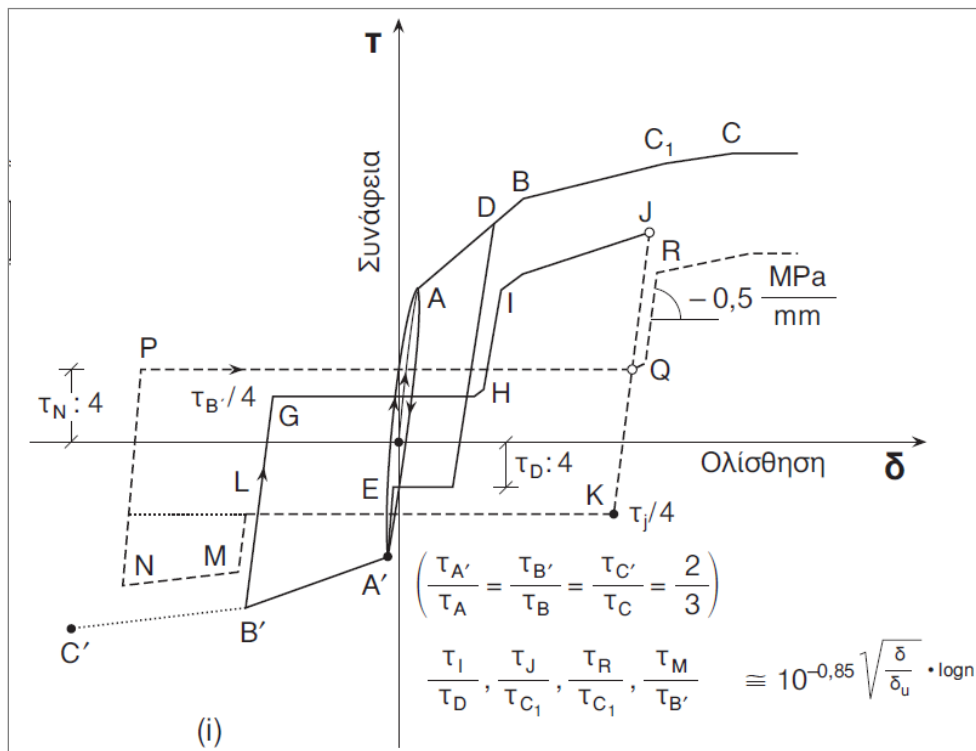


Σχήμα 51. Σχέση μεταξύ τοπικής τάσης συνάφειας και τοπικής ολίσθησης, στην περίπτωση μονοτονικής δράσης (Τάσιος, 2014)

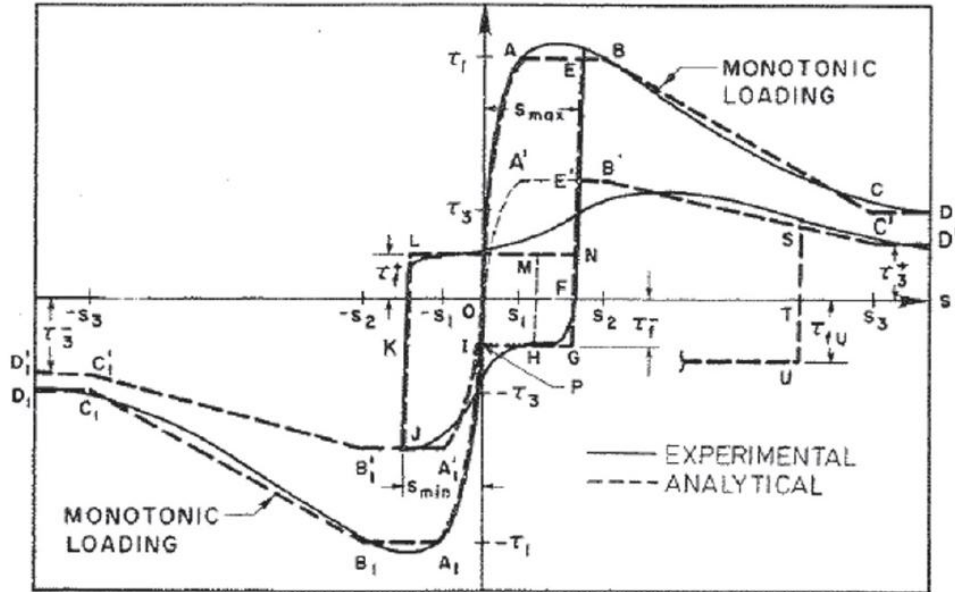
Στις τοπικές τάσεις συνάφειας του ανωτέρω σχήματος, αντιστοιχούν οι ακόλουθες καταστάσεις:

- τ_o : συνοχή (χημικής/μηχανικής φύσης) υπό πρακτικώς μηδενική ολίσθηση
- τ_A : εσωτερική (εγκάρσια) ρηγμάτωση $\approx f_{ct}$
- τ_B : εμφάνιση (διαμήκων) ρωγμών απόσχισης $\approx 2f_{ct}$
- τ_u : πλήρης απόσχιση ή θραύση «προβολίσκων» σκυροδέματος μεταξύ διαδοχικών νευρώσεων (και μεταξύ διαδοχικών εγκαρσίων ρωγμών) $\approx f_{cc}: 3$
- τ_r : απομένουσα τάση συνάφειας (τριβή) $\approx f_{ct}: 2$

Στο Σχήμα 52 παρουσιάζεται το διάγραμμα τοπικών τάσεων συνάφειας – τοπικής ολίσθησης για ανακυκλιζόμενες δράσεις, χωρίς περίσφιγξη, κατά τον Τάσιο (1980). Παρατηρείται σημαντική μείωση της επιστρατευόμενης τάσης συνάφειας με την ανακύκληση, και λαμβάνεται $\delta_u = 2mm$. Στο Σχήμα 53 παρουσιάζεται το διάγραμμα τοπικών τάσεων συνάφειας – τοπικής ολίσθησης για ισχυρώς περισφιγμένο σκυρόδεμα, κατά Elgehausen (1983).



Σχήμα 52. Διάγραμμα τοπικών τάσεων συνάφειας – τοπικής ολίσθησης για ανακυκλιζόμενες δράσεις, χωρίς περίσφιγξη, κατά τον Τάσιο (1980) (παράθεση από Τάσιος, 2014)



Σχήμα 53. Βασικά στοιχεία προσομοιώματος τοπικής συνάφειας – τοπικής ολίσθησης, κατά Elgehausen (παράθεση από Τάσιος, 2014)

4.3 ΣΧΕΣΗ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ ΡΑΒΔΟΥ ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ – ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΗ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗ

Λόγω των σεισμικώς επιβαλλόμενων ετερόσημων μετακινήσεων, αναμένεται ότι και οι εξολκευόμενοι οπλισμοί θα βρεθούν σε κατάσταση αποφόρτισης (και επαναφόρτισης κατόπιν). Στις περιπτώσεις διατεμνομένων διεπιφανειών που «ράβονται» με εγκάρσιους οπλισμούς (σφιγκτήρες), η τάση του χάλυβα παραμένει πάντοτε εφελκυστική. Τότε μιλάμε για «επαναλαμβανόμενη» (κι όχι ανακυκλιζόμενη) ένταση του χάλυβα (Τάσιος, 2014). Το φορμαλιστικό προσομοίωμα επαναλαμβανόμενης εξόλκευσης ράβδου, παρουσιάζεται στο Σχήμα 54.

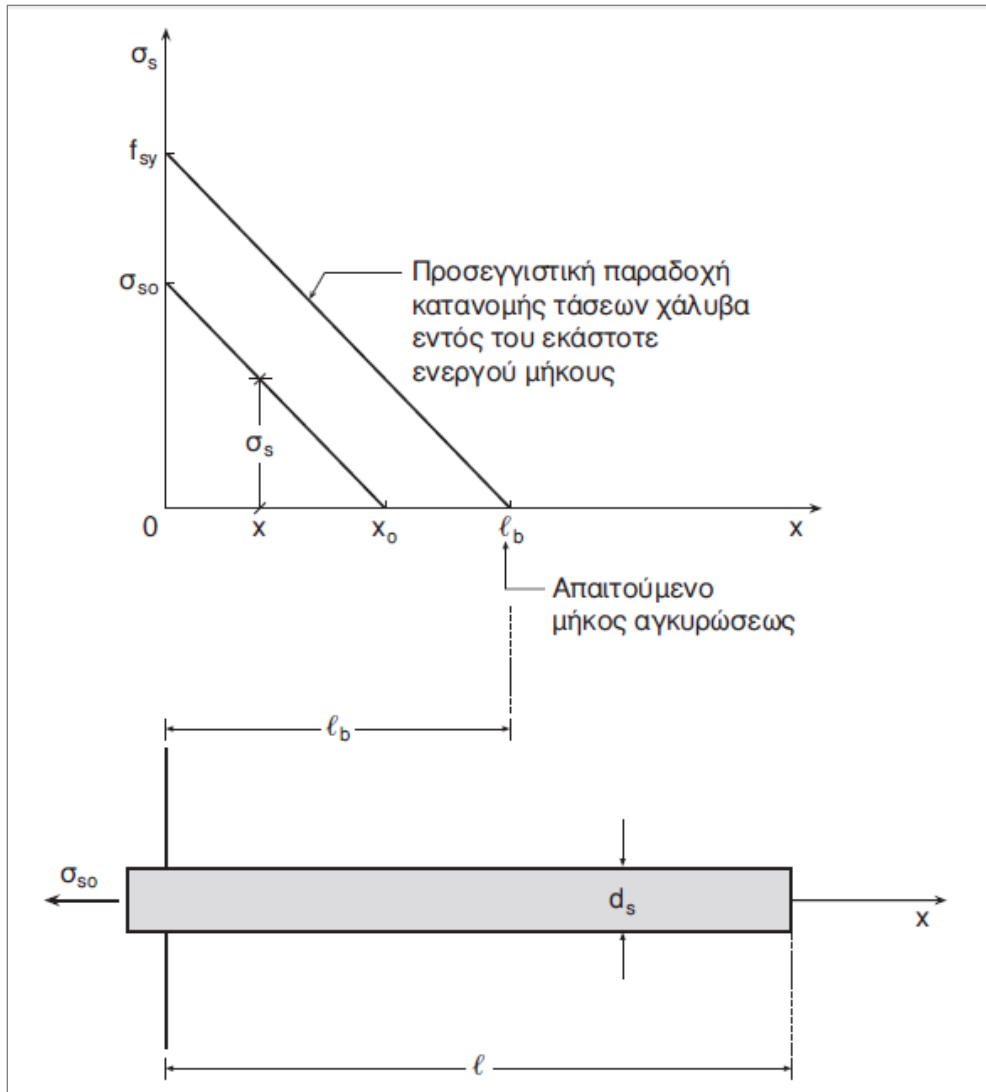
Αρχικά, η εφελκυστική τάση της ράβδου στο άκρο της αυξάνεται, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_{so} = \sqrt{\frac{\delta_o}{a_s} \cdot E_s \cdot f_c}, \quad (35)$$

υπό τον όρο πάντοτε, ότι το μήκος αγκύρωσης είναι επαρκές ($l > l_b$).

Στη συνέχεια, η εφελκυστική τάση της ράβδου μειώνεται σε κάθε κύκλο για την ίδια ολίσθηση, σύμφωνα με τη σχέση:

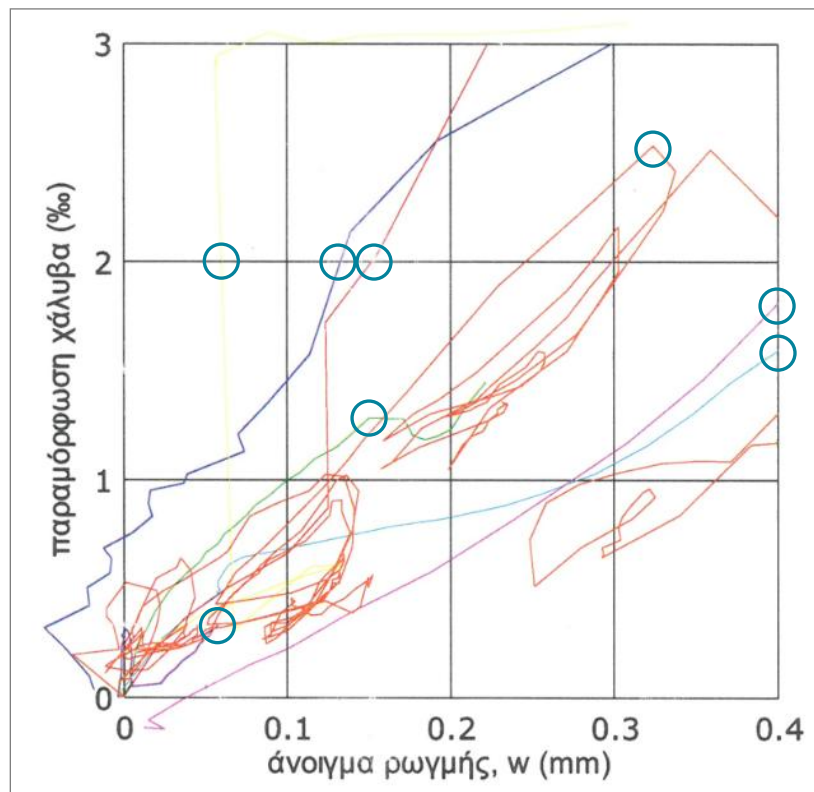
$$\sigma_{so,n} \cong \sigma_{so,1} \sqrt{1 - \frac{n-1}{10}} \quad (36)$$



