



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ Ο.Σ.

Διπλωματική Εργασία

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ
ΑΝΕΠΑΡΚΩΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ
ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Σοφία Μπουτσάκη

Επιβλέπων: Κ. Γ. Τρέζος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά το ακαδημαϊκό έτος 2013-2014 υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή Ε.Μ.Π. Κωνσταντίνου Τρέζου, τον οποίο ευχαριστώ ιδιαιτέρως για την πολύτιμη επιστημονική καθοδήγηση που μου παρείχε και την αξιοσημείωτη διάθεσή του να βοηθήσει καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Εξίσου ευχαριστώ για τη συνεργασία τον υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π., Κωνσταντίνο Χριστίδη ο οποίος μου παρείχε συνεχή βοήθεια και συντόνισε με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την πειραματική διαδικασία. Θερμότατες ευχαριστίες και αναφορά αξίζουν στον πολυπράγμονα μηχανουργό κ. Παναγιώτη Παπανδρέου ο οποίος έκανε εξαιρετική δουλειά στην εφαρμογή των ενισχύσεων των τοιχωμάτων και συνετέλεσε σε μεγάλο βαθμό στο στήσιμο της πειραματικής διάταξης.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς, τον αδελφό μου και τον Αλέξανδρο για την αμέριστη τους αγάπη και στήριξη.

Αθήνα, Μάιος 2014

Σοφία Μπουτσάκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη συμπεριφορά, τις αιτίες και τους τρόπους αστοχίας τοιχωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση, καθώς και μια συγκεκριμένη μέθοδο ενίσχυσης σε διάτμηση ελαφρώς οπλισμένων τοιχωμάτων με εξωτερικές επικολλητές πλάκες χάλυβα. Τα τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος υπόκεινται σε μεγάλη διατμητική καταπόνηση κατά τη σεισμική διέγερση, κατ' επέκταση οι διατμητικού τύπου αστοχίες εμφανίζονται συχνότερα από ότι στα υποστρώματα. Η προσομοίωση της διατμητικής συμπεριφοράς των τοιχωμάτων, που εξαρτάται από ένα πλήθος αλληλοεξαρτώμενων παραγόντων είναι υπό συνεχή διερεύνηση διεθνώς.

Τα δοκίμια που αναφέρονται στο παρόν τεύχος είναι έξι, δυο κατασκευασμένα σύμφωνα με τις σύγχρονες μεθόδους αντισεισμικού σχεδιασμού και τέσσερα κατασκευασμένα με τις πρό του 1985 διατάξεις που δεν προέβλεπαν την αντισεισμική απόκριση. Αναλυτικοί υπολογισμοί και πειραματική διαδικασία γίνονται για τα τέσσερα από αυτά: Δυο αντισεισμικά κατασκευασμένα, το ένα εκ των οποίων ενισχύεται, και άλλα δύο της ομάδας των ελαφρώς οπλισμένων, το ένα εκ των οποίων επίσης ενισχύεται. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί γίνονται σύμφωνα με τις διατάξεις των EC2, EC8-Μέρος 1, EC8-Μέρος 3, ΚΑΝ.ΕΠΕ., ΑCΙ 318-05.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγική αναφορά στα τοιχώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα, στα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά που τα διαμορφώνουν, τις μορφές αστοχίας που παρουσιάζουν. Αναφέρονται επίσης οι βιβλιογραφικές αναφορές και οι έρευνες που έχουν κατά καιρούς πραγματοποιηθεί και μερικές αξιολογούνται και σε αυτή την εργασία ως εργαλείο αποτίμησης.

Στο Κεφάλαιο 2 παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο για τους αναλυτικούς υπολογισμούς που γίνονται στα δοκίμια.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται περιγραφή των μηχανικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών των έξι δοκιμίων, πριν την ενίσχυση των δύο εξ' αυτών.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται ο υπολογισμός της καμπτικής και διατμητικής αντοχής, της ενεργού δυσκαμψίας και των παραμορφωσιακών χαρακτηριστικών σύμφωνα με το προαναφερθέν κανονιστικό υπόβαθρο. Γίνεται ακόμη συγκριτική εφαρμογή ενός τροποποιημένου μοντέλου υπολογισμού της διατμητικής αντοχής βασισμένο σε αυτό των Kowalski και Priestley [2000] και ενός προσομοιώματος θλιπτήρα-ελκυστήρων προσαρμοσμένου στα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων της πειραματικής βάσης.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται η πειραματική διάταξη και τα πειραματικά αποτελέσματα για δύο από τα δοκίμια (μη ενισχυμένα) που υποβλήθηκαν σε στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφεται η μέθοδος και οι λεπτομέρειες της ενίσχυσης και υπολογίζονται οι νέες αντοχές των ενισχυμένων δοκιμίων σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ..

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και η επεξεργασία τους για τα ενισχυμένα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση και συγκρίνονται με αυτά του Κεφαλαίου 5.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 απαριθμούνται κάποια συμπεράσματα με βάση όλα τα παραπάνω αναλυτικά και πειραματικά δεδομένα.

Λέξεις - κλειδιά: τοιχώματα, ανακύκλιση, παραμορφώσεις, διατμητικός οπλισμός, ενίσχυση σε διάτμηση, χαλύβδινες πλάκες

ABSTRACT

This thesis deals with the behaviour, the causes and the types of failure of reinforced concrete walls under static cyclic loading, as well as it introduces a certain method of externally bonded steel straps for shear strengthening. RC Walls are subjected to intensive shear stress when a remarkable seismic action takes place, thus shear failure modes are more likely to appear to shear walls than to columns. Nowadays, the analytical modeling of the RC Walls shear performance is under constant research globally.

In the present thesis six specimens are included (W7-W12). Two of them (W7, W8) are constructed in order to exhibit sufficient seismic response according to the modern Eurocodes, and, the other four (W9-W12) are lightly reinforced in accordance to older construction codes (before the year 1985) that did not provide adequate earthquake resistant designing instructions. Analytical calculations and experimental testing are thoroughly presented for four of these specimens: two of them are the so called earthquake resistant walls. The reinforcement method is applied to one earthquake resistant specimen (W8) and to one lightly reinforced (W10). The calculations are based upon the instructions of Eurocode 2, Eurocode 8-Part1, Eurocode 8-Part 3, KAN.EPE. (the Greek modern Restoration and Reinforcement Code) and the American code (ACI 318-05).

Chapter 1 is an introductory description of reinforced concrete walls and a brief presentation of the geometrical and mechanical characteristics that govern their function. A general reference to the international literature and experimental tests that are available up to date and can be a useful tool for basic assumptions is also included in this chapter.

Chapter 2 includes the theoretical basis and equations of the above mentioned modern codes. (EN 1992/Eurocode 2: Design of concrete structures, EN 1998/Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, EN 1998/Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, KAN.EPE. ACI 318-05: American Concrete Institute).

In Chapter 3 the geometrical and mechanical characteristics of the specimens (before the external intervention) are presented.

In Chapter 4 the methodologies of regulations applied to assess the seismic behavior are presented. Thus, the shear and flexural resistance, the effective stiffness and ductility level of all specimens are calculated. Emphasis is given to the shear resistance mechanism, so in this chapter also takes place a comparative reference and application of a recently developed shear strength model. The proposed shear strength model is based on the UCSD shear model by Kowalsky and Priestley [2000] with

proposed changes for walls and members with lower shear span ratios. Finally, a simplified strut model adapted to the specimens geometry and mechanical characteristics is also presented.

In Chapter 5, the experimental procedure for the two walls of reinforced concrete (W7, W9) that took place at the Laboratory of Reinforced Concrete of NTUA is – fully detailed- described and the results are presented.

Chapter 6 includes the details and calculations.of the shear strengthening method applied, according to KAN.EPE. instructions.

The experimental procedure and results extracted -concerning the strengthened specimens (W8, W10)- are presented in Chapter 7. In addition these results are compared to those of Chapter 5.

Finally, in Chapter 8 some basic conclusions based on all the above mentioned stages are drawn, including suggestions for further research.

Keywords: *RC Walls, cyclic loading, deformation, horizontal reinforcement, shear strengthening, steel plates*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ | 11 |
| 1.1 Εισαγωγή | 11 |
| 1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση | 13 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ-ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ | 17 |
| 2.1 Εισαγωγή | 17 |
| 2.2 Ευρωκώδικας 2 – Μέρος 1-1 (EC8 – Part 1-1) | 17 |
| 2.2.1 Σκυρόδεμα | 17 |
| 2.2.2 Χάλυβας οπλισμών | 20 |
| 2.2.3 Παραδοχές για κάμψη ορθογωνικής διατομής με ή χωρίς αξονική δύναμη | 22 |
| 2.2.4 Διάτμηση | 23 |
| 2.3 Ευρωκώδικας 8 - Μέρος 3 (EC8 - Part 3) | 25 |
| 2.3.1 Προσομοίωμα περίσφιγξης | 25 |
| 2.3.2 Γωνία στροφής χορδής θ | 27 |
| 2.3.3 Καμπύλη ικανότητας ή αντίστασης, F- δ (Capacity Curve)..... | 28 |
| 2.3.4 Διάτμηση (Οριακή Κατάσταση Οιονεί Κατάρρευσης) | 35 |
| 2.3.5 Διαδικασία επιλογής και σχεδιασμού των ενισχύσεων - Γενικές αρχές..... | 37 |
| 2.3.6 Διατμητική αντοχή υπό τη συνεισφορά χαλύβδινης ενίσχυσης | 38 |
| 2.4 Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) – 1 ^η Αναθεώρηση Ιούλιος 2013 | 39 |
| 2.4.1 Καμπύλη αντίστασης «F- δ » | 39 |
| 2.4.2 Διάγραμμα «Ροπών-(Αξονικών)-Καμπυλοτήτων» (M - 1/R) | 41 |
| 2.4.3 Ροπή και καμπυλότητα στη διαρροή (ΚΑΝ.ΕΠΕ., ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 7 ^A) | 42 |
| 2.4.4 Ροπή και καμπυλότητα στην αστοχία..... | 44 |
| 2.4.5 Παραμόρφωση διαρροής στοιχείου..... | 46 |
| 2.4.6 Παραμόρφωση αστοχίας στοιχείου (πλαστική και συνολική γωνία στροφής) | 47 |
| 2.4.7 Παραμόρφωση κατά την αστοχία από τέμνουσα | 48 |
| 2.4.8 Δείκτης πλαστιμότητας και χαρακτηρισμός συμπεριφοράς..... | 50 |
| 2.4.9 Ενισχύσεις | 51 |
| 2.4.10 Κριτήρια για την εφαρμογή του τύπου ενίσχυσης | 51 |
| 2.4.11 Μεταφορά δυνάμεων από χάλυβα σε σκυρόδεμα μέσω εμπηγνόμενων στοιχείων ή βλήτρων..... | 53 |
| 2.4.12 Μεταφορά δυνάμεων μέσω στρώσεων εποξειδικής κόλλας – Διατμητική αντίσταση διεπιφάνειας | 53 |
| 2.4.13 Επέμβαση με στόχο την αύξηση της φέρουσας ικανότητας έναντι τέμνουσας.... | 54 |

| | |
|---|-----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗ | 57 |
| 3.1 Μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων..... | 57 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΤΟΧΕΣ ΤΟΙΧΙΩΝ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ | 63 |
| 4.1 Ιδιότητες σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού..... | 63 |
| 4.2 Καμπτική αντοχή..... | 64 |
| 4.3 Ροπή διαρροής και Ενεργός δυσκαμψία..... | 66 |
| 4.4 Παραμορφώσεις διαρροής και αστοχίας - πλαστιμότητα..... | 72 |
| 4.5 Διατμητική Αντοχή και Καμπτοδιατμητική αλληλεπίδραση | 76 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΑ ΤΟΙΧΙΑ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗ..... | 109 |
| 5.1 Πειραματική διάταξη..... | 109 |
| 5.2 Βελόμετρα | 110 |
| 5.3 Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων | 112 |
| 5.3.1 Διαδικασία και κύκλοι φόρτισης..... | 112 |
| 5.3.2 Υστερητική συμπεριφορά δοκιμίων..... | 113 |
| 5.3.3 Παραμορφωσιακή συμπεριφορά δοκιμίων στη διαρροή..... | 125 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΟΧΩΝ..... | 135 |
| 6.1 Εισαγωγή..... | 135 |
| 6.2 Εποξειδικές ρητίνες..... | 135 |
| 6.3 Χαλύβδινες πλάκες..... | 137 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ | 145 |
| 7.1 Πειραματική διάταξη..... | 145 |
| 7.2 Βελόμετρα | 145 |
| 7.3 Επιμηκυνσιόμετρα (Strain-gages ή Strain-gauges) | 146 |
| 7.4 Πειραματική Επεξεργασία..... | 152 |
| 7.4.1 Κύκλοι φόρτισης | 152 |
| 7.4.2 Υστερητική συμπεριφορά ενισχυμένων δοκιμίων | 165 |
| 7.4.3 Παραμορφωσιακή συμπεριφορά ενισχυμένων δοκιμίων | 175 |
| 7.4.4 Σύγκριση ενισχυμένων και μη ενισχυμένων δοκιμίων..... | 184 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ..... | 201 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 205 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΜΕΘΟΔΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ..... | 211 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.1 Εισαγωγή

Τα τοιχώματα ωπλισμένου σκυροδέματος αποτελούν βασική γραμμική άμυνας των κατασκευών έναντι εξωτερικών και κατ' επέκταση έναντι σεισμικών δράσεων. Ιδιαίτερος δε, καθώς τα φορτία που αναπτύσσονται στις διατομές των τοιχωμάτων λόγω δράσης των κατακόρυφων φορτίων είναι συνήθως μικρά, η κύρια λειτουργία τους συνίσταται στην ανάληψη οριζοντίων δράσεων που καταπονούν μια κατασκευή στη βάση της κατά τη σεισμική διέγερση. Υπό κατακόρυφα φορτία μια διατομή τοιχώματος πρέπει να παραμένει συνήθως στην ελαστική περιοχή συμβάλλοντας έτσι στην ευστάθεια του δομήματος.

Κατά τη σεισμική διέγερση ωστόσο η σπουδαία συμβολή των τοιχωμάτων στην εξασφάλιση επαρκούς αντισεισμικής αντοχής έγκειται στην ενεργοποίηση της υστερητικής συμπεριφοράς τους, στην ενεργοποίηση δηλαδή μιας σειράς μηχανισμών που παραλαμβάνουν ένα σταθερό ποσοστό των δρώντων δυνάμεων και καταναλώνουν έτσι ένα μεγάλο τμήμα από την ενέργεια που εισάγεται στην κατασκευή κατά την απόκρισή της στη σεισμική διέγερση. Συνεπώς, η σπουδαιότητα των τοιχίων από ωπλισμένο σκυρόδεμα στις κατασκευές και ειδικότερα σε σεισμογενείς περιοχές όπως ο Ελλαδικός χώρος είναι μεγάλη. Η πειραματική έρευνα που γίνεται έχει ακόμη πολλά καινούρια πεδία να καλύψει για την επαρκή περιγραφή της ελαστικής και κυρίως της ανελαστικής απόκρισης των τοιχωμάτων αλλά και τον ικανοποιητικό αντισεισμικό σχεδιασμό τους ώστε να προβλέπεται ο ακριβής τρόπος αστοχίας τους ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους.

Οι τύποι αστοχίας των τοιχωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι δύο βασικών κατηγοριών: (1) καμπτικού και (2) διατμητικού τύπου ανάλογα με το ύψος του τοιχώματος. Η καμπτικού τύπου αστοχία χαρακτηρίζεται από καμπτική ρηγμάτωση στη βάση του τοιχώματος, στην περιοχή δηλαδή δημιουργίας πλαστικής άρθρωσης. Η ικανότητα για μετελαστικές παραμορφώσεις σε αυτού του τύπου τα τοιχεία είναι συνάρτηση της καμπτικής αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος λόγω θλιπτικής καταπόνησης, του λυγισμού του διαμήκους οπλισμού στη θλιβόμενη ζώνη, της εξόλκευσης των διαμήκων ράβδων από την περιοχή της αγκύρωσής τους στη βάση ή της θράυσης αυτών των ράβδων υπό εφελκυστική αξονική καταπόνηση. Η διατμητικού τύπου αστοχία χαρακτηρίζεται από έντονη καθ' ύψος κεκλιμένη χιαστί ρηγμάτωση (υπό ανακύκλιση) που αποδιοργανώνει τη μεσαία περιοχή κυρίως του τοιχώματος. Η ικανότητα μετελαστικής απόκρισης σε αυτού του τύπου τα τοιχώματα είναι συνάρτηση του αν η διατμητική αστοχία οφείλεται σε λοξό εφελκυσμό, σε λοξή θλίψη του σκυροδέματος, σε διατμητική ολίσθηση στην περιοχή της βάσης κατά

μήκος μιας κυρίαρχης καμπτικής ρωγμής ή σε πιθανά συνυπάρχοντα φαινόμενα που χαρακτηρίζουν την καμπτικού τύπου αστοχία.

Στο πλαίσιο της φιλοσοφίας του Ευρωκώδικα 8 και του ΚΑΝ.ΕΠΕ., που κατά βάση μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία και αποτελούν το σύγχρονο ελληνικό υπόβαθρο αντισεισμικού σχεδιασμού, περιέχονται διατάξεις που συνθέτουν τόσο πληθώρα πειραματικών όσο και αναλυτικών μοντέλων προσομοίωσης, αποτίμησης και βελτίωσης της σεισμικής απόκρισης των δομημάτων. Ο αντισεισμικός *σχεδιασμός* νέων φορέων βασίζεται σε έναν συγκεκριμένο *επιτρεπόμενο βαθμό βλάβης* του φορέα στην περίπτωση του σεισμού σχεδιασμού και τα κριτήρια για την σεισμική αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας (φορέων οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι σύμφωνα με τους κανονισμούς αυτούς και στη συνέχεια έχουν υποστεί βλάβες) αποτελούν αναπόσπαστο μέρος ολόκληρης της διαδικασίας για τη αντισεισμική ασφάλεια του φορέα.

Ένα σημαντικό στοιχείο που βρίσκουμε στις πρόσφατες μεθόδους αντισεισμικού σχεδιασμού ή αποτίμησης είναι ότι *η σεισμική δράση λαμβάνεται ως επιβολή μετακινήσεων και όχι δυνάμεων και έτσι η πλαστική απόκριση ελέγχεται καλύτερα και με απλούστερο τρόπο, απαιτεί ωστόσο μεγαλύτερη υπολογιστική ακρίβεια*. Οι νεότεροι κανονισμοί ακόμα και όταν έδιναν μεγαλύτερο βάρος στο σχεδιασμό και την αποτίμηση σε όρους επιβαλλόμενων δυνάμεων ενέπλεκαν έμμεσα την παραμορφωσιμότητα ενός στοιχείου ωπλισμένου σκυροδέματος εισάγοντας στην ανάλυση το *δείκτη πλαστιμότητας* του, που δηλώνει την ικανότητα ενός μέλους (και κατ' επέκταση της συνολικής κατασκευής) να αναπτύξει μετελαστικές παραμορφώσεις μετά τη διαρροή του χωρίς σημαντική μείωση της ροπής αντίστασής του. Έτσι απέφευγαν να κάνουν ανάλυση με βάση τις μετακινήσεις (μειώνοντας τις ελαστικές σεισμικές δυνάμεις με βάση τον συνολικό *δεικτη συμπεριφοράς*) και κατέφευγαν σε ισοδύναμη ανάλυση με βάση τις δυνάμεις. Η εξασφάλιση της τοπικής πλαστιμότητας των μελών επιτυγχάνεται με τις κατάλληλες *λεπτομέρειες όπλισης* ιδιαίτερα στις κρίσιμες περιοχές (συνύπαρξη μέγιστων εντατικών μεγεθών) των μελών μιας κατασκευής και με τον *ικανοτικό σχεδιασμό σε τέμνουσα (εξασφάλιση καμπτικής αστοχίας)*. Σήμερα όμως η μέθοδος των μετακινήσεων αρχίζει να γίνεται ευρέως διαδεδομένη καθώς η μέθοδος των δυνάμεων εκτιμούσε την ελαστική κυρίως αντοχή, ενώ πλέον εισάγονται στην εργαλειοθήκη του μηχανικού και μέθοδοι εκτίμησης της ενεργού δυσκαμψίας, της παραμόρφωσης που μπορεί να αναπτύξει μετελαστικά ένα μέλος ως την αστοχία του, καθώς και τον τύπο της αστοχίας που το καθορίζει.

Ένα μεγάλο ποσοστό των υφιστάμενων τοιχωμάτων έχουν κατασκευαστεί με παλαιότερες κατασκευαστικές διατάξεις (πριν το 1985) που δεν συμπεριλαμβάνουν τις σύγχρονες μεθόδους περί αντισεισμικού σχεδιασμού (αραιή διάταξη οπλισμών, απουσία κρυφούποστυλωμάτων) και όπως έχει αποδειχθεί υφίστανται εκτεταμένες βλάβες κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων. Η επισκευή και η ενίσχυση στοιχείων από ωπλισμένο σκυρόδεμα που έχουν υποστεί βλάβες από σεισμικές δράσεις είναι σχετικά νέο πεδίο μελέτης. Η ενίσχυση πλέον πραγματοποιείται κυρίως

προληπτικά όταν προκύπτουν υπολογιστικά αδυναμίες των κατασκευών υπό τις δράσεις σχεδιασμού, ενώ σε λιγότερες περιπτώσεις ακολουθεί τη μερική βλάβη στοιχείων.

