

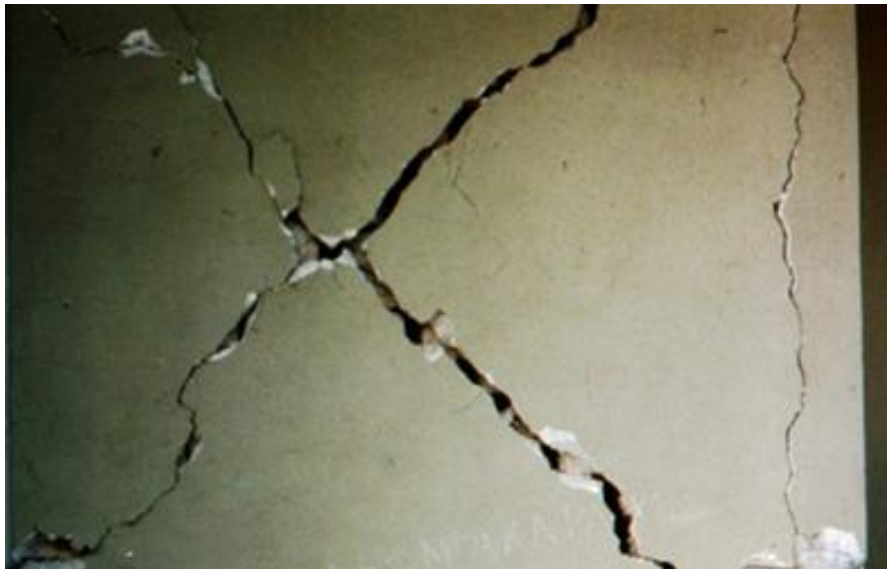


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Συμβολή στη διερεύνηση της εξασθένησης των μηχανισμών αντίστασης σε τέμνουσα υπό ανακυκλιζόμενη ένταση μετά τη διαρροή(με έμφαση στην αντίσταση V_{cd} σκυροδέματος)

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Παππά Χαρίκλεια

Επιβλέπων καθηγητής: Θ.Π.Τάσιος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013

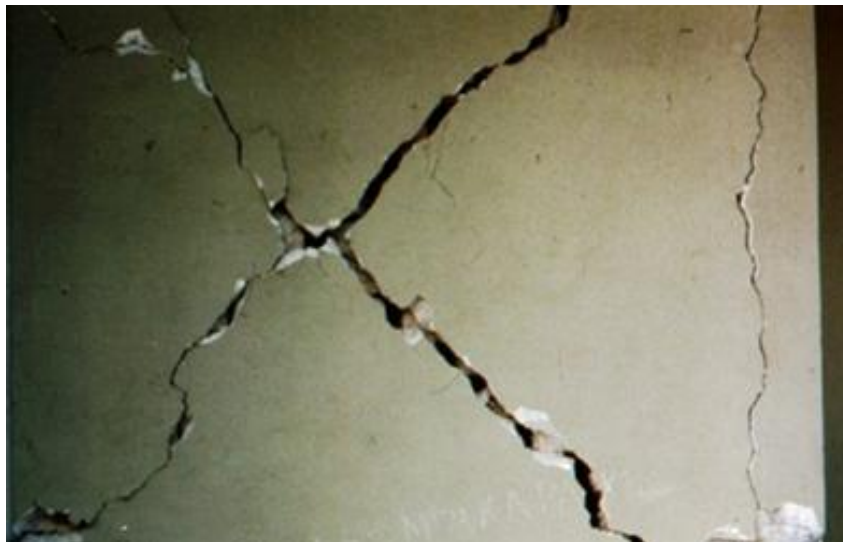


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Συμβολή στη διερεύνηση της εξασθένησης των μηχανισμών αντίστασης σε τέμνουσα υπό ανακυκλιζόμενη ένταση μετά τη διαρροή (με έμφαση στην αντίσταση V_{cd} σκυροδέματος)

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Παππά Χαρίκλεια

Επιβλέπων καθηγητής: Θ.Π.Τάσιος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013

ΠΑΠΠΑ ΧΑΡΙΚΛΕΙΑ

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Δ.Μ.Π.Σ. ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

© 2013 – All rights reserved

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου κύριο Θ.Π.Τάσιο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για την υποστήριξη που μου παρείχε.

Επίσης ευχαριστώ πολύ την κυρία Μαρίνα Μωρέττη για τις πολύτιμες συμβουλές της, την αμέριστη βοήθεια και την συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Οφείλω τέλος να ευχαριστήσω τους φίλους και τους συγγενείς που με στήριξαν και βοήθησαν για τη διεκπεραίωση της εργασίας.

Στη μητέρα μου Μαρίνα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μηχανισμοί που συμμετέχουν στην ανάληψη τέμνουσας εξασθενούν υπό την επιρροή της ανακυκλιζόμενης έντασης. Ο ρυθμός εξασθένησης είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό των μηχανισμών ανάληψης τέμνουσας στην καμπτική διαρροή. Ως αποτέλεσμα η τελική αντοχή σε τέμνουσα είναι μικρότερη από εκείνη που αντιστοιχεί στην καμπτική διαρροή. Ως εκ τούτου επέρχεται διατμητική, άρα ψαθυρή αστοχία υπό την ανακύκλιση πλαστικών παραμορφώσεων. Η ανάγκη μελέτης των μηχανισμών είναι επιτακτική. Αφού αναλυθεί η θεωρία του J. C. Walraven για την τέμνουσα δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή, επιλέγονται τρία δοκίμια από την διδακτορική διατριβή του Δ.Μπισκίνη και εφαρμόζεται η ανωτέρω θεωρία. Αθροιζόμενη με την τέμνουσα που αναλαμβάνεται από τον μηχανισμό της αξονικής δύναμης, γίνεται σύγκριση με τον Ευρωκώδικα 2, Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3 και τον Αμερικάνικο Κανονισμό, ACI. Αναπτύσσονται προσομοιώματα για τη λειτουργία των λοιπών μηχανισμών ανάληψης τέμνουσας και γίνονται αριθμητικές εφαρμογές στα τρία δοκίμια. Μελετάται η συμπεριφορά των μηχανισμών υπό ανακυκλική φόρτιση και εξάγονται συμπεράσματα για τον τρόπο εξασθένησής τους. Τέλος γίνεται επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων που χρησιμοποίησε ο Δ.Μπισκίνης και εξάγονται διαγράμματα για τη μεταβολή κάθε μηχανισμού συναρτήσει επιλεγμένων παραγόντων.

ABSTRACT

The mechanisms involved in taking shear, weaken under the influence of cyclic tension. The rate of decay is greater than the rate of the mechanisms transferring shear in flexural yield. As a result the final shear strength is less than that corresponding to the flexural yield. Therefore occurs brittle shear failure under the recycling of plastic deformation. The need to study the mechanisms is imperative. After analyzing the theory of J. C. Walraven for the shear forces in aggregates, there were selected three columns of doctoral thesis of D.Mpiskinis and the above theory was applied. After summing the results with the shear force tranfered from the mechanism of axial force, the results are compared to Eurocode 2, Eurocode 8 - Part 3 and regulations of ACI. There were ddeveloped analytical models for the operation of the other mechanisms for transferring shear force and numerical applications were made on the three columns. It was examined the behavior of the mechanisms under cyclic loading and were deduced drawing conclusions about how they weaken. Finally the experiment data used by D.Mpiskinis were edited and diagrams were exported for how each mechanism is altered in relation to the selected factors.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT.....	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1. ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΤΕΜΝΟΥΣΑ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΕΝΤΑΣΗ.....	16
2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ.....	23
2.1. Συμβολή σκυροδέματος στην αντίσταση σε τέμνουσα.....	23
2.1.1 Η δύναμη εμπλοκής αδρανών.....	24
2.1.2 Μηχανισμός τόξου.....	80
2.1.3 Διαμήκης σπλισμός ρ_{tot}	82
2.1.3.1 Μηχανισμός οιονεί βλήτρου του θλιβόμενου σπλισμού.....	82
2.1.3.2 Μηχανισμός βλήτρου του εφελκόμενου σπλισμού.....	85
2.1.3.3 Συμβολή του εφελκόμενου σπλισμού στη μείωση του ανοίγματος της ρωγμής 94	
2.2 Συνολική τιμή τέμνουσας που αναλαμβάνεται από το σκυρόδεμα.....	106
2.3 Συμβολή του σπλισμού διάτμησης στην ανάληψη τέμνουσας.....	107
2.4 Συμβολή του αξονικού φορτίου στην ανάληψη τέμνουσας.....	109
3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ.....	113
3.1 Αποτελέσματα V_c σύμφωνα με Ευρωκώδικα 8 –Μέρος 3.....	113
3.2 Αποτελέσματα Ευρωκώδικα 2 (EC2).....	114
3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τον Αμερικάνικο κανονισμό σκυροδέματος (ACI)(παράγραφος 11.2.1.2).....	118
4 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ ΣΕ ΜΕΛΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	124
4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν το άνοιγμα της διατμητικής ρωγμής, w	125
5 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΝΑΚΥΚΛΙΣΗ.....	130
5.1 Τα αδρανή.....	131
5.2 Ο σπλισμός κορμού.....	135
5.3 Η δράση βλήτρου του εφελκόμενου σπλισμού.....	137
6 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ Δ. ΜΠΙΣΚΙΝΗ.....	139
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	144
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	147

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό ότι η ανακύκλιση της έντασης προκαλεί σταδιακή υποβάθμιση των μηχανισμών που επιστρατεύονται για την ανάληψη της τέμνουσας. Είναι επιτακτικό η αστοχία σε τέμνουσα να μην προηγείται της αστοχίας σε κάμψη. Δηλαδή θα πρέπει η αντοχή σε τέμνουσα να είναι μεγαλύτερη από την τέμνουσα που αντιστοιχεί στην καμπτική διαρροή.

$$V_R > V_{Mu} \quad (1)$$

Όπου $V_{Mu} = M_u \cdot a_0$

M_u η ροπή διαρροής

a_0 το μήκος διάτμησης

Κατά τη διάρκεια της ανακυκλιζόμενης έντασης αμφότεροι οι μηχανισμοί που συνιστούν την V_R και την V_{Mu} εξασθενούν. Όμως οι μηχανισμοί που συμβάλουν στην ανάληψη τέμνουσας εξασθενούν ταχύτερα από αυτούς στην καμπτική διαρροή. Αποτέλεσμα αυτού είναι να υπάρχει η πιθανότητα κατά τη διάρκεια της ανακύκλισης να προκύψει πρόωρη διατμητική αστοχία, ενώ τη στιγμή της αστοχίας η ροπή καμπτικής αντοχής να είναι μικρότερη από εκείνη που αναμενόταν.

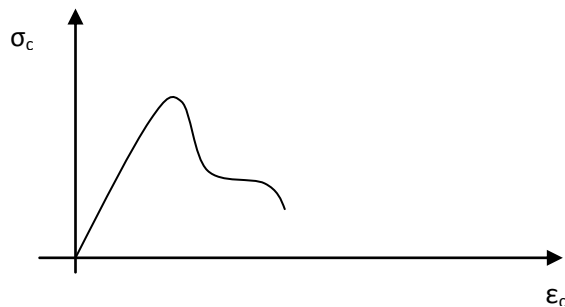
Η διατμητική αστοχία είναι ψαθυρή. Χαρακτηρίζεται από εντοπισμένη ρηγμάτωση (μια - δύο ρωγμές μεγάλου εύρους και μικρό βέλος). Η αστοχία αυτή είναι ανεπιθύμητη διότι:

- ❖ Δεν εμφανίζονται αρκετές ενδείξεις της επερχόμενης κατάστασης του φορέα και
- ❖ Δεν υπάρχει αρκετό χρονικό περιθώριο για την αποφόρτιση του φορέα ώστε να αποφευχθεί η κατάρρευση.

Η διατμητική αστοχία εμφανίζεται με τη μορφή :

- ❖ Λοξής σύνθλιψης του σκυροδέματος λόγω ανεπάρκειας του λοξού θλιπτήρα του φορέα (περίπτωση φορέων με ανεπαρκές πλάτος) ή
- ❖ Μεμονωμένης λοξής ρωγμής με διακριτά χείλη, λόγω ανεπάρκειας του λοξού ή εγκάρσιου ελκυστήρα του φορέα (συνδετήρας).

Η περίπτωση της σύνθλιψης του σκυροδέματος είναι σαφώς ψαθυρή αστοχία, καθώς η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε θλίψη είναι, όπως φαίνεται από το διάγραμμα $[\sigma_c - \epsilon_c]$ ψαθυρή.



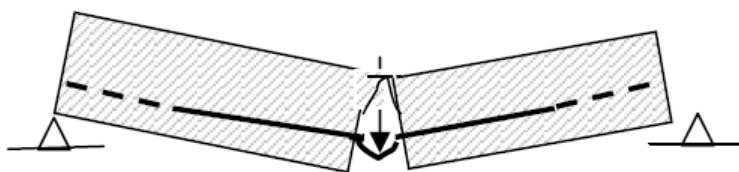
Σχήμα 1 Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων σκυροδέματος

Η δεύτερη περίπτωση αστοχίας λόγω της διακριτής λοξής ρηγμάτωσης θα αναμένετε να είναι πιο πλαστική, καθώς η παρουσία των εγκάρσιων ελκυστήρων του οπλισμού (συνδετήρων) παρεμποδίζει την ανεξέλεγκτη εξέλιξη της ρηγμάτωσης. Εν τούτοις, και αυτή η περίπτωση αστοχίας είναι ψαθυρή γιατί οι διατμητικές ρωγμές:

- 1) Συναντούν τον διαμήκη εφελκόμενο οπλισμό σε θέση κοντά στην αγκύρωσή του και καταστρέφοντας τη συνάφεια οπλισμού – σκυροδέματος στη θέση αυτή, οδηγούν σε καταστροφή της αγκύρωσης του διαμήκους εφελκόμενου οπλισμού.

Προϋπόθεση για την παραμόρφωση και ένταση ενός φορέα είναι η μετακίνησή του να είναι παρεμποδιζόμενη. Ομοίως, προϋπόθεση για την παραμόρφωση και ένταση των ράβδων του χάλυβα είναι η επιμήκυσή τους να είναι παρεμποδιζόμενη. Οι ράβδοι του χάλυβα παραμορφώνονται και εντείνονται μόνο αν στηρίζονται σε κάποια θέση τους, δηλαδή αν είναι αγκυρωμένες στο σκυρόδεμα.

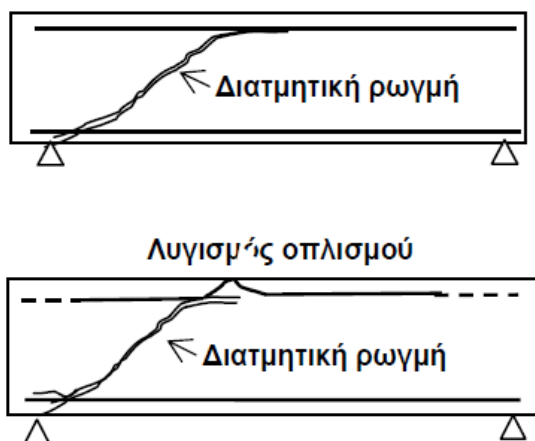
Όπως μία δοκός αν υποχωρήσουν οι στηρίξεις της απλά κατέρχεται χωρίς να παραμορφώνεται και, κατά συνέπεια, χωρίς να εντείνεται, έτσι και μια ράβδος χάλυβα αν δεν είναι αγκυρωμένη απλά ολισθαίνει χωρίς να εντείνεται και ο φορέας παραμένει άοπλος και αστοχεί ακαριαία.



Σχήμα 2 Αστοχία αγκύρωσης

Γι' αυτό αστοχία αγκύρωσης των ράβδων του οπλισμού λόγω ελλειπούς μήκους αγκύρωσής τους, είτε λόγω κακής επαφής τους με το σκυρόδεμα (π.χ. κακή συμπύκνωση του σκυροδέματος), οδηγεί σε κατάρρευση του φορέα.

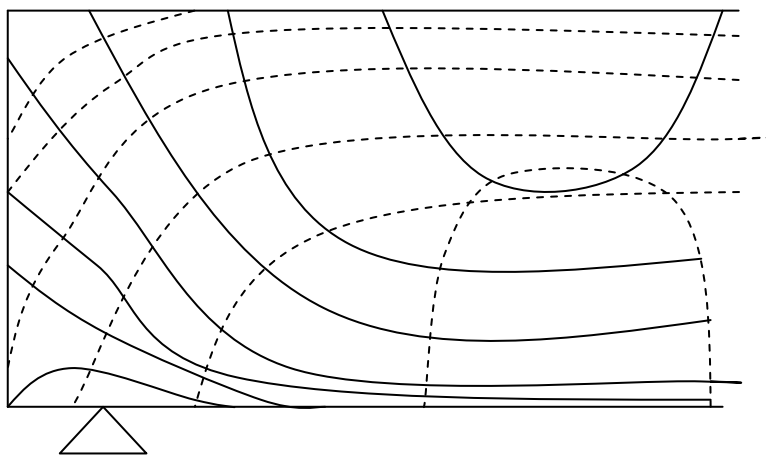
- 2) Συναντούν τον διαμήκη θλιβόμενο οπλισμό σε θέση κοντά στη μέγιστη καμπτική επιπόνηση και καταστρέφοντας τοπικά τη συνάφεια του θλιβόμενου οπλισμού, οδηγούν, σε πρόωρο λυγισμό του με αποτέλεσμα εκτίναξη του σκυροδέματος της επικάλυψης, αποδιοργάνωση του διαμήκους θλιπτήρα και απότομη αστοχία.



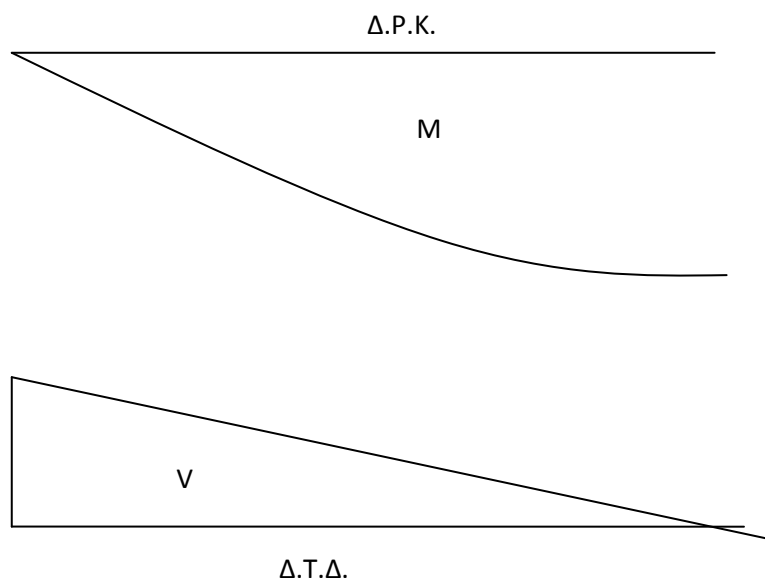
Σχήμα 3 Διατμητική αστοχία

Λόγω της ταχείας εξέλιξης της διατμητικής αστοχίας, η διατμητική ρηγμάτωση εμφανίζεται στο ένα μόνο διατμητικό μήκος του φορέα (κι αν είναι ίδια η τιμή της τέμνουσας και άρα και η ένταση των λοξών ράβδων και στα δύο διατμητικά μήκη).

Οι λοξές ρωγμές εμφανίζονται στην αρχή ενδιάμεσα του ύψους στις θέσεις με την μέγιστη διατμητική τάση (για δοκό ορθογωνικής διατομής στον μέσον του ύψους) και με κλίση προς τις στηρίξεις. Με την αύξηση της επιπόνησης προεκτείνονται προς τα πέλματα του φορέα διευρυνόμενες προς το εφελκούμενο πέλμα λόγω της ελκτικής δράσης του διαμήκους ελκυστήρα και κλείνοντας προς το θλιβόμενο πέλμα λόγω της συμπιεστικής δράσης του διαμήκους θλιπτήρα. Περί την περιοχή των μέγιστων ροπών η διεύθυνση των ρωγμών είναι κάθετη προς το εφελκούμενο πέλμα, σε αρκετά πυκνές αποστάσεις. Περί την περιοχή των στηριγμάτων όμως οι ρωγμές κλίνουν υπό γωνία ως προς το εφελκούμενο πέλμα με κατεύθυνση από τα άκρα προς το μέσον της δοκού. Αιτία γι' αυτή την αλλαγή της πορείας των ρωγμών στην περιοχή των στηριγμάτων είναι η δράση της τέμνουσας. Κοντά στα στηρίγματα οι μεν εφελκυστικές τάσεις λόγω ροπών εξασθενούν βαθμιαίως (αντίστοιχα με τη μείωση των καμπτικών ροπών), αυξάνονται όμως οι διατμητικές τάσεις αντίστοιχα με την τέμνουσα. Έτσι, περί τα στηρίγματα, οι κύριες εφελκυστικές τάσεις δεν είναι πια οριζόντιες όπως στην μεσαία διατομή αλλά κλίνουν υπό γωνία ϕ ως προς το εφελκούμενο πέλμα. Κατά συνέπεια οι αντίστοιχες ρωγμές (κάθετες προς τις εφελκυστικές τάσεις) θα κλίνουν υπό γωνία $90^\circ - \phi$.

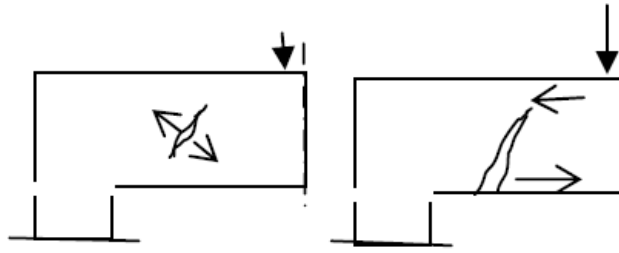


----- σ_{II} =θλιπτικές τάσεις
 ——— σ_I =εφελκυστικές τάσεις



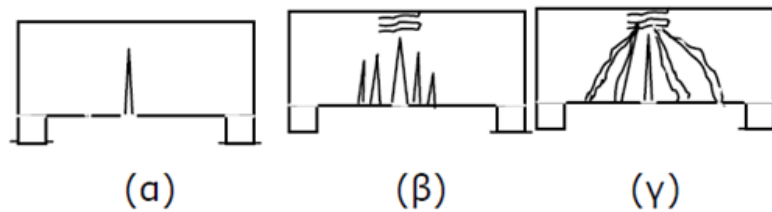
Σχήμα 4 Κύριες τάσεις στην περίπτωση ομογενούς μη ρηγματωμένου υλικού

Γι' αυτό οι ρωγμές αυτές, όπως και οι καμπτικές, στα ανοίγματα των φορέων είναι ανοικτές προς τα κάτω και στην περιοχή των στηρίξεων ανοικτές προς τα άνω. Η εξέλιξη των διατμητικών ρωγμών είναι πολύ γρήγορη, η διατμητική αστοχία είναι ιδιαίτερα ψαθυρή. Συνήθως η διατμητική ρωγμάτωση εμφανίζεται σε μια μόνον από τις κρίσιμες διατομές κι αν επιπονούνται όλες με την ίδια δρώσα τέμνουσα. Η πρώτη ρωγμή που θα εμφανιστεί σε μια από τις κρίσιμες διατομές θα εξελιχθεί τόσο γρήγορα και θα φθάσει σε αστοχία και δεν θα επιτρέψει να εμφανιστούν άλλες ρωγμές στις υπόλοιπες κρίσιμες θέσεις.



Σχήμα 5 Εξέλιξη διαμητικών ρωγμών

Η καμπτική αστοχία είναι επιθυμητό να προηγείται της διαμητικής καθώς είναι εν γένει πλάστιμη.



α) Καμπτική ρηγμάτωση β) Καμπτική αστοχία γ) Καμπτοδιαμητική αστοχία

Σχήμα 6

Οι καμπτικές ρωγμές δεν οδηγούν σε αστοχία της αγκύρωσης του διαμήκου εφελκόμενου οπλισμού, γιατί δεν τον συναντούν σε θέση κοντά στην αγκύρωσή του. Η ράβδος του οπλισμού εκτείνεται σημαντικά πέραν από τη θέση της καμπτικής ρηγμάτωσης, τουλάχιστον κατά το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης. Επίσης δεν συναντούν το θλιβόμενο οπλισμό και δεν οδηγούν σε πρόωρο λυγισμό του.

Λόγω της βραδύτερης, πιο παρατεταμένης εξέλιξης της καμπτικής αστοχίας των φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα, ο φορέας μπορεί να αστοχήσει σε περισσότερες από μία κρίσιμες θέσεις, εμφανίζοντας περισσότερες από μία καμπτικές ρωγμές σε κάθε θέση.

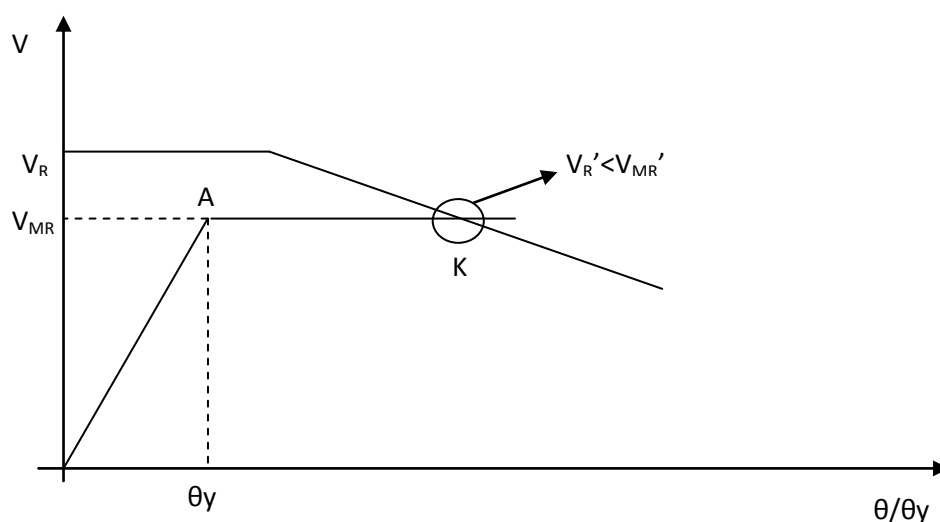
Στην περίπτωση της ταυτόχρονης καμπτικής και διαμητικής αστοχίας, δηλαδή στην περίπτωση καμπτοδιαμητικής αστοχίας, αποφεύγονται οι δυσμενείς παρενέργειες του λυγισμού του θλιβόμενου οπλισμού και της ολίσθησης του εφελκόμενου οπλισμού. Οι λοξές ρωγμές εμφανίζονται στην περιοχή του φορέα μεταξύ της μέγιστης τέμνουσας και της μέγιστης ροπής.

Οι λοξές ρωγμές, λόγω των σημαντικών καμπτικών εφελκυστικών τάσεων στη θέση του διαμήκου ελκυστήρα, πλησιάζοντας στο εφελκόμενο πέλμα του φορέα κατακορυφώνονται με αποτέλεσμα να μην συναντούν τον διαμήκη εφελκόμενο οπλισμό κοντά στην αγκύρωσή του και να αποφεύγεται η ολίσθησή του και η ψαθυρότητα που

συνεπάγεται. Η αστοχία είναι πιο παρατεταμμένη και γι' αυτό εμφανίζονται περισσότερες από μία λοξές, καμπτοδιατμητικές ρωγμές.

Η μείωση της διατμητικής αντοχής με την ανακυκλιζόμενη ένταση αφορά κυρίως μέλη οπλισμένου σκυροδέματος τα οποία αναπτύσσουν πλαστικές αρθρώσεις με καμπτική διαρροή του οπλισμού πριν εξαντληθεί η διατμητική τους αντοχή. Γι' αυτό το λόγο το φαινόμενο εκφράζεται ποσοτικά ως μείωση της διατμητικής αντοχής με ανακύκλιση πλαστικών παραμορφώσεων μέχρι η διατμητική αντοχή του μέλους V_R μειωθεί κάτω από την τιμή της τέμνουσας που αντιστοιχεί στην καμπτική διαρροή V_{Mu} .

Παρουσιάζεται το παρακάτω διάγραμμα στο οποίο φαίνεται η πορεία της αντοχής σε τέμνουσα και της τέμνουσας στην καμπτική διαρροή καθώς οι παραμορφώσεις αυξάνονται.



Πορεία της αντοχής σε τέμνουσα και της τέμνουσας στην καμπτική διαρροή

Σχήμα 7

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται πως αρχικά η αντοχή σε τέμνουσα ήταν μεγαλύτερη από την τέμνουσα που αντιστοιχεί στην καμπτική διαρροή. Κατά τη διάρκεια της ανακύκλισης και ενώ η γωνία στροφής μεγαλώνει έχουμε εξασθένηση της αντοχής σε τέμνουσα υπό επιβαλλόμενες μετελαστικές ανακυκλιζόμενες παραμορφώσεις και αφού επέλθει η καμπτική αστοχία (σημείο A) παρατηρούμε ότι μετά το σημείο K η τελική αντοχή σε τέμνουσα είναι μικρότερη από την τέμνουσα στην καμπτική αστοχία. Συνέπεια αυτού είναι το δομικό στοιχείο να αστοχεί ψαθυρά έστω και μετά από κάποιες μεγάλες παραμορφώσεις.

Γίνεται λοιπόν φανερή η ανάγκη για την μελέτη των συνθηκών εξασθένησης της αντοχής σε τέμνουσα, V_R υπό ανακυκλιζόμενες συνθήκες μετά τη διαρροή. Προς τούτο όμως είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε καλύτερα τους μηχανισμούς που συμβάλουν στην αντίσταση τέμνουσας. Μόνο όταν τους γνωρίζουμε επαρκώς, μπορούμε να παρακολουθήσουμε την εξέλιξη κάθε μηχανισμού για μεγάλες επιβαλλόμενες παραμορφώσεις (δείκτης τοπικής πλαστικότητας σε όρους μετακινήσεων μ_Δ) και μάλιστα υπό ανακυκλιζόμενες συνθήκες.

Γι' αυτό θεωρήσαμε απαραίτητο να ξεκινήσουμε από την επαναδιερεύνηση της 'φύσης' της συμβολής του σκυροδέματος στην ανάληψη τέμνουσας, δηλαδή της V_{cd} .

Αντιθέτως ο μηχανισμός της αντίστασης V_w των συνδετήρων είναι πολύ σαφέστερος και μπορεί ευχερέστερα να μελετηθεί υπό ανακυκλιζόμενη ένταση.

1. ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΤΕΜΝΟΥΣΑ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΕΝΤΑΣΗ

Έχουν γίνει προσπάθειες εύρεσης προσομοιώματος για την διατμητική αντοχή μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Πρώτος ο Priestley και οι συνεργάτες του (Kowalsky & Priestley 2000), ακολουθεί ο Moehle και οι συνεργάτες του (Moehle κ.α. 2001) και τελευταίος ο Δ.Ε.Μπισκίνης και οι συνεργάτες του.

Τα τρία ανωτέρω προσομοιώματα λαμβάνουν ως ξεχωριστό μηχανισμό τη συνεισφορά του οπλισμού κορμού V_w σύμφωνα με το ισοδύναμο δικτύωμα των Ritter-Mörsch, καθώς και χωριστή τη συνεισφορά του σκυροδέματος V_c . Η ομάδα του Priestley και ο Δ. Μπισκίνης θεωρούν ως ξεχωριστό μηχανισμό τη συνεισφορά του αξονικού θλιπτικού φορτίου, όπως αναφέρεται και στο CEB/FIP Model Code 90.

Οι προσπάθειες καθιέρωσης προσομοιώματος εκφράζεται από:

- Τους Kowalsky and Priestley (2000) ως "Revised UCSD model" για κυκλικά υποστυλώματα (μονάδες: MN, m):

$$V_R = \sqrt{f_c} \cdot k(\mu_\Delta) \cdot \min \left[1,5 ; \max \left(1 ; 3 - \frac{L_s}{h} \right) \right] \cdot \min(1; 0,5 + 20 \cdot \rho_{tot}) \cdot (0,8 \cdot A_c) + N \cdot \frac{h-x}{2 \cdot L_s} + V_w \quad (2)$$

Στην παραπάνω εξίσωση ο πρώτος όρος αφορά τη συνεισφορά του σκυροδέματος, ο δεύτερος όρος την συνεισφορά του αξονικού φορτίου και ο τρίτος τη συνεισφορά του οπλισμού κορμού. Ακόμη ρ_{tot} είναι το συνολικό ποσοστό του διαμήκους οπλισμού, $A_c = \pi D_c^2 / 4$ είναι η επιφάνεια του σκυροδέματος, όπου D_c είναι η διάμετρος του πυρήνα διατομής εντός των συνδετήρων, h είναι το ύψος της διατομής που είναι ίσο με τη διάμετρο D για κυκλικές διατομές, N είναι το αξονικό φορτίο που είναι θετικό για θλίψη, x είναι το ύψος της θλιβόμενης ζώνης και όπου L_s είναι το μήκος διάτμησης. Η παραπάνω σχέση ισχύει και για ορθογωνικά υποστυλώματα με αντικατάσταση του όρου $0,8 \cdot A_c$ με $b_w \cdot d$.

Η συνεισφορά του σκυροδέματος εξαρτάται, όπως φαίνεται, από τον συντελεστή $k(\mu_\Delta)$ που εκφράζει την μείωση της διατμητικής αντοχής λόγω ανακύκλισης συναρτήσει του δείκτη πλαστιμότητας και είναι ίσος με:

$$k(\mu_\Delta) = \frac{1,07 - 0,115 \cdot \mu_\Delta}{3}, \quad 0,05 \leq k(\mu_\Delta) \leq 0,28 \quad (3)$$

Όσον αφορά τη συνεισφορά του εγκάρσιου οπλισμού, για ορθογωνικές διατομές προκύπτει:

$$V_w = \rho_w \cdot b_w \cdot (d - x) \cdot f_{yw} \cdot \cot \theta \quad (4)$$

όπου $0,8 A_c$ ισούται με $b_w d$ (b_w : πλάτος διατομής, d : στατικό ύψος), για ορθογωνικές διατομές και ρ_w το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού.

και

$$V_w = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yw} \cdot (D - c - x) \cdot \cot \theta \quad (5)$$

όπου A_{sw} είναι το εμβαδόν της διατομής ενός κυκλικού συνδετήρα, s η απόσταση μεταξύ διαδοχικών συνδετήρων και c η επικάλυψη του σπλισμού, για κυκλικές διατομές. Η κλίση των θλιπτήρων του ισοδύναμου δικτύωματος λαμβάνεται ίση με $\theta=30^\circ$.

- Των Moehle et al 2001 που αναπτύχθηκε για ορθογωνικές διατομές.

$$V_R = k(\mu_\Delta) \cdot (V_w + V_c) , V_c = 0,5 \cdot \sqrt{f_c} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{N}{0,5 \cdot \sqrt{f_c} \cdot A_c}} \right) \cdot A_c \cdot \frac{d}{L_s} \quad (6)$$

$$0,7 \leq k(\mu_\Delta) \leq 1,0 , k(\mu_\Delta) = 1,15 - 0,075 \cdot \mu_\Delta \quad (7)$$

Μονάδες: MN, m; $A_c=bw \cdot h$: εμβαδόν διατομής

Παρατηρείται πως στην τελευταία σχέση η συνεισφορά του αξονικού φορτίου συμπεριλαμβάνεται στην συνεισφορά του σκυροδέματος σε αντίθεση με την πρώτη σχέση όπου αποτελεί ξεχωριστό μηχανισμό. Ακόμη παρατηρείται πως θεωρείται ότι η συνεισφορά του σκυροδέματος V_c και των συνδετήρων V_w επηρεάζονται το ίδιο από την μείωση της διατμητικής αντοχής λόγω ανακύκλισης, αφού πολλαπλασιάζονται με τον ίδιο συντελεστή $k(\mu_\Delta)$.

Όσον αφορά τη συνεισφορά του εγκάρσιου σπλισμού, V_w , λαμβάνεται σύμφωνα με την εξίσωση για ορθογωνικές διατομές με την διαφορά ότι στην θέση του όρου $(d-x)$ λαμβάνεται ο μοχλοβραχίονας $z=0.9d$ και η κλίση των θλιπτήρων θ λαμβάνεται $\theta=45^\circ$ (όπως και στο κλασικό προσομοίωμα δικτύωματος των Ritter-Mörsch).

$$V_w = \rho_w \cdot b_w \cdot z \cdot f_{yw} \cdot \cot \theta \quad (8)$$

Για υποστυλώματα κυκλικής διατομής ο όρος V_w λαμβάνεται σύμφωνα με την εξίσωση για κυκλικές διατομές αλλά με $\theta = 45^\circ$ και αντί για $(D-c-x)$ με $(D-2c)$.

$$V_w = \frac{\pi \cdot A_{sw}}{2 \cdot s} \cdot f_{yw} \cdot (D-2c) \cdot \cot \theta \quad (9)$$

- τον Δ.Ε.Μπισκίνη

Περιλαμβάνει δύο προσομοιώματα για την μείωση της διατμητικής αντοχής.

1ο προσομοίωμα:

$$V_R = \frac{h-x}{2 \cdot L_s} \cdot \min(N; 0,55 \cdot A_c \cdot f_c) + 0,16 \cdot [1 - 0,085 \cdot \min(5; \mu_\Delta^{pl})] \cdot \max(0,5; 100 \rho_{tot}) \cdot [1 - 0,16 \min(5; \frac{L_s}{h})] \cdot \sqrt{f_c} \cdot A_c + V_w \quad (10)$$

σε MN

Συνάδει με την μορφή του προσομοιώματος των Kowalsky & Priestley 2000 ως προς το ότι μόνον ο όρος V_c λαμβάνεται μειούμενος με την ανακύκλιση των πλαστικών παραμορφώσεων.

2ο προσομοίωμα:

$$V_R = \frac{h-x}{2 \cdot L_s} \cdot \min(N; 0,55 \cdot A_c \cdot f_c) + [1 - 0,055 \cdot \min(5; \mu_{\Delta}^{pl})] \cdot [0,16 \cdot \max(0,5; 100\rho_{tot}) \cdot [1 - 0,16 \cdot \min(5; \frac{L_s}{h})]] \cdot \sqrt{f_c} \cdot A_c + V_w \quad (11)$$

σε MN και m

Συνάδει με την μορφή του προσομοιώματος των Moehle et al 2001, υπό την έννοια ότι τόσο ο όρος V_c όσο και ο V_w μειώνονται σταδιακά και με τον ίδιο ρυθμό με την ανακύκλιση. Σημειώνεται πως και τα δύο ανωτέρω προσομοιώματα εκφράζονται συναρτήσει του δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων $\mu_{\Delta}^{pl} = \mu_{\Delta} - 1$, που υπολογίζεται από το λόγο του πλαστικού μέρους της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία (συνολική γωνία μείον γωνία στην διαρροή) προς την υπολογιζόμενη γωνία στροφής στην διαρροή θ_y σύμφωνα με τα παρακάτω.

Για μέλη ορθογωνικής διατομής η τιμή του θ_y υπολογίζεται κατά Panagiotakos & Fardis 2001:

$$\theta_y = \varphi_y \cdot \frac{L_s}{3} + 0,0025 + \frac{0,25 \cdot \varepsilon_y \cdot d_b \cdot f_y}{(d-d') \cdot \sqrt{f_c}} \quad (12)$$

Στην παραπάνω σχέση ο 1ος και 2ος όρος αφορούν την καμπτική και τη διατμητική παραμόρφωση αντίστοιχα και ο 3^{ος} όρος την ολίσθηση των ράβδων διαμήκουσ οπλισμού από την περιοχή αγκύρωσής τους. φ_y είναι η καμπυλότητα διαρροής, όπως υπολογίζεται θεωρητικά, f_y και f_c (σε MPa) οι αντοχές του χάλυβα και του σκυροδέματος αντίστοιχα, d_b η διάμετρος του εφελκούμενου οπλισμού και d, d' το στατικό ύψος του εφελκούμενου και του θλιβόμενου οπλισμού αντίστοιχα. Η σχέση που διατύπωσε ο Δ. Μπισκίνης και οι συνεργάτες του έχει προσαρμοστεί σε πάνω από 200 αποτελέσματα μελών ΟΣ ορθογωνικής διατομής.

Για υποστυλώματα κυκλικής διατομής χρησιμοποιείται μια παρόμοια σχέση με αυτή, με τον 2^ο όρο της διατμητικής παραμόρφωσης να λαμβάνεται ίσος με 0.001 και αντικατάσταση του $\varepsilon_y / (d-d')$ στον 3^ο όρο με φ_y (Biskinis et al, 2002).

Δύο είναι οι λόγοι που χρησιμοποιείται η υπολογιζόμενη τιμή του θ_y και όχι η πειραματική:

α) στην εφαρμογή των προσομοιωμάτων στην πράξη η ακριβής τιμή του θ_y δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων και πρέπει να υπολογισθεί κατά κάποιο τρόπο, και

β) για να εξαλειφθούν προβλήματα από πειραματικές μετρήσεις με ερωτηματικά (π.χ. στα 24 πειράματα των Ang et al 1985 και 1989, η ευκαμψία της βάσης των δοκιμών αύξησε την μετρούμενη γωνία στροφής χορδής στην διαρροή αλλά πιστεύεται ότι δεν επηρέασε τις πλαστικές παραμορφώσεις του μέλους).

Η συνεισφορά της αξονικής θλίψης N στην διατμητική αντοχή λαμβάνεται και στα δύο προσομοιώματα όπως στην εξίσωση των Kowalsky and Priestley καθότι η φυσική σημασία της είναι σαφής. Αξονικός εφελκυσμός θεωρείται ότι δεν έχει επιρροή στη διατμητική αντοχή.

Η συνεισφορά του εγκάρσιου οπλισμού λαμβάνεται για μεν τα μέλη ορθογωνικής διατομής κατά την εξίσωση για ορθογωνική διατομή με την διαφορά ότι αντί του όρου $(d-x)$

λαμβάνεται ο μοχλοβραχίονας $z \approx d-d' \approx 0.9d$, ενώ για μέλη κυκλικής διατομής λαμβάνεται σύμφωνα με την εξίσωση για κυκλική διατομή αλλά αντί του όρου $(D-c-x)$ λαμβάνεται ο $(D-2c)$.

Όσον αφορά την κλίση των διαγώνιων θλιπτήρων, λαμβάνεται $\theta = 45^\circ$, όπως στο κλασικό προσομοίωμα δικτύωματος των Ritter-Mörsch.

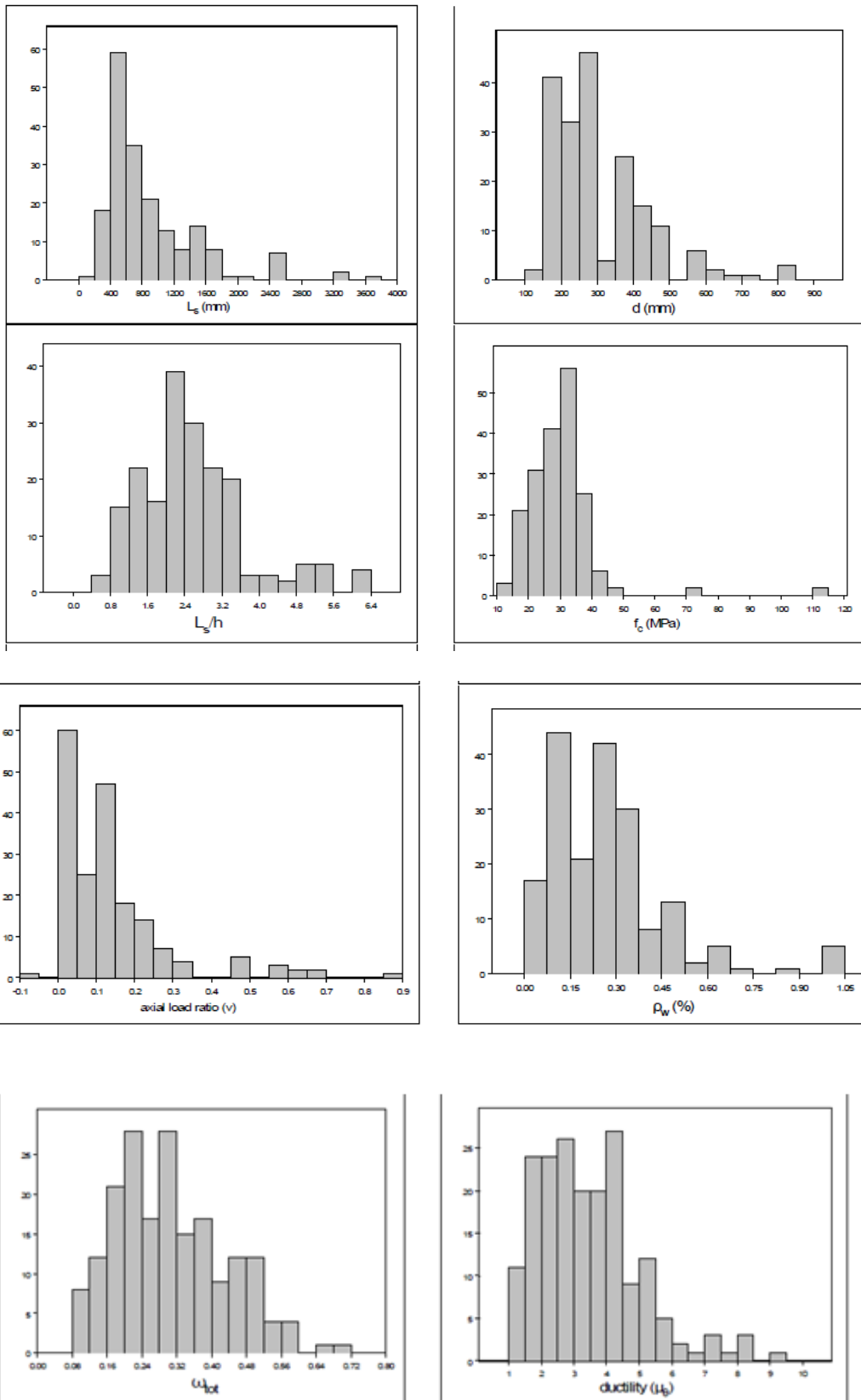
Το προσομοίωμα που έχει επικρατήσει και βρίσκεται στον Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3 είναι του Δ. Μπισκίνη. Ο τελευταίος προσπάθησε να συγκεντρώσει και να καταγράψει πειράματα που έχουν γίνει και να καλύπτουν όσο το δυνατόν περισσότερες κατηγορίες μελών. Τα περισσότερα αφορούσαν δοκούς και υποστυλώματα τα οποία είχαν αστοχήσει καμπτικά. Βρέθηκαν όμως πολλά πειράματα τα οποία αφορούσαν την ανακυκλιζόμενη φόρτιση με διατμητική αστοχία λόγω διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού. Η βάση πειραματικών δεδομένων περιλαμβάνει τα εξής δοκίμια:

- 185 δοκούς και υποστυλώματα ορθογωνικής διατομής,
- 68 μέλη κυκλικής διατομής,
- 8 τοιχώματα ορθογωνικής διατομής, και
- 24 μέλη κοίλης ορθογωνικής διατομής (ή μέλη με παρόμοια διατομή, πχ I, T, H).

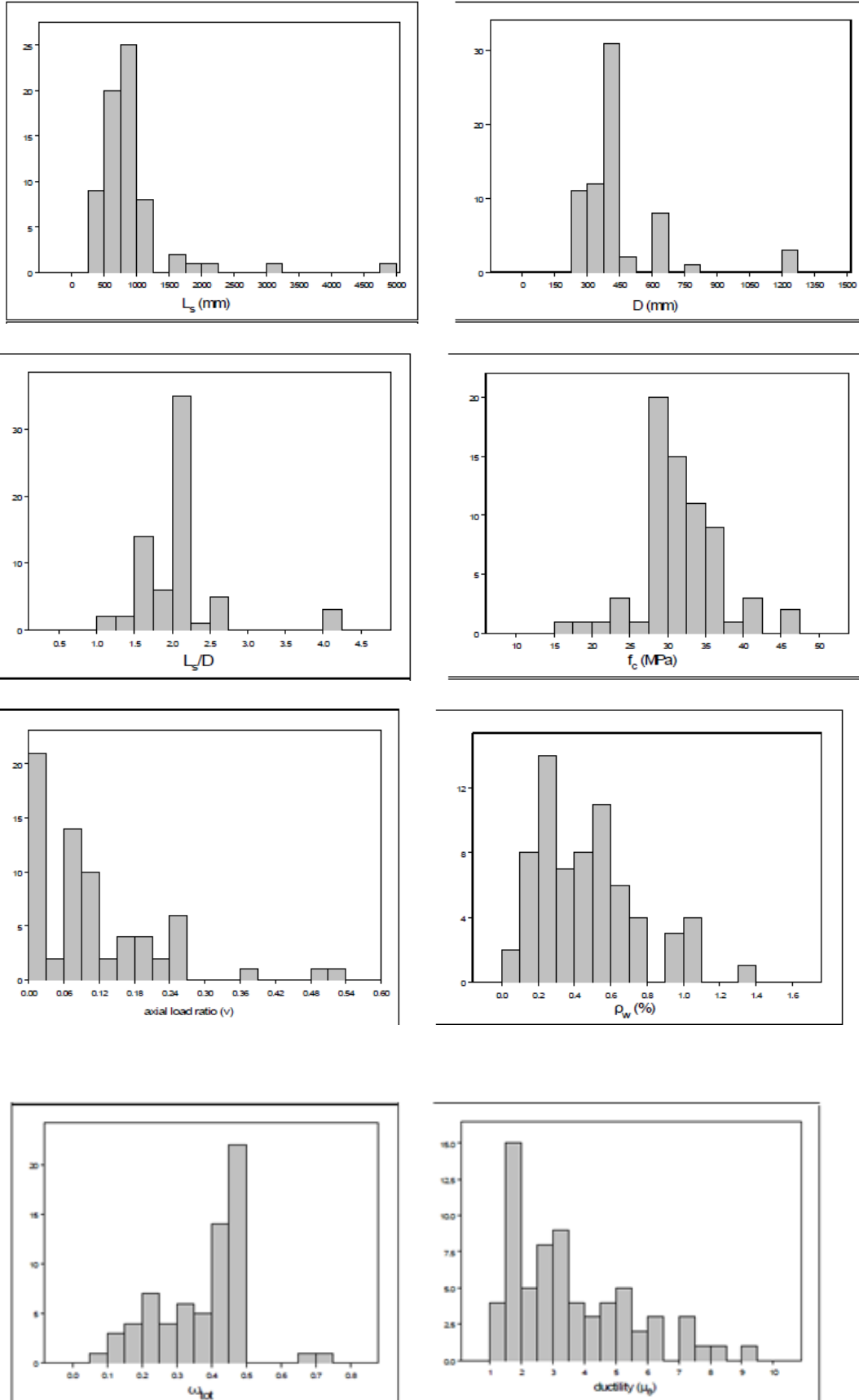
Σε όλα τα πειράματα προηγήθηκε καμπτική διαρροή πριν την διατμητική αστοχία.