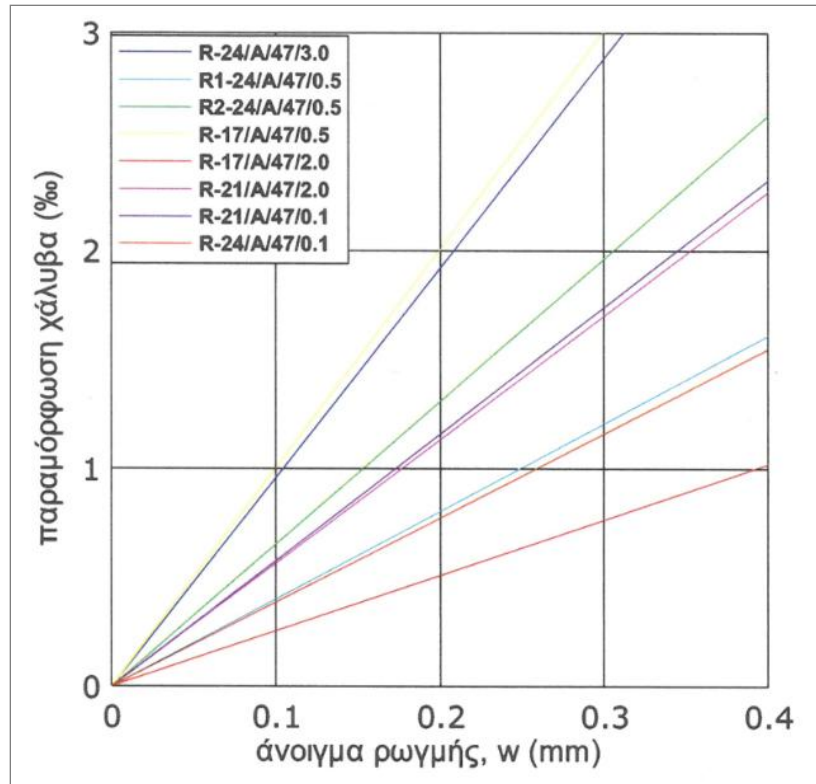
Σχήμα 55. Προσεγγιστική παραδοχή κατανομής των τάσεων σ_s κατά μήκος της ράβδου (Τάσιος, 2014)

Η ικανοποίηση της σχέσης (35) επιβεβαιώνεται και από τα πειραματικά αποτελέσματα στη Δ.Δ. της Παλιεράκη (2014). Στο Σχήμα 56 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ του ανοίγματος της ρωγμής και των εφελκυστικών παραμορφώσεων των ράβδων χάλυβα, επαρκούς μήκους αγκύρωσης, που διατέμνουν τη διεπιφάνεια των δοκιμίων, όπως προέκυψε από τις δοκιμές της Παλιεράκη (2014). Οι δοκιμές σε δοκίμια στα οποία οι ράβδοι έχουν επαρκές μήκος αγκύρωσης έδειξαν, ότι υπάρχει μία σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ του ανοίγματος της ρωγμής και της μέσης παραμόρφωσης του χάλυβα, αν και η αναλογία της αύξησης της παραμόρφωσης του χάλυβα διαφέρει σημαντικά από το ένα δοκίμιο στο άλλο. Στο Σχήμα 56α επισημαίνονται τα σημεία στις

καμπύλες για κάθε δοκίμιο, στα οποία έγινε ο έλεγχος ικανοποίησης της σχέσης (35). Με βάση την παραμόρφωση του χάλυβα πριν τη διαρροή, υπολογίστηκε η εφελκυστική τάση των ράβδων για κάθε δοκίμιο από τη σχέση $\sigma = E \cdot \varepsilon$. Με βάση το άνοιγμα ρωγμής υπολογίστηκε η εφελκυστική τάση των ράβδων από τη σχέση (35) και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις δύο σχέσεις. Η ποιότητα του χάλυβα είναι S500 (με μία μέση τιμή ορίου διαρροής ίση με 520 N/mm^2). Η διάμετρος των ράβδων για τα δοκίμια του διαγράμματος, είναι $d_s = 8 \text{ mm}$. Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα λήφθηκε $E_s = 200000 \text{ MPa}$. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 22.



(α)



(β)

Σχήμα 56. (α) Σχέση μεταξύ του ανοίγματος της ρωγμής και των εφελκυστικών παραμορφώσεων των ράβδων χάλυβα, επαρκούς μήκους αγκύρωσης, που διατέμνουν τη διεπιφάνεια, (β) Γραμμική εξέλιξη μεταξύ του ανοίγματος της ρωγμής και της μέσης παραμόρφωσης του χάλυβα (Παλιεράκη, 2014)

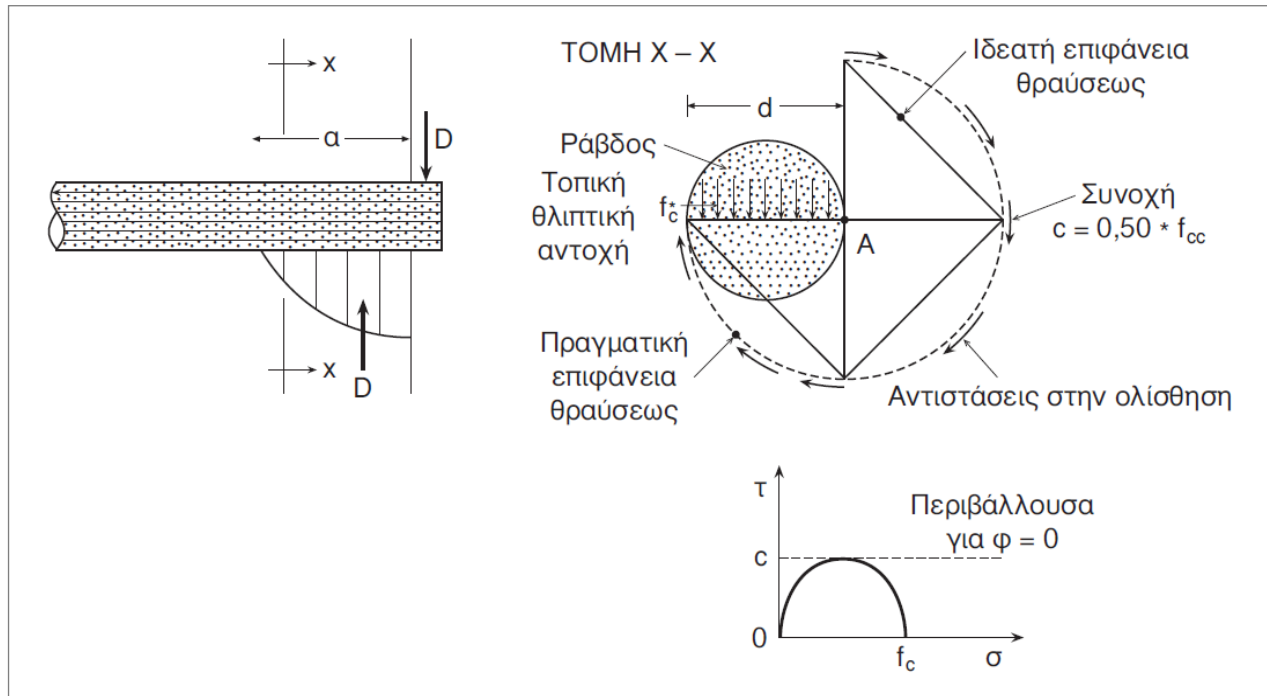
Δοκίμιο	ε (‰)	w (mm)	$\delta_o = w/2$ (mm)	f_c (MPa)	$\sigma = E_s \cdot \varepsilon$ (MPa)	$\sigma_{so} = \sqrt{\frac{\delta_o}{d_s} \cdot E_s \cdot f_c}, (MPa)$
R-24/A/47/3.0	2,00	0,13	0,065	24	400	198
R1-24/A/47/0.5	1,58	0,40	0,200	24	316	346
R2-24/A/47/0.5	1,28	0,15	0,075	24	256	212
R-17/A/47/0.5	2,00	0,06	0,030	17	400	113
R-17/A/47/2.0	2,00	0,15	0,075	17	400	179
R-21/A/47/2.0	1,79	0,40	0,200	21	358	324
R-21/A/47/0.1	0,32	0,06	0,030	21	64	126
R-24/A/47/0.1	2,51	0,32	0,160	24	502	310

Πίνακας 22. Έλεγχος ικανοποίησης της σχέσης (35), με βάση τα δεδομένα του Σχήματος 56α

Όπως αναφέρθηκε στην Εισαγωγή, η δράση βλήτρου αποτελεί τον ένα από τους δύο μηχανισμούς μεταφοράς τέμνουσας σε ωπλισμένες διεπιφάνειες σκυροδέματος, κατά μήκος των οποίων επιβάλλεται διατμητική δύναμη. Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται η σχέση που προσδιορίζει τη μέγιστη αντίσταση βλήτρου και το διάγραμμα αντίστασης βλήτρου – σχετικής μετακίνησης, για τις περιπτώσεις μεγάλης και μικρής επικάλυψης γύρω απ' τη ράβδο. Ακόμη, αναφέρονται οι ελάχιστες τιμές επικάλυψης και απόστασης μεταξύ διαδοχικών βλήτρων, προκειμένου ο μηχανισμός να αστοχεί με διαρροή του βλήτρου και ταυτόχρονη τοπική αστοχία λόγω συνθλίψεως του σκυροδέματος κάτω απ' τη ράβδο, και όχι με απόσχιση του σκυροδέματος που αποτελεί εξαιρετικά ψαθυρό τρόπο αστοχίας. Επιπλέον, παρουσιάζεται η επιρροή της ανακύκλησης στον μηχανισμό βλήτρου και το προσομοίωμα της συμπεριφοράς του μηχανισμού, κατά την επιβολή ανακυκλιζόμενων μετακινήσεων σταθερού εύρους. Τέλος, γίνεται αναφορά στην αλληλόδραση των δυνάμεων βλήτρου και εξόλκευσης των ράβδων οπλισμού που διαπερνούν τη διεπιφάνεια.

5.1 ΜΕΓΑΛΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗ ΡΑΒΔΟ

5.1.1 Τριαξονική συμπεριφορά του σκυροδέματος γύρω απ' τη ράβδο, για μηδενική γωνία τριβής



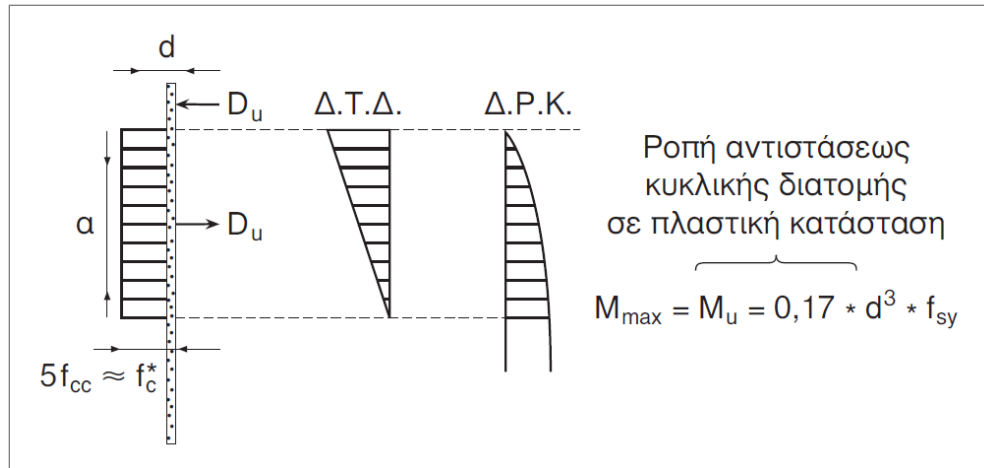
Σχήμα 57. Η τριαξονική συμπεριφορά του σκυροδέματος γύρω απ' τη ράβδο, για μηδενική γωνία τριβής (Τάσιος, 2014)

Με βάση το Σχήμα 57, υπολογίζοντας τις ροπές ως προς το σημείο A, προκύπτει:

$$f_c^* \cdot d \cdot \frac{d}{2} = (f_{cc}/2) \cdot (3/4) \cdot (2\pi d) \cdot d \Rightarrow$$

$$f_c^* \approx 5 \cdot f_{cc} \quad (38)$$

5.1.2 Υπολογισμός της αντοχής βλήτρου, D_u



Σχήμα 58. Ροπή αντιστάσεως κυκλικής διατομής σε πλαστική κατάσταση (Τάσιος, 2014)

Από την ισορροπία των οριζοντίων δυνάμεων, με βάση το Σχήμα 58, προκύπτει (Τάσιος, 2014):

$$D_u = d \cdot a \cdot 5f_{cc} \Rightarrow a = \frac{D_u}{5 \cdot d \cdot f_{cc}} \left(= 0,26 \sqrt{\frac{f_{sy}}{f_{cc}}} \cdot d \right) \quad (39)$$

$$M_{\max} = D_u \cdot a - D_u \cdot \frac{a}{2} = \frac{1}{2} \cdot D_u \cdot a \xrightarrow{(39)} M_{\max} = \frac{D_u^2}{10 \cdot d \cdot f_{cc}} \quad (40)$$

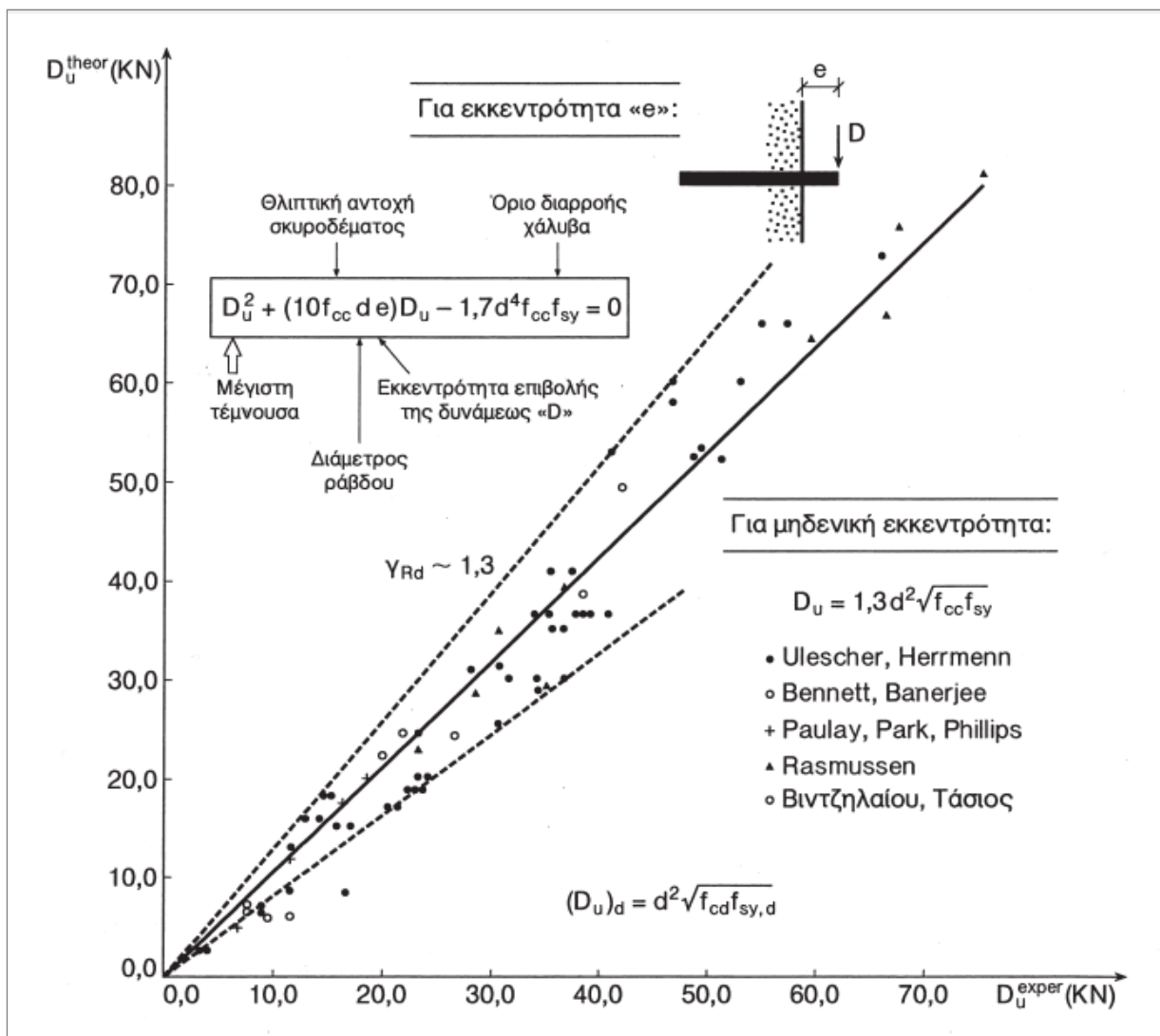
Έτσι προκύπτει:

$$\frac{D_u^2}{10 \cdot d \cdot f_{cc}} = 0,17 \cdot d^3 \cdot f_{sy} \Rightarrow$$

$$D_u = 1,3 \cdot d^2 \sqrt{f_{sy} \cdot f_{cc}}, \quad (41)$$

όπου εφαρμόζεται $\gamma_{Rd} = 1,3$.