Μερικοί προτεινόμενοι τύποι ενίσχυσης είναι οι μανδύες σκυροδέματος ή χάλυβα, η επισκευή μικρού εύρους ρωγμών με χρήση ρητινένεσων, τα ινοπλισμένα πολυμερή (FRP), οι λάμες από δομικό χάλυβα κ.α. ανάλογα με την επιδιωκόμενη αύξηση της αντοχής, της δυσκαμψίας, της πλαστιμότητας ή όλων αυτών ταυτοχρόνως. Ωστόσο στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός μελετών για ενίσχυση υποστυλωμάτων και δοκών σε αντίθεση με τον περιορισμένο όγκο διερευνήσεων πάνω στην ενίσχυση τοιχίων από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Συνεπώς οι αποδοτικότερες μέθοδοι ενίσχυσης συγκεκριμένα για τοιχώματα είναι ακόμα προς διερεύνηση.

Ένα ακόμη πρόβλημα που προκύπτει στην προσπάθεια ακριβούς πρόβλεψης της συμπεριφοράς των τοιχωμάτων και προσεγγίζεται στην παρούσα εργασία, είναι ότι ενώ το ζήτημα της κάμψης δείχνει να έχει αντιμετωπιστεί επαρκώς καθώς υπάρχει ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων σε ό,τι αφορά σε τοιχία που επιδεικνύουν καθαρά καμπτική συμπεριφορά, *το πρόβλημα της διάτμησης εξακολουθεί να βρίσκεται υπό εντατική διερεύνηση λόγω της διαφοράς μεταξύ πειραμάτων και ανάλυσης αναφορικά με τη διατμητική συμπεριφορά*. Η διαφορά αυτή δείχνει να έγκειται στην μη ακριβή πρόβλεψη φαινομένων όπως είναι η *αλληλεπίδραση διάτμησης και κάμψης* (η αλληλεπίδραση εξαρτάται κυρίως από το βαθμό ορθής και ταυτόχρονης διατμητικής έντασης, από το λόγο διάτμησης του τοιχώματος καθώς επίσης και από το βαθμό και προσανατολισμό της ρηγμάτωσης του στοιχείου). Επίσης υπάρχουν ορισμένες ασυμβατότητες ή ασάφειες στους σύγχρονους κανονισμούς στο θέμα προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής τοιχωμάτων (π.χ. βαθμός συνεισφοράς επικουρικών μηχανισμών στην ανάληψη της τέμνουσας, εξάρτηση ή όχι της συνεισφοράς των συνδετήρων από το λόγο διάτμησης, ισχύς δικτυώματος Morsch κ.α).

Τέλος, είναι αποδεδειγμένο ότι τοιχώματα που υπόκεινται σε μεγάλη ανακυκλιζόμενη διατμητική ένταση παρουσιάζουν μικρή μετελαστική ικανότητα παραμόρφωσης (όπου κυριαρχούν οι διατμητικές μετατοπίσεις), απότομη μείωση της δυσκαμψίας τους με την είσοδο στο μετελαστικό κλάδο, μικρή ικανότητα απόσβεσης ενέργειας και ψαθυρή αστοχία.

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Πριν τη δεκαετία του 1960, όπως σημειώνεται από τους Hidalgo et al. [1], η χρήση τοιχωματικών συστημάτων που αναλαμβάνουν μεγάλες οριζόντιες δυνάμεις δεν ήταν διαδεδομένη κατασκευαστική τεχνική σε σειсмоγενείς χώρες και οι ερευνητές επικέντρωναν τις μελέτες τους στη σεισμική συμπεριφορά πλαισιωτών συστημάτων. Από τη δεκαετία αυτή και μετά, η σεισμική συμπεριφορά τοιχωμάτων από οπλισμένο

σκυρόδεμα κατασκευασμένων ώστε να αναπτύσσουν πλαστικές αρθρώσεις στη βάση τους έγινε αντικείμενο πολλών μελετών που συνεχίζονται εντατικά μέχρι σήμερα. Οι Beck [2] και Rosman [3] ήταν από τους πρώτους που εξήγαγαν αναλυτικά προσομοιώματα για την απόκριση τοιχίων υποβαλλόμενων σε οριζόντια (σεισμικά) φορτία. Οι Fintel και Naaseh [4] αναγνώρισαν τη βελτιωμένη σεισμική απόκριση τοιχωματικών συστημάτων σε σχέση με τα πλαισιωτά συστήματα. Από τις πρώτες μελέτες πάνω στη συμπεριφορά τοιχίων οπλισμένου σκυροδέματος είναι αυτή των Paulay et al. (1982) [5], η οποία θίγει θέματα όπως η ανάπτυξη πλαστιμότητας και οι λεπτομέρειες όπλισης προς αυτή την κατεύθυνση, η θετική παρουσία του διαγώνιου οπλισμού και το φαινόμενο της διατμητικής ολίσθησης, ένα φαινόμενο με το οποίο ασχολήθηκαν εκ των υστέρων και άλλες μελέτες (Salonikios, 2002 [6]). Οι Coull και Stafford Smith [7] ασχολήθηκαν με το σχεδιασμό κατασκευών μεγάλου ύψους και αφιέρωσαν μεγάλο μέρος της έρευνάς τους στη σεισμική συμπεριφορά λυγηρών τοιχίων. Οι Paulay και Priestley, στο βιβλίο τους το 1992 [8] συγκέντρωσαν όλες τις προγενέστερες έρευνες τους όσον αφορά στα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα, και συμπεριέλαβαν εκτεταμένες αναφορές στα συστήματα τοιχωμάτων και τα συζευγμένα τοιχώματα.

Όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν διάφορες παράμετροι που διαμορφώνουν τη συμπεριφορά ενός τοιχώματος και επηρεάζουν το είδος της αστοχίας του. Ο λόγος διάτμησης, α , είναι μία από τις σημαντικότερες και ορίζεται ως $\alpha = M/l_w \cdot V$, όπου l_w είναι το εγκάρσιο μήκος του τοιχίου. Σύμφωνα με τον EC8-Part1 (2004) [9] τα τοιχώματα διαχωρίζονται ως προς το λόγο διάτμησης τους σε λυγηρά (slender) με λόγο διάτμησης μεγαλύτερο ή ίσο με δύο, σε τοιχία με λόγο διάτμησης μικρότερο του δύο (χθαμαλά τοιχία - low rise walls) και σε τοιχία με λόγο διάτμησης μεταξύ του δύο και του τέσσερα (μεσαία - medium rise walls) και στα οποία η αλληλεπίδραση της κάμψης και της διάτμησης είναι μεγάλη, ώστε να είναι δυσκολότερος ο ξεκάθαρος προσδιορισμός του τύπου αστοχίας που τα χαρακτηρίζει (διατμητικός ή καμπτικός τύπος). Από την πειραματική δοκιμή τοιχωμάτων Ο/Σ στην εργασία των Salonikios et al. [10] [11] επιχειρείται η προσέγγιση της απόκρισης μέσω αναλυτικού ανελαστικού προσομοιώματος, ενώ στην εργασία Salonikios (2005) [12], γίνεται προσπάθεια για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ κάμψης και διάτμησης, όπου χρησιμοποιούνται δύο ελατήρια για την ακριβέστερη προσέγγιση του φαινομένου της ταυτόχρονης ανελαστικής παραμόρφωσης του μηχανισμού κάμψης και διάτμησης ενώ σε άλλες εργασίες γίνεται η εισαγωγή πεπερασμένων στοιχείων (κάμψης και διάτμησης) κατανεμημένης ευκαμψίας. Σε τοιχώματα τα οποία διαμορφώνουν λόγο διάτμησης μεγαλύτερο του τέσσερα, επιτρέπεται να μη λαμβάνονται υπόψη οι διατμητικές παραμορφώσεις (Paulay and Priestley, 1992). Τέτοια τοιχία απαντώνται συχνά ως «ψηλά» τοιχία (high rise walls). Παράλληλα, για λόγο διάτμησης μικρότερο του ένα ($\alpha < 1$) τα τοιχία αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία και ως «κοντά» (squat walls). Για τοιχώματα με στατικό σύστημα προβόλου ο λόγος διάτμησης ορίζεται ως $\alpha = h/l_w$ (όπου h το ύψος του τοιχίου και l_w το εγκάρσιο ύψος της διατομής τους).

Αναφορικά με τη βάση πειραματικών και αναλυτικών δεδομένων της διεθνούς βιβλιογραφίας, η συμπεριφορά των λυγηρών τοιχωμάτων έχει προσεγγιστεί και προβλεφθεί σε ικανοποιητικό βαθμό τόσο σε επίπεδο του κάθε κατασκευαστικού στοιχείου ενός τοιχώματος όσο και σε επίπεδο συνολικής κατασκευής υπό ψευδο-στατικές και δυναμικές ανακυκλιζόμενες φορτίσεις. Όσον αφορά στα κοντά και μεσαία τοιχώματα, λίγες ερευνητικές εργασίες είναι διαθέσιμες παρά την χρησιμότητα και ευρεία χρήση τους. Συγκεκριμένα, οι Paulay et al. [13] ήταν οι πρώτοι που αντιμετώπισαν το ζήτημα της πλαστιμότητας και της σεισμικής απόκρισης τέτοιων τοιχίων. Οι Duffey et al. ερεύνησαν τα όρια της μετατόπισης κορυφής (drift) τοιχωμάτων με χαμηλό λόγο διάτμησης. Οι Hidalgo et al. [1] μελέτησαν τη συμπεριφορά τοιχίων Ω.Σ. που αστόχησαν διατμητικά μέσω ενός ερευνητικού προγράμματος που περιελάμβανε 26 δοκίμια που υποβλήθηκαν σε στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση με επιβολή μεγάλων μετατοπίσεων. Ως παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν ο λόγος διάτμησης, η ποσότητα του οριζόντιου και κατακόρυφου οπλισμού και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

Όσον αφορά σε τοιχία ελαφρώς οπλισμένα, λίγες βιβλιογραφικές αναφορές είναι διαθέσιμες. Μια ενδιαφέρουσα εργασία είναι αυτή των Lefas et al. [14] που περιελάμβανε κοντά τοιχία με ακραίο οπλισμό περίσφιγξης (3.1%) αλλά αραιό οριζόντιο οπλισμό κορμού (0.37%). Η πειραματική διάταξη ήταν απλή με επιβολή οριζόντιων μετατοπίσεων στην κορυφή. Το μειωμένο ποσοστό οριζόντιου διατμητικού οπλισμού είχε πολύ μικρή επίδραση στο μέγιστο φορτίο, την αναπτυχθείσα πλαστιμότητα, ακόμα και στον τύπο της αστοχίας. Τα δοκίμια αστόχησαν λόγω λοξής θλίψης και ως εκ τούτου αποδείχθηκε ότι το σκυρόδεμα της θλιβόμενης ζώνης έχει σημαντική συμβολή στην αντοχή των τοιχωμάτων. Άλλες δυο γνωστές έρευνες είναι αυτές των Greinfenhagen and Lestuzzi [15] όπου μελετήθηκε η σεισμική συμπεριφορά τοιχίων ακατάλληλα σχεδιασμένων για ανάληψη σεισμικών δυνάμεων, και αυτή των Kuang and Ho 2008 [16] που αφορούσε στη σύγκριση ελαφρώς οπλισμένων τοιχίων και τοιχίων με διαμόρφωση κρυφοϋποστυλωμάτων και κατέδειξε την μεγαλύτερη ανάπτυξη πλαστιμότητας και διάχυσης ενέργειας που ανέπτυξαν τα δεύτερα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες από τις προαναφερθείσες έρευνες είναι αρκετά πρόσφατες, ενώ ακόμα πιο νέο είναι το πεδίο ανάπτυξης προσομοιωμάτων ακριβούς πρόβλεψης του τύπου αστοχίας ενός τοιχώματος ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής του, καθώς και οι μέθοδοι ενίσχυσης ή επισκευής ανάλογα με τον τύπο βλάβης ή αναμενόμενης αστοχίας. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά άρθρα και πειραματικά δεδομένα όσον αφορά στην ενίσχυση δοκών και υποστυλωμάτων με χρήση μανδυών σκυροδέματος και σύνθετα υλικά. Αντίθετα η ενίσχυση τοιχίων, ειδικά με χαλύβδινες λάμες είναι υπό δοκιμή και δεν υπάρχουν αρκετές πηγές αναφοράς.

Έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα υπολογισμού της - διατμητικής- αντοχής (Wood 1990 [17], Gulec et al. 2008 [18], Gulec and Whittaker 2011 [19], Shohara and Kato). Γνωστό, επίσης, είναι το μοντέλο UCSD (Priestley et al. 1994 [20], Kowalsky and

Priestley 2000 [21]), το οποίο με πρόσφατες τροποποιήσεις και προτάσεις που βασίστηκαν σε αξιόπιστες βάσεις πειραματικών δεδομένων από τους J. Krolicki , J. Maffei & G. M. Calvi 2011 [22], φαίνεται να έχει προσεγγίσει σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό το πολύπλοκο ζήτημα του τρόπου αστοχίας τοιχίων με λόγο διάτμησης έως 2 (μεσαίων), δηλαδή τοιχίων με καμπτοδιατμητική συμπεριφορά. Η ακρίβεια του προσομοιώματος βέβαια μένει να αποδειχθεί με περαιτέρω έρευνα και εμπλουτισμό της βάσης. Ευρείας αποδοχής έχουν τύχει και τα μοντέλα των Panagiotakos and Fardis (2001) [23] και Biskinis et al.(2004) [24] που αφορούν την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας σε όρους πλαστιμοτήτων και σε όρους διατμητικής αντοχής, αντίστοιχα, και τα οποία, με ελάχιστες τροποποιήσεις, έχουν υιοθετηθεί και από τον EC8-Part 3 [25] και χρησιμοποιούνται και στην παρούσα εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ-ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Εισαγωγή

Οι βασικές ιδιότητες που κυρίως καθορίζουν την απόκριση μεμονωμένων δομικών στοιχείων ή και ολόκληρων δομικών συστημάτων, έναντι των αναπτυσσόμενων δράσεων είναι η *δυσκαμψία*, η *αντοχή* και η *πλαστιμότητα*. Η *δυσκαμψία* χαρακτηρίζει την ελαστική απόκριση, η *αντοχή* καθορίζει τα όρια της ελαστικής και της μετελαστικής απόκρισης ενώ η *πλαστιμότητα* είναι ο παράγοντας που καθορίζει την μετελαστική συμπεριφορά του δομικού στοιχείου. Οι σύγχρονοι κανονισμοί, ταυτοχρόνως με την πιο άμεση υιοθέτηση της πλαστιμότητας για τη σεισμική αποτίμηση και την ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών, βασίζονται σε αναλύσεις με βάση τις μετακινήσεις.

Στο παρόν κεφάλαιο αποτυπώνονται οι θεωρητικές παραδοχές και αναλυτικές σχέσεις που περιγράφουν για τοιχώματα ορθογωνικής διατομής την διατμητική αντοχή, την καμπτική αντοχή, την παραμόρφωση στη διαρροή και αστοχία, την ενεργό *δυσκαμψία* και την *πλαστιμότητα*, ενώ παράλληλα δίδονται τα κριτήρια και οι σχέσεις υπολογισμού των επιλεχθέντων μέσων ενίσχυσης.

2.2 Ευρωκώδικας 2 – Μέρος 1-1 (EC8 – Part 1-1)

2.2.1 Σκυρόδεμα

Η τιμή της θλιπτικής αντοχής σχεδιασμού ορίζεται ως:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c \quad (2.1)$$

όπου:

- γ_c είναι ο μερικός συντελεστής ασφαλείας για το σκυρόδεμα που για της ανάγκες της παρούσης διπλωματικής που είναι κυρίως αποτιμητική και η αντοχή έχει προκύψει με πειραματικές μεθόδους που μειώνουν την αβεβαιότητα λαμβάνεται ίσος με 1
- α_{cc} είναι συντελεστής που συνεκτιμά μακροχρόνιες επιδράσεις στην θλιπτική αντοχή και δυσμενείς επιρροές που προκύπτουν από τον τρόπο με τον οποίο επιβάλλεται το φορτίο. Προς απλοποίηση στο αναλυτικό κομμάτι δεν λαμβάνονται υπόψη αυτές οι επιρροές, οπότε και αυτός λαμβάνεται ίσος με 1.

Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος κατά τον Ευρωκώδικα 2 υποδηλώνεται με τις Κατηγορίες Σκυροδέματος οι οποίες αντιστοιχίζονται στη χαρακτηριστική (5%) κυλινδρική αντοχή f_{ck} , ή την κυβική αντοχή $f_{ck,cube}$. Ωστόσο για το παρόν εκπόνημα ως χαρακτηριστική αντοχή χρησιμοποιήθηκε η μετρηθείσα (πειραματικές δοκιμές).

Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής σχεδιασμού, f_{ctd} , ορίζεται ως:

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} f_{ctk} 0,05 / \gamma_c \quad (2.2)$$

όπου:

- γ_c είναι ο μερικός συντελεστής ασφαλείας για το σκυρόδεμα
- α_{ct} είναι ο συντελεστής που συνεκτιμά μακροχρόνιες επιδράσεις στην αντοχή σε εφελκυσμό και δυσμενείς επιρροές που προκύπτουν από τον τρόπο με τον οποίο επιβάλλεται το φορτίο.

Στην ορθή ένταση αγνοούμε την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος υπέρ ασφαλείας, εκτός ειδικών περιπτώσεων όπως π.χ. για την αγκύρωση των ράβδων, για τον υπολογισμό του ελάχιστου οπλισμού έναντι ψαθυρής αστοχίας κ.α.

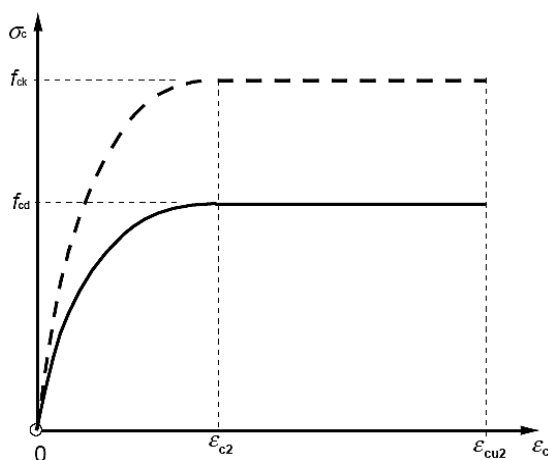
2.2.1.A) Απερίσφιγγο σκυρόδεμα

$$\sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad \text{για} \quad 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad (2.3)$$

$$\sigma_c = f_{cd} \quad \text{για} \quad \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \quad (2.4)$$

όπου :

- $n=2$ σύμφωνα με τον Πίνακα 3.1 του EN 1992-1-1
- ε_{c2} είναι η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη αντοχή
- ε_{cu2} είναι η παραμόρφωση αστοχίας
- f_{cd} η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος



Διάγραμμα 2.1 Ορθογωνικό-παραβολικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης σκυροδέματος (EC2)

Δύναμη σκυροδέματος για ορθογωνικό-παραβολικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης:

$$F_c = a f_{cd} b x \quad (2.5)$$

όπου:

- α είναι ο συντελεστής πλήρωσης που για παραμόρφωση αστοχίας σκυροδέματος 0,035 και παραβολικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων λαμβάνεται ίσος με 0,81, ενώ:

$$\text{για } \varepsilon_{c2} < 2\text{‰}, \alpha = \frac{1}{12} \varepsilon_{c2} (6 - \varepsilon_{c2}) \quad (2.6)$$

$$\text{για } 2\text{‰} < \varepsilon_{c2} < 3,5\text{‰}, \alpha = \frac{3\varepsilon_{c2} - 2}{3\varepsilon_{c2}} \quad (2.7)$$

- f_{cd} η αντοχή σχεδιασμού του σκυροδέματος
- x το ύψος της θλιβόμενης ζώνης
- b το πλάτος της διατομής

2.2.1.B) Περισιγμένο σκυρόδεμα

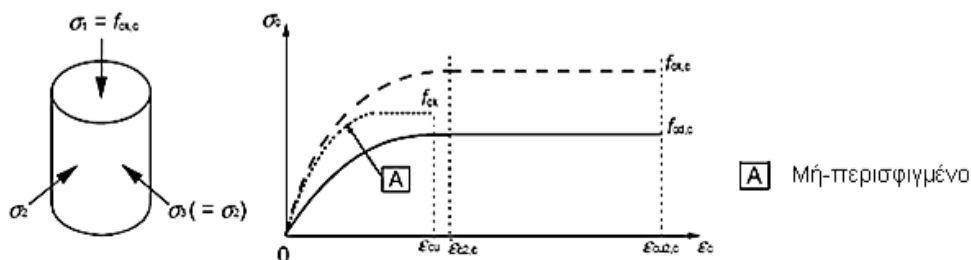
Η περίσιγξη του σκυροδέματος έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της σχέσης δρώσας τάσης-παραμόρφωσης καθώς επιτυγχάνονται υψηλότερη αντοχή και μεγαλύτερες κρίσιμες παραμορφώσεις. Τα υπόλοιπα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού μπορεί να θεωρηθούν αμετάβλητα για τον σχεδιασμό. Οι σχέσεις του EC2 που δίνουν την αντοχή και τις παραμορφώσεις διαρροής και αστοχίας του περισιγμένου σκυροδέματος, για εγκάρσια τάση θλίψης σ_2 , είναι:

$$f_{ck,c} = f_{ck} \left(1,000 + 5,0 \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right) \quad \text{για } \sigma_2 \leq 0,05 f_{ck} \quad (2.8)$$

$$f_{ck,c} = f_{ck} \left(1,125 + 2,5 \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right) \quad \text{για } \sigma_2 > 0,05 f_{ck} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2} \left(\frac{f_{ck,c}}{f_{ck}} \right)^2 \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{c2} + 0,2 \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \quad (2.11)$$



Διάγραμμα 2.2 Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης περισιγμένου και απερίσιγγτου σκυροδέματος (EC2)

2.2.2 Χάλυβας οπλισμών

Η αποτίμηση των μηχανικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών του δομικού χάλυβα βασίζεται στο ονομαστικό εμβαδόν διατομής του οπλισμού καθώς και στις τιμές που προκύπτουν ύστερα από επιτόπου μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής της κάθε παρτίδας που χρησιμοποιείται.