Ακολούθως δίνονται ιστογράμματα της κατανομής του πλήθους των μελών ορθογωνικής, Σχήμα 1.1, και κυκλικής, Σχήμα 1.2, διατομής ως προς τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Μήκος διάτμησης, L_s ,
- Στατικό ύψος, d ,
- Διάμετρος διατομής (κυκλικές διατομές), D ,
- Λόγος διάτμησης, L_s/h ,
- Αντοχή σκυροδέματος, f_c ,
- Ανηγμένο αξονικό φορτίο, $v=N/Acfc$,
- Γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού, ρ_w ,
- Μηχανικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού, ω_{tot} ,
- Πειραματική τιμή δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων (ή γωνιών στροφής χορδής), $\mu\theta$

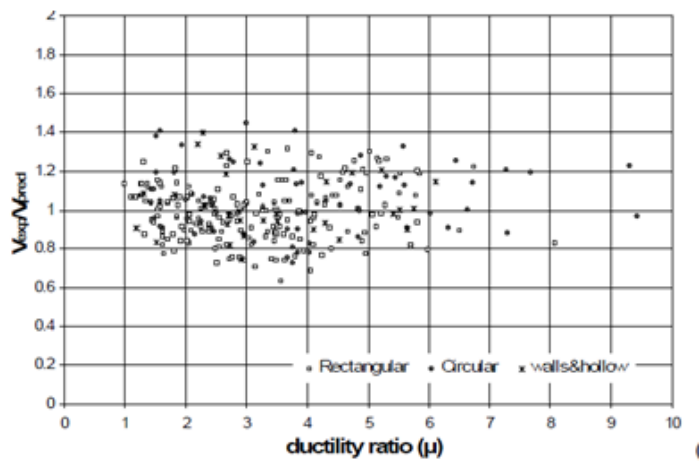
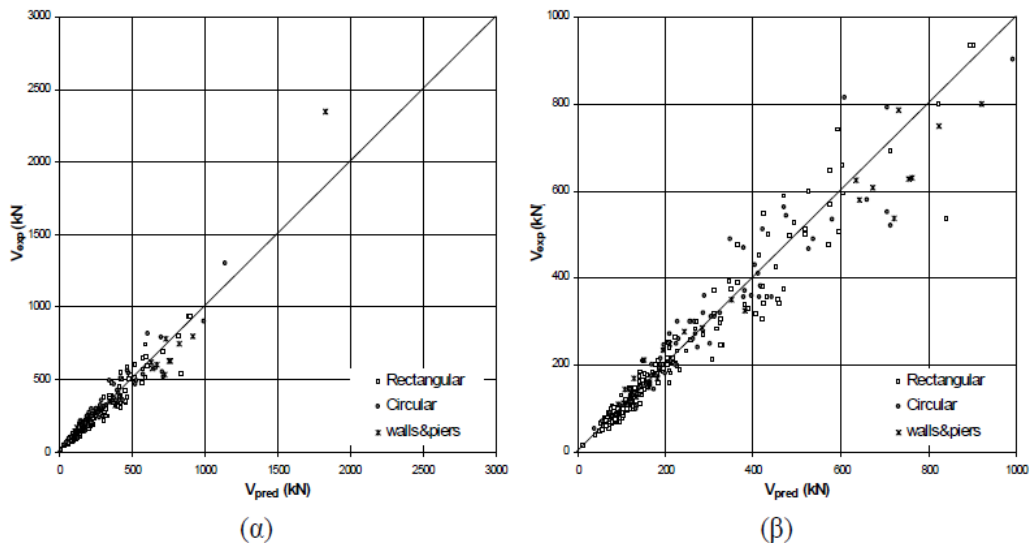


Σχήμα 1.1 Ιστογράμματα βασικών χαρακτηριστικών δοκών και υποστυλωμάτων ορθογωνικής διατομής με διαμετρική αστοχία λόγω διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού



Σχήμα 1.2 Ιστογράμματα βασικών χαρακτηριστικών μελών κυκλικής διατομής με διαμητική αστοχία λόγω διαρροής του εγκάρσιου σπλισμού

Παρουσιάζεται παρακάτω η σύγκριση των αποτελεσμάτων όπως προκύπτουν από τα προσομοιώματα του Δ.Μπισκίνη και των πειραματικών αποτελεσμάτων. Παρατηρείται πως υπάρχει καλή συσχέτιση.



Σχήμα 1.3 Σύγκριση προβλεπόμενων τιμών από το προσομοίωμα του Δ.Μπισκίνη και των πειραματικών τιμών

2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ

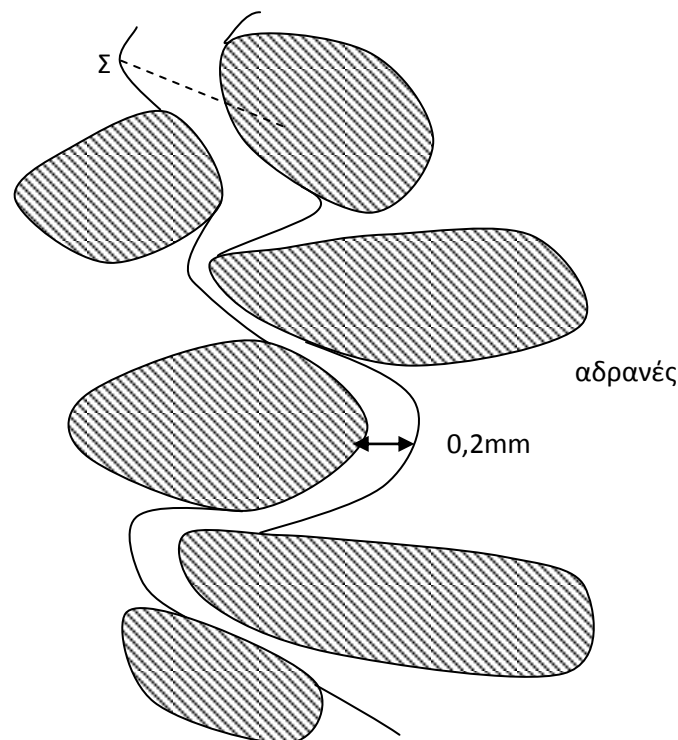
2.1. Συμβολή σκυροδέματος στην αντίσταση σε τέμνουσα

Η συμβολή του σκυροδέματος στην ανάληψη τέμνουσας εκφράζεται από επιμέρους μηχανισμούς οι οποίοι είναι οι εξής:

- α) εμπλοκή αδρανών
- β) διατμητικές τάσεις της θλιβόμενης ζώνης σκυροδέματος = μηχανισμός τόξου
- γ) διαμήκης σπλισμός ρ_{tot}

2.1.1 Η δύναμη εμπλοκής αδρανών

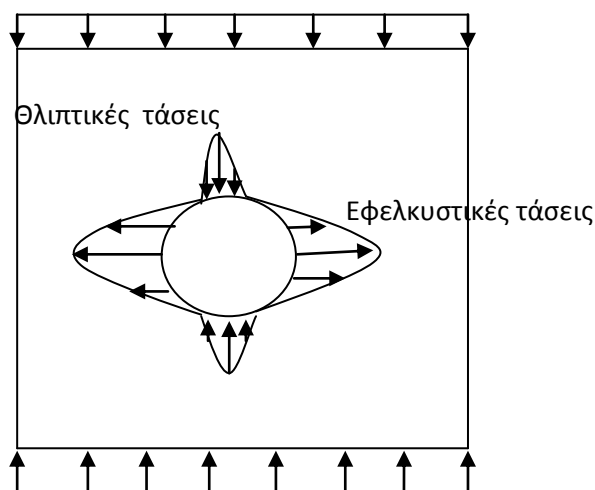
Ως γνωστόν το σκυρόδεμα αποτελείται και από αδρανή. Παρόλο το μικρό μέγεθός τους, η συμμετοχή τους στην ανάληψη τέμνουσας είναι σημαντική. Όταν σχηματίζεται μία ρωγμή, οι επιφάνειες αυτής είναι τραχείες και ανώμαλες. Τα αδρανή κατά το άνοιγμα της ρωγμής παραμένουν στη μία πλευρά και στην απέναντι αυτής. Έτσι κατά τη διάρκεια μιας μετατόπισης-ολίσθησης κατά μήκος των χειλών της ρωγμής, τα προεξέχοντα αδρανή έρχονται σε επαφή και έτσι αναπτύσσονται δυνάμεις αντίστασης στην ανωτέρω επιβαλλόμενη ολίσθηση. Η εμπλοκή των αδρανών παρεμποδίζει την ολίσθηση και κατ' επέκταση το περαιτέρω άνοιγμα της ρωγμής. Οι δυνάμεις αυτές δεν είναι μικρής σημασίας. Έρευνες έχουν δείξει πως αναλαμβάνουν το 30-50% της τέμνουσας υπό κατάλληλες συνθήκες, απουσία σπλισμού κορμού.



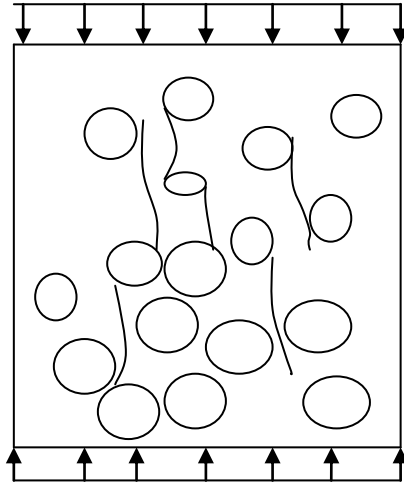
Σχήμα 2.1 Αδρανή στις παρειές ρωγμής

Αναλυτικότερα παρουσιάζεται η θεωρία του J.C. Walraven όσον αφορά τη συμβολή των αδρανών.

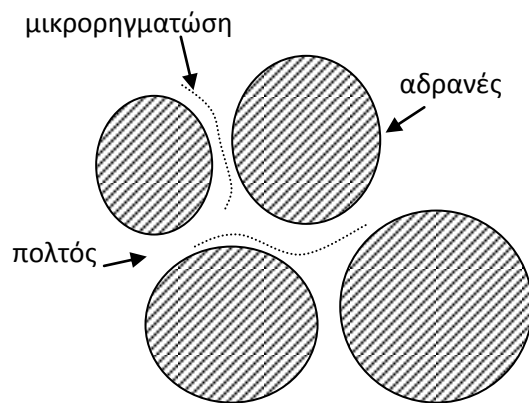
Με βάση τη θεωρία που ανέπτυξε ο J.C. Walraven, το σκυρόδεμα μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα υλικό δύο φάσεων: ενός πυρήνα (σκληρός πολτός τσιμέντου) και ενός συνόλου αδρανών τα οποία είναι ενσωματωμένα στον πολτό. Γενικά η αντοχή και η ακαμψία των αδρανών είναι μεγαλύτερη από εκείνη του πολτού. Ωστόσο η επιφάνεια επαφής μεταξύ των δύο φάσεων είναι η πιο αδύναμη περιοχή του συστήματος. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο προσωμοίωμα σκυροδέματος αποτελούμενο από αδρανή και τσιμεντοπολτό. Στο προσωμοίωμα φαίνονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις στη περιοχή γύρω από το αδρανές σφαιρικού σχήματος το οποίο βρίσκεται μέσα σε σκληρυμένο τσιμεντοπολτό που υποβάλλεται σε ομοιόμορφη θλιπτική τάση. Παρουσιάζονται οι περιοχές όπου αναπτύσσονται εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις. Είναι φανερό ότι αν ασκηθούν εξωτερικά επιβαλλόμενες θλιπτικές τάσεις οι αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις θα δημιουργήσουν ρωγμές στο υλικό, αφού η αντοχή του σε εφελκυσμό είναι μικρότερη από εκείνη της θλίψης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ρωγή θα δημιουργηθεί στη διεπιφάνεια με αποκόλληση του τσιμεντοπολτού από την επιφάνεια του αδρανούς με αστοχία σε συνάφεια. Τα αδρανή σε αυτή την περίπτωση έχουν μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από τον τσιμεντοπολτό. Στην περίπτωση ελαφροσκυροδέματος το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών είναι μικρότερο από αυτό του τσιμεντοπολτού.



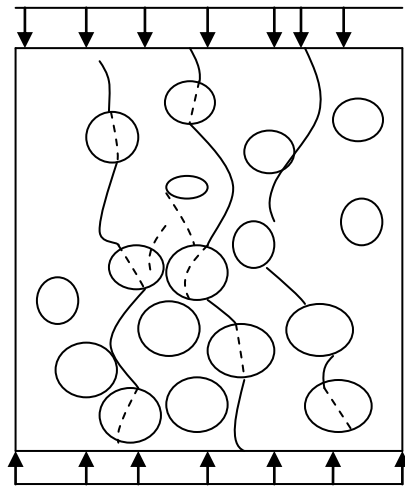
Σχήμα 2.2 Αναπτυσσόμενες τάσεις στην περιφέρεια αδρανούς περιβαλλόμενου από σκληρυμένο τσιμεντοπολτό (μέτρο ελαστικότητας αδρανούς $E_a > E_{τστ}$)



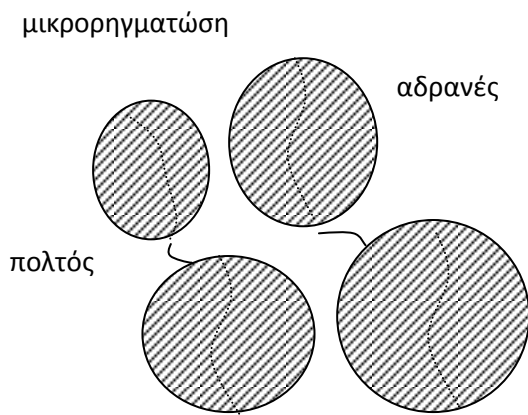
Σχήμα 2.3 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε προσομοίωμα με σειρά αδρανών μέσα σε τσιμεντοπολτό (μέτρο ελαστικότητας αδρανούς $E_a > E_{τσ}$ μέτρο ελαστικότητας τσιμεντοπολτού)



Σχήμα 2.4 Λεπτομέρεια ρηγματώσης τσιμεντοπολτού

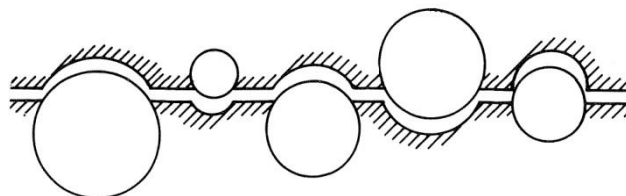


Σχήμα 2.5 Ρηγμάτωση σε προσομοίωμα ελαφροσκυροδέματος (μέτρο ελαστικότητας αδρανούς $E_a > E_{τσ}$ μέτρο ελαστικότητας τσιμεντοπολτού)



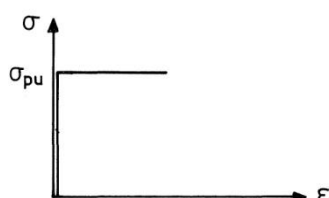
Σχήμα 2.6 Λεπτομέρεια ρηγμάτωσης τσιμεντοπολτού

Τα αδρανή θεωρείται ότι έχουν σφαιρικό σχήμα και μπορούν να τμηθούν από τη ρωγή σε κάθε βάθος με την ίδια πιθανότητα. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δομή της ρωγμής να έχει την μορφή του παρακάτω σχήματος.



Σχήμα 2.7 Μορφή των επιφανειών της ρωγμής

Αναλογιζόμενοι τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης και το γεγονός πως το μέγεθος των περισσότερων αδρανών είναι σχετικώς μεγαλύτερο από το άνοιγμα της ρωγμής (άρα δεν επηρεάζεται σημαντικά η τραχύτητα που προκαλείται από την επαφή των αδρανών), καταλήγουμε ότι η μικροτραχύτητα της ρωγμής, η οποία προκαλείται από τα αδρανή στην περιοχή της ρωγμής, υπερισχύει της μακροτραχύτητας εξαιτίας των συνολικών κυμματισμών του επιπέδου της ρωγμής. Έτσι λοιπόν η επιφάνεια της ρωγμής θεωρείται επίπεδη.

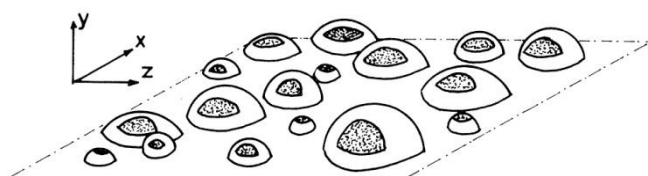


Σχήμα 2.8 Σχέση τάσεων – παραμορφώσεων τσιμεντοπολτού

Ο σκληρυμμένος πολτός τσιμέντου θεωρείται ιξώδες ελαστικό υλικό: οι παραμορφώσεις που προκαλούνται από τάσεις είναι μερικώς ελαστικές και στο υπόλοιπο μέρος πλαστικές. Υπό πολυαξονικές τάσεις, στην περιοχή μεταξύ των αδρανών στο σκυρόδεμα, μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις μπορούν να συμβούν ως αποτέλεσμα της μείωσης του όγκου των πόρων. Από τη στιγμή που οι πλαστικές παραμορφώσεις αναμένονται να κυριαρχήσουν έναντι των ελαστικών, η σχέση τάσης-παραμόρφωσης του μίγματος αποτελούμενου από πολτό και αδρανή μικρότερα των 0,25mm, θεωρείται ότι είναι άκαμπταελαστική.

Η τάση υπό την οποία έχουμε πλαστική παραμόρφωση του τσιμεντοπολτού συμβολίζεται ως $\sigma_{ρυ}$.

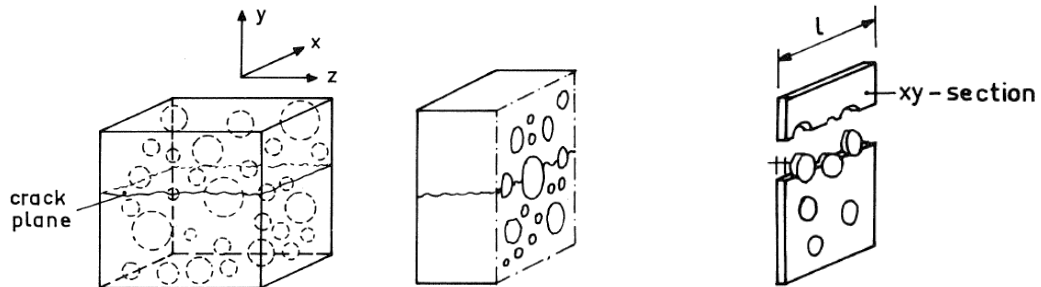
Έτσι λοιπόν αναμένεται ότι κατά τη διάρκεια της διατμητικής μετατόπισης των μετώπων της ρωγμής, αναπτύσσονται επιφάνειες επαφής στην επιφάνεια των αδρανών με ταυτόχρονη αλληλεμπλοκή τους στα δύο χείλη της ρωγμής, εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης του πυρήνα-επειδή οι παραμορφώσεις είναι πλαστικές δεν θα ανατραπούν, η αλληλεμπλοκή των αδρανών θα παραμείνει και δεν θα 'ξεκουμπώσουν' με αποτέλεσμα να αντιστέκονται στο περαιτέρω άνοιγμα της ρωγμής. Οι τάσεις στις επιφάνειες επαφής προκαλούν αντιδράσεις σε όλες τις διευθύνσεις σε όλους τους κύριους άξονες.



Σχήμα 2.9 Επιφάνειες επαφής των αδρανών κατά τη διάρκεια της διατμητικής μετατόπισης

Γίνεται υπόθεση ενός σώματος ρηγματωμένου σκυροδέματος αποτελούμενο από πολλά

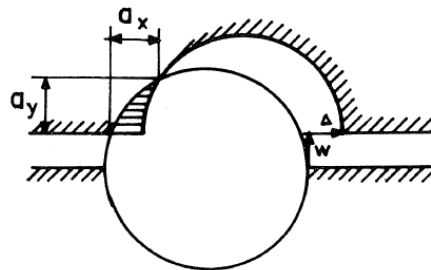
τμήματα με μοναδιαίο πλάτος. Είναι δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα για την συμπεριφορά του σκυροδέματος αφού πρώτα αποκωδικοποιηθεί η συμπεριφορά αυτού του μοναδιαίου πλάτους τμήματος.



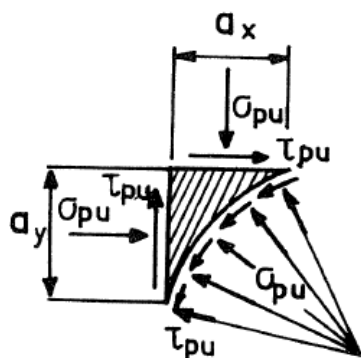
α) Σώμα ρηγματωμένου σκυροδέματος β) Τομή ως προς τον άξονα z γ) αντιπροσωπευτικό τμήμα

Σχήμα 2.10

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μία τομή ενός αδρανούς όπου υπάρχει επιφάνεια επαφής μεταξύ των χειλών της ρωγμής. Το αδρανές βρίσκεται στον άξονα z. Αν προβάσουμε την επιφάνεια επαφής στον x και στον y άξονα, θα έχουμε τις επιφάνειες a_x και a_y . Η σκιασμένη περιοχή αντιπροσωπεύει το μέρος του πυρήνα που χάθηκε λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης αυτού.



Σχήμα 2.11 Επιφάνεια επαφής μεταξύ πολτού και αδρανών



Σχήμα 2.12 Τάσεις που επικρατούν στο τμήμα επαφής

Αν το διατμητικό φορτίο αυξηθεί στο επίπεδο της ρωγμής και το άνοιγμα της ρωγμής παρεμποδίζεται από δυνάμεις ενάντια σ' αυτό, αναπτύσσεται ένας μηχανισμός που μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

Οι επιφάνειες επαφής τείνουν αρχικά να ολισθήσουν. Ως αποτέλεσμα της ολίσθησης, οι επιφάνειες επαφής μειώνονται και έτσι αναπτύσσονται πολύ μεγάλες τάσεις επαφής. Ως εκ τούτου προκαλείται περαιτέρω πλαστική παραμόρφωση μέχρι να επέλθει ισορροπία μεταξύ των δυνάμεων στον άξονα x και y. Οι τάσεις στην επιφάνεια επαφής αναλύονται σε μία τάση $\sigma_{\rho u}$ κάθετα στην επιφάνεια επαφής και σε μία τάση $\tau_{\rho u}$ εφαπτόμενη σε αυτή. Οι τάσεις $\sigma_{\rho u}$ και $\tau_{\rho u}$ αλληλοσυνδέονται με τη συνθήκη ότι οι επιφάνειες επαφής τείνουν να ολισθήσουν οπότε αναπτύσσεται τριβή. Έτσι λοιπόν η συνθήκη ισορροπίας σχηματίζεται με βάση έναν κρίσιμο συνδυασμό ομοιόμορφων τάσεων:

$$\tau_{\rho u} = \mu \cdot \sigma_{\rho u} \quad (13)$$

Οι συνισταμένες των δυνάμεων στην επιφάνεια επαφής μπορούν να προσδιοριστούν ποσοτικά με βάση την προαναφερθείσα υπόθεση. Οι σχέσεις στην x και y διεύθυνση παρουσιάζονται ως εξής:

$$F_x = \sigma_{\rho u} \cdot a_y + \tau_{\rho u} \cdot a_x \quad (14)$$

$$F_y = \sigma_{\rho u} \cdot a_x - \tau_{\rho u} \cdot a_y \quad (15)$$

Αν όπου $\tau_{\rho u}$ βάλουμε τη σχέση (13) και αθροίσουμε όλες τις επιφάνειες επαφής στο αδρανές, η συνολική αντίσταση της περιοχής της ρωγμής σε ένα μοναδιαίου πλάτους τμήμα θα έχει ως εξής:

$$\Sigma F_y = \sigma_{\rho u} \cdot (\Sigma a_x - \mu \cdot \Sigma a_y) \quad (16)$$

$$\Sigma F_x = \sigma_{\rho u} \cdot (\Sigma a_y + \mu \cdot \Sigma a_x) \quad (17)$$

Οι τιμές των $\sigma_{\rho u}$ και μ είναι σταθερές του υλικού ενώ οι τιμές των Σa_x και Σa_y θα πρέπει να υπολογιστούν όπως θα παρουσιασθεί παρακάτω:

Η κατανομή των αδρανών στο τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκαν σε πειράματα έγινε με

βάση την καμπύλη του Fuller. Αυτή η συσσωρευτική συνάρτηση κατανομής εκφράζεται από τη σχέση:

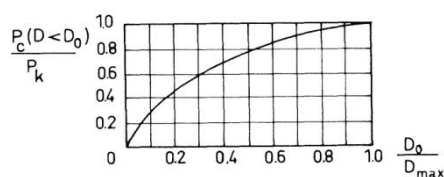
$$P_k = \sqrt{\frac{D}{D_{max}}} \quad (18)$$

Στην ανωτέρω σχέση το P_k εκφράζει το λόγο των αδρανών που διαπερνούν ένα κόσκινο και έχουν διάμετρο D , ενώ D_{max} είναι η διάμετρος του μεγαλύτερου αδρανούς. Η πιθανότητα ένα τυχαίο σημείο στο σκυρόδεμα να είναι σε ένα αδρανές είναι $P = p_k$. Κανονικά το p_k είναι ο λόγος του όγκου των αδρανών προς τον όγκο του σκυροδέματος.

Με βάση την παραπάνω σχέση μπορούμε να βρούμε την πιθανότητα ένα τυχαίο σημείο στο z επίπεδο στο μοναδιαίο τμήμα που εξετάζεται, να βρίσκεται σε ένα αδρανές με διάμετρο D_0 , δηλαδή να ισχύει $D < D_0$. Αυτή η συνάρτηση είναι η εξής:

$$P_c(D < D_0) = p_k (1.065 D_0^{0.5} D_{max}^{-0.5} - 0.053 D_0^4 D_{max}^{-4} - 0.012 D_0^6 D_{max}^{-6} - 0.0045 D_0^8 D_{max}^{-8} - 0.0025 D_0^{10} D_{max}^{-10}) \quad (19)$$

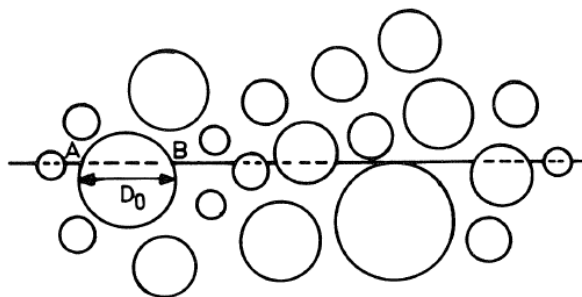
Η ανωτέρω σχέση εκφράζεται γραφικά στο παρακάτω γράφημα:



Σχήμα 2.13 Συσσωρευτική συνάρτηση κατανομής των αδρανών συναρτήσει της διαμέτρου αυτών

Δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος των αδρανών τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα το σημείο που εξετάζεται στην μάζα του σκυροδέματος στο επίπεδο z , να ανήκει σε ένα αδρανές.

Η ρωγμή στο επίπεδο z τέμνει τα αδρανή.



Σχήμα 2.14 Αδρανή που τέμνονται από τη ρωγμή

Το μέσο μήκος της γραμμής τομής AB για ένα αδρανές με διάμετρο D_0 , τετμημένο από τη ρωγμή είναι :

$$s_m = \frac{\pi \cdot D_0}{4} \quad (20)$$

Υποθέτοντας μία διατομή μοναδιαίου πλάτους που προήλθε από την τομή του z επιπέδου και της ρωγμής, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που περιλαμβάνει μόνο σημεία τα οποία βρίσκονται σε αδρανές με διάμετρο D_0 , μπορεί να προκύψει πολλαπλασιάζοντας αυτό το μοναδιαίου μήκους τμήμα με το $P_c'(D_0)$, δηλαδή με την πιθανότητα ένα σημείο να βρίσκεται σε αδρανές με διάμετρο D_0 , όπου

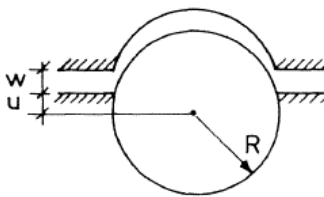
$$\dot{P}_c(D_0) = \partial P_c(D < D_0) / \partial D_0 \quad (21)$$

$$\text{Έτσι: } 1 \cdot (D_0) = \dot{P}_c(D_0) \cdot 1 = \dot{P}_c(D_0) \quad (22)$$

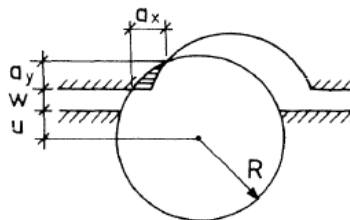
Κατά συνέπεια η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για ένα σύνολο αδρανών με διάμετρο D_0 στο επίπεδο z, το οποίο τέμνει τη ρωγμή, δηλαδή ο αριθμός των αδρανών που τέμνονται από τη ρωγμή και έχουν διάμετρο D_0 είναι:

$$n(D_0) = \frac{P_c'(D_0)}{0,25 \cdot \pi \cdot D_0} \quad (23)$$

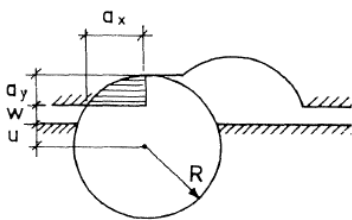
Έτσι λοιπόν η επιφάνεια επαφής για μία τέτοια τομή με διάμετρο D_0 προκύπτει σαν συνάρτηση του ανοίγματος της ρωγμής w και της διατμητικής μετατόπισης Δ . Υπάρχουν 3 πιθανότητες:



α) φάση μηδενικής επαφής μεταξύ των αδρανών $0 < \Delta < \Delta_0$



β) έναρξη επαφής μεταξύ των αδρανών $\Delta_0 < \Delta < \Delta_b$



γ) φάση μέγιστης επαφής μεταξύ των αδρανών $\Delta > \Delta_b$

Σχήμα 2.15

Είναι:

$$\Delta_0 = \sqrt{R^2 - u^2} - \sqrt{R^2 - (u + w)^2} \quad (24)$$

$$\Delta_b = \sqrt{2 \cdot R \cdot w - w^2} \quad (25)$$

Για τις προβαλλόμενες επιφάνειες a_x και a_y :

Για $0 < \Delta < \Delta_0$:

$$a_x = a_y = 0 \quad (26)$$

Για $\Delta_0 < \Delta < \Delta_b$:

$$a_y = \sqrt{R^2 - \frac{1}{4} \cdot (w^2 + \Delta^2)} \cdot \frac{\Delta}{\sqrt{w^2 + \Delta^2}} - \frac{1}{2} \cdot w - u \quad (27)$$

$$a_x = \frac{1}{2} \cdot \Delta - \sqrt{R^2 - \frac{1}{4} \cdot (w^2 + \Delta^2)} \cdot \frac{w}{\sqrt{w^2 + \Delta^2}} + \sqrt{R^2 - (u + w)^2} \quad (28)$$

Για $\Delta > \Delta_b$:

$$a_y = R - (u + w) \quad (29)$$

$$a_x = \sqrt{R^2 - (u + w)^2} \quad (30)$$

Οι παραπάνω σχέσεις συνυπολογίζουν ως παράμετρο το u που είναι το βάθος αλληλεμπλοκής, δηλαδή πόσο πιο κάτω είναι το κέντρο βάρους του αδρανούς από την επιφάνεια του χείλους της ρωγμής. Δεχόμενοι ότι όλες οι τιμές του u μπορούν να συμβούν με την ίδια πιθανότητα, είναι δυνατόν να υπολογίσουμε τις τιμές των a_x και a_y συναρτήσει των D, w και Δ . Έτσι λοιπόν αν τα μέτωπα της ρωγμής στρίβουν το ένα ως προς το άλλο, για κάθε αδρανές με διάμετρο D οι πιο πιθανές τιμές για τις μέσες τιμές των a_x και a_y είναι γνωστές. Αν D_{min} είναι η μικρότερη διάμετρος του κύκλου τομής που υποδηλώνει επαφή για τις δεδομένες συνθήκες (w, Δ) και D_{max} είναι η μέγιστη διάμετρος του κύκλου τομής, η επιφάνειες επαφής των χειλών της ρωγμής A_x και A_y υπολογίζονται για ένα τμήμα μοναδιαίου μήκους και πλάτους ως εξής:

$$A_x = \sum a_x = \int_{D_{min}}^{D_{max}} n(D) \cdot \bar{a}_{xD} dD \quad (31)$$

$$A_y = \sum a_y = \int_{D_{min}}^{D_{max}} n(D) \cdot \bar{a}_{yD} dD \quad (32)$$

Εκτίμηση των ανωτέρω σχέσεων δίνει τα παρακάτω:

Περίπτωση Α: $\Delta < w$

$$A_y = \int_{\frac{w^2 + \Delta^2}{4}}^{D_{max}} p_k \cdot \frac{4}{\pi} \cdot F\left(\frac{D}{D_{max}}\right) \cdot G_1(\Delta, w, D) \cdot dD \quad (33)$$

$$A_x = \int_{\frac{D}{D_{max}}}^{D_{max}} p_k \cdot \frac{4}{\pi} \cdot F\left(\frac{D}{D_{max}}\right) \cdot G_2(\Delta, w, D) \cdot dD \quad (34)$$

Περίπτωση Β: $\Delta > w$

$$A_y = \int_{2w}^{\frac{w^2+\Delta^2}{w}} p_k \cdot \frac{4}{\pi} \cdot F\left(\frac{D}{D_{max}}\right) \cdot G_3(\Delta, w, D) \cdot dD + \int_{\frac{w^2+\Delta^2}{w}}^{D_{max}} p_k \cdot \frac{4}{\pi} \cdot F\left(\frac{D}{D_{max}}\right) \cdot G_1(\Delta, w, D) \cdot dD \quad (35)$$

$$A_x = \int_{2w}^{\frac{w^2+\Delta^2}{w}} p_k \cdot \frac{4}{\pi} \cdot F\left(\frac{D}{D_{max}}\right) \cdot G_4(\Delta, w, D) \cdot dD + \int_{\frac{w^2+\Delta^2}{w}}^{D_{max}} p_k \cdot \frac{4}{\pi} \cdot F\left(\frac{D}{D_{max}}\right) \cdot G_1(\Delta, w, D) \cdot dD \quad (36)$$

$$G_1(\Delta, w, D) = D^{-3} \cdot \left(\sqrt{D^2 - (w^2 + \Delta^2)} \cdot \frac{\Delta}{\sqrt{w^2 + \Delta^2}} \cdot u_{max} - w \cdot u_{max} - u_{max}^2 \right) \quad (37)$$

$$G_2(\Delta, w, D) =$$

$$D^{-3} \left\{ \Delta - \sqrt{D^2 - (w^2 + \Delta^2)} \cdot \frac{w}{\sqrt{w^2 + \Delta^2}} \cdot u_{max} + (u_{max} + w) \cdot \sqrt{\frac{1}{4} \cdot D^2 - (w + u_{max})^2} - w \cdot \sqrt{\frac{1}{4} \cdot D^2 - w^2} + \frac{1}{4} \cdot D^2 \sin^{-1} \frac{w+u_{max}}{\frac{1}{2}D} - \frac{D^2}{4} \cdot \sin^{-1} \frac{2 \cdot w}{D} \right\} \cdot dD \quad (38)$$

$$G_3(\Delta, w, D) = D^{-3} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot D - w \right)^2 \quad (39)$$

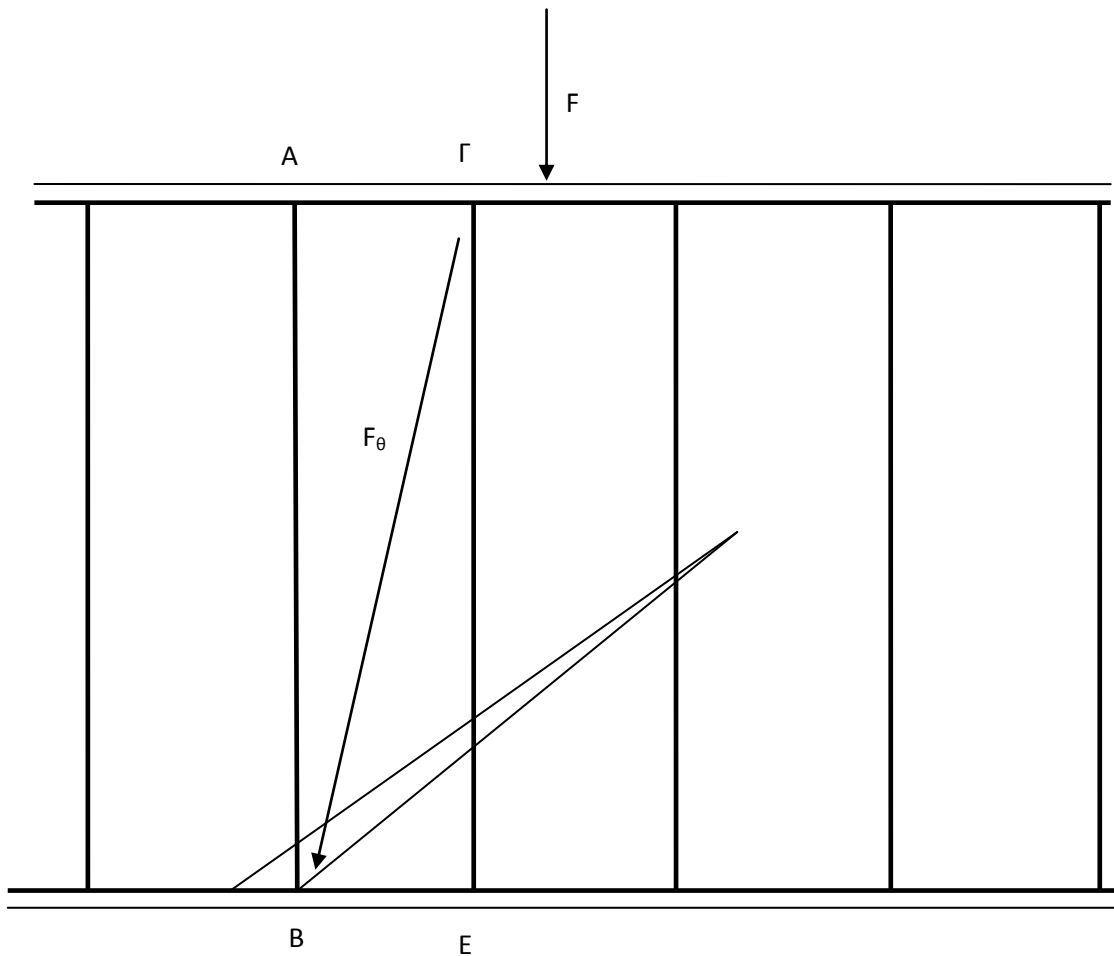
$$G_4(\Delta, w, D) = D^{-3} \left(\frac{\pi}{8} \cdot D^2 - w \cdot \sqrt{\frac{1}{4} \cdot D^2 - w^2} - \frac{D^2}{4} \cdot \sin^{-1} \frac{2 \cdot w}{D} \right) \quad (40)$$

$$F\left(\frac{D}{D_{max}}\right) = 0,532 \cdot \left(\frac{D}{D_{max}}\right)^{0,5} - 0,212 \cdot \left(\frac{D}{D_{max}}\right)^4 - 0,072 \cdot \left(\frac{D}{D_{max}}\right)^6 - 0,036 \cdot \left(\frac{D}{D_{max}}\right)^8 - 0,025 \cdot \left(\frac{D}{D_{max}}\right)^{10} \quad (41)$$

$$u_{max} = \frac{-\frac{1}{2}w \cdot (w^2 + \Delta^2) + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{w^2 \cdot (w^2 + \Delta^2)^2 - (w^2 + \Delta^2) \cdot \{(w^2 + \Delta^2)^2 - \Delta^2 D^2\}}}{(w^2 + \Delta^2)} \quad (42)$$

Η θεωρία του Walraven βρίσκει εφαρμογή στην παρούσα εργασία. Λαμβάνονται τρία δοκίμια από εκείνα που χρησιμοποίησε ο Δ. Μπισκίνης και εφόσον έχουν αποχήσει καμπτοδιατμητικά, θεωρούμε ότι έχει αναπτυχθεί διατμητική ρωγμή η οποία φτάνει μέχρι ύψος $0,9 \cdot d$.

Η κεκλιμένη ρωγμή είναι αποτέλεσμα άσκησης τέμνουσας δύναμης F . Μέσω του δικτυώματος Morsch μεταφέρεται στο σημείο τομής, Β, του συνδετήρα ΑΒ και του εφελκυσμένου οπλισμού δύναμη, F_θ .



Σχήμα 2.16 Μεταφορά τέμνουσας στο σημείο τομής συνδετήρα και εφελκόμενου σπλισμού

Η ρωγμή διαπερνά της συνδετήρες AB και ΓΕ. Η δύναμη F_{θ} προκαλεί εξόλκευση στον συνδετήρα. Ο συνδετήρας ενεργοποιεί την αντοχή του σε εφελκυσμό και αντιδρά στην εξόλκευση που του επιβάλλεται. Αποτέλεσμα αυτού είναι να συμβάλει στη μείωση του ανοίγματος της ρωγμής. Αναμενόμενη παραμόρφωση του συνδετήρα είναι η ταυτόχρονη οριζόντια και κατακόρυφη μετατόπισή του. Παρόλαυτά ο συνδετήρας λειτουργεί ταυτόχρονα ως βλήτρο, οπότε αντιστέκεται στην παραμόρφωση εγκάρσια στον άξονά του. Ο συνδετήρας από το σημείο Δ καταλήγει στο σημείο Ε κατακόρυφα. Η διαδρομή που ακολουθεί το σημείο Δ του σκυροδέματος είναι η $\Delta\Delta_1\Delta_2E$.

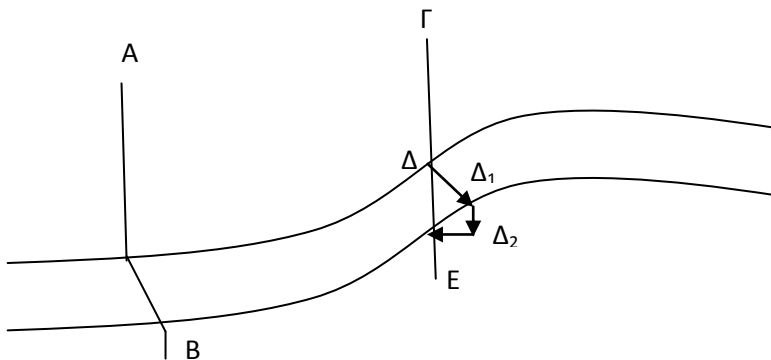
Το σημείο Δ μεταφέρεται στη θέση Δ_1 λόγω του ανοίγματος της ρωγμής. Έπειτα από τη θέση Δ_1 κατευθύνεται στη θέση Δ_2 λόγω της αντίδρασης του συνδετήρα στην επιβαλλόμενη εξόλκευση. Τελικά από το σημείο Δ_2 θα καταλήξουμε στο σημείο Ε λόγω δράσης βλήτρου του συνδετήρα. Ουσιαστικά η συνισταμένη των Δ_2E με την $\Delta\Delta_2$, η οποία είναι συνισταμένη των $\Delta\Delta_1$ και $\Delta_1\Delta_2$, είναι η ΔE , που είναι η εξόλκευση του συνδετήρα. Είναι:

$$\Delta\Delta_1 = w = \text{άνοιγμα ρωγμής}$$

$$\Delta_1\Delta_2 = \text{κατακόρυφη μετακίνηση του συνδετήρα}$$

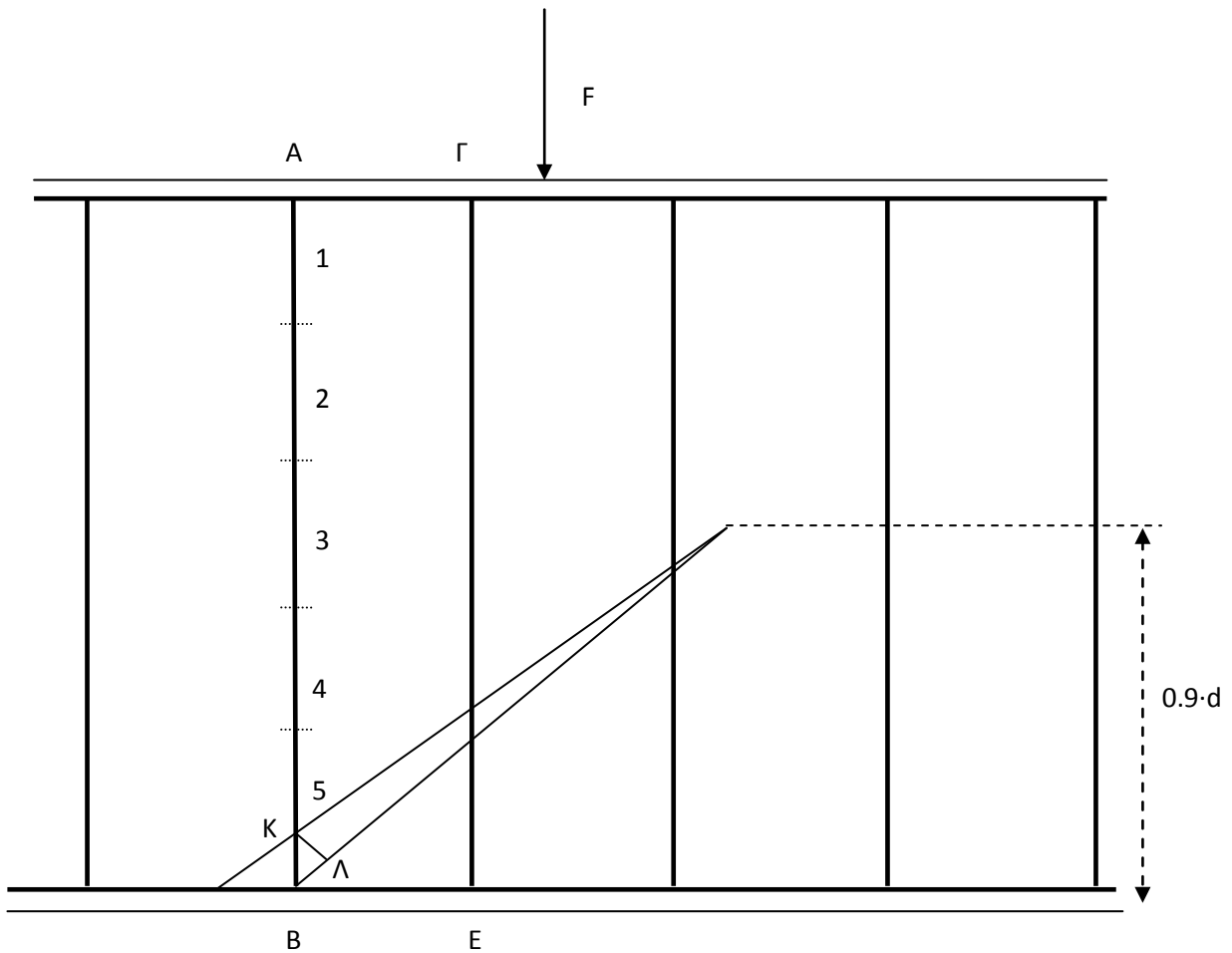
$$\Delta_1E = s = \text{ολίσθηση επιφάνειας χείλους ρωγμής}$$

$\Delta E = \text{εξόλκευση}$



Σχήμα 2.17 Δράση βλήτρου συνδετήρα

Προκειμένου να υπολογιστεί το άνοιγμα της ρωγμής, w , ο συνδετήρας AB θα επιμεριστεί σε πέντε τμήματα μήκους 28mm το καθένα. Θεωρείται ότι στο σημείο B ο συνδετήρας έχει φτάσει το όριο διαρροής του. Ακόμη θεωρείται πως στο σημείο αγκύρωσης του συνδετήρα με τον διαμήκη θλιβόμενο σπλισμό, η ολίσθηση είναι μηδενική, λόγω της αγκύρωσης. Οπότε η τάση στο σημείο αυτό είναι γνωστή και είναι ίση με $\sigma_{sB} = \sigma_{sy} = 318 \text{MPa}$. Ξεκινώντας με μια υπόθεση για την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο A, υπολογίζεται η τάση που αναπτύσσεται σε καθένα από τα πέντε επιμέρους τμήματα του συνδετήρα, κάνοντας επαναλήψεις μέχρι να ικανοποιηθεί η αρχική θεώρηση ότι ο συνδετήρας διαρρέει στο σημείο B.