Στο Σχήμα 59 παρατηρείται, ότι η σύγκριση των αποτελεσμάτων της θεωρητικής σχέσης (41) με τα πειραματικά αποτελέσματα τα προερχόμενα από διάφορες πηγές, είναι πολύ ικανοποιητική. Διαπιστώνεται όμως, η ανάγκη εισαγωγής συντελεστή αβεβαιότητας προσομοιώματος, $\gamma_{Rd} \cong 1,3$.



Σχήμα 59. Σύγκριση αποτελεσμάτων που προκύπτουν για την αντοχή βλήτρου από τη σχέση (41), με πειραματικά αποτελέσματα (Τάσιος, 2014)

Σε περιοχές, όπου ασκείται μια εξωτερική δύναμη παράλληλη προς τον οπλισμό, θα πρέπει να λαμβάνεται:

$$D'_u \cong 1,3 \cdot d^2 \cdot \sqrt{(f_{sy} - |\sigma_s|) \cdot f_c}, \quad (42)$$

όπου, σ_s είναι η αρχική τάση εφελκυσμού ή θλίψης της ράβδου, λόγω αυτής της εξωτερικής δύναμης.

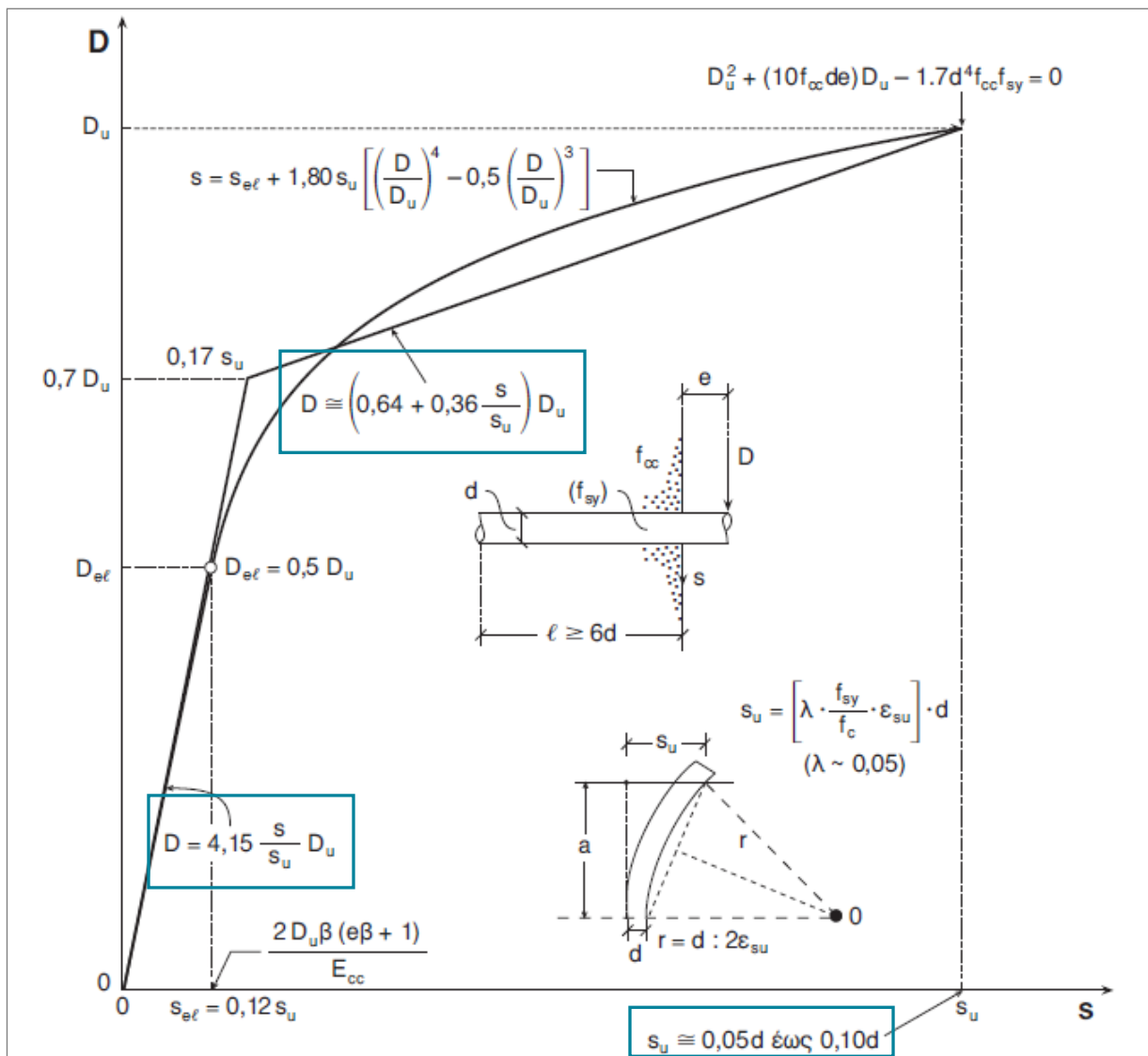
Τοπική αποφλοίσωση σκυροδέματος (spalling), στην κάθετη προς το βλήτρο επιφάνεια, εμφανίζεται όταν (Τάσιος, 2014):

$$D_{sp} \sim 0,7D_u \quad (43)$$

και το βάθος αυτής της αποφλοίσωσης εκτιμάται απ' την εμπειρική σχέση:

$$t_{sp} \sim \frac{1}{2} a = \frac{1}{8} \sqrt{\frac{f_{sy}}{f_c}} \cdot d \quad (44)$$

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται το πλήρες διάγραμμα δύναμης – σχετικής μετακίνησης, για την περίπτωση βλήτρων με μεγάλη επικάλυψη.



Σχήμα 60. Πλήρες διάγραμμα δύναμης – σχετικής μετακίνησης, για την περίπτωση βλήτρων με μεγάλη επικάλυψη (Για παλαιούς χάλυβες, $s_u \sim 0,10d$) (Τάσιος, 2014)

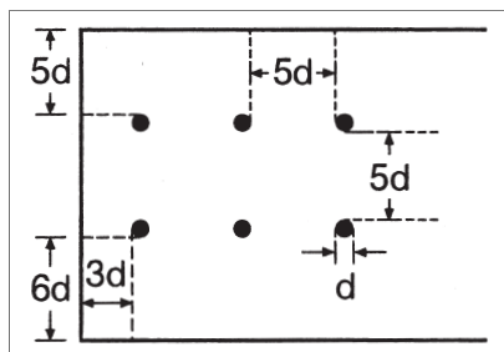
5.1.3 Αποστάσεις βλήτρων

Πρέπει να εξασφαλίζεται, ότι ο μηχανισμός βλήτρου αστοχεί με διαρροή του βλήτρου και ταυτόχρονη τοπική αστοχία λόγω συνθλίψεως του σκυροδέματος κάτω απ' τη ράβδο (KAN.ΕΠΕ., 2012). Ο επιθυμητός τρόπος αστοχίας εξασφαλίζεται, όταν η επικάλυψη της ράβδου, διαμέτρου d_b (κατά τη διεύθυνση της φορτίσεως και κάθετα προς αυτήν), είναι τουλάχιστον ίση με τις τιμές που ακολουθούν, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 61.

- Κατά τη διεύθυνση φορτίσεως:
 - ελάχιστη εμπρός επικάλυψη = $6d_b$
 - ελάχιστη πίσω επικάλυψη = $5d_b$
- Κάθετα στη διεύθυνση φορτίσεως:
 - ελάχιστη πλευρική επικάλυψη = $3d_b$

Όταν η επικάλυψη δεν είναι επαρκής, ο μηχανισμός αστοχεί με την εμφάνιση ρωγμής στο σκυρόδεμα κατά μήκος του βλήτρου (ρωγμή αποσχίσεως). Η αστοχία λόγω αποσχίσεως του σκυροδέματος είναι εξαιρετικά ψαθυρή (συμβαίνει για πολύ μικρή τιμή της ολισθήσεως κατά μήκος της διεπιφάνειας, συνοδεύεται δε από σημαντική απότομη πτώση της αναλαμβανόμενης τέμνουσας). Γι' αυτό το λόγο, όταν δεν τηρούνται αυτές οι προϋποθέσεις επικαλύψεων, δεν επιτρέπεται να λαμβάνεται υπόψη η αντίσταση βλήτρου υπό σεισμό (KAN.ΕΠΕ., 2012).

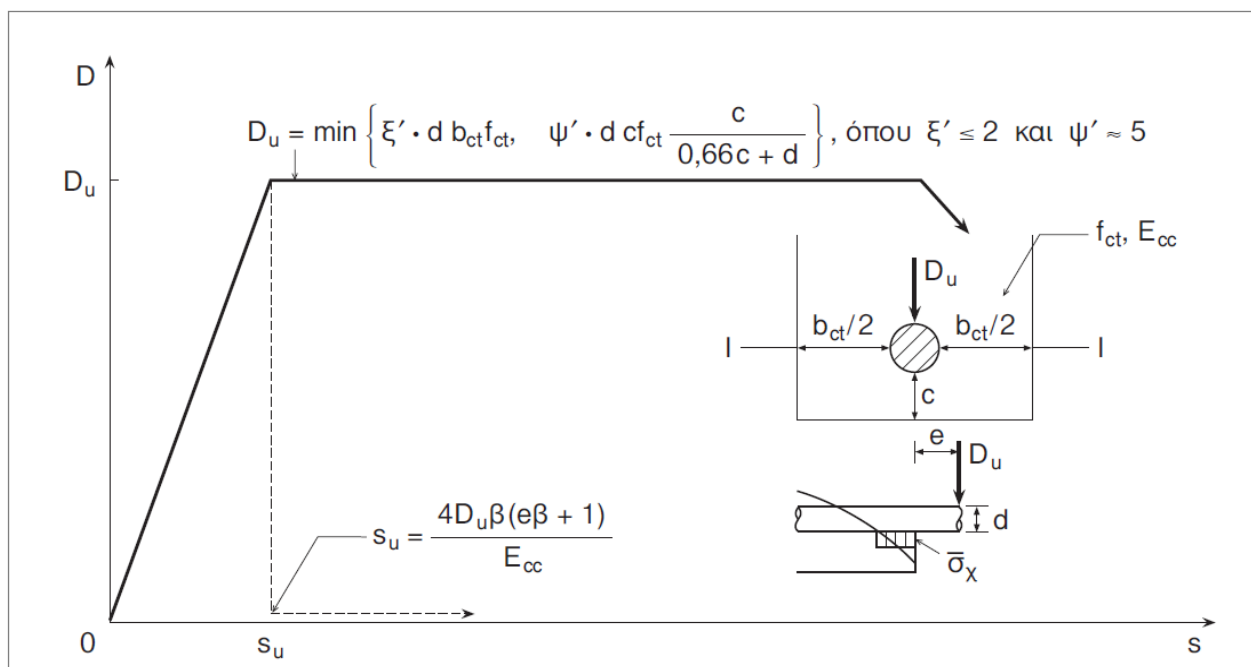
Στην περίπτωση βλήτρων διατεταγμένων εν σειρά, η καθαρή απόσταση μεταξύ διαδοχικών βλήτρων πρέπει να είναι κατ' ελάχιστον ίση με το πενταπλάσιο της διαμέτρου του βλήτρου.