Για συνήθη *σχεδιασμό*, μπορεί να εφαρμοστεί μία από τις παρακάτω παραδοχές:

- Κεκλιμένος δεύτερος κλάδος με όριο παραμόρφωσης ε_{ud} και μέγιστη τάση kf_{yk} στην ε_{uk} , όπου $k = \left(\frac{f_t}{f_y}\right)_k$. Για χάλυβα κατηγορίας C η κράτυνση κυμαίνεται από 1,15 έως 1,35. Η κλίση του μετελαστικού κλάδου θεωρητικά και χωρίς πλατώ διαρροής είναι:

$$E_{II} = \frac{kf_{yd} - f_{yd}}{\varepsilon_{uk} - \varepsilon_{yd}}, \text{ με } f_y = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}, \gamma_s = 1 \quad (2.12)$$

- Οριζόντιος δεύτερος κλάδος χωρίς την ανάγκη ελέγχου του ορίου παραμόρφωσης, πλην της περίπτωσης που η αστοχία επέρχεται με θραύση του χάλυβα..
- Η μέση τιμή της πυκνότητας μπορεί να θεωρείται ίση προς 7850 Kg/m^3 .
- Η τιμή σχεδιασμού του μέτρου ελαστικότητας μπορεί να θεωρείται ίση προς 200.000 MPa .

Δύναμη χάλυβα

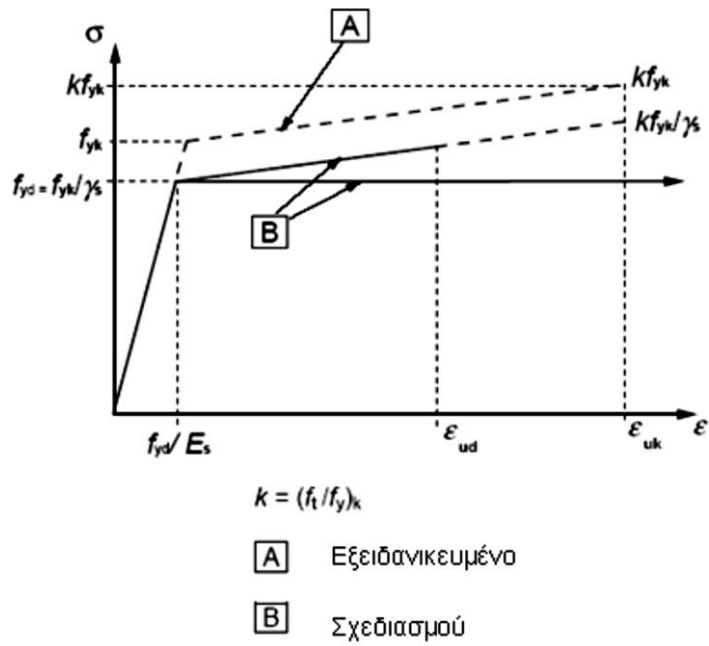
$$F_S = A_s \sigma_s = A_s \varepsilon_s E_s \text{ για } \sigma_s < f_y \quad (2.13)$$

$$F_S = A_s [f_y + E_{II} (\varepsilon_s - \varepsilon_y)] = A_s \left[f_y + \frac{(f_u - f_y)(\varepsilon_s - \varepsilon_y)}{(\varepsilon_u - \varepsilon_y)} \right] \text{ για } \sigma_s \geq f_y \quad (2.14)$$

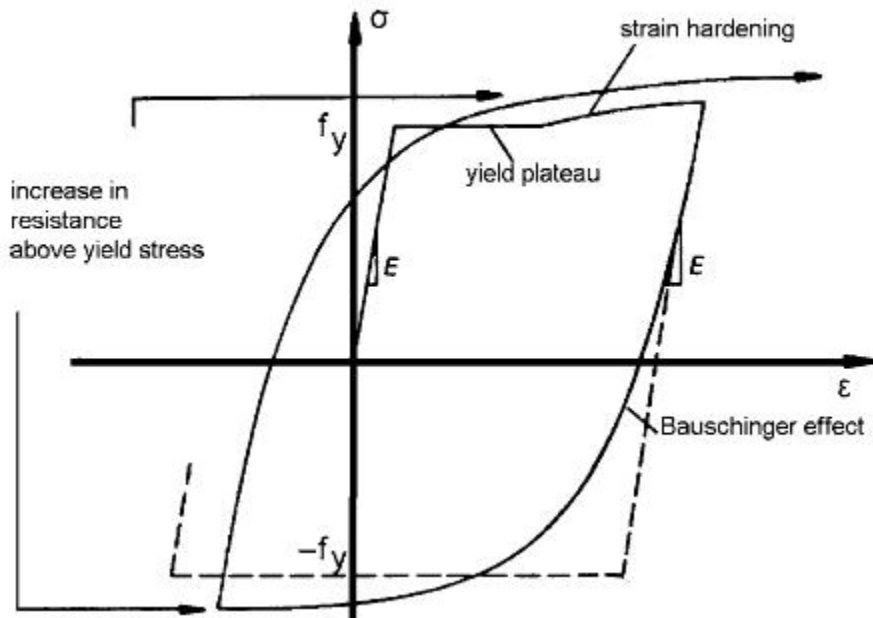
όπου:

- A_s είναι το συνολικό εμβαδόν του οπλισμού σε μια διατομή
- σ_s είναι η αναπτυσσόμενη τάση του οπλισμού στη δεδομένη διατομή
- E_s είναι το μέτρο ελαστικότητας που λαμβάνεται σταθερό και ίσο με 200.000 MPa
- f_y και ε_y η τάση και η παραμόρφωση διαρροής αντίστοιχα, και
- f_u και ε_u η τάση και η παραμόρφωση αστοχίας

Το **Διάγραμμα 2.3** και το **Διάγραμμα 2.4** απεικονίζουν τη μεταβολή της τάσης συναρτήσει της παραμόρφωσης του συμβατικού χάλυβα οπλισμού υπό μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση αντίστοιχα. Υπο ανακυκλιζόμενη ένταση παρατηρείται το φαινόμενο Bauschinger (καμπύλωση του διαγράμματος μετά την πρώτη διαρροή) και η κλίση γίνεται πολύ μικρή με κίνδυνο το λυγισμό των θλιβόμενων ράβδων οπλισμού.



Διάγραμμα 2.3 Εξειδανικευμένο διάγραμμα και διάγραμμα σχεδιασμού τάσης-παραμόρφωσης για το χάλυβα υπό θλίψη και εφελκυσμό (EC2)



Διάγραμμα 2.4 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση (M.N.Fardis, Seismic Design, Assessment and Retrofitting of Concrete Buildings)

2.2.3 Παραδοχές για κάμψη ορθογωνικής διατομής με ή χωρίς αξονική δύναμη

1. Η διατομή παραμένει επίπεδη μέχρι την αστοχία (και κάθετη στον παραμορφωμένο άξονα του στοιχείου). $\rightarrow x = d \frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{c2} + \varepsilon_{s1}}$
2. Κοινές ανηγμένες παραμορφώσεις σκυροδέματος και χάλυβα που βρίσκονται στην ίδια στάθμη: $\varepsilon_{ci} = \varepsilon_{si}$,
3. Αγνοείται η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος $f_{ct} = 0$
4. Οι τάσεις του θλιβόμενου σκυροδέματος υπολογίζονται βάσει των σχέσεων τάσης-παραμόρφωσης. Χρησιμοποιούμε το παραβολικό-ορθογωνικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων σκυροδέματος για τις επιλύσεις των εξισώσεων ισοδυναμίας. Αποδεικνύεται ότι για $\varepsilon_{c2} = -3.5\%$ η θέση της συνισταμένης θλιπτικής δύναμης είναι $a = 0.416 \cdot x$, και η μέση τάση σκυροδέματος προκύπτει $f_{cm} = 0.81 f_{cd}$. Η μέγιστη παραμόρφωση του σκυροδέματος λαμβάνεται ίση με ε_{cu2} ή $\varepsilon_{cu2,c}$, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, (**Διάγραμμα 2.1** ή **Διάγραμμα 2.2**). Σημειώνεται πως για το περισφιγμένο σκυρόδεμα ο συντελεστής πλήρωσης α εξαρτάται από το βαθμό αποφλοιώσης του απερίσφιγτου μέρους της διατομής, καθώς και από την παραμόρφωση του περισφιγμένου σκυροδέματος στο συγκεκριμένο στάδιο (διαρροή, αστοχία).
6. Για χάλυβα με κράτυνση (κεκλιμένος μετελαστικός κλάδος) λαμβάνεται όριο παραμόρφωσης ε_{ud} .

Εξισώσεις ισοδυναμίας εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων

Για θετικό πρόσημο θλίψης και μηδενική δρώσα αξονική δύναμη ($N_{sd} = 0 \rightarrow v_d = 0$):

$$N_{\varepsilon_s} = N_{\varepsilon_s'} \rightarrow F_c + \sum F_{S, \theta \lambda \iota \beta \acute{o} \mu \epsilon \nu \omicron \iota} - \sum F_{S, \varepsilon \varphi \epsilon \lambda \kappa \upsilon \acute{o} \mu \epsilon \nu \omicron \iota} = 0 \quad (2.15)$$

$$M_{\varepsilon_s} = M_{\varepsilon_s'} \rightarrow M_d = F_c (d - a') + \sum F_{S,i} (d - d_i) - \sum F_{S,j} (d - d_j) \quad (2.16)$$

Για ορθογωνικό-παραβολικό διάγραμμα:

$$\bullet \quad a' = \zeta' \cdot x \quad (2.17)$$

$$\bullet \quad \zeta' = 8 - \frac{\varepsilon_{c2}}{[4(6 - \varepsilon_{c2})]} \quad \text{για } \varepsilon_{c2} \leq 2\% \text{ και } \zeta' = 0,416 \quad \text{για } \varepsilon_{c2} = 3,5\% \quad (2.18\alpha)$$

$$\bullet \quad \zeta' = \frac{\varepsilon_{c2}(3\varepsilon_{c2} - 4) + 2}{2\varepsilon_{c2}(3\varepsilon_{c2} - 2)} \quad \text{για } 2\% < \varepsilon_{c2} < 3,5\% \quad (2.18\beta)$$

2.2.4 Διάτμηση

Ο υπολογισμός αντοχής σε τέμνουσα στοιχείου ωπλισμένου σκυροδέματος κατά τον Ευρωκώδικα 2 περιλαμβάνει τους εξής μηχανισμούς:

- $V_{Rd,c}$: αντοχή σε τέμνουσα στοιχείων χωρίς οπλισμό διάτμησης.

- $V_{Rd,s}$: η τέμνουσα που μπορεί να αναληφθεί από τον οπλισμό διάτμησης (συνδετήρες) τη στιγμή της διαρροής του.

- $V_{Rd,max}$: η μέγιστη τέμνουσα που μπορεί να αναληφθεί από το στοιχείο, όπως καθορίζεται από τη συντριβή των λοξών θλιπτήρων.

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται οι αλλαγές που έγιναν από τους Ευρωκώδικες στους συμβολισμούς σε σχέση με τον Ελληνικό Κανονισμό Ωπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΚΩΣ) που ήταν ο κυρίως χρησιμοποιούμενος Κανονισμός μέχρι πρόσφατα.

Πίνακας 2.5 Μεγέθη που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της αντοχής σε διάτμηση, όπως τροποποιήθηκαν από τους Ευρωκώδικες

| Μέγεθος | Σύμβολο | |
|----------------------------------|--------------|-----------|
| | EC2 | ΕΚΩΣ |
| Δρώσα τέμνουσα | V_{Ed} | V_{Sd} |
| Τέμνουσα Αντοχής άοπλου σκυρ/τος | $V_{Rd,c}$ | V_{Rd1} |
| Τέμνουσα συνδετήρων | $V_{Rd,s}$ | V_{wd} |
| Μέγιστη τέμνουσα | $V_{Rd,max}$ | V_{Rd2} |

Η τέμνουσα για την οποία δεν απαιτείται οπλισμός διάτμησης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d \quad (2.19)$$

όπου:

- f_{ck} σε MPa
- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$ (d σε mm)
- $\rho_1 = \frac{A_{s1}}{bd} < 0,02\alpha$
- A_{s1} είναι το εμβαδόν του εφελκόμενου οπλισμού που εκτείνεται σε απόσταση μεγαλύτερη από $(l_{bd}+d)$ πέρα από τη θεωρούμενη διατομή (δηλαδή είναι ο οπλισμός ο οποίος διαπερνά τη ρωγμή η οποία ξεκινά από την εξεταζόμενη θέση και είναι καλά αγκυρωμένος πέραν της ρωγμής)

- b_w είναι το ελάχιστο πλάτος της διατομής στην εφελκόμενη ζώνη (mm)
- $\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2f_{cd}$ (MPa)
- N_{Ed} είναι η αξονική δύναμη στη διατομή (σε N, $N_{Ed} > 0$ για θλίψη). Η επιρροή των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων αγνοείται.
- $A_c = b_w d$ είναι το εμβαδόν της διατομής σκυροδέματος μέχρι τον ακραίο εφελκόμενο οπλισμό (mm^2)
- $V_{Rd,c}$ (σε N)
- $C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_c = 0,18/1$
- $k_1 = 0,15$
- $C_{Rd,c} k [100\rho_1 f_{ck}]^{1/3} \geq v_{min} = 0,035 k^2 f_{ck}^{1/2}$

Για τα στοιχεία για τα οποία απαιτείται οπλισμός διάτμησης ($V_{Ed} > V_{Rd,c}$), ο σχεδιασμός βασίζεται σε ένα γενικευμένο δικτύωμα Moersch:

- με θλιβόμενες ράβδους σκυροδέματος (γωνία κλίσεως θ : $21,8^\circ < \theta < 45^\circ$), η αντοχή των οποίων, $V_{Rd,max}$, καθορίζει την επάρκεια της διατομής (αλλιώς απαιτείται να αλλάξουμε διαστάσεις).
- με εφελκόμενες ράβδους χάλυβα (γωνία κλίσεως α : $45^\circ < \alpha < 90^\circ$), η αντοχή των οποίων, $V_{Rd,s}$, προσδιορίζει τον απαιτούμενο οπλισμό διάτμησης.

Οι αντίστοιχες τέμνουσες δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$V_{Rd,max} = a_{cw} b_w z v_1 f_{cd} (\cot\theta + \cot\alpha) / (1 + \cot^2\theta) \quad (2.20)$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} (\cot\theta + \cot\alpha) \sin\alpha \quad (2.21)$$

όπου:

- $a_{cw} = 1$ για τα μη προεντεταμένα στοιχεία
- s η απόσταση των συνδετήρων κατά μήκος του στοιχείου
- A_{sw} το συνολικό εμβαδόν των σκελών του συνδετήρα
- $z = 0,9d$ ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων, εφόσον δεν έχει προηγηθεί ακριβής υπολογισμός
- v_1 ο μειωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη μείωση της θλιπτικής αντοχής λόγω της ετερόσημης διαξονικής εντάσεως που επικρατεί στο σκυρόδεμα και μπορεί να λαμβάνεται ίσος με: $v_1 = v = 0,6(1 - f_{ck}/250)$ (f_{ck} σε MPa)

Η εκτίμηση των ακραίων τιμών των αντοχών πραγματοποιείται για τιμές γωνίας κλίσεως των θλιβόμενων ράβδων του σκυροδέματος $21,8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ και για γωνία κλίσης των εφελκόμενων ράβδων χάλυβα $\alpha = 90^\circ$. Έτσι οι εξισώσεις (2.20), (2.21) μετασχηματίζονται ως εξής:

$$V_{Rd,max} = a_{cw} b_w z v_1 f_{cd} / (\cot\theta + \tan\theta) \quad (2.22)$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot\theta \quad (2.23)$$

2.3 Ευρωκώδικας 8 - Μέρος 3 (EC8 - Part 3)

Η γενική φιλοσοφία στην οποία βασίζεται ο Ευρωκώδικας 8 (όπως και όλοι οι υπόλοιποι Ευρωκώδικες), αφορά στον οικονομικό σχεδιασμό των κατασκευών με ταυτόχρονη εξασφάλιση της απαιτούμενης ελάχιστης αντοχής έναντι των αναμενόμενων σεισμικών φορτίσεων. Από τη σύγκριση του κώδικα αυτού με τους Εθνικούς Κανονισμούς, προκύπτει ότι σε κάποια σημεία ο ΕΚ8 είναι αυστηρότερος και σε άλλα σημεία ευμενέστερος. Ο αντισεισμικός σχεδιασμός νέων φορέων βασίζεται σε έναν συγκεκριμένο *επιτρεπόμενο βαθμό βλάβης* του φορέα (σχεδιασμός και επεμβάσεις με βάση τις *στάθμες επιτελεστικότητας*) στην περίπτωση του σεισμού σχεδιασμού. Αντανακλώντας τις βασικές απαιτήσεις του EN 1998-1:2004, ο παρών Κανονισμός καλύπτει την σεισμική *αποτίμηση* της φέρουσας ικανότητας και την *ενίσχυση* κτηρίων κατασκευασμένων από τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα δομικά υλικά: το σκυρόδεμα, τον χάλυβα και την τοιχοποιία.

2.3.1 Προσομοίωμα περίσφιγξης

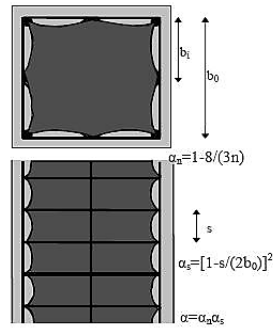
Στο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος παρατηρείται αφενός μεν αύξηση της μέγιστης τάσεως που μπορεί να αναπτυχθεί (από f_c γίνεται $f_{c,conf}$ ή f_{cc}) αλλά κυρίως αύξηση της μέγιστης παραμόρφωσης αστοχίας του σκυροδέματος (από ϵ_{cu} γίνεται $\epsilon_{cu,conf}$ ή ϵ_{cc}). Ο βαθμός περίσφιγξης του σκυροδέματος μετριέται από την ποσότητα $\alpha \cdot \omega_w$ όπου:

- ω_w είναι το μηχανικό-ογκομετρικό ποσοστό των συνδετήρων:

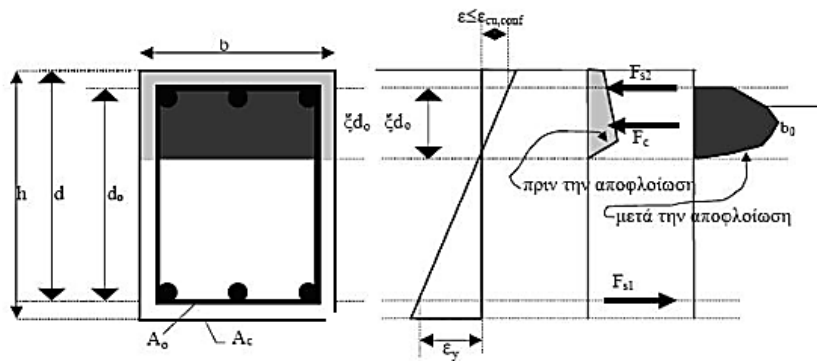
$$\omega_{wd} = \frac{\text{volume of confining hoops (όγκος των βρόχων περίσφιγξης)}}{\text{volume of concrete core (όγκος του περισφιγμένου πυρήνα)}} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}}$$

- α είναι ο συντελεστής αποδόσεως της περισφίξεως ($= \alpha_n \cdot \alpha_s$)
- α_n είναι ο συντελεστής που λαβαίνει υπόψη του το πλήθος των γωνιών των συνδετήρων στην διατομή
- α_s συντελεστής που λαβαίνει υπόψη του την απόσταση των συνδετήρων καθ' ύψος.

Στο **Σχήμα 2.6**, με σκούρο γκρι δείχνεται η περισφιγμένη περιοχή του σκυροδέματος και φαίνεται η επίδραση της πυκνότητας διάταξης των συνδετήρων περίσφιγξης στην απόδοσή της.

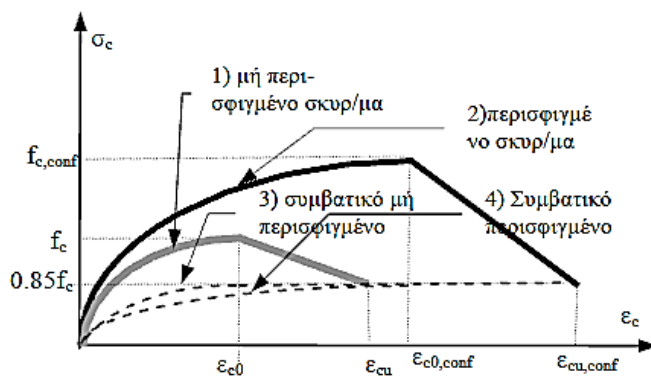


Σχήμα 2.6 Περισφιγμένη περιοχή διατομής και συνδεδητές περίσφιγξης (Τρέζος Κ., 2012)



Σχήμα 2.7 Κατανομή τάσεων και παραμορφώσεων για σκυρόδεμα πριν και μετά την αποφλοίωση της επικάλυψης (Τρέζος Κ., 2012)

Σε περίπτωση μεγάλης έντασης, δηλαδή για $\epsilon_c > 3,5\%$, παρατηρείται αποφλοίωση, καθώς η επικάλυψη ($h-d$) δεν είναι περισφιγμένη (Σχήμα 2.7).