Σχήμα 2.18 Καταμερισμός συνδετήρα AB σε πέντε ίσα τμήματα

Έτσι λοιπόν

- Γίνεται υπόθεση για την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο A,

έστω σ_{sA} .

Η παραμόρφωση και η ολίσθηση στο σημείο αυτό θα είναι μηδενικές διότι ο εγκάρσιος σπλισμός είναι καλά αγκυρωμένος στον διαμήκη θλιβόμενο σπλισμό.

- Υπολογίζεται η τάση που αναπτύσσεται στο πρώτο τμήμα του συνδετήρα.

$$\sigma_{s1} = \sigma_{sA} + \frac{\tau p d \Delta x}{A_s}$$

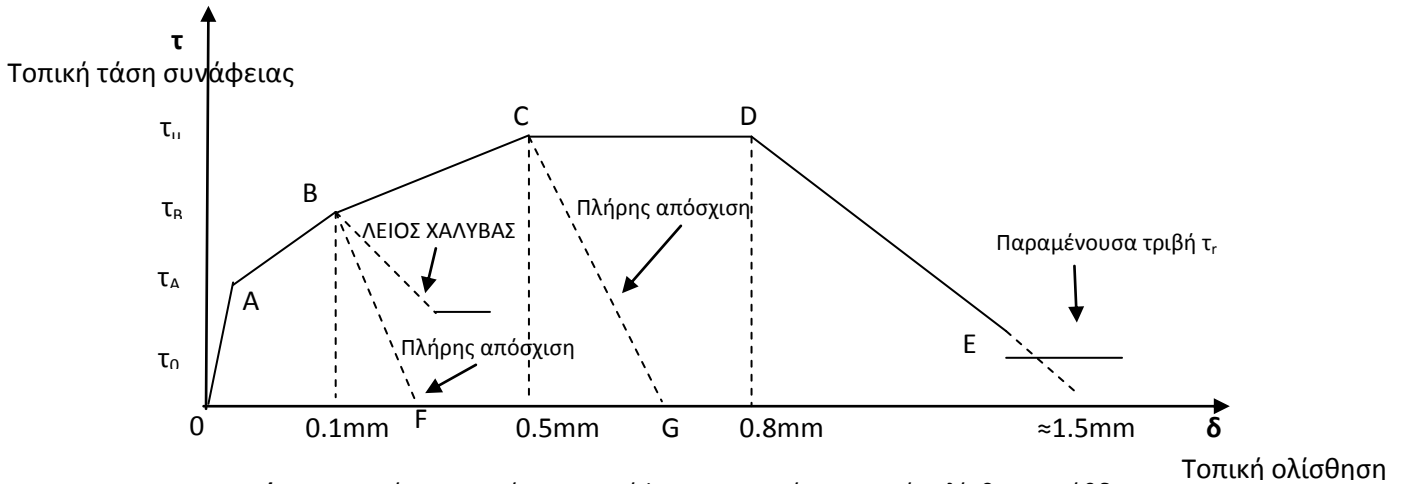
- Έπειτα υπολογίζεται η παραμόρφωση που προκαλείται στο τέλος του πρώτου τμήματος του συνδετήρα.

$$\epsilon_{s1} = \frac{\sigma s A}{E s}$$

- Γνωρίζοντας την παραμόρφωση αυτού, υπολογίζεται εν συνεχεία η ολίσθηση του τμήματος.

$$s_1 = \epsilon_{s1} \cdot \Delta x$$

- Για την παραπάνω τιμή της τοπικής ολίσθησης σημειώνεται από το διάγραμμα 'τοπικής ολίσθησης – τοπικής τάσης συνάφειας', η τιμή της τάσης συνάφειας τ_{b1} που επιστρατεύεται λόγω της εξόλκευσης.



τ_o : συνοχή (χημικής/μηχανικής φύσεως) υπό πρακτικώς μηδενική ολίσθηση

τ_A : εσωτερική (εγκάρσια) ρηγμάτωση $\approx f_{ct}$

τ_B : εμφάνιση (διαμήκων) ρωγμών αποσχίσεως $\approx 2 \cdot f_{ct}$

τ_u : πλήρης απόσχιση ή θραύση «προβολίσκων» σκυροδέματος μεταξύ διαδοχικών νευρώσεων (και μεταξύ διαδοχικών εγκάρσιων ρωγμών) $\approx f_{cc} : 3$

τ_r : απομένουσα τάση συνάφειας (τριβή)

- Συνεχίζοντας στο δεύτερο τμήμα του συνδετήρα υπολογίζουμε την τάση που αναπτύσσεται.

$$\sigma_{s2} = \sigma_{sA} + \frac{\tau_p d \Delta x}{A_s}$$

Όπου

σ_{s1} η τάση που αναπτύχθηκε στο πρώτο τμήμα

τ_{b1} η τάση συνάφειας όπως σημειώθηκε από το παραπάνω διάγραμμα

d η διάμετρος του συνδετήρα

Δx το μήκος του πρώτου τμήματος του συνδετήρα

A_s η διάμετρος του συνδετήρα

Ουσιαστικώς η τάση που αναπτύσσεται στο δεύτερο τμήμα του συνδετήρα είναι ίση με την τάση που έχει αναπτυχθεί στο πρώτο τμήμα αυξημένη κατά την τάση συνάφειας που αναπτύχθηκε στο πρώτο τμήμα λόγω της ολίσθησης σε σχέση με την τάση συνάφειας στο συνολικό εμβαδόν του συνδετήρα.

- Έχοντας βρει την τάση στο δεύτερο τμήμα, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η παραμόρφωση του δεύτερου τμήματος:

$$\epsilon_{s2} = \frac{\sigma_{s2}}{E_s}$$

- Έπειτα υπολογίζεται η ολίσθηση του δεύτερου τμήματος:

$$s_2 = s_1 + \epsilon_{s2} \cdot \Delta x$$

Η ολίσθηση του πρώτου τμήματος προστίθεται στην ολίσθηση του δεύτερου.

- Για την παραπάνω ολίσθηση σημειώνεται από το διάγραμμα η τάση συνάφειας που αναπτύσσεται στο δεύτερο τμήμα τ_{b2} .

- Στο τρίτο τμήμα η τάση που αναπτύσσεται θα είναι ίση με:

$$\sigma_{s3} = \sigma_{s2} + \frac{\tau_{b2} \Delta x}{A_s}$$

- Η παραμόρφωση που προκαλείται λόγω της τάσης σ_{s3} είναι:

$$\epsilon_{s3} = \frac{\sigma_{s3}}{E_s}$$

- Η ολίσθηση του τρίτου τμήματος είναι:

$$s_3 = s_2 + \epsilon_{s3} \cdot \Delta x$$

- Από το διάγραμμα σημειώνεται η τάση συνάφειας τ_{b3} .

- Η τάση που αναπτύσσεται στο τέταρτο τμήμα είναι ίση με:

$$\sigma_{s4} = \sigma_{s3} + \frac{\tau_{b3} \Delta x}{A_s}$$

- Η παραμόρφωση αυτού του τμήματος είναι:

$$\epsilon_{s4} = \frac{\sigma_{s4}}{E_s}$$

- Η ολίσθηση είναι:

$$s_4 = s_3 + \epsilon_{s4} \cdot \Delta x$$

- Η τάση συνάφειας είναι τ_{b4} .
- Στο τελευταίο τμήμα η τάση είναι:

$$\sigma_{s5} = \sigma_{s4} + \frac{\tau_{pd} \Delta x}{A_s}$$

- Η επιβαλλόμενη παραμόρφωση:

$$\epsilon_{s5} = \frac{\sigma_{s5}}{E_s}$$

- Η ολίσθηση:

$$s_5 = s_4 + \epsilon_{s5} \cdot \Delta x$$

- Η τάση συνάφειας είναι τ_{b5} .

Οπότε η τάση του σημείου B είναι:

$$\sigma_{sB} = \sigma_{s5} + \frac{\tau_{pd} \Delta x}{A_s}$$

- Η παραμόρφωση αυτού του τμήματος είναι:

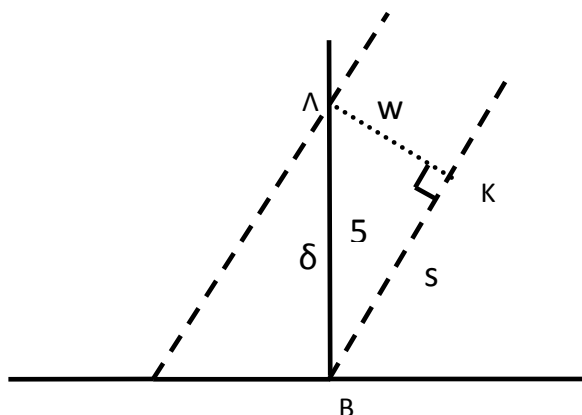
$$\epsilon_{sB} = \frac{\sigma_{sB}}{E_s}$$

- Η ολίσθηση είναι:

$$s_B = s_5 + \epsilon_{sB} \cdot \Delta x$$

Η τάση αυτή συγκρίνεται με την τάση διαρροής του εγκάρσιου σπλισμού και σε περίπτωση μη ταύτισης γίνεται επαναληπτική διαδικασία υποθέτοντας διαφορετική τάση στο σημείο A του συνδετήρα. Σε περίπτωση συμφωνίας οι υπολογισμοί συνεχίζονται κανονικά.

Στο τελευταίο τμήμα του συνδετήρα θεωρούμε ορθογώνιο τρίγωνο ΒΚΛ.



Σχήμα 2.20 Λεπτομέρεια συνδετήρα στο σημείο τομής με τον εφελκόμενο οπλισμό - μέγιστο άνοιγμα ρωγμής

Στο παραπάνω τρίγωνο:

- το τμήμα ΚΛ είναι ίσο με το άνοιγμα της ρωγμής w
- το τμήμα ΒΛ είναι ίσο με την εξόλκευση του συνδετήρα, δ
- το τμήμα ΒΚ είναι ίσο με την ολίσθηση s της επιφάνειας της ρωγμής

Θεωρώντας ότι ισχύει το δικτύωμα Morsch, ο θλιπτήρας λειτουργεί υπό γωνία 45° . Οπότε και η ρωγμή, όντας παράλληλη με τον θλιπτήρα, σχηματίζει γωνία 45° με τον εφελκόμενο οπλισμό. Άρα η γωνία $B=45^\circ$. Οπότε:

$$\sin 45 = \frac{KL}{BL} = \frac{w}{\delta}$$

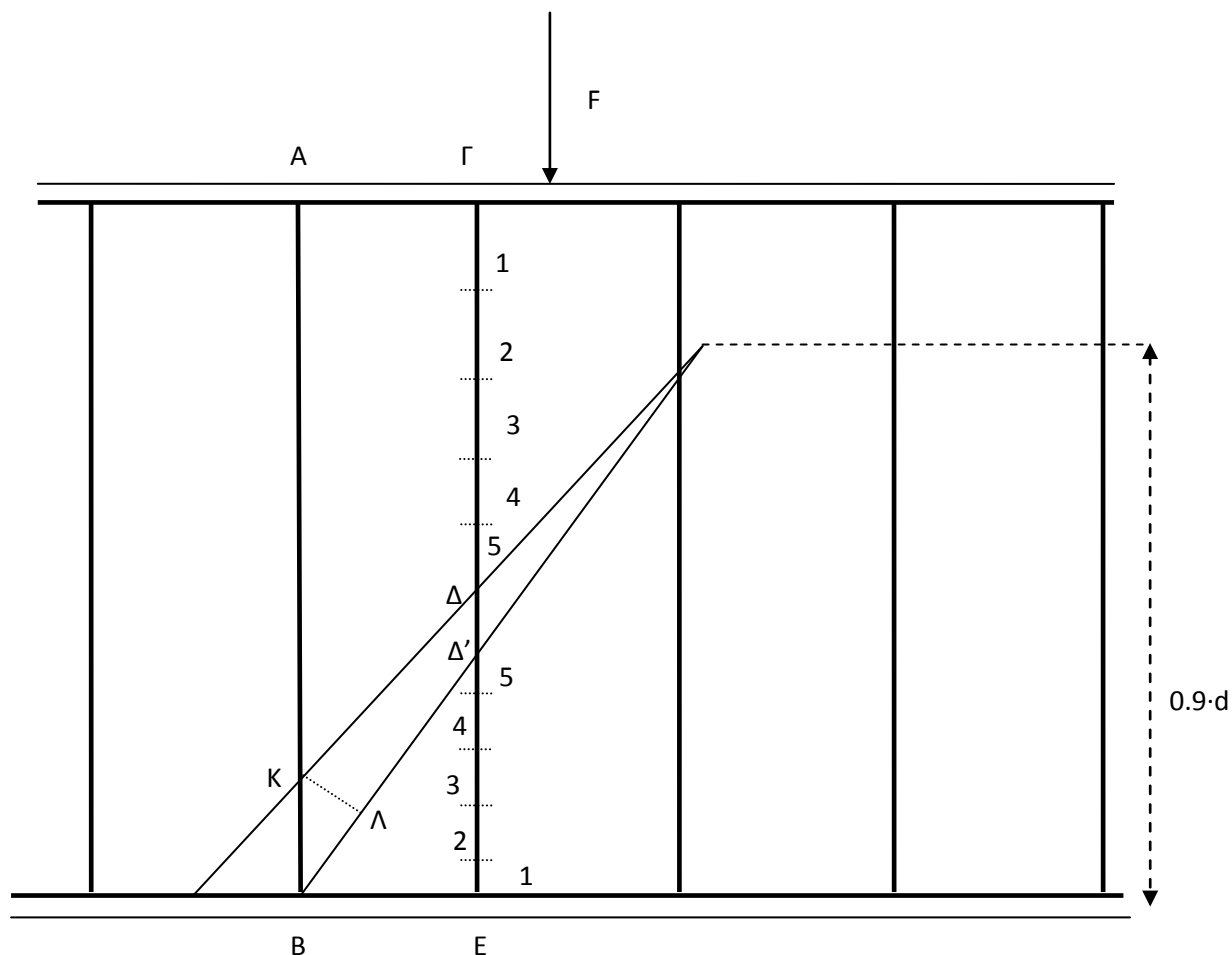
Οπότε το άνοιγμα της ρωγμής είναι ίσο με την εξόλκευση του συνδετήρα πολλαπλασιασμένο με το ημίτονο της γωνίας.

$$w = \delta \cdot \sin 45$$

Η παραμόρφωση και η ολίσθηση στο σημείο Α είναι μηδενικές διότι ο εγκάρσιος οπλισμός είναι καλά αγκυρωμένος στον διαμήκη θλιβόμενο οπλισμό. Μετά τη σκυροδέτηση, η ράβδος του συνδετήρα δεν περιβάλλεται σε όλη την περίμετρό της και σε όλο το μήκος της ομοιογενώς με σκυρόδεμα. Όπως είναι φυσικό όταν οι ράβδοι οπλισμού τοποθετούνται παράλληλα με την διεύθυνση σκυροδετήσεως, εξασφαλίζονται συνθήκες καλής συνάφειας. Όσο οι οπλισμοί έχουν κλίση μεγαλύτερη από 45° από τη διεύθυνση σκυροδετήσεως επικρατούν συνθήκες κακής συνάφειας. Αυτό συμβαίνει διότι το νωπό σκυρόδεμα παθαίνει συνίζηση, δηλαδή τα στερεά του σκυροδέματος κατεβαίνουν και έτσι αμέσως κάτω από μια ράβδο που είναι τοποθετημένη οριζοντίως στο πάνω μέρος της μάζας του σκυροδέματος δημιουργείται μηνίσκος νερού που αργότερα απορροφάται από το σκυρόδεμα και επομένως ένα μέρος της περιμέτρου δεν συνεργάζεται αμέσως με το σκυρόδεμα. Ο συνδετήρας βρίσκεται σε συνθήκες κακής συνάφειας. Ως αποτέλεσμα, οι τιμές της τάσης συνάφειας από το παραπάνω διάγραμμα θα μειωθούν ακόμη παραπάνω από ότι αν ήταν

σε περιοχή κακής συνάφειας δηλαδή μείωση μεγαλύτερη από 70%. Ο συνδετήρας περιβάλλεται κυρίως από κονίαμα και η επικάλυψη, c , είναι πολύ μικρή. Η μείωση της τάσης συνάφειας θα είναι 50%.

Έπειτα εξετάζοντας τον δεύτερο συνδετήρα τον οποίο τέμνει η ρωγμή, χωρίζουμε και πάλι κάθε τμήμα άνω και κάτω από τη ρωγμή σε πέντε τμήματα.



Σχήμα 2.21 Καταμερισμός καθενός από τα δύο τμήματα του συνδετήρα ΓΕ σε πέντε τμήματα

Ξεκινώντας από το σημείο Γ - σημείο τομής του θλιβόμενου σπλισμού με τον υπό εξέταση συνδετήρα-και υποθέτοντας μία τάση στο σημείο αυτό, ακολουθούμε την ανωτέρω διαδικασία και καταλήγουμε σε μία τάση στο σημείο Δ .

- Γίνεται υπόθεση για την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο Γ ,

έστω $\sigma_{s\Gamma}$.

- Υπολογίζεται η τάση που αναπτύσσεται στο πρώτο τμήμα του συνδετήρα.

$$\sigma_{s1} = \sigma_{s\Delta} + \frac{\tau \pi d \Delta x}{A_s}$$

- Έπειτα υπολογίζεται η παραμόρφωση που προκαλείται στο τέλος του πρώτου τμήματος του συνδετήρα.

$$\epsilon_{s1} = \frac{\sigma s \Delta}{E s}$$

- Γνωρίζοντας την παραμόρφωση αυτού, υπολογίζεται εν συνεχεία η ολίσθηση του τμήματος.

$$s_1 = \epsilon_{s1} \cdot \Delta_x$$

- Συνεχίζοντας στο δεύτερο τμήμα του συνδετήρα υπολογίζουμε την τάση που αναπτύσσεται.

$$\sigma_{s2} = \sigma_{sA} + \frac{\tau \pi d \Delta x}{A s}$$

- Έχοντας βρει την τάση στο δεύτερο τμήμα, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η παραμόρφωση του δεύτερου τμήματος:

$$\epsilon_{s2} = \frac{\sigma s 2}{E s}$$

- Έπειτα υπολογίζεται η ολίσθηση του δεύτερου τμήματος:

$$s_2 = s_1 + \epsilon_{s2} \cdot \Delta_x$$

- Για την παραπάνω ολίσθηση σημειώνεται από το διάγραμμα η τάση συνάφειας που αναπτύσσεται στο δεύτερο τμήμα τ_{b2} .

- Στο τρίτο τμήμα η τάση που αναπτύσσεται θα είναι ίση με:

$$\sigma_{s3} = \sigma_{s2} + \frac{\tau \pi d \Delta x}{A s}$$

- Η παραμόρφωση που προκαλείται λόγω της τάσης σ_{s3} είναι:

$$\epsilon_{s3} = \frac{\sigma s 3}{E s}$$

- Η ολίσθηση του τρίτου τμήματος είναι:

$$s_3 = s_2 + \epsilon_{s3} \cdot \Delta_x$$

- Από το διάγραμμα σημειώνεται η τάση συνάφειας τ_{b3} .

- Η τάση που αναπτύσσεται στο τέταρτο τμήμα είναι ίση με:

$$\sigma_{s4} = \sigma_{s3} + \frac{\tau \pi d \Delta x}{A_s}$$

- Η παραμόρφωση αυτού του τμήματος είναι:

$$\epsilon_{s4} = \frac{\sigma_{s4}}{E_s}$$

- Η ολίσθηση είναι:

$$s_4 = s_3 + \epsilon_{s4} \cdot \Delta x$$

- Η τάση συνάφειας είναι τ_{b4} .
- Στο τελευταίο τμήμα η τάση είναι:

$$\sigma_{s5} = \sigma_{s4} + \frac{\tau \pi d \Delta x}{A_s}$$

- Η επιβαλλόμενη παραμόρφωση:

$$\epsilon_{s5} = \frac{\sigma_{s5}}{E_s}$$

- Η ολίσθηση:

$$s_5 = s_4 + \epsilon_{s5} \cdot \Delta x$$

- Η τάση συνάφειας είναι τ_{b5} .

Οπότε η τάση του σημείου Δ είναι:

$$\sigma_{s\Delta} = \sigma_{s5} + \frac{\tau \pi d \Delta x}{A_s}$$

Στο σημείο Δ θα πρέπει να απαιτήσουμε :

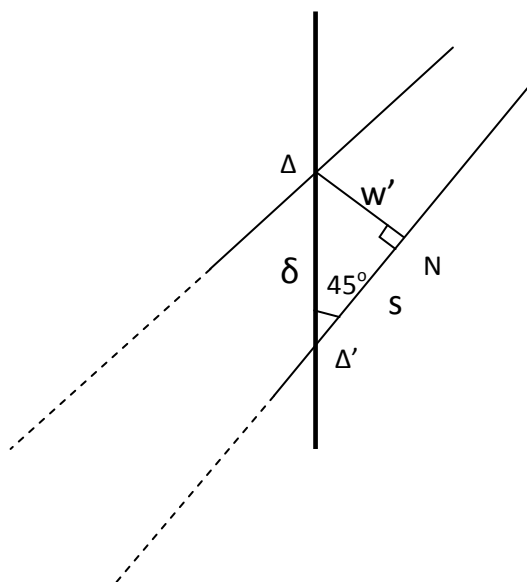
$$1) \sigma_{s\Delta} = \sigma_{s\Delta'}$$

Δηλαδή η τάση στο σημείο Δ του πρώτου τμήματος του υπό εξέταση συνδετήρα να είναι ίση με την τάση στο σημείο Δ' του δεύτερου τμήματος αυτού. Αυτό συμβαίνει διότι το μήκος ΔΔ' είναι πολύ μικρό οπότε η τάση που επικρατεί στα δύο άκρα θα είναι ίση. Ακόμη γνωρίζουμε ότι το άνοιγμα της ρωγμής στον δεύτερο συνδετήρα είναι $w' = w/2$, δηλαδή το μισό του ανοίγματος του πρώτου συνδετήρα γιατί έχουμε τριγωνική κατανομή της δύναμης.

Επίσης θα πρέπει να ισχύει το εξής:

$$2) \delta_{ΓΔ} \cdot \sin 45^\circ + \delta_{ΕΔ} \cdot \sin 45^\circ = w' = \frac{w}{2}$$

Η παραπάνω σχέση εξάγεται εύκολα αν σχηματίσουμε το ορθογώνιο τρίγωνο $\Delta\Delta'N$ που προκύπτει στο σημείο της ρωγμής με τον δεύτερο συνδετήρα ΓΕ.



Σχήμα 2.22 Λεπτομέρεια σημείου τομής ρωγμής και συνδετήρα ΓΕ

Στο παραπάνω τρίγωνο:

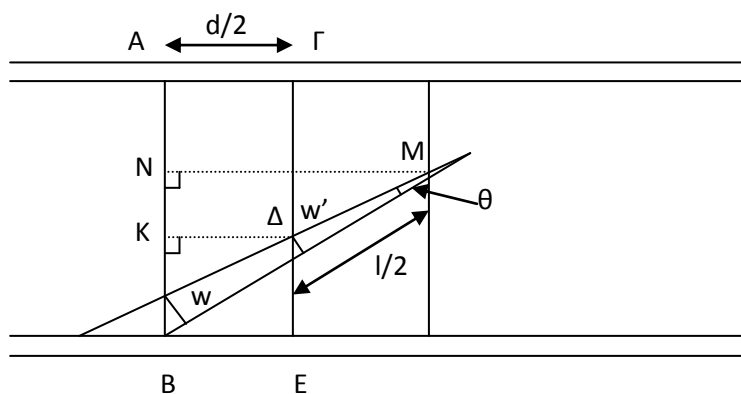
- το τμήμα ΔN είναι ίσο με το άνοιγμα της ρωγμής w'
- το τμήμα $\Delta\Delta'$ είναι ίσο με την εξόλκευση του συνδετήρα, δ
- το τμήμα $\Delta'N$ είναι ίσο με την ολίσθηση s της επιφάνειας της ρωγμής

Οπότε $\sin 45^\circ = \frac{w'}{\delta}$ άρα $w' = \delta \cdot \sin 45^\circ$

Το άνοιγμα της ρωγμής στον συνδετήρα ΓΕ θα είναι το μισό του ανοίγματος στον συνδετήρα ΑΒ διότι:

Η ρωγμή έχει συνολικό μήκος x και θεωρήθηκε πως η απόσταση των συνδετήρων είναι ίση με $d/2$. Αν θεωρήσουμε το παρακάτω σχήμα, από το ορθογώνιο τρίγωνο ΒΔΚ που σχηματίζεται προκύπτει ότι το μήκος της ρωγμής μεταξύ των δύο συνδετήρων είναι ίσο με:

$$ΒΔ = \sqrt{2} \cdot \frac{d}{2} = \frac{l}{2}$$



Σχήμα 2.23 Άνοιγμα ρωγμής συνδετήρα ΓΕ

Φυσικά βασική προϋπόθεση είναι η ρωγμή να τέμνει παραπάνω από τρεις συνδετήρες. Σε αντίθετη περίπτωση θεωρείται ότι η ρωγμή φτάνει μέχρι και τον τρίτο συνδετήρα με μηδενικό άνοιγμα.

Αν θεωρήσουμε το τρίγωνο NBM, προκύπτει ότι το συνολικό μήκος της ρωγμής είναι ίσο με

$$BM = \sqrt{2} \cdot d = l$$

Το ένα από τα δύο χείλη της ρωγμής θεωρείται ότι στρίβει ως προς το άλλο κατά γωνία θ . Οπότε ισχύει:

$$\epsilon\phi\theta = \frac{w}{l} \text{ άρα } w = l \cdot \epsilon\phi\theta = l \cdot \theta, \text{ επειδή η γωνία } \theta \text{ είναι πολύ μικρή, θεωρείται } \epsilon\phi\theta = \theta$$

$$\text{και } w' = \frac{l}{2} \cdot \theta \text{ άρα}$$

$$w' = \frac{w}{2}$$

Τέλος, θα πρέπει και πάλι η ολίσθηση στα σημεία Γ και Ε να είναι μηδενικές διότι ο συνδετήρας είναι καλά αγκυρωμένος στο θλιβόμενο και εφελκυσμένο σπλισμό αντίστοιχα. Δηλαδή:

$$3) s_{\Gamma} = s_E = 0 \text{ mm}$$

Έτσι έχει υπολογισθεί το άνοιγμα ρωγμής και η τάση στο σημείο Δ.

Αν δεν ισχύουν οι παραπάνω προϋποθέσεις επανέρχομαι στην αρχική υπόθεση της τάσης στο σημείο Γ και ακολουθείται επαναληπτική διαδικασία.

Σε περίπτωση που ικανοποιούνται συνεχίζεται η διαδικασία για το δεύτερο τμήμα του συνδετήρα.

Έχοντας γνωστή την τάση στο σημείο Δ' (καθώς απαιτήθηκε $\sigma_{s\Delta} = \sigma_{s\Delta'}$), υπολογίζεται η τάση στο πρώτο τμήμα του δεύτερου τμήματος του συνδετήρα ως εξής:

- Είναι γνωστό ότι $\sigma_{s\Delta} = \sigma_{s\Delta'}$.
- Γίνεται υπόθεση για την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο E του συνδετήρα, ενώ η παραμόρφωση και η ολίσθηση στο σημείο αυτό είναι μηδενικές διότι ο εφελκόμενος σπλισμός είναι αγκυρωμένος.
- Υπολογίζεται η τάση που αναπτύσσεται στο πρώτο τμήμα του συνδετήρα.

$$\sigma_{s1} = \sigma_{sE} + \frac{\tau \pi d \Delta x}{A_s}$$

Η τάση στο πρώτο τμήμα είναι αυξημένη σε σχέση με αυτή στο σημείο E κατά την τάση συνάφειας του πρώτου τμήματος.

- Έπειτα υπολογίζεται η παραμόρφωση που προκαλείται στο τέλος του πρώτου τμήματος του συνδετήρα.

$$\epsilon_{s1} = \frac{\sigma_{s\Delta'}}{E_s}$$

- Γνωρίζοντας την παραμόρφωση αυτού, υπολογίζεται εν συνεχεία η ολίσθηση του τμήματος.

$$s_1 = \epsilon_{s1} \cdot \Delta_x$$

- Υπολογίζεται η τάση συνάφειας τ_{b1} από το διάγραμμα
- Συνεχίζοντας στο δεύτερο τμήμα του συνδετήρα υπολογίζουμε την τάση που αναπτύσσεται.

$$\sigma_{s2} = \sigma_{s1} + \frac{\tau \pi d \Delta x}{A_s}$$

- Έχοντας βρει την τάση στο δεύτερο τμήμα, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η παραμόρφωση του δεύτερου τμήματος:

$$\epsilon_{s2} = \frac{\sigma_{s2}}{E_s}$$

- Έπειτα υπολογίζεται η ολίσθηση του δεύτερου τμήματος:

$$s_2 = s_1 + \epsilon_{s2} \cdot \Delta_x$$

- Για την παραπάνω ολίσθηση σημειώνεται από το διάγραμμα η τάση συνάφειας που αναπτύσσεται στο δεύτερο τμήμα τ_{b2} .

- Στο τρίτο τμήμα η τάση που αναπτύσσεται θα είναι ίση με:

$$\sigma_{s3} = \sigma_{s2} + \frac{\tau_{\pi d} \Delta x}{A_s}$$

- Η παραμόρφωση που προκαλείται λόγω της τάσης σ_{s3} είναι:

$$\epsilon_{s3} = \frac{\sigma_{s3}}{E_s}$$

- Η ολίσθηση του τρίτου τμήματος είναι:

$$s_3 = s_2 + \epsilon_{s3} \cdot \Delta x$$

- Από το διάγραμμα σημειώνεται η τάση συνάφειας τ_{b3} .

- Η τάση που αναπτύσσεται στο τέταρτο τμήμα είναι ίση με:

$$\sigma_{s4} = \sigma_{s3} + \frac{\tau_{\pi d} \Delta x}{A_s}$$

- Η παραμόρφωση αυτού του τμήματος είναι:

$$\epsilon_{s4} = \frac{\sigma_{s4}}{E_s}$$

- Η ολίσθηση είναι:

$$s_4 = s_3 + \epsilon_{s4} \cdot \Delta x$$

- Η τάση συνάφειας είναι τ_{b4} .

- Στο τελευταίο τμήμα η τάση είναι:

$$\sigma_{s5} = \sigma_{s4} + \frac{\tau_{\pi d} \Delta x}{A_s}$$

- Η επιβαλλόμενη παραμόρφωση:

$$\epsilon_{s5} = \frac{\sigma_{s5}}{E_s}$$

- Η ολίσθηση:

$$s_5 = s_4 + \epsilon_{s5} \cdot \Delta x$$

Η τάση συνάφειας είναι τ_{b5}

Οπότε η τάση του σημείου E είναι:

$$\sigma_{S\Delta'} = \sigma_{S5} + \frac{\tau \pi d \Delta x}{A_S}$$

- Η επιβαλλόμενη παραμόρφωση:

$$\epsilon_{sE} = \frac{\sigma_{sE}}{E_S}$$

- Η ολίσθηση:

$$s_E = s_S + \epsilon_{sE} \cdot \Delta_x$$

Η ολίσθηση στο σημείο E πρέπει να προκύψει μηδενική.

- Η τάση συνάφειας είναι τ_{bE} .

Εφαρμογή σε τρία δοκίμια από εκείνα που εξέτασε ο Δ.Μπισκίνης

- Το πρώτο δοκίμιο έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Αποτελεί το test_462. Το υποσύλωμα έχει μήκος διάτμησης $L_s=500\text{mm}$, πλάτος κορμού $b=200\text{mm}$, ύψος διατομής $h=200\text{mm}$, στατικό ύψος $d=170\text{mm}$, συνολικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού $\rho_{\text{tot}}=3\%$, τάση διαρροής διαμήκους οπλισμού $f_{yl}=359\text{MPa}$, διάμετρος ράβδων διαμήκους οπλισμού $d_{bl}=19,5\text{mm}$, ποιότητα σκυροδέματος $f_c=22\text{MPa}$, διάμετρος ράβδων εγκάρσιου οπλισμού $d_{bw}=6,5\text{mm}$, απόσταση μεταξύ διαδοχικών συνδετήρων $s=70\text{mm}$, τάση διαρροής εγκάρσιου οπλισμού $f_{yw}=318\text{MPa}$, ανηγμένο αξονικό φορτίο $\nu=0,45$. Υπόκειται σε ανακυκλική φόρτιση και παρατηρήθηκε ολίσθηση των ράβδων. Αστόχησε σε πλάστιμη διατμητική αστοχία λόγω διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού.

Συνδετήρας AB:

Υποθέτουμε τάση στο σημείο A ίση με 140MPa .

Γίνεται υπόθεση για την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο A.

$$\sigma_{sA}=140\text{MPa}, \varepsilon_A=0, s_A=0\text{mm}$$

Τμήμα 1

$$\sigma_{s1}=140\text{MPa}$$

$$\varepsilon_{s1}=\frac{\sigma_{sA}}{E_s}=\frac{140}{200000}=0.0007$$

$$s_1=\varepsilon_{s1}\cdot\Delta_x=0,0007\cdot 28\text{mm}=0.0196\text{mm}$$

$$\tau_{b1}=1.4\text{MPa}$$

Τμήμα 2

$$\sigma_{s2}=\sigma_{sA}+\frac{1.4\cdot\pi\cdot 6,5\cdot 28}{A_s}=164,30\text{MPa}, \text{ όπου } A_s=\pi\cdot d^2/4=\pi\cdot 6,5^2/4=33,17\text{mm}^2$$

$$\varepsilon_{s2}=\frac{\sigma_{s2}}{E_s}=\frac{164,3}{200000}=0.00082$$

$$s_2=s_1+\varepsilon_{s2}\cdot\Delta_x=0.0196+0.00082\cdot 28=0.042\text{mm}$$

$$\tau_{b2}=1,9 \text{ MPa}$$

Τμήμα 3

$$\sigma_{s3}=\sigma_{s2}+\frac{1,9 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 28}{33,17}=197,29 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s3}=\frac{\sigma_{s3}}{E_s}=\frac{197,29}{200000}=0,00098$$

$$s_3=s_2+\epsilon_{s3} \cdot \Delta_x=0,042+0,00098 \cdot 28=0,07 \text{ mm}$$

$$\tau_{b3}=2,2 \text{ MPa}$$

Τμήμα 4

$$\sigma_{s4}=\sigma_{s3}+\frac{2,2 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 28}{33,17}=235,48 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s4}=\frac{\sigma_{s4}}{E_s}=\frac{235,48}{200000}=0,0012$$

$$s_4=s_3+\epsilon_{s4} \cdot \Delta_x=0,07+0,0012 \cdot 28=0,1 \text{ mm}$$

$$\tau_{b4}=2,375 \text{ MPa}$$

Τμήμα 5

$$\sigma_{s5}=\sigma_{s4}+\frac{2,375 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 28}{33,17}=276,71 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s5}=\frac{\sigma_{s5}}{E_s}=\frac{276,71}{200000}=0,0014$$

$$s_5=s_4+\epsilon_{s5} \cdot \Delta_x=0,1+0,0014 \cdot 28=0,14 \text{ mm}$$

$$\tau_{b5}=2,45 \text{ MPa}$$

Η τάση του σημείου B είναι:

$$\sigma_{sB} = \sigma_{s5} + \frac{2,45 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 28}{33,17} = 319,24 \text{ MPa} \approx 318 \text{ MPa} = \text{τάση διαρροής εγκάρσιου σπλισμού.}$$

$$\epsilon_{sB} = \frac{\sigma_{sB}}{E_s} = \frac{319,24}{200000} = 0,0016$$

$$s_B = s_5 + \epsilon_{sB} \cdot \Delta_x = 0,14 + 0,0016 \cdot 28 = 0,19 \text{ mm}$$

Οπότε το άνοιγμα της ρωγμής είναι:

$$w = \delta \cdot \sin 45 = 0,19 \cdot 0,707 = 0,158 \text{ mm}$$

Συνδετήρας ΓΕ:

Γίνεται υπόθεση για την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο Γ.

$$\sigma_{s\Gamma} = 80 \text{ MPa}, \epsilon_r = 0, s_r = 0 \text{ mm}$$

Τμήμα 1

$$\sigma_{s1} = \sigma_{s\Gamma} + \frac{0 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{A_s} = 80 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s1} = \frac{\sigma_{s1}}{E_s} = \frac{80}{200000} = 0,0004$$

$$s_1 = \epsilon_{s1} \cdot \Delta_x = 0,0004 \cdot 14 \text{ mm} = 0,0056 \text{ mm}$$

$$\tau_{b1} = 0,95 \text{ MPa}$$

Τμήμα 2

$$\sigma_{s2} = \sigma_{s1} + \frac{0,95 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{A_s} = 88,24 \text{ MPa}, \text{ όπου } A_s = \pi \cdot d^2 / 4 = \pi \cdot 170^2 / 4 = 33,17 \text{ mm}^2$$

$$\epsilon_{s2} = \frac{\sigma_{s2}}{E_s} = \frac{88,24}{200000} = 0,00044$$

$$s_2 = s_1 + \epsilon_{s2} \cdot \Delta_x = 0,0056 + 0,00044 \cdot 14 = 0,012 \text{ mm}$$

$$\tau_{b2}=1,1 \text{ MPa}$$

Τμήμα 3

$$\sigma_{s3}=\sigma_{s2}+\frac{1,1 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{33,17}=97,79 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s3}=\frac{\sigma_{s3}}{E_s}=\frac{97,79}{200000}=0,00049$$

$$s_3=s_2+\epsilon_{s3} \cdot \Delta_x=0,012+0,00049 \cdot 14=0,019 \text{ mm}$$

$$\tau_{b3}=1,4 \text{ MPa}$$

Τμήμα 4

$$\sigma_{s4}=\sigma_{s3}+\frac{1,4 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{33,17}=109,95 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s4}=\frac{\sigma_{s4}}{E_s}=\frac{109,95}{200000}=0,00055$$

$$s_4=s_3+\epsilon_{s4} \cdot \Delta_x=0,019+0,00055 \cdot 14=0,026 \text{ mm}$$

$$\tau_{b4}=1,55 \text{ MPa}$$

Τμήμα 5

$$\sigma_{s5}=\sigma_{s4}+\frac{1,55 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{33,17}=123,4 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s5}=\frac{\sigma_{s5}}{E_s}=\frac{123,4}{200000}=0,000617$$

$$s_5=s_4+\epsilon_{s5} \cdot \Delta_x=0,026+0,000617 \cdot 14=0,035 \text{ mm}$$

$$\tau_{b5}=1,8 \text{ MPa}$$

Η τάση του σημείου Δ είναι:

$$\sigma_{s\Delta} = \sigma_{s5} + \frac{1.8 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{33,17} = 139,02 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{\Delta} = \frac{\sigma_{s\Delta}}{E_s} = \frac{139,02}{200000} = 0,00069$$

$$s_{\Delta} = s_5 + \varepsilon_{s\Delta} \cdot \Delta_x = 0,035 + 0,00069 \cdot 14 = 0,045 \text{ mm}$$

Στο σημείο αυτό θεωρείται ότι ισχύουν οι τρεις προϋποθέσεις που ορίστηκαν παραπάνω:

✓ $\sigma_{s\Delta} = \sigma_{s\Delta'} = 139,02 \text{ MPa}$

✓ $\delta_{\Gamma\Delta} \cdot \sin 45^\circ + \delta_{E\Delta'} \cdot \sin 45^\circ = w' = \frac{w}{2} = \frac{0,158}{2} = 0,079 \text{ mm}$

άρα η το άνοιγμα ρωγμής που θα προκαλείται από κάθε τμήμα του συνδετήρα είναι $w_1 = w_2 = \frac{0,079}{2} = 0,0395 \text{ mm}$, εφόσον τα δύο τμήματα του συνδετήρα έχουν ίσο μήκος.

✓ $s_f = s_E = 0 \text{ mm}$

Εφόσον ικανοποιούνται, συνεχίζεται η ίδια διαδικασία για το δεύτερο τμήμα του συνδετήρα.

Γίνεται υπόθεση για την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο Ε.

$$\sigma_{sE} = 80 \text{ MPa}, \varepsilon_E = 0, s_E = 0 \text{ mm}$$

Τμήμα 1

$$\sigma_{s1} = \sigma_{sE} + \frac{0 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{A_s} = 80 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{\sigma_{s1}}{E_s} = \frac{80}{200000} = 0,0004$$

$$s_1 = \varepsilon_{s1} \cdot \Delta_x = 0,0004 \cdot 14 \text{ mm} = 0,0056 \text{ mm}$$

$$\tau_{b1} = 0,95 \text{ MPa}$$

Τμήμα 2

$$\sigma_{s2} = \sigma_{s1} + \frac{0.95 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{A_s} = 88.24 \text{ MPa}, \text{ όπου } A_s = \pi \cdot d^2 / 4 = \pi \cdot 6,5^2 / 4 = 33,17 \text{ mm}^2$$

$$\epsilon_{s2} = \frac{\sigma_{s2}}{E_s} = \frac{88.24}{200000} = 0.00044$$

$$s_2 = s_1 + \epsilon_{s2} \cdot \Delta_x = 0.0056 + 0.00044 \cdot 14 = 0.012 \text{ mm}$$

$$\tau_{b2} = 1,1 \text{ MPa}$$

Τμήμα 3

$$\sigma_{s3} = \sigma_{s2} + \frac{1,1 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{33,17} = 97.79 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s3} = \frac{\sigma_{s3}}{E_s} = \frac{97.79}{200000} = 0,00049$$

$$s_3 = s_2 + \epsilon_{s3} \cdot \Delta_x = 0,012 + 0,00049 \cdot 14 = 0,019 \text{ mm}$$

$$\tau_{b3} = 1.4 \text{ MPa}$$

Τμήμα 4

$$\sigma_{s4} = \sigma_{s3} + \frac{1,4 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{33,17} = 109.95 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s4} = \frac{\sigma_{s4}}{E_s} = \frac{109.95}{200000} = 0,00055$$

$$s_4 = s_3 + \epsilon_{s4} \cdot \Delta_x = 0,019 + 0,00055 \cdot 14 = 0,026 \text{ mm}$$

$$\tau_{b4} = 1.55 \text{ MPa}$$

Τμήμα 5

$$\sigma_{s5} = \sigma_{s4} + \frac{1.55 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{33,17} = 123.4 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s5} = \frac{\sigma_{s5}}{E_s} = \frac{123.4}{200000} = 0,000617$$

$$s_5 = s_4 + \varepsilon_{s5} \cdot \Delta_x = 0,026 + 0,000617 \cdot 14 = 0,035 \text{ mm}$$

$$\tau_{b5} = 1.8 \text{ MPa}$$

Η τάση του σημείου Δ' είναι:

$$\sigma_{s\Delta'} = \sigma_{s5} + \frac{1.8 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{33,17} = 139.02 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{\Delta'} = \frac{\sigma_{s\Delta'}}{E_s} = \frac{139.02}{200000} = 0,00069$$

$$s_{\Delta'} = s_5 + \varepsilon_{s\Delta'} \cdot \Delta_x = 0,035 + 0,00069 \cdot 14 = 0,045 \text{ mm}$$

Οπότε ικανοποιούνται όλες οι προϋποθέσεις και τελικά το άνοιγμα της ρωγμής στην θέση του συνδετήρα AB είναι:

$$w = 0.16 \text{ mm}$$

ενώ στην θέση του δεύτερου συνδετήρα είναι:

$$w' = 0.079 \text{ mm}$$

Έχοντας υπολογίσει το άνοιγμα της ρωγμής w' είναι εύκολο να υπολογισθεί η διατμητική ολίσθηση s της επιφάνειας της ρωγμής. Από το τρίγωνο ΔΔ'Ν έχουμε:

$$\varepsilon_{\phi 45^\circ} = \frac{w'}{s}$$

άρα

$$w' = s = 0.079 \text{ mm}$$

➤ Εφαρμογή στο δεύτερο δοκίμιο

Το δεύτερο δοκίμιο που εξετάζεται έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Αποτελεί το test_373. Το υποστύλωμα έχει μήκος διάτμησης $L_s=500\text{mm}$, πλάτος κορμού $b=200\text{mm}$, ύψος διατομής $h=200\text{mm}$, στατικό ύψος $d=170\text{mm}$, συνολικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού $\rho_{\text{tot}}=2\%$, τάση διαρροής διαμήκους οπλισμού $f_{yt}=525\text{MPa}$, διάμετρος ράβδων διαμήκους οπλισμού $d_{bl}=16\text{mm}$, ποιότητα σκυροδέματος $f_c=20,4\text{MPa}$, διάμετρος ράβδων εγκάρσιου οπλισμού $d_{bw}=6,5\text{mm}$, απόσταση μεταξύ διαδοχικών συνδετήρων $s=70\text{mm}$, τάση διαρροής εγκάρσιου οπλισμού $f_{yw}=352\text{MPa}$, ανηγμένο αξονικό φορτίο $\nu=0,19$. Υπόκειται σε ανακυκλική φόρτιση και παρατηρήθηκε ολίσθηση των ράβδων. Αστόχησε σε πλάστικη διατμητική αστοχία λόγω διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού.

Συνδετήρας AB:

Υποθέτουμε τάση στο σημείο A ίση με 170MPa .

Γίνεται υπόθεση για την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο A.

$$\sigma_{sA}=170\text{MPa}, \varepsilon_A=0, s_A=0\text{ mm}$$

Τμήμα 1

$$\sigma_{s1}=170\text{MPa}$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{\sigma_{sA}}{E_s} = \frac{170}{200000} = 0.00085$$

$$s_1 = \varepsilon_{s1} \cdot \Delta_x = 0,00085 \cdot 28\text{mm} = 0.0238\text{mm}$$

$$\tau_{b1}=1.4\text{MPa}$$

Τμήμα 2

$$\sigma_{s2} = \sigma_{sA} + \frac{1.4 \cdot \pi \cdot 6.5 \cdot 28}{A_s} = 194,3\text{MPa}, \text{ όπου } A_s = \pi \cdot d^2 / 4 = \pi \cdot 6.5^2 / 4 = 12,56\text{ mm}^2$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{\sigma_{s2}}{E_s} = \frac{194,3}{200000} = 0.00097$$

$$s_2 = s_1 + \varepsilon_{s2} \cdot \Delta_x = 0.0238 + 0.00097 \cdot 28 = 0.05\text{mm}$$

$$\tau_{b2}=2 \text{ MPa}$$

Τμήμα 3

$$\sigma_{s3}=\sigma_{s2}+\frac{2\cdot\pi\cdot 6.5\cdot 28}{33.17}=229,04 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s3}=\frac{\sigma_{s3}}{E_s}=\frac{229,04}{200000}=0,0011$$

$$s_3=s_2+\epsilon_{s3}\cdot\Delta_x=0,05+0,0011\cdot 28=0,083\text{mm}$$

$$\tau_{b3}=2.3\text{MPa}$$

Τμήμα 4

$$\sigma_{s4}=\sigma_{s3}+\frac{2,3\cdot\pi\cdot 6.5\cdot 28}{33.17}=268,95 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s4}=\frac{\sigma_{s4}}{E_s}=\frac{268,95}{200000}=0,0013$$

$$s_4=s_3+\epsilon_{s4}\cdot\Delta_x=0,083+0,0013\cdot 28=0,12\text{mm}$$

$$\tau_{b4}=2,375 \text{ MPa}$$

Τμήμα 5

$$\sigma_{s5}=\sigma_{s4}+\frac{2,375\cdot\pi\cdot 6.5\cdot 28}{33.17}=310,182 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s5}=\frac{\sigma_{s5}}{E_s}=\frac{310,182}{200000}=0,0016$$

$$s_5=s_4+\epsilon_{s5}\cdot\Delta_x=0,12+0,0016\cdot 28=0,16\text{mm}$$

$$\tau_{b5}=2,45\text{MPa}$$

Η τάση του σημείου Β είναι:

$$\sigma_{sB} = \sigma_{s5} + \frac{2,45 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 28}{33,17} = 352,71 \text{ MPa} \approx 352 \text{ MPa} = \text{τάση διαρροής εγκάρσιου σπλισμού.}$$

$$\varepsilon_{sB} = \frac{\sigma_{sB}}{E_s} = \frac{352,71}{200000} = 0,0018$$

$$s_B = s_5 + \varepsilon_{sB} \cdot \Delta_x = 0,16 + 0,0018 \cdot 28 = 0,21 \text{ mm}$$

Οπότε το άνοιγμα της ρωγμής είναι:

$$w = \delta \cdot \sin 45 = 0,21 \cdot 0,707 = 0,18 \text{ mm}$$

Συνδετήρας ΓΕ:

Γίνεται υπόθεση για την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο Γ.

$$\sigma_{s\Gamma} = 100 \text{ MPa}, \varepsilon_r = 0, s_r = 0 \text{ mm}$$

Τμήμα 1

$$\sigma_{s1} = \sigma_{s\Gamma} + \frac{0 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{A_s} = 100 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{\sigma_{s1}}{E_s} = \frac{100}{200000} = 0,0005$$

$$s_1 = \varepsilon_{s1} \cdot \Delta_x = 0,0005 \cdot 14 \text{ mm} = 0,007 \text{ mm}$$

$$\tau_{b1} = 0,95 \text{ MPa}$$

Τμήμα 2

$$\sigma_{s2} = \sigma_{s1} + \frac{0,95 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{A_s} = 108,246 \text{ MPa}, \text{ όπου } A_s = \pi \cdot d^2 / 4 = \pi \cdot 6,5^2 / 4 = 33,17$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{\sigma_{s2}}{E_s} = \frac{108,246}{200000} = 0,00054$$

$$s_2 = s_1 + \varepsilon_{s2} \cdot \Delta_x = 0,007 + 0,00054 \cdot 14 = 0,015 \text{ mm}$$

$$\tau_{b2}=1,2 \text{ MPa}$$

Τμήμα 3

$$\sigma_{s3}=\sigma_{s2}+\frac{1,2\cdot\pi\cdot 6,5\cdot 14}{33,17}=118,66 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s3}=\frac{\sigma_{s3}}{E_s}=\frac{118,66}{200000}=0,00059$$

$$s_3=s_2+\epsilon_{s3}\cdot\Delta_x=0,015+0,00059\cdot 14=0,022\text{mm}$$

$$\tau_{b3}=1.4 \text{ MPa}$$

Τμήμα 4

$$\sigma_{s4}=\sigma_{s3}+\frac{1,4\cdot\pi\cdot 6,5\cdot 14}{33,17}=130,81 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s4}=\frac{\sigma_{s4}}{E_s}=\frac{130,81}{200000}=0,00065$$

$$s_4=s_3+\epsilon_{s4}\cdot\Delta_x=0,022+0,00065\cdot 14=0,03\text{mm}$$

$$\tau_{b4}=1,7\text{MPa}$$

Τμήμα 5

$$\sigma_{s5}=\sigma_{s4}+\frac{1,7\cdot\pi\cdot 6,5\cdot 14}{33,17}=145,57\text{MPa}$$

$$\epsilon_{s5}=\frac{\sigma_{s5}}{E_s}=\frac{145,57}{200000}=0,00072$$

$$s_5=s_4+\epsilon_{s5}\cdot\Delta_x=0,03+0,00072\cdot 14=0,04\text{mm}$$

$$\tau_{b5}=1,9 \text{ MPa}$$

Η τάση του σημείου Δ είναι:

$$\sigma_{s\Delta} = \sigma_{s5} + \frac{1,9 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{33,17} = 162,06 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{\Delta} = \frac{\sigma_{s\Delta}}{E_s} = \frac{162,06}{200000} = 0,00081$$

$$s_{\Delta} = s_5 + \varepsilon_{s\Delta} \cdot \Delta_x = 0,04 + 0,00081 \cdot 14 = 0,053 \text{ mm}$$

Στο σημείο αυτό θεωρείται ότι ισχύουν οι τρεις προϋποθέσεις που ορίστηκαν παραπάνω:

✓ $\sigma_{s\Delta} = \sigma_{s\Delta'} = 162,06 \text{ MPa}$

✓ $\delta_{r\Delta} \cdot \sin 45^\circ + \delta_{e\Delta'} \cdot \sin 45^\circ = w' = \frac{w}{2} = \frac{0,18}{2} = 0,09 \text{ mm}$

άρα η το άνοιγμα ρωγμής που θα προκαλείται από κάθε τμήμα του συνδετήρα είναι $w_1 = w_2 = \frac{0,09}{2} = 0,045 \text{ mm}$, εφόσον θεωρήθηκε ότι τα δύο τμήματα του συνδετήρα έχουν 'σο μήκος.