Σχήμα 61. Ελάχιστες επικαλύψεις και καθαρή απόσταση μεταξύ διαδοχικών βλήτρων (Τάσιος, 2014)

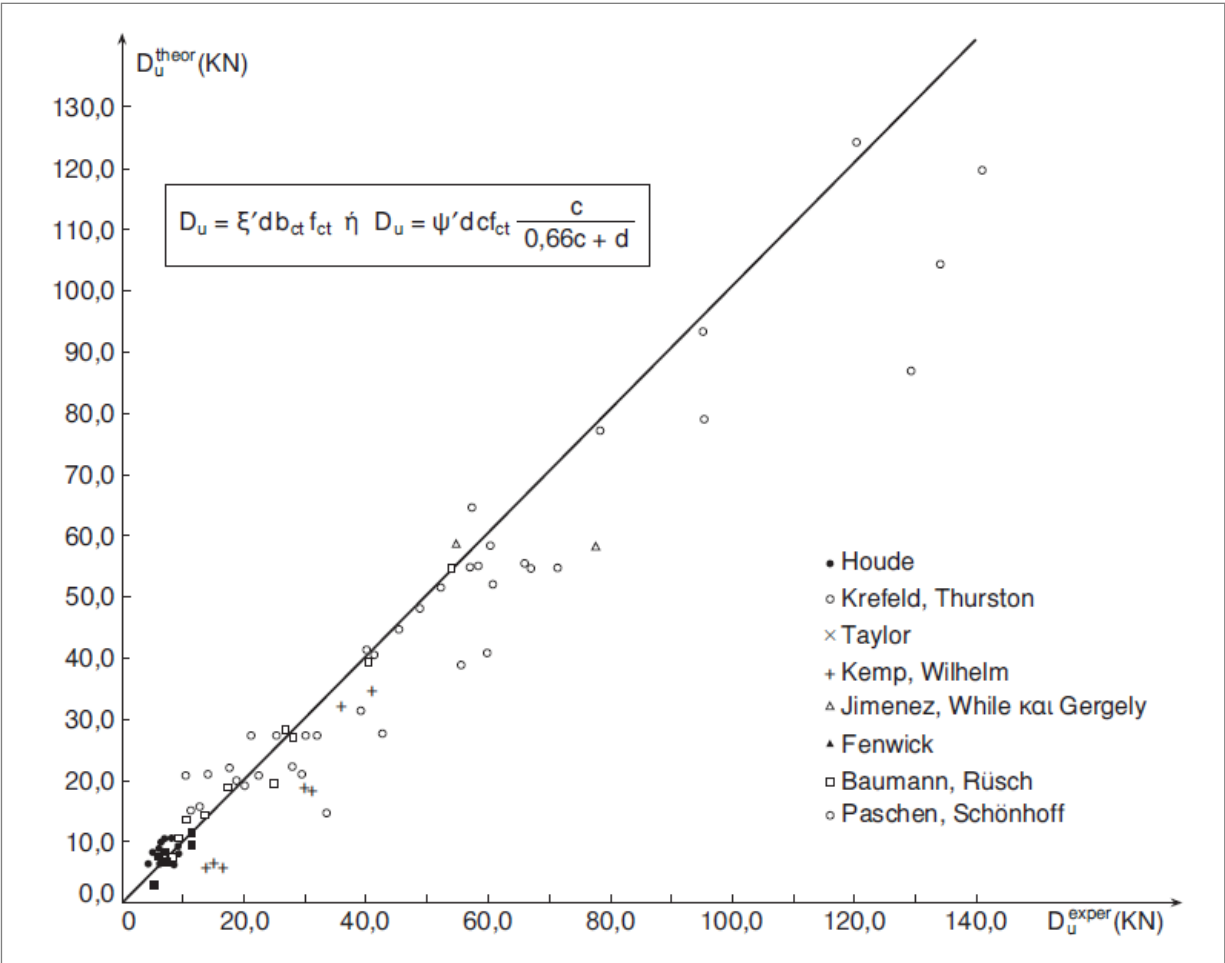
5.2 ΜΙΚΡΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΡΑΒΔΟΥ

Σ' αυτή την περίπτωση, η θλιπτική δύναμη που ασκείται στο σκυρόδεμα κάτω απ' τη ράβδο εξισορροπείται από εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα κατά μήκος της τομής I – I (Σχήμα 62). Εάν αυτές οι τάσεις φθάσουν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, τότε ανοίγει μια ρωγμή αποσχίσεως κατά μήκος της ράβδου, η οποία και προκαλεί αστοχία του μηχανισμού. Το διάγραμμα τέμνουσας δύναμης – σχετικής μετακίνησης, σ' αυτή την περίπτωση, αποτελείται από έναν πρακτικώς ευθύγραμμο ανιόντα κλάδο μέχρι την εμφάνιση της ρωγμής αποσχίσεως. Αμέσως μετά, εάν το βάθος έμπηξης του βλήτρου είναι μικρό, παρατηρείται μείωση μέχρι μηδενισμού της απόκρισης. Εάν το βάθος έμπηξης είναι μεγάλο, προηγείται ένας πραγματικώς οριζόντιος κλάδος.



Σχήμα 62. Διάγραμμα δύναμης – σχετικής μετακίνησης, για την περίπτωση βλήτρων με μικρή επικάλυψη (Τάσιος, 2014)

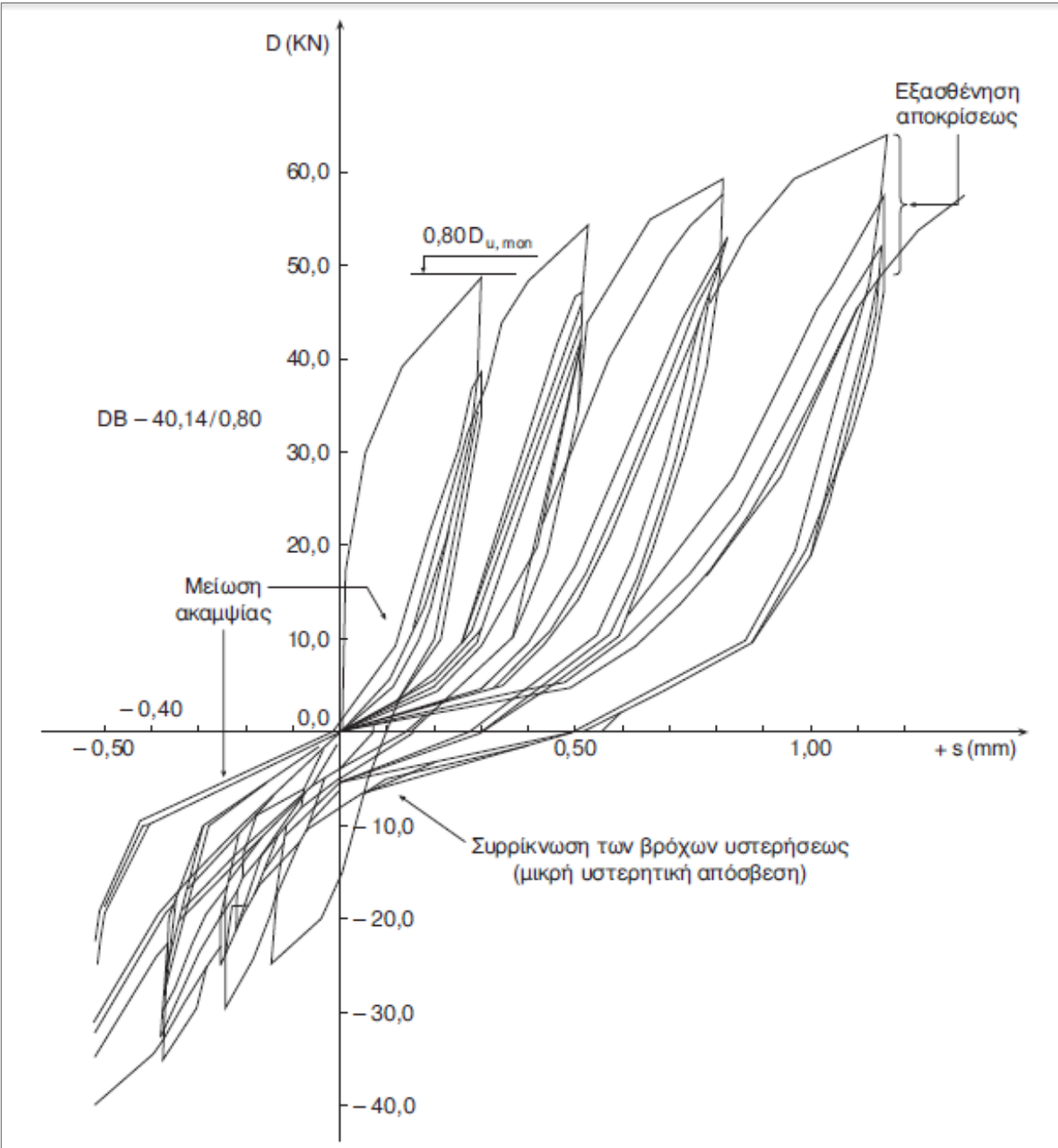
Στο Σχήμα 63 φαίνεται, ότι η σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνει η εφαρμογή των θεωρητικών σχέσεων και πειραματικών αποτελεσμάτων από διάφορες πηγές, είναι ικανοποιητική.



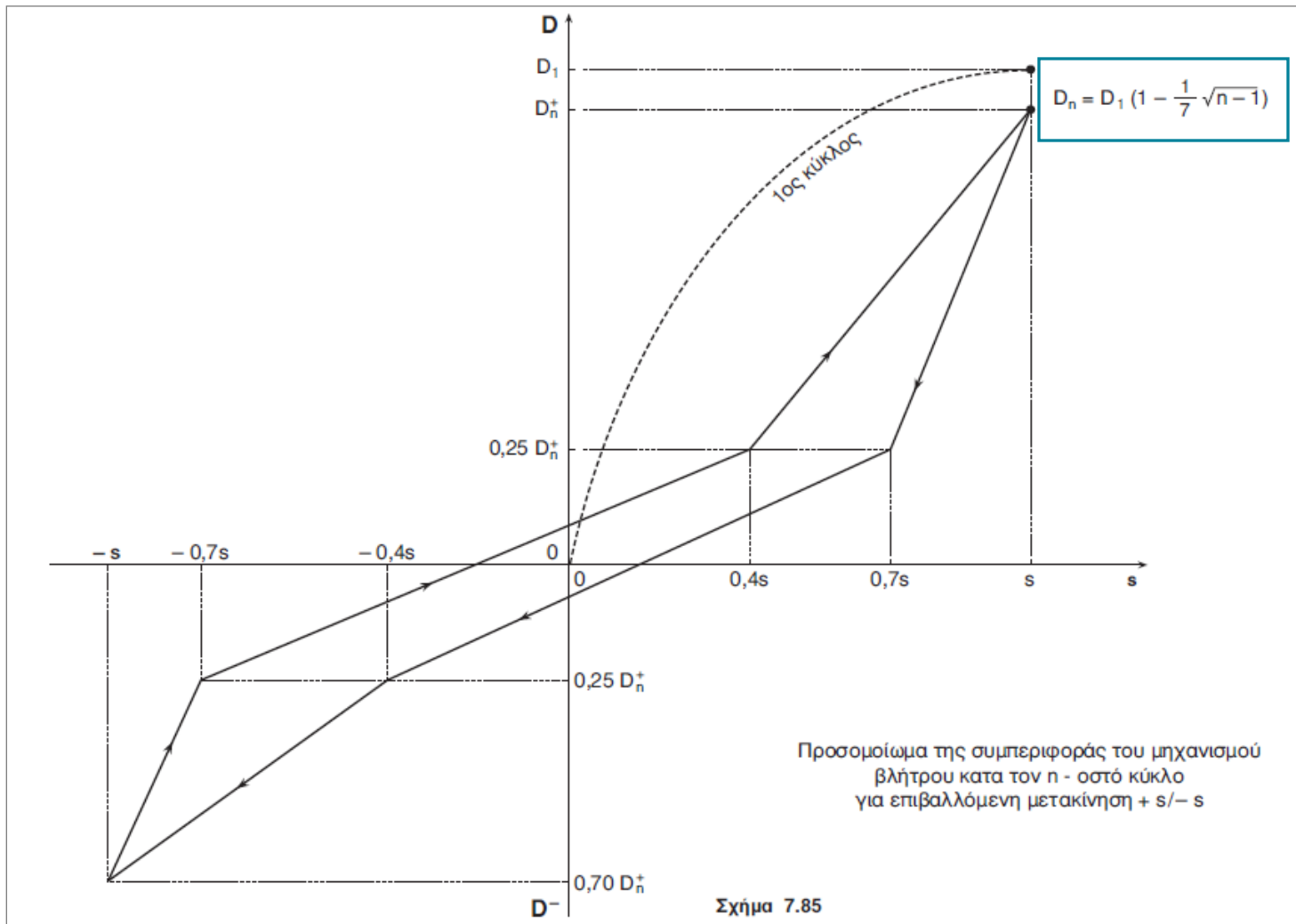
Σχήμα 63. Σύγκριση αποτελεσμάτων από την εφαρμογή των θεωρητικών σχέσεων, με πειραματικά αποτελέσματα (Τάσιος, 2014)

5.3 Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΗΣΗΣ ΣΤΟΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΒΛΗΤΡΟΥ

Στα Σχήματα 64, 65 παρουσιάζονται αντίστοιχα, η επιρροή της ανακύκλισης στον μηχανισμό βλήτρου και το προσομοίωμα της συμπεριφοράς του μηχανισμού βλήτρου κατά το n -οστό κύκλο, για επιβαλλόμενη μετακίνηση $+s/-s$.



Σχήμα 64. Η επιρροή της ανακύκλισης στον μηχανισμό βλήτρου, κατά τη Βιντζηλαίου (1984) (παράθεση από Τάσιος, 2014)



Σχήμα 65. Προσομοίωμα της συμπεριφοράς του μηχανισμού βλήτρου κατά το n -οστό κύκλο, για επιβαλλόμενη μετακίνηση $+s/-s$ (Τάσιος, 2014)

5.4 ΑΛΛΗΛΟΔΡΑΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΒΛΗΤΡΟΥ (D) ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ (B)

Αμφότερες οι δράσεις επιστρατεύουν τάσεις στη ράβδο, όπως άλλωστε και η εξωτερική αξονική δύναμη N ($\rightarrow \sigma_{SN}$). Έτσι, όταν οι τάσεις αυτές προστίθενται $\sigma_{SD} + \sigma_{SB} + \sigma_{SN} = f_{sy}$, αναμένεται ότι οι δύο μηχανισμοί δεν μπορούν να φθάσουν στις μέγιστες τιμές τους D_u και B_u , οι οποίες θα ίσχυαν αν δρούσαν μόνοι τους (Τάσιος, 2014).

- Προσεγγιστική συνάρτηση αλληλόδρασης

- Δύναμη εξόλκευσης: $B = \frac{\pi d^2}{4} \sigma_{SB}$

- Αντίσταση βλήτρου: $D \cong 1,3d^2 \sqrt{\sigma_{SD} f_c}$

- Μέγιστη δύναμη εξόλκευσης: $B_u = \frac{\pi d^2}{4} f_{sy}$

- Μέγιστη αντίσταση βλήτρου: $D_u \cong 1,3d^2 \sqrt{f_{sy} f_c}$

Οφείλει, να ικανοποιείται η σχέση:

$$\sigma_{SB} + \sigma_{SD} = f_{sy} \rightarrow \left(\frac{B}{B_u}\right) + \left(\frac{D}{D_u}\right)^2 = 1 \quad (45)$$

- Η συνάρτηση αυτή δίνει πρακτικώς τις ίδιες τιμές, τις οποίες δίνει η συνήθως χρησιμοποιούμενη εμπειρική εξίσωση:

$$\left(\frac{B}{B_u}\right)^{3/2} + \left(\frac{D}{D_u}\right)^{3/2} = 1 \quad (46)$$

Εξ άλλου, για να ληφθεί υπόψη και η τυχόν συμπαρομαρτούσα εξωτερική αρχική τάση σ_{sN} των οπλισμών, η συνάρτηση αυτή τροποποιείται:

$$\left(\frac{\sigma_{sB}}{f_{syd}-\sigma_{sN}}\right)^{3/2} + \left(\frac{D}{d^2 \sqrt{f_{cd}(f_{yd}-|\sigma_{sN}|)}}\right)^{3/2} \leq 1, \quad (47)$$

όπου: σ_{sB} = η τάση εξόλκευσης χάλυβα που επιστρατεύεται λόγω της διόγκωσης $w(s)$ κατά την ολίσθηση του σκυροδέματος κατά μήκος της ρωγμής,

$$\sigma_{sN} = \frac{\nu}{\rho + \frac{E_c}{E_s}} \cdot f_c = \text{η τάση χάλυβα λόγω αρχικής θλιπτικής ή εφελκυστικής}$$

αξονικής δύναμης, όπου $E_c = 9500 \cdot f_{cm}^{1/3}$, [MPa] και $\nu = \frac{N}{A_c f_c} \sim$ θετική για εφελκυσμό και αρνητική για θλίψη.