Διάγραμμα 2.8 Τάσεις και παραμορφώσεις περισφιγμένου και απερίσφιγτου σκυροδέματος υπό μονοτονική φόρτιση (Τρέζος Κ., 2012)

Όπως φαίνεται από το παραπάνω Διάγραμμα 2.8, η περίσφιγξη έχει συνέπεια η καμπύλη από τη μορφή 1 να πηγαίνει στη μορφή της καμπύλης 2 και κατά συνέπεια

έχει συνέπεια την σημαντική αύξηση της παραμόρφωσης αστοχίας του σκυροδέματος, άρα και της πλαστιμότητας.

Η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος κατά EC8-Part 3 υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$f_{cc} = f_c \left[1 + 3,7 \left(\frac{\alpha \rho_{sx} f_{yw}}{f_c} \right)^{0,86} \right] \quad (2.24)$$

όπου:

- f_c η αντοχή του απερίσφιγτου σκυροδέματος
- α ο συντελεστής απόδοσης της περίσφιγξης
- ρ_{sx} το γεωμετρικό ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού περίσφιγξης
- f_{yw} η τάση διαρροής του εγκάρσιου αυτού οπλισμού

Η ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην αντοχή f_{cc} θεωρείται ότι αυξάνει πάνω από την τιμή ε_{c2} του μη περισφιγμένου σκυροδέματος ως εξής:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c2} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_c} - 1 \right) \right] \quad (2.25)$$

και η οριακή ανηγμένη παραμόρφωση της ακραίας ίνας της θλιβόμενης ζώνης λαμβάνεται ως:

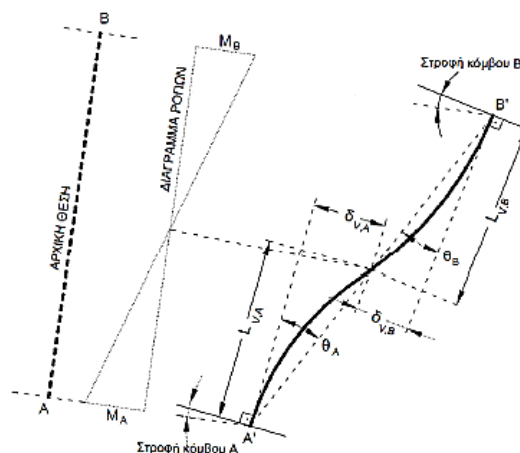
$$\varepsilon_{cu} = 0,004 + 0,5 \frac{\alpha \rho_{sx} f_{yw}}{f_{cc}} \quad (2.26)$$

Το προσομοίωμα αυτό υιοθέτησε ο EC8 από τους Newman και Newman (1971).

Για το μη περισφιγμένο σκυρόδεμα και τον χάλυβα υπό ορθή ένταση ισχύουν οι παραδοχές των παραγράφων 2.2.1, 2.2.2.A, 2.2.3.

2.3.2 Γωνία στροφής χορδής θ

Η ικανότητα παραμόρφωσης των τοιχίων ορίζεται σε όρους στροφής χορδής θ , δηλ. της γωνίας μεταξύ της εφαπτομένης στον άξονα στο άκρο υπό διαρροή και της χορδής που συνδέει το άκρο αυτό με το άκρο του ανοίγματος διάτμησης ($L_v = M/V =$ ροπή / τέμνουσα στην ακραία διατομή), δηλαδή το σημείο μηδενισμού των ροπών. Η στροφή χορδής είναι επίσης ίση με τον λόγο της σχετικής παραμόρφωσης του στοιχείου, δηλαδή της κάθετης παραμόρφωσης στο άκρο του ανοίγματος διάτμησης ως προς την εφαπτομένη στον άξονα στο άκρο υπό διαρροή, δια του ανοίγματος διάτμησης.



Σχήμα 2.9 Γωνία στροφής χορδής, θ (Ψυχάρης Γ.Ν., 2010)

2.3.3 Καμπύλη ικανότητας ή αντίστασης, F- δ (Capacity Curve)

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 - Μέρος 3 η πραγματική καμπύλη συμπεριφοράς ενός δομήματος προσεγγίζεται μέσω ενός πολυγραμμικού διαγράμματος με τον ελαστικό κλάδο να παρακάμπτει την ρηγματώση και να εκτείνεται από την αρχή των αξόνων μέχρι την διαρροή του στοιχείου, μετά την οποία η καμπύλη μπορεί να λαμβάνεται περίπου οριζόντια.

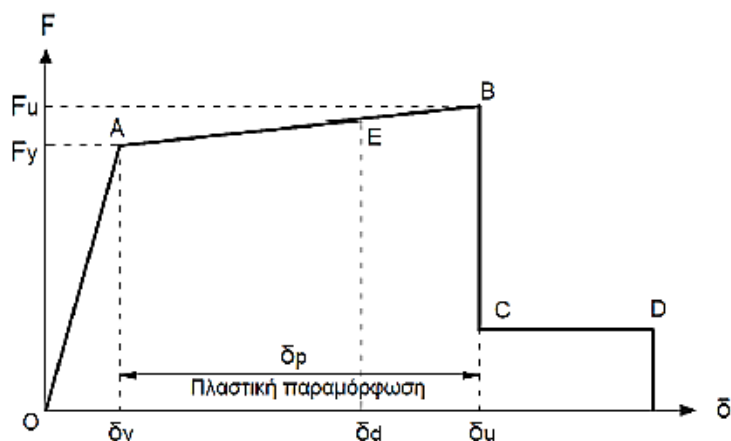
Στα στοιχεία Ω.Σ. οι καμπτικές και διατμητικές παραμορφώσεις είναι αλληλένδετες, ωστόσο οι στροφή μιας ακραίας διατομής του στοιχείου επηρεάζεται και από την εξόλκευση των οπλισμών στις αγκυρώσεις.

Η ελαστική (ή επαπτομενική) δυσκαμψία, EI (tangential stiffness), πρέπει να αντιστοιχεί σε αυτή των ρηγματωμένων διατομών, καθώς με βάση τους σύγχρονους κανονισμούς τα στοιχεία σχεδιάζονται ώστε να ρηγματώνονται σε φάση λειτουργίας. Κατά συνέπεια η δυσκαμψία ακόμα και στην ελαστική περιοχή μεταβάλλεται καθώς το σκυρόδεμα υφίσταται μονοτόνως αύξουσες καμπτικές παραμορφώσεις. Είναι προφανές λοιπόν ότι κανονικά θα έπρεπε να λαμβάνεται υπόψη η ροπή αδράνειας αρκετών διατομών κατά μήκος του στοιχείου, κάτι το οποίο θα ήταν χρονοβόρο και δευτερεύουσας σημασίας, καθώς η εκτίμηση της μη γραμμικής ανακυκλιζόμενης απόκρισης δεν επηρεάζεται από το αν ο προ της διαρροής κλάδος θεωρείται ευθύγραμμος ή τεθλασμένος. Έτσι εισάγεται μια μέση τιμή δυσκαμψίας, η ενεργός δυσκαμψία μέχρι τη διαρροή, η οποία ορίζεται ως:

$$EI_{eff} = \frac{M_y L_v}{3 \theta_y} \quad (2.27)$$

Η ροπή διαρροής M_y μπορεί να λαμβάνεται ίση με τη ροπή διαρροής ή με την οριακή ροπή M_u του διαγράμματος $M-\theta$ του μήκους διάτμησης L_v , όπου L_v είναι ο λόγος M/V στην ακραία διατομή του στοιχείου (σημείο μηδενισμού των ροπών, εν προκειμένω για τοιχία είναι όλο το μήκος τους εφόσον στατικά λαμβάνονται ως

πρόβολοι), και, τέλος η γωνία στροφής θ_y πρέπει να λαμβάνει υπόψη όλες τις παραμορφώσεις (καμπτικές, διατμητικές, λόγω εξόλκευσης οπλισμών). Ο EC8 γενικώς απαιτεί να λαμβάνεται υπόψη η επιρροή της ρηγμάτωσης που αντιστοιχεί στην αρχή της διαρροής του οπλισμού κατα το σεισμικό σχεδιασμό και επιτρέπει η ενεργός αυτή δυσκαμψία να λαμβάνεται προσεγγιστικά ίση με το 50% της αρηγμάτωτης.



Διάγραμμα 2.10 Ιδεατή καμπύλη F-δ (Ψυχάρης Γ.Ν., 2010)

ΤΜΗΜΑ ΟΑ

Αντιπροσωπεύει τον ελαστικό κλάδο μέχρι το θεωρητικό σημείο διαρροής. Η κλίση της ευθείας ορίζει την τέμνουσα δυσκαμψία της ελαστικής ανάλυσης. Εάν η παραμόρφωση δίνεται σε όρους στροφής χορδής, δηλαδή αν $\delta_y = \theta_y$, η στροφή διαρροής θα πρέπει να υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο την καμπυλότητα διαρροής λόγω κάμψης, αλλά και τη συμμετοχή των διατμητικών παραμορφώσεων και την πιθανότητα ολίσθησης των οπλισμών πέραν της αγκύρωσης. Στον EC8 δίνονται σχέσεις για τον υπολογισμό της θ_y λαμβάνοντας υπόψη όλα αυτά τα φαινόμενα που αντιστοιχούν σε κριτήριο ελέγχου στάθμης «ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΒΛΑΒΩΝ» (DL).

Για τοιχώματα ορθογωνικής διατομής η θεωρητική γωνία στροφής χορδής μέλους στη διαρροή είναι:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_v + a_v z}{3} + 0,0013 + \varphi_y \frac{a_b f_y}{8\sqrt{f_c}} \quad (2.28)$$

όπου :

- φ_y είναι η καμπυλότητα διαρροής της ακραίας διατομής
- a_{vz} εκφράζει το μήκος μετατόπισης του διαγράμματος ροπών κάμψης λόγω λοξής ρηγμάτωσης, ως z ορίζεται ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων και ισούται με $0,8h$ για τοιχώματα ορθογωνικής διατομής και

γωνία ρηγμάτωσης 45° και ο συντελεστής α_v ισούται με 1 αν η τέμνουσα που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση υπολείπεται της τιμής τέμνουσας κατά την καμπτική διαρροή, και με 0 εάν είναι μεγαλύτερη σύμφωνα με το EN 1992-2-2:2004 6.2.2(1).

- d_b είναι η μέση διάμετρος του εφελκόμενου οπλισμού
- f_y και f_c είναι η τάση διαρροής του χάλυβα και του σκυροδέματος αντίστοιχα

Στην παραπάνω εξίσωση ο πρώτος όρος εκφράζει τη συνεισφορά της κάμψης, ο δεύτερος της διάτμησης και ο τρίτος της εκφράζει την επιρροή της εξόλκευσης του οπλισμού του άκρου. Η μεταφορά δυνάμεων ενός μέλους γίνεται μέσω των τριών αυτών μηχανισμών, οι οποίοι για λυγηρά μέλη θεωρείται ότι δρουν εν σειρά.

Εναλλακτικά ο EC8 προτείνει την εξίσωση:

$$\theta_y = \varphi_y \frac{(L_s + a_v z)}{3} + 0,0013 + \frac{d_b f_y \varepsilon_y}{(a - a') 6 \sqrt{f_c}} \quad (2.29)$$

Σημειώνεται πως οι παραπάνω σχέσεις που δίνουν την παραμόρφωση ενός μέλους στη διαρροή του, νοούν ως διαρροή τη διαρροή σε κάμψη, δηλαδή ο μηχανισμός μεταφοράς μέσω κάμψης έχει μικρότερη αντοχή από τους μηχανισμούς της διάτμησης και της μεταφοράς των τάσεων του διαμήκους οπλισμού στην περιοχή της αγκύρωσης. Αυτό συνεπάγεται ότι για μέλη που έχουν καμπτοδιατμητική ή διατμητική συμπεριφορά οι σχέσεις αυτές ίσως να μην δίνουν ακριβή αποτελέσματα, ακόμη περισσότερο δε στην περιγραφή των παραμορφώσεων αστοχίας, όπως θα δούμε παρακάτω.

ΣΗΜΕΙΟ E

Στην καμπύλη αντίστασης οι στάθμες επιτελεστικότητας ορίζονται με βάση τις αντίστοιχες παραμορφώσεις σχεδιασμού, δ_u . Το σημείο E αντιστοιχεί στη στάθμη επιτελεστικότητας «ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΒΛΑΒΕΣ» (SD) και η ικανότητα στροφής θ_{sd} λαμβάνεται ίση με το 0,75 της οριακής γωνίας στροφής θ_u .

ΤΜΗΜΑ AB

Αναπαριστά τη μετελαστική συμπεριφορά του στοιχείου μέχρι το σημείο της θεωρητικής αστοχίας (B). Το σημείο B ορίζεται από την οριακή παραμόρφωση αστοχίας δ_u ή της οριακής γωνίας στροφής θ_u , δηλαδή την παραμόρφωση ή στροφή στην οποία έχει επέλθει σημαντική απομείωση της αρχικής αντοχής. Η απομείωση αυτή κατά τον EC8 λαμβάνεται περίπου ίση με το 20% της μέγιστης τιμής. Πολλές φορές και σε άλλους κανονισμούς όπως ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. η κλίση του κλάδου AB λαμβάνεται οριζόντια και η διαρροή ταυτίζεται με την οριακή αντοχή σε όρους δυνάμεων ή ροπών. Ακόμη, η οριακή παραμόρφωση καθορίζει και την ικανότητα του στοιχείου για πλαστική παραμόρφωση δ_p , η οποία ορίζεται ως η διαφορά $\delta_u - \delta_y$.

Οριακή κατάσταση «ΟΙΟΝΕΙ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ» (NC)

Η οριακή τιμή της συνολικής ικανότητας στροφής της χορδής στην *καμπτική αστοχία* (ελαστικό συν ανελαστικό μέρος), θ_u , μελών από σκυρόδεμα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση μπορεί να υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} 0,016 (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01;\omega')}{\max(0,01;\omega)} f_c \right]^{0,225} \min \left(9; \frac{L_v}{h} \right)^{0,35} 25^{(a\rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c})} (1,25^{100\rho_d}) \quad (2.30)$$

όπου:

- $L_v = M/V$ το μήκος διάτμησης
- ω το μηχανικό ποσοστό εφελκόμενου οπλισμού (περιλαμβάνει τον τυχόν διαμήκη οπλισμό κορμού μεταξύ εφελκόμενου και θλιβόμενου πέλματος)
- ω' το μηχανικό ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού
- $v = N/b \cdot h \cdot f_c$ το ανηγμένο στη διατομή θλιβόμενης ζώνης b αξονικό φορτίο
- $\rho_s = \frac{A_{sx}}{b_w s_h}$ το γεωμετρικό ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού παράλληλα στη διεύθυνση της φόρτισης
- α είναι ο συντελεστής αποδοτικότητας περίσφιξης

$$\alpha = \left(1 - \frac{s_h}{2 b_c} \right) \left(1 - \frac{s_h}{2 h_c} \right) \left(1 - \frac{\sum b_i^2}{6 h_c b_c} \right) \quad (2.31)$$

όπου b_c και h_c οι διαστάσεις του περισφιγμένου πυρήνα, s_h η απόσταση των συνδετήρων και b_i οι αποστάσεις μεταξύ διαμήκων ράβδων που συγκρατούνται από συνδετήρα στην περίμετρο της διατομής.

- f_{yw} η τάση διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού
- ρ_d το γεωμετρικό ποσοστό δισδιαγώνιου οπλισμού

Για τους τοίχους οι τιμές που δίδονται από την έκφραση (2.30) πολλαπλασιάζονται επί 0,58.

Η τιμή του πλαστικού μέρους της ικανότητας στροφής της χορδής του μέλους από σκυρόδεμα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση υπολογίζεται:

$$\theta_{um}^{pl} = \theta_{um} - \theta_y = \frac{1}{\gamma_{el}} 0,0145 (0,25^v) \left[\frac{\max(0,01;\omega')}{\max(0,01;\omega)} \right]^{0,3} f_c^{0,2} \min \left(9; \frac{L_v}{h} \right)^{0,35} 25^{(a\rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c})} (1,275^{100\rho_d}) \quad (2.32)$$

Το γ_{el} ισούται με 1,8 για τα κύρια σεισμικά στοιχεία και με 1,0 για τα δευτερεύοντα σεισμικά στοιχεία και όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές ορίζονται όπως για την έκφραση (2.30). Εάν χρησιμοποιηθεί εν ψυχρώ κατεργασμένος ψαθυρός χάλυβας, το πλαστικό μέρος της ικανότητας στροφής της χορδής διαιρείται δια του 2.

Σε μέλη χωρίς τις διαμορφώσεις λεπτομερειών που προβλέπονται για αντοχή σε σεισμούς οι τιμές που δίδονται στις σχέσεις (2.30) και (2.32) διαιρούνται με 1,2, και ο συντελεστής περισφιγξης α λαμβάνεται ίσος με 0.

Μήκος Πλαστικής Άρθρωσης (L_{pl})

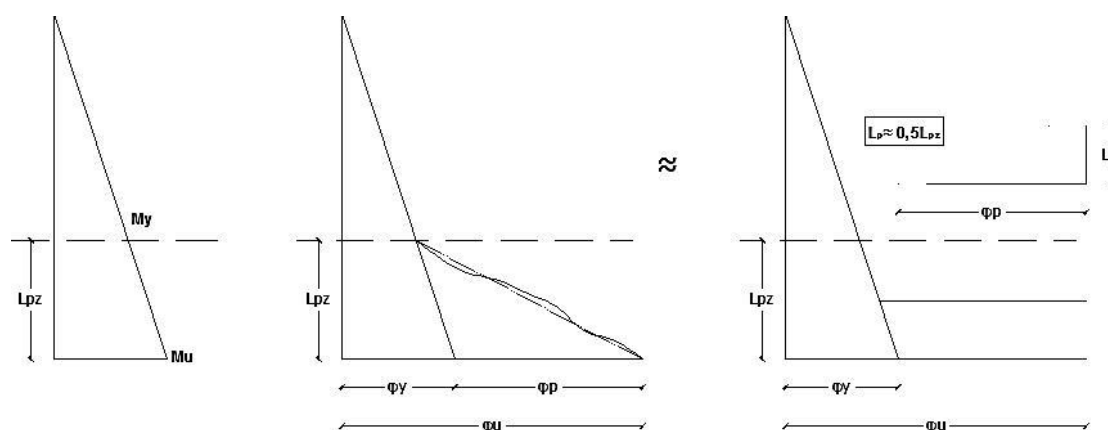
Η οριακή γωνία στροφής για στοιχεία που διαμορφώνουν οπλισμό περισφιγξης εκτιμάται αρκετά συχνά με βάση την καμπυλότητα αστοχίας και το μήκος πλαστικής άρθρωσης, L_{pl} . Το μήκος πλαστικής άρθρωσης μπορεί να οριστεί θεωρώντας ότι στο μήκος πλαστικοποίησης του εφελκυόμενου οπλισμού (L_{pz}) στο άκρο της βάσης, που εξαρτάται από το λόγο της ροπής διαρροής προς τη ροπή αστοχίας, το πλαστικό τμήμα της καμπυλότητας, ϕ_p , είναι σταθερό και ίσο με την τιμή του στο άκρο.

Δηλαδή, το κατά προσέγγιση τριγωνικό διάγραμμα μεταβολής του πλαστικού τμήματος της καμπυλότητας στο πλαστικοποιημένο τμήμα του μέλους αντικαθίσταται με ένα ορθογωνικό ίσου εμβαδού, $\{(1/r)_u - (1/r)_y\} \cdot L_{pl}$. Με αυτό τον τρόπο το πλαστικοποιημένο τμήμα του μέλους προσομοιώνεται με μία άρθρωση στο μέσον του μήκους πλαστικής άρθρωσης και γίνεται η παραδοχή ότι στην πλαστική αυτή «άρθρωση» αναπτύσσεται η οριακή γωνία στροφής $\theta = E_{ισ} = \{(1/r)_u - (1/r)_y\} \cdot L_{pl}$.

Αυτή η πλαστική γωνία στροφής προστίθεται στην ελαστική γωνία στροφής λόγω κάμψης. Έτσι, ο EC8 παραθέτει την παρακάτω εξίσωση για τον υπολογισμό της οριακής ικανότητας στροφής χορδής:

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} \left\{ \theta_y + \left[\left(\frac{1}{r} \right)_u - \left(\frac{1}{r} \right)_y \right] L_{pl} \left[1 - \frac{(0,5L_{pl})}{L_S} \right] \right\} \quad (2.33)$$

Η παραμόρφωση στην αστοχία προσδιορίζεται συμβατικά ως το σημείο μετά τη μέγιστη αντοχή όπου η επιβαλλόμενη μετακίνηση δεν μπορεί να αυξήσει την αντίστασή πάνω από το 80% της μέγιστης. Η γωνία στροφής χορδής που αντιστοιχεί σ' αυτή την μετακίνηση απαιτεί τον υπολογισμό της καμπυλότητας αστοχίας στο ίδιο σημείο. Η γωνία στροφής χορδής κατά τη διαρροή θ_y υπολογίζεται κατά τις σχέσεις (2.28) ή (2.29). Η καμπυλότητα διαρροής, μπορεί να υπολογίζεται κατά τις σχέσεις (2.39) ή (2.40) των Panagiotakos και Fardis [2001] που ενσωματώθηκαν στον ΚΑΝ.ΕΠΕ όπως περιγράφονται στην επόμενη Παράγραφο, **2.4.3**. Η καμπυλότητα αστοχίας μπορεί συμβατικά να υπολογίζεται από την Παράγραφο **2.4.4**.