✓ $s_f = s_e = 0 \text{ mm}$

Εφόσον ικανοποιούνται, συνεχίζεται η ίδια διαδικασία για το δεύτερο τμήμα του συνδετήρα.

Γίνεται υπόθεση για την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο Γ.

$$\sigma_{sE} = 100 \text{ MPa}, \varepsilon_E = 0, s_E = 0 \text{ mm}$$

Τμήμα 1

$$\sigma_{s1} = \sigma_{sE} + \frac{0 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{A_s} = 100 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{\sigma_{s1}}{E_s} = \frac{100}{200000} = 0,0005$$

$$s_1 = \varepsilon_{s1} \cdot \Delta_x = 0,0005 \cdot 14 \text{ mm} = 0,007 \text{ mm}$$

$$\tau_{b1} = 0,95 \text{ MPa}$$

Τμήμα 2

$$\sigma_{s2} = \sigma_{s1} + \frac{0,95 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{A_s} = 108,246 \text{ MPa}, \text{ όπου } A_s = \pi \cdot d^2 / 4 = \pi \cdot 6,5^2 / 4 = 33,17$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{\sigma_{s2}}{E_s} = \frac{108,246}{200000} = 0,00054$$

$$s_2 = s_1 + \varepsilon_{s2} \cdot \Delta_x = 0,007 + 0,00054 \cdot 14 = 0,015 \text{ mm}$$

$$\tau_{b2} = 1,2 \text{ MPa}$$

Τμήμα 3

$$\sigma_{s3} = \sigma_{s2} + \frac{1,2 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{33,17} = 118,66 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s3} = \frac{\sigma_{s3}}{E_s} = \frac{118,66}{200000} = 0,00059$$

$$s_3 = s_2 + \varepsilon_{s3} \cdot \Delta_x = 0,015 + 0,00059 \cdot 14 = 0,022 \text{ mm}$$

$$\tau_{b3} = 1,4 \text{ MPa}$$

Τμήμα 4

$$\sigma_{s4} = \sigma_{s3} + \frac{1,4 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{33,17} = 130,81 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s4} = \frac{\sigma_{s4}}{E_s} = \frac{130,81}{200000} = 0,00065$$

$$s_4 = s_3 + \varepsilon_{s4} \cdot \Delta_x = 0,022 + 0,00065 \cdot 14 = 0,03 \text{ mm}$$

$$\tau_{b4} = 1,7 \text{ MPa}$$

Τμήμα 5

$$\sigma_{s5} = \sigma_{s4} + \frac{1,7 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{33,17} = 145,57 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s5} = \frac{\sigma_{s5}}{E_s} = \frac{145,57}{200000} = 0,00072$$

$$s_5 = s_4 + \varepsilon_{s5} \cdot \Delta x = 0,03 + 0,00072 \cdot 14 = 0,04 \text{ mm}$$

$$\tau_{b5} = 1,9 \text{ MPa}$$

Η τάση του σημείου Δ είναι:

$$\sigma_{s\Delta} = \sigma_{s5} + \frac{1,9 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 14}{33,17} = 162,06 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{\Delta} = \frac{\sigma_{s\Delta}}{E_s} = \frac{162,06}{200000} = 0,00081$$

$$s_{\Delta} = s_5 + \varepsilon_{s\Delta} \cdot \Delta x = 0,04 + 0,00081 \cdot 14 = 0,085 \text{ mm}$$

Οπότε ικανοποιούνται όλες οι προϋποθέσεις και τελικά το άνοιγμα της ρωγμής στην θέση του συνδετήρα AB είναι:

$$w = 0.18 \text{ mm}$$

ενώ στην θέση του δεύτερου συνδετήρα είναι

$$w' = 0.09 \text{ mm}$$

Έχοντας υπολογίσει το άνοιγμα της ρωγμής w' είναι εύκολο να υπολογισθεί η διατμητική ολίσθηση s της επιφάνειας της ρωγμής. Από το τρίγωνο $\Delta\Delta'N$ έχουμε:

$$\varepsilon_{\phi 45^\circ} = \frac{w'}{s}$$

άρα

$$w' = s = 0.09 \text{ mm}$$

➤ Εφαρμογή στο τρίτο δοκίμιο

Το τρίτο δοκίμιο που εξετάζεται έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Αποτελεί το test_3CMD12. Το υποστυλωμα έχει μήκος διάτμησης $L_s=1473\text{mm}$, πλάτος κορμού $b=457\text{mm}$, ύψος διατομής $h=457\text{mm}$, στατικό ύψος $d=381\text{mm}$, συνολικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού $\rho_{\text{tot}}=3\%$, τάση διαρροής διαμήκους οπλισμού $f_{yl}=331\text{MPa}$, διάμετρος ράβδων διαμήκους οπλισμού $d_{bl}=31.8\text{mm}$, ποιότητα σκυροδέματος $f_c=27.7\text{MPa}$, διάμετρος ράβδων εγκάρσιου οπλισμού $d_{bw}=9.5\text{mm}$, απόσταση μεταξύ διαδοχικών συνδετήρων $s=190.5\text{mm}$, τάση διαρροής εγκάρσιου οπλισμού $f_{yw}=400\text{MPa}$, ανηγμένο αξονικό φορτίο $\nu=0,26$. Υπόκειται σε ανακυκλική φόρτιση και παρατηρήθηκε ολίσθηση των ράβδων. Αστόχησε σε πλάστιμη διατμητική αστοχία λόγω διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού.

Συνδετήρας AB:

Υποθέτουμε τάση στο σημείο A ίση με 90 MPa.

Γίνεται υπόθεση για την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο A.

$$\sigma_{sA}=90\text{MPa}, \varepsilon_A=0, s_A=0\text{ mm}$$

Τμήμα 1

$$\sigma_{s1}=90\text{MPa}$$

$$\varepsilon_{s1}=\frac{\sigma_{sA}}{E_s}=\frac{90}{200000}=0.00045$$

$$s_1=\varepsilon_{s1}\cdot\Delta_x=0,00045\cdot 61\text{mm}=0.027\text{mm}$$

$$\tau_{b1}=1.7\text{MPa}$$

Τμήμα 2

$$\sigma_{s2}=\sigma_{sA}+\frac{1.7\cdot\pi\cdot 9.5\cdot 61}{A_s}=133.54\text{ MPa}, \text{ όπου } A_s=\pi\cdot d^2/4=\pi\cdot 9.5^2/4=70.84\text{ mm}^2$$

$$\varepsilon_{s2}=\frac{\sigma_{s2}}{E_s}=\frac{133.54}{200000}=0.00067$$

$$s_2=s_1+\varepsilon_{s2}\cdot\Delta_x=0.027+0.00067\cdot 61=0.068\text{mm}$$

$$\tau_{b2}=2.2 \text{ MPa}$$

Τμήμα 3

$$\sigma_{s3}=\sigma_{s2}+\frac{2.2 \cdot \pi \cdot 9.5 \cdot 61}{70.84}=189.92 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s3}=\frac{\sigma_{s3}}{E_s}=\frac{189.92}{200000}=0,00095$$

$$s_3=s_2+\epsilon_{s3} \cdot \Delta_x=0,068+0,00095 \cdot 61=0,126 \text{ mm}$$

$$\tau_{b3}=2.3 \text{ MPa}$$

Τμήμα 4

$$\sigma_{s4}=\sigma_{s3}+\frac{2,3 \cdot \pi \cdot 9.5 \cdot 61}{70.84}=248.84 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s4}=\frac{\sigma_{s4}}{E_s}=\frac{248.84}{200000}=0,00124$$

$$s_4=s_3+\epsilon_{s4} \cdot \Delta_x=0,126+0,00124 \cdot 61=0,202 \text{ mm}$$

$$\tau_{b4}=2,8 \text{ MPa}$$

Τμήμα 5

$$\sigma_{s5}=\sigma_{s4}+\frac{2,8 \cdot \pi \cdot 9.5 \cdot 61}{70.84}=320.58 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s5}=\frac{\sigma_{s5}}{E_s}=\frac{320.58}{200000}=0,0016$$

$$s_5=s_4+\epsilon_{s5} \cdot \Delta_x=0,202+0,0016 \cdot 61=0,299 \text{ mm}$$

$$\tau_{b5}=3.2 \text{ MPa}$$

Η τάση του σημείου B είναι:

$$\sigma_{sB} = \sigma_{s5} + \frac{3.2 \cdot \pi \cdot 9.5 \cdot 61}{70.84} = 402.56 \text{ MPa} \approx 400 \text{ MPa} = \text{τάση διαρροής εγκάρσιου οπλισμού.}$$

$$\epsilon_{sB} = \frac{\sigma_{sB}}{E_s} = \frac{402.56}{200000} = 0,002$$

$$s_B = s_5 + \epsilon_{sB} \cdot \Delta_x = 0,299 + 0,002 \cdot 61 = 0,42 \text{ mm}$$

Οπότε το άνοιγμα της ρωγμής είναι:

$$w = \delta \cdot \sin 45 = 0,42 \cdot 0,707 = 0,36 \text{ mm}$$

Συνδετήρας ΓΕ:

Γίνεται υπόθεση για την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο Γ.

$$\sigma_{s\Gamma} = 65 \text{ MPa}, \epsilon_{\Gamma} = 0, s_{\Gamma} = 0 \text{ mm}$$

Τμήμα 1

$$\sigma_{s1} = \sigma_{s\Gamma} + \frac{0 \cdot \pi \cdot 9.5 \cdot 30.5}{A_s} = 65 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s1} = \frac{\sigma_{s1}}{E_s} = \frac{65}{200000} = 0.000325$$

$$s_1 = \epsilon_{s1} \cdot \Delta_x = 0,000325 \cdot 30.5 \text{ mm} = 0.0099 \text{ mm}$$

$$\tau_{b1} = 1.1 \text{ MPa}$$

Τμήμα 2

$$\sigma_{s2} = \sigma_{s1} + \frac{1.1 \cdot \pi \cdot 9.5 \cdot 30.5}{A_s} = 79.091 \text{ MPa}, \text{ όπου } A_s = \pi \cdot d^2 / 4 = \pi \cdot 9.5^2 / 4 = 70.84$$

$$\epsilon_{s2} = \frac{\sigma_{s2}}{E_s} = \frac{79.091}{200000} = 0.00039$$

$$s_2 = s_1 + \epsilon_{s2} \cdot \Delta_x = 0.0099 + 0.00039 \cdot 30.5 = 0.022 \text{ mm}$$

$$\tau_{b2} = 1,4 \text{ MPa}$$

Τμήμα 3

$$\sigma_{s3} = \sigma_{s2} + \frac{1,4 \cdot \pi \cdot 9,5 \cdot 30,5}{70,84} = 97,025 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s3} = \frac{\sigma_{s3}}{E_s} = \frac{97,025}{200000} = 0,00048$$

$$s_3 = s_2 + \epsilon_{s3} \cdot \Delta_x = 0,022 + 0,00048 \cdot 30,5 = 0,037 \text{ mm}$$

$$\tau_{b3} = 1,8 \text{ MPa}$$

Τμήμα 4

$$\sigma_{s4} = \sigma_{s3} + \frac{1,8 \cdot \pi \cdot 9,5 \cdot 30,5}{70,84} = 120,083 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s4} = \frac{\sigma_{s4}}{E_s} = \frac{120,083}{200000} = 0,0006$$

$$s_4 = s_3 + \epsilon_{s4} \cdot \Delta_x = 0,037 + 0,0006 \cdot 30,5 = 0,055 \text{ mm}$$

$$\tau_{b4} = 2,05 \text{ MPa}$$

Τμήμα 5

$$\sigma_{s5} = \sigma_{s4} + \frac{2,05 \cdot \pi \cdot 9,5 \cdot 30,5}{70,84} = 146,34 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{s5} = \frac{\sigma_{s5}}{E_s} = \frac{146,34}{200000} = 0,00073$$

$$s_5 = s_4 + \epsilon_{s5} \cdot \Delta_x = 0,055 + 0,00073 \cdot 30,5 = 0,077 \text{ mm}$$

$$\tau_{b5} = 2,24 \text{ MPa}$$

Η τάση του σημείου Δ είναι:

$$\sigma_{s\Delta} = \sigma_{s5} + \frac{2,24 \cdot \pi \cdot 9,5 \cdot 30,5}{70,84} = 175,03 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{\Delta} = \frac{\sigma_{s\Delta}}{E_s} = \frac{175.03}{200000} = 0,00088$$

$$s_{\Delta} = s_5 + \varepsilon_{s\Delta} \cdot \Delta_x = 0,077 + 0,00088 \cdot 30.5 = 0,104 \text{ mm}$$

Στο σημείο αυτό θεωρείται ότι ισχύουν οι τρεις προϋποθέσεις που ορίστηκαν παραπάνω:

$$\checkmark \quad \sigma_{s\Delta} = \sigma_{s\Delta'} = 175.03 \text{ MPa}$$

$$\delta_{r\Delta} \cdot \sin 45^\circ + \delta_{e\Delta} \cdot \sin 45^\circ = w' = \frac{w}{2} = \frac{0.29}{2} = 0.0179 \text{ mm}$$

Άρα η το άνοιγμα ρωγμής που θα προκαλείται από κάθε τμήμα του συνδετήρα είναι $w_1 = w_2 = \frac{0.0179}{2} = 0.0089 \text{ mm}$, εφόσον θεωρήθηκε ότι τα δύο τμήματα του συνδετήρα έχουν 'σο μήκος.

$$\checkmark \quad s_f = s_e = 0 \text{ mm}$$

Εφόσον ικανοποιούνται, συνεχίζεται η ίδια διαδικασία για το δεύτερο τμήμα του συνδετήρα.

Γίνεται υπόθεση για την τάση που αναπτύσσεται στο σημείο E.

$$\sigma_{sE} = 65 \text{ MPa}, \quad \varepsilon_E = 0, \quad s_E = 0 \text{ mm}$$

Τμήμα 1

$$\sigma_{s1} = \sigma_{sr} + \frac{0 \cdot \pi \cdot 9.5 \cdot 30.5}{A_s} = 65 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s1} = \frac{\sigma_{s1}}{E_s} = \frac{65}{200000} = 0.000325$$

$$s_1 = \varepsilon_{s1} \cdot \Delta_x = 0,000325 \cdot 30.5 \text{ mm} = 0.0099 \text{ mm}$$

$$\tau_{b1} = 1.1 \text{ MPa}$$

Τμήμα 2

$$\sigma_{s2} = \sigma_{s1} + \frac{1.1 \cdot \pi \cdot 9.5 \cdot 30.5}{A_s} = 79.091 \text{ MPa}, \quad \text{όπου } A_s = \pi \cdot d^2 / 4 = \pi \cdot 9.5^2 / 4 = 70.84$$

$$\varepsilon_{s2} = \frac{\sigma_{s2}}{E_s} = \frac{79.091}{200000} = 0.00039$$

$$s_2 = s_1 + \varepsilon_{s2} \cdot \Delta x = 0.0099 + 0.00039 \cdot 30.5 = 0.022 \text{ mm}$$

$$\tau_{b2} = 1.4 \text{ MPa}$$

Τμήμα 3

$$\sigma_{s3} = \sigma_{s2} + \frac{1.4 \cdot \pi \cdot 9.5 \cdot 30.5}{70.84} = 97.025 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s3} = \frac{\sigma_{s3}}{E_s} = \frac{97.025}{200000} = 0.00048$$

$$s_3 = s_2 + \varepsilon_{s3} \cdot \Delta x = 0.022 + 0.00048 \cdot 30.5 = 0.037 \text{ mm}$$

$$\tau_{b3} = 1.8 \text{ MPa}$$

Τμήμα 4

$$\sigma_{s4} = \sigma_{s3} + \frac{1.8 \cdot \pi \cdot 9.5 \cdot 30.5}{70.84} = 120.083 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s4} = \frac{\sigma_{s4}}{E_s} = \frac{120.083}{200000} = 0.0006$$

$$s_4 = s_3 + \varepsilon_{s4} \cdot \Delta x = 0.037 + 0.0006 \cdot 30.5 = 0.055 \text{ mm}$$

$$\tau_{b4} = 2.05 \text{ MPa}$$

Τμήμα 5

$$\sigma_{s5} = \sigma_{s4} + \frac{2.05 \cdot \pi \cdot 9.5 \cdot 30.5}{70.84} = 146.34 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{s5} = \frac{\sigma_{s5}}{E_s} = \frac{146.34}{200000} = 0.00073$$

$$s_5 = s_4 + \varepsilon_{s5} \cdot \Delta x = 0.055 + 0.00073 \cdot 30.5 = 0.077 \text{ mm}$$

$$\tau_{b5} = 2.24 \text{ MPa}$$

Η τάση του σημείου Δ' είναι:

$$\sigma_{s\delta} := \sigma_{s5} + \frac{2,24 \cdot \pi \cdot 9,5 \cdot 30,5}{70,84} = 175,03 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{\Delta} := \frac{\sigma_{s\delta}}{E_s} = \frac{175,03}{200000} = 0,00088$$

$$s_{\Delta} := s_5 + \varepsilon_{s\Delta} \cdot \Delta_x = 0,077 + 0,00088 \cdot 30,5 = 0,104 \text{ mm}$$

Εφαρμογή της θεωρίας του J.C.Walraven στα τρία δοκίμια

Με αυτά τα δεδομένα είναι εύκολο από τις σχέσεις του J.C.Walraven να υπολογισθούν επιφάνειες A_x και A_y των αδρανών που αναλαμβάνουν την τέμνουσα δύναμη και έπειτα την δύναμη ΣF_x και ΣF_y που αναλαμβάνουν αυτά.

Η μέγιστη διάμετρος των αδρανών είναι:

$$D_{\max}=32\text{mm}$$

ενώ η ελάχιστη

$$D_{\min}=0\text{mm}$$

Υπολογίστηκαν οι επιφάνειες A_x και A_y . Τα ολοκληρώματα που εμφανίζονται στις σχέσεις του J.C.Walraven υπολογίστηκαν με τη βοήθεια της Fortran(ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ).

➤ Δοκίμιο1:

Από την παραπάνω διαδικασία προέκυψε για τον συνδετήρα AB:

$$w= 0,16 \text{ mm και } \Delta=0,16 \text{ mm}$$

Οπότε από το προσωμίομα του J.C.Walraven προκύπτει:

$$A_x=A_y=0.068378$$

Άρα

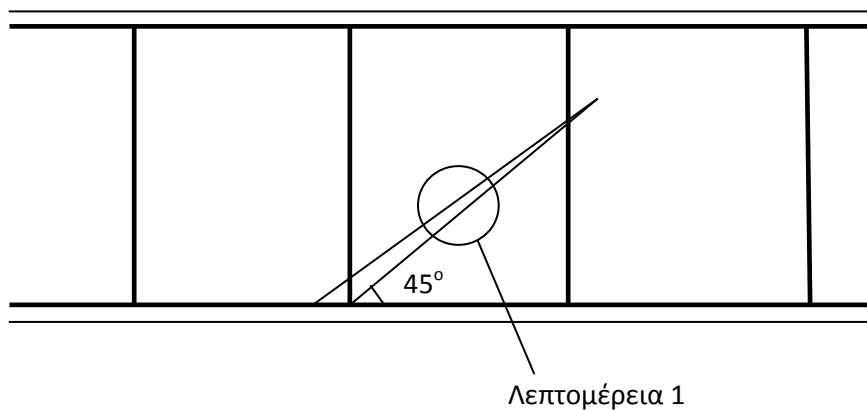
$$\Sigma F_y=\sigma_{pu}*(\Sigma_{ax}-\mu*\Sigma_{ay})=36,08*(0,068378-0,4*0,068378)=1.48\text{N}$$

$$\Sigma F_x=\sigma_{pu}*(\Sigma_{ay}+\mu*\Sigma_{ax})=36,08*(0,068378+0,4*0,068378)=3,46 \text{ N}$$

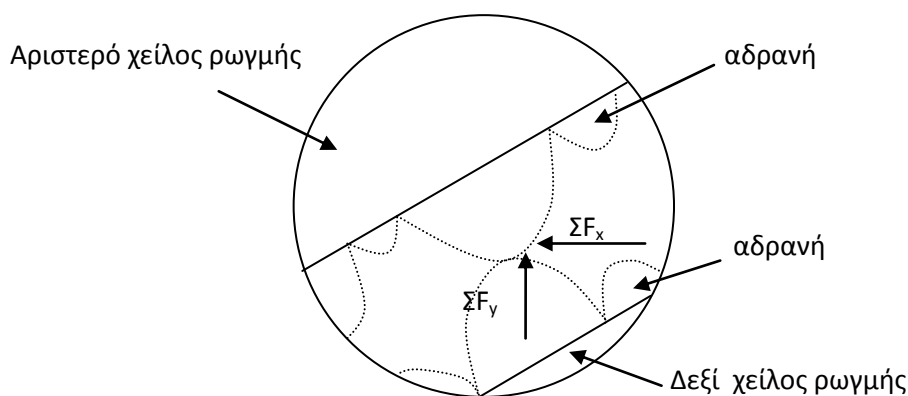
Όπου

$\sigma_{pu}=6.39*f_c^{0.56}=6.39*22^{0.56}=36,08\text{MPa}$ η ορθή τάση που ασκείται στην επιφάνεια επαφής των αδρανών λόγω της επαφής τους και

$\mu=0,4$, ο συντελεστής τριβής των επιφανειών, όπως αναλύθηκε στη θεωρία του J.C.Walraven.



Σχήμα 2.24 Διατμητική ρωγμή υπό γωνία 45°



Σχήμα 2.25 Λεπτομέρεια 1

Οι συνισταμένες των δυνάμεων ΣF_x και ΣF_y στην διεύθυνση κάθετα στην επιφάνεια της ρωγμής είναι ίσες με:

$$\Sigma F_y' = \Sigma F_y \cdot \cos 45^\circ = 1,48 \cdot \cos 45^\circ = 1,05 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x' = \Sigma F_x \cdot \cos 45^\circ = 3,46 \cdot \cos 45^\circ = 2,45 \text{ N}$$

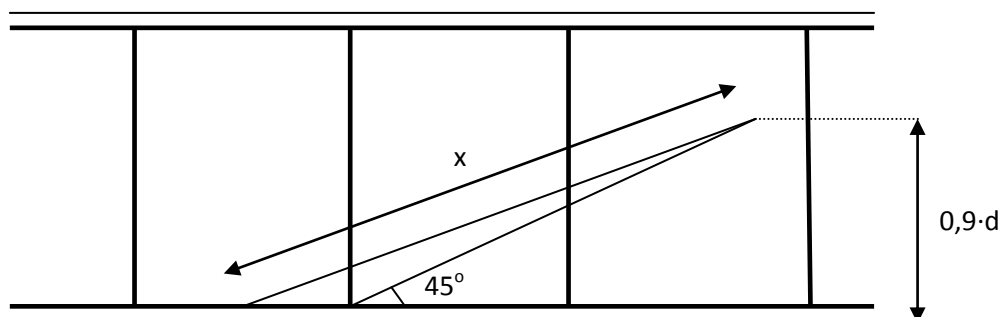
Οπότε η συνολική δύναμη που ασκείται στην διεύθυνση κάθετα στην επιφάνεια της ρωγμής είναι:

$$\Sigma F = \Sigma F_x' + \Sigma F_y' = 2,45 + 1,05 = 3,5 \text{ N}$$

Οι επιφάνειες που υπολογίστηκαν αποτελούν τις συνισταμένες της επιφάνειας επαφής των αδρανών που έρχονται σε επαφή και λόγω της αλληλεμπλοκής τους συνεισφέρουν στην ανάληψη τέμνουσας. Τα αδρανή βρίσκονται στα χείλη της ρωγμής, σε ένα τμήμα της δοκού μοναδιαίου πλάτους και μήκους. Προκειμένου να υπολογιστεί η επιφάνεια επαφής των

αδρανών σε όλη την επιφάνεια της ρωγμής είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η επιφάνεια της ρωγμής.

Γίνεται υπόθεση ότι το μήκος της ρωγμής είναι ίσο με x και ότι η ρωγμή φτάνει μέχρι ύψος $0,9 \cdot d$.



Σχήμα 2.26 Διαστάσεις διατμητικής ρωγμής

$$\sin 45 = \frac{0,9 \cdot d}{x}$$

άρα

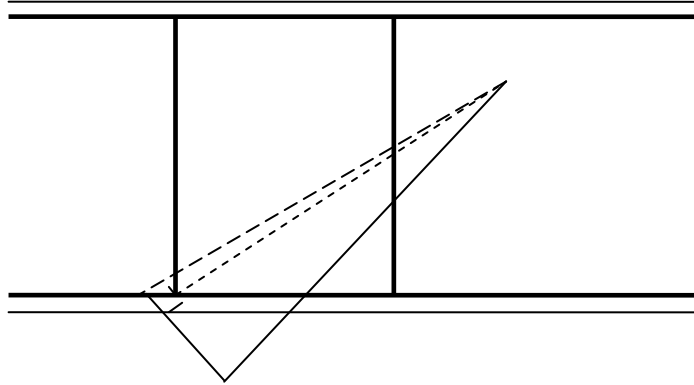
$$x = \frac{0,9 \cdot d}{\sin 45} = \frac{0,9 \cdot 170}{\sin 45} = 216,4 \text{ mm}$$

Οπότε η επιφάνεια της ρωγμής είναι:

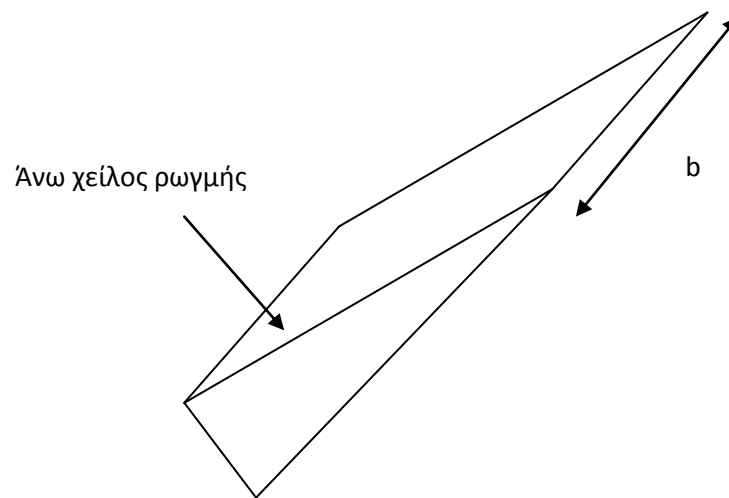
$$A = x \cdot b = 216,4 \text{ mm} \cdot 200 \text{ mm} = 43200 \text{ mm}^2$$

Οι δυνάμεις που αναλαμβάνουν τα αδρανή είναι μεγαλύτερες όσο μικρότερο είναι το άνοιγμα της ρωγμής διότι έτσι μπορούν να αδρανή να έρθουν σε επαφή. Δεδομένου ότι το άνοιγμα της ρωγμής είναι μεγαλύτερο στο σημείο τομής του εφελκόμενου οπλισμού με τον συνδετήρα και μικρότερο όσο πλησιάζουμε την θλιβόμενη ζώνη του δοκιμίου, η δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή αναμένεται να είναι μικρότερη στο σημείο τομής του εφελκόμενου οπλισμού με τον συνδετήρα και μεγαλύτερη όσο πλησιάζουμε τη θλιβόμενη ζώνη. Όμως επειδή η επιφάνεια της ρωγμής στο σημείο τομής του εφελκόμενου οπλισμού με τον συνδετήρα είναι μεγαλύτερη, η δύναμη που θα αναλαμβάνουν τελικά θα είναι μεγαλύτερη διότι είναι μεγαλύτερη η επιφάνεια αυτών. Θα υπολογιστεί η δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή σε ένα τμήμα του σκυροδέματος μοναδιαίου πλάτους και έπειτα θεωρώντας τριγωνική κατανομή των δυνάμεων που αναλαμβάνουν τα αδρανή θα υπολογιστεί η δύναμη σε όλη την επιφάνεια της ρωγμής. Φυσικά υπάρχει όριο για το άνοιγμα της ρωγμής πέραν του οποίου δεν υπάρχει αλληλεμπλοκή των αδρανών.

Μπορεί λοιπόν να θεωρηθεί πως η κατανομή των δυνάμεων που αναλαμβάνουν τα αδρανή είναι τριγωνική κατά μήκος της ρωγμής.



Σχήμα 2.27 Τριγωνική κατανομή δυνάμεων που αναλαμβάνουν τα αδρανή κατά μήκος της ρωγμής



Σχήμα 2.28 Προοπτικό τριγωνικής κατανομής δυνάμεων αδρανών

Άρα η συνολική δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή στην επιφάνεια της ρωγμής είναι.

$$\Sigma F_{\text{τελικό}} = \frac{\beta \cdot \alpha \cdot \eta}{2} \cdot \text{ύψος} = \frac{\Sigma F \cdot A}{2} = \frac{3,5 \cdot 43200}{2} = 75,60 \text{ kN}$$

Διαιρούμε με συντελεστή ασφάλειας 1,5 επειδή όλα τα παραπάνω αφορούν το σκυρόδεμα και έτσι προκύπτει.:

$$\frac{75,60}{1,5} = \mathbf{50,4 \text{ kN}}$$

Στο σημείο τομής της ρωγμής με τον δεύτερο συνδετήρα η δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή είναι:

Για $w=0,079\text{mm}$:

$$A_x = A_y = 0,07096$$

$$\Sigma F_y = \sigma_{pu} \cdot (\Sigma \alpha_x - \mu \cdot \Sigma \alpha_y) = 36,08 \cdot (0,07096 - 0,4 \cdot 0,07096) = 1,54 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x = \sigma_{\rho u} \cdot (\Sigma \alpha_y + \mu \cdot \Sigma \alpha_x) = 36,08 \cdot (0,07096 + 0,4 \cdot 0,07096) = 3,58 \text{ N}$$

$$\Sigma F_y' = \Sigma F_y \cdot \cos 45^\circ = 1,54 \cdot \cos 45^\circ = 1,09 \text{ N}$$

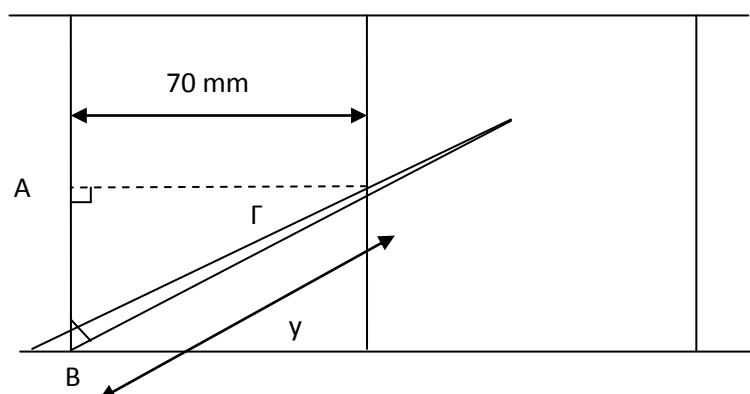
$$\Sigma F_x' = \Sigma F_x \cdot \cos 45^\circ = 3,58 \cdot \cos 45^\circ = 2,53 \text{ N}$$

$$\Sigma F = \Sigma F_x' + \Sigma F_y' = 2,53 + 1,09 = 3,62 \text{ N}$$

Το μήκος της ρωγμής μέχρι τον συνδετήρα ΓΕ υπολογίζεται ως εξής:

Η απόσταση των συνδετήρων είναι 70mm και εφόσον η γωνία της ρωγμής με τον συνδετήρα είναι 45° (από δικτύωμα Morsch), από το τρίγωνο ΑΒΓ που σχηματίζεται προκύπτει ότι το μήκος της ρωγμής από τον πρώτο συνδετήρα ΑΒ ,μέχρι τον δεύτερο ΓΕ, είναι γ=100mm. Άρα το μήκος της ρωγμής από τον δεύτερο συνδετήρα ΓΕ μέχρι και το τέλος της είναι: 216,4mm-100mm=116.4mm=x. Οπότε το εμβαδόν της ρωγμής είναι ίσο με $A = x \cdot b = 116,4 \cdot 200 = 23280 \text{ mm}^2$

$$\Sigma F_{\text{τελικό}} = \frac{\beta \cdot \alpha \eta}{2} \cdot \text{ύψος} = \frac{\Sigma F \cdot A}{2} = \frac{3,62 \cdot 23280}{2} = 42,1 \text{ kN/1,5} = \mathbf{28,09 \text{ kN}}$$



Σχήμα 2.29 Έυρεση μήκους ρωγμής

Όπως προκύπτει, η δύναμη μειώνεται. Δικαιολογείται έτσι η θεώρηση της τριγωνικής κατανομής της δύναμης που αναλαμβάνουν τα αδρανή.

Σε μία θέση της ρωγμής για ένα άνοιγμα ρωγμής w, η δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή είναι

$$F = \frac{\beta \cdot v}{2}$$

Όπου :

β είναι η βάση του τριγώνου για την τριγωνική κατανομή που θεωρήθηκε και είναι η δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή στο μοναδιαίου πλάτους τμήμα.

υ είναι το συνολικό εμβαδόν της ρωγμής.

Για ένα μικρότερο άνοιγμα ρωγμής στην ίδια θέση (όπου το u θα ήταν το ίδιο) θα προέκυπτε μεγαλύτερη δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή. Όμως επειδή αναζητείται η δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή για το άνοιγμα ρωγμής στη θέση όπου συναντάει τον δεύτερο συνδετήρα, όπου το u είναι μικρότερο, παρόλο που το άνοιγμα ρωγμής είναι μικρότερο, η δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή θα είναι μικρότερη.

➤ Δεύτερο δοκίμιο

Από τα παραπάνω προέκυψε:

$$w=0.18 \text{ mm και } \Delta=0.18 \text{ mm}$$

Οπότε από το προσωμίοωμα του J.C.Walraven προκύπτει:

$$A_x=A_y=0.06774 \text{ mm}^2$$

Άρα

$$\Sigma F_y = \sigma_{pu} \cdot (\Sigma \alpha_x - \mu \cdot \Sigma \alpha_y) = 34.58 \cdot (0,06774 - 0,4 \cdot 0,06774) = 1.40 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x = \sigma_{pu} \cdot (\Sigma \alpha_y + \mu \cdot \Sigma \alpha_x) = 34.58 \cdot (0,06774 + 0,4 \cdot 0,06774) = 3.28 \text{ N}$$

Όπου

$$\sigma_{pu} = 6.39 \cdot f_c^{0.56} = 6.39 \cdot 20,4^{0.56} = 34,58 \text{ MPa}$$

$$\mu = 0,4$$

Οι συνισταμένες των δυνάμεων ΣF_x και ΣF_y στην διεύθυνση κάθετα στην επιφάνεια της ρωγμής είναι ίσες με:

$$\Sigma F'_x = \Sigma F_x \cdot \cos 45^\circ = 3.28 \cdot \cos 45^\circ = 2.31 \text{ N}$$

$$\Sigma F'_y = \Sigma F_y \cdot \cos 45^\circ = 1.40 \cdot \cos 45^\circ = 0.99 \text{ N}$$

Οπότε η συνολική δύναμη που ασκείται στην διεύθυνση κάθετα στην επιφάνεια της ρωγμής είναι:

$$\Sigma F = \Sigma F'_x + \Sigma F'_y = 2.31 + 0.99 = 3.3 \text{ N}$$

Το μήκος της ρωγμής είναι:

$$x = \frac{0.9 \cdot d}{\sin 45} = \frac{0.9 \cdot 170}{\sin 45} = 216.4 \text{ mm}$$

Οπότε η επιφάνεια της ρωγμής είναι:

$$A = x \cdot b = 216,4 \text{ mm} \cdot 200 \text{ mm} = 43200 \text{ mm}^2$$

Άρα η συνολική δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή στην επιφάνεια της ρωγμής είναι.

$$\Sigma F_{\text{τελικό}} = \frac{\beta \acute{\alpha}\sigma\eta}{2} \cdot \acute{\upsilon}\psi\omicron\varsigma = \frac{\Sigma F \cdot A}{2} = \frac{3.3 \cdot 43200}{2} = 71.41 \text{ kN}$$

Διαιρούμε με συντελεστή ασφάλειας 1,5 επειδή όλα τα παραπάνω αφορούν το σκυρόδεμα και έτσι προκύπτει.:

$$\frac{71.41}{1.5} = \mathbf{47.61 \text{ kN}}$$

Στο σημείο τομής της ρωγμής με τον δεύτερο συνδετήρα η δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή είναι:

Για $w=0,09\text{mm}$:

$$A_x=A_y=0.07058$$

$$\Sigma F_y = \sigma_{pu} \cdot (\Sigma \alpha_x - \mu \cdot \Sigma \alpha_y) = 34.58 \cdot (0,07058 - 0,4 \cdot 0,07058) = 1.46 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x = \sigma_{pu} \cdot (\Sigma \alpha_y + \mu \cdot \Sigma \alpha_x) = 34.58 \cdot (0,07058 + 0,4 \cdot 0,07058) = 3.42 \text{ N}$$

$$\Sigma F'_y = \Sigma F_y \cdot \cos 45^\circ = 1.46 \cdot \cos 45^\circ = 1.03 \text{ N}$$

$$\Sigma F'_x = \Sigma F_x \cdot \cos 45^\circ = 3.42 \cdot \cos 45^\circ = 2.42 \text{ N}$$

$$\Sigma F = \Sigma F'_x + \Sigma F'_y = 2.42 + 1.03 = 3.45 \text{ N}$$

$$\Sigma F_{\text{τελικό}} = \frac{\beta \acute{\alpha}\sigma\eta}{2} \cdot \acute{\upsilon}\psi\omicron\varsigma = \frac{\Sigma F \cdot A}{2} = \frac{3.45 \cdot 23280}{2} = 40.16 \text{ kN}/1.5 = \mathbf{26.77 \text{ kN}}$$

➤ Τρίτο δοκίμιο

Από τα παραπάνω προέκυψε:

$$w=0.36 \text{ mm και } \Delta=0.36 \text{ mm}$$

Οπότε από το προσωμίοωμα του J.C.Walraven προκύπτει:

$$A_x=A_y=0.063$$

Άρα

$$\Sigma F_y = \sigma_{pu} \cdot (\Sigma \alpha_x - \mu \cdot \Sigma \alpha_y) = 35.25 \cdot (0,063 - 0,4 \cdot 0,063) = 1.33 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x = \sigma_{pu} \cdot (\Sigma \alpha_y + \mu \cdot \Sigma \alpha_x) = 35.25 \cdot (0,063 + 0,4 \cdot 0,063) = 3.11 \text{ N}$$

Όπου

$$\sigma_{pu} = 6.39 \cdot f_c^{0.56} = 6.39 \cdot 21.1^{0.56} = 35.25 \text{ MPa}$$

$$\mu = 0,4$$

Οι συνισταμένες των δυνάμεων ΣF_x και ΣF_y στην διεύθυνση κάθετα στην επιφάνεια της ρωγμής είναι ίσες με:

$$\Sigma F_x' = \Sigma F_x \cdot \cos 45^\circ = 3.11 \cdot \cos 45^\circ = 2.19 \text{ N}$$

$$\Sigma F_y' = \Sigma F_y \cdot \cos 45^\circ = 1.33 \cdot \cos 45^\circ = 0.94 \text{ N}$$

Οπότε η συνολική δύναμη που ασκείται στην διεύθυνση κάθετα στην επιφάνεια της ρωγμής είναι:

$$\Sigma F = \Sigma F_x' + \Sigma F_y' = 2.19 + 0.94 = 3.13 \text{ N}$$

Το μήκος της ρωγμής είναι:

$$x = \frac{0.9 \cdot d}{\sin 45} = \frac{0.9 \cdot 394}{\sin 45} = 501.56 \text{ mm}$$

Οπότε η επιφάνεια της ρωγμής είναι:

$$A = x \cdot b = 501.56 \text{ mm} \cdot 457 \text{ mm} = 229212.92 \text{ mm}^2$$

Άρα η συνολική δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή στην επιφάνεια της ρωγμής είναι.

$$\Sigma F_{\text{τελικό}} = \frac{\beta \acute{\alpha}\sigma\eta}{2} \cdot \acute{\upsilon}\psi\omicron\varsigma = \frac{\Sigma F \cdot A}{2} = \frac{3.13 \cdot 229212.92}{2}$$

Διαιρούμε με συντελεστή ασφάλειας 1,5 επειδή όλα τα παραπάνω αφορούν το σκυρόδεμα και έτσι προκύπτει.:

$$\frac{358.71}{1.5} = \mathbf{239.14 \text{ kN}}$$

Στο σημείο τομής της ρωγμής με τον δεύτερο συνδετήρα η δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή είναι:

Για $w = 0,18 \text{ mm}$:

$$A_x = A_y = 0.06774$$

$$\Sigma F_y = \sigma_{pu} \cdot (\Sigma \alpha_x - \mu \cdot \Sigma \alpha_y) = 35,25 \cdot (0,06774 - 0,4 \cdot 0,06774) = 1.43 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x = \sigma_{pu} \cdot (\Sigma \alpha_y + \mu \cdot \Sigma \alpha_x) = 35,25 \cdot (0,06774 + 0,4 \cdot 0,06774) = 3,34 \text{ N}$$

$$\Sigma F_y' = \Sigma F_y \cdot \cos 45^\circ = 1,43 \cdot \cos 45^\circ = 1,011 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x' = \Sigma F_x \cdot \cos 45^\circ = 3,34 \cdot \cos 45^\circ = 2,36 \text{ N}$$

$$\Sigma F = \Sigma F_x' + \Sigma F_y' = 2,36 + 1,011 = 3,371 \text{ N}$$

$$x = 222.92$$

$$A = 222.92 \cdot 457 = 101874.44 \text{ mm}^2$$

$$\Sigma F_{\text{τελικό}} = \frac{\beta \acute{\alpha}\sigma\eta}{2} \cdot \acute{\upsilon}\psi\omicron\varsigma = \frac{\Sigma F \cdot A}{2} = \frac{3,371 \cdot 101874.44}{2} = 171.7 \text{ kN} / 1,5 = \mathbf{114.47 \text{ kN}}$$

Το ανωτέρω αποτέλεσμα αποδεικνύει πως όσο μειώνεται το άνοιγμα της ρωγμής αυξάνεται η δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή και η κατανομή είναι σχεδόν τριγωνική.

2.1.2 Μηχανισμός τόξου

Λόγω της καμπτικής ροπής M αναπτύσσονται στη θλιβόμενη ζώνη του σκυροδέματος ορθές τάσεις σ_c ανάλογες της τιμής της ροπής. Λόγω της τέμνουσας V αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις τ . Η τιμή τους για αρηγμάτωση διατομή δίνεται από τη σχέση:

$$\tau = V_s \cdot S / (b \cdot J)$$

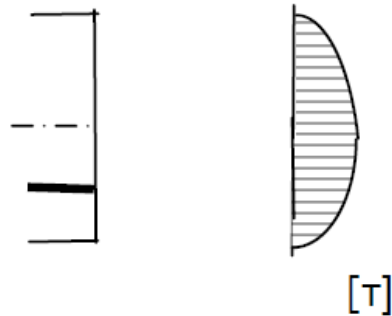
Όπου:

V_s η δρώσα τέμνουσα

S η στατική ροπή της διατομής στη στάθμη της τα

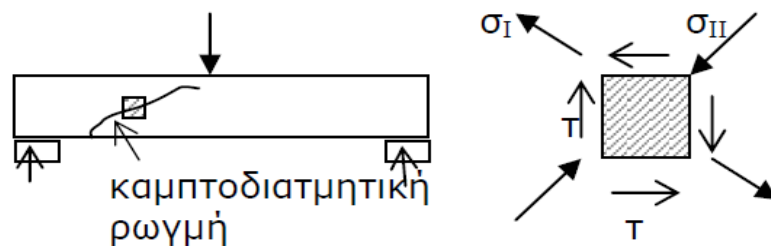
J η ροπή αδράνειας της διατομής

B το πλάτος της διατομής.



Σχήμα 2.30 Μορφή διαγράμματος διατμητικών τάσεων

Λόγω της συνύπαρξης των τάσεων σ και τ προκύπτει μια λοξή εφελκυστική τάση σ_I και μια λοξή θλιπτική τάση σ_{II} .

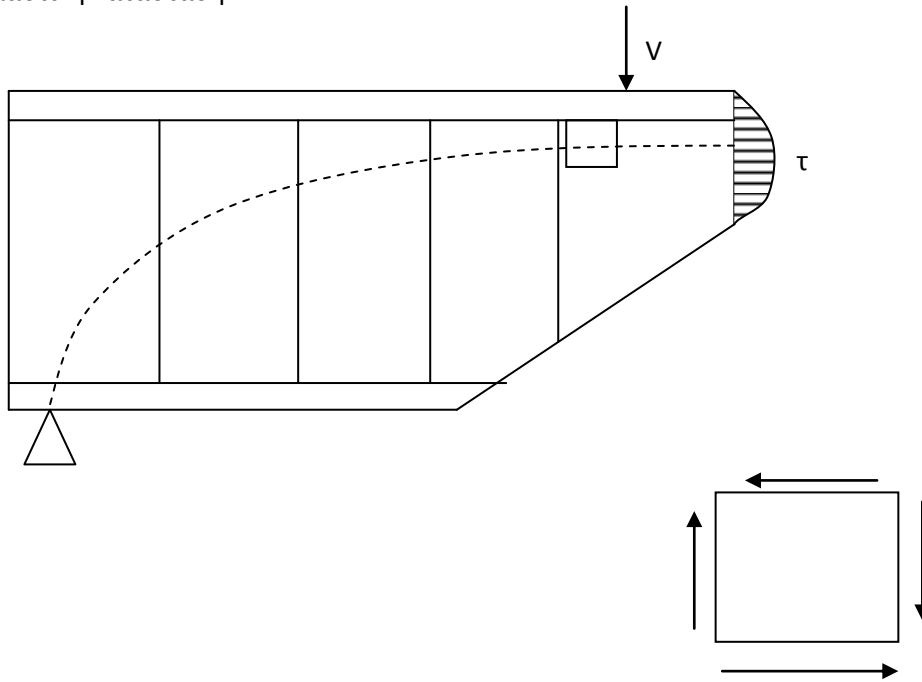


Σχήμα 2.31 Λοξές εφελκυστικές τάσεις σ_I και θλιπτικές σ_{II}

Οι τάσεις αυτές δημιουργούν ένα θλιπτήρα ο οποίος καταλήγει στη στήριξη του φορέα. Με τον τρόπο αυτό μεταφέρεται τέμνουσα μέσω ενός μηχανισμού τόξου απευθείας στη στήριξη του φορέα.