- Ονομάζεται s_{crit} η ολίσθηση για την οποία μοναδίζεται η συνάρτηση αλληλόδρασης. Για $s > s_{crit}$, θα είναι $D(s) = D(s_{crit}/2)$, ενώ η $F(s)$ θα προκύπτει μόνον για σταθερή $\sigma_{cs} = \sigma_{cs}(s_{crit})$, αλλά θα αυξάνεται καθώς αυξάνεται η s . Υπέρ της ασφαλείας, η συνάρτηση αλληλόδρασης ελέγχεται πριν απ' την εξασθένηση των B, D λόγω ανακύκλωσης. Στον Πίνακα 23 συνοψίζεται η εξέλιξη των επιστρατευομένων αντιστάσεων D και τ_{fr} , καθώς αυξάνεται η σχετική ολίσθηση s . Ονομάζεται s_{all} η επιτρεπόμενη μέγιστη ολίσθηση (όπως τυχόν απαιτείται απ' την αποδεκτή στάθμη επιτελεστικότητας).

Σχετική ολίσθηση, s	0	s_{crit}	αύξηση	s_{all}
Συνάρτηση Αλληλόδρασης	0	1	1	1
Αντίσταση βλήτρου, D	0	$D_{s_{crit}/2}$	σταθερή	$D_{s_{crit}/2}$
Τάση σκυροδέματος, σ_{cs}	0	$\sigma_{cs,crit}$	σταθερή	$\sigma_{cs,crit}$
Αντίσταση τριβής, τ_{fr}	0	$\tau(\sigma_{s_{crit}}, s_{crit})$	αύξηση	$\tau(\sigma_{s_{crit}}, s_{all})$
Τάση χάλυβα, σ_{so}	σ_{sN}	$\sigma_{s_{crit}}$	σταθερή	σταθερή

Πίνακας 23. Εξέλιξη των επιστρατευομένων αντιστάσεων D και τ_{fr} ,

καθώς αυξάνεται η σχετική ολίσθηση s (Τάσιος, 2014)

Από τη μέχρι τώρα διερεύνηση του θέματος, η οποία ωστόσο συνεχίζεται, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα. Σημειώνεται, ότι τα συμπεράσματα συμπληρώνονται από τα επιπλέον δεδομένα που προέκυψαν κατά τη συνέχιση της διερεύνησης στα προηγούμενα, η οποία πραγματοποιείται στο ένθετο κείμενο.

- Μέσω εφαρμογής των σχέσεων (21), (22) (βλ. ενότητα 3.2.2.α) που διατυπώνονται στο fib Model Code 2010 και αφορούν στον υπολογισμό της αντίστασης σε διάτμηση τ και της ορθής θλιπτικής τάσης σφήνωσης σ κάθετα σε μια ρηγματωμένη διεπιφάνεια, όταν η μια όψη της ρωγμής υπόκειται σε σχετική ολίσθηση ως προς την άλλη, διερευνήθηκε η επίδραση του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_0 στη διαμόρφωση των τιμών του συντελεστή μ_1 .

Πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές, στις οποίες οι τιμές του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_0 μεταβάλλονταν από 0,1 μέχρι 1,0 mm, ο συντελεστής θραύσης αδρανών τέθηκε $C_f = 1$, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος λήφθηκε $f_c = 30 \text{ MPa}$, και η τιμή της σταθεράς k θεωρήθηκε $k = 2/3$. Στις τρεις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, η τιμή της επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης τ μεταβάλλονταν, και λήφθηκαν οι εξής τρεις διαφορετικές τιμές: $\tau = 4, 7, 10 \text{ MPa}$. Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, διαπιστώθηκε, ότι καθώς αυξάνεται το αρχικό άνοιγμα ρωγμής w_0 , μειώνεται η τιμή του μ_1 , σύμφωνα με μια σχέση που στη γενική της μορφή διατυπώνεται ως εξής:

$$\mu_1 \cong \left(b - a \cdot \frac{w_0}{w_1} \right)$$

όπου: w_1 είναι σταθερά αδιαστασιοποίησης, ίση με 1 mm, και

a, b = σταθερές, οι οποίες για κάθε δοκιμή προέκυψαν:

Δοκιμή 1^η: $\tau = 10 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$, $k = 2/3 \longrightarrow a = 0,14$, $b = 0,64$

Δοκιμή 2^η: $\tau = 7 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$, $k = 2/3 \longrightarrow a = 0,14$, $b = 0,53$

Δοκιμή 3^η: $\tau = 4 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$, $k = 2/3 \longrightarrow a = 0,14$, $b = 0,41$

Από τα αποτελέσματα των ανωτέρω δοκιμών διαπιστώθηκε, ότι για τιμές της επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης γύρω στα $\tau = 7 \text{ MPa}$, οι τιμές του συντελεστή μ_1 προσεγγίζουν έως και ταυτίζονται με την τιμή 0,44. Με τη μείωση των τιμών της τ , παρατηρήθηκε μείωση των τιμών του μ_1 , και για τιμές της επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης γύρω στα $\tau = 4 \text{ MPa}$, οι τιμές του συντελεστή μ_1 προέκυψε, ότι προσεγγίζουν έως και ταυτίζονται με την τιμή 0,33, την οποία λαμβάνει υπόψη η Παλιεράκη (2014) για διεπιφάνειες παλαιού – νέου σκυροδέματος.

- Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση του συντελεστή θραύσης αδρανών C_f στη διαμόρφωση των τιμών του συντελεστή μ_1 , πραγματοποιήθηκε μια δοκιμή στην οποία τέθηκε $C_f = 0,8$ (το 20% των αδρανών θραύεται) και λήφθηκαν $\tau = 10 \text{ MPa}$, $f_c = 30 \text{ MPa}$ και $k = 2/3$. Στην περίπτωση αυτή, διαπιστώθηκε, ότι ο συντελεστής τριβής μ και ο συντελεστής μ_1 , λαμβάνουν ελάχιστα μικρότερες τιμές σε σχέση με την περίπτωση που θεωρήθηκε $C_f = 1$. Μια περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης του συντελεστή θραύσης αδρανών C_f στις τιμές του μ_1 , παρουσιάζεται στο ένθετο κείμενο.
- Όσον αφορά στα αίτια ύπαρξης αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o , παρά την εκ των υστέρων άσκηση θλιπτικής τάσης σ_c σε προεφελκυσμένη ρηγματωμένη διεπιφάνεια, διερευνήθηκαν δύο περιπτώσεις: της άοπλης διατομής και της ωπλισμένης διατομής. Στην περίπτωση της άοπλης διατομής, το εγκλωβισμένο (ολίγον, έστω) υλικό φθοράς εμποδίζει το κλείσιμο της ρωγμής, με αποτέλεσμα να παραμένει αρχικό άνοιγμα w_o . Στην περίπτωση της ωπλισμένης διατομής, η επιβαλλόμενη θλιπτική τάση σ_c δεν είναι ικανή να μηδενίσει το αρχικό άνοιγμα w_1 , και το παραμένον άνοιγμα ρωγμής w_o , στην περίπτωση που δεν έχει προηγηθεί διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα, προέκυψε, ότι υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$w_o = 1,6 \cdot \frac{\sigma_{so}^2}{E_s \cdot f_c} \cdot d_s \cdot \left(0,25 - \frac{\sigma_c}{\rho \cdot \sigma_{so}} \right),$$

όπου: σ_{so} , είναι η εφελκυστική τάση που αναπτύσσεται στη ράβδο οπλισμού διαμέτρου d_s που τέμνει εγκάρσια τη διεπιφάνεια, λόγω δράσης εφελκυστικής δύναμης κάθετα στο επίπεδο ολίσθησης, η οποία προκαλεί άνοιγμα ρωγμής w_1 , και ρ , είναι το γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού της διεπιφάνειας.

Από την ανωτέρω σχέση διαπιστώνεται, ότι ζήτημα είναι, αν για πολύ μικρές τιμές $\sigma_c < 1 \text{ MPa}$, μπορεί να είναι $w_o < 0,2 \text{ mm}$. Όσον αφορά στην περίπτωση που έχει προηγηθεί διαρροή του εφελκυσόμενου χάλυβα, υπάρχει πολύ περιθώριο για μεγάλες τιμές w_o .

- Στο διάγραμμα (Σχήμα 25, σελ. 47) του fib Model Code 2010 παρατηρείται, ότι καθώς το αρχικό άνοιγμα ρωγμής w_o αυξάνεται, απαιτείται μεγαλύτερη ολίσθηση s_o προκειμένου τα χείλη της ρωγμής να έρθουν σε επαφή και να επιστρατευθεί διατμητική αντίσταση λόγω τριβής τ και ορθή θλιπτική τάση σ . Η τάση αύξησης της ολίσθησης s_o με την αύξηση του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o , για την περίπτωση ενεργοποίησης της διατμητικής αντίστασης λόγω τριβής, προέκυψε, ότι διατυπώνεται μέσω της σχέσης:

$$s_o \cong 0,35 \cdot w_o^2 + 0,03$$

Σημειώνεται, ότι η χρήση της ανωτέρω σχέσης, οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα στην περίπτωση που διατίθενται δύο τμήματα σκυροδέματος αμετακίνητα κατακορύφως, όπου απαιτείται σχετική ολίσθηση s_o των όψεων της ρωγμής προκειμένου να έρθουν σε επαφή, με σκοπό την ανάπτυξη διατμητικής αντίστασης λόγω τριβής. Στην παρούσα εργασία όμως, διερευνάται η περίπτωση ρηγματωμένης διεπιφάνειας, στην οποία επιβάλλεται ορθή θλιπτική τάση που μηδενίζει το άνοιγμα ρωγμής, διότι η περίπτωση αυτή συναντάται στην πραγματικότητα στις κατασκευές, όπου τα ρηγματωμένα δομικά στοιχεία υπόκεινται σε εξωτερική φόρτιση, η οποία οδηγεί πρακτικώς σε μηδενισμό του ανοίγματος της ρωγμής, λαμβάνοντας ωστόσο, και όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο συμπέρασμα, σχετικά με την ύπαρξη παραμένοντος ανοίγματος ρωγμής w_o , παρά την εκ των υστέρων άσκηση θλιπτικής τάσης σ_c σε προεφελκυσμένη ρηγματωμένη διεπιφάνεια.

- Μέσω της χρήσης του διαγράμματος (Σχήμα 43, σελ. 89) της έρευνας των Walraven and Reinhardt (1981), διερευνήθηκε η διαμόρφωση των τιμών του μ_1 σε σχέση με τη διάμετρο του μέγιστου αδρανούς D_{max} . Μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις, όπου διαφοροποιούνταν η διάμετρος του μέγιστου αδρανούς, λαμβάνοντας τιμές $D_{max} = 32$ και 16 mm , οι τιμές του αρχικού ανοίγματος ρωγμής w_o μεταβάλλονταν από $0,1$ μέχρι $1,0 \text{ mm}$, η αντοχή του σκυροδέματος λήφθηκε $f_c = 32 \text{ MPa}$ και θεωρήθηκε $k = 2/3$. Ακολούθως, παρουσιάζονται οι σχέσεις $\mu_1 = \mu_1(w_o)$ που προέκυψαν σε κάθε περίπτωση:

Περίπτωση 1^η: $D_{max} = 32 \text{ mm}$, $f_c = 32 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

$$\mu_1 \cong -0,30 \left(\frac{w_o}{w_1} \right) + 0,67 \quad , \quad \text{όπου: } w_1 = 1 \text{ mm}$$

Περίπτωση 2^η: $D_{max} = 16 \text{ mm}$, $f_c = 32 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

$$\mu_1 \cong -0,37 \left(\frac{w_o}{w_1} \right) + 0,60 \quad , \quad \text{όπου: } w_1 = 1 \text{ mm}$$

Από τα αποτελέσματα των ανωτέρω δοκιμών διαπιστώθηκε και εδώ, ότι για τιμές της επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης γύρω στα $\tau = 7 \text{ MPa}$, οι τιμές του συντελεστή μ_1 προσεγγίζουν την τιμή $0,44$, ενώ για τιμές γύρω στα $\tau = 5 \text{ MPa}$, πλησιάζουν την τιμή $0,33$. Επιπλέον, συγκρίνοντας τις τιμές των μ και μ_1 μεταξύ των δύο περιπτώσεων ($D_{max} = 32 \text{ mm}$ και $D_{max} = 16 \text{ mm}$), παρατηρήθηκε, ότι προέκυψαν μικρότερες για τη μικρότερη διάμετρο αδρανούς, το οποίο οφείλεται στο μικρότερο βαθμό τραχύτητας της διεπιφάνειας στην περίπτωση αυτή.

Επιπλέον, μέσω της χρήσης του διαγράμματος (Σχήμα 43) της έρευνας, επιβεβαιώθηκε η έκφραση που αφορά στο μειωτικό συντελεστή του μ_1 σε σχέση με την αδρομέρεια της διεπιφάνειας (χοντρικά τη διάμετρο του μέγιστου αδρανούς, D_{max}): $\sqrt[4]{\frac{D_{max}}{D_o}} \leq 1$, όπου: $D_o = 30 \text{ mm}$. Η επιβεβαίωση της έκφρασης διερευνήθηκε, για $D_{max} = 16 \text{ mm}$, αρχικό άνοιγμα ρωγμής $w_o = 0,2$ έως $0,5 \text{ mm}$ και επιστρατευόμενη διατμητική τάση $\tau = 2$ έως 5 MPa . Μια ορθότερη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε για την επίδραση της διαμέτρου του μέγιστου κόκκου αδρανούς D_{max} στις τιμές του μ_1 , παρουσιάζεται στο ένθετο κείμενο.