Σχήμα 2.11 Μήκος πλαστικής άρθρωσης στην πλαστικοποιημένη περιοχή

Όπως φαίνεται από το **Σχήμα 2.11** η καμπυλότητα στη διαρροή, ϕ_y , στατικού συστήματος προβόλου, κατ' αναλογία με τις ροπές κάμψης μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει γραμμική κατανομή (τριγωνική). Το μέλος δηλαδή λαμβάνεται ως ρηγματωμένο σ' όλο το μήκος διάτμησης και *αγνοείται η συμβολή στη δυσκαμψία των εφελκυστικών τάσεων σκυροδέματος μεταξύ των ρωγμών*. Στην πραγματικότητα όμως λόγω ρηγμάτωσης η κατανομή της καμπυλότητας είναι έντονα μη γραμμική στις περιοχές ανοίγματος ρωγμών.

Κατά EC8 - Part 3, η τιμή του μήκους L_{pl} της πλαστικής άρθρωσης εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη η ενίσχυση της αντοχής και της ικανότητας παραμόρφωσης του σκυροδέματος, η οποία οφείλεται στην *περίσφιγξη*, κατά τον υπολογισμό της *οριακής καμπυλότητας* της ακραίας διατομής, ϕ_u .

Α. Εάν η οριακή καμπυλότητα της ακραίας διατομής ϕ_u υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση υπολογίζεται με:

α) την οριακή ανηγμένη παραμόρφωση του διαμήκους σπλισμού, ϵ_{su} να ισούται με:

- τις ελάχιστες τιμές που δίδονται στον EN 1992-1-1, Πίνακας C.1 για την χαρακτηριστική ανηγμένη παραμόρφωση υπό μέγιστη δύναμη, ϵ_{uk} , για τις κατηγορίες χάλυβα A ή B,

- 6% για την κατηγορία χάλυβα C, και

β) το προσομοίωμα περίσφιγξης στο EN 1992-1-1:2004, 3.1.9, (βλέπε και παρ. 2.2.1.B) με την ενεργή πλευρική τάση περίσφιγξης σ_2 , να λαμβάνεται ίση με $\alpha \rho_{sx} f_{yw}$, όπως τα α , ρ_{sx} και f_{yw} ορίζονται στις (2.28), (2.29) τότε, για μέλη με διαμόρφωση λεπτομέρειών για αντοχή σε σεισμό και χωρίς παραθέσεις των διαμήκων ράβδων που βρίσκονται κοντά στη διατομή, στην οποία αναμένεται διαρροή, το L_{pl} μπορεί να υπολογίζεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$L_{pl} = 0,1L_V + 0,17h + 0,24 \frac{d_{bL}f_y (\text{MPa})}{\sqrt{f_c (\text{MPa})}} \quad (2.34)$$

όπου h είναι το ύψος του μέλους και d_{bL} είναι η (μέση) διάμετρος του εφελκόμενου οπλισμού.

B. Εάν η οριακή καμπυλότητα της ακραίας διατομής, ϕ_u , υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση υπολογίζεται με:

α) την οριακή ανηγμένη παραμόρφωση του διαμήκους οπλισμού, ε_{su} , να λαμβάνεται όπως στο A.(α), και

β) το προσομοίωμα περίσφιγξης που δίνεται από τις σχέσεις (2.24) έως (2.26) το οποίο αντιπροσωπεύει καλύτερα από το προσομοίωμα στον EN 1992-1-1:2004, 3.1.9 την βελτίωση του ϕ_u για περίσφιγξη υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, τότε, για μέλη με διαμόρφωση λεπτομέρειών για αντοχή σε σεισμό και χωρίς υπερκάλυψη των διαμήκων ράβδων που βρίσκονται κοντά στη διατομή, στην οποία αναμένεται διαρροή, το L_{pl} μπορεί να υπολογίζεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$L_{pl} = \frac{L_V}{30} + 0,2h + 0,11 \frac{d_{bL}f_y (\text{MPa})}{\sqrt{f_c (\text{MPa})}} \quad (2.35)$$

Εάν το προσομοίωμα περίσφιγξης στον EN 1992-1-1:2004, 3.1.9, υιοθετείται στον υπολογισμό της οριακής καμπυλότητας της ακραίας διατομής, ϕ_u , και η τιμή του L_{pl} από την έκφραση (2.31) χρησιμοποιείται στην έκφραση (2.30), τότε ο εμπλεκόμενος για το σχεδιασμό συντελεστής γ_{el} μπορεί να ληφθεί ίσος με 2 για τα πρωτεύοντα σεισμικά στοιχεία και με 1,0 για τα δευτερεύοντα σεισμικά στοιχεία. Εάν αντί αυτού χρησιμοποιείται το προσομοίωμα περίσφιγξης το οποίο δίδεται από τις εκφράσεις (2.32) έως (2.34), μαζί με την έκφραση (2.35), τότε η τιμή του συντελεστή γ_{el} μπορεί να λαμβάνεται ως ίση με 1,7 για πρωτεύοντα σεισμικά στοιχεία και με 1,0 για δευτερεύοντα σεισμικά στοιχεία.

Η προτεινόμενη σχέση για το μήκος πλαστικής άρθρωσης που δίνεται από τον Θ.Ν. Σαλονικιό για τοιχώματα ([6], [12]) είναι:

$$L_{pl} = 0,044h + 0,014d_b f_y \quad (2.36)$$

όπου h το ύψος του τοιχίου, d_b η διάμετρος των διαμήκων ράβδων και f_y το όριο διαρροής τους.

Οι Pristley et al. [2007] [21] προτείνουν τη σχέση:

$$L_{pl} = k(L_{SS}) + 0,1lw + L_{SP} \geq 2L_{SP} \quad (2.37)$$

όπου:

$$k = 0,2 \left(\frac{f_u}{f_y} - 1 \right) \leq 0,08$$

$L_{SP} = 0,15 f_y d_b$ (f_y σε ksi, $1\text{MPa} = 0,145 \text{ ksi}$), L_v το μήκος διάτμησης.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, το μήκος πλαστικής άρθρωσης είναι συνάρτηση του προσομοιώματος περίσφιγξης που υιοθετείται κάθε φορά. Κατά συνέπεια, όπως υπάρχουν αποκλίσεις και διαφορετικές παραδοχές μεταξύ των διαφόρων προσομοιωμάτων περίσφιγξης που προτείνονται στη διεθνή βιβλιογραφία, έτσι υπάρχει και ανακρίβεια στον προσδιορισμό του μήκους πλαστικής άρθρωσης.

Στο Σχήμα 2.12 δίνονται ενδεικτικά οι αναμενόμενες βλάβες σε τοιχώματα για τις στάθμες επιτελεστικότητας Άμεση Χρήση, Περιορισμός Βλαβών, Προστασία Ζωής, Οιονεί Κατάρρευση που περιγράφηκαν παραπάνω.

| | | | | |
|-----------|---|---|--|--|
| Τοιχώματα | <p>Ασήμαντες διατμητικές ρηγματώσεις στο επίπεδο του τοιχώματος. Καθόλου ή πολύ μικρές ρηγματώσεις στη βάση του τοιχώματος.</p> <p>Καμμία μόνιμη παραμόρφωση.</p> <p>Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.</p> | <p>Ελάχιστες διατμητικές ρηγματώσεις στο επίπεδο του τοιχώματος. Καθόλου ή πολύ μικρές ρηγματώσεις στη βάση του τοιχώματος.</p> <p>Καμμία μόνιμη παραμόρφωση.</p> <p>Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.</p> | <p>Εκτεταμένες αποκολλήσεις του σκυροδέματος επικάλυψης και διατμητικές και καμπτικές ρηγματώσεις στη βάση του τοιχώματος. Ενδείξεις αστοχιών λόγω διατμητικής ολίσθησης.</p> <p>Δημιουργούνται μόνιμες οριζόντιες παραμορφώσεις που αντιστοιχούν σε οριζόντια παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) 2.0%, που μπορεί να είναι και οριακά μεγαλύτερες σε ορισμένες περιοχές.</p> <p>Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.</p> | <p>Εκτεταμένες αποκολλήσεις του σκυροδέματος επικάλυψης και διατμητικές και καμπτικές ρηγματώσεις σε όλο το ύψος του τοιχώματος και ειδικά στις περιοχές με τη μεγαλύτερη μόνιμη παραμόρφωση. Ενδείξεις λυγισμού διαμήκων ράβδων οπλισμού.</p> <p>Ενδείξεις αστοχιών λόγω διατμητικής ολίσθησης στις θέσεις των αρμών σκυροδέτησης και στη βάση του τοιχώματος.</p> <p>Δημιουργούνται μόνιμες οριζόντιες παραμορφώσεις που αντιστοιχούν σε οριζόντια παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) 3.5%, που μπορεί να είναι και οριακά μεγαλύτερες σε ορισμένες περιοχές.</p> <p>Η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων διατηρείται σχεδόν σε όλα τα τοιχώματα της</p> |
|-----------|---|---|--|--|

Σχήμα 2.12 Ενδεικτική περιγραφή αναμενόμενων βλαβών σε τοιχία από Ω.Σ. για τις στάθμες επιτελεστικότητας Άμεση Χρήση, Περιορισμός Βλαβών, Προστασία Ζωής, Οιονεί Κατάρρευση (ATC-40)

2.3.4 Διάτμηση (Οριακή Κατάσταση Οιονεί Κατάρρευσης)

Η διατμητική αντοχή υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση μειώνεται ανάλογα με το μέγεθος του πλαστικού τμήματος της απαιτούμενης γωνίας στροφής χορδής στη διατομή μέγιστης ροπής, το οποίο εκφράζεται σε όρους συντελεστή πλαστιμότητας της εγκάρσιας καμπτικής παραμόρφωσης του ανοίγματος διάτμησης ή της στροφής της χορδής στο άκρο του μέλους: $\mu_{\Delta}^{pl} = \mu_{\Delta} - 1$. Γι' αυτό το μ_{Δ}^{pl} μπορεί να υπολογίζεται ως

ο λόγος του πλαστικού μέρους της στροφής της χορδής, θ_{pl} , ανηγμένο στη στροφή της χορδής στη διαρροή, θ_y , υπολογισμένη σύμφωνα με τις σχέσεις (2.28) ή (2.29).

Η διατμητική αντοχή, λαμβάνοντας υπόψη αυτή την μείωση λόγω της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (μονάδες σε MN και m):

$$V_R = \frac{h-x}{2L_V} \min(N; 0,55A_c f_c) + [1 - 0,05 \min(5; \mu_{\Delta}^{pl})] [0,16 \max(0,5; 100\rho_{tot}) [1 - 0,16 \min(5; \frac{L_V}{h})] \sqrt{f_c} A_c + V_w] \quad (2.38)$$

όπου:

- h το ύψος της διατομής
- x το ύψος της θλιβόμενης ζώνης
- N είναι η θλιπτική αξονική δύναμη (θετική, λαμβάνεται ως μηδενική για εφελκυσμό)
- L_V το μήκος διάτμησης
- A_c είναι η επιφάνεια της διατομής, η οποία λαμβάνεται ίση με $b_w d$ για μια διατομή με ορθογωνικό κορμό πλάτους (πάχους) b_w και στατικού ύψους d
- f_c είναι θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (MPa)
- ρ_{tot} είναι το συνολικό ποσοστό του διαμήκους οπλισμού
- V_w είναι η συνεισφορά του εγκάρσιου οπλισμού στην διατμητική αντοχή, η οποία για διατομές με ορθογωνικό κορμό πλάτους b_w λαμβάνεται ως ίση με:

$$V_w = \rho_w b_w z f_{yw}$$

όπου:

- ρ_w είναι το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού
- z είναι το μήκος του εσωτερικού μοχλοβραχίονα για λοξή γωνία ρηγμάτωσης 45° , λαμβάνεται ίσος με $0,8h$ για τοιχώματα
- f_{yw} είναι η τάση διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού

Η διατμητική αντοχή ενός τοιχώματος από σκυρόδεμα δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την τιμή η οποία αντιστοιχεί στην αστοχία λόγω λοξής θλίψης του κορμού, $V_{R,max}$, η οποία δίνεται από την σχέση (μονάδες σε MN και μέτρα):

$$V_{R,max} = 0,85 [1 - 0,06 \min(5; \mu_{\Delta}^{pl})] \left[1 + 1,8 \min\left(0,15; \frac{N}{A_c f_c}\right) \right] [1 + 0,25 \max(1,75; 100\rho_{tot})] \left[1 - 0,2 \min\left(2; \frac{L_V}{h}\right) \right] \sqrt{f_c} b_w z \quad (2.39)$$

όπου η f_c είναι σε ΜΡα, τα b_w και z είναι σε μέτρα, η $V_{R,max}$ σε ΜΝ, και όλες οι άλλες μεταβλητές είναι όπως ορίζονται στη (2.38).

Η διατμητική αντοχή υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε όρους σύνθλιψης του κορμού πριν από την καμπτική διαρροή προκύπτει από τη σχέση (2.39) για $\mu_{\Delta}^{pl}=0$.

2.3.5 Διαδικασία επιλογής και σχεδιασμού των ενισχύσεων - Γενικές αρχές

Κατά τον EC8 αλλά και τον ΚΑΝ.ΕΠΕ, όπως περιγράφεται παρακάτω, η επιλογή του τύπου, της τεχνικής, της έκτασης και του επείγοντος της επέμβασης βασίζεται στις πληροφορίες για τον φορέα που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της αποτίμησης της φέρουσας ικανότητας του δομήματος, και αναλόγως της επιδιωκόμενης αύξησης της αντοχής, της δυσκαμψίας ή της πλαστιμότητας, ή και όλων αυτών ταυτοχρόνως, επιλέγεται η κατάλληλη μέθοδος επέμβασης.

Όσον αφορά στον *τύπο* της επέμβασης που τελικώς θα επιλεγεί, οι Ευρωκώδικες επισυνάπτουν τους εξής ενδεικτικούς τύπους:

α) Τοπική ή συνολική τροποποίηση των στοιχείων που έχουν ή δεν έχουν υποστεί βλάβη (επισκευή, ενίσχυση ή πλήρης αντικατάσταση), λαμβάνοντας υπόψη τη δυσκαμψία, την αντοχή και/ ή την πλαστιμότητα των στοιχείων αυτών.

β) Προσθήκη νέων δομικών στοιχείων (π.χ. συνδέσμων ή τοιχοπληρώσεων, λωρίδες / ζώνες από χάλυβα, ξύλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα σε τοιχοποιίες, κ.α.).

γ) Τροποποίηση του δομικού συστήματος (εξάλειψη ορισμένων αρμών, διεύρυνση των αρμών, εξάλειψη ευπαθών στοιχείων, τροποποίηση σε πιο κανονικές και/ ή πιο πλαστικές διατάξεις).

δ) Προσθήκη ενός νέου δομικού συστήματος για να παραλάβει μέρος, ή όλη τη δράση του σεισμού.

ε) Πιθανές διαμορφώσεις υφιστάμενων μη-φερόντων στοιχείων σε φέροντα στοιχεία.

στ) Εισαγωγή διατάξεων παθητικής προστασίας μέσω πλαστικών συνδέσμων ή σεισμικής μόνωσης.

ζ) Μείωση της μάζας.

η) Περιορισμός ή αλλαγή της χρήσης του κτιρίου.

θ) Μερική κατεδάφιση.

Μπορεί να επιλεγούν ένας ή περισσότεροι τύποι σε συνδυασμό. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η επιρροή των δομικών τροποποιήσεων στις

θεμελιώσεις. Εάν υιοθετηθεί η σεισμική μόνωση ακολουθούνται οι διατάξεις που περιέχονται στο EN 1998-1:2004, 10.

Στην παρούσα εργασία η επιλογή του τύπου ενίσχυσης αφορά κατά κύριο λόγο στην ενίσχυση των ελαφρώς οπλισμένων τοιχωμάτων (ο οπλισμός τους δηλαδή είναι μικρότερος του ελάχιστου απαιτούμενου σύμφωνα με το Κεφάλαιο 9 του EC2), ώστε να αυξηθεί η διατμητική αντοχή τους χωρίς ταυτόχρονα να μεταβληθούν σημαντικά η καμπτική αντοχή, η δυσκαμψία ή η πλαστιμότητά τους. Η ενίσχυση στο αντισεισμικώς κατασκευασμένο τοίχιο W8 είναι κατ' ουσίαν περιττή μιας και αυτά έχουν κατασκευαστεί τόσο ώστε να ικανοποιούν τις απαιτήσεις αυξημένης αντοχής, όσο και τις απαιτήσεις αυξημένης πλαστιμότητας και δυσκαμψίας έναντι σεισμικών δράσεων. Ωστόσο γίνεται για δοκιμαστικό σκοπό. Τα χαλύβδινα ελάσματα που τελικώς επιλέγονται συμβάλλουν στην αύξηση της διατμητικής αντοχής, όπως περιγράφεται στην αμέσως επόμενη παράγραφο (βλ. και παραδοχές ΚΑΝ.ΕΠΕ. παρακάτω).

2.3.6 Διατμητική αντοχή υπό τη συνεισφορά χαλύβδινης ενίσχυσης

Η συνεισφορά του μανδύα ή της λάμας στην διατμητική αντοχή επιλέγεται ως προσθετικό στην υπάρχουσα αντοχή, υπό την προϋπόθεση ότι η χαλύβδινη ενίσχυση παραμένει μέσα στην ελαστική περιοχή. Κατ' αυτόν τον τρόπο η ενίσχυση ελέγχει το πλάτος των εσωτερικών ρωγμών και εξασφαλίζει την ακεραιότητα του σκυροδέματος, επιτρέποντας έτσι στον αρχικό μηχανισμό διατμητικής αντοχής να συνεχίζει την λειτουργία του.

Εάν χρησιμοποιείται μόνο το 50% της αντοχής διαρροής του μανδύα, η έκφραση για την επιπλέον διάτμηση V_j που παραλαμβάνεται από τον μανδύα είναι:

$$V_j = 0,5h \frac{2t_j b}{s} f_{y,j,d} \cdot (\cot\theta + \cot\beta) \cdot \sin\beta \quad (2.40)$$

όπου:

- t_j είναι το πάχος των χαλύβδινων στοιχείων
- b είναι το πλάτος των χαλύβδινων στοιχείων
- s είναι η απόσταση μεταξύ των χαλύβδινων στοιχείων ($b/s = 1$, σε περίπτωση συνεχών χαλύβδινων πλακών)
- $f_{y,j,d}$ είναι η το όριο διαρροής σχεδιασμού του χάλυβα
- β είναι η γωνία μεταξύ του άξονα των χαλύβδινων στοιχείων και του άξονα του μέλους
- θ είναι η γωνία της αναμενόμενης λοξής ρωγμής, που μπορεί να λαμβάνεται ίση με 45°

2.4 Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) – 1^η Αναθεώρηση Ιούλιος 2013

Ο Κανονισμός Επεμβάσεων αφορά την *αποτίμηση* της φέρουσας ικανότητας και τον *αντισεισμικό ανασχεδιασμό* υφισταμένων δομημάτων ή μελών τους. Ως δομήματα, νοούνται κυρίως κτίρια με φέροντα οργανισμό από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Ο Κανονισμός καλύπτει τους ελέγχους υφισταμένων δομημάτων χωρίς εμφανείς βλάβες ή φθορές, καθώς και τον έλεγχο, την επισκευή ή ενίσχυση και τον αντισεισμικό ανασχεδιασμό υφισταμένων δομημάτων που έχουν υποστεί βλάβες. Οι στόχοι αποτίμησης ή ανασχεδιασμού που προβλέπονται, αποτελούν συνδυασμούς αφενός μιας *στάθμης επιτελεστικότητας* και αφετέρου μιας σεισμικής δράσης, με δεδομένη «ανεκτή πιθανότητα υπέρβασης κατά την τεχνική διάρκεια ζωής του δομήματος» (σεισμός σχεδιασμού). Οι στάθμες επιτελεστικότητας ορίζονται όπως στον EC8 σύμφωνα με την πρόσφατη αναθεωρημένη έκδοση του ΚΑΝ.ΕΠΕ. του Ιουλίου 2013.

Ακόμη, στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. εισάγονται για πρώτη φορά σε Ελληνικό Κανονισμό οι *Στάθμες Αξιοπιστίας Δεδομένων (Σ.Α.Δ)* βάσει των οποίων τροποποιούνται οι ενσωματούμενοι συντελεστές ασφαλείας για τις δράσεις και τα υλικά αναλόγως τις αξιοπιστίας των διαθέσιμων δεδομένων για τα υπό ανασχεδιασμό ή αποτίμηση στοιχεία ωπλισμένου σκυροδέματος και τα προστιθέμενα υλικά ενίσχυσης. Επιπλέον, ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. παρέχει υπολογιστικά εργαλεία για την εκτίμηση του *δείκτη συμπεριφοράς (q)* μιας υφιστάμενης κατασκευής και των τοπικών δεικτών πλαστιμότητας (*m*). Τέλος, ο Κανονισμός χωρίζει τα στοιχεία σε *προτεύοντα και δευτερεύοντα* σεισμικώς, ανάλογα με το ποσοστό των οριζόντιων δράσεων που αναλαμβάνουν.

2.4.1 Καμπύλη αντίστασης «F-δ»

Η καμπύλη αντίστασης, δηλαδή η σχέση ανάμεσα στην τέμνουσα βάσεως και την οριζόντια μετακίνηση του κόμβου ελέγχου υπολογίζεται για μετακινήσεις του κόμβου ελέγχου οι οποίες θα κυμαίνονται από μηδέν μέχρι και πέρα από την μετακίνηση για την οποία θα γίνει ο έλεγχος. Ο κόμβος ελέγχου της στοχευόμενης μετακίνησης λαμβάνεται εν γένει στο κέντρο μάζας της κορυφής του τοιχίου. Το προσομοίωμα διγραμμικοποίησης της καμπύλης ικανότητας κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. υιοθετείται γενικώς και για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας αφού οι απλοί κανόνες για τον υπολογισμό της σεισμικής απόκρισης με ψευδο-ελαστικές μεθόδους προϋποθέτουν διγραμμική περιβάλλουσα καμπύλη συνολικών δυνάμεων-μετακινήσεων.