Η τέμνουσα που μεταφέρεται μέσω του μηχανισμού τόξου θα είναι μεγάλη αν το σημείο όπου ασκείται η τέμνουσα είναι κοντά στη στήριξη του φορέα, οπότε ο λόγος του μήκους διάτμησης προς το ύψος της διατομής Lv/h έχει μικρή τιμή δηλαδή πρόκειται για κοντό υποστύλωμα. Ενώ θα μεταφέρεται μικρό ποσοστό τέμνουσας αν η τέμνουσα ασκείται μακριά από τη στήριξη, δηλαδή αν ο λόγος Lv/h έχει μεγάλη τιμή και οπότε πρόκειται για κανονικό, ψηλό υποστύλωμα.

Η τέμνουσα που μεταφέρεται από το μηχανισμό αυτό μεταφέρεται μέσα από το σώμα της δοκού. Δεν είναι θέμα αδρανών διότι δεν έχει ανοίξει ακόμη η ρωγμή. Πρόκειται για οιονεί ελαστική κατάσταση.



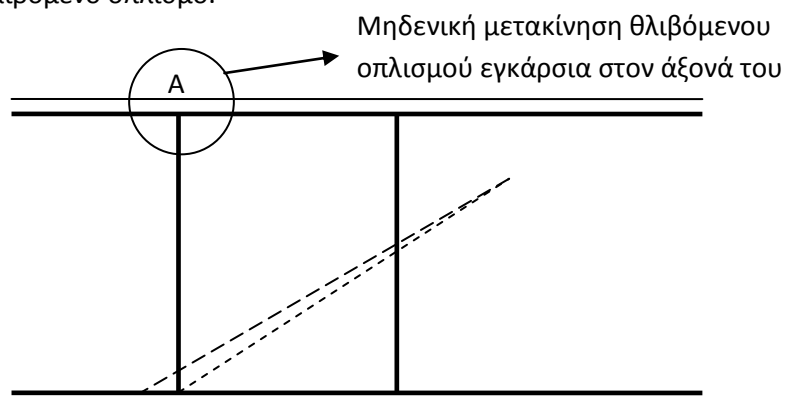
Σχήμα 2.32 Μηχανισμός τόξου

2.1.3 Διαμήκης οπλισμός ρ_{tot}

2.1.3.1 Μηχανισμός οιονεί βλήτρου του θλιβόμενου οπλισμού

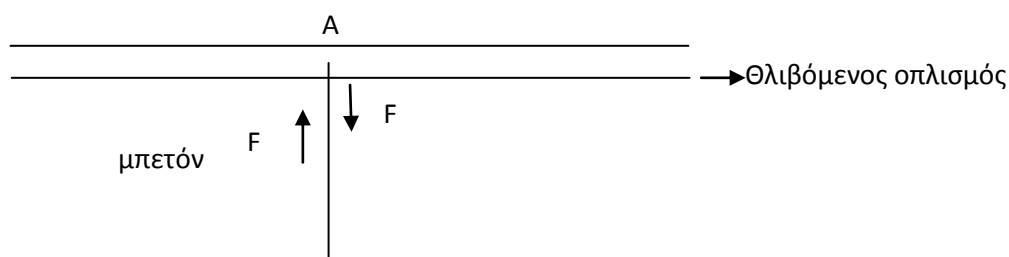
Η τέμνουσα δύναμη που κατευθύνεται στο σημείο τομής του εφελκυσμένου οπλισμού με τον συνδετήρα, μέσω του δικτυώματος Morsch, προκαλεί την εξόλκευση του συνδετήρα και κατά συνέπεια την τάση για κάμψη του θλιβόμενου οπλισμού εγκάρσια στον άξονά του. Ο θλιβόμενος οπλισμός αντιστέκεται σε αυτήν και έτσι εισάγεται η δύναμη βλήτρου.

Όμως το άνοιγμα της ρωγμής στο σημείο A (σημείο σύνδεσης του συνδετήρα με τον θλιβόμενο οπλισμό) είναι μηδενικό, και ο θλιβόμενος οπλισμός δεν κάμπτεται στο σημείο Γ δηλαδή $s_r=0\text{mm}$. Αυτό συμβαίνει διότι ο συνδετήρας είναι καλά αγκυρωμένος στον διαμήκη θλιβόμενο οπλισμό.



Σχήμα 2.33 Μηδενική μετακίνηση θλιβόμενου οπλισμού υπό την επίδραση της εξόλκευσης του συνδετήρα

Από τη στιγμή που ο θλιβόμενος οπλισμός δεν κάμπτεται, η τέμνουσα δύναμη F που αναμένεται να αναλυθεί από τον θλιβόμενο οπλισμό, μεταφέρεται στο σκυρόδεμα κάτω από τον θλιβόμενο οπλισμό και αναλαμβάνεται από αυτό. Έτσι λοιπόν το σκυρόδεμα αναλαμβάνει την τέμνουσα αντιστεκόμενο σε θλίψη που προκαλεί η τέμνουσα F και ο θλιβόμενος οπλισμός δεν παθαίνει τίποτα. Είναι ένας οιονεί μηχανισμός βλήτρου.



Σχήμα 2.34 Μηχανισμός βλήτρου θλιβόμενου οπλισμού

Ουσιαστικά πρόκειται για έναν πρόσθετο μηχανισμό που ανακουφίζει τον συνδετήρα.

Η τιμή οιονεί βλήτρου στο σημείο A προκύπτει ως εξής:

➤ Για το πρώτο δοκίμιο:

$$\sigma_A = 140 \text{ MPa}$$

$$A_{\text{συνδετήρα}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 33,17 \text{ mm}^2$$

όπου $d=6,5 \text{ mm}$, η διάμετρος του συνδετήρα

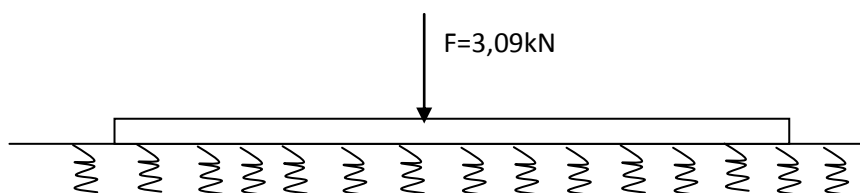
$$\sigma_A = \frac{F}{A} \text{ άρα } F = \sigma \cdot A = 140 \cdot 33,17 = 4643,24 \text{ N} = 4,63 \text{ kN}$$

Αυτή είναι η δύναμη που εισάγει ο συνδετήρας στον θλιβόμενο οπλισμό στο σημείο σύνδεσής τους.

Άρα στο σημείο A έχω οιονεί δύναμη βλήτρου ίση με 4,63 kN που αναμένεται να αναλυθεί από τον θλιβόμενο οπλισμό αλλά επειδή $S_A=0 \text{ mm}$, δεν έχουμε 'τσάκισμα' και η δύναμη αυτή αναλαμβάνεται από το μπετόν. Θεωρούμε συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1,5, άρα τελικά η δύναμη βλήτρου είναι:

$$F_{\text{υδθλιβόμενου}} = \frac{4,63}{1,5} = \mathbf{3,09 \text{ kN.}}$$

Η μηδενική μετατόπιση στο σημείο σύνδεσης του θλιβόμενου οπλισμού με τον συνδετήρα μπορεί εύκολα να αποδειχθεί αν προσομοιάσουμε τον θλιβόμενο οπλισμό με δοκό εδραζόμενη επί ελαστικού εδάφους Winkler στην οποία ασκείται η δύναμη οιονεί βλήτρου που υπολογίσθηκε παραπάνω.



Σχήμα 2.35 Προσομοίωση θλιβόμενου οπλισμού ως δοκού έδρασης επί ελαστικού εδάφους Winkler

Η βύθιση η οποία προκύπτει είναι ίση με 0,000169mm που είναι ουσιαστικά μηδενική.

➤ Για το δεύτερο δοκίμιο:

$$\sigma_A = 170 \text{ MPa}$$

$$A_{\text{συνδετήρα}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 33,17 \text{ mm}^2$$

όπου $d=6,5 \text{ mm}$, η διάμετρος του συνδετήρα

$$\sigma_A = \frac{F}{A} \text{ άρα } F = \sigma \cdot A = 170 \cdot 33,17 = 5638,9 \text{ N} = 5,64 \text{ kN}$$

Διαιρώντας με το συντελεστή ασφαλείας 1,5, προκύπτει:

$$F_{\text{υδθλιβόμενου}} = \frac{5,64}{1,5} = \mathbf{3,76 \text{ kN}}$$

➤ Για το τρίτο δοκίμιο:

$$\sigma_A = 90 \text{ MPa}$$

$$A_{\text{συνδετήρα}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 118,76 \text{ mm}^2$$

όπου $d = 12,3 \text{ mm}$, η διάμετρος του συνδετήρα

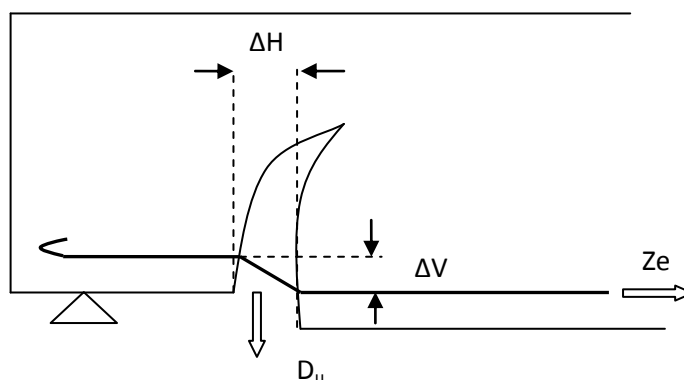
$$\sigma_A = \frac{F}{A} \text{ άρα } F = \sigma \cdot A = 90 \cdot 118,76 = 10688,4 \text{ N} = 10,69 \text{ N}$$

Διαιρώντας με το συντελεστή ασφαλείας 1,5, προκύπτει:

$$F_{\text{υδθλιβόμενου}} = \frac{10,69}{1,5} = \mathbf{7,13 \text{ Kn}}$$

2.1.3.2 Μηχανισμός βλήτρου του εφελκόμενου οπλισμού

Κατά τη διεύρυνση της ρωγμής η μετακίνηση συνίσταται από μια κατακόρυφη και μια οριζόντια συνιστώσα ΔV και ΔH αντίστοιχα. Ο διαμήκης εφελκόμενος οπλισμός δέχεται δύναμη εγκάρσια στον άξονά του. Η δύναμη αυτή τείνει να κάμψει τον διαμήκη οπλισμό. Ο τελευταίος αντιστέκεται σε αυτή την μετακίνηση μέχρις ότου καμφθεί, δηλαδή κάνει γόνατο και επομένως να εισάγει προς τα αριστερά μια τέμνουσα δύναμη βλήτρου D_u . Με την αύξηση της φόρτισης, αυξάνεται το άνοιγμα της ρωγμής, οπότε και οι δύο συνιστώσες της μετακίνησης. Όσο αυξάνει η ΔV , τόσο αυξάνει και η αντίσταση του εφελκόμενου οπλισμού (δύναμη βλήτρου) D_u μέχρι που εμφανίζεται ρωγμή παράλληλη προς το διαμήκη οπλισμό (ρωγμή αποκόλλησης του εφελκόμενου οπλισμού). Σημειώνεται πως η δύναμη βλήτρου παίζει ουσιαστικότερο ρόλο όσο η απόσταση των συνδετήρων είναι μικρότερη. Αυτό συμβαίνει καθώς το βλήτρο (εφελκόμενος οπλισμός) βρίσκει στήριγμα στον επόμενο συνδετήρα οπότε αναστέλλεται η κατακόρυφη μετακίνηση του βλήτρου. Η δύναμη βλήτρου που αναλαμβάνεται από αυτό το μηχανισμό αυξάνεται όσο η διάμετρος της εφελκόμενης ράβδου μεγαλώνει.



Σχήμα 2.36 Μηχανισμός βλήτρου εφελκόμενου οπλισμού

Αναφέρονται δύο προσομοιώματα που αφορούν την τέμνουσα που αναλαμβάνεται μέσω του μηχανισμού βλήτρου:

1) Προσομοίωμα βλήτρου με αποκόλληση υποκείμενου σκυροδέματος

Για την ανάληψη τέμνουσας μέσω του μηχανισμού βλήτρου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η φόρμουλα που αναφέρεται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. &6.1.1.5, διότι ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει επικάλυψη $6 \cdot d_b$, όπου d_b είναι η διάμετρος της ράβδου που λειτουργεί ως βλήτρο. Συγκεκριμένα αναφέρεται:

Η τιμή σχεδιασμού της μέγιστης τέμνουσας, F_{ud} , που μπορεί να μεταφερθεί από μια ράβδο με διάμετρο d_b , με επαρκές μήκος και επαρκείς επικαλύψεις μπορεί να υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F_{ud} = \frac{1,30 \cdot d_b^2}{\gamma_{Rd}} \cdot \sqrt{f_{cd} \cdot f_{yd}} \leq \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\sqrt{3}} \quad (43)$$

όπου:

A_s : η διατομή της ράβδου

f_{cd} : η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος

f_{yd} : η τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής της ράβδου, και το γ_{Rd} λαμβάνεται ίσο με 1,3.

Όταν η διεπιφάνεια την οποία διαπερνά η ράβδος ενδέχεται να υποβληθεί σε ανακυκλιζόμενη δράση, συνιστάται να λαμβάνεται υπ' όψη μειωμένη αντοχή βλήτρου, ως ακολούθως:

$$F_{ud} = 0,65 \cdot d_b^2 \cdot \sqrt{f_{cd} \cdot f_{yd}} \leq \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\sqrt{3}} [mm, MPa] \quad (44)$$

β) Ελάχιστες επικαλύψεις

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

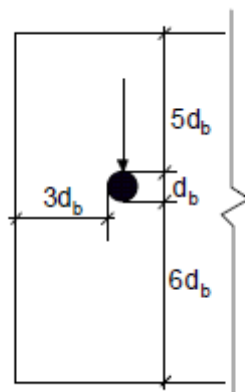
- Κατά την διεύθυνση φορτίσεως:

Ελάχιστη εμπρός επικάλυψη = $6d_b$

Ελάχιστη πίσω επικάλυψη = $5d_b$

- Κάθετα στην δ/νση φορτίσεως:

Ελάχιστη πλευρική επικάλυψη = $3d_b$



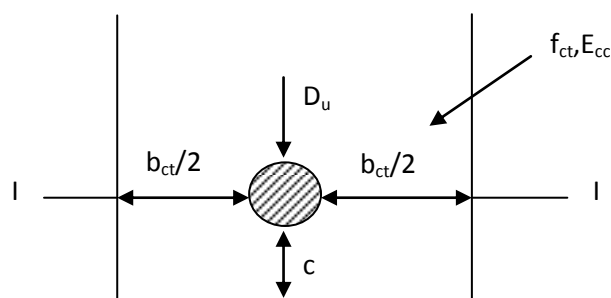
Σχήμα 2.37 Ελάχιστες επικαλύψεις για τη λειτουργία βλήτρου όπως ορίζει ο ΚΑ.Ν.Ε.Π.Ε.

Οι τιμές σχεδιασμού του ορίου διαρροής του χάλυβα και της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος προκύπτουν όπως προβλέπεται ανάλογα με το εάν το βλήτρο είναι εγκατεστημένο στο παλαιό ή στο νέο σκυρόδεμα και ανάλογα με την στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων (όταν είναι εγκατεστημένο στο παλαιό σκυρόδεμα).

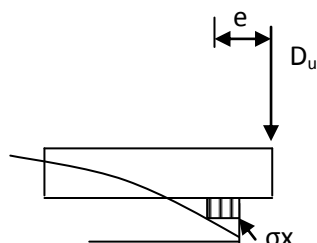
Αυτός είναι ο πλέον επιθυμητός μηχανισμός. Όταν η επικάλυψη δεν είναι επαρκής, ο μηχανισμός αστοχεί με την εμφάνιση ρωγμής στο σκυρόδεμα κατά μήκος του βλήτρου (ρωγμή αποσχίσεως). Η αστοχία λόγω αποσχίσεως του σκυροδέματος είναι εξαιρετικά ψαθυρή (συμβαίνει για πολύ μικρή τιμή της ολισθήσεως κατά μήκος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

Στην περίπτωση μας η ράβδος είναι ο εφελκόμενος οπλισμός και η επικάλυψη που διαθέτει είναι συνήθως 20mm. Αν υποθέσουμε μια ράβδο με διάμετρο 20mm που αποτελεί συνήθους τιμή, τότε η επικάλυψη θα είναι $2 \cdot d_b < 5 \cdot d_b$ οπότε δεν ικανοποιείται η συνθήκη.

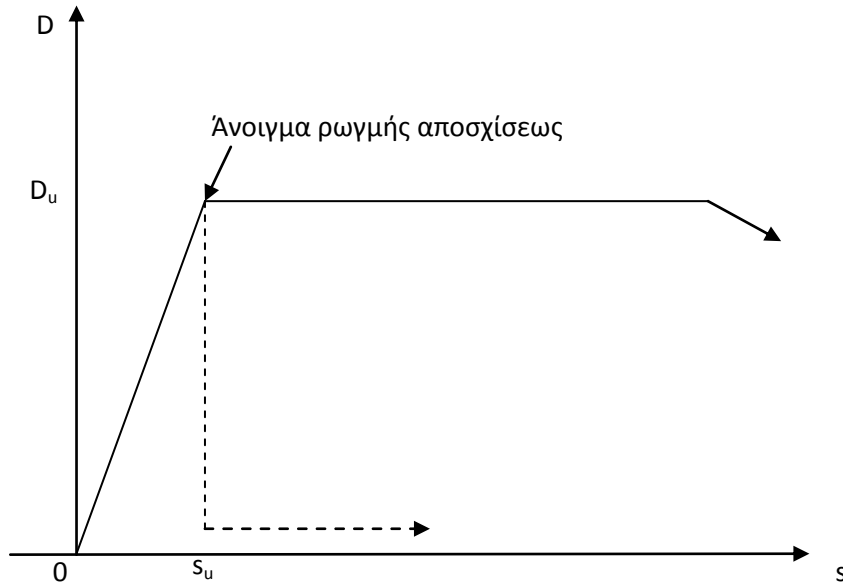
Σε αυτήν την περίπτωση λοιπόν της μικρής επικάλυψης, η θλιπτική δύναμη που ασκείται στο σκυρόδεμα κάτω από τη ράβδο εξισορροπείται από εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα κατά μήκος της τομής I-I. Εάν αυτές οι τάσεις φτάσουν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, τότε ανοίγει μια ρωγμή αποσχίσεως κατά μήκος της ράβδου, η οποία και προκαλεί αστοχία του μηχανισμού. Το διάγραμμα τέμνουσας-σχετικής μετακινήσεως, σ' αυτήν την περίπτωση, αποτελείται από έναν πρακτικώς ευθύγραμμο κλάδο μέχρι την εμφάνιση της ρωγμής αποσχίσεως. Αμέσως μετά, εάν το βάθος εμπήξεως του βλήτρου είναι μικρό, παρατηρείται μείωση μέχρι μηδενισμού της αποκρίσεως. Εάν το βάθος εμπήξεως είναι μεγάλο, προηγείται ένας πρακτικώς οριζόντιος κλάδος.



Σχήμα 2.38 Εφελκόμενος οπλισμός και επικάλυψη αυτού



Σχήμα 2.39 Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις στο σκυρίδεμα κάτω από τη ράβδο



Σχήμα 2.40 Διάγραμμα δύναμης που αναλαμβάνεται από τη δράση βλήτρου του εφελκόμενου οπλισμού συναρτήσει της ολίσθησης της ράβδου

Όπου $s_u = (4 \cdot D_u \cdot \beta \cdot (e \cdot \beta + 1)) / E_{cc}$

Είναι η ολίσθηση του εφελκόμενου οπλισμού για την οποία ανοίγει η ρωγή αποσχίσεως.

Η μέγιστη τιμή της τέμνουσας δύναμης που αναλαμβάνει ο εφελκόμενος οπλισμός είναι:

$D_u = \min \{ \xi' \cdot d_b \cdot b_{ct} \cdot f_{ct}, \psi' \cdot d_b \cdot f_{ct} \cdot c / (0,66 \cdot c + d_b) \}$, όπου $\xi' \leq 2$ και $\psi' \approx 5$

Όπου

b_{ct} το εφελκόμενο πλάτος, το οποίο λαμβάνεται ίσο με $2 \cdot c$, όπου c η επικάλυψη του εφελκόμενου οπλισμού

f_{ct} η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος

d_b η διάμετρος του εφελκόμενου οπλισμού

Εφαρμογή στα υπό μελέτη δοκίμια:

➤ Δοκίμιο 1:

Τα δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό της τέμνουσας που αναλαμβάνεται μέσω του μηχανισμού βλήτρου είναι τα εξής και λαμβάνονται από την έρευνα του Δ. Μπισκίνη:

Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος:

$$f_c=22\text{MPa}, \text{ άρα } f_{ct}=0,3 \cdot f_c^{2/3}=0,3 \cdot 22^{2/3}=2,38 \text{ MPa}$$

Διάμετρος διαμήκους εφελκόμενου σπλισμού:

$$d_b=19,5 \text{ mm}$$

Εφελκόμενο πλάτος:

$$b_{ct}=40\text{mm}$$

Επικάλυψη σκυροδέματος:

$$c=20 \text{ mm}$$

Επομένως εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση σε αυτή τη δοκό προκύπτει το εξής:

$$D_u=\min \{2 \cdot 19,5 \cdot 2 \cdot 20 \cdot 2,38; 5 \cdot 19,5 \cdot 20 \cdot 2,38 \cdot 20 / (0,66 \cdot 20 + 19,5)\} = \min(3,71; 2,84) = \mathbf{2,84 \text{ kN}}$$

➤ Δοκίμιο 2:

Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος:

$$f_c=20,4\text{MPa}, \text{ άρα } f_{ct}=0,3 \cdot f_c^{2/3}=0,3 \cdot 20,4^{2/3}=2,26 \text{ MPa}$$

Διάμετρος διαμήκους εφελκόμενου σπλισμού:

$$d_b=16 \text{ mm}$$

Εφελκόμενο πλάτος:

$$b_{ct}=40\text{mm}$$

Επικάλυψη σκυροδέματος:

$$c=20 \text{ mm}$$

Επομένως εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση σε αυτή τη δοκό προκύπτει το εξής:

$$D_u=\min \{2 \cdot 16 \cdot 2 \cdot 20 \cdot 2,26 ; 5 \cdot 16 \cdot 20 \cdot 2,26 \cdot 20 / (0,66 \cdot 20 + 16)\} = \min(2,89; 2,5) = \mathbf{2,5 \text{ kN}}$$

➤ Δοκίμιο 3:

Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος:

$$f_c=21,1\text{MPa}, \text{ άρα } f_{ct}=0,3 \cdot f_c^{2/3}=0,3 \cdot 21,1^{2/3}=2,31\text{ MPa}$$

Διάμετρος διαμήκους εφελκυσμένου σπλισμού:

$$d_b=28,6\text{ mm}$$

Εφελκυσμένο πλάτος:

$$b_{ct}=40\text{mm}$$

Επικάλυψη σκυροδέματος:

$$c=20\text{ mm}$$

Επομένως εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση σε αυτή τη δοκό προκύπτει το εξής:

$$D_u=\min \{2 \cdot 28,6 \cdot 2 \cdot 20 \cdot 2,31 ; 5 \cdot 28,6 \cdot 20 \cdot 2,31 \cdot 20 / (0,66 \cdot 20 + 28,6)\} = \min(5,3 ; 3,16) = \mathbf{3,16\text{ kN}}$$

2) Προσομοίωμα J.C.Walraven

Στα δοκίμια με ράβδους παράλληλα στον άξονά τους –διαμήκης σπλισμός- παρατηρείται ότι η μεταβολή στην δυσκαμψία δεν επηρεάζει γενικώς την διαδικασία ανοίγματος της ρωγμής. Για τιμές του ποσοστού διαμήκους σπλισμού μεταξύ 0,56-3,34% παρατηρούνται παρόμοιες διαδρομές ανοίγματος ρωγμής. Τα δοκίμια στα οποία είχαν εφαρμοστεί μαλακά περιτυλίγματα γύρω από τις διαμήκεις ράβδους συμπεριφέρθηκαν με τον ίδιο τρόπο όπως τα δοκίμια που δεν είχαν ενσωματωμένες ράβδους αλλά εξωτερικώς τοποθετημένες.

Έτσι λοιπόν συμπεραίνεται πως η διαδρομή ανοίγματος της ρωγμής εξαρτάται από την παρουσία τάσεων συνάφειας. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι οι υψηλές τιμές αντίστασης λόγω συνάφειας προκαλούν μείωση του ανοίγματος της ρωγμής στην γειτονία με τις διαμήκεις ράβδους, ενώ οι λείες ράβδοι καταλήγουν να προκαλούν ένα σταθερό άνοιγμα ρωγμής.

Η συμμετοχή του εφελκυσμένου σπλισμού στην ανάληψη τέμνουσας έχει αναλυθεί παραπάνω. Όπως και για τον θλιβόμενο σπλισμό, έτσι και για τον εφελκυσμένο μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αποτελεί ένα δοκάρι επί ελαστικού εδάφους. Όμως η βύθιση εδώ δεν θα είναι μηδενική. Αντιθέτως θα έχουμε γόνατο του εφελκυσμένου σπλισμού και κατά συνέπεια δράση βλήτρου. Για την περίπτωση που ο εφελκυσμένος σπλισμός δεν δέχεται αξονική δύναμη και η επιρροή στο άνοιγμα της ρωγμής αμελείται, η δύναμη βλήτρου είναι:

$$F_d = \beta^3 EI \cdot 2y_0 = \beta^3 EI \cdot \Delta, \quad \beta = \sqrt[4]{\frac{\phi G_t}{4EI}} \quad (45)$$

Όπου το Δ είναι η διατμητική μετατόπιση μεταξύ των μετώπων της ρωγμής, I είναι η ροπή αδρανείας του εφελκυσμένου σπλισμού, G_t είναι ο δείκτης θεμελίωσης του σκυροδέματος. Με αντικατάσταση του

$$I = \pi \Phi^2 / 64$$

Καταλήγουμε στη σχέση

$$F_d = 3,65 \cdot \phi^{1,75} \cdot G_t^{0,75} \cdot \Delta \quad (46)$$

Πειράματα από διάφορους ερευνητές έδειξαν ότι το G_t δεν εξαρτάται από την διάμετρο της ράβδου Φ . Στα πειράματα του Paulay απεδείχθη ότι για σταθερή τιμή θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος $f_{cc} = 30 \text{ N/mm}^2$, η τιμή του G_t δεν ήταν μια μειωτική συνάρτηση της ολίσθησης Δ . Σύγκριση με πειράματα έδειξαν ότι:

$$G_t = 188 \Delta^{-0,85}$$

Όμως το G_t πρέπει να εκφράζεται και συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος f_{cc} . Εξαιτίας του μέτρου ελαστικότητας E_c εκφράζεται ως εξής:

$$E_c = C_1 \cdot \sqrt{f_{cc}} \quad (47)$$

Ή αλλιώς:

$$G_f = 34 \cdot \sqrt{f_{cc}} \cdot \Delta^{-0,85} \quad (48)$$

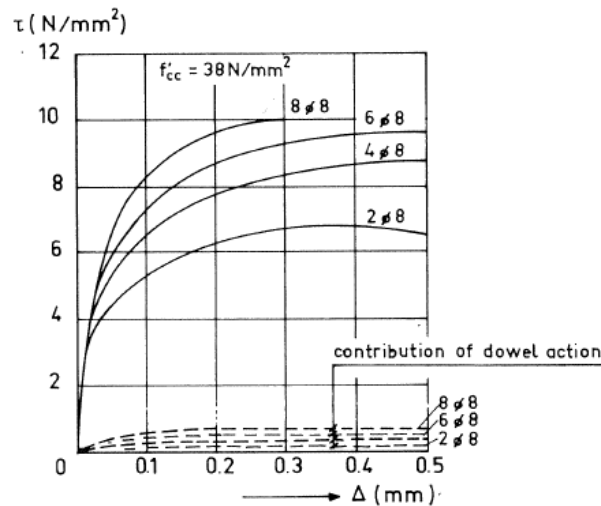
Όμως η ανωτέρω σχέση βασίζεται μόνο σε πειράματα χωρίς αξονικές εφελκυστικές δυνάμεις να ασκούνται στον εφελκυσμένο οπλισμό. Για παράδειγμα για άνοιγμα ρωγμής $w=0\text{mm}$ απεδείχθη από πειράματα του Eleiott ότι η αξονική εφελκυστική δύναμη μειώνει την αντίσταση βλήτρου. Για παράδειγμα εφελκυστική τάση ίση με 175N/mm^2 σε μια εφελκυσόμενη ράβδο με διάμετρο $\Phi 12,8\text{mm}$ μειώνει την αντίσταση βλήτρου αυτού έως περίπου 50%, ενώ αύξηση σε 350N/mm^2 προκαλεί μείωση 40%. Για τα πειράματα που έχουν γίνει έχει θεωρηθεί ότι τάση της τάξεως των 175N/mm^2 λαμβάνεται για άνοιγμα ρωγμής $w=0.2\text{mm}$ και τάση 350N/mm^2 για άνοιγμα ρωγμής $w=0.4\text{mm}$. Λαμβάνοντας υπόψη τις ανωτέρω τιμές μπορούμε να σχηματίσουμε τον μειωτικό συντελεστή της αντίστασης βλήτρου λόγω αξονικής δύναμης του εφελκυσμένου οπλισμού:

$$\xi = 0,20 \cdot (w + 0,2)^{-1} \quad (49)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις μπορεί να υπολογιστεί μια τιμή για τη δύναμη βλήτρου του εφελκυσμένου οπλισμού, λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή του ανοίγματος της ρωγμής w , της διατμητικής μετατόπισης Δ , τη διάμετρο της εφελκυσόμενης ράβδου Φ και της ποιότητας του σκυροδέματος f_{cc} .

$$F_d = 10 \cdot (w + 0,2)^{-1} \cdot \Delta^{0,36} \cdot \Phi^{1,75} \cdot f_{cc}^{0,38} \quad (50)$$

Συγκρίνοντας τις τιμές της τέμνουσας που αναλαμβάνονται από τον εφελκυσμένο οπλισμό μέσω της δράσης βλήτρου όπως προκύπτουν από την παραπάνω σχέση, με την τιμή της συνολικής τέμνουσας φαίνεται ότι η αναλαμβάνεται μικρό ποσοστό της τέμνουσας μέσω του μηχανισμού της δράσης βλήτρου.



Σχήμα 2.41 Συνεισφορά δράσης βλήτρου στην ανάληψη τέμνουσας εν συγκρίσει με την συνολική τέμνουσα

Εφαρμογή στα υπό μελέτη δοκίμια:

➤ Δοκίμιο1:

$$F_d = 10 * (0.16 + 0.2)^{-1} * 0,16^{0,36} * 19,5^{1,75} * 22^{0,38} = 8503,49 \text{ N} = 8,47 \text{ kN}$$

➤ Δοκίμιο 2:

$$F_d = 10 * (0.18 + 0.2)^{-1} * 0,18^{0,36} * 16^{1,75} * 20,4^{0,38} = 5886,8 \text{ N} = 5,89 \text{ kN}$$

➤ Δοκίμιο3:

$$F_d = 10 * (0.36 + 0.2)^{-1} * 0,36^{0,36} * 28,6^{1,75} * 21,1^{0,38} = 13935,67 \text{ N} = 13,9 \text{ kN}$$

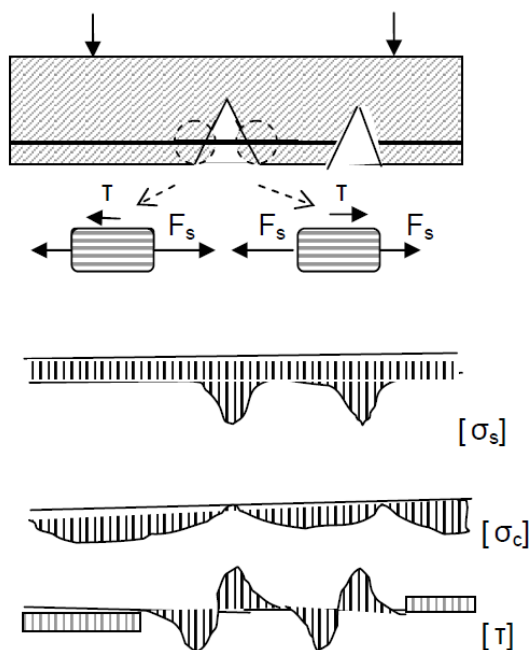
Παρατηρούμε λοιπόν πώς τα δύο προσομοιώματα καταλήγουν σε αποτελέσματα ίδιας τάξης μεγέθους.

2.1.3.3 Συμβολή του εφελκόμενου σπλισμού στη μείωση του ανοίγματος της ρωγμής

Ένας άλλος τρόπος συνεισφοράς του εφελκόμενου σπλισμού στην ανάληψη τέμνουσας είναι μέσω της εξόλκευσης αυτού. Η τέμνουσα δύναμη που μεταφέρεται μέσω του δικτυώματος Morsch στο σημείο σύνδεσης του συνδετήρα με τον εφελκόμενο σπλισμό προκαλεί εξόλκευση του συνδετήρα, όπως θα αναλυθεί εκτενέστερα παρακάτω, και έτσι προκαλείται το άνοιγμα της ρωγμής. Το άνοιγμα της ρωγμής 'μεταφράζεται' στην κατακόρυφη εξόλκευση του συνδετήρα ίση με δ_w και στην οριζόντια εξόλκευση δ_l του διαμήκους εφελκόμενου σπλισμού. Θα πρέπει ο εφελκόμενος σπλισμός να επιτρέψει στον συνδετήρα να εξολκευθεί.

Συμβολή του εφελκόμενου σπλισμού στην ανάληψη τέμνουσας

Η εφελκυστική παραμόρφωση του χάλυβα σε μια θέση του φορέα ισούται με το ανηγμένο άνοιγμα των ρωγμών στη θέση αυτή. Σε ένα καμπτόμενο φορέα εμφανίζονται εν γένει περισσότερες της μιας ρωγμές.



Σχήμα 2.42 Εντατική κατάσταση στην περιοχή των ρωγμών

Όταν η εφελκυστική τάση του σκυροδέματος υπερβεί στην πιο εξασθενημένη θέση της κρίσιμης περιοχής την εφελκυστική αντοχή, ανοίγει η πρώτη ρωγμή και η εφελκυστική τάση του σκυροδέματος στη θέση αυτή αναλαμβάνεται από τον σπλισμό. Με μια μικρή περαιτέρω αύξηση του φορτίου, η εφελκυστική τάση φθάνει στην οριακή της τιμή στην επόμενη εξασθενημένη θέση της κρίσιμης περιοχής και ανοίγει δεύτερη ρωγμή.

Η τάση του σκυροδέματος αναλαμβάνεται πάλι από τον σπλισμό και η εντατική κατάσταση

στην περιοχή των ρωγμών είναι αυτή που παρουσιάζεται ανωτέρω. Η εφελκυστική τάση του σκυροδέματος σ_{ct} βαίνει μειούμενη προς τη θέση της ρωγμής, ενώ η τάση σ_s του χάλυβα βαίνει αυξανόμενη.

Στις θέσεις των ρωγμών μηδενίζεται η εφελκυστική δύναμη F_{ct} του σκυροδέματος και αντισταθμίζεται με αύξηση της δύναμης F_s του εφελκυσμένου χάλυβα, ο οποίος στις θέσεις αυτές έχει αυξημένη παραμόρφωση (κατά το ανηγμένο άνοιγμα της ρωγμής) και αυξημένη τάση.

Για την ισορροπία του οπλισμού στην περιοχή από τη θέση της ρωγμής μέχρι το μέσον της απόστασής της από γειτονική ρωγμή, αναπτύσσονται δυνάμεις τριβής με φορά αυτήν της μικρότερης δύναμης και γι' αυτό με αντίθετη φορά εκατέρωθεν της ρωγμής.

Οι δυνάμεις αυτές επειδή αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια δύο υλικών δηλώνονται ως τάσεις συνάφειας και παρεμποδίζουν την ολίσθηση των δύο υλικών.

Θεωρώντας το φορέα ως αλυσίδα με κρίκους τις επί μέρους διατομές του, οι θέσεις της ρωγμής αποτελούν ασθενείς κρίκους της αλυσίδας οι οποίοι, όπως εντοπίστηκε παραπάνω εστιάζουν την ένταση σ' αυτούς επιτρέποντας στους διπλανούς τους κρίκους να υποεντείνονται.

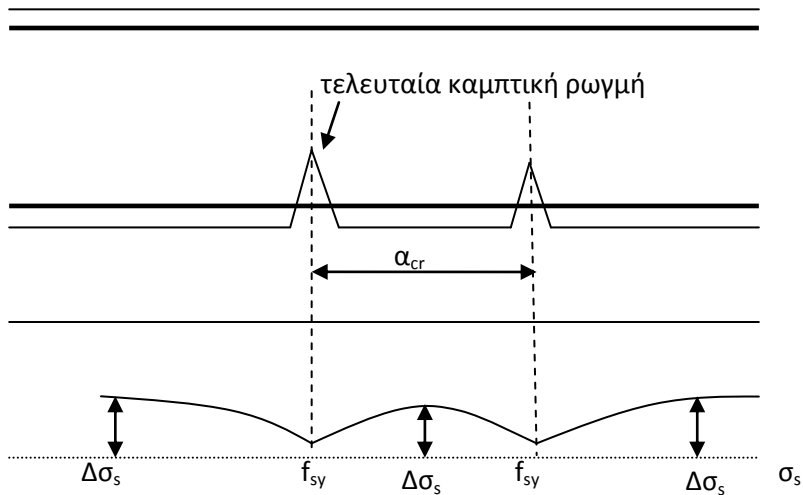
Με τον τρόπο αυτό γίνεται ανακατανομή της έντασης του φορέα προς τις θέσεις των ρωγμών και αποφεύγεται η ρηγμάτωση σε άλλες θέσεις του φορέα. Με την αύξηση της επιπόνησης διευρύνονται οι ήδη υπάρχουσες ρωγμές.

Μια πρώτη συμβολή του ποσοστού διαμήκους οπλισμού, ρ_{tot} , στην V_{CR} αποδίδεται στις επιστρατευόμενες (μικρές έστω) τιμές της αντίστασης βλήτρου (στο εφελκυσμένο πέλμα) και 'οιονεί βλήτρου' (στο θλιβόμενο πέλμα), όπως περιγράφηκε στα προηγούμενα.

Μια πολύ σημαντικότερη όμως συμβολή του ποσοστού ρ_{tot} στη διαμόρφωση της V_{CR} φαίνεται ότι οφείλεται στην μείωση του ανοίγματος της λοξής διατμητικής ρωγμής, λόγω της τοπικής αύξησης της τάσης του εφελκυσμένου χάλυβα τη στιγμή της λοξής ρηγμάτωσης (μειώνεται η τάση του σκυροδέματος και αυξάνεται η τάση του χάλυβα)

α) Κατάσταση πριν τη λοξή ρηγμάτωση

Σε δοκό έστω ότι έχουν ανοίξει καμπτικές ρωγμές. Η κατάσταση που επικρατεί είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 2.43 Τάσεις κατά μήκος της εφελκόμενης ράβδου

Στη θέση της ρωγμής ο χάλυβας του εφελκόμενου οπλισμού έχει φτάσει το όριο διαρροής του. Σε θέση εκτός της ρωγμής δεν έχει φτάσει το όριο διαρροής του αλλά έχει τάση μικρότερη από αυτή καθώς επιστρατεύεται η τάση συνάφειας μεταξύ του χάλυβα του εφελκόμενου οπλισμού και του σκυροδέματος, η οποία είναι σταθερή.

$$\Delta\sigma_s = \frac{\text{περιμετρική συνάφεια}}{\text{διατομή}} = \frac{\tau_m \cdot \frac{\alpha_{cr}}{2} \cdot \pi \cdot d_b}{\pi \cdot d_b^2 / 4} = 2 \cdot \frac{\alpha_{cr}}{d_b} \cdot \tau_m$$

Όπου τ_m είναι η μέση τάση συνάφειας και είναι ίση με:

$$\tau_m = \frac{f_c}{6}$$

Η μέση απόσταση α_{cr} των καμπτικών ρωγμών υπολογίζεται βάσει της θεωρίας της καμπτικής ρηγμάτωσης ως εξής:

$$\alpha_{cr} = \frac{1}{2} \frac{f \cdot f_{ct} \cdot d_b}{\tau_m \cdot \rho_1}$$

όπου

f συντελεστής αναγωγής της εφελκυστικής τάσης σκυροδέματος με πραγματικές τιμές 0,60-0,80

f_{ct} η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος

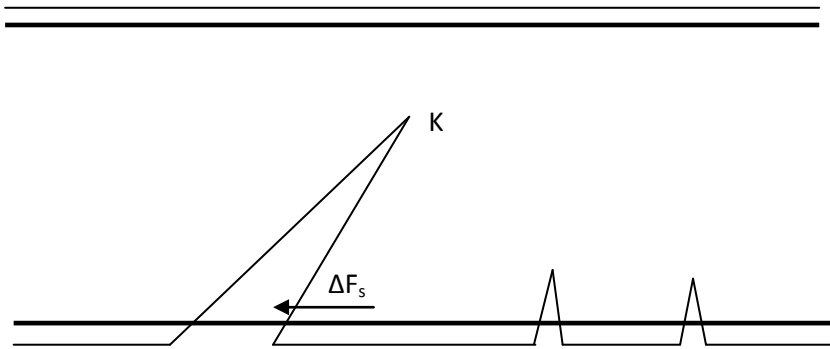
d_b η διάμετρος του εφελκόμενου οπλισμού

τ_m η μέση τιμή των τάσεων συνάφειας κατά τη στιγμή της ολίσθησης της ράβδου

ρ_1 το ποσοστό του εφελκόμενου οπλισμού

Για ένα ενδεικτικό παράδειγμα θα ληφθεί $\min 15 \text{ cm}$ και $\max 30 \text{ cm}$.

β) Κατάσταση μετά τη λοξή ρηγμάτωση



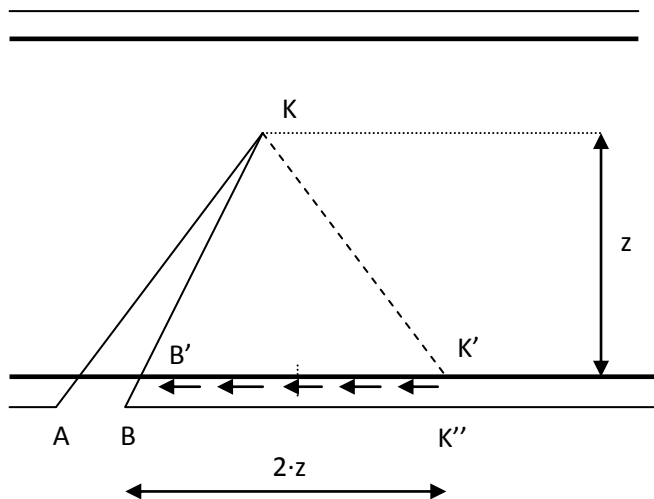
Σχήμα 2.44 Δύναμη εφελκόμενου σπλισμού μόλις ανοίξει η διατμητική ρωγμή

ΔF_s = Νέα τοπική δύναμη εφελκόμενου σπλισμού, η οποία εμφανίζεται μόλις ανοίξει η λοξή ρωγμή.

Στη θέση της λοξής διατμητικής ρωγμής η εφελκυστική δύναμη του σκυροδέματος μηδενίζεται και αντισταθμίζεται από την εφελκυστική δύναμη ΔF_s του εφελκόμενου σπλισμού. Στο σημείο της λοξής ρωγμής ο χάλυβας φθάνει στην διαρροή του, ενεργοποιώντας την τάση $\Delta \sigma_s$ που υπολείπονταν έως την f_{sy} (τάση διαρροής αυτού). Η δύναμη ΔF_s είναι ίση με:

$$\Delta F_s = \rho_1 \cdot b \cdot h \cdot \Delta \sigma_s = \rho_1 \cdot b \cdot h \cdot 2 \cdot \frac{\alpha c r}{d b} \cdot \tau m$$

γ) Θα υπολογισθεί πόσο το δεξιό χείλος της ρωγμής στρέφεται προς τα αριστερά υπό την επίδραση των διανεμημένων δυνάμεων συνάφειας λόγω της δύναμης του χάλυβα ΔF_s .

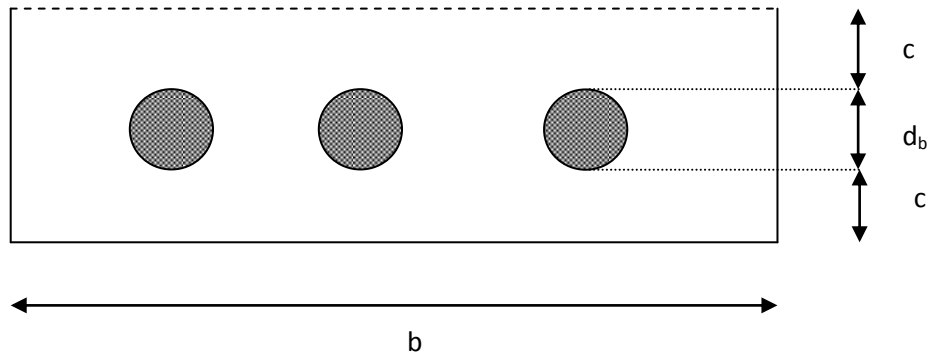


Σχήμα 2.45 Τρίγωνο που σχηματίζεται και ωθεί προς το κλείσιμο της ρωγμής

Το σημείο K'' είναι η δυσμενέστερη δυνατή πλησιέστερη καμπτική ρωγμή.

Προς τούτο θα αρκεσθούμε εδώ προσωρινώς σε μια αδρομερή εκτίμηση της αύξησης του μήκους της πλευράς Κ'Β' του τριγώνου ΚΒ'Κ'. Αντί να υπολογιστεί η στροφή της πλευράς ΒΚ του τριγώνου, υπολογίζεται η αύξηση του μήκους της πλευράς Κ'Β' του δοντιού που σχηματίζεται.

δ) Θεωρούμε έναν δήθεν ελεύθερο ελκυστήρα ΒΒ'Κ'Κ'' με την ακόλουθη διατομή:



Σχήμα 2.46 Ελκυστήρας που προσομοιώνει τη δράση του εφελκυσμένου σπλισμού

Το εμβαδόν της διατομής του ελκυστήρα είναι:

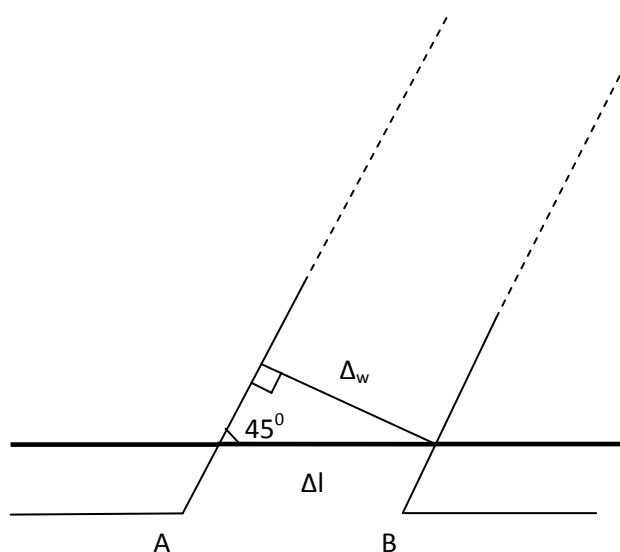
$$\Delta A_c = b \cdot (2 \cdot c + d_b) \leq 3 \cdot d_b$$

Η επιμήκυνση του ελκυστήρα εκτιμάται ως εξής:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \text{ άρα } \Delta l = \varepsilon \cdot l = \frac{\sigma}{A} \cdot l = \frac{2/3 \cdot \Delta F s}{\Delta A_c \cdot E_{ct}} \cdot 2 \cdot z = 4 \cdot \rho_1 \cdot \frac{\tau m}{E_c} \cdot \frac{acr}{db} \cdot \frac{h}{2 \cdot c + d_b} \cdot z$$

όπου $E_{ct} = \frac{2}{3} \cdot E_c$ το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος υπό εφελκυσμό.