- Τελικά, προτείνεται (με πολλές αβεβαιότητες), ότι η τιμή του μ_1 θα εξαρτάται:
 - απ' την αδρομέρεια, χοντρικά απ' το D_{max} αδρανών, και
 - από μια αντιπροσωπευτική τιμή αρχικού ανοίγματος διατμητικής ρωγμής w_o , ωπλισμένης διεπιφάνειας.

Έτσι, λοιπόν, διατυπώνεται η ακόλουθη έκφραση:

$$\mu_1 \cong \left(b - a \cdot \frac{w_o}{w_1} \right) \cdot \sqrt[4]{\frac{D_{max}}{D_o}}$$

όπου: a, b = σταθερές, $w_1 = 1 \text{ mm}$ και $D_o = 30 \text{ mm}$.

Μια περαιτέρω διερεύνηση για τη διατύπωση μιας γενικής έκφρασης του μ_1 , η οποία περιγράφει την εξάρτηση του μ_1 από το αρχικό άνοιγμα ρωγμής w_o , το λόγο της επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης / τη θλιπτική αντοχή σκυροδέματος τ/f_c , και τη διάμετρο του μέγιστου κόκκου αδρανών D_{max} , παρουσιάζεται στο ένθετο κείμενο.

- Με βάση την έρευνα των Lin, Lu and Dong προέκυψε, ότι για τις τραχείες διεπιφάνειες (δημιουργήθηκαν, προκαλώντας ρηγμάτωση σε δοκίμιο σκυροδέματος), οι τιμές του συντελεστή μ_1 πλησιάζουν την τιμή 0,44, ενώ για τις λείες διεπιφάνειες, προκύπτουν σημαντικά μικρότερες απ' αυτή. Επιπλέον, πραγματοποιώντας διερεύνηση της σχέσης $\tau_u = \mu_1 \cdot \sqrt[3]{f_c^2 \cdot \sigma_c}$ για τα δοκίμια με τραχεία διεπιφάνεια, διαπιστώθηκε, ότι οι τιμές της μέγιστης διατμητικής τάσης λόγω τριβής τ_u που προκύπτουν από τη σχέση, προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα πειραματικά αποτελέσματα της έρευνας.
- Η διαμόρφωση των τιμών των μ_1 και k διερευνήθηκε θεωρητικώς για διαφορετικές κατηγορίες και συνθέσεις σκυροδέματος. Πραγματοποιήθηκε διερεύνηση για γωνία τριβής θραυσμένου σκυροδέματος στο εύρος τιμών $\varphi_u = 25 - 30^\circ$, γωνία τριβής ακέραιου σκυροδέματος $\varphi_o = 30 - 40^\circ$ και συντελεστή ασφαλείας $\gamma_o = 1,5 - 2$. Από τη διερεύνηση αυτή, προέκυψε:

Εύρος τιμών του μ_1 : από 0,47 μέχρι 0,58

Εύρος τιμών του k : από 2/7 μέχρι 2/3

- Αξιοποιώντας τα πειραματικά δεδομένα του Σχήματος 7 (σελ. 19), το εύρος τιμών των σταθερών της έκφρασης που περιγράφει την εξέλιξη του ανοίγματος ρωγμής w σε σχέση με την επιβαλλόμενη ολίσθηση s υπό μονοτονική δράση, κυμαίνεται σύμφωνα με τις εξισώσεις:

- $w \cong 0,5 \cdot s^{2/3}$

- $w \cong 0,9 \cdot s^{2/3}$

Επιπλέον, όσον αφορά στην εξέλιξη του ανοίγματος ρωγμής, με βάση την έρευνα των Briseghella and Gori διαπιστώθηκε, ότι καθώς το αρχικό άνοιγμα ρωγμής αυξάνεται, προκύπτουν μεγαλύτερες σχετικές μετακινήσεις των όψεων της ρωγμής παράλληλα και κάθετα στη ρηγματωμένη διεπιφάνεια. Ακόμη, παρατηρήθηκε, ότι όσο μειώνεται το αρχικό άνοιγμα ρωγμής, οι τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή της σχέσης $w = 0,6 \cdot s^{2/3}$, πλησιάζουν περισσότερο τις τιμές του ανοίγματος ρωγμής, που προκύπτουν με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα των συγγραφέων.

- Όσον αφορά στην ολίσθηση μεγίστου της τριβής s_u , από τη βιβλιογραφική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, δεν κατέστη δυνατή η εύρεση περισσότερων αριθμητικών δεδομένων που να αποδεικνύουν την επιρροή των υπό μελέτη παραμέτρων στην ολίσθηση s_u .

- Briseghella L. and Gori R.,
«AGGREGATE INTERLOCK CYCLIC RESPONSE OF R.C. CRITICAL SECTION», *Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, 1984, pp. 501 – 508.
- fib Bulletin No. 65: Model Code 2010 – Final draft, Volume 1, pp. 134 – 135.
- Fronteddu L., Leger P. and Tinawi R. (1998),
«STATIC AND DYNAMIC BEHAVIOR OF CONCRETE LIFT JOINT INTERFACES», *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 124(12), pp. 1418 – 1430.
- Lin F., Lu H. and Dong Y.,
«Component Model for Shear Transfer in Reinforced Concrete», *ACI Journal Manuscript Submission*.
- Walraven J. C. and Reinhardt H. W. (1981),
«THEORY AND EXPERIMENTS ON THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF CRACKS IN PLAIN AND REINFORCED CONCRETE SUBJECTED TO SHEAR LOADING», *HERON*, Vol. 26(1A), pp. 1 – 68.
- Walraven J. (1994),
«ROUGH CRACKS SUBJECTED TO EARTHQUAKE LOADING», *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 120(5), pp. 1510 – 1524.
- Βιντζηλαίου Ε. (1986),
«ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΕΣ ΔΡΑΣΕΙΣ», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κανονισμός Επεμβάσεων σε Κτίρια από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) (2012), Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.), Αθήνα.
- Παλιεράκη Β. (2014),
«ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΩΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΣΕ ΕΠΙΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ/ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΕΜΑΤΟΣ», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Τάσιος Θ. (2006),

«ΘΕΩΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΠΙΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ».

Τάσιος Θ. (2014),

«ΘΕΩΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΠΙΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ».

ΕΝΘΕΤΟ: Περαιτέρω Διερεύνηση, ως Συνέχεια της Ανωτέρω Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης – Διατύπωση Προτάσεων για την Υπολογιστική Διερεύνηση του Θέματος

Στο ένθετο αυτό, αναφέρονται ορισμένα δεδομένα που προέκυψαν από τη συνέχιση της διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε στα προηγούμενα, και διατυπώνονται κάποιες προτάσεις για την υπολογιστική διερεύνηση του θέματος.

✚ Γενίκευση της έκφρασης του μ_1

- Εξάρτηση του μ_1 από το αρχικό άνοιγμα ρωγμής w_o , και το λόγο της επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης / τη θλιπτική αντοχή σκυροδέματος, τ/f_c

Αξιοποιώντας τις σχέσεις (21), (22) (σελ. 46) του fib Model Code 2010, προέκυψαν με τη διαδικασία που αναφέρθηκε στην ενότητα 3.2.2.α, οι εκφράσεις $\mu_1 = \mu_1(w_o)$ θεωρώντας θλιπτική αντοχή σκυροδέματος $f_c = 30 \text{ MPa}$, συντελεστή θραύσης αδρανών $C_f = 1$, τιμή του συντελεστή $k = 2/3$ και τιμές της επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης $\tau = 4, 7, 10 \text{ MPa}$. Οι τιμές του μ_1 που προέκυψαν από τη διερεύνηση αυτή, συγκεντρώνονται στον ακόλουθο Πίνακα A1 και στη συνέχεια, διατυπώνονται οι εκφράσεις $\mu_1 = \mu_1(w_o)$ που προέκυψαν.

Υπολογισμός τιμών του μ_1 , για $f_c = 30 \text{ MPa}$, $C_f = 1$ και $k = 2/3$					
$\tau = 10 \text{ MPa}$		$\tau = 7 \text{ MPa}$		$\tau = 4 \text{ MPa}$	
$w_o \text{ (mm)}$	μ_1	$w_o \text{ (mm)}$	μ_1	$w_o \text{ (mm)}$	μ_1
0,1	0,64	0,1	0,53	0,1	0,41
0,2	0,61	0,2	0,50	0,2	0,38
0,3	0,59	0,3	0,48	0,3	0,36
0,4	0,58	0,4	0,47	0,4	0,35
0,5	0,56	0,5	0,46	0,5	0,33
0,6	0,55	0,6	0,44	0,6	0,32
0,7	0,54	0,7	0,43	0,7	0,31
0,8	0,53	0,8	0,42	0,8	0,30
0,9	0,52	0,9	0,41	0,9	0,29
1,0	0,50	1,0	0,40	1,0	0,28

Πίνακας A1. Υπολογισμός τιμών του μ_1 , για $f_c = 30 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $k = 2/3$ και $\tau = 4, 7, 10 \text{ MPa}$

Δοκιμή 1^η: $\tau = 10 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

$$\mu_1 \cong -0,14 \left(\frac{w_o}{w_1} \right) + 0,64 \quad \text{όπου: } w_1 = 1 \text{ mm} \quad (\alpha 1)$$

Δοκιμή 2^η: $\tau = 7 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

$$\mu_1 \cong -0,14 \left(\frac{w_o}{w_1} \right) + 0,53 \quad \text{όπου: } w_1 = 1 \text{ mm} \quad (\alpha 2)$$

Δοκιμή 3^η: $\tau = 4 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 30 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

$$\mu_1 \cong -0,14 \left(\frac{w_o}{w_1} \right) + 0,41 \quad \text{όπου: } w_1 = 1 \text{ mm} \quad (\alpha 3)$$

Ως συνέχεια της ανωτέρω αναζήτησης, με σκοπό τη διερεύνηση της μεταβολής της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος στις τιμές του μ_1 , πραγματοποιήθηκε μια διερεύνηση όπου μεταβλήθηκε η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε $f_c = 25 \text{ MPa}$ και οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων παρέμειναν σταθερές. Οι τιμές του μ_1 που προέκυψαν στην περίπτωση αυτή, συγκεντρώνονται στον Πίνακα A2 και ακολούθως, διατυπώνονται οι εκφράσεις $\mu_1 = \mu_1(w_o)$.

Υπολογισμός τιμών του μ_1 , για $f_c = 25 \text{ MPa}$, $C_f = 1$ και $k = 2/3$					
$\tau = 10 \text{ MPa}$		$\tau = 7 \text{ MPa}$		$\tau = 4 \text{ MPa}$	
$w_o \text{ (mm)}$	μ_1	$w_o \text{ (mm)}$	μ_1	$w_o \text{ (mm)}$	μ_1
0,1	0,71	0,1	0,58	0,1	0,44
0,2	0,68	0,2	0,55	0,2	0,41
0,3	0,66	0,3	0,53	0,3	0,39
0,4	0,65	0,4	0,52	0,4	0,38
0,5	0,63	0,5	0,51	0,5	0,37
0,6	0,62	0,6	0,50	0,6	0,36
0,7	0,61	0,7	0,49	0,7	0,35
0,8	0,60	0,8	0,48	0,8	0,34
0,9	0,58	0,9	0,46	0,9	0,33
1,0	0,57	1,0	0,45	1,0	0,32

Πίνακας Α2. Υπολογισμός τιμών του μ_1 , για $f_c = 25 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $k = 2/3$
και $\tau = 4, 7, 10 \text{ MPa}$

Δοκιμή 1^η: $\tau = 10 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 25 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

$$\mu_1 \cong -0,15 \left(\frac{w_o}{w_1} \right) + 0,71 \quad \text{όπου: } w_1 = 1 \text{ mm} \quad (\alpha 4)$$

Δοκιμή 2^η: $\tau = 7 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 25 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

$$\mu_1 \cong -0,13 \left(\frac{w_o}{w_1} \right) + 0,58 \quad \text{όπου: } w_1 = 1 \text{ mm} \quad (\alpha 5)$$

Δοκιμή 3^η: $\tau = 4 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 25 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

$$\mu_1 \cong -0,12 \left(\frac{w_o}{w_1} \right) + 0,44 \quad \text{όπου: } w_1 = 1 \text{ mm} \quad (\alpha 6)$$

Επιπλέον, έγινε μια διερεύνηση όπου η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος έλαβε την τιμή $f_c = 20 \text{ MPa}$ και οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων παρέμειναν σταθερές. Οι τιμές του μ_1 που προέκυψαν στην περίπτωση αυτή, συγκεντρώνονται στον Πίνακα Α3 και στη συνέχεια, διατυπώνονται οι εκφράσεις $\mu_1 = \mu_1(w_o)$.

Υπολογισμός τιμών του μ_1 , για $f_c = 20 \text{ MPa}$, $C_f = 1$ και $k = 2/3$					
$\tau = 10 \text{ MPa}$		$\tau = 7 \text{ MPa}$		$\tau = 4 \text{ MPa}$	
$w_o \text{ (mm)}$	μ_1	$w_o \text{ (mm)}$	μ_1	$w_o \text{ (mm)}$	μ_1
0,1	0,82	0,1	0,66	0,1	0,49
0,2	0,78	0,2	0,63	0,2	0,46
0,3	0,76	0,3	0,61	0,3	0,44
0,4	0,74	0,4	0,60	0,4	0,43
0,5	0,73	0,5	0,58	0,5	0,42
0,6	0,72	0,6	0,57	0,6	0,41
0,7	0,70	0,7	0,56	0,7	0,40
0,8	0,69	0,8	0,55	0,8	0,39
0,9	0,68	0,9	0,54	0,9	0,38
1,0	0,66	1,0	0,53	1,0	0,37

Πίνακας Α3. Υπολογισμός τιμών του μ_1 , για $f_c = 20 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $k = 2/3$
και $\tau = 4, 7, 10 \text{ MPa}$

Δοκιμή 1^η: $\tau = 10 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 20 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

$$\mu_1 \cong -0,16 \left(\frac{w_o}{w_1} \right) + 0,81 \quad \text{όπου: } w_1 = 1 \text{ mm} \quad (\alpha 7)$$

Δοκιμή 2^η: $\tau = 7 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 20 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

$$\mu_1 \cong -0,14 \left(\frac{w_o}{w_1} \right) + 0,66 \quad \text{όπου: } w_1 = 1 \text{ mm} \quad (\alpha 8)$$

Δοκιμή 3^η: $\tau = 4 \text{ MPa}$, $C_f = 1$, $f_c = 20 \text{ MPa}$, $k = 2/3$

$$\mu_1 \cong -0,12 \left(\frac{w_o}{w_1} \right) + 0,48 \quad \text{όπου: } w_1 = 1 \text{ mm} \quad (\alpha 9)$$

Από την ανωτέρω διερεύνηση, όπου η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος έλαβε τις τιμές $f_c = 20, 25, 30 \text{ MPa}$, διαπιστώνεται, ότι η μείωση των τιμών της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος f_c , οδηγεί σε αύξηση των τιμών του μ_1 για το ίδιο αρχικό άνοιγμα ρωγμής w_o και την ίδια τιμή επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης τ .

Λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή του αρχικού ανοίγματος ρωγμής, της επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης και της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος στις τιμές του μ_1 , κρίθηκε σκόπιμη η διατύπωση μιας έκφρασης του μ_1 συναρτήσεως των παραμέτρων αυτών. Στα προηγούμενα, είχε διατυπωθεί η σχέση: $\mu_1 \cong \left(b - a \cdot \frac{w_o}{w_1} \right)$, με $a, b =$ σταθερές. Τώρα, επιδιώκεται η έκφραση του b συναρτήσεως του λόγου $\frac{\tau}{f_c}$. Από την ανωτέρω διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε για $f_c = 20, 25, 30 \text{ MPa}$, προέκυψε η ίδια έκφραση εξάρτησης του b από το λόγο $\frac{\tau}{f_c}$. Η σχέση που προτείνεται για την περιγραφή της εξάρτησης του μ_1 από το αρχικό άνοιγμα ρωγμής w_o και το λόγο $\frac{\tau}{f_c}$, με βάση τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε για w_o : από 0,1 μέχρι 1 mm, τ : 4, 7, 10 MPa, f_c : 20, 25, 30 MPa, C_f : 1 και k : 2/3, είναι η ακόλουθη. Σημειώνεται, ότι η έκφραση αυτή προβλέπει τις τιμές του μ_1 που προέκυψαν από την εφαρμογή των σχέσεων (21), (22) (σελ. 46) του fib Model Code 2010, για το ανωτέρω εύρος τιμών των παραμέτρων, με σφάλμα που δεν ξεπερνά το 9%.

$$\mu_1 \cong -\frac{1}{7} \cdot \left(\frac{w_o}{w_1} \right) + \frac{1}{4} \cdot \left(1 + 4,6 \cdot \frac{\tau}{f_c} \right) \quad (\text{σφάλμα μέχρι } 9\%) \quad (\alpha 10)$$

όπου: $w_1 = 1 \text{ mm}$.

- Διερεύνηση της επίδρασης του συντελεστή θραύσης αδρανών C_f στις τιμές του μ_1

Προκειμένου να εξεταστεί η επιρροή του συντελεστή θραύσης αδρανών C_f στις τιμές του μ_1 , πραγματοποιήθηκε διερεύνηση, όπου μεταβλήθηκε η τιμή του συντελεστή θραύσης αδρανών από $C_f = 1$ σε $C_f = 0,7$ (το 30% των αδρανών θραύεται) και $C_f = 0,35$ (το 65% των αδρανών θραύεται), ενώ για τις υπόλοιπες παραμέτρους διατηρήθηκε το ίδιο εύρος τιμών. Ο λόγος των τιμών του μ_1 που προέκυψαν για $C_f = 0,7$ ως προς τις τιμές του μ_1 για $C_f = 1$, υπολογίστηκε κατά μέσο όρο: $\frac{\mu_1(\text{για } C_f: 0,7)}{\mu_1(\text{για } C_f: 1)} = 0,98$, ενώ ο λόγος των τιμών του μ_1 μεταξύ των περιπτώσεων όπου $C_f = 0,35$ και $C_f = 1$, προέκυψε κατά μέσο όρο: $\frac{\mu_1(\text{για } C_f: 0,35)}{\mu_1(\text{για } C_f: 1)} = 0,96$. Με βάση τις τιμές αυτές, δεν κρίνεται σημαντική η επιρροή του συντελεστή θραύσης αδρανών C_f στις τιμές του μ_1 , και επομένως, δεν λαμβάνεται υπόψη ο παράγοντας αυτός στη γενική έκφραση του μ_1 . Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνεται και από τις σχέσεις (21), (22) (σελ. 46) του fib Model Code 2010, διότι όπως παρουσιάζεται ακολούθως, ο συντελεστής τριβής μ προκύπτει ανεξάρτητος του C_f .

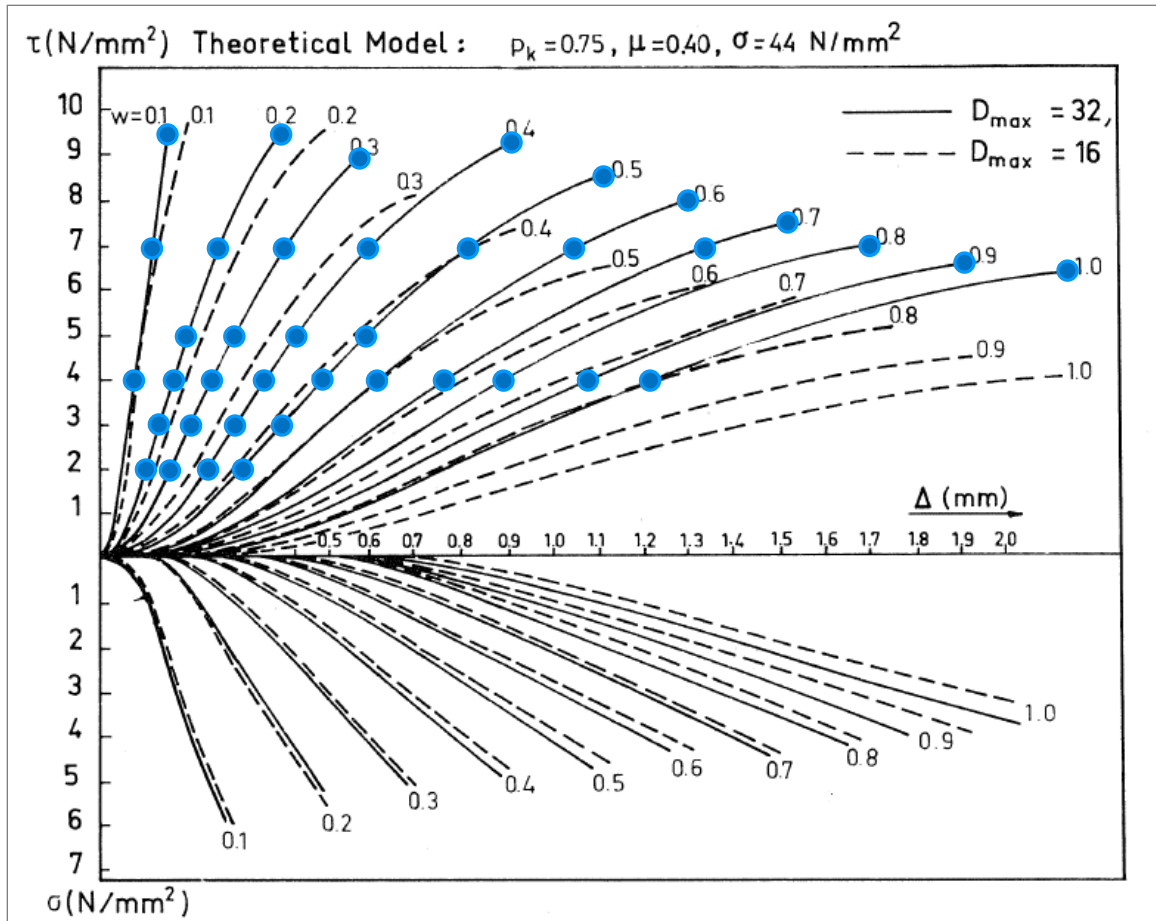
$$\mu = \frac{\tau}{\sigma} = \frac{C_f \{-0,04f_c + [1,8w^{-0,8} + (0,292w^{-0,7} - 0,25)f_c]\delta\}}{C_f \{-0,06f_c + [1,35w^{-0,63} + (0,242w^{-0,55} - 0,19)f_c]\delta\}} = \mu\{f_c, w, \delta\}$$

- Διερεύνηση της επίδρασης της διαμέτρου του μέγιστου αδρανούς D_{max} στις τιμές του μ_1

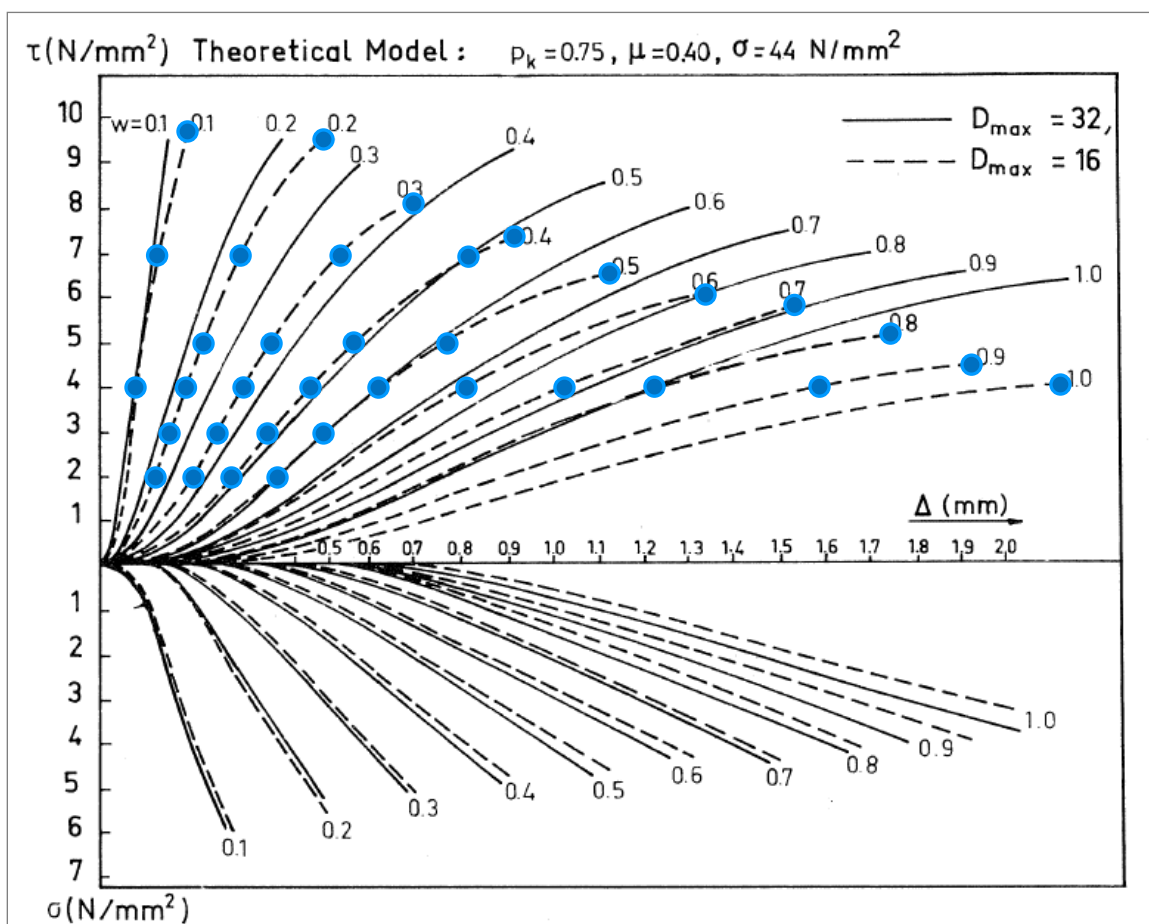
Όσον αφορά στην επίδραση της διαμέτρου του μέγιστου αδρανούς D_{max} στις τιμές του μ_1 , στο υποκεφάλαιο 3.6 παρουσιάστηκε ένας τρόπος προσέγγισης του θέματος. Ωστόσο, εδώ παρουσιάζεται μια ορθότερη διαδικασία για τη συγκεκριμένη αναζήτηση, αξιοποιώντας και εδώ το διάγραμμα (Σχήμα 43) της έρευνας των Walraven and Reinhardt (1981). Στην πειραματική διερεύνηση που πραγματοποίησε ο Walraven, έγινε χρήση δύο διαμέτρων μέγιστου αδρανούς, $D_{max} = 16 \text{ mm}$ και 32 mm , και προέκυψε το συμπέρασμα, ότι η διαφοροποίηση του

μεγέθους του μέγιστου αδρανούς στο εύρος τιμών $16 \text{ mm} \leq D_{max} \leq 32 \text{ mm}$ δεν επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας. Εδώ, παρουσιάζεται μια διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, με σκοπό την αναζήτηση μιας έκφρασης που να περιγράφει την επίδραση της αδρομέρειας της διεπιφάνειας στις τιμές του μ_1 , αξιοποιώντας το διάγραμμα της έρευνας των Walraven and Reinhardt (1981).

Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ένα νέφος σημείων στις καμπύλες του διαγράμματος που αναφέρονται σε $D_{max} = 32 \text{ mm}$ (Σχήμα A1), τα οποία αντιστοιχούν στις μέγιστες τιμές της επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης τ για κάθε άνοιγμα ρωγμής w_o , όπως προκύπτουν από το διάγραμμα, σε τιμές της διατμητικής τάσης $\tau = 4,7 \text{ MPa}$ για κάθε άνοιγμα ρωγμής, καθώς επίσης, επιλέχθηκαν πιο πυκνά σημεία στην περιοχή του διαγράμματος που ορίζεται για αρχικό άνοιγμα ρωγμής από 0,2 – 0,5 mm και επιστρατευόμενη διατμητική τάση από 2 – 5 MPa. Για κάθε σημείο που ορίζεται από μια τιμή διατμητικής τάσης τ και ανοίγματος ρωγμής w_o , προσδιορίστηκε η αντίστοιχη ορθή θλιπτική τάση σ , ο συντελεστής τριβής $\mu = \frac{\tau}{\sigma}$, και τελικά, ο συντελεστής $\mu_1 = \mu \left(\frac{\sigma_c}{f_c} \right)^{2/3}$. Ένα αντίστοιχο νέφος σημείων για τα ίδια δεδομένα, επιλέχθηκε στις καμπύλες που αναφέρονται σε $D_{max} = 16 \text{ mm}$ (Σχήμα A2), απ' όπου προέκυψαν οι τιμές του μ_1 για αυτή την περίπτωση.



Σχήμα Α1. Νέφος σημείων για διάμετρο μέγιστου αδρανούς $D_{max} = 32 mm$.
 Ολιπτική αντοχή σκυροδέματος $f_{cc} = 32 N/mm^2$.