Οι δύο ευθείες που συνθέτουν τη διγραμμική καμπύλη μπορούν να προσδιορίζονται γραφικά, με κριτήριο την κατά προσέγγιση ισότητα των εμβαδών των χωρίων που προκύπτουν πάνω και κάτω από τις τομές της πραγματικής και της εξιδανικευμένης

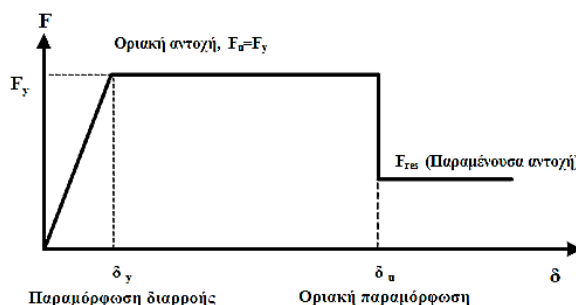
καμπύλης. Το είδος του μεγέθους F επιλέγεται έτσι ώστε να αντιπροσωπεύει το κύριο μέρος της έντασης που αναπτύσσεται λόγω της σεισμικής δράσης. Η παραμόρφωση δ επιλέγεται έτσι ώστε, σε συνδυασμό με το εντατικό μέγεθος F , να αναπαριστά την ενέργεια παραμόρφωσης του στοιχείου.

Στη διγραμμική καμπύλη αντίστασης ο οιονεί ελαστικός κλάδος παρακάμπτει την ρηγματώση και κατευθύνεται στην διαρροή του στοιχείου, καθώς τα στοιχεία είναι κατά κανόνα ήδη ρηγματωμένα από προγενέστερες δράσεις, σεισμικές ή μη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο κανονισμός διακρίνει τις εξής περιπτώσεις:

- 1) Για ένα μέλος που αστοχεί από κάμψη με ροπή αστοχίας M_u :
 - $F_y=M_u$ εφόσον οι F είναι σε όρους ροπών,
 - $F_y=V_{Mu}$, εφόσον οι F είναι σε όρους δυνάμεων
- 2) Σε ένα μέλος που αστοχεί από τέμνουσα, όταν δηλαδή $V_u < V_{Mu}$, θα λαμβάνεται:
 - $F_y=M_{Vu}$ (η ροπή, την στιγμή της διατμητικής αστοχίας), εφόσον οι F εκφράζονται σε όρους ροπών,
 - $F_y=V_u$ εφόσον οι F είναι σε όρους δυνάμεων.

Σημειώνεται πως $V_{Mu}=M_u/(a_s h)$, όπου $a_s=M/(Vh)$ ο λόγος διάτμησης του μέλους, ο οποίος μπορεί να λαμβάνεται σταθερός για κατακόρυφα στοιχεία για όλη τη διάρκεια της απόκρισης.



Διάγραμμα 2.13 Καμπύλη ικανότητας δομήματος για οριζόντιο μετελαστικό κλάδο και παραμένουσα αντοχή (KAN.ΕΠΕ., 2013)

Ο πρώτος ευθύγραμμος κλάδος εκτείνεται από την αρχή των αξόνων μέχρι τη συμβατική (ή ενεργό) «διαρροή» του στοιχείου, μετά την οποία η καμπύλη F - δ μπορεί να λαμβάνεται περίπου οριζόντια.

Η αντίσταση διαρροής F_y μπορεί να ληφθεί ίση με την οριακή αντίσταση για τον κρίσιμο τρόπο αστοχίας.

Η τιμή της παραμόρφωσης στη διαρροή, δ_y , πρέπει να λαμβάνει υπόψη όλες τις παραμορφώσεις κατά τη διαρροή του στοιχείου (καμπτικές, διατμητικές, λόγω εξόλκευσης οπλισμών), όπως ορίζεται και στον EC8.

Σε υπάρχουσες κατασκευές, οι οπλισμοί είναι δεδομένοι και κατ' αρχήν γνωστοί, οι δε τιμές των F_y , δ_y και K μπορούν να εκτιμηθούν πειραματικά ή με κανονιστικές σχέσεις. Για τις επισκευές και ενισχύσεις, είναι δυνατός ο υπολογισμός των F_y , δ_y και K μέσω μιας θαμιστικής διαδικασίας (διαστασιολόγηση της ενίσχυσης με δοκιμές), καθώς και με την πειραματική απόκριση του ενισχυμένου μέλους (όπως γίνεται στο παρόν Τεύχος).

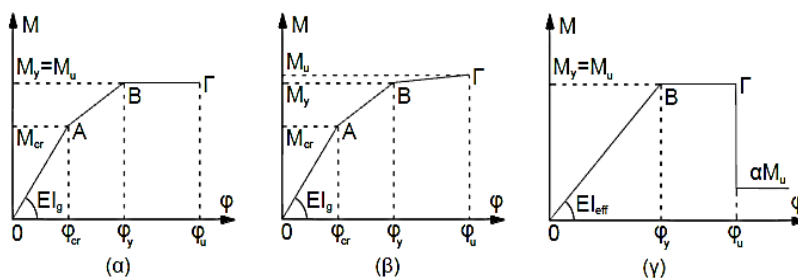
2.4.2 Διάγραμμα «Ροπών-(Αξονικών)-Καμπυλοτήτων» (M - 1/R)

Το διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων μιας διατομής, είναι η γραφική παράσταση της καμπυλότητας μιας διατομής όταν στη διατομή αυτή εξασκείται ροπή κάμψης. Καμπυλότητα ($1/R$) είναι το αντίστροφο της ακτίνας καμπυλότητας, της ακτίνας δηλαδή του κύκλου που προσεγγίζει την ελαστική γραμμή του στοιχείου στην περιοχή της διατομής που εξετάζεται. Η καμπτική παραμόρφωση που υφίσταται σε κάθε σημείο του ένα γραμμικό στοιχείο ωπλισμένου σκυροδέματος υπό κάμψη χαρακτηρίζεται από την καμπυλότητα που παρουσιάζει η διατομή στο σημείο αυτό. Αποδεικνύεται ότι η καμπυλότητα μιας διατομής της οποίας η πάνω ίνα έχει θλιπτική παραμόρφωση ϵ_c και η κάτω ίνα έχει εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_{s1} είναι:

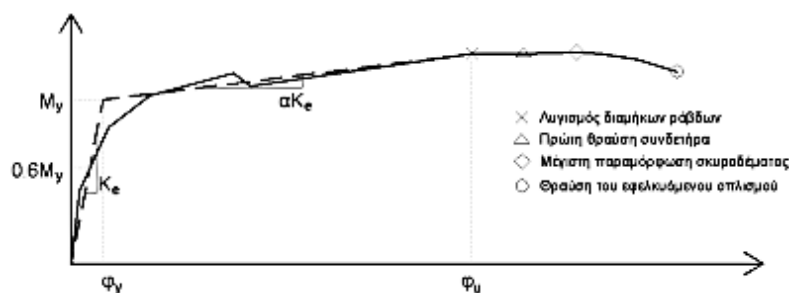
$$\frac{1}{R} = \frac{(\epsilon_c + \epsilon_{s1})}{d} = \frac{\epsilon_c}{x} = \frac{\epsilon_{s1}}{d - x}$$

Το διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων έχει τη μορφή συνεχούς καμπύλης, αλλά στην πράξη προσεγγίζεται με τη μορφή ενός πολυγραμμικού διαγράμματος, ή και διγραμμικού όταν παρακάμπτεται ο κλάδος που ορίζει το σημείο της πρώτης ρηγμάτωσης μιας διατομής. Σημειώνεται ότι το διάγραμμα αυτό ισχύει για μια συγκεκριμένη διατομή και για μια συγκεκριμένη αξονική δύναμη.

Στα παρακάτω σχήματα παρατίθενται κάποιες ενδεικτικές προσεγγίσεις γραμμικοποίησης του διαγράμματος Ροπών-Καμπυλοτήτων (M-φ).



Σχήμα 2.14 (α) τριγραμμικό διάγραμμα M-φ με οριζόντιο μετελαστικό κλάδο (συμπεριλαμβανομένης της ρηγμάτωσης), (β) τριγραμμικό με κεκλιμένο μετελαστικό κλάδο (συμπεριλαμβανομένης της ρηγμάτωσης) και, (γ) διγραμμικό με οριζόντιο μετελαστικό κλάδο, παράκαμψη της πρώτης ρηγμάτωσης και απομένουσα αντοχή (KAN.ΕΠΕ.)



Σχήμα 2.15 Διγραμμική προσέγγιση διαγραμμάτων M-φ βάσει της μεθόδου ΑΠΘ όπου η θεωρητική αστοχία λαμβάνεται στο σημείο όπου πληρούται το πρώτο από τα κριτήρια αστοχίας (Παναγόπουλος Γ./Κάππος Α.Ι., 2009)

Κατά τον ΚΑΝ.ΕΠΕ., ο δείκτης πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων, $\mu_{1/r}$, δηλαδή, ο λόγος της καμπυλότητας αστοχίας προς την καμπυλότητα διαρροής, υπολογίζεται με βάση το διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων ως εξής:

- Υπολογίζεται η καμπυλότητα της διατομής κατά την διαρροή του πλέον εφελκόμενου χάλυβα, για δεδομένη αξονική δύναμη.
- Υπολογίζεται η καμπυλότητα της διατομής κατά την αστοχία της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος (αν είναι αυτός ο κρίσιμος τρόπος αστοχίας). Γι' αυτόν τον υπολογισμό, λαμβάνονται υπ' όψη τα μηχανικά χαρακτηριστικά του περισφιγμένου σκυροδέματος της διατομής του πυρήνα. δεδομένου ότι το εκτός συνδετήρων τμήμα της διατομής αποφλοιώνεται, όταν η παραμόρφωση του σκυροδέματος υπερβαίνει ένα όριο ($\epsilon_c > 0,0035$).
- Υπολογίζεται η ροπή αστοχίας της διατομής, η οποία πρέπει να μην υπολείπεται της ροπής διαρροής κατά ποσοστό μεγαλύτερο του 15%. Εάν αυτή η απαίτηση δεν ισχύει, τότε θα πρέπει να αυξηθεί καταλλήλως ο οπλισμός περισφιγξης της διατομής ή να προβλεφθεί εξωτερική περισφιγξη ή να ληφθεί ο δείκτης πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων ίσος με 1,00.

2.4.3 Ροπή και καμπυλότητα στη διαρροή (ΚΑΝ.ΕΠΕ., ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 7^Α)

Ο ελληνικός κανονισμός επεμβάσεων έχει υιοθετήσει τα αποτελέσματα πειραματικών δεδομένων που αντικατοπτρίζονται στη σύνταξη εξισώσεων κλειστού τύπου από τους Παναγιωτάκος (1998) και Panagiotakos και Fardis (2001), οι οποίες βασίστηκαν στις εξής παραδοχές:

- Ισχύς της υπόθεσης Navier – Bernoulli για επιπεδότητα διατομών.
- Γραμμική σχέση σ-ε των υλικών μέχρι τη διαρροή (και για τον χάλυβα και το σκυρόδεμα).

- Κριτήριο διαρροής:

α) εξάντληση της τάσης διαρροής του χάλυβα, f_y , ή

β) βράχυνση της ακραίας θλιβόμενης ίνας $\varepsilon_c=1,8f_c/E_c$,

ανάλογα με το ποιο από τα α), β), συμβαίνει πρώτο.

Από της παραπάνω παραδοχές, εισάγεται η ευρύτερη έννοια της «διαρροής» της διατομής, που δεν ορίζεται πλέον μονοσήμαντα ως διαρροή του πλέον εφελκόμενου οπλισμού.

Αν η διαρροή της διατομής οφείλεται στη διαρροή του πλέον εφελκόμενου οπλισμού, δηλαδή για τάση $\sigma_{s1}=f_y$ και παραμόρφωση $\varepsilon_s=f_y/E_s$:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_y = \frac{f_y}{[E_s(1-\xi_y)d]} \quad (2.41)$$

Αν η διαρροή της διατομής οφείλεται σε μη-γραμμικότητα των παραμορφώσεων του θλιβόμενου σκυροδέματος (για παραμόρφωση ακραίας θλιβόμενης ίνας πέραν του $\varepsilon_c \approx 1.8f_c/E_c$, τότε:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_y = \frac{\varepsilon_c}{\xi_y d} \approx \frac{1.8f_c}{E_c \xi_y d} \quad (2.42)$$

Λαμβάνεται η μικρότερη των δύο τιμών.

Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης στη διαρροή, ξ_y , ανηγμένο στο στατικό ύψος d , είναι:

$$\xi_y = (a^2 A^2 + 2aB)^{1/2} - aA$$

όπου για ορθογωνική διατομή πλάτους b στατικού ύψους d και $a=E_s/E_c$ και εφόσον διαρρέει πρώτα ο χάλυβας:

$$A = \rho + \rho' + \rho_v + \frac{N}{bdf_y}$$

$$B = \rho + \rho' \delta' + 0,5\rho_v(1 + \delta') + \frac{N}{bdf_y}$$

Τα ρ , ρ' και ρ_v είναι αντίστοιχα τα ανηγμένα στο $b \cdot d$ ποσοστά του οπλισμού του εφελκόμενου πέλματος, του θλιβόμενου πέλματος και του οπλισμού στον κορμό, ο οποίος θεωρείται ομοιόμορφα κατανομημένος στο τμήμα του ύψους μεταξύ εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού. Η απόσταση του εφελκόμενου ή του θλιβόμενου οπλισμού από το αντίστοιχο πέλμα συμβολίζεται με d' , και ως δ ορίζεται ο λόγος d'/d . Η αξονική δύναμη N λαμβάνεται θετική αν είναι θλιπτική.

Αν το ποσοστό ρ είναι πολύ μεγάλο και τα ρ' , ρ_v μικρά, ή αν η μέση θλιπτική τάση $N/b \cdot d$ είναι υψηλή, η σχέση $M-1/R$ μπορεί να καμπυλωθεί με τα κοίλα προς τα κάτω όχι λόγω διαρροής του εφελκόμενου οπλισμού αλλά λόγω εισόδου του

σκυροδέματος στο έντονα μη-γραμμικό τμήμα του διαγράμματος σ-ε σε θλίψη. Σε αυτή την περίπτωση:

$$A = \rho + \rho' + \rho_v - \frac{N}{bd\varepsilon_c E_c} \approx \rho + \rho' + \rho_v - \frac{N}{bd1,8af_c}$$

$$B = \rho + \rho'\delta' + 0,5\rho_v(1 + \delta')$$

Με δεδομένη την καμπυλότητα στη διαρροή, $(1/r)_y$, η αντίστοιχη ροπή διαρροής M_y είναι:

$$\frac{M_y}{bd^3} = \left(\frac{1}{r}\right)_y \left\{ E_c \frac{\xi_y^2}{2} \left(0,5(1 + \delta') - \frac{\xi_y}{3} \right) + \left[(1 - \xi_y)\rho + (\xi_y - \delta')\rho' + \frac{\rho_v}{6}(1 - \delta') \right] (1 - \delta') \frac{E_s}{2} \right\} \quad (2.43)$$

2.4.4 Ροπή και καμπυλότητα στην αστοχία

Ο υπολογισμός της ροπής αντοχής, M_u , και της καμπυλότητας στην αστοχία, φ_u , μπορεί να βασιστεί στις ίδιες αρχές με τον υπολογισμό της ροπής και καμπυλότητας διαρροής, M_y και φ_y , δηλαδή στην *υπόθεση επιπεδότητας των διατομών* και στην εξίσωση των εσωτερικών και εξωτερικών (αξονικών) δυνάμεων με τους κατάλληλους νόμους τάσεων – παραμορφώσεων, σ-ε, των υλικών. Η διατομή μπορεί να φτάσει σε κατάσταση αστοχίας κάτω από το ένα από τα παρακάτω δύο ενδεχόμενα:

1. Θραύση του εφελκόμενου οπλισμού κατά την εξάντληση της μέγιστης παραμόρφωσης ε_{su} . Σε αυτήν την περίπτωση η καμπυλότητα στην αστοχία είναι:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{su} = \frac{\varepsilon_{su}}{(1 - \xi_{su})d} \quad (2.44)$$

όπου ξ_{su} είναι το ανηγμένο ύψος της θλιβόμενης ζώνης κατά τη θραύση του εφελκόμενου οπλισμού.

2. Αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης όταν η ακραία θλιβόμενη ίνα φτάνει τη μέγιστη παραμόρφωσή της ε_{cu} . Σε αυτήν την περίπτωση η καμπυλότητα στην αστοχία είναι:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{cu} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\xi_{cu}d} \quad (2.45)$$

όπου ξ_{cu} το ανηγμένο ύψος της θλιβόμενης ζώνης κατά την αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης.

Οι δύο αυτοί τρόποι αστοχίας μπορούν να συμβούν σε ένα από τα δύο παρακάτω στάδια:

1) πριν, ή κατά τη διάρκεια της αποφλοίωσης του απερίσφιγτου σκυροδέματος της επικάλυψης, δηλαδή σε επίπεδο της πλήρους διατομής με τις πλήρεις διαστάσεις, b , h , d , ή,

2) σε επίπεδο διατομής του περισφιγμένου πυρήνα, μετά την αποφλοίωση του σκυροδέματος της επικάλυψης. Σ' αυτή την περίπτωση οι διαστάσεις της πλήρους διατομής b , h , d θα πρέπει ν' αντικαθίστανται από τις διαστάσεις του πυρήνα b_c , h_c , d_c , το ύψος της θλιβόμενης ζώνης, ξ , θα πρέπει να είναι ανηγμένο στο d_c και η μέγιστη παραμόρφωση σκυροδέματος, ϵ_{cu} , αντικαθίσταται από τη μέγιστη παραμόρφωση περισφιγμένου σκυροδέματος $\epsilon_{cu,c}$.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, όταν αυτό περισφίγγεται μέσω συνδετήρων από χάλυβα υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$f_{cd,c} = (1 + 2,5a\omega_{wd})f_{cd} \text{ για } a\omega_{wd} \leq 0,10 \quad (2.46)$$

$$f_{cd,c} = (1,125 + 1,25a\omega_{wd})f_{cd} \text{ για } a\omega_{wd} \geq 0,10 \quad (2.47)$$

$$\epsilon_{c2,c} = 0,002 \left(\frac{f_{cd,c}}{f_{cd}} \right)^2 \quad (2.48)$$

$$\epsilon_{cu,c} = 0,0035 + 0,1a\omega_{wd} \quad (2.49)$$

όπου:

- $a\omega_{wd}$ το ενεργό ποσοστό περίσφιγξης
- $\epsilon_{c2,c}$ η ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην $f_{cd,c}$
- $\epsilon_{cu,c}$ η ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο $0,85f_{cd}$ μετρούμενη στο φθιτό κλάδο του διαγράμματος σ - ϵ του περισφιγμένου σκυροδέματος (βλ.

Διάγραμμα 2.8)

Αν οι συνδετήρες δεν κλείνουν με άγκιστρο προς το εσωτερικό του σκυροδέματος, όπως στα τοιχία 9-12 ($\geq 135^\circ$ στις γωνίες και $\geq 90^\circ$ στο ενδιάμεσο των πλευρών), συνιστάται να αμελείται η περίσφιγξη (ο συντελεστής a λαμβάνεται ίσος με 0).

Το προσομοίωμα αυτό υιοθετήθηκε στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών των τοιχίων W7-W8. Ένα μειονέκτημά του ωστόσο είναι ότι δε συνοδεύεται από μια σχέση υπολογισμού του μήκους πλαστικής άρθρωσης. Επίσης υπερεκτιμά την αντοχή και την παραμόρφωση διαρροής και αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος σε σχέση με τα άλλα δυο προσομοιώματα των Ευρωκωδίκων (EC2, EC8-Part 3).

Υπο ανακυκλιζόμενη φόρτιση, οι Μπισκίνης και Φαρδής (Biskinis και Fardis 2010) δίνουν την οριακή παραμόρφωση του σκυροδέματος (απερίσφιγτου ή περισφιγμένου) από την εξής σχέση:

$$\varepsilon_{cu,2} = 0,0035 + \left(\frac{1}{\xi_{yd}}\right)^{3/2} + \frac{1}{3} \frac{\alpha' \rho_s f_{yw}}{f_{cc}} \quad (2.50)$$

όπου:

- ξ_{yd} το ανηγμένο στο στατικό ύψος d της θλιβόμενης ζώνης στη διαρροή
- α' ο συντελεστής περίσφιγξης
- ρ_s το ποσοστό του οπλισμού περίσφιγξης
- f_{yw} η τάση διαρροής των συνδετήρων
- f_{cc} η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος

Σε περίπτωση που η διατομή δεν διαθέτει οπλισμό περίσφιγξης η εξίσωση (2.50) ισχύει με τη διαφορά ότι ο όρος που αφορά στην περίσφιγξη είναι μηδενικός.

Στην περίπτωση που η αστοχία, όμως, δεν επέλθει λόγω θλίψης του σκυροδέματος, αλλά λόγω θραύσης του εφελκόμενου οπλισμού, κρίσιμο μέγεθος είναι η μήκυνση αστοχίας του χάλυβα οπλισμού ε_{su} .

Προτείνεται ακόμη από τους Biskinis and Fardis (2010b) η παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό της ε_{su} σε μονοτονική φόρτιση, προσαρμοσμένη σε πειραματικά δεδομένα για την καμπυλότητα αστοχίας:

$$\varepsilon_{su} = 7/12 \cdot \varepsilon_{su,nominal} \quad (2.51)$$

όπου $\varepsilon_{su,nominal}$ η μήκυνση του χάλυβα που αντιστοιχεί στην εφελκυστική του αντοχή.