Αυτό που έχει υπολογιστεί φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.47 Λεπτομέρεια επιμήκυνσης εφελκυσμένου σπλισμού

Τελικώς θα δεχθούμε κατ' αδρομερή προσέγγιση μείωση ανοίγματος w λοξής ρωγμής ίση με:

$$\sin 45 = \frac{\Delta w}{\Delta l} \text{ άρα } \Delta w = \Delta l \cdot \sin 45$$

οπότε:

$$\Delta w = \lambda \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 4 \cdot \rho_1 \cdot \frac{\tau m}{E_c} \cdot \frac{a c r}{d b} \cdot \frac{h}{2 \cdot c + d b} \cdot z$$

$$\Delta w = \lambda \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \rho_1 \cdot \frac{\tau m}{E_c} \cdot \frac{a c r}{d b} \cdot \frac{h}{2 \cdot c + d b} \cdot z$$

Όπου $\lambda < 1$ κατάλληλος συντελεστής (πιθανές τιμές από 0,4 έως 0,8)

ε) Έτσι, αυξανόμενου του ποσοστού ρ_1 του εφελκυσμένου οπλισμού, (και για τον ίδιο συνδετήρα), μειώνεται το άνοιγμα της λοξής ρωγμής και επομένως αυξάνονται οι αντιστάσεις εμπλοκής αδρανών, οπότε αυξάνεται η V_{CR} .

Το μέγιστο άνοιγμα ρωγμής είναι η διαφορά των μηκύνσεων χάλυβα και σκυροδέματος εντός της μεταξύ των διαδοχικών ρωγμών απόσταση α_{cr} .

$$w_{\max} = \alpha_{cr} \cdot \left(\frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{\sigma_c}{E_c} \right) \approx \alpha_{cr} \cdot \frac{\sigma_c}{E_c}$$

Το άνοιγμα της ρωγμής είναι ίσο με την μήκυνση του χάλυβα στην περιοχή μεταξύ των διαδοχικών ρωγμών διότι η μήκυνση του σκυροδέματος είναι πολύ μικρή καθώς έχει πολύ μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό απ' ότι ο χάλυβας.

Εφαρμογή στα υπό εξέταση δοκίμια:

➤ Δοκίμιο 1:

Η δύναμη του εφελκόμενου σπλισμού είναι ίση με:

$$\Delta F_s = \rho_1 \cdot b \cdot h \cdot \Delta \sigma_s = \rho_1 \cdot b \cdot h \cdot 2 \cdot \frac{\alpha_{cr}}{db} \cdot \tau_m$$

Όπου:

$$\rho_1 = \frac{\rho_{tot}}{2} = 1,5\%$$

$$b = 200 \text{ mm}$$

$$h = 200 \text{ mm}$$

$$f_{ct} = 0.3 \cdot f_c^{2/3} = 0.3 \cdot 22^{2/3} = 2.38 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{cr} = \frac{1}{2} \cdot \frac{f \cdot f_{ct} \cdot db}{\tau_m \cdot \rho_1} = \frac{0.7 \cdot 2.38 \cdot 19.5}{2 \cdot 3.67 \cdot 0.015} = 295.068 \text{ mm}$$

$$d_b = 19.5 \text{ mm}$$

$$\tau_m = \frac{f_c}{6} = \frac{22}{6} = 3.67 \text{ MPa}$$

$$\text{άρα } \Delta F_s = 0,015 \cdot 200 \cdot 200 \cdot 2 \cdot \frac{295.06}{19.5} \cdot 3,67 = 66.64 \text{ kN}$$

Ο εφελκόμενος σπλισμός προκαλεί μείωση του ανοίγματος κατά:

$$\Delta_w = \lambda \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \rho_1 \cdot \frac{\tau_m \cdot \alpha_{cr}}{E_c} \cdot \frac{h}{2 \cdot c + db} \cdot z$$

Όπου:

$$\lambda = 0,5$$

$$z = 0.9 \cdot d = 0.9 \cdot 170 = 153 \text{ mm}$$

$$E_c = 9.5 \cdot (f_{ck} + 8)^{1/3} = 29.19 \text{ GPa} = 29190 \text{ MPa}$$

$$\text{άρα } \Delta_w = 0,5 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,015 \cdot \frac{3,67}{29190} \cdot \frac{295.06}{19.5} \cdot \frac{200}{2 \cdot 20 + 19.5} \cdot 153 = 0.01 \text{ mm}$$

➤ Δοκίμιο 2:

Η δύναμη του εφελκόμενου σπλισμού είναι ίση με:

$$\Delta F_s = \rho_1 \cdot b \cdot h \cdot \Delta \sigma_s = \rho_1 \cdot b \cdot h \cdot 2 \cdot \frac{\alpha_{cr}}{db} \cdot \tau_m$$

Όπου:

$$\rho_1 = \frac{\rho_{tot}}{2} = 1\%$$

$$b = 200 \text{ mm}$$

$$h = 200 \text{ mm}$$

$$f_{ct} = 0.3 \cdot f_c^{2/3} = 0.3 \cdot 20.4^{2/3} = 2.26 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{cr} = \frac{1}{2} \frac{f \cdot f_{ct} \cdot db}{\tau_m \cdot \rho_1} = \frac{0.7 \cdot 2.26 \cdot 16}{2 \cdot 3.4 \cdot 0.01} = 372.24 \text{ mm}$$

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

$$\tau_m = \frac{f_c}{6} = \frac{20.4}{6} = 3.4 \text{ MPa}$$

$$\acute{\alpha}\rho\alpha \Delta F_s = 0,01 \cdot 200 \cdot 200 \cdot 2 \cdot \frac{372.24}{16} \cdot 3,4 = 63.28 \text{ kN}$$

Ο εφελκόμενος οπλισμός προκαλεί μείωση του ανοίγματος κατά:

$$\Delta_w = \lambda \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \rho_1 \cdot \frac{\tau_m \cdot \alpha_{cr}}{E_c} \cdot \frac{h}{2 \cdot c + db} \cdot z$$

Όπου:

$$\lambda = 0,5$$

$$z = 0.9 \cdot d = 0.9 \cdot 170 = 153 \text{ mm}$$

$$E_c = 9.5 \cdot (f_{ck} + 8)^{1/3} = 28.66 \text{ GPa} = 28660 \text{ MPa}$$

$$\acute{\alpha}\rho\alpha \Delta_w = 0,5 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,01 \cdot \frac{3,4}{28660} \cdot \frac{372.24}{16} \cdot \frac{200}{2 \cdot 20 + 16} \cdot 153 = 0.033 \text{ mm}$$

➤ Δοκίμιο 3:

Η δύναμη του εφελκόμενου οπλισμού είναι ίση με:

$$\Delta F_s = \rho_1 \cdot b \cdot h \cdot \Delta \sigma_s = \rho_1 \cdot b \cdot h \cdot 2 \cdot \frac{\alpha_{cr}}{db} \cdot \tau_m$$

Όπου:

$$\rho_1 = \frac{\rho_{tot}}{2} = 1.225\%$$

$$b = 457 \text{ mm}$$

$$h = 457 \text{ mm}$$

$$f_{ct} = 0.3 \cdot f_c^{2/3} = 0.3 \cdot 21.1^{2/3} = 2.31 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{cr} = \frac{1}{2} \frac{f \cdot f_{ct} \cdot db}{\tau_m \cdot \rho_1} = \frac{0.7 \cdot 2.31 \cdot 28.6}{2 \cdot 3.51 \cdot 0.01225} = 537.8 \text{ mm}$$

$$d_b = 28.6 \text{ mm}$$

$$\tau_m = \frac{fc}{6} = \frac{21.1}{6} = 3.51 \text{ MPa}$$

$$\acute{\alpha}\rho\alpha \Delta F_s = 0,01225 \cdot 457 \cdot 457 \cdot 2 \cdot \frac{537.8}{28.6} \cdot 3.51 = 337.72 \text{ kN}$$

Ο εφελκόμενος σπλισμός προκαλεί μείωση του ανοίγματος κατά:

$$\Delta_w = \lambda \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \rho_1 \cdot \frac{\tau_m \cdot a c r}{E_c} \cdot \frac{h}{d b} \cdot \frac{h}{2 \cdot c + d b} \cdot z$$

Όπου:

$$\lambda = 0,5$$

$$z = 0.9 \cdot d = 0.9 \cdot 394 = 354.6 \text{ mm}$$

$$E_c = 9.5 \cdot (f_{ck} + 8)^{1/3} = 28.89 \text{ GPa} = 28890 \text{ MPa}$$

$$\acute{\alpha}\rho\alpha \Delta_w = 0,5 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,01225 \cdot \frac{3.51}{28890} \cdot \frac{537.8}{28.6} \cdot \frac{457}{2 \cdot 20 + 28.6} \cdot 354.6 = 0.093 \text{ mm}$$

Με τις μειωμένες τιμές του ανοίγματος της ρωγμής, θα υπολογιστεί εκ νέου η δύναμη που αναλαμβάνουν τα αδρανή με το προσομοίωμα του J.C. Walraven. Οπότε για καθένα από τα δοκίμια προκύπτει:

➤ Δοκίμιο 1:

Νέο άνοιγμα ρωγμής μειωμένο λόγω της δράσης του εφελκόμενου σπλισμού:

$$w_{\acute{\alpha}\nu\epsilon\omicron} = 0,16 \text{ mm} - 0.01 \text{ mm} = 0.15 \text{ mm}$$

$$A_x' = 0.06873$$

$$A_y' = 0.06873$$

$$\Sigma F_y = \sigma_{pu} \cdot (\Sigma \alpha_x - \mu \cdot \Sigma \alpha_y) = 36,08 \cdot (0,06873 - 0,4 \cdot 0,06873) = 1.48 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x = \sigma_{pu} \cdot (\Sigma \alpha_y + \mu \cdot \Sigma \alpha_x) = 36,08 \cdot (0,06873 + 0,4 \cdot 0,06873) = 3,47 \text{ N}$$

$\mu = 0,4$, ο συντελεστής τριβής των επιφανειών, όπως αναλύθηκε στη θεωρία του

$$\sigma_{pu} = 6.39 \cdot f_c^{0.56} = 6.39 \cdot 22^{0.56} = 36,08 \text{ MPa}$$

$$\Sigma F_y' = \Sigma F_y \cdot \cos 45^\circ = 1.48 \cdot \cos 45^\circ = 1,05 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x' = \Sigma F_x \cdot \cos 45^\circ = 3,47 \cdot \cos 45^\circ = 2,45 \text{ N}$$

$$\Sigma F = \Sigma F_x' + \Sigma F_y' = 2,45 + 1,05 = 3,5 \text{ N}$$

$$x = \frac{0.9 \cdot d}{\sin 45} = \frac{0.9 \cdot 170}{\sin 45} = 216.4 \text{ mm}$$

Οπότε η επιφάνεια της ρωγμής είναι:

$$A=x \cdot b=216,4\text{mm} \cdot 200\text{mm}=43200\text{mm}^2$$

$$\Sigma F_{\text{τελικό}} = \frac{\beta \acute{\alpha}\sigma\eta}{2} \cdot \acute{\upsilon}\psi\omicron\varsigma = \frac{\Sigma F \cdot A}{2} = \frac{3,5 \cdot 43200}{2} = 75,60 \text{ kN}$$

$$\frac{75,60}{1,5} = 50,4 \text{ kN}$$

Οπότε η τέμνουσα που αναλαμβάνουν τα αδρανή αυξήθηκε κατά

$$50,4 \text{ kN} - 50,4 \text{ kN} = 0 \text{ kN}$$

Δηλαδή η συμμετοχή του εφελκόμενου σπλισμού στο κλείσιμο του ανοίγματος της ρωγμής είναι μηδενική. Η τέμνουσα που αναλαμβάνεται από τον εφελκόμενο σπλισμό είναι ίση με

$$V_{\rho 1} = 0 \text{ kN}$$

➤ Δοκίμιο 2:

Νέο άνοιγμα ρωγμής μειωμένο λόγω της δράσης του εφελκόμενου σπλισμού:

$$w_{\text{νέο}} = 0,18\text{mm} - 0,033\text{mm} = 0,147\text{mm}$$

$$A_x' = 0,06873$$

$$A_y' = 0,06873$$

$$\Sigma F_y = \sigma_{\rho u} \cdot (\Sigma \alpha_x - \mu \cdot \Sigma \alpha_y) = 34,58 \cdot (0,06873 - 0,4 \cdot 0,06873) = 1,42 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x = \sigma_{\rho u} \cdot (\Sigma \alpha_y + \mu \cdot \Sigma \alpha_x) = 34,58 \cdot (0,06873 + 0,4 \cdot 0,06873) = 3,30 \text{ N}$$

$\mu = 0,4$, ο συντελεστής τριβής των επιφανειών, όπως αναλύθηκε στη θεωρία του

$$\sigma_{\rho u} = 6,39 \cdot f_c^{0,56} = 6,39 \cdot 20,4^{0,56} = 34,58 \text{ MPa}$$

$$\Sigma F_y' = \Sigma F_y \cdot \cos 45^\circ = 1,42 \cdot \cos 45^\circ = 1,00 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x' = \Sigma F_x \cdot \cos 45^\circ = 3,30 \cdot \cos 45^\circ = 2,34 \text{ N}$$

$$\Sigma F = \Sigma F_x' + \Sigma F_y' = 2,34 + 1,00 = 3,34 \text{ N}$$

$$x = \frac{0,9 \cdot d}{\sin 45} = \frac{0,9 \cdot 170}{\sin 45} = 216,4 \text{ mm}$$

Οπότε η επιφάνεια της ρωγμής είναι:

$$A=x \cdot b=216,4\text{mm} \cdot 200\text{mm}=43281,47\text{mm}^2$$

$$\Sigma F_{\text{τελικό}} = \frac{\beta \acute{\alpha}\sigma\eta}{2} \cdot \acute{\upsilon}\psi\omicron\varsigma = \frac{\Sigma F \cdot A}{2} = \frac{3,34 \cdot 43200}{2} = 72,28 \text{ kN}$$

$$\frac{72,28}{1,5} = 48,19 \text{ kN}$$

Οπότε η τέμνουσα που αναλαμβάνουν τα αδρανή αυξήθηκε κατά

$$48,19 \text{ kN} - 47,61 \text{ kN} = 0,58 \text{ kN}$$

Δηλαδή η συμμετοχή του εφελκόμενου οπλισμού στο κλείσιμο του ανοίγματος της ρωγμής είναι και πάλι πολύ μικρή. Η τέμνουσα που αναλαμβάνεται από τον εφελκόμενο οπλισμό είναι ίση με

$$V_{\rho 1} = 0,58 \text{ kN}$$

➤ Δοκίμιο 3:

Νέο άνοιγμα ρωγμής μειωμένο λόγω της δράσης του εφελκόμενου οπλισμού:

$$w_{\text{νέο}} = 0,36 \text{ mm} - 0,093 \text{ mm} = 0,267 \text{ mm}$$

$$A_{x'} = 0,06533$$

$$A_{y'} = 0,06533$$

$$\Sigma F_y = \sigma_{\rho u} \cdot (\Sigma \alpha_x - \mu \cdot \Sigma \alpha_y) = 35,25 \cdot (0,06533 - 0,4 \cdot 0,06533) = 1,38 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x = \sigma_{\rho u} \cdot (\Sigma \alpha_y + \mu \cdot \Sigma \alpha_x) = 35,25 \cdot (0,06533 + 0,4 \cdot 0,06533) = 3,22 \text{ N}$$

$\mu = 0,4$, ο συντελεστής τριβής των επιφανειών, όπως αναλύθηκε στη θεωρία του

$$\sigma_{\rho u} = 6,39 \cdot f_c^{0,56} = 6,39 \cdot 21,1^{0,56} = 35,25 \text{ MPa}$$

$$\Sigma F_y' = \Sigma F_y \cdot \cos 45^\circ = 1,38 \cdot \cos 45^\circ = 0,98 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x' = \Sigma F_x \cdot \cos 45^\circ = 3,22 \cdot \cos 45^\circ = 2,28 \text{ N}$$

$$\Sigma F = \Sigma F_x' + \Sigma F_y' = 2,28 + 0,98 = 3,26 \text{ N}$$

$$x = \frac{0,9 \cdot d}{\sin 45} = \frac{0,9 \cdot 394}{\sin 45} = 501,56 \text{ mm}$$

Οπότε η επιφάνεια της ρωγμής είναι:

$$A = x \cdot b = 501,56 \text{ mm} \cdot 457 \text{ mm} = 229212,92 \text{ mm}^2$$

$$\Sigma F_{\text{τελικό}} = \frac{\beta \cdot \sigma_{\rho u}}{2} \cdot \text{ύψος} = \frac{\Sigma F \cdot A}{2} = \frac{3,26 \cdot 229212}{2} = 373,62 \text{ kN}$$

$$\frac{373,62}{1,5} = 249,08 \text{ kN}$$

Οπότε η τέμνουσα που αναλαμβάνουν τα αδρανή αυξήθηκε κατά

$$249,08 \text{ kN} - 239,14 \text{ kN} = 9,94 \text{ kN}$$

Δηλαδή η συμμετοχή του εφελκυσμένου οπλισμού στο κλείσιμο του ανοίγματος της ρωγμής είναι σημαντικότερη απ' ότι στα άλλα δύο δοκίμια. Η τέμνουσα που αναλαμβάνεται από τον εφελκυσμένο οπλισμό είναι ίση με:

$$V_{\rho 1} = \mathbf{9,94 \text{ kN}}$$

2.2 Συνολική τιμή τέμνουσας που αναλαμβάνεται από το σκυρόδεμα

➤ Δοκίμιο 1:

$V_c = V_c(\text{λόγω εμπλοκής αδρανών}) + V_c(\text{λόγω δράση οιονεί βλήτρου θλιβόμενου σπλισμού}) + V_c(\text{δράσης βλήτρου εφελκόμενου σπλισμού}) + V_c(\text{δράσης εφελκόμενου σπλισμού-μείωση ανοίγματος ρωγμής}) = 50,4 \text{ kN} + 3,09 \text{ kN} + 2,84 \text{ kN} + 0 = \mathbf{56,33 \text{ kN}}$

➤ Δοκίμιο 2:

$V_c = V_c(\text{λόγω εμπλοκής αδρανών}) + V_c(\text{λόγω δράση οιονεί βλήτρου θλιβόμενου σπλισμού}) + V_c(\text{δράσης βλήτρου εφελκόμενου σπλισμού}) + V_c(\text{δράσης εφελκόμενου σπλισμού-μείωση ανοίγματος ρωγμής}) = 47,61 \text{ kN} + 3,76 \text{ kN} + 2,5 \text{ kN} + 0,58 = \mathbf{54,45 \text{ kN}}$

➤ Δοκίμιο 3:

$V_c = V_c(\text{λόγω εμπλοκής αδρανών}) + V_c(\text{λόγω δράση οιονεί βλήτρου θλιβόμενου σπλισμού}) + V_c(\text{δράσης βλήτρου εφελκόμενου σπλισμού}) + V_c(\text{δράσης εφελκόμενου σπλισμού-μείωση ανοίγματος ρωγμής}) = 239,14 \text{ kN} + 7,13 \text{ kN} + 3,16 \text{ kN} + 9,94 = \mathbf{259,37 \text{ kN}}$

2.3 Συμβολή του οπλισμού διάτμησης στην ανάληψη τέμνουσας

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο το υπόλοιπο μέρος της τέμνουσας μεταφέρεται μέσω ενός μηχανισμού εσωτερικού δικτύωματος με μεταβλητή γωνία δ . Το δικτύωμα αυτό δικτύωμα αυτό αποτελείται από:

- πεδίο θλιπτικών τάσεων στο σκυρόδεμα υπό γωνία δ με τον άξονα του μέλους. Η θλιπτική τάση στο σκυρόδεμα είναι ίση με :
 $\sigma_c = 2 \cdot V / (b_w \cdot z \cdot \sin 2\delta)$
- Εφελκυστική τάση στον εγκάρσιο οπλισμό ίση με $V \cdot \tan \delta / (\rho_w \cdot b_w \cdot z)$, όπου b_w είναι το πλάτος του κορμού της διατομής και z είναι ο εσωτερικός μοχλοβραχίονας. Αυτή η τάση αντιστοιχεί σε εφελκυστική δύναμη ανά μονάδα μήκος του δομικού στοιχείου ίση με $V \cdot \tan \delta / z$.
- Εφελκυστική δύναμη στον διαμήκη οπλισμό ίση με $V \cdot \cot \delta$.

Στην παρούσα εργασία η γωνία του δικτύωματος λαμβάνεται ίση με $\delta = 45^\circ$ προκειμένου να δοθεί έμφαση στους μηχανισμούς ανάληψης τέμνουσας και όχι τόσο στη μεταβλητότητα της γωνίας του θλιπτήρα. Το δικτύωμα των 45° αποτελεί το δικτύωμα Morsch. Ο εγκάρσιος οπλισμός διαστασιολογείται να αναλάβει εφελκυστική δύναμη ανά μονάδα μήκος του μέλους ίση με $(V - V_c) / z$ αντί της τιμής $V \cdot \tan \delta / z$ που αντιστοιχεί σε δικτύωμα μεταβλητής γωνίας. Ο όρος V_c αντικαθιστά τη συνεισφορά των συνδετήρων στην ανάληψη τέμνουσας V_R καθώς η γωνία του δικτύωματος μικραίνει από $\delta = 45^\circ$ σε χαμηλότερες τιμές. Είναι η συνεισφορά του σκυροδέματος στην ανάληψη τέμνουσας.

Με την έναρξη της ρηγμάτωσης, μέσω του δικτύωματος Morsch η τέμνουσα που ασκείται στο δομικό στοιχείο μεταφέρεται στους συνδετήρες αυτού. Οι τελευταίοι καλούνται να αναλάβουν αυτή την αξονική δύναμη που τους ασκείται και προκαλεί εξόλκευση. Αποτέλεσμα είναι οι συνδετήρες να αντιστέκονται σε εξόλκευση και να επιστρατεύουν την αντοχή σε εφελκυσμό. Έτσι η αντίσταση των συνδετήρων είναι ίση με

$$V_w = \rho_w \cdot b_w \cdot z \cdot f_{yw}$$

Όπου

ρ_w το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού

z το μήκος του εσωτερικού μοχλοβραχίονα ίσο με $0,9 \cdot d$, όπου d είναι το στατικό ύψος της διατομής

f_{yw} η τάση διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού. Για τα πρωτεύοντα σεισμικά στοιχεία το f_{yw} θα πρέπει να διαιρείται περαιτέρω δια του επιμέρους συντελεστή για το χάλυβα σύμφωνα με το EN 1998-1:2004.

Εφαρμογή στα υπό εξέταση δοκίμια:

Δοκίμιο 1:

Το πρώτο δοκίμιο διαθέτει οπλισμό διάτμησης ίσο με $\rho_w=0,33\%$, ενώ η τάση διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού είναι $f_{yw}=352$ MPa. Έτσι λοιπόν εφαρμόζοντας τη σχέση προκύπτει:

$$V_w = \rho_w \cdot b_w \cdot z \cdot f_{yw} = 0,0033 \cdot 200 \cdot 0,9 \cdot 170 \cdot 318 = 32111,64 \text{ N} = 32,11 \text{ kN}$$

Δοκίμιο 2:

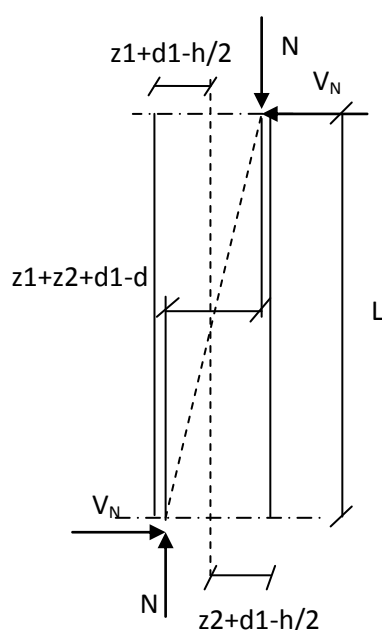
$$V_w = \rho_w \cdot b_w \cdot z \cdot f_{yw} = 0,0033 \cdot 200 \cdot 0,9 \cdot 170 \cdot 352 = 35544,96 \text{ N} = 35,54 \text{ kN}$$

Δοκίμιο 3:

$$V_w = \rho_w \cdot b_w \cdot z \cdot f_{yw} = 0,0017 \cdot 457 \cdot 0,9 \cdot 394 \cdot 469 = 129204,22 \text{ N} = 129,2 \text{ kN}$$

2.4 Συμβολή του αξονικού φορτίου στην ανάληψη τέμνουσας

Ο Ευρωκώδικας 2 και ο CEB/FIP Model Code 90 θεωρούν ότι η αξονική θλιπτική δύναμη, N συνεισφέρει στην διατμητική αντοχή με βάση τον ακόλουθο μηχανισμό. Η διατμητική δύναμη ως γνωστόν προκαλεί ροπή κάμψης στο δομικό στοιχείο στο οποίο ασκείται. Σε μια συνήθης περίπτωση ενός αμφίπακτου υποστυλώματος υπό κάμψη, η αξονική δύναμη N που ασκείται στα δύο άκρα θα εξισορροπηθεί από τη συγκέντρωση θλιπτικών τάσεων γύρω από το σημείο εφαρμογής του αξονικού φορτίου. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται λοξός θλιπτήρας καθ' ύψος του υποστυλώματος, μέσω του οποίου μεταφέρεται η αξονική θλιπτική δύναμη N από την περιοχή συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων στο ένα άκρο του υποστυλώματος στην άλλη περιοχή στο άλλο άκρο.



Σχήμα 2.48 Λειτουργία αξονικής δύναμης

Η δύναμη που μεταφέρεται διαγωνίως σε κάθε άκρο αναλύεται σε δύο συνιστώσες, η μία παράλληλη στον άξονα του υποστυλώματος και η άλλη κάθετα σε αυτόν. Η συνιστώσα που είναι παράλληλη στον άξονα του υποστυλώματος είναι ίση με την αξονική δύναμη που ασκείται σε αυτό, ενώ η κάθετη είναι ίση με

$$V_N = N \cdot (z_1 + z_2 + d_1 - d) / L$$

Όπου z_1 και z_2 είναι οι εσωτερικοί μοχλοβραχίονες στα δύο άκρα

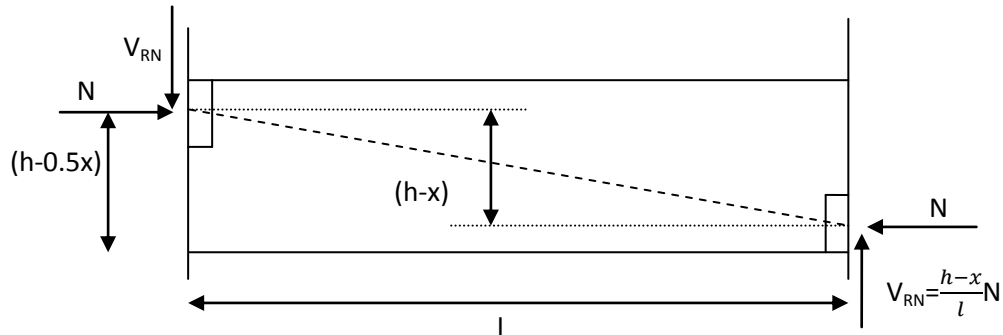
$$d_1 = h - d$$

L το μήκος διάτμησης

μάλιστα αντίθετης φοράς από ότι η εξωτερικώς ασκούμενη δύναμη. Έτσι η εσωτερική αυτή συνιστώσα αντισταθμίζει την εξωτερικώς ασκούμενη δύναμη και έτσι εξηγείται η συνεισφορά του διαγώνιου θλιπτήρα στην ανάληψη τέμνουσας.

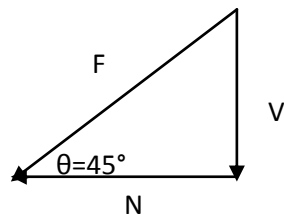
Στη συνήθη περίπτωση όπου η ροπή που ασκείται στο ένα άκρο του υποστυλώματος είναι ίση με αυτή που ασκείται στο άλλο και ο σπλισμός επίσης, η κάθετη συνιστώσα είναι ίση με:

$$V_N = N \cdot (h-x)/L$$



Σχήμα 2.49 Λειτουργία μηχανισμού αξονικής δύναμης

Όπου x είναι το βάθος του ουδέτερου άξονα (ύψος θλιβόμενης ζώνης).



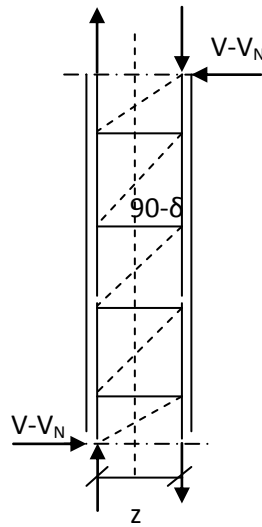
Είναι:

$$\tan\theta = V/N \text{ άρα } V = N \cdot \tan\theta.$$

$$\text{Όμως είναι } \tan\theta = (h-x)/2 \cdot L_s$$

$$\text{Άρα } V = ((h-x)/2 \cdot L_s) \cdot N$$

Έτσι λοιπόν ένα μέρος της τέμνουσας που ασκείται στο υποστύλωμα μεταφέρεται μέσω του προαναφερθέντος μηχανισμού. Το υπόλοιπο μέρος της τέμνουσας $V - V_N$ 'αναλαμβάνεται' μέσω ενός μηχανισμού εσωτερικού δικτυώματος με μεταβλητή γωνία δ .



Σχήμα 2.50 Δικτύωμα μεταβλητής γωνίας

Η διαγώνια ρωγή αρχικά δημιουργείται υπό γωνία 45° ως προς τον άξονα του μέλους. Τότε ο διαγώνιος θλιπτήρας είναι παράλληλος με τη ρωγή. Με την προϋπόθεση ότι ο κορμός έχει επαρκή αντοχή σε θλίψη, το μέλος μπορεί να αυξήσει την αντοχή σε τέμνουσα μέχρι τη διαρροή των συνδετήρων με μια σταθερά μειούμενη γωνία των θλιπτήρων. Η τέμνουσα που αναλαμβάνουν οι συνδετήρες είναι:

$$V_{RS} = \rho_w \cdot b_w \cdot z \cdot f_{yw} \cdot \cot \delta$$

Ο Δ. Μπισκίνης έχει εξάγει την παρακάτω σχέση η οποία έχει εισαχθεί και στον Ευροκώδικα 8-Μέρος 3.

$$V_N = \frac{h-x}{2 \cdot L_V} \min(N; 0.55 \cdot A_c \cdot f_c)$$

Ο όρος $\frac{h-x}{2 \cdot L_V}$ δικαιολογήθηκε παραπάνω. Όσον αφορά τον όρο $\min(N; 0.55 \cdot A_c \cdot f_c)$ ερμηνεύεται ως εξής:

Αρχικά για την τιμή της ανηγμένης αξονικής $v=0,1$ η αξονική δύναμη που ασκείται στα δύο άκρα του υποστυλώματος εξαιτίας της μικρής τιμής της εξισορροπείται τοπικώς και δεν είναι ικανή για να δημιουργηθεί ισχυρός διαγώνιος θλιπτήρας έτσι ώστε να έχουμε μεταφορά τέμνουσας και την ενεργοποίηση του μηχανισμού. Η μέγιστη τιμή της μέγιστης αξονικής δύναμης $v=0,55$ είναι επιτακτική. Η θλιβόμενη ζώνη του σκυροδέματος θα εξαντληθεί σε περίπτωση αξονικής δύναμης μεγαλύτερης της $N=0,55 \cdot A_c \cdot f_c$ με αποτέλεσμα να μην δημιουργηθεί ο διαγώνιος θλιπτήρας.

Εφαρμογή στα υπό μελέτη δοκίμια:

Δοκίμιο 1:

$$V_N = \frac{h-x}{2 \cdot L_V} \min(N; 0.55 \cdot A_c \cdot f_c) = \frac{200-112,5}{2 \cdot 500} \cdot \min(336600; 0.55 \cdot 200 \cdot 170 \cdot 22) = 29452.5 \text{ N} = \mathbf{29.45 \text{ kN}}$$

Δοκίμιο 2:

$$V_N = \frac{h-x}{2 \cdot L_V} \min(N; 0.55 \cdot A_c \cdot f_c) = \frac{200-47.5}{2 \cdot 500} \cdot \min(131784; 0.55 \cdot 200 \cdot 170 \cdot 20.4) = 20097.06 \text{ N} = \mathbf{20.097 \text{ kN}}$$

Δοκίμιο 3:

$$V_N = \frac{h-x}{2 \cdot L_V} \min(N; 0.55 \cdot A_c \cdot f_c) = \frac{457-353.44}{2 \cdot 1473} \cdot \min(2317527; 0.61 \cdot 457 \cdot 394 \cdot 21.1) = 81576.93 \text{ N} = \mathbf{81.58 \text{ kN}}$$

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ

3.1 Αποτελέσματα V_c σύμφωνα με Ευρωκώδικα 8 –Μέρος 3

Με βάση τον ευρωκώδικα 8 -Μέρος 3, η τέμνουσα που αναλαμβάνεται από το σκυρόδεμα, V_c είναι ίση με:

$$V_c = 0.16 \max(0.5; 100\rho_{\text{tot}}) \left(1 - 0.16 \min\left(5; \frac{L_v}{h}\right)\right) \sqrt{f_c} A_c$$

➤ Δοκίμιο 1:

$$V_c = 0.16 \max(0.5; 100\rho_{\text{tot}}) \left(1 - 0.16 \min\left(5; \frac{L_v}{h}\right)\right) \sqrt{f_c} A_c =$$

$$0,16 \max(0.5; 100 \cdot 0.03) \left(1 - 0.16 \min\left(5; \frac{500}{200}\right)\right) \sqrt{22} \cdot 200 \cdot 170 =$$

$$45924.48 \text{ N} = 45.92 \text{ kN}$$

➤ Δοκίμιο 2:

$$V_c = 0.16 \max(0.5; 100\rho_{\text{tot}}) \left(1 - 0.16 \min\left(5; \frac{L_v}{h}\right)\right) \sqrt{f_c} A_c =$$

$$0,16 \max(0.5; 100 \cdot 0.02) \left(1 - 0.16 \min\left(5; \frac{500}{200}\right)\right) \sqrt{20,4} \cdot 200 \cdot 170 =$$

$$29506,56 \text{ N} = 29,56 \text{ kN}$$

➤ Δοκίμιο 3:

$$V_c = 0.16 \max(0.5; 100\rho_{\text{tot}}) \left(1 - 0.16 \min\left(5; \frac{L_v}{h}\right)\right) \sqrt{f_c} A_c =$$

$$0,16 \max(0.5; 100 \cdot 2,45) \left(1 - 0.16 \min\left(5; \frac{1473}{457}\right)\right) \sqrt{21,1} \cdot 457 \cdot 394 = 157062 \text{ N} = 157,062 \text{ kN}$$

3.2 Αποτελέσματα Ευρωκώδικας 2 (EC2)

Ο Ευρωκώδικας 2 ορίζει ποια θα είναι η τέμνουσα που αναλαμβάνει το σκυρόδεμα υπό μονοτονική φόρτιση. Συγκεκριμένα είναι:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d$$

με ελάχιστη τιμή την

$$V_{Rd,c} = (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d$$

όπου:

f_{ck} σε MPa

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \text{ με } d \text{ σε mm}$$

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02$$

A_{sl} είναι το εμβαδόν του εφελκυσμένου οπλισμού που εκτείνεται σε απόσταση $\geq (l_{bd} + d)$ πέρα από τη θεωρούμενη διατομή (βλέπε Σχήμα 6.3).

b_w είναι το ελάχιστο πλάτος της διατομής στην εφελκυσμένη ζώνη [mm]

$$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c < 0,2 f_{cd} \text{ [MPa]}$$

N_{Ed} είναι η αξονική δύναμη στη διατομή [σε N] ($N_{Ed} > 0$ για θλίψη). Η επιρροή των επιβεβλημένων παραμορφώσεων στη N_E μπορεί να αγνοείται.

A_c είναι το εμβαδόν της διατομής του σκυροδέματος [mm²]

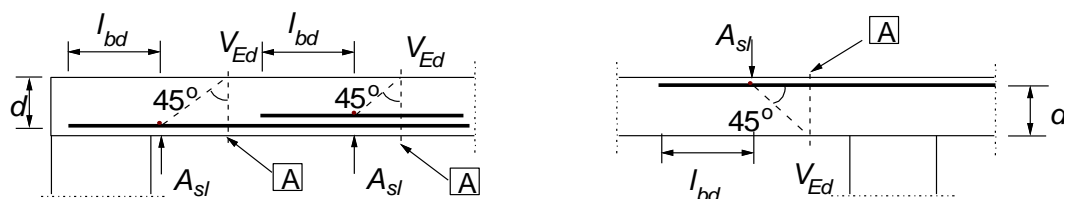
$V_{Rd,c}$ σε [N]

Σημείωση: Οι τιμές των $C_{Rd,c}$, v_{min} και k_1 που θα χρησιμοποιούνται σε μια χώρα δίνονται στο αντίστοιχο Εθνικό Προσάρτημα. Η συνιστώμενη τιμή για το $C_{Rd,c}$ είναι $0,18/\gamma_c$, ενώ για το v_{min} δίνεται από τη σχέση (6.3N) και για το k_1 είναι 0,15.

$$v_{min} = 0,035 k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$$

Δεδομένου ότι όλη η ανάλυση που έχει γίνει μέχρι τώρα αφορά τη μονοτονική φόρτιση μελών θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από

τον Ευροκωδικα 2.



Σχήμα 3.1 Ορισμός του A_{sl} στη σχέση

Έτσι για καθένα από τα τρία υπό εξέταση δοκίμια θα αφαιρεθεί η συνεισφορά του αξονικού φορτίου. Οπότε προκύπτει:

➤ Δοκίμιο 1:

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 = 2,08 > 2 \text{ άρα } k=2, \text{ όπου } d=170\text{mm το στατικό ύψος του δοκίμιου}$$

$$\rho_l = \frac{\rho_{tot}}{2} = \frac{3}{2} = 1,5\%$$

$$f_{ck} = 22 \text{ MPa}$$

$$k_1 = 0,15$$

$$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c = (v \cdot A_c \cdot f_c / A_c) = (0,45 \cdot 200 \cdot 170 \cdot 22 / 200 \cdot 170) = 9,9 \text{ MPa} > 0,2 f_{cd} = 0,2 \cdot \frac{22}{1,5} = 2,93 \text{ MPa}$$

$$\text{Άρα } \sigma_{cp} = 2,93 \text{ MPa}$$

$$b_w = 200 \text{ mm}$$

$$d = 170 \text{ mm}$$

$$\text{Άρα } V_{Rd,c} = \mathbf{40,81 \text{ kN}}$$

Ελάχιστη τιμή:

$$V_{RdC} = (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

$$\text{Όπου } v_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$$

Οπότε:

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} = 0,035 \cdot 2^{3/2} \cdot 22^{1/2} = 0,46 \text{ άρα}$$

$$V_{RdC} = (0,46 + 0,15 \cdot 2,93) \cdot 200 \cdot 170 = 30583 \text{ N} = 30,58 \text{ kN}$$

➤ Δοκίμιο 2:

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 = 2,08 > 2 \text{ άρα } k=2, \text{ όπου } d=170\text{mm το στατικό ύψος του δοκιμίου}$$

$$\rho_l = \frac{\rho_{tot}}{2} = \frac{2}{2} = 1\%$$

$$f_{ck} = 20,4 \text{ MPa}$$

$$k_1 = 0.15$$

$$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c = (v \cdot A_c \cdot f_c / A_c) = (0.19 \cdot 200 \cdot 170 \cdot 20,4 / 200 \cdot 170) = 3,876 \text{ MPa} > 0,2 f_{cd} = 0,2 \cdot \frac{20,4}{1,5} = 2,72 \text{ MPa}$$

$$\text{Άρα } \sigma_{cp} = 2,72 \text{ MPa}$$

$$b_w = 200 \text{ mm}$$

$$d = 170 \text{ mm}$$

$$\text{Άρα } V_{Rd,c} = \mathbf{35,94 \text{ kN}}$$

Ελάχιστη τιμή:

$$V_{RdC} = (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

$$\text{Όπου } v_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$$

Οπότε:

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} = 0,035 \cdot 2^{3/2} \cdot 20,4^{1/2} = 0,45 \text{ άρα}$$

$$V_{RdC} = (0,45 + 0,15 \cdot 2,72) \cdot 200 \cdot 170 = 29172 \text{ N} = 29,17 \text{ Kn}$$

➤ Δοκίμιο 3:

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{1,5} = 0,12$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 = 1,87, \text{ όπου } d=394 \text{ mm το στατικό ύψος του δοκιμίου}$$

$$\rho_l = \frac{\rho_{tot}}{2} = \frac{2,45}{2} = 1,225\%$$

$$f_{ck} = 21,1 \text{ MPa}$$

$$k_1=0.15$$

$$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c = (v \cdot A_c \cdot f_c / A_c) = (0.61 \cdot 457 \cdot 394 \cdot 21.1 / 457 \cdot 394) = 12.87 \text{ MPa} > 0,2 f_{cd} = 0,2 \cdot \frac{21.1}{1.5} = 2.81 \text{ MPa}$$

$$\text{Άρα } \sigma_{cp} = 2,81 \text{ MPa}$$

$$b_w = 457 \text{ mm}$$

$$d = 394 \text{ mm}$$

$$\text{Άρα } V_{Rd,c} = 139.832 \text{ kN}$$

Ελάχιστη τιμή:

$$V_{RdC} = (v_{\min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

$$\text{Όπου } v_{\min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$$

Οπότε:

$$v_{\min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} = 0,035 \cdot 1.87^{3/2} \cdot 21.1^{1/2} = 0,41 \text{ άρα}$$

$$V_{RdC} = (0,41 + 0,15 \cdot 2,81) \cdot 457 \cdot 394 = 149718.23 \text{ N} = 149.718 \text{ kN}$$

3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τον Αμερικάνικο κανονισμό σκυροδέματος (ACI)(παράγραφος 11.2.1.2)

Ο Αμερικάνικος κανονισμός σκυροδέματος υπολογίζει την τέμνουσα που αναλαμβάνει το σκυρόδεμα ως εξής:

$$V_c = 0.17 \cdot \left(1 + \frac{N_u}{14 \cdot A_g}\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d$$

Όπου

N_u είναι η αξονική θλιπτική δύναμη που ασκείται στο μέλος

A_g είναι το εμβαδόν της διατομής του μέλους, $A_g = b_w \cdot d$

f_c είναι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

b_w είναι το πλάτος της διατομής του μέλους

d είναι το στατικό ύψος της διατομής

λ είναι συντελεστής ο οποίος αφορά το αν πρόκειται για ελαφροσκυρόδεμα ή όχι. (παραγραφος 8.6.1)Είναι:

$\lambda = 0,85$ για ελαφροσκυρόδεμα με άμμο

$\lambda = 0,75$ για όλους τους υπόλοιπους τύπους ελαφροσκυροδεμάτων και

$\lambda = 1,00$ για κανονικό σκυροδέμα και όχι ελαφροσκυροδέμα

Οπότε εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση στα υπό εξέταση δοκίμια προκύπτουν τα εξής:

➤ Δοκίμιο 1:

$$N_u = \nu \cdot A_c \cdot f_c = 0.45 \cdot 200 \cdot 170 \cdot 22 = 336600 \text{ N}$$

$$V_c = 0.17 \cdot \left(1 + \frac{N_u}{14 \cdot A_g}\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d = 0.17 \cdot \left(1 + \frac{336600}{14 \cdot 200 \cdot 170}\right) \cdot 1 \cdot \sqrt{22} \cdot 200 \cdot 170 = 46281.6 \text{ N} = 46.28 \text{ kN}$$

➤ Δοκίμιο 2:

$$N_u = \nu \cdot A_c \cdot f_c = 0.19 \cdot 200 \cdot 170 \cdot 20.4 = 131784 \text{ N}$$

$$V_c = 0.17 \cdot \left(1 + \frac{N_u}{14 \cdot A_g}\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d = 0.17 \cdot \left(1 + \frac{131784}{14 \cdot 200 \cdot 170}\right) \cdot 1 \cdot \sqrt{20.4} \cdot 200 \cdot 170 = 33333.81 \text{ N} = 33.33 \text{ kN}$$

➤ Δοκίμιο 3:

$$N_u = \nu \cdot A_c \cdot f_c = 0.61 \cdot 457 \cdot 394 \cdot 21.1 = 2317526.52 \text{ N}$$

$$V_c = 0.17 \cdot \left(1 + \frac{N_u}{14 \cdot A_g}\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d = 0.17 \cdot \left(1 + \frac{2317526.52}{14 \cdot 457 \cdot 394}\right) \cdot 1 \cdot \sqrt{21.1} \cdot 457 \cdot 394 = 269872.32 \text{ N} = 269.87 \text{ kN}$$

Πίνακας 3.1 Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων σύμφωνα με το τι θεωρεί ο κάθε κανονισμός ως συνεισφορά του σκυροδέματος στην ανάληψη τέμνουσας

V_c (kN)	ΔΟΚΙΜΙΟ 1	ΔΟΚΙΜΙΟ 2	ΔΟΚΙΜΙΟ 3
ΑΝΑΛΥΣΗ	56,33	54,45	259,37
EC8	45,92 (18,48%)	29,56 (45,71%)	157,06 (39,45%)
EC2	40,81 (27,55%)	35,94 (33,99%)	139,83 (46,09%)
ACI	46,28 (17,78%)	33,33 (38,79%)	269,87 (4,05%)

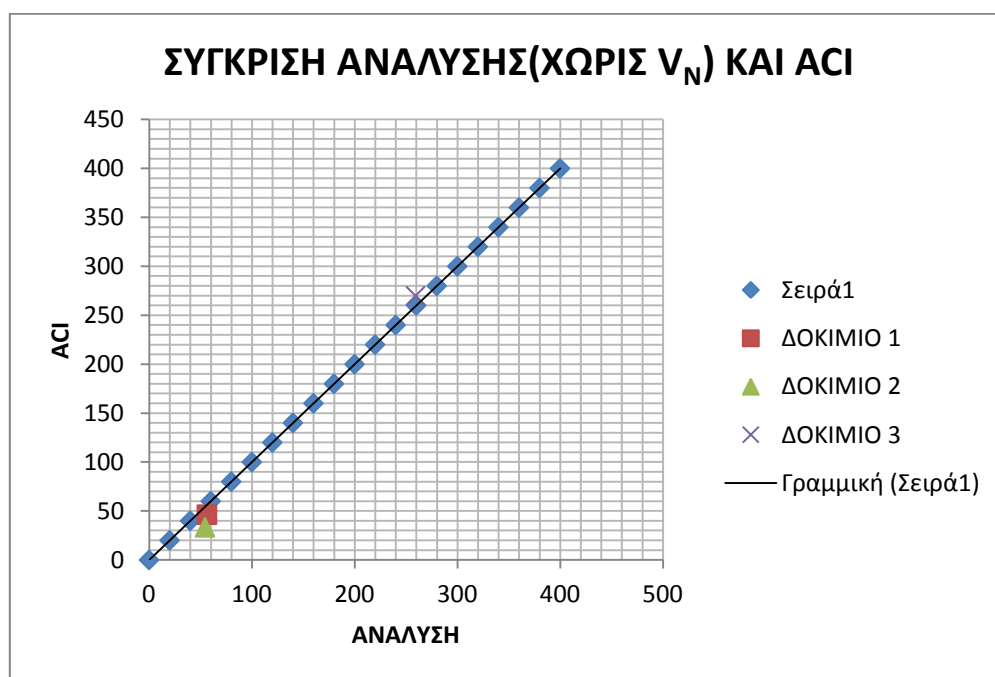
Πίνακας 3.2 Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων λαμβανομένης της αξονικής δύναμης στην συνεισφορά σκυροδέματος

V_c (kN)	ΔΟΚΙΜΙΟ 1	ΔΟΚΙΜΙΟ 2	ΔΟΚΙΜΙΟ 3
ΑΝΑΛΥΣΗ	56,33+29,45=85,78	54,45+20,09=75,56	259,37+81,58=340,95
EC8	45,92+29,45=75,37 (12,14%)	29,56+20,09=49,65 (34,29%)	157,06+81,58=238,64 (30,00%)
EC2	40,81 (52,24%)	35,94 (52,44%)	139,832 (58,99%)
ACI	46,28 (46,05%)	33,33 (55,89%)	269,87 (20,84%)

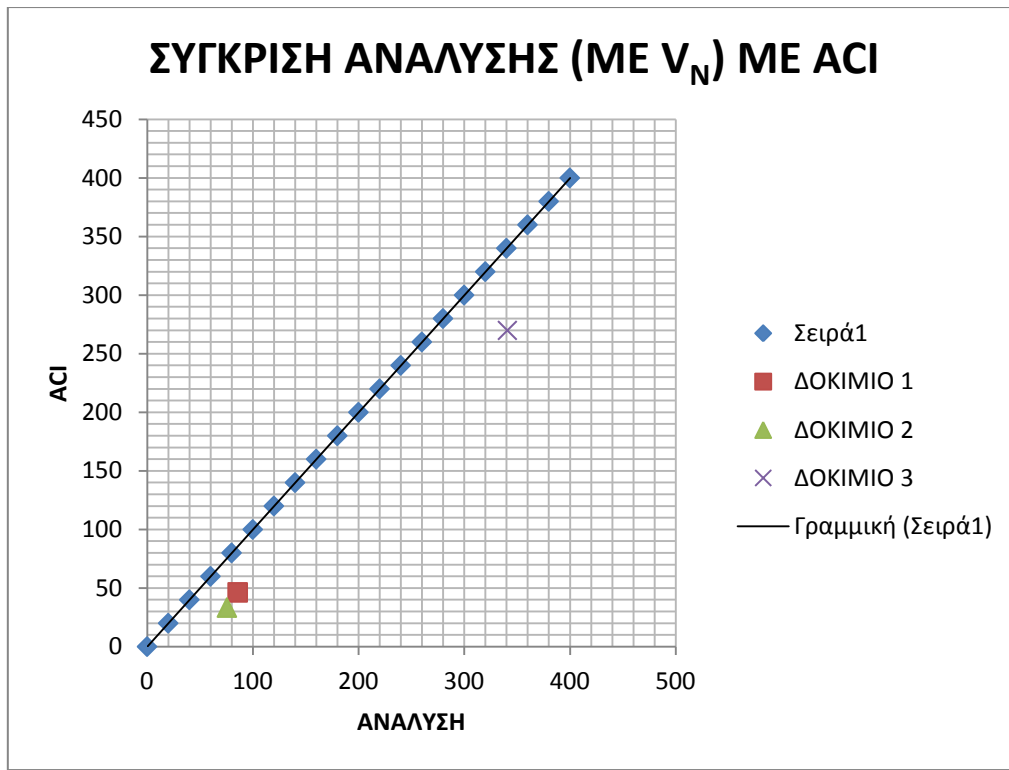
Προκειμένου να διαφανεί τι ποσοστό της τέμνουσας αναλαμβάνει καθένας από τους μηχανισμούς θα παρουσιασθεί ένας συνολικός συγκριτικός πίνακας με τις τιμές όπως προέκυψαν από την ανάλυση και όπως προκύπτουν από τον EC8-Μέρος 3.