Σχήμα Α2. Νέφος σημείων για διάμετρο μέγιστου αδρανούς $D_{max} = 16 \text{ mm}$.

Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος $f_{cc} = 32 \text{ N/mm}^2$.

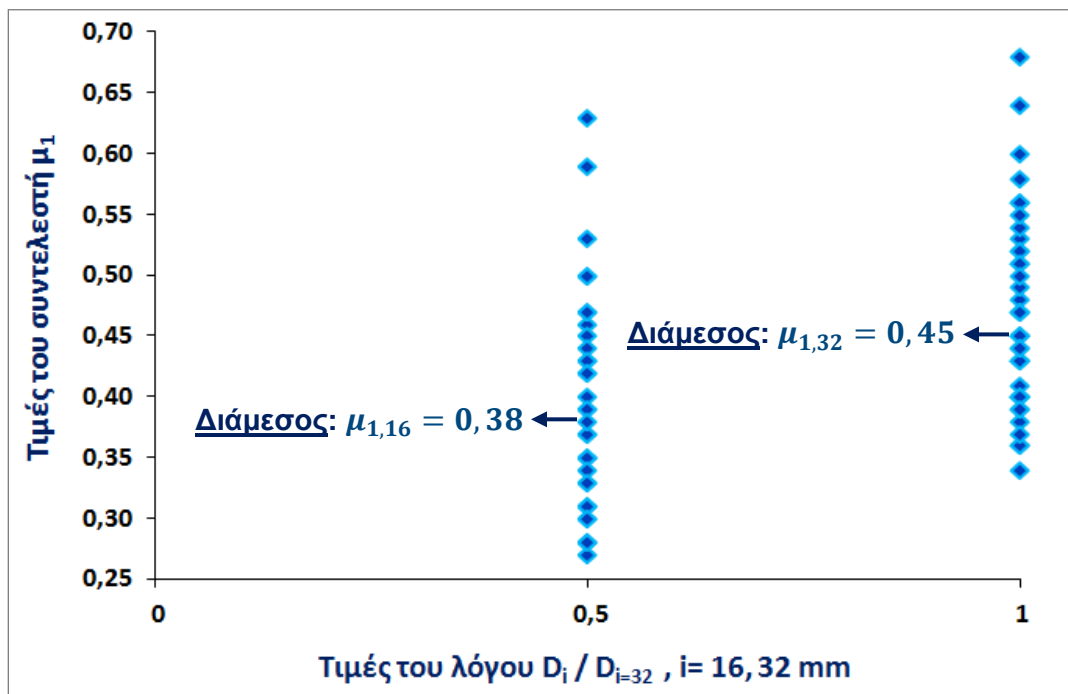
Οι τιμές του συντελεστή μ_1 που προέκυψαν για το νέφος σημείων που αναφέρεται σε $D_{max} = 32 \text{ mm}$ και 16 mm , παρουσιάζονται στον Πίνακα Α4. Οι τιμές του μ_1 τοποθετήθηκαν σε αύξουσα σειρά, έτσι ώστε να προσδιοριστεί η διάμεσος των δύο συνόλων τιμών. Η διάμεσος των τιμών του μ_1 για $D_{max} = 32 \text{ mm}$, προέκυψε $\delta_{D_{max}: 32\text{mm}} = 0,45$, ενώ η διάμεσος των τιμών για $D_{max} = 16 \text{ mm}$, προέκυψε $\delta_{D_{max}: 16\text{mm}} = 0,38$.

	$D_{max} = 32 \text{ mm}$				$D_{max} = 16 \text{ mm}$			
A/A	$w_o(\text{mm})$	$\tau \text{ (MPa)}$	μ_1	μ_1 (αύξου- σα σειρά)	$w_o(\text{mm})$	$\tau \text{ (MPa)}$	μ_1	μ_1 (αύξου- σα σειρά)
1	0,1	9,5	0,68	0,34	0,1	9,7	0,63	0,27
2	0,2	9,5	0,60	0,36	0,2	9,5	0,53	0,28
3	0,3	8,9	0,56	0,36	0,3	8,1	0,46	0,28
4	0,4	9,25	0,53	0,37	0,4	7,4	0,43	0,28
5	0,5	8,6	0,51	0,38	0,5	6,5	0,39	0,30
6	0,6	8,0	0,48	0,39	0,6	6,05	0,37	0,30
7	0,7	7,5	0,45	0,39	0,7	5,8	0,35	0,31
8	0,9	6,6	0,40	0,40	0,8	5,2	0,31	0,31
9	1,0	6,45	0,40	0,40	0,9	4,4	0,28	0,31
10	0,1	4,0	0,52	0,40	0,1	4,0	0,50	0,33
11	0,2	4,0	0,52	0,40	0,2	4,0	0,45	0,33
12	0,3	4,0	0,47	0,41	0,3	4,0	0,40	0,34
13	0,4	4,0	0,45	0,43	0,4	4,0	0,37	0,35
14	0,5	4,0	0,41	0,43	0,5	4,0	0,35	0,35
15	0,6	4,0	0,40	0,43	0,6	4,0	0,33	0,35
16	0,7	4,0	0,39	0,44	0,7	4,0	0,31	0,37
17	0,8	4,0	0,38	0,44	0,8	4,0	0,31	0,37
18	0,9	4,0	0,36	0,45	0,9	4,0	0,28	0,38
19	1,0	4,0	0,36	0,45	1,0	4,0	0,27	0,39
20	0,1	7,0	0,64	0,45	0,1	7,0	0,59	0,39
21	0,2	7,0	0,58	0,47	0,2	7,0	0,50	0,40
22	0,3	7,0	0,54	0,47	0,3	7,0	0,47	0,42
23	0,4	7,0	0,51	0,47	0,4	7,0	0,44	0,42
24	0,5	7,0	0,49	0,48	0,2	2,0	0,43	0,43
25	0,6	7,0	0,47	0,49	0,2	3,0	0,42	0,43
26	0,7	7,0	0,45	0,50	0,2	5,0	0,47	0,44
27	0,8	7,0	0,43	0,51	0,3	2,0	0,30	0,45
28	0,2	2,0	0,43	0,51	0,3	3,0	0,35	0,46
29	0,2	3,0	0,56	0,52	0,3	5,0	0,42	0,47

30	0,2	5,0	0,55	0,52	0,4	2,0	0,30	0,47
31	0,3	2,0	0,43	0,53	0,4	3,0	0,34	0,50
32	0,3	3,0	0,44	0,54	0,4	5,0	0,39	0,50
33	0,3	5,0	0,50	0,55	0,5	2,0	0,28	0,53
34	0,4	2,0	0,37	0,56	0,5	3,0	0,33	0,59
35	0,4	3,0	0,40	0,56	0,5	5,0	0,38	0,63
36	0,4	5,0	0,47	0,58				
37	0,5	2,0	0,34	0,60				
38	0,5	3,0	0,39	0,64				
39	0,5	5,0	0,44	0,68				

Πίνακας Α4. Οι τιμές του συντελεστή μ_1 που προέκυψαν για το νέφος σημείων που αφορά σε $D_{max} = 32 \text{ mm}$ και 16 mm

Τα δύο σύνολα τιμών του μ_1 για $D_{max} = 32 \text{ mm}$ και 16 mm , απεικονίζονται και στο Σχήμα Α3. Το εύρος τιμών του μ_1 για $D_{max} = 32 \text{ mm}$ κυμαίνεται από 0,34 μέχρι 0,68, ενώ το εύρος τιμών για $D_{max} = 16 \text{ mm}$, κυμαίνεται από 0,27 μέχρι 0,63.



Σχήμα Α3. Σύνολα τιμών του μ_1 , για $D_{max} = 32 \text{ mm}$ και 16 mm

Με βάση τη διάμεσο των δύο συνόλων τιμών του μ_1 , ο μειωτικός συντελεστής του μ_1 για $D_{max} = 16 \text{ mm}$ σε σχέση με την τιμή του μ_1 για $D_{max} = 32 \text{ mm}$, υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{\mu_{1,16}}{\mu_{1,32}} = \left(\frac{16}{32}\right)^{\nu} \Rightarrow \ln\left(\frac{\mu_{1,16}}{\mu_{1,32}}\right) = \ln\left(\frac{16}{32}\right)^{\nu} \Rightarrow$$

$$\nu = \frac{\ln\left(\frac{\mu_{1,16}}{\mu_{1,32}}\right)}{\ln\left(\frac{16}{32}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{0,38}{0,45}\right)}{\ln\left(\frac{16}{32}\right)} = 0,244 = \frac{1}{4} \Rightarrow$$

$$\boxed{\mu_{1,16} = \mu_{1,32} \cdot \sqrt[4]{\frac{16}{32}}} \quad (\alpha 11)$$

Η ανωτέρω σχέση επιβεβαιώνεται, λαμβάνοντας τη μέση τιμή των τιμών του μ_1 που προέκυψαν για w_o από 0,2 – 0,5 mm και επιστρατευόμενη διατμητική τάση τ από 2 – 5 MPa. Η μέση τιμή των τιμών του μ_1 σε αυτό το εύρος, για $D_{max} = 32 \text{ mm}$ προέκυψε $\mu_{D_{max}: 32mm} = 0,448$, ενώ η μέση τιμή για $D_{max} = 16 \text{ mm}$ προέκυψε $\mu_{D_{max}: 16mm} = 0,374$. Με βάση τις τιμές αυτές, ο συντελεστής ν προκύπτει και εδώ, $\nu = 0,260 = \frac{1}{4}$.

Επομένως, τελικά, με βάση τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε για w_o : από 0,1 μέχρι 1 mm, τ : 4, 7, 10 MPa, f_c : 20, 25, 30 MPa, k : 2/3, και λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή της διαμέτρου του μέγιστου αδρανούς D_{max} στις τιμές του μ_1 , διατυπώνεται η ακόλουθη γενική έκφραση του συντελεστή μ_1 . Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί, ότι η επιρροή του D_{max} είναι μικρή στη γενική έκφραση του μ_1 , διότι η έκφραση του μ_1 συναρτήσει του w_o και του λόγου τ/f_c , προέρχεται από την εφαρμογή των σχέσεων (21), (22) (σελ. 46) του fib Model Code 2010, οι οποίες βασίζονται στην έρευνα του Walraven, σύμφωνα με τον οποίο, οι σχέσεις είναι κατάλληλες για το εύρος τιμών $16 \text{ mm} \leq D_{max} \leq 32 \text{ mm}$ και η επιρροή του μεγέθους του μέγιστου αδρανούς σε αυτό το εύρος τιμών, δεν επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας.

$$\boxed{\mu_1 \cong \left[-\frac{1}{7} \cdot \left(\frac{w_o}{w_1}\right) + \frac{1}{4} \cdot \left(1 + 4,6 \cdot \frac{\tau}{f_c}\right) \right] \cdot \sqrt[4]{\frac{D_{max}}{D_o}}} \quad (\alpha 12)$$

όπου: $w_1 = 1 \text{ mm}$ και $D_o = 32 \text{ mm}$.

✚ Διατύπωση προτάσεων για την υπολογιστική διερεύνηση του θέματος

Στην υπολογιστική διερεύνηση του θέματος, θα γίνει χρήση του αλγορίθμου που είχε δημιουργήσει η κ. Βασιλοπούλου στην ερευνητική εργασία που πραγματοποίησε με τον κ. Τάσιο (Tassios T., Vassilopoulou I.: «Shear transfer capacity along a R.C. crack, under cyclic sliding», 2002), η οποία κατέληξε στη δημιουργία απλοποιητικών κανόνων για τον υπολογισμό της μέγιστης επιστρατευόμενης διατμητικής αντίστασης σε ρηγματωμένη διεπιφάνεια Ω.Σ. που υποβάλλεται σε μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Θα ληφθούν υπόψη τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση στην παρούσα εργασία και στη συνέχεια ο αλγόριθμος θα εφαρμοσθεί, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σε θέματα για περαιτέρω διερεύνηση. Ορισμένες προτάσεις για διερεύνηση, διατυπώνονται ακολούθως:

→ Μία πρόταση εξέλιξης της παρούσας εργασίας μέσω της υπολογιστικής διερεύνησης είναι, να ληφθούν υπόψη διαφορετικά είδη διεπιφάνειας θέτοντας διάφορες τιμές σε ορισμένες παραμέτρους που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας, και να υπολογιστούν για κάθε είδος διεπιφάνειας οι τιμές των συντελεστών συμμετοχής της μέγιστης αντίστασης βλήτρου β_d και της μέγιστης αντίστασης τριβής β_f στη μέγιστη διατμητική αντίσταση της διεπιφάνειας. Η πρόταση αυτή ευνοείται από το ότι υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα από τη Δ.Δ. της κ. Παλιεράκη (2014), και επομένως, θα είναι δυνατός ο έλεγχος της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από την υπολογιστική διερεύνηση.

→ Ένα άλλο θέμα που προτείνεται να διερευνηθεί, αφορά στην περίπτωση όπου ασκείται εφελκυστική αντί για θλιπτική δύναμη κάθετα στη διεπιφάνεια. Κάποιες παρατηρήσεις που έγιναν όσον αφορά στο θέμα αυτό, στην περίπτωση ρηγματωμένης διεπιφάνειας, είναι:

- Εάν ήδη υπάρχει ένα αρχικό άνοιγμα ρωγμής w_o και η εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση στη διεπιφάνεια είναι εφελκυστική και όχι θλιπτική, τότε:

- Εάν $\sigma_c = \rho\sigma_{so} >$ εξωτερικά επιβαλλόμενης εφελκυστικής τάσης



Αναπτύσσεται διατμητική αντίσταση λόγω τριβής, με ορθή θλιπτική τάση κάθετα στη διεπιφάνεια ίση με: $\sigma_c = \rho\sigma_{so}$ — εξωτερικά επιβαλλόμενη εφελκυστική τάση.

- Εάν $\sigma_c = \rho\sigma_{so} <$ εξωτερικά επιβαλλόμενης εφελκυστικής τάσης



Δεν είναι δυνατόν να έρθουν οι όψεις της ρωγμής σ' επαφή και να αναπτυχθεί διατμητική αντίσταση λόγω τριβής, και επομένως, η συνολική διατμητική αντίσταση της διεπιφάνειας προέρχεται μόνο από τη δράση βλήτρου.

- Επιπλέον, στην περίπτωση που η εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση είναι εφελκυστική και όχι θλιπτική, η συνάρτηση αλληλόδρασης μοναδίζεται γρηγορότερα (για μικρότερη τιμή ολίσθησης), δηλαδή ο χάλυβας διαρρέει γρηγορότερα.