Ως τιμές της $\varepsilon_{su,nominal}$ λαμβάνονται οι παρακάτω τιμές, ως μέσοι όροι αποτελεσμάτων δοκιμών εφελκυσμού.

- Παραδοσιακοί όλκιμοι χάλυβες, τύπου Ευρωπαϊκού S400 ή Αμερικανικού Grade 60: $\varepsilon_{su,nominal} = 0,11$

- Σύγχρονοι όλκιμοι Ευρωπαϊκοί χάλυβες τύπου Tempcore: $\varepsilon_{su,nominal} = 0,09$

- Ψαθυροί χάλυβες ψυχρής κατεργασίας: $\varepsilon_{su,nominal} = 0,04$

2.4.5 Παραμόρφωση διαρροής στοιχείου

Όπως και στον EC8, στον υπολογισμό της παραμόρφωσης διαρροής πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση και της κάμψης, της διάτμησης και της εξόλκευσης του οπλισμού πέραν της ακραίας διατομής. Η συμβολή της κάμψης στην παραμόρφωση διαρροής εκφράζεται μέσω της καμπυλότητας διαρροής όπως έχει παρουσιαστεί στην Παράγραφο 2.7.1. Εάν δε οι παραμορφώσεις «δ» αναφέρονται στο σύνολο του μήκους διάτμησης (που για τα τοιχία είναι όλο το μήκος τους) στο άκρο δομικού στοιχείου (όταν δηλαδή ως παραμόρφωση χρησιμοποιείται η γωνία

στροφής χορδής θ), τότε στη φάση της καμπτικής διαρροής το τμήμα της θ_y που οφείλεται στην κάμψη, μπορεί να ληφθεί ίσο με $(1/r)_y(L_s+a_vz)/3$, όπου ο όρος a_vz εκφράζει την επιρροή του «μήκους μετάθεσης» των ροπών κάμψης σ' αυτές, z είναι ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων, ο δε συντελεστής a_v ισούται με 1 εάν η τέμνουσα, V_{R1} , που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση του στοιχείου, υπολείπεται της τιμής της τέμνουσας κατά την καμπτική διαρροή $VM_u=M_y/L_s$, και με 0 αν είναι μεγαλύτερη.

Η γωνία στροφής στην καμπτική διαρροή για τοιχώματα μπορεί να εκτιμηθεί από την παρακάτω σχέση, που είναι αυτή που υιοθέτησε πρόσφατα και ο EC8 (βλ. σχέση (2.28)):

$$\theta_y = \left(\frac{1}{r}\right)_y \frac{L_s+a_vz}{3} + 0,0013 + \frac{\left(\frac{1}{r}\right)_y d_b f_y}{8\sqrt{f_c}} \quad (2.52)$$

Ο 2ος όρος εκφράζει τις μέσες διατμητικές παραμορφώσεις στο μήκος L_s , ενώ ο 3ος όρος εκφράζει την επιρροή της εξόλκευσης του τμήματος των ράβδων πέραν της ακραίας διατομής του στοιχείου (f_y και f_c σε MPa, d_b , L_s , z σε m, $1/r$ σε m^{-1}).

Η Εξ. (2.52) εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της ενεργού δυσκαμψίας, ακόμη και αν η διατμητική αστοχία του στοιχείου προηγείται της καμπτικής διαρροής του άκρου του. Η ενεργός δυσκαμψία του μήκους L_s στοιχείου ορίζεται όπως και στον EC8 από τη σχέση (2.27).

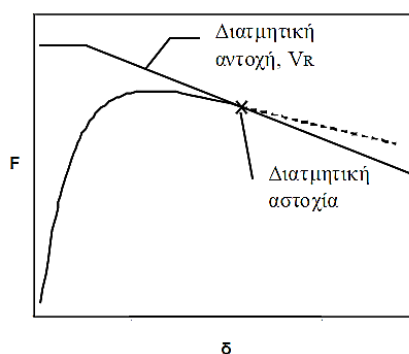
2.4.6 Παραμόρφωση αστοχίας στοιχείου (πλαστική και συνολική γωνία στροφής)

Ως αστοχία ορίζεται η σημαντική και συχνά απότομη μείωση της αντίστασης F υπό μονοτονικά αυξανόμενη παραμόρφωση ή υπό ανακυκλιζόμενη παραμόρφωση. Υπό την έννοια αυτή, μπορεί να θεωρηθεί ως «αστοχία» μείωση της αντίστασης ίση περίπου με 20% της μέγιστης τιμής της. Ως παραμόρφωση αστοχίας, δ_u , επομένως, ορίζεται εκείνη η τιμή που αντιστοιχεί σε απόκριση F μειωμένη κατά 20% έναντι της μέγιστης. Η τιμή της παραμόρφωσης αστοχίας, δ_u , ορίζει και την ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης, μέσω του πλαστικού τμήματος της παραμόρφωσης αστοχίας, δηλ. του $\delta_{u,pl}=\delta_u-\delta_y$ ενός στοιχείου, μιας κρίσιμης περιοχής ή μιας συνδέσεως στοιχείων. Η παραμόρφωση δ μπορεί να εκφράζεται ως ανηγμένο μέγεθος, με τη βοήθεια του δείκτη πλαστιμότητας παραμορφώσεων, $\mu_\delta=\delta/\delta_y$. Η $\mu_{\delta u}=\delta_u/\delta_y$ ορίζεται ως διαθέσιμη (μέγιστη) τιμή του δείκτη πλαστιμότητας παραμορφώσεων. Η διαθέσιμη γωνία πλαστικής στροφής θ_{upl} μιας κρίσιμης περιοχής και η διαθέσιμη συνολική γωνία στροφής θ_u στο άκρο δομικού στοιχείου πρέπει να υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη όλες τις υπεισερχόμενες παραμέτρους των μεγεθών αυτών, πάντως δε συνεκτιμώντας υπέρ της ασφαλείας και όλες τις σχετικές πηγές αβεβαιότητας, καθώς η εκτίμηση της διαθέσιμης τιμής της πλαστικής γωνίας

στροφής ή της συνολικής γωνίας στροφής χορδής στοιχείων Ω.Σ. είναι κυρίως εμπειρική, συναρτήσει των γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των στοιχείων και των οπλισμών τους. Έτσι μια μέση οριακή γωνία στροφής χορδής θ_{um} αποτιμάται όπως στη σχέση (2.30) χωρίς το συντελεστή ασφαλείας γ_{el} . Το ίδιο ισχύει και για το πλαστικό μέρος της γωνίας στροφής χορδής το οποίο υπολογίζεται κατά τη σχέση (2.32).

2.4.7 Παραμόρφωση κατά την αστοχία από τέμνουσα

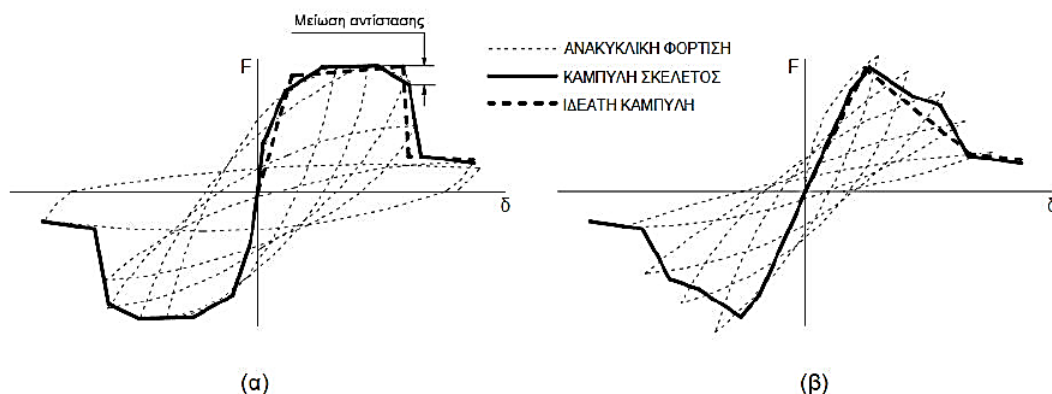
Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ, αν το στοιχείο αστοχεί από τέμνουσα προτού διαρρεύσει σε κάμψη επιτρέπεται να λαμβάνεται πλαστική γωνία στροφής στο άκρο του μετά την εξάντληση της διατμητικής αντοχής ίση με το 40% της αντίστοιχης γωνίας στροφής χορδής στην καμπτική διαρροή, δηλαδή $\theta_u=1,4\theta_y$. Σε κάθε άλλη περίπτωση η οριακή γωνία στροφής υπολογίζεται κατά τα ανωτέρω.



Σχήμα 2.16 Εξασθένιση της διατμητικής αντοχής V_R κατά την ανακύκλιση (ΚΑΝ.ΕΠΕ 2013)

Κατά τις μετελαστικές ανακυκλίσεις, η σταδιακή εξασθένιση της αντίστασης V_R σε τέμνουσα, ενδέχεται να προκαλέσει αστοχία από τέμνουσα ακόμη και στην περίπτωση όπου αρχικώς ήταν $V_R > V_{Mu}$. Για να ληφθεί επαρκώς υπόψη το ενδεχόμενο αυτό, απαιτείται η εκτίμηση αυτής της εξασθένισης της V_R συναρτήσει του απαιτούμενου για τον σχεδιασμό δείκτη πλαστιμότητας επιβαλλόμενων μετακινήσεων, $\mu_\theta = \theta_u / \theta_y$. Κανονικά, ο έλεγχος της διατμητικής αντοχής κάθε μέλους γίνεται με τιμές αξονικής δύναμης και λόγου διάτμησης οι οποίες παρουσιάζονται σταδιακώς κατά τις φορτίσεις που λαμβάνονται υπόψη στη σύνταξη της καμπύλης αντίστασης. Επιτρέπεται να γίνεται ο έλεγχος αυτός σε κάθε μέλος με τιμές αξονικής δύναμης και λόγου διάτμησης ίσες με εκείνες που συμβαίνουν στο μέλος αυτό κατά τη στιγμή της αστοχίας.

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. υιοθετεί το ίδιο προσομοίωμα με τον EC8 για τον υπολογισμό της διατμητικής αντίστασης V_R , της αντοχής του κορμού σε λοξή θλίψη, $V_{R,max}$, και της συμβολής του διατμητικού οπλισμού, V_w , στη συνολική αντοχή.

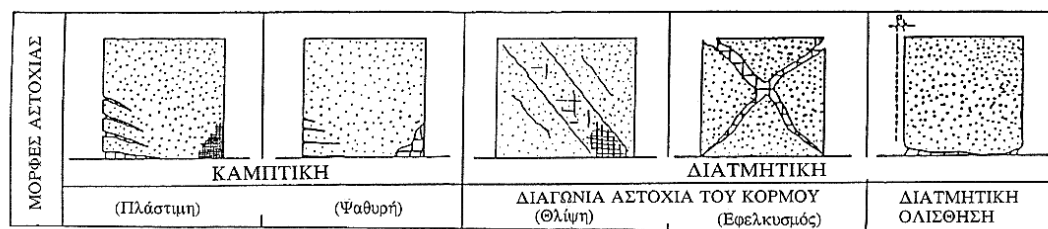


Σχήμα 2.17 Καμπύλες αντίστασης (α) για καμπτική και, (β) για διατμητική συμπεριφορά (Ψυχάρης Γ.Ν., 2010)

Η αστοχία των μελών ΟΣ σε διάτμηση, εάν προηγείται της καμπτικής διαρροής ή και της καμπτικής αστοχίας, συμβαίνει συνήθως σε μικρές παραμορφώσεις και συνδέεται με απότομη πτώση της αντίστασής τους. Επομένως, θεωρείται ψαθυρός τρόπος αστοχίας. Οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί εξασφαλίζουν ότι η καμπτική διαρροή και αστοχία των μελών θα προηγηθεί της διατμητικής, προσδίδοντας *υπεραντοχή σε διάτμηση μέσω του ικανοτικού σχεδιασμού σε τέμνουσα*. Ωστόσο, ο κίνδυνος διατμητικής αστοχίας παραμένει σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, οι οποίες έχουν κατασκευασθεί σύμφωνα με παλαιότερους κανονισμούς, αλλά και για μεγάλες τέμνουσες δυνάμεις λόγω ισχυρού σεισμού.

Συχνά παρατηρείται, ένα μέλος ΟΣ το οποίο διέρρευσε καμπτικά υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, τελικά να αστοχεί σε διάτμηση, εμφανίζοντας λοξές ρωγμές, το πάχος και η έκταση των οποίων αυξάνονται παρ' όλη τη σταδιακή πτώση της αντίστασης του μέλους. Η αστοχία αυτή συνδυάζεται με μειωμένα φαινόμενα που χαρακτηρίζουν την αστοχία σε κάμψη, όπως η αποσύνθεση του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη ή ο λυγισμός και η θραύση διαμήκων ράβδων. Ακόμη παρατηρείται μέλη που θεωρητικά αστοχούν σε διάτμηση να φτάνουν την καμπτική αντοχή τους με ή χωρίς τόσο απότομη πτώση του κλάδου της καμπύλης αντίστασης που αντιστοιχεί στη μετελαστική συμπεριφορά. Όταν προσεγγίζεται η παραμόρφωση αστοχίας σε κάμψη τα φαινόμενα που σηματοδοτούν αστοχία σε κάμψη γίνονται κυρίαρχα, ενώ οι λοξές ρωγμές που μπορεί να είχαν δημιουργηθεί αρχικά είναι πιθανόν να εξαφανιστούν, εξαιτίας της πτώσης της αντίστασης του μέλους μετά τη μέγιστη αντίσταση σε κάμψη. Η αστοχία υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση μετά την καμπτική διαρροή, λόγω μείωσης της διατμητικής αντίστασης με την ανακύκλιση ταχύτερα από την καμπτική, αποτελεί πλάστιμο τρόπο αστοχίας σε διάτμηση («ductile» shear failure). Συμβαίνει μόνο υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση επειδή η διατμητική αντοχή

μειώνεται με την ανακύκλιση γρηγορότερα από την καμπτική, και συνδέεται συνήθως με λοξό εφελκυσμό και διαρροή του οπλισμού κορμού.



Σχήμα 2.18 Μορφές αστοχίας τοιχωμάτων (Σαλονικιός Δ.Ε., 1998)

2.4.8 Δείκτης πλαστιμότητας και χαρακτηρισμός συμπεριφοράς

Πλαστιμότητα είναι η ικανότητα φορέων ή δομικών στοιχείων να αναπτύσσουν μεγάλες μετελαστικές παραμορφώσεις χωρίς σημαντική μείωση της φέρουσας ικανότητάς τους κατά τους διαδοχικούς κύκλους φορτίσεως.

Ο δείκτης πλαστιμότητας μετράει την σχέση των πλαστικών παραμορφώσεων (μέχρι να αναπτυχθεί παραμόρφωση αστοχίας στο σκυρόδεμα $\epsilon_{c2} = \epsilon_{cu}$, (αδιαφορώντας για την παραμόρφωση του χάλυβα αρκεί βέβαια να μην ξεπεραστεί η παραμόρφωση φυσικής αστοχίας του χάλυβα προς την ελαστική παραμόρφωση (όταν διαρρέει ο πλέον εφελκυσμένος οπλισμός $\epsilon_{s1} = \epsilon_{yd}$). Ανάλογα με το είδος της παραμορφώσεως (μετατόπιση ή στροφή ή καμπυλότητα), διακρίνουμε αντιστοίχως: δείκτη πλαστιμότητας σε όρους μετατοπίσεως $\mu_d = d_u / d_y$, δείκτη πλαστιμότητας σε όρους στροφών $\mu_\phi = \phi_u / \phi_y$ και δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων $\mu_r = (1/r)_u / (1/r)_y$ όπου ο δείκτης «u» υποδηλώνει την κατάσταση αστοχίας και ο δείκτης «y» υποδηλώνει την κατάσταση «διαρροής». Με τον όρο «διαρροή ενός μέλους», εννοείται το πέρασμα από τον ελαστικό κλάδο στον πλαστικό. Το πέρασμα αυτό συνήθως συμβαίνει όταν διαρρέει ο πλέον εφελκυσμένος οπλισμός. Σε περιπτώσεις ωστόσο περισσότερων των δύο σταθμών οπλισμού, όπως στα τοιχία εν προκειμένω, η διαρροή του μέλους είναι πιο ασαφής έννοια και γίνεται ακόμα προσπάθεια να προσδιοριστεί με ακρίβεια.

Το όριο μεταξύ πλάστιμης και ψαθυρής συμπεριφοράς λαμβάνεται συμβατικά ίσο με 2,0, όταν αναφέρεται σε διαθέσιμη τιμή δείκτη πλαστιμότητας σχετικών μετακινήσεων, μ_d ή μ_ϕ . Όταν αναφέρεται σε διαθέσιμη τιμή δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων, $\mu_{1/r}$, το συμβατικό όριο λαμβάνεται ίσο με 3,0. Στοιχεία οπλισμένου σκυρόδεματος που διαρρέουν σε διάτμηση πριν απ' τη διαρροή σε κάμψη (δηλαδή στα οποία η $V_{Mu} = M_u / (\alpha_s h)$ είναι μεγαλύτερη από τη V_u) θεωρείται ότι έχουν ψαθυρή συμπεριφορά. Στοιχεία που διαρρέουν σε κάμψη πριν απ' τη διαρροή σε διάτμηση

(δηλαδή όταν η $V_{Mu}=M_u/(a_s h)$ είναι μικρότερη της V_u) μπορεί να θεωρηθούν ότι έχουν πλαστική συμπεριφορά.

2.4.9 Ενισχύσεις

Με τον όρο ενίσχυση νοείται η διαδικασία επέμβασης σε ένα δόμημα με ή χωρίς βλάβες, η οποία αυξάνει τη φέρουσα ικανότητα ή πλαστιμότητα του στοιχείου ή φορέα σε στάθμη υψηλότερη από αυτήν του αρχικού σχεδιασμού. Με τον όρο «βλάβη», νοείται κάθε αλλοίωση ή απομείωση της γεωμετρίας ή των μηχανικών χαρακτηριστικών των στοιχείων του φέροντος οργανισμού. Στις βλάβες, συμπεριλαμβάνονται γενικώς και οι φθορές, π.χ. λόγω φυσικοχημικών δράσεων.

2.4.10 Κριτήρια για την εφαρμογή του τύπου ενίσχυσης

Η επιλογή του τύπου, της τεχνικής, της έκτασης και του επείγοντος της επέμβασης γίνεται και με βάση τεχνικά κριτήρια σχετιζόμενα με τη διαπιστωθείσα κατάσταση του δομήματος. Η απόφαση για την ενίσχυση των παλαιού κατασκευαστικού τύπου τοιχίων (W10, W12) προέκυψε λόγω της καμπτοδιατμητικής (W9) και διατμητικής (W11) αστοχίας των ομοίων τους δοκιμίων κατά την πειραματική τους φόρτιση και η ενίσχυση του τοιχίου με λεπτομέρειες αντισεισμικότητας (W8) έγινε για δοκιμαστικούς λόγους. Οι προϋποθέσεις για την τοποθέτηση των χαλύβδινων ελασμάτων είναι εν γένει:

- Ικανότητα ανάληψης της έντασης μόνιμων φορτίων από το υφιστάμενο στοιχείο.
- Διαρροή του υφιστάμενου εφελκόμενου οπλισμού στη φάση αστοχίας.
- Το υλικό ενίσχυσης θεωρείται νέος εξωτερικός οπλισμός και το στοιχείο μονολιθικό.
- Οι εφελκυστικές δυνάμεις από τη συνολική καμπτική ένταση πρέπει να αναλαμβάνονται από τον παλαιό και τον νέο οπλισμό.

Οι εργασίες εκτελούνται σύμφωνα με σχετικές τεχνικές προδιαγραφές. Αλλιώς έχουν εφαρμογή οι Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές [26].

Σε περίπτωση απλής ρηγμάτωσης σε τοιχώματα, συγκολλούνται οι ρωγμές με χρήση εποξειδικής ρητίνης. Τοιχία που μελετήθηκαν με παλαιότερους κανονισμούς φέρουν μειωμένους οπλισμούς λόγω των παραδοχών ανάλυσης που εφαρμόζονταν παλιότερα. Ως εκ τούτου, η σφράγιση των ρωγμών με ρητίνες τις περισσότερες φορές δεν είναι αρκετή και για αυτό συνίσταται η ενίσχυση των τοιχωμάτων με μανδύες

οπλισμένου σκυροδέματος ή με χρήση σύνθετων υλικών (χαλύβδινα στοιχεία, ινοπλισμένα πολυμερή κ.α.).

Οι συνδέσεις παλαιών με νέων υλικών οφείλουν να ελέγχονται ώστε στη διεπιφάνεια να ισχύει η σχέση:

$$R_{id} \geq S_{id}$$

Η διανυσματική διαφορά του συνόλου των δυνάμεων που αναλαμβάνονται από το συνολικό ενισχυμένο τοίχωμα, και εκείνων που αναλαμβάνονται από το υφιστάμενο τοίχωμα, συνιστά τις δρώσες διατμητικές δυνάμεις επί των διεπιφανειών χάλυβα και σκυροδέματος.