Πίνακας 3.3 Ποσά τέμνουσας που αναλαμβάνει κάθε μηχανισμός

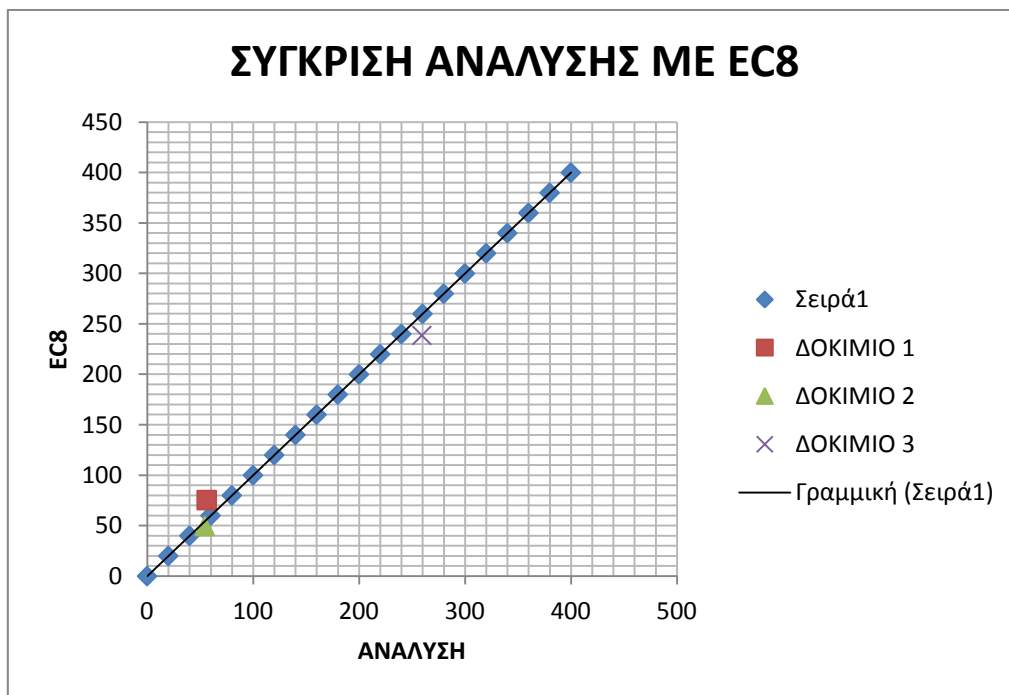
	V_N	V_c	V_w
ΔΟΚΙΜΙΟ 1 EC8	29,45	45,92	32,11
ΔΟΚΙΜΙΟ 2 EC8	20,09	29,56	35,54
ΔΟΚΙΜΙΟ 3 EC8	81,58	157,06	129,2
ΔΟΚΙΜΙΟ 1 ΑΝΑΛΥΣΗ	29,45	56,33	32,11
ΔΟΚΙΜΙΟ 2 ΑΝΑΛΥΣΗ	20,097	54,45	35,54
ΔΟΚΙΜΙΟ 3 ΑΝΑΛΥΣΗ	81,58	259,37	129,2



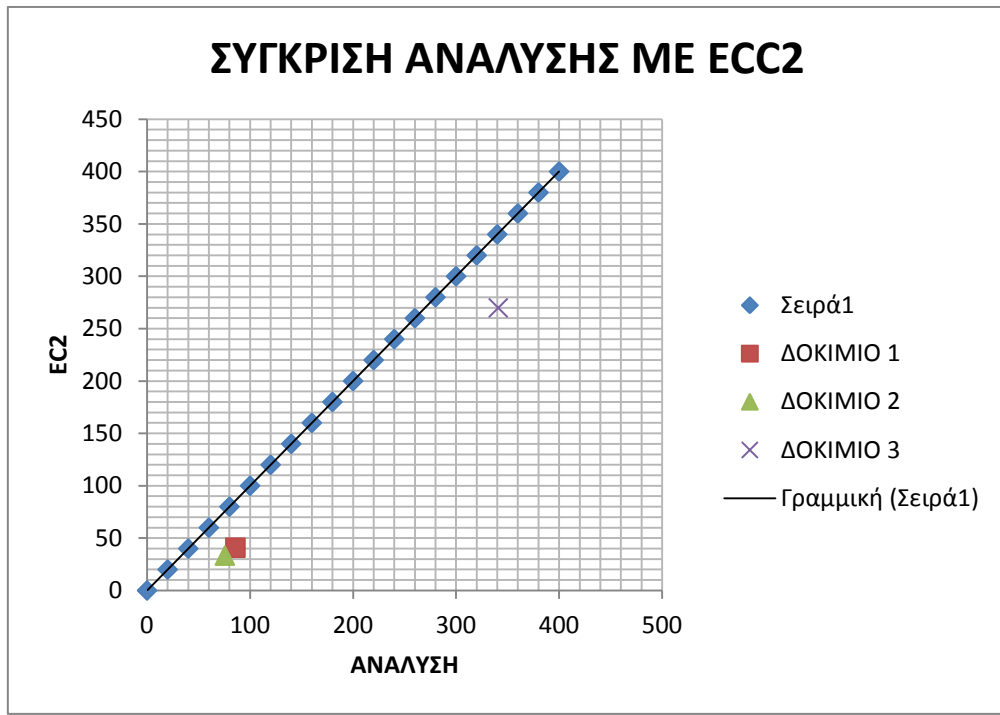
Σχήμα 3.1 Σύγκριση ανάλυσης με ACI



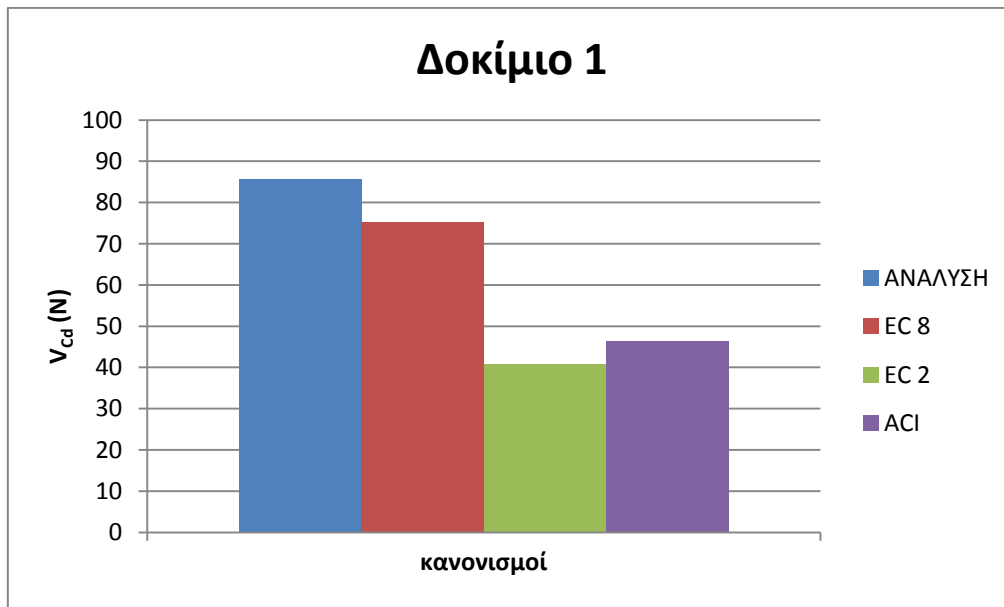
Σχήμα 3.2 Σύγκριση ανάλυσης με ACI



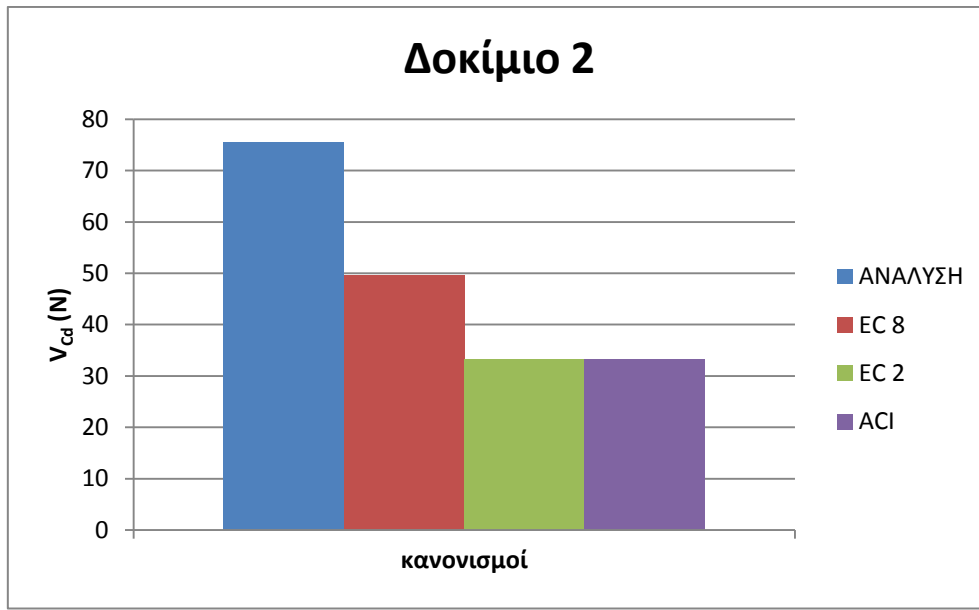
Σχήμα 3.3 Σύγκριση ανάλυσης με EC8-3



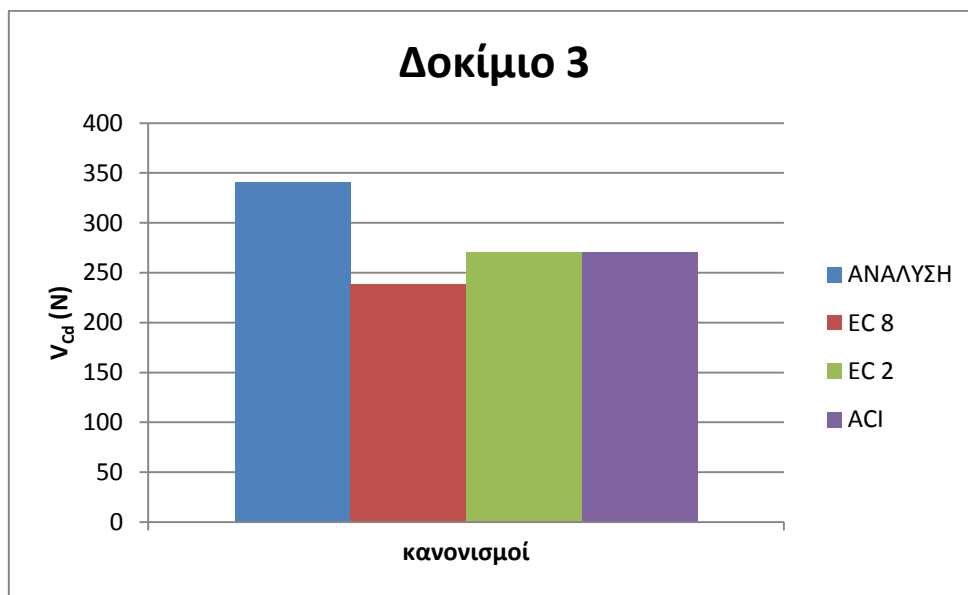
Σχήμα 3.4 Σύγκριση ανάλυσης με EC2



Σχήμα 3.5 Σύγκριση όλων των κανονισμών για το δοκίμιο 1



Σχήμα 3.6 Σύγκριση όλων των κανονισμών για το δοκίμιο 2



Σχήμα 3.7 Σύγκριση όλων των κανονισμών για το δοκίμιο 3

4 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ ΣΕ ΜΕΛΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Μεταξύ της καμπτικής και της διατμητικής ρωγμής υπάρχουν βασικές διαφορές. Το άνοιγμα της διατμητικής ρωγμής στα μέλη οπλισμένου σκυροδέματος συνήθως συνοδεύονται από ολίσθηση των χειλών της ρωγμής κάτι που συνεπάγεται στη μεταφορά τέμνουσας δύναμης μέσω της εμπλοκής αδρανών. Η ολίσθηση των μετώπων της ρωγμής είναι ένας από του βασικότερους παράγοντες για την παραμόρφωση του εγκάρσιου οπλισμού, ιδιαίτερα υπό ανακυκλική φόρτιση. Αντιθέτως, σε περιοχές με σταθερή ροπή, μόνο ρωγμές λόγω εφελκυσμού ή κάμψης συμβαίνουν χωρίς να υπάρχει ολίσθηση κατά μήκος της ρωγμής. Περαιτέρω έρευνες έχουν αποδείξει ότι το άνοιγμα της ρωγμής δεν προκαλείται μόνο από την επιμήκυνση του κατακόρυφου τμήματος του εγκάρσιου οπλισμού αλλά και από την ολίσθηση των συνδετήρων στο σημείο αγκύρωσης και από την επιμήκυνση του οριζόντιου τμήματος των συνδετήρων το οποίο προκαλεί ολίσθηση στο σημείο που ο συνδετήρας αποκτά κλίση. Αντιθέτως το άνοιγμα των καμπτικών ρωγμών συνήθως προκαλείται από την επιμήκυνση του εφελκυσμένου οπλισμού υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει ολίσθηση στα άκρα του.

Έρευνες έχουν δείξει ότι το άνοιγμα της διατμητικής ρωγμής εξαρτάται από τον οπλισμό του μέλους αλλά και από την γωνία του οπλισμού με τη γωνία της ρωγμής. Σε δοκούς με κατακόρυφους συνδετήρες παρατηρήθηκε μεγαλύτερο άνοιγμα ρωγμής σε σχέση με δοκούς με κεκλιμένους με την ίδια απραμόρφωση αυτών (Hassan et al 1985). Μία διατμητική ρωγμή γενικώς τέμνει τον οπλισμό διάτμησης και κάμψης υπό γωνία ενώ μια καμπτική ρωγμή τους τέμνει κάθετα. Παρατηρήθηκε ότι το άνοιγμα της καμπτικής ρωγμής είναι ανάλογο με την απόσταση αυτής από την γειτονική ράβδο, δηλαδή όσο μεγαλύτερη η απόσταση τόσο μεγαλύτερη η ρωγμή (Gergely και Lutz 1968). Στην έρευνα του Broms (1965) απεδείχθη ότι η επικάλυψη του εγκάρσιου οπλισμού παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο άνοιγμα της ρωγμής. Το άνοιγμα της ρωγμής είναι ανάλογο της απόστασης από τον γειτονικό συνδετήρα εξαιτίας του δεσμού μεταξύ του συνδετήρα και του περιβάλλοντος σκυροδέματος.

4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν το άνοιγμα της διατμητικής ρωγμής, w

Έχουν γίνει πολλαπλές προσπάθειες προκειμένου να αποσαφηνιστεί το θέμα του ανοίγματος της διατμητικής ρωγμής σε δομικά στοιχεία με σπλισμένο σκυρόδεμα που διαθέτουν σπλισμό διάτμησης. Τέτοιες είναι των Adebar και Leeuwen 1999, Adebar 2001, De Silva et al 2005, 2008, Hassan et al 1985, 1987, 1991, Witchukreangkrai et al 2004, 2006, Riyamahant 2002, Collins et al 2007, Sherwood et al 2007, Zararis 2007. Η ρωγή σχετίζεται με την εμφάνιση, την υδατοστεγανότητα, την δυνατότητα να συντηρηθεί και να επιδιορθωθεί το δομικό στοιχείο στο οποίο εμφανίζεται. Σχετίζεται ακόμη με την αντοχή του, η οποία συνδέεται άμεσα με την ακαμψία του μέλους. Έχει αποδειχθεί ότι το άνοιγμα της διατμητικής ρωγμής είναι μεγαλύτερο από το άνοιγμα αντίστοιχης ρωγμής που προκλήθηκε λόγω εφελκυσμού ή λόγω κάμψης. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι η διαγώνια παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη από την διαμήκη παραμόρφωση καθώς ο σπλισμός διάτμησης είναι υπό γωνία σε σχέση με την διαγώνια ρωγή (Adebar 2001). Επιπροσθέτως έχει αποδειχθεί ότι το μέγιστο άνοιγμα διατμητικής ρωγμής μπορεί να επηρεαστεί από πολλούς παράγοντες όπως η παραμόρφωση του διαμήκη σπλισμού κατά τη διεύθυνση του άξονά του, το ποσοστό του εγκάρσιου σπλισμού, και η επικάλυψη του εγκάρσιου σπλισμού (Adebar and Leeuwen 1999). Οι Hassan et al (1985, 1987, 1991) απέδειξαν ότι το άνοιγμα της ρωγμής εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εγκάρσιου σπλισμού (αγκύρωση, μεταξύ τους απόσταση, γωνία σε σχέση με τον άξονα του μέλους και ποσοστό αυτού) καθώς επίσης και από τον λόγο του διατμητικού ανοίγματος προς το ύψος της διατομής. Πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι διατμητικές ρωγμές έχουν μειωμένη ικανότητα να μεταφέρουν διατμητικές τάσεις. Το μέγεθος των ρωγμών εξαρτάται από την απόσταση των ρωγμών η οποία καθορίζεται από την απόσταση του διαμήκη σπλισμού. Η απόσταση μεταξύ των ρωγμών στο μέσον του ύψους του κορμού αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους της δοκού. Σύμφωνα με τα πειράματα των Shioya et al (1989) έχει αποδειχθεί ότι η οριζόντια απόσταση των διατμητικών ρωγμών είναι περίπου ίση με $0,5 \cdot d$. Σύμφωνα με τον Zarari 2003 ο διαμήκης σπλισμός διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στο άνοιγμα των διατμητικών ρωγμών.

Προκειμένου να αποκωδικοποιηθεί η εικόνα και οι παράγοντες που επηρεάζουν την διατμητική ρωγή πραγματοποιήθηκαν από τους Mohamed Zakaria, Tamon Ueda, Zhimin Wu και Liang Meng 10 πειράματα στα πλαίσια διερεύνησης του ανωτέρω θέματος από το πανεπιστήμιο Hokaido στην Ιαπωνία και το πανεπιστήμιο Dalian στην Κίνα. Τα δοκίμια ήταν δοκοί αμφιέριστες με πλάτος πέλματος $b=200\text{mm}$.

Παρουσιάζονται παρακάτω τα δεδομένα των πειραμάτων:

Πίνακας 4.1 Δεδομένα πειραμάτων

Specimen	Overall height h , mm	Effective depth d , mm	Shear span a , mm	a/d	Side concrete cover to stirrup c_s , mm	ρ_t %	ρ_w %	Stirrup spacing s_y , mm
Series I								
A ₁ left	200	160	320	2.0	25	2.86	0.72	100
A ₁ right	200	160	480	3.0	25	2.86	0.72	100
A ₂ left	350	280	560	2.0	25	2.83	0.72	100
A ₂ right	350	280	840	3.0	25	2.83	0.72	100
A ₃ left	500	432	864	2.0	25	2.84	0.72	100
A ₃ right	500	432	1296	3.0	25	2.84	0.72	100
A ₄ left	750	669	1338	2.0	25	2.84	0.72	100
A ₄ right	750	669	1003	1.5	25	2.84	0.72	100
Series II								
B ₁ left*	500	432	864	2.0	40	2.84	0.72	100
B ₁ right	500	432	864	2.0	40	2.84	0.72	100
B ₂ left	500	432	864	2.0	60	2.84	0.36	200
B ₂ right	500	432	864	2.0	60	2.84	0.72	100
B ₃ left	500	432	864	2.0	80	2.84	0.36	200
B ₃ right	500	432	864	2.0	80	2.84	0.72	100
Series III								
C ₁	500	450	900	2.0	25	1.62	0.72	100
C ₂	500	427	854	2.0	25	2.30	0.72	100
C ₃	500	417	834	2.0	25	3.64	0.72	100

Όπου

a/d είναι ο λόγος του μήκους διάτμησης

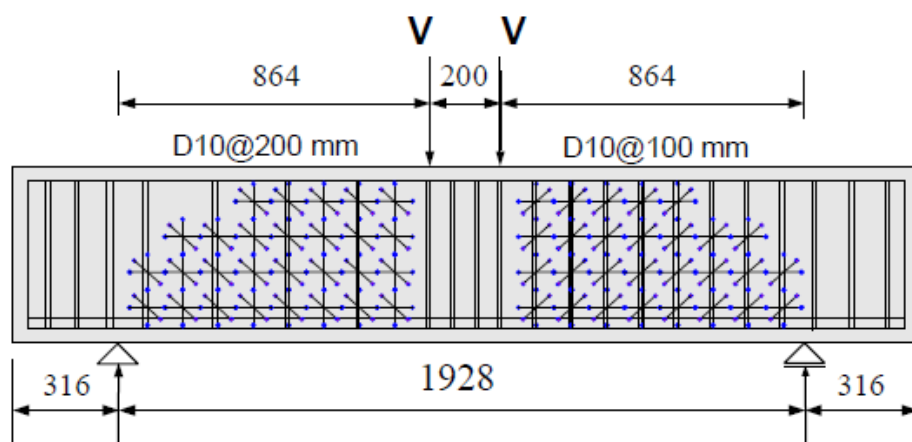
ρ_t % είναι το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού

ρ_w % είναι το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού.

Μετρήθηκε το άνοιγμα της ρωγμής και η παραμόρφωση του σκυροδέματος με τη βοήθεια εξαρτημάτων μέτρησης παραμόρφωσης (strain gages) με ακρίβεια 0,001mm. Ακόμη ίδια εξαρτήματα τοποθετήθηκαν στον εγκάρσιο οπλισμό προκειμένου να αποσαφινιστεί η σχέση μεταξύ του ανοίγματος της ρωγμής και της παραμόρφωσης των συνδετήρων στο σημείο τομής με την ρωγμή.

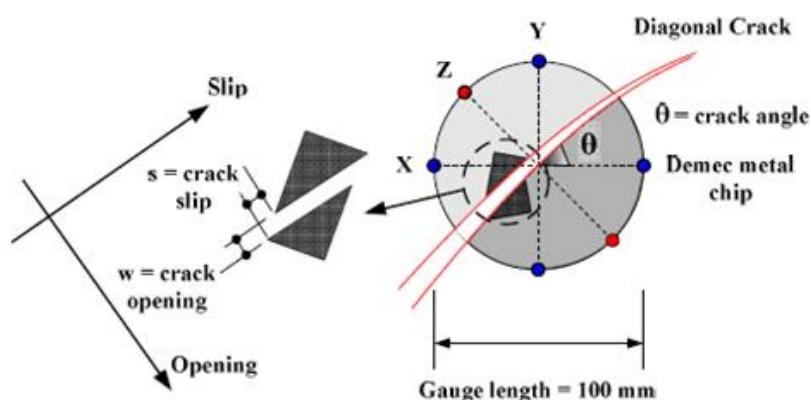
Τα δέκα δοκίμια εγχύθηκαν σε ξύλινα καλούπια με σκυρόδεμα με χαρακτηριστική αντοχή 40 MPa και μέγιστη διάμετρο κόκκων 25mm. Στις αναλογίες ανάμιξης του τσιμέντου ακολουθήθηκαν οι αναλογίες του τσιμέντου Portland και ο λόγος νερό προς τσιμέντο ήταν 0,5 με τη χρήση πρόσθετων.

Τα strain gages τοποθετήθηκαν στα δοκίμια σε συγκεκριμένες θέσεις γύρω από το σημείο εφαρμογής της τέμνουσας και μετρήθηκε το άνοιγμα της ρωγμής και η ολίσθηση των χειλών αυτής.



Σχήμα 4.1 Θέσεις όπου τοποθετήθηκαν οι μετρητές παραμόρφωσης του σκυροδέματος

Μετρώντας τις παραμορφώσεις του σκυροδέματος και τη γωνία της διατμητικής ρωγμής, είναι δυνατόν να υπολογιστούν το άνοιγμα της ρωγμής, w και η ολίσθηση των χειλών αυτής, s .

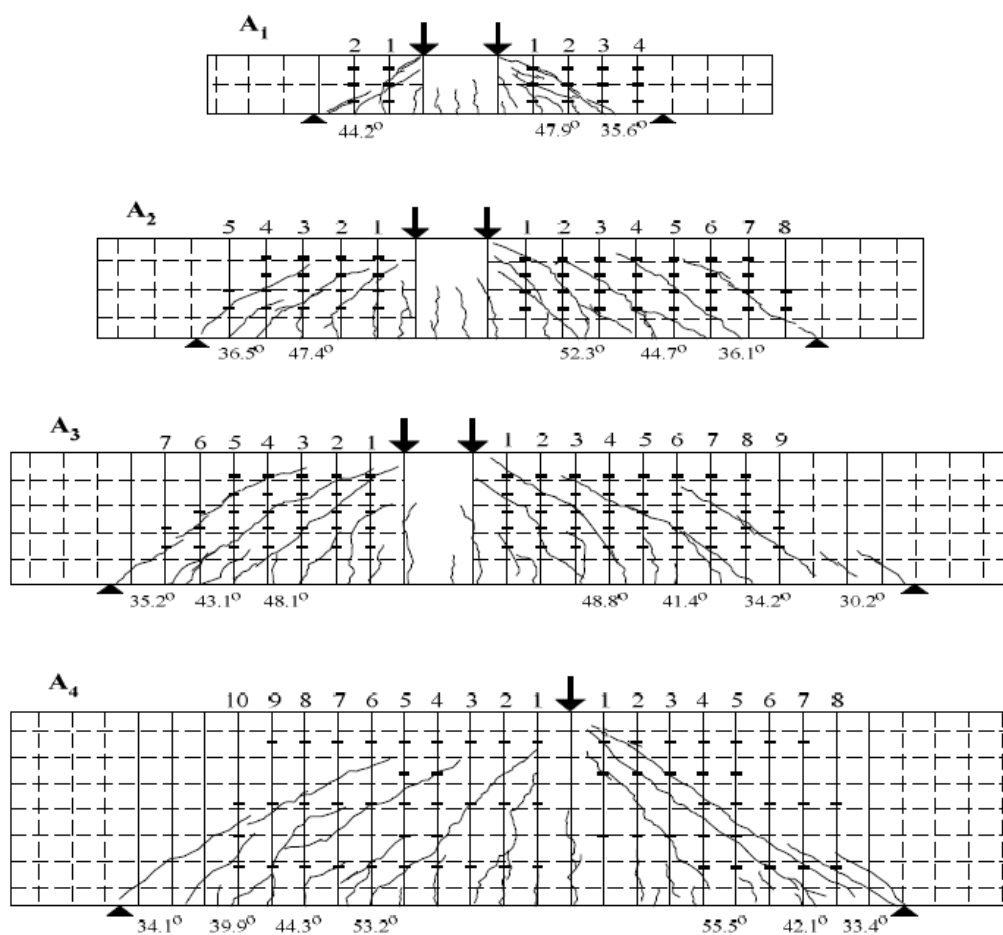


Σχήμα 4.2 Προσδιορισμός μετακινήσεων διατμητικής ρωγμής

Προκειμένου να υπολογιστεί η σχέση μεταξύ του ανοίγματος της ρωγμής και της παραμόρφωσης των συνδετήρων, τοποθετήθηκαν strain gages στους υπό μελέτη συνδετήρες ενώ τοποθετήθηκαν επίσης strain gages στα σημεία εφαρμογής των φορτίων. Η υπό εξέταση επιφάνεια βάφτηκε με άσπρο χρώμα προκειμένου να είναι ευκολότερη η παρατήρηση της εξέλιξης της ρωγμής. Σε όλα τα δοκίμια επιβλήθηκε φορτίο 5000 kN.

Οι ρωγμές που προέκυψαν μετά την επιβολή της φόρτισης ήταν διαφορετικής γωνίας κατά μήκος του ανοίγματος της δοκού. Στο σημείο εφαρμογής της δύναμης, οι διατμητικές ρωγμές ήταν απότομες και με μικρή κλίση ενώ κοντά στο στήριγμα γινόταν πιο ομαλές και η κλίση τους αυξανόταν σε σχέση με τον άξονα της δοκού. Οι αρχικές ρωγμές ήταν

καμπτικές στο μέσον του ανοίγματος της δοκού και καθώς το φορτίο αυξανόταν εμφανίζονταν καμπτικές ρωγμές στην περιοχή διάτμησης και έπειτα πήραν τη μορφή καμπτοδιατμητικών ρωγμών προσπαθώντας να συναντήσουν στο στήριγμα της δοκού και το σημείο εφαρμογής του φορτίου. Έπειτα εμφανίστηκαν περισσότερες διατμητικές ρωγμές με την περαιτέρω αύξηση του φορτίου.



Σχήμα 4.3 Μορφές διατμητικών ρωγμών στα δοκίμια

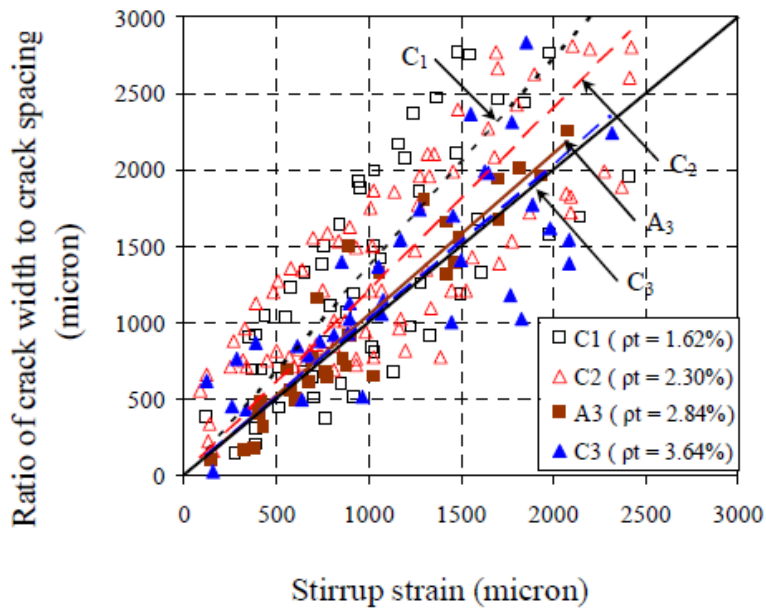
Όλα τα δοκίμια αστόχησαν πρώτα καμπτικά και μετά διατμητικά. Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν έχουν ως ακολούθως:

- Επιρροή του ποσοστού διαμήκους σπλισμού

Το ποσοστό διαμήκους σπλισμού που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα ήταν $\rho_{tot}=1,62\%$, $2,3\%$, $2,84\%$ και $3,64\%$. Απεδείχθη πως όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό σπλισμού, τόσο μικρότερη είναι η απόσταση μεταξύ των ρωγμών. Ακόμη όσο μεγαλύτερο είναι το όριο διαρροής του διαμήκους σπλισμού, τόσο μικρότερο είναι το άνοιγμα της ρωγμής. Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, ο εγκάρσιος σπλισμός καλείται να αντισταθεί στην εξόλκευση που του επιβάλλεται. Η εξόλκευση του συνδετήρα οδηγεί στο άνοιγμα της ρωγμής. Ο εφελκόμενος σπλισμός εξαιτίας του ότι είναι συνδεδεμένος με τον συνδετήρα, θα πρέπει να 'επιτρέψει' στον τελευταίο να εξολκευθεί τόσο όσο θα εξολκευθεί

και ο ίδιος. Με αυτόν τον τρόπο ο εφελκόμενος σπλισμός 'ράβει' την ρωγμή και μέσω της αντίστασης σε εξόλκευση – εφελκυσμό συμβάλει στο μη περαιτέρω άνοιγμα της ρωγμής.

Παρουσιάζεται το παρακάτω διάγραμμα όπου φαίνεται πως για μικρότερο ποσοστό διαμήκους σπλισμού, ο λόγος του ανοίγματος της ρωγμής προς την απόσταση των ρωγμών είναι μεγαλύτερος για την ίδια παραμόρφωση συνδετήρα.



Σχήμα 4.4 Επιρροή του διαμήκους σπλισμού στον λόγο ανοίγματος ρωγμής προς την απόσταση των ρωγμών

5 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΝΑΚΥΚΛΙΣΗ

Κατά τη διάρκεια της ανακύκλισης οι μηχανισμοί ανάληψης τέμνουσας εξασθενούν, άρα και η τέμνουσα που αναλαμβάνεται μειώνεται. Μια πρώτη εικόνα της επιρροής που έχει η ανακύκλιση στους μηχανισμούς είναι η εξής:

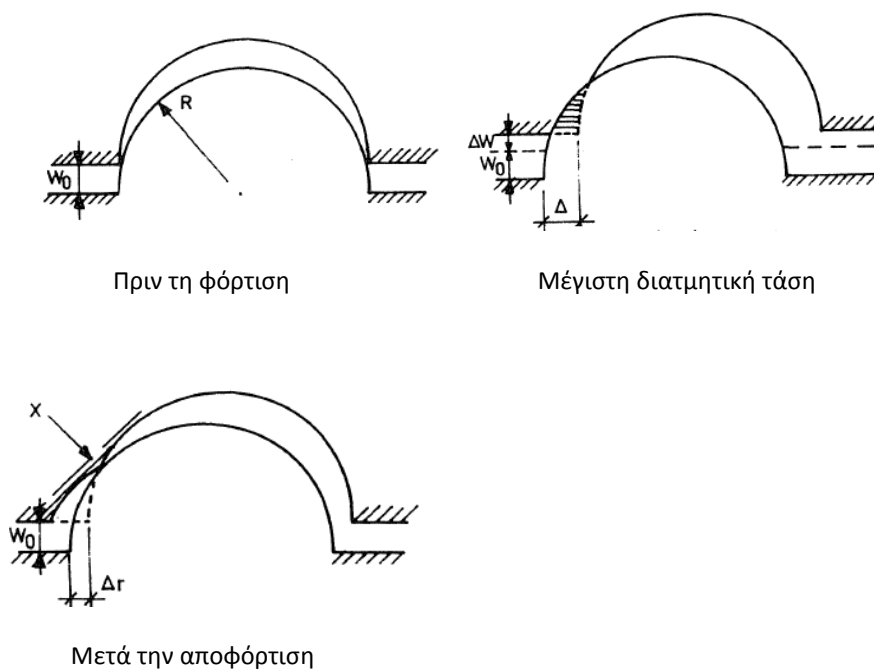
- Κατά τη διάρκεια της ανακύκλισης υπάρχει ολίσθηση μεταξύ των χειλών της ρωγμής. Αποτέλεσμα αυτού είναι τα αδρανή τα οποία προεξείχαν από το όριο του κάθε χείλους της ρωγμής να "τρίβονται" μεταξύ τους. Έτσι οι επιφάνειες της ρωγμής γίνονται λείες. Τα αδρανή παύουν να αλληλοεμπλέκονται.
- Ο μηχανισμός δράσης βλήτρου εξασθενεί καθώς το άνοιγμα της ρωγμής μεγαλώνει και ο εφελκόμενος σπλισμός δεν μπορεί πλέον να αντισταθεί στην παραμόρφωση εγκάρσια στον άξονά του. Ο τελευταίος αποκτά πλαστικές παραμορφώσεις και δεν συμμετέχει πλέον στην ανάληψη τέμνουσας.
- Η ρωγμή που έχει προκύψει φτάνει μέχρι το $0,9 \cdot d$ του ύψους της διατομής. Κατά τη διάρκεια επιβολής ανακυκλιζόμενης έντασης το ύψος της ρωγμής μεγαλώνει και η τελευταία εισέρχεται στη θλιβόμενη ζώνη του σκυροδέματος με αποτέλεσμα να την καθιστά αδύνατη να αναλάβει περαιτέρω τέμνουσα.
- Το γεγονός ότι το άνοιγμα της ρωγμής μεγαλώνει και λόγω της ολίσθησης που λαμβάνει χώρα, η αλληλεμπλοκή των αδρανών μειώνεται σταδιακά και αυτό έχει επίπτωση στη συνάφεια μεταξύ των συνδετήρων και του σκυροδέματος. Κατά συνέπεια ο συνδετήρας δεν συγκρατείται από το σκυρόδεμα και αποκτά πλαστικές παραμορφώσεις.
- Η αντοχή και η δυσκαμψία του σκυροδέματος μειώνονται λόγω της μήκυνσης που συνοδεύει το εφελκυστικό πεδίο τάσεων στην εγκάρσια διεύθυνση.

5.1 Τα αδρανή

Από πειράματα που έχουν γίνει, είναι γνωστό ότι η συμπεριφορά του επιπέδου της ρωγμής δεν είναι η ίδια κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου φόρτισης και κατά τους επόμενους κύκλους. Η σχέση διατμητικής τάσης – διατμητικής παραμόρφωσης του αρχικού κύκλου είναι σχεδόν γραμμική και μετά την αποφόρτιση μπορεί να παρατηρηθεί ένα σημαντικό ποσοστό υστερητικής συμπεριφοράς. Η σχέση διατμητικής τάσης – διατμητικής παραμόρφωσης για ένα μεταγενέστερο κύκλο φόρτισης είναι έντονα μη γραμμική.

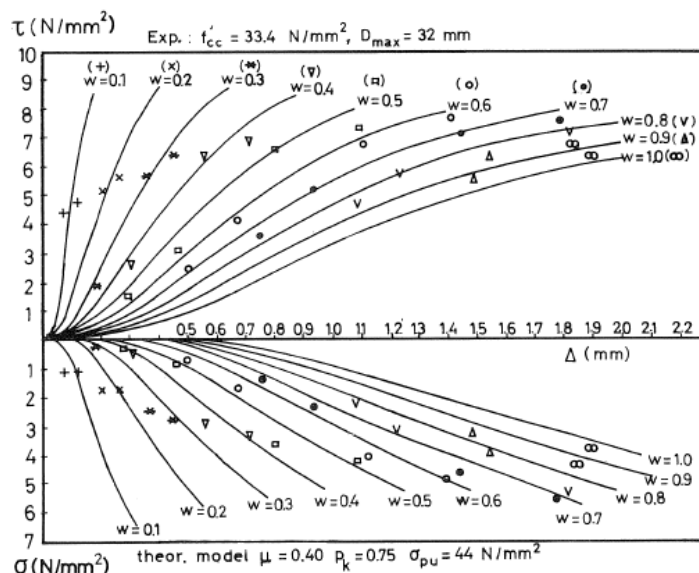
Για να εξηγήσουμε την ανωτέρω συμπεριφορά θα υποθέσουμε ένα δοκίμιο με ποιότητα σκυροδέματος $f_{cc}=33.4\text{N/mm}^2$ ενώ η μέγιστη διάμετρος αδρανούς σ' αυτό είναι $D_{\max}=32\text{mm}$. Ορίζουμε ένα προκαθορισμένο άνοιγμα ρωγμής ίσο με $w=0.5\text{mm}$ και συνδετήρες που παρέχουν τάση περίσφιξης ίση με $0,5\text{N/mm}^2$ για αύξηση του ανοίγματος της ρωγμής ίσο με $0,1\text{mm}$. Η μέγιστη διατμητική τάση που μπορεί να ασκηθεί είναι $\tau=3\text{N/mm}^2$.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει τις θέσεις των χειλών της ρωγμής πριν και κατά τη διάρκεια της ανακυκλιζόμενης φόρτισης όπως περιγράφονται μέσω της θέσης ενός αδρανούς.



Σχήμα 5.1 Τρία χαρακτηριστικά στάδια κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου φόρτισης

Όταν το διατμητικό φορτίο αυξάνεται, τα μέτωπα της ρωγμής λόγω της ολίσθησης που λαμβάνει χώρα έρχονται σε επαφή. Η σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης τ και της διατμητικής μετατόπισης Δ μπορεί να υπολογιστεί από το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.2 Σύγκριση μεταξύ πειραματικών τιμών για σκυρόδεμα με $f_c=33\text{MPa}$, $D_{max}=32\text{mm}$, $\rho_k=0.75$, $\mu=0,40$ και $\sigma_{pu}=44\text{MPa}$

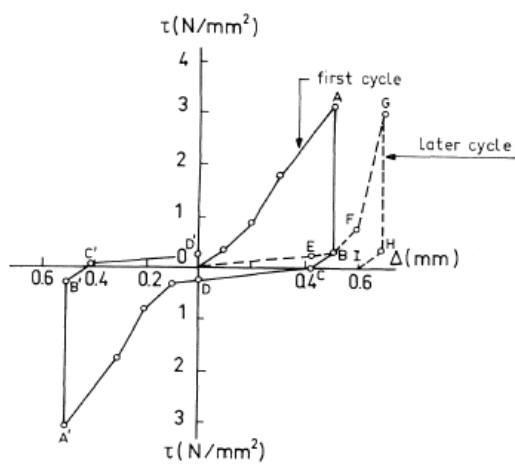
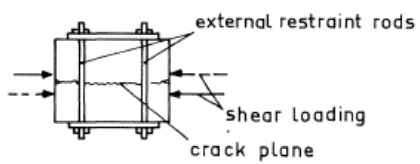
Τη στιγμή που θα προσεγγιστεί η μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης τ (σημείο Α στο παρακάτω σχήμα η τιμή της τριβής μεταξύ των αδρανών και του πολτού είναι ακόμη μέγιστη ($\mu=0,40$). Αν η διατμητική δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο μειωθεί – φάση αποφόρτισης πρώτου κύκλου- θα έχω σχετική μετακίνηση μεταξύ των χελιών της ρωγμής μόνο όταν το ποσοστό της τριβής στην αντίθετη κατεύθυνση υπερνικηθεί και έχω ολίσθηση. Με βάση τη θεωρία του Walraven, υπολογίστηκε ότι το σημείο όπου ξεπερνιέται το ποσοστό τριβής για να έχω ολίσθηση προσεγγίζεται όταν η διατμητική τάση μειώνεται σε $0,24\text{N/mm}^2$ (σημείο Β στο παρακάτω σχήμα). Δηλαδή αν η διατμητική τάση είναι μικρότερη από $0,24\text{N/mm}^2$ θα καταφέρω να υπερνικήσω την τριβή και να έχω ολίσθηση. Στο σημείο Α του παρακάτω σχήματος έχω ολίσθηση $\Delta_A=0,5\text{mm}$ και στο σημείο Β ομοίως $\Delta_B=0,5\text{mm}$, δηλαδή δεν έχω καταφέρει να ξεπεράσω την τριβή και να έχω ολίσθηση προς την αντίθετη κατεύθυνση. Από το σημείο Β όμως και μετά, αφού η διατμητική τάση γίνει $0,24\text{N/mm}^2$, έχω καταφέρει να ξεπεράσω την τριβή και να έχω ολίσθηση αντίθετης κατεύθυνσης.

Το σχήμα με τη πορεία φόρτισης (36) δείχνει ότι μετά την αποφόρτιση, η φάση της «μη επαφής» επέρχεται πριν μηδενιστεί η διατμητική μετατόπιση. Δηλαδή πριν τα αδρανή, και κατ' επέκταση τα χείλη της ρωγμής, έρθουν στην αρχική τους θέση όπου δεν είχαν επαφή, θα έχουν χάσει την επαφή τους άρα και την αντίσταση στην ολίσθηση ήδη πριν επανέλθουν στην αρχική θέση. Δεν έχουμε επαφή των αδρανών αν η ακτίνα του αδρανούς είναι ίση με το μισό της μέγιστης διάμετρο αυτού σε μηδενικό βάθος, δηλαδή αν $R=1/2 \cdot D_{max}$, $u=0$.

Για τη συγκεκριμένη περίπτωση υπολογίστηκε ότι η παραμένουσα διατμητική μετατόπιση Δ_r είναι ίση με 0,41mm (σημείο C στο παρακάτω σχήμα). Δηλαδή όταν η διατμητική τάση που εφαρμόζα μηδενιστεί, δεν σημαίνει ότι θα έχει μηδενιστεί και η μετατόπιση. Αντιθέτως θα έχω μια παραμένουσα παραμόρφωση-μετατόπιση Δ_r και τα χείλη της ρωγμής δεν θα έρθουν εντελώς στην αρχική τους θέση.

Για να επαναφέρουμε τα δύο μέτωπα του δοκιμίου στην αρχική τους θέση, ίσως είναι απαραίτητη η άσκηση μιας μικρής διατμητικής δύναμης αντίθετης κατεύθυνσης, από τη στιγμή που τα αδρανή στη διεπιφάνεια της ρωγμής προκαλούν τριβή που δυσκολεύει τη μετακίνηση προς την αρχική θέση (σημείο D στο παρακάτω σχήμα). Αν η διατμητική δύναμη ασκηθεί στην αντίθετη κατεύθυνση κατά τη διάρκεια του αντίθετου κύκλου φόρτισης, αναμένεται η ίδια συμπεριφορά από τη στιγμή που τα μέρη της ρωγμής όπου θα έχουν επαφή δεν έχουν επηρεαστεί και καταστραφεί ακόμη. Έτσι λοιπόν αναμένεται μια παρόμοια καμπύλη φόρτισης και αποφόρτισης (σημεία A', B' C', D'). Δηλαδή αφού έχουμε φτάσει στην αρχική θέση με την άσκηση της δύναμης, θα ασκηθεί περαιτέρω δύναμη και θα φτάσουμε στη μέγιστη τιμή αυτής καθώς και στην μέγιστη τιμή της τριβής $\mu=0,4$ (σημείο A'). Έπειτα η ασκούμενη δύναμη θα μειωθεί και θα φτάσουμε στο σημείο B' όπου δεν θα έχω ολίσθηση αφού δεν έχω καταφέρει να ξεπεράσω την τριβή στη διεπιφάνεια. Έπειτα μειώνεται περαιτέρω η διατμητική τάση και τελικά μηδενίζεται χωρίς να φτάσουν τα χείλη της ρωγμής στην αρχική θέση (σημείο C'). Τελικά, θα ασκηθεί δύναμη αντίθετης κατεύθυνσης για να φτάσουμε στην αρχική θέση (σημείο D').

Κατά τη διάρκεια των επόμενων κύκλων φόρτισης, η παρουσία της σπηλαίωσης που εμφανίστηκε κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου φόρτισης επηρεάζει τη συμπεριφορά του δοκιμίου. Αρχικά θα έχω μικρή διατμητική μετατόπιση με την εφαρμογή μιας μικρής διατμητικής δύναμης, μέχρι να έχω επαφή των απέναντι πλευρών ($\Delta > 0,41\text{mm}$, σημείο E) η οποία θα προκαλέσει τριβή που θα αντιστέκεται στην μετακίνηση. Μετά για πολύ μικρή μετατόπιση Δ θα έχω επαφή των δύο πλευρών. Σε αυτή τη μικρή μετατόπιση μια διαδικασία σταδιακής μείωσης θα συμβεί σε περιοχές υψηλών τάσεων επαφής (σημείο F στο σχήμα 36). Γι' αυτό θα αναμένεται ένας απότομα ανερχόμενος κλάδος (EFG) λίγο στραμμένος από την αρχικού κύκλου γραμμή φόρτισης. Κατά την αποφόρτιση αναμένεται παρόμοια συμπεριφορά με αυτή στον πρώτο κύκλο φόρτισης (GHI). Δηλαδή δεν θα έχουμε μετακίνηση μέχρι το σημείο H του διαγράμματος, στο οποίο θα υπερνικηθεί η αντίσταση τριβής που προκαλείται από τα αδρανή και θα έχω μετατόπιση αντίθετης κατεύθυνσης μέχρι μηδενισμού της διατμητικής τάσης. Στο σημείο αυτό (σημείο I στο διάγραμμα) θα έχω παραμένουσα μετατόπιση.



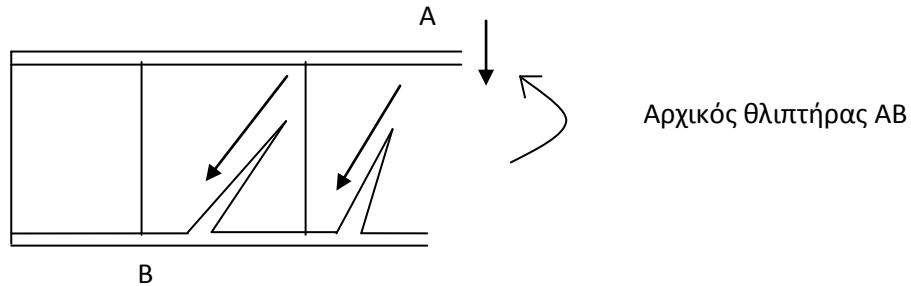
Πλασματικό δοκίμιο

Απόκριση αδρανών σε ανακυκλική φόρτιση

Σχήμα 5.3

5.2 Ο σπλισμός κορμού

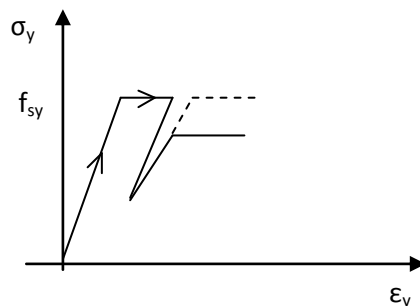
Όπως προαναφέρθηκε ο σπλισμός κορμού αναλαμβάνει τέμνουσα δύναμη μέσω του δικτυώματος Morsch. Πριν την ανακύκλιση το σκυρόδεμα γύρω από τους συνδετήρες είναι αδιατάρακτο. Μετά την ανακύκλιση ανοίγουν ρωγμές υπό γωνία 45° . Οι λοξοί θλιπτήρες είναι παράλληλοι στις ρωγμές και μεταφέρουν δύναμη στους συνδετήρες. Έστω ο θλιπτήρας AB.



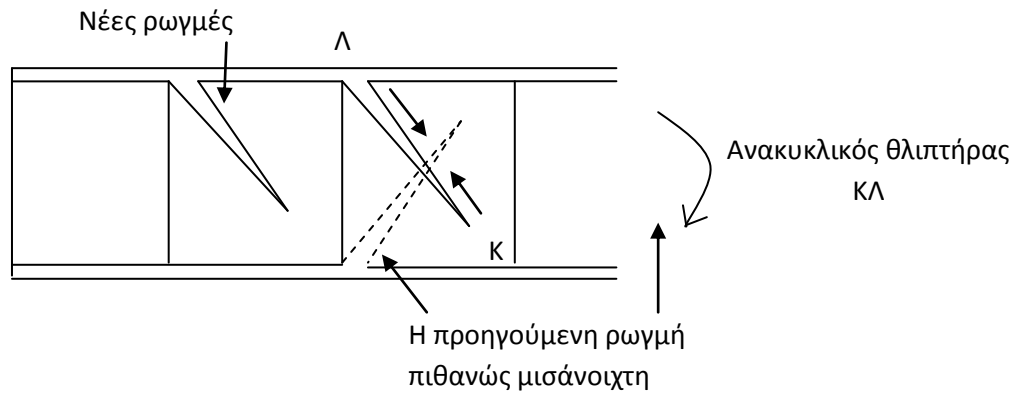
Σχήμα 5.4 Σχηματιζόμενοι θλιπτήρες

Όταν η φόρτιση αλλάξει φορά θα δημιουργηθούν νέες αντιδιαγώνιες σε σχέση με τις προηγούμενες ρωγμές ενώ οι παλαιές πιθανώς να είναι μισανοιχτές. Οι νέοι θλιπτήρες που θα προκύψουν και θα είναι παράλληλοι με τις νέες ρωγμές. Θα 'συναντήσουν' τις παλαιές μισανοιχτές και θα προσπαθήσουν να τις κλείσουν και έπειτα να μπορέσουν να μεταφέρουν τέμνουσα δύναμη στους συνδετήρες μέσω του δικτυώματος Morsch. Όμως μέχρι να κλείσουν τελείως οι παλαιές ρωγμές υπό την πίεση του ανεστραμμένου θλιπτήρα, εκδηλώνονται μεγάλες παραμορφώσεις υπό μικρότερες τιμές αντίδρασης του δικτυώματος Morsch. Δηλαδή η ανακύκλιση χρειάζεται πολύ μεγάλες παραμορφώσεις για να πετύχει την ίδια αντίσταση συνδετήρα με αυτή κατά την αρχική φορά φόρτισης. Αυτό συμβαίνει διότι:

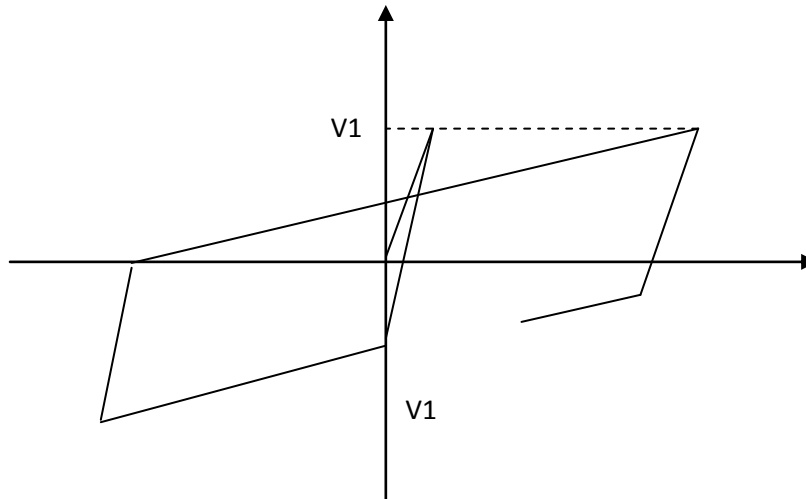
- Αργεί να αναπτυχθεί η αναγκαία λοξή δύναμη διότι οι θλιπτήρες προσπαθούν αρχικά να κλείσουν την αρχική ρωγμή.
- Ο χάλυβας έχει υστερητική συμπεριφορά. Κατά την φόρτιση ο συνδετήρας παραμορφώνεται και φτάνει το σημείο διαρροής του. Έπειτα αποφορτίζεται και κατά τη διάρκεια της επαναφόρτισης χρειάζεται πολύ μεγαλύτερη παραμόρφωση για να αναλάβει την τέμνουσα που αντιστοιχεί στο σημείο διαρροής του.



Σχήμα 5.5 Συμπεριφορά χάλυβα στην ανακυκλιζόμενη ένταση



Σχήμα 5.6 Δισδιαγώνια ρηγάτωση λόγω ανακυκλικής φόρτισης



Σχήμα 5.7 Υστερητική συμπεριφορά συνδετήρων

Από την απλοποιημένη αυτή ανάλυση προκύπτει ότι δεν διαπιστώνεται ουσιαστικής εξασθένηση του μηχανισμού αυτού υπό συνθήκες ανακυκλιζόμενων μετελαστικών παραμορφώσεων.

Η επιβαλλόμενη πλαστικότητα, ανεξάρτητα από την ανακύκλιση, συνεπάγεται αύξηση του ανοίγματος της ρωγμής και επομένως περαιτέρω επιβράδυνση στο κλείσιμο της ρωγμής κατά την ανακύκλιση άρα εξασθένηση.

5.3 Η δράση βλήτρου του εφελκυσμένου οπλισμού

Εξαιτίας των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια της ρωγμής κατά τη διάρκεια της ανακύκλισης, το ένα από τα δύο μέτωπα της ρωγμής τείνει να ολισθήσει σε σχέση με το άλλο. Αν δεν υπάρχει τάση κάθετη στο επίπεδο της ρωγμής, δηλαδή αν δεν λειτουργεί ο διαγώνιος θλιπτήρας που θα προσπαθήσει να κλείσει τη ρωγμή, η ολίσθηση του μετώπου της ρωγμής περιορίζεται μονάχα από τις εφελκυσμένες διαμήκεις ράβδους του δομικού στοιχείου. Το μέγεθος της ολίσθησης που προκαλείται από τις διατμητικές τάσεις και η μέγιστη διατμητική δύναμη που μπορεί να μεταφερθεί κατά μήκος της ρωγμής, εξαρτώνται από τη διάμετρο και την εφελκυστική αντοχή των ράβδων του εφελκυσμένου οπλισμού.

Οι ρωγμές που έχουν τραχείς επιφάνειες μεταφέρουν τέμνουσα δύναμη μέσω της τριβής. Σε αυτό το μηχανισμό της αλληλεμπλοκής των αδρανών συμμετέχουν οι εφελκυσμένες ράβδοι καθώς μέσω της αντίστασής τους σε εφελκυσμό προσφέρουν την απαραίτητη δύναμη που συγκρατεί τα μέτωπα της ρωγμής κοντά για να έρθουν σε επαφή και να αναπτυχθεί τριβή. Οι ράβδοι αντιστέκονται στην παραμόρφωση εγκάρσια στον άξονά τους λειτουργώντας ως βλήτρα και επομένως αποφεύγεται η ολίσθηση των μετώπων της ρωγμής. Η αντίσταση αυτή εξαρτάται από τη διάμετρό τους και την επικάλυψη από σκυρόδεμα.

Κατά τη διάρκεια μονοτονικής φόρτισης είναι δυνατόν να μεταφερθούν σημαντικά ποσοστά τέμνουσας δύναμης μέσω της αλληλεμπλοκής των αδρανών και τη δράση βλήτρου του εφελκυσμένου οπλισμού.

Όμως και οι δύο μηχανισμοί είναι πολύ ευαίσθητοι στην ανακυκλική φόρτιση. Η ολίσθηση των μετώπων της ρωγμής καθιστά αναποτελεσματικό το μηχανισμό της εμπλοκής των αδρανών καθώς δεν είναι δυνατόν να αναπτυχθεί τριβή. Οι εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται κάτω από τον εφελκυσμένο οπλισμό που δρα ως βλήτρο, είναι πιθανόν να συνθλίψουν τοπικά το σκυρόδεμα και να ανοίξει ρωγμή που θα πρέπει να κλείσει έτσι ώστε να μπορέσει να λειτουργήσει ο εφελκυσμένος οπλισμός και πάλι ως βλήτρο σε μεταγενέστερο κύκλο φόρτισης.

Και στις δύο περιπτώσεις, (αδρανών και εφελκυσμένου οπλισμού) οι βρόγχοι αποφόρτισης και επαναφόρτισης έχουν σχήμα ανεστραμμένου S με απότομο τον αρχικό κλάδο αποφόρτισης και επίσης απότομο τον τελικό κλάδο επαναφόρτισης στην αντίθετη κατεύθυνση.

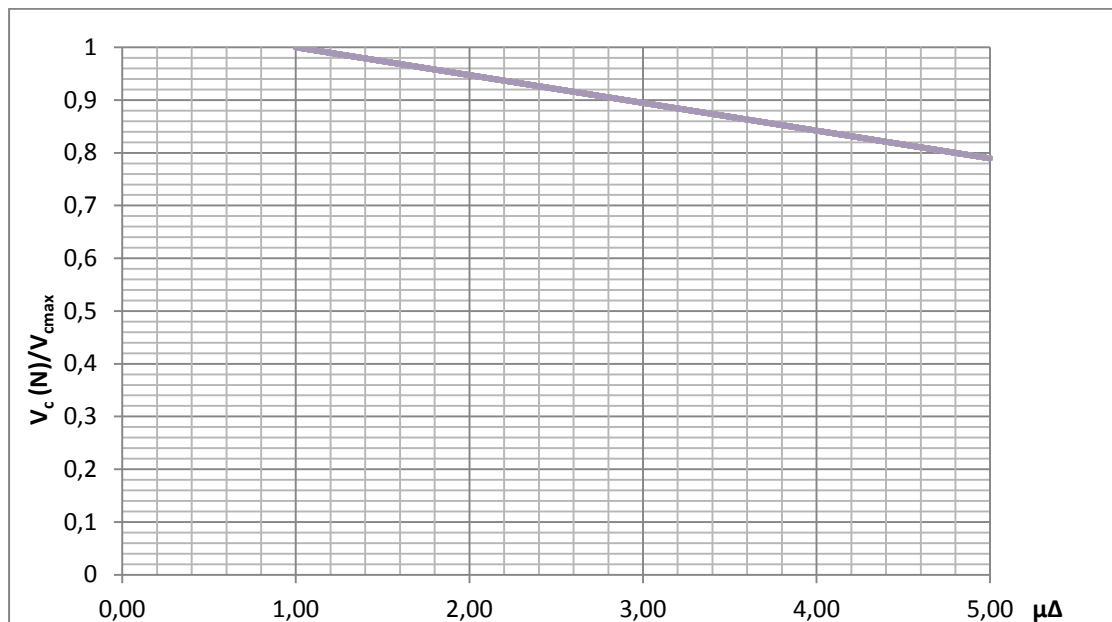
Μεταξύ των δύο κλάδων (αποφόρτισης και επαναφόρτισης) υπάρχει μια ενδιάμεση φάση με σχεδόν ανεμπόδιστη μετακίνηση αντίθετα από την αρχική της φόρτισης και σύμφωνα με αυτή της αποφόρτισης, μέχρι να μην μπορεί να μετακινηθεί περαιτέρω το ένα μέτωπο της ρωγμής γιατί πλέον θα το εμποδίζει το άλλο, όσον αφορά τα αδρανή ή μέχρι η εφελκυσμένη ράβδος κινούμενη και εκείνη προς την κατεύθυνση της αποφόρτισης να μην μπορεί να μετακινηθεί περαιτέρω διότι θα εμποδίζεται από το σκυρόδεμα που θα την καλύπτει και δεν θα την ακολουθεί στην μετακίνηση. Οι υστερητικοί βρόγχοι και των δύο και ειδικά των αδρανών είναι στενοί που σημαίνει ότι η ποσότητα της ενέργειας που

εκτονώνεται είναι μικρή.

6 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ Δ. ΜΠΙΣΚΙΝΗ

Κατά τη διερεύνηση του φαινομένου έχουν γίνει πειράματα και μέσω αυτών έχουν εξαχθεί συμπεράσματα που ενσωματώθηκαν στους κανονισμούς. Ο Διονύσιος Ε. Μπισκίνης κατά τη διάρκεια της διδακτορικής του διατριβής πραγματοποίησε χίλια πειράματα τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποίησε προκειμένου να εξάγει τη φόρμουλα που χρησιμοποιείται ως και σήμερα για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση μετά από καμπτική διαρροή. Τα πειράματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία προκειμένου να αποσαφηνιστεί πως μεταβάλλεται η αναλαμβανόμενη τέμνουσα συναρτήσει επιμέρους παραγόντων που εμπλέκονται.

Η αναλαμβανόμενη από το σκυρόδεμα τέμνουσα συναρτήσει της πλαστιμότητας σε όρους μετακινήσεων παρουσιάζεται στο επόμενο διάγραμμα το οποίο προέκυψε μετά από επεξεργασία της βάσης των χιλίων δεδομένων.

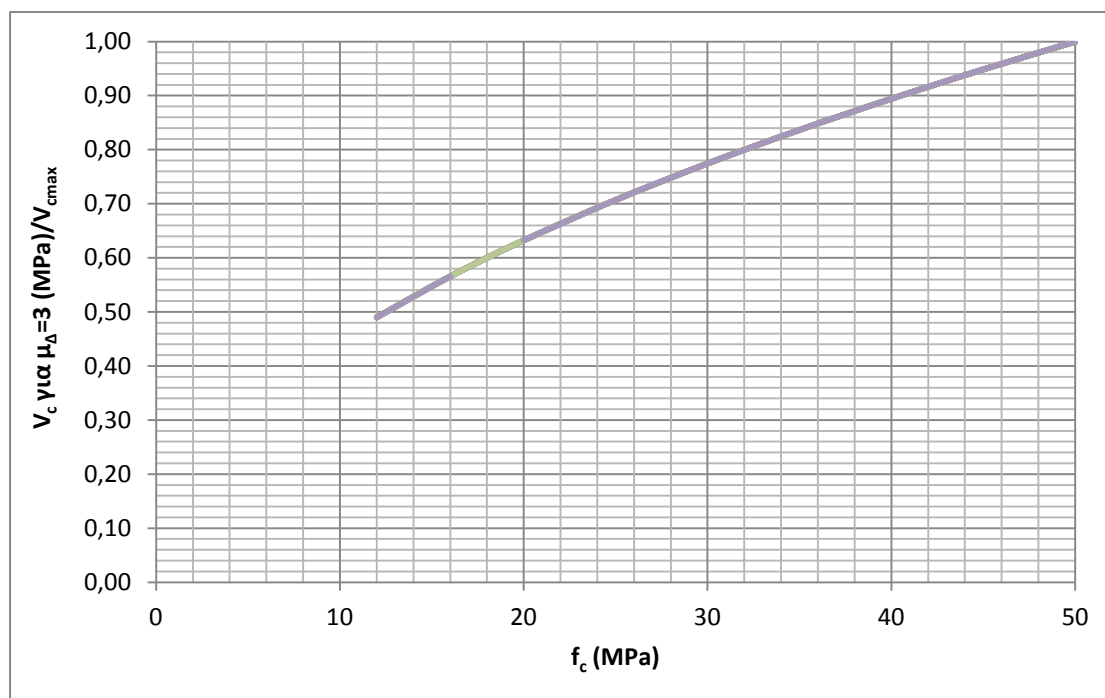


Σχήμα 6.1 Μεταβολή αναλαμβανόμενης τέμνουσας συναρτήσει της πλαστιμότητας σε όρους μετακινήσεων

Παρατηρείται πως όσο η πλαστιμότητα σε όρους μετακινήσεων μεγαλώνει, η ικανή να αναληφθεί από το σκυρόδεμα τέμνουσα μειώνεται. Αυτό συμβαίνει διότι όσο ο φορέας παραμορφώνεται, τα χείλη της ρωγμής ολισθαίνουν με αποτέλεσμα τη λείανση αυτών και τη διακοπή της αλληλεμπλοκής των αδρανών ενώ η μετακίνηση του εφελκόμενου οπλισμού εγκάρσια στον άξονά του καταλήγει στην δημιουργία ρωγμής απόσχισης και στην διακοπή της λειτουργίας. Αυτό έρχεται σε πλήρη συμφωνία και για τα χίλια πειράματα με τον EC8-Μέρος 3, όπου η τιμή της τέμνουσας που αναλαμβάνεται από το σκυρόδεμα μειώνεται όσο αυξάνεται ο δείκτης πλαστιμότητας. (παράρτημα Α)

$$V_c = (1 - 0,05 \min(5; \mu_{\Delta}^{Pl})) \cdot [0,16 \max(0,5; 100 \rho_{tot}) (1 - 0,16(5; Lv/h) f_c^{0,5} A_c]$$

Η αναλαμβανόμενη τέμνουσα συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.



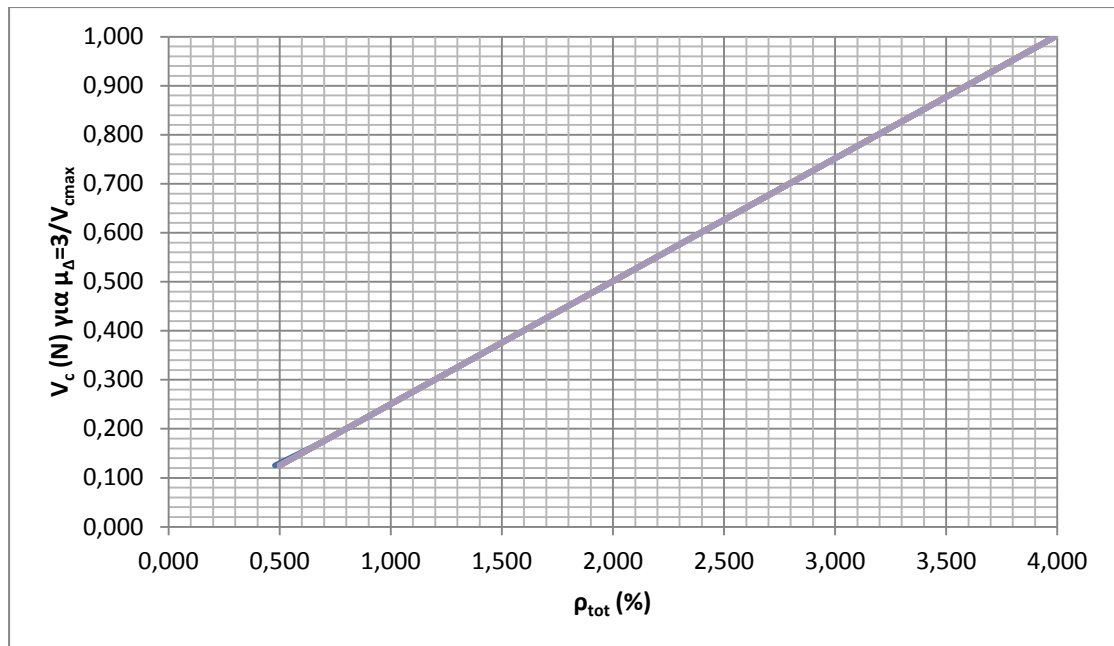
Σχήμα 6.2 Μεταβολή αναλαμβανόμενης τέμνουσας συναρτήσει της αντοχής του σκυροδέματος σε θλίψη

Η αναλαμβανόμενη από το σκυρόδεμα τέμνουσα αυξάνεται όσο αυξάνεται η ποιότητα του σκυροδέματος. Είναι επόμενο εφόσον όσο καλύτερη είναι η ποιότητα του σκυροδέματος, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα των αδρανών, οπότε η αλληλεμπλοκή τους θα καθυστερεί τη λείανση των μετώπων της ρωγμής. Ακόμη η καλύτερη ποιότητα του σκυροδέματος θα έχει μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό οπότε δεν θα δημιουργείται άμεσα η ρωγή απόσχισης που οδηγεί στην εξασθένηση του μηχανισμού βλήτρου. Τέλος η θλιβόμενη ζώνη θα είναι περισσότερο ισχυρή. Σημειώνεται πως θεωρήθηκε τιμή πλαστιμότητας ίση με $\mu_{\Delta}=3$, που αποτελεί συνήθους τιμή και όχι ακραία.

Η μορφή του διαγράμματος δικαιολογείται πλήρως από την φόρμουλα του Ευρωκώδικα όπως παρουσιάζεται στο παράρτημα Α.

$$V_c = (1 - 0,05 \min(5; \mu_{\Delta}^{pl})) \cdot [0,16 \max(0,5; 100 \rho_{tot}) (1 - 0,16(5; L_v/h) f_c^{0,5} A_c]$$

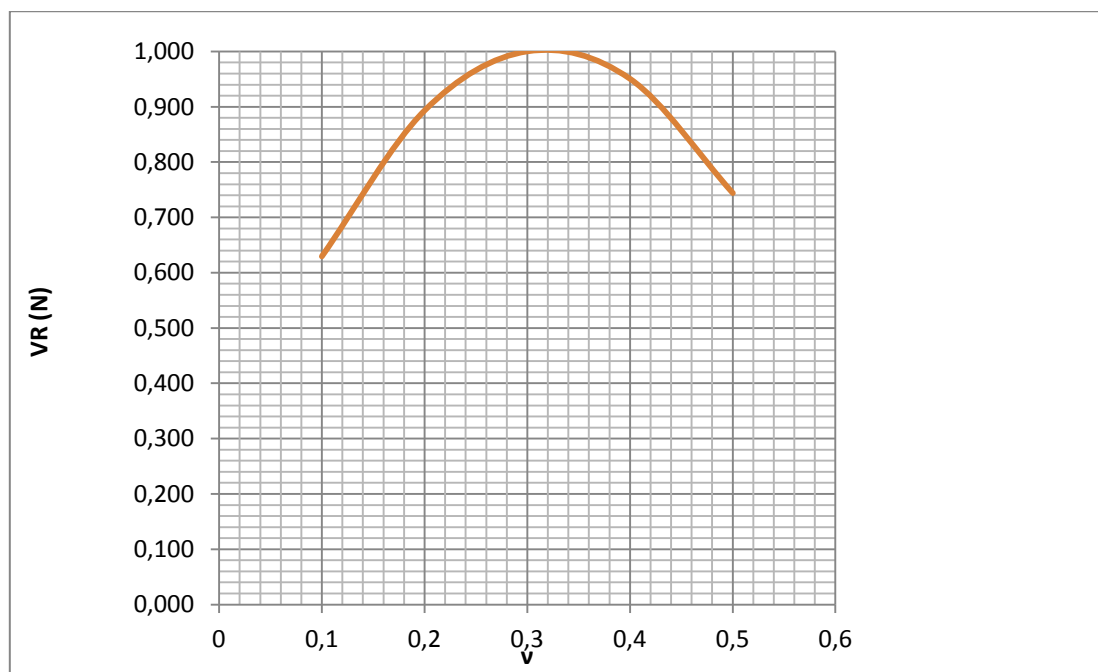
Η αναλαμβανόμενη τέμνουσα συναρτήσει του ποσοστού διαμήκους οπλισμού.



Σχήμα 6.3 Μεταβολή αναλαμβανόμενης τέμνουσας συναρτήσει του ποσοστού διαμήκους οπλισμού

Παρατηρείται πως η τέμνουσα αυξάνεται όσο το ποσοστό διαμήκους οπλισμού αυξάνεται. Τα αποτελέσματα συνάδουν πλήρως με τον Ευρωκώδικα.

$$V_c = (1 - 0,05 \min(5; \mu_{\Delta}^{pl})) \cdot [0,16 \max(0,5; 100 \rho_{tot}) (1 - 0,16 (5; L_v/h) f_c^{0,5} A_c]$$

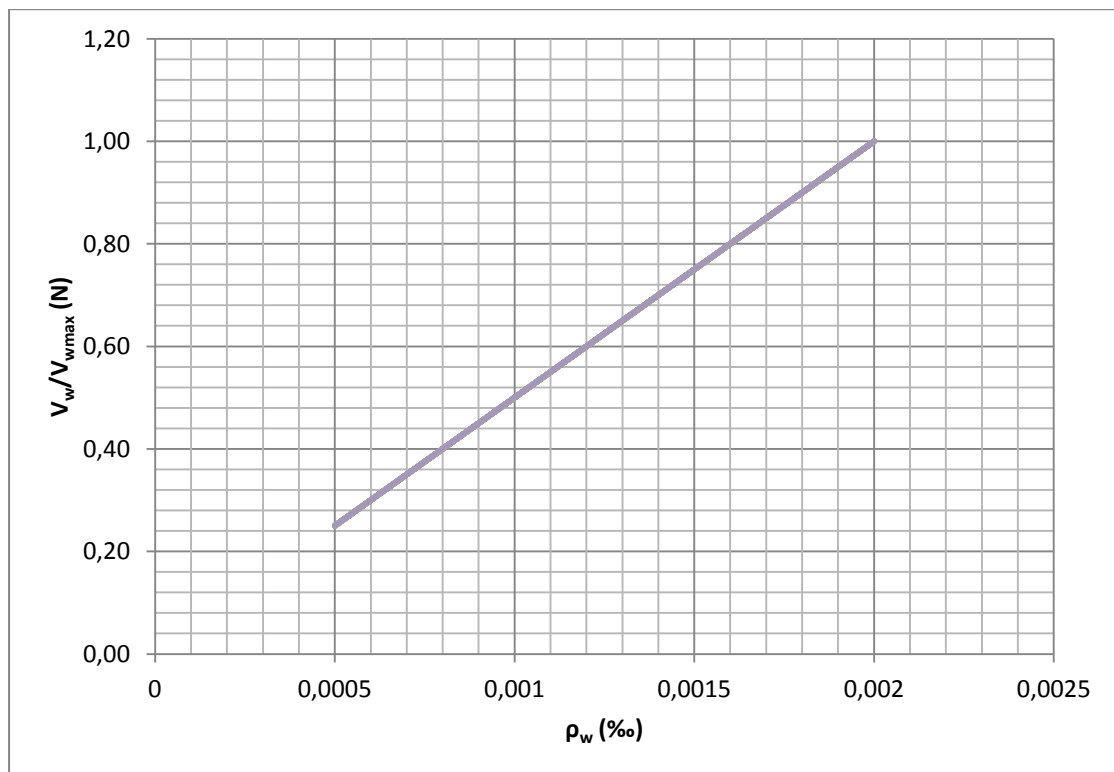


Σχήμα 6.4 Μεταβολή αναλαμβανόμενης τέμνουσας συναρτήσει της ανηγμένης αξονικής δύναμης

Παρατηρείται πως η τέμνουσα που αναλαμβάνεται μέσω του μηχανισμού της αξονικής

δύναμης αυξάνεται όσο η αξονική δύναμη αυξάνεται. Όμως μετά την τιμή $v=0,35$ η αναλαμβανόμενη τέμνουσα που αρχίζει να αυξάνεται από $v=0,1$, μειώνεται σημαντικά και σταματάει να μειώνεται όταν $v=0,55$. Αυτό συμβαίνει διότι αρχικά για την τιμή της ανηγμένης αξονικής $v=0,1$ η αξονική δύναμη που ασκείται στα δύο άκρα του υποστρώματος εξαιτίας της μικρής τιμής της εξισορροπείται τοπικώς και δεν είναι ικανή για να δημιουργηθεί ισχυρός διαγώνιος θλιπτήρας έτσι ώστε να έχουμε μεταφορά τέμνουσας και την ενεργοποίηση του μηχανισμού. Η μέγιστη τιμή της μέγιστης αξονικής δύναμης $v=0,55$ είναι επιτακτική. Η θλιβόμενη ζώνη του σκυροδέματος θα εξαντληθεί σε περίπτωση αξονικής δύναμης μεγαλύτερης της $N=0,55 \cdot A_c \cdot f_c$, με αποτέλεσμα να μην δημιουργηθεί ο διαγώνιος θλιπτήρας. Σημειώνεται και εδώ πως θεωρήθηκε τιμή πλαστιμότητας ίση με $\mu_\Delta=3$, που αποτελεί συνήθης τιμή και όχι ακραία.

$$V_N = 1/\gamma_{el} [((h-x)/2 \cdot L_v) \cdot \min(N; 0,55 \cdot A_c \cdot f_c)]$$



Σχήμα 6.5 Μεταβολή αναλαμβανόμενης τέμνουσας συναρτήσει ποσοστού οπλισμού διάτμησης

Όσο αυξάνεται το ποσοστό διαμήκους οπλισμού αυξάνεται η τέμνουσα που αναλαμβάνεται από τους συνδετήρες. Αυτό είναι επόμενο διότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος των συνδετήρων τόσο μεγαλύτερη θα είναι η αντίσταση σε εξόλκευση. Επίσης όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των συνδετήρων, τόσο περισσότεροι θα ενεργοποιηθούν όσο η ρωγμή θα αποκτά μικρότερη κλίση. Τα αποτελέσματα συμφωνούν πλήρως με αυτά των πειραμάτων και του Ευρωκώδικα 8.

$V_w = \rho_w \cdot b_w \cdot z \cdot f_{yw}$ για ορθογωνικές διατομές και

$V_w = (\pi/2) \cdot (A_{sw}/s) \cdot f_{yw} \cdot (D-2 \cdot c)$ για κυκλικές διατομές

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος, Θ.Π.Τάσιος
2. Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings based on EN-Eurocodes by MICHAEL N. FARDIS Department of Civil Engineering, University of Patras, Greece
3. Theory and experiments on the mechanical behavior of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading – J. C. Walraven, H. W. Reinhardt
4. AGGREGATE INTERLOCK :A THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS – J.C.WALRAVEN
5. FLEXURAL DUCTILITY OF STRUCTURAL CONCRETE SECTIONS- M.Z.COHN: PROFESSOR DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING UNIVERSITY OF WATERLOO ONTARIO,CANADA , PAOLO RIVA: POST - DOCTORAL FELLOW DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING UNIVERSITY OF WATERLOO ONTARIO,CANADA
6. Shear Friction in High-Strength Concrete , by J. Walraven and J. Stroband
7. Laboratory Definitions of Behavior for Structural Components and Building Systems by D.P. Abrams
8. Πειραματική Μελέτη Διεπιφανειών Σκυροδέματος σε Διάτμηση, Ο. Δημητριάδου , Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ., Β.Ν. Κότσογλου, Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ., Γ. Ε. Θέρμου, MSc. DIC, Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ., Α, Σάββα, Επίκουρος καθηγήτρια Δ.Π.Θ. ,Δ.Ι. Πανταζόπουλου, Καθηγήτρια Δ.Π.Θ.
9. Influence of aggregate fracture on shear transfer through cracks in reinforced concrete, J. Sagaseta E' cole Polytechnique Fe' de' rale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland, R. L. Vollum Department of Civil & Environmental Engineering, Imperial College London, London, UK
10. Model Code 2010 First complete draft Volume 2 April 2010
11. Shear strength model of reinforced concrete circular cross-section members, I. Merta Vienna University of Technology, Institute for Building Construction and Technology, Austria
12. ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ, Αντώνης Κανελλόπουλος
13. Reinforced concrete structures, R.Park and T.Paulay
14. Συνάφεια ράβδων οπλισμού στο σκυρόδεμα, Π. Ι. Γιαννόπουλος Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.
15. Προσομοιώματα, όπλιση και ρηγματώση γραμμικών φορέων,
16. Καμπτοδιατμητική συμπεριφορά φορέων. Η έννοια, οι τύποι και τα κριτήρια αστοχίας.
17. Σχεδιασμός αγκυρώσεων.
18. Ρηγματώσεις και αστοχίες, διάγνωση και αντιμετώπιση.
19. Φορείς με μικρό λόγο διάτμησης, κοντοί πρόβολοι, υψίκορμα, κοντά υποστυλώματα
20. Η αποκαλυπτική δράση του σεισμού και οι ευθύνες των μηχανικών
21. The shear transfer behavior of cracked monotonic concrete subject to cyclically reversing shear., Alan h. Mattock
22. Design in shear of reinforced concrete short columns M.L. Moretti*1, T.P. Tassios2a 1 Faculty of Engineering (Civil),University of Thessaly, Volos, Greece 2 Faculty of Engineering (Civil), NTUA, Athens, Greece
23. Influencce of yielding of flexural reinforcement on shear transfer through cracks, Rui Vaz Rodrigues –Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Instituto Superior Tecnico, Lisbon, Portugal
24. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΝ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 2 EN 1992 -1-1ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ Ε.ΜΑΚΡΥΚΩΣΤΑΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π.
25. ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΛΩΝ Ο.Σ. ΕΝΑΝΤΙ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗΣ ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ, Δ.Ε. Μπισκίνης MSc Πολιτικός Μηχανικός Ερευνητής, Εργαστήριο Κατασκευών, Τμ. Πολ. Μηχανικών, Παν/μιο Πατρών, Γ.Κ. Ρουπακιάς MSc Πολιτικός Μηχανικός, Τμ. Πολ. Μηχανικών, Παν/μιο Πατρών, Μ.Ν. Φαρδής Καθηγητής, Εργαστήριο Κατασκευών, Τμ. Πολ. Μηχανικών, Παν/μιο Πατρών
26. Improved Analytical Model for Shear Strength of Circular Reinforced Concrete Columns in Seismic Regions, by Mervyn J. Kowalsky and M. J. Nigel Priestley
27. ΑΜΦΙΕΡΕΙΣΤΗ ΔΟΚΟΣ, Γεράσιμος Κοτσωβός

28. ΥΛΙΚΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, Γεράσιμος Κοτσωβός
29. 15 MATLAB ΓΙΑ ΓΕΝΙΚΗ ΧΡΗΣΗ, Καρατζάς
30. The modified Compression- Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear by Frank J. Vecchio and Michael P. Collins
31. Οριακή κατάσταση αστοχίας από τέμνουσα, Κεφάλαιο 11 ΕΑΚ 2000
32. ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΜΕΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, ΜΕΉ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗ, ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ, ΔΙΟΝΥΣΙΟΥ Ε. ΜΠΙΣΚΙΝΗ Πολιτικού Μηχανικού ΠΑΤΡΑ 2007
33. ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ, ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΑΡΓΥΡΟΣ ΜΑΡΤΙΟΣ 2011
34. ΑΙΤΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΡΩΓΜΩΝ ΣΤΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ, ΚΑΛΛΙΑΝΙΩΤΗΣ ΦΩΤΗΣ ΣΤΑΘΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
35. Seismic Design Codes for Buildings in Japan, Hiroshi Kuramoto
36. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Βασικά προσομοιώματα συμπεριφοράς, Ελισάβετ Βιντζηλαίου ΕΜΠ
37. Where is Shear Reinforcement Required? A Review of Research Results and Design Procedures, Michael P. Collins, Evan, C. Bentz, and Edward G. Sherwood
38. Degradation of Shear Strength of Reinforced Concrete Members with Inelastic Cyclic Displacements, by Dionysis E. Biskinis, George K. Roupakias, and Michael N. Fardis
39. Experiments on the shear strength of ultra – high strength reinforced concrete columns, Hiroshi Kuramoto Yokohama University, Japan, Koichi Minami Fukuyama University, Japan.
40. Σχεδιασμός δοκών και υποστυλωμάτων
41. Γενικευμένο Πεπερασμένο Στοιχείο Δοκού επί Ελαστικού Υποβάθρου Winkler, Ι.Ε.Αβραμίδης, Καθηγητής Α.Π.Θ. , Κ.Μορφίδης, Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός
42. Experimental Investigation on Shear Cracking Behavior in Reinforced Concrete Beams with Shear Reinforcement, Mohamed Zakaria, Tamon Ueda, Zhimin Wu and Lian Meng
43. Δείκτες Δυσκαμψίας για Προβλήματα Αλληλεπίδρασης Εδάφους–Κατασκευής, Γ. Δ. Μανώλης Καθηγητής Α.Π.Θ., Η.Α.Παρασκευόπουλος Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Διδάκτωρ Α.Π.Θ. , Κ.Π.Πλατσούκας, Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Μ.Δ.Ε.
44. Προχωρημένη Τεχνολογία σκυροδέματος, Στ.Κόλιας
45. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-11) An ACI Standard and Commentary
46. EN 1992 Ευρωκώδικας 2
47. EN 1998 Ευρωκώδικας 8 –Μέρος 3
48. Κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος Ι .ΤΕΙ Σερρών
49. Αρχές σχεδιασμού και εφαρμογή σε συνήθεις φορείς
50. Έλεγχος ποιότητας και τεχνολογίας δομήσιμων υλικών, Γενικό τμήμα Φυσικής Χημείας και τεχνολογίας υλικών Δρ. Αθ. Ρουθούλας καθηγητής ΤΕΙ Πειραιά
51. Shear strength model of reinforced concrete circular cross-section members I. MertaVienna University of Technology, Institute for Building Construction and Technology, Austria
52. Deformations of Reinforced Concrete Members at Yielding and Ultimate by Telemachos B. Panagiotakos and Michael N. Fardis
53. Influence Of Repeated Loading On The Stirrup Stress Of Reinforced Concrete Beams By J. Ruhnau
54. Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.)
55. Shear Transfer Of Reinforced Concrete Beams Under Reversed Loading By R. H. Brown and J. O. Jirsa

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΚΩΔΙΚΑΣ FORTRAN 1

```
DIMENSION Y(500),P(500),AA(500),BB(500),U(500),G(500),C(500)

OPEN(8,FILE='siminp.txt')

OPEN(9,FILE='simout.txt')

READ(8,*) A,B,N

H=(B-A)/(FLOAT(N)-1.)

WRITE(9,9100) A,B,N,H

X0=A

DO I=1,N

  P(I)=(X0/32.)**0.5

  AA(I)=0.532*(X0/32.)**0.5-0.212*(X0/32.)**4-0.072*(X0/32.)**6-0.036*(X0/32.)**8-
0.025*(X0/32.)**10

  U(I)=(-0.000729+0.5*sqrt(0.000002125-0.0162*(0.0002624-0.0081*X0**2)))/0.0162

  G(I)=X0**(-3.)*((X0**2.-0.0162)**0.5*0.7071*U(I)-0.09*U(I)-U(I)**2)

  Y(I)=P(I)*4/3.14159*AA(I)*G(I)

  WRITE(9,9150) X0,P(I),AA(I),G(I),Y(I)

  X0=X0+H

END DO

CALL SIMP(Y,N,H,OL)

WRITE(9,9300) OL

STOP

9100 FORMAT(5X,'ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΚΑΝΟΝΑ SIMPSON'/5X,36('*')//&

      5X,'ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ - A =',F8.3/5X,'ΑΝΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ -
B =',F8.3,&

      /5X,'ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ - N =',I4/5X,'ΜΕΓΕΘΟΣ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ - H =',F10.5/)

9150 FORMAT(3F8.3,3E10.5)
```

```

9300 FORMAT(/5X,40('*')/5X,'* Η ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΑΤΟΣ =' ,E12.5,'*/5X,40('*'))
END
SUBROUTINE SIMP(Y,N,H,OL)
DIMENSION Y(500)
OL=0.
IF (AMOD(FLOAT(N),2.)/=0.) GO TO 50
OL=3.*H/8.*(Y(N-3)+3.*Y(N-2)+3.*Y(N-1)+Y(N))
IF (N==4) RETURN
K=N-5
GO TO 60
50 K=N-2
60 DO I=1,K,2
    OL=OL+H/3.*(Y(I)+4.*Y(I+1)+Y(I+2))
END DO

```

ΚΩΔΙΚΑΣ FORTRAN 2

```

DIMENSION Y(500),P(500),AA(500),BB(500),U(500),G(500),C(500)
OPEN(8,FILE='siminp.txt')
OPEN(9,FILE='simout.txt')
READ(8,*) A,B,N
H=(B-A)/(FLOAT(N)-1.)
WRITE(9,9100) A,B,N,H
X0=A
DO I=1,N
    P(I)=(X0/32.)**0.5
    AA(I)=0.532*(X0/32.)**0.5-0.212*(X0/32.)**4-0.072*(X0/32.)**6-0.036*(X0/32.)**8-
0.025*(X0/32.)**10
    U(I)=(-0.005832+0.5*sqrt(0.0001360-0.0648*(0.004199-0.0324*X0**2)))/0.0648
    G(I)=X0**(-3.)*((X0**2.-0.0648)**0.5*0.7071*U(I)-0.18*U(I)-U(I)**2)

```

```

Y(I)=P(I)*4/3.14159*AA(I)*G(I)

WRITE(9,9150) X0,P(I),AA(I),G(I),Y(I)

X0=X0+H

END DO

CALL SIMP(Y,N,H,OL)

WRITE(9,9300) OL

STOP

9100 FORMAT(5X,'ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΚΑΝΟΝΑ SIMPSON'/5X,36('*')//&
      5X,'ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ - A =',F8.3/5X,'ΑΝΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ -
B =',F8.3,&
      /5X,'ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ - N =',I4/5X,'ΜΕΓΕΘΟΣ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ - H =',F10.5/)

9150 FORMAT(3F8.3,3E10.5)

9300 FORMAT(/5X,40('*')/5X,'* Η ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΑΤΟΣ =',E12.5,'*/5X,40('*'))

END

SUBROUTINE SIMP(Y,N,H,OL)

DIMENSION Y(500)

OL=0.

IF (AMOD(FLOAT(N),2.)/=0.) GO TO 50

OL=3.*H/8.*(Y(N-3)+3.*Y(N-2)+3.*Y(N-1)+Y(N))

IF (N==4) RETURN

K=N-5

GO TO 60

50 K=N-2

60 DO I=1,K,2

      OL=OL+H/3.*(Y(I)+4.*Y(I+1)+Y(I+2))

END DO

RETURN

```

END

ΚΩΔΙΚΑΣ FORTRAN 3

DIMENSION Y(500),P(500),AA(500),BB(500),U(500),G(500),C(500)

OPEN(8,FILE='siminp.txt')

OPEN(9,FILE='simout.txt')

READ(8,*) A,B,N

H=(B-A)/(FLOAT(N)-1.)

WRITE(9,9100) A,B,N,H

X0=A

DO I=1,N

 P(I)=(X0/32.)**0.5

 AA(I)=0.532*(X0/32.)**0.5-0.212*(X0/32.)**4-0.072*(X0/32.)**6-0.036*(X0/32.)**8-
 0.025*(X0/32.)**10

 U(I)=(-0.04665+0.5*sqrt(0.008707-0.2592*(0.06718-0.1296*X0**2)))/0.2592

 G(I)=X0**(-3.)*((X0**2.-0.2592)**0.5*0.7071*U(I)-0.36*U(I)-U(I)**2)

 Y(I)=P(I)*4/3.14159*AA(I)*G(I)

 WRITE(9,9150) X0,P(I),AA(I),G(I),Y(I)

 X0=X0+H

END DO

CALL SIMP(Y,N,H,OL)

WRITE(9,9300) OL

STOP

9100 FORMAT(5X,'ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΚΑΝΟΝΑ SIMPSON'/5X,36('*')//&

 5X,'ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ - A =',F8.3/5X,'ΑΝΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ -
B =',F8.3,&

 /5X,'ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ - N =',I4/5X,'ΜΕΓΕΘΟΣ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ - H =',F10.5/)

9150 FORMAT(3F8.3,3E10.5)

```

9300 FORMAT(/5X,40('*')/5X,'* Η ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΑΤΟΣ =' ,E12.5,'*/5X,40('*'))
END
SUBROUTINE SIMP(Y,N,H,OL)
DIMENSION Y(500)
OL=0.
IF (AMOD(FLOAT(N),2.)/=0.) GO TO 50
OL=3.*H/8.*(Y(N-3)+3.*Y(N-2)+3.*Y(N-1)+Y(N))
IF (N==4) RETURN
K=N-5
GO TO 60
50 K=N-2
60 DO I=1,K,2
    OL=OL+H/3.*(Y(I)+4.*Y(I+1)+Y(I+2))
END DO
RETURN
END

```

ΚΩΔΙΚΑΣ FORTRAN 4

```

DIMENSION Y(500),P(500),AA(500),BB(500),U(500),G(500),C(500)
OPEN(8,FILE='siminp.txt')
OPEN(9,FILE='simout.txt')
READ(8,*) A,B,N
H=(B-A)/(FLOAT(N)-1.)
WRITE(9,9100) A,B,N,H
X0=A
DO I=1,N
    P(I)=(X0/32.)**0.5
    AA(I)=0.532*(X0/32.)**0.5-0.212*(X0/32.)**4-0.072*(X0/32.)**6-0.036*(X0/32.)**8-
    0.025*(X0/32.)**10

```

```

U(I)=(-0.0004930+0.5*sqrt(0.0000009723-0.01248*(0.0001558-
0.006241*X0**2)))/0.01248

G(I)=X0**(-3.)*((X0**2.-0.01248)**0.5*0.7071*U(I)-0.079*U(I)-U(I)**2)

Y(I)=P(I)*4/3.14159*AA(I)*G(I)

WRITE(9,9150) X0,P(I),AA(I),G(I),Y(I)

X0=X0+H

END DO

CALL SIMP(Y,N,H,OL)

WRITE(9,9300) OL

STOP

9100 FORMAT(5X,'ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΚΑΝΟΝΑ SIMPSON'/5X,36('*')//&
          5X,'ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ - A =' ,F8.3/5X,'ΑΝΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ -
B =' ,F8.3,&
          /5X,'ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ - N =' ,I4/5X,'ΜΕΓΕΘΟΣ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ - H =' ,F10.5/)

9150 FORMAT(3F8.3,3E10.5)

9300 FORMAT(/5X,40('*')/5X,'* Η ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΑΤΟΣ =' ,E12.5,'*/5X,40('*'))

END

SUBROUTINE SIMP(Y,N,H,OL)

DIMENSION Y(500)

OL=0.

IF (AMOD(FLOAT(N),2.)/=0.) GO TO 50

OL=3.*H/8.*(Y(N-3)+3.*Y(N-2)+3.*Y(N-1)+Y(N))

IF (N==4) RETURN

K=N-5

GO TO 60

50 K=N-2

60 DO I=1,K,2

```



```

        OL=OL+H/3.*(Y(I)+4.*Y(I+1)+Y(I+2))

    END DO

RETURN

END

ΚΩΔΙΚΑΣ FORTRAN 5

DIMENSION Y(500),P(500),AA(500),BB(500),U(500),G(500),C(500)

OPEN(8,FILE='siminp.txt')

OPEN(9,FILE='simout.txt')

READ(8,*) A,B,N

H=(B-A)/(FLOAT(N)-1.)

WRITE(9,9100) A,B,N,H

X0=A

DO I=1,N

    P(I)=(X0/32.)**0.5

    AA(I)=0.532*(X0/32.)**0.5-0.212*(X0/32.)**4-0.072*(X0/32.)**6-0.036*(X0/32.)**8-
0.025*(X0/32.)**10

    U(I)=(-0.003944+0.5*sqrt(0.00006223-0.0499*(0.002492-0.02496*X0**2)))/0.04992

    G(I)=X0**(-3.)*((X0**2.-0.05)**0.5*0.707*U(I)-0.158*U(I)-U(I)**2)

    Y(I)=P(I)*4/3.14159*AA(I)*G(I)

    WRITE(9,9150) X0,P(I),AA(I),G(I),Y(I)

    X0=X0+H

END DO

CALL SIMP(Y,N,H,OL)

WRITE(9,9300) OL

STOP

9100 FORMAT(5X,'ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΚΑΝΟΝΑ SIMPSON'/5X,36('*')//&

```

```
5X,'ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ - A =',F8.3/5X,'ΑΝΩΤΕΡΟ ΟΡΙΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ -  
B =',F8.3,&
```

```
/5X,'ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ - N =',I4/5X,'ΜΕΓΕΘΟΣ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ - H =',F10.5/)
```

```
9150 FORMAT(3F8.3,3E10.5)
```

```
9300 FORMAT(/5X,40('*')/5X,'* Η ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΑΤΟΣ =',E12.5,'*/5X,40('*'))
```

```
END
```

```
SUBROUTINE SIMP(Y,N,H,OL)
```

```
DIMENSION Y(500)
```

```
OL=0.
```

```
IF (AMOD(FLOAT(N),2.)/=0.) GO TO 50
```

```
OL=3.*H/8.*(Y(N-3)+3.*Y(N-2)+3.*Y(N-1)+Y(N))
```

```
IF (N==4) RETURN
```

```
K=N-5
```

```
GO TO 60
```

```
50 K=N-2
```

```
60 DO I=1,K,2
```

```
    OL=OL+H/3.*(Y(I)+4.*Y(I+1)+Y(I+2))
```

```
    END DO
```

```
RETURN
```

```
END
```