Σε αρκετές περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί αστοχία δομικών στοιχείων ενισχυμένων με σύνθετα υλικά ή συγκολλημένους κλωβούς με φορτία αρκετά μικρότερα από τα φορτία που είχαν εκτιμηθεί κατά την επιλογή της ενίσχυσης και τη διαστασιολόγηση της. Αυτό συμβαίνει λόγω υπολειτουργίας των υλικών ενίσχυσης που συγκολλούνται στο σκυρόδεμα με αποτέλεσμα να μη φτάνουν στην οριακή τάση εφελκυστικής αστοχίας τους αλλά να χάνουν τη δυνατότητα παραλαβής επιπλέον τάσεων και να «αχρηστεύονται», παρόλο που τα ίδια δε θραύονται. Δύο βασικοί παράγοντες που προκαλούν την υπολειτουργία των ενισχύσεων είναι το φαινόμενο της αποκόλλησής τους (delamination) και της ανεπαρκούς αγκύρωσης (insufficient anchorage).

Η αποκόλληση οφείλεται στην ανάπτυξη σημαντικών διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-υλικών ενίσχυσης και γίνεται κατά κανόνα μέσω σκυροδέματος, δεδομένου ότι αυτό έχει μικρότερη διατμητική αντοχή από τις συνήθεις εποξειδικές ρητίνες καλής ποιότητας. Σε πολλές περιπτώσεις, η εφαρμογή του απαιτούμενου μήκους επικόλλησης είναι δύσκολη ή και αδύνατη αν δεν υπάρχει ο απαιτούμενος χώρος. Στην περίπτωση αυτή επιλέγεται η λύση της εφαρμογής μηχανικών αγκυρώσεων που δεν απαιτούν ιδιαίτερο χώρο για την τοποθέτησή τους. Οι μηχανικές αγκυρώσεις πρέπει να είναι κατασκευασμένες από υλικά με καλή μηχανική συμπεριφορά και υψηλή αντοχή που να παρουσιάζουν πλάστιμη συμπεριφορά. Το συνηθέστερο χρησιμοποιούμενο υλικό για μηχανικές αγκυρώσεις είναι ο χάλυβας. Η βασικότερη μέθοδος μηχανικής αγκύρωσης είναι οι χαλύβδινες πλάκες αγκύρωσης. Αυτές τοποθετούνται στις ακραίες περιοχές του ελάσματος σε ζεύγη και στις δύο όψεις πχ ενός τοίχου ενώ ένας αριθμός προεντεταμένων κοχλιών ασκεί θλιπτική πίεση εγκλωβίζοντας το έλασμα και αυξάνοντας την τριβή μεταξύ πλάκας και ελάσματος. Μια άλλη μέθοδος αγκύρωσης είναι με γωνιακά χαλύβδινα ελάσματα ενώ ως εναλλακτική των παραπάνω λύσεων παρουσιάζεται η λύση της δημιουργίας εγκοπών μέσα στο σώμα του τοίχου και με μηχανικά μέσα επιτυγχάνεται η σφήνωση και συνεπώς η αγκύρωση του ελάσματος.

2.4.11 Μεταφορά δυνάμεων από χάλυβα σε σκυρόδεμα μέσω εμπηγνυόμενων στοιχείων ή βλήτρων

Χαλύβδινα στοιχεία εγκαθίστανται κάθετα στη διεπιφάνεια (έμπηξη), με σκοπό την μεταφορά εφελκυστικών και διατμητικών δυνάμεων μεταξύ του σκυροδέματος και του προστιθέμενου χαλύβδινου στοιχείου. Η μέγιστη (ορθή ή διατμητική) δύναμη, την οποία μπορεί να μεταφέρει ένα τέτοιο χαλύβδινο στοιχείο θα είναι η μικρότερη απ' τις δυνάμεις που είναι δυνατόν να μεταφερθούν μέσω του τμήματος του χαλύβδινου στοιχείου που είναι πακτωμένο στην μία ή στην άλλη πλευρά της διεπιφάνειας. Πρέπει να εξασφαλίζεται ότι ο μηχανισμός βλήτρου αστοχεί με διαρροή του βλήτρου και ταυτόχρονα τοπική αστοχία λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος κάτω από τη ράβδο. Όταν όμως η επικάλυψη των βλήτρων δεν είναι επαρκής ο μηχανισμός αστοχεί με εμφάνιση ρωγμής στο σκυρόδεμα κατά μήκος του βλήτρου (ρωγμή απόσχισης). Η αστοχία λόγω απόσχισης του σκυροδέματος είναι εξαιρετικά ψαθυρή (συμβαίνει για πολύ μικρή τιμή ολίσθησης στη διεπιφάνεια και συνοδεύεται από απότομη πτώση της αναλαμβανόμενης τέμνουσας). Γι' αυτό, όταν δεν τηρούνται οι προϋποθέσεις ελάχιστων επικαλύψεων στα βλήτρα, δεν λαμβάνεται υπόψη η αντίσταση βλήτρου υπό σεισμό.

2.4.12 Μεταφορά δυνάμεων μέσω στρώσεων εποξειδικής κόλλας – Διατμητική αντίσταση διεπιφάνειας

Η αστοχία του ενισχυμένου στοιχείου πρέπει να προηγείται της αστοχίας των διεπιφανειών παλαιών και νέων υλικών. Γι' αυτό κανονικά ο έλεγχος αντοχής της διεπιφάνειας θα πρέπει να πραγματοποιείται για εντατικά μεγέθη πολλαπλασιασμένα με συντελεστή $\gamma_{sd} = 1,35$. Η αντίσταση μιας διεπιφάνειας μπορεί να είναι είτε αντίσταση σε θλίψη είτε αντίσταση σε εφελκυσμό είτε διατμητική αντίσταση. Λόγω της συνήθους ψαθυρής συμπεριφοράς των διεπιφανειών, απαιτείται να παραμείνουν στην ελαστική τους φάση μέχρι την αστοχία του ενισχυμένου στοιχείου.

A) Αντίσταση διεπιφάνειας σε θλίψη

Υπολογίζεται με βάση τη θλιπτική αντοχή του ασθενέστερου υλικού εκατέρωθεν της διεπιφάνειας.

B) Αντίσταση διεπιφάνειας σε εφελκυσμό

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται εποξειδική κόλλα συνίσταται να λαμβάνεται ως εφελκυστική αντοχή της διεπιφάνειας η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Στην περίπτωση έμπηξης αγκυρίων, η μέγιστη εφελκυστική αντοχή που μπορεί να αναλάβει το αγκύριο είναι η μικρότερη από τις τιμές που προκύπτουν για τις

παρακάτω περιπτώσεις υπό την προϋπόθεση ότι διατίθεται επαρκές μήκος έμπηξης ($\approx 6-8d_b$, όπου d_b η διάμετρος του αγκυρίου):

- i. Διαρροή του αγκυρίου για μέγιστη εφελκυστική δύναμη $N_y = A_s f_y$ (A_s και f_y εμβαδόν και τάση διαρροής του αγκυρίου αντίστοιχα).
- ii. Αστοχία συνάφειας μεταξύ αγκυρίου και συνδετικού υλικού
- iii. Αστοχία της συνάφειας μεταξύ αγκυρίου και περιβάλλοντος σκυροδέματος

Γ) Διατμητική αντίσταση διεπιφάνειας και αγκύρια υποβαλλόμενα σε διάτμηση

Μπορεί να θεωρείται ότι η διεπιφάνεια διαθέτει συνοχή ίση με την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Δεδομένης όμως της ευαισθησίας την οποία παρουσιάζει η κόλλα σε υψηλές θερμοκρασίες και υγρασία καθώς και στις συνθήκες προετοιμασίας και εφαρμογής, η συμμετοχή της συνοχής αμελείται στην αντίσταση διεπιφάνειας.

Για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής που μπορούν να αναλάβουν τα αγκύρια βασικό κριτήριο αποτελεί το μήκος έμπηξης, η απόσταση μεταξύ αγκυρίων, το μήκος τους, η αντοχή τους, η διάμετρος της διανοιγόμενης οπής και οι ελάχιστες επικαλύψεις που δίνονται από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. (Παρ. 6.1.1.5, 6.1.1.6, 6.1.2.2). *Εφόσον κάποιο/α από τα παραπάνω κριτήρια δεν ικανοποιούνται η συνεισφορά του αγκυρίου στη διατμητική αντοχή αμελείται.*

2.4.13 Επέμβαση με στόχο την αύξηση της φέρουσας ικανότητας έναντι τέμνουσας

Τα τοιχεία υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση παρουσιάζουν τρόπους διατμητικής αστοχίας, όπως αστοχία λόγω διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού (ST), η αστοχία σε λοξή θλίψη του σκυροδέματος στον κορμό πριν ή μετά την καμπτική διαρροή (SC), η αστοχία λόγω ολίσθησης στη βάση (SLS) και η διατμητική αστοχία «κοντών» τοιχείων (squat). Υπάρχει δε περίπτωση να συναντηθεί διατμητική αστοχία λόγω διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού πριν την καμπτική διαρροή. Η διατμητική αστοχία πριν την καμπτική διαρροή αλλά χωρίς να έχει διαρρεύσει ο εγκάρσιος οπλισμός είναι επίσης μια ενδεχόμενη μορφή αστοχίας, ωστόσο δεν έχουν συναντηθεί μέχρι στιγμής στη βιβλιογραφία πειράματα που έχουν διερευνήσει αυτή τη μορφή αστοχίας.

Η ενίσχυση έναντι τέμνουσας ενός στοιχείου Ω.Σ. η οποία απαιτείται λόγω ανεπάρκειας του οπλισμού διάτμησης ($V_s > V_w$), μπορεί να γίνει είτε με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος, είτε με εξωτερικά στοιχεία από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή τα οποία επικολλώνται πλήρως επί του στοιχείου, αναλαμβάνοντας ρόλο οπλισμού διάτμησης, ανάλογου με αυτόν του αντίστοιχου συμβατικού οπλισμού (συνδετήρες).

Τα εξωτερικά στοιχεία μπορούν να έχουν την μορφή επικολλητών φύλλων ή κολλάρων (εξωτερικοί συνδετήρες). Στην περίπτωση χρήσης χάλυβα, τα κολλάρα μπορεί να είναι ράβδοι ή ελάσματα, ενώ στην περίπτωση χρήσης ινοπλισμένου πολυμερούς είναι λωρίδες από υφάσματα ή ελάσματα. Στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. συνιστάται η κατασκευή «κλειστών» ενισχύσεων με την μορφή ολόπλευρων μανδυών ή κολλάρων που περιβάλλουν ολόκληρη τη διατομή του στοιχείου. Στην περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό, πρέπει να επιδιώκεται η πλήρης αγκύρωση του διατμητικού οπλισμού της «ανοικτής» ενίσχυσης στο υφιστάμενο σκυρόδεμα με πρόσθετα στοιχεία σύνδεσης, με επαρκή ικανότητα για την μεταφορά των δυνάμεων στο αρχικό στοιχείο. Πάντως γενικώς δεν επιτρέπονται «ανοικτές» ενισχύσεις με ανεξάρτητα ελάσματα ή υφάσματα ΙΟΠ επικολλημένα στις παρειές του στοιχείου: «Ανοικτές» ενισχύσεις επιτρέπονται μόνο υπό μορφή συνεχούς U.

Στην περίπτωση ενίσχυσης με εξωτερικά στοιχεία από χάλυβα, η τέμνουσα αντοχής σχεδιασμού λόγω οπλισμού διάτμησης υπολογίζεται από την σχέση:

$$V_{Rd,tot} = V_{Rd,s} + V_{jd} \quad (2.53)$$

όπου:

- $V_{Rd,s}$ είναι η τέμνουσα που αναλαμβάνουν οι συνδετήρες του αρχικού στοιχείου
- V_{jd} είναι η τέμνουσα που αναλαμβάνει ο νέος οπλισμός διάτμησης και είναι ίση με:

$$V_{jd} = \sigma_{jd} \rho_j b_w h_{j,ef} (\cot\theta + \cot\alpha) \sin^2\alpha \quad (2.54)$$

όπου:

- σ_{jd} είναι η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης του οπλισμού διάτμησης
- ρ_j είναι το γεωμετρικό ποσοστό του εξωτερικού οπλισμού
- b_w είναι το πλάτος της διατομής
- $h_{j,ef}$ είναι το ενεργό (για την ανάληψη τέμνουσας) ύψος της ενίσχυσης
- θ είναι η γωνία μεταξύ του άξονα του στοιχείου και της διεύθυνσης των αναμενόμενων λοξών ρωγμών, η οποία λαμβάνεται ίση με 45°
- α είναι η γωνία εξωτερικού οπλισμού διάτμησης ως προς τον διαμήκη άξονα του μέλους

Το ποσοστό ρ_j ορίζεται ως:

$$\rho_j = \frac{2A_j}{b_w s_j \sin\alpha} \quad \text{όπου } A_j = t_j \cdot w_j$$

- t_j είναι το πάχος του εξωτερικού οπλισμού
- w_j και s_j είναι το πλάτος και η αξονική απόσταση αντίστοιχα του εξωτερικού οπλισμού στην περίπτωση λωρίδων.

Για $\theta=45^\circ$ και $\alpha=90^\circ$, η σχέση (2.52) απλοποιείται ως εξής:

$$V_{jd} = \sigma_{jd} \rho_j b_w h_{j,ef} = \frac{2A_j}{s_j} h_{j,ef} \sigma_{jd} \quad (2.55)$$

Το $h_{j,ef}$ μπορεί να θεωρηθεί ίσο με $2/3 \cdot d$, όπου d το στατικό ύψος του ενισχυόμενου στοιχείου.

Ως τιμή σχεδιασμού σ_{jd} θεωρείται αυτή που αντιστοιχεί στη *δυσμενέστερη* από τις ακόλουθες δύο μορφές αστοχίας:

I. Αστοχία του υλικού ενίσχυσης

Προκειμένου να αποφευχθεί μια τέτοιου είδους αστοχία θα πρέπει κατά το σχεδιασμό να ισχύει:

$$\sigma_{jd} \leq f_{jk} / \gamma_m$$

όπου f_{jk} είναι η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής του υλικού ενίσχυσης και γ_m ο συντελεστής ασφαλείας του υλικού.

Για συμβατικά υλικά όπως είναι ο χάλυβας οπλισμού (S235) και συνήθεις διατομές υλικού και προσπελασιμότητα διατομής όπου γίνεται η ενίσχυση, ο συντελεστής γ_m μπορεί να ληφθεί ίσος με 1 ή 1,05 και αυξάνεται αναλόγως των επιτόπου δυσχερειών στην εφαρμογή της ενίσχυσης. Επίσης ως f_{jk} λαμβάνεται το συμβατικό όριο διαρροής του χάλυβα f_{yk} . Στην εργασία το όριο διαρροής και η αντοχή σε θραύση του χάλυβα υπολογίστηκαν μέσω εργαστηριακής δοκιμής των πλακών σε εφελκυσμό.

II. Αστοχία λόγω πρόωρης αποκόλλησης του υλικού

Σε μερικές περιπτώσεις όταν το υλικό ενίσχυσης είναι χάλυβας ή ΙΟΠ η αστοχία μπορεί να επέλθει πριν από την εξάντληση της συμβατικής παραμόρφωσης αστοχίας του υλικού, λόγω τοπικής υπερκαταπόνησης σε μια θέση όπου γεφυρώνεται το μεγαλύτερο άνοιγμα μιας *κρίσιμης διατμητικής ρωγμής*. Αυτή η μορφή αστοχίας *αφορά μόνο τις κατά παρέκκλιση επιτρεπόμενες ανοικτές ενισχύσεις που δεν έχουν πρόσθετα ακραία στοιχεία αγκύρωσης*, και η αγκύρωση των άκρων τους εξασφαλίζεται μόνο με πρόσφυση μέσω εποξειδικής κόλλας. Στην περίπτωση «κλειστών» ενισχύσεων, η αστοχία αυτή αποφεύγεται εξασφαλίζοντας την περιμετρική συνέχεια του στοιχείου ενίσχυσης. Αν το υλικό είναι χάλυβας, η συνέχεια θεωρείται ότι εξασφαλίζεται μέσω ηλεκτροσυγκολλήσεων ή μηχανικών συνδέσμων.

Πρόωρη αποκόλληση που συνοδεύεται και από αποφλοιώση του σκυροδέματος μπορεί επίσης να συμβεί λόγω της πολύ μικρότερης διατμητικής αντοχής του σκυροδέματος από την εποξειδική πάστα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗ

3.1 Μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμών

Ως *γεωμετρικά* χαρακτηριστικά ορίζονται το μήκος διάτμησης, οι διαστάσεις της διατομής και οι λεπτομέρειες όπλισης. Ο διαμήκης οπλισμός χαρακτηρίζεται από τη διάμετρο των ράβδων και το ποσοστό του. Ο εγκάρσιος οπλισμός χαρακτηρίζεται από τη διάμετρο των συνδετήρων, την απόσταση μεταξύ τους, τον αριθμό των σκελών κατά τη φορά φόρτισης, το ποσοστό εντός διατομής σκυροδέματος.

Όσον αφορά στα *μηχανικά* χαρακτηριστικά, ορίστηκαν η αντοχή του σκυροδέματος και η τάση διαρροής και αστοχίας του χάλυβα των ράβδων. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η διαμόρφωση του οπλισμού ανάλογα με τους χρησιμοποιούμενους κανονισμούς (EC2-EC8 ή Β.Δ. 59') φαίνονται συγκεντρωτικά στον **Πίνακα 3.5** καθώς και στα αναλυτικά σχέδια και τις επισυναπτόμενες εικόνες κατά το στάδιο κατασκευής των τοιχίων.

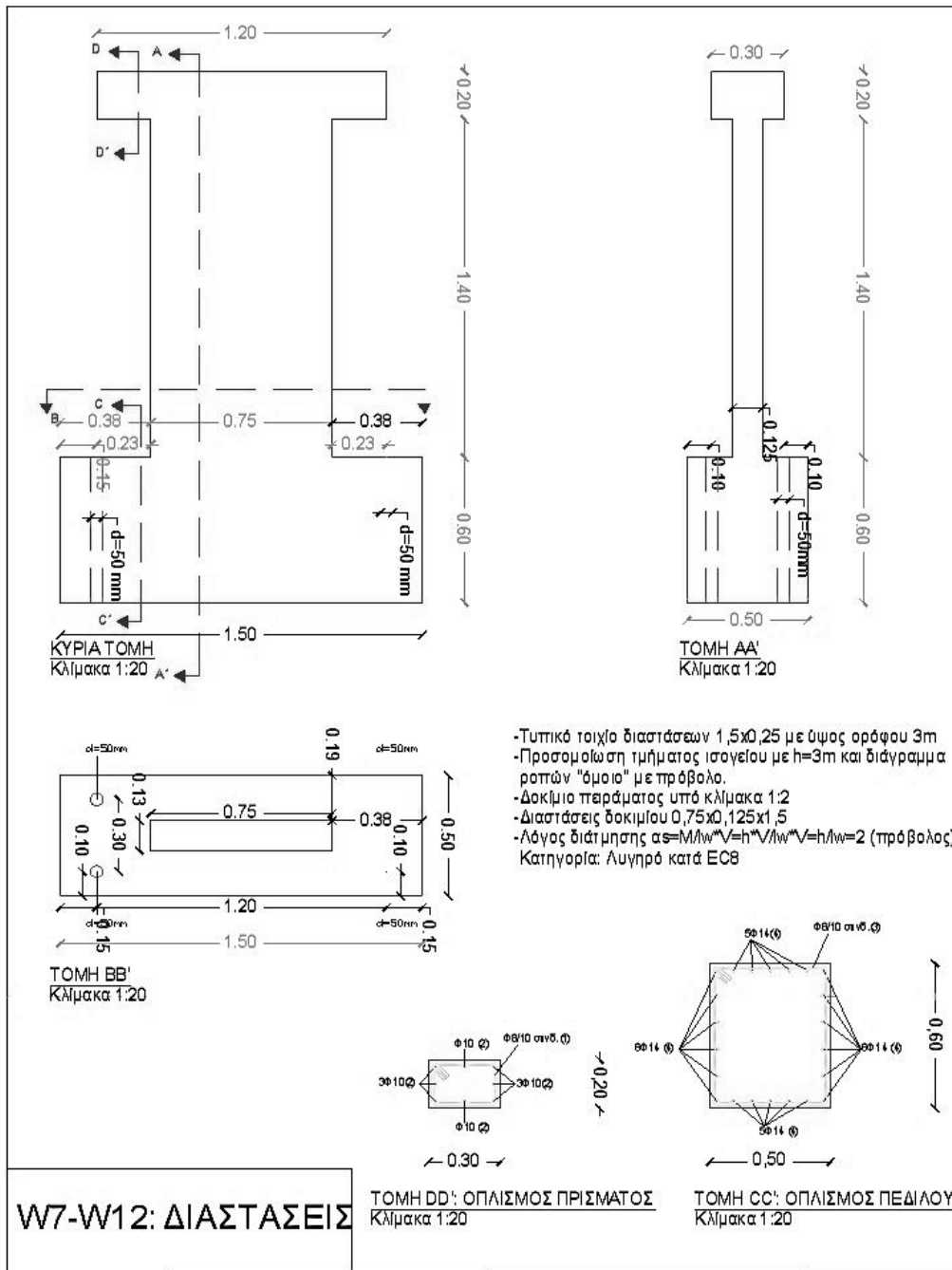
Όλα τα δοκίμια είχαν τις ίδιες διαστάσεις 0,75x0,125x1,5 (m) και κατασκευάστηκαν υπό κλίμακα 1:2, ενώ έχουν λόγο διάτμησης $\alpha_s = M/L_w V = h/L_w = 1,5/0,75 = 2$ (η παραδοχή ότι ο λόγος διάτμησης ισούται με το λόγο του ύψους προς το εγκάρσιο μήκος ισχύει μόνον για θεώρηση του δοκιμίου ως προβόλου και τριγωνικό διάγραμμα ροπών κάμψης). Ο λόγος διάτμησης 2 κατατάσσει το δοκίμιο μεταξύ λυγηρού (για $\alpha_s \geq 2$) και χθαμαλού (για $\alpha_s < 2$) κατά EC8 και μεταξύ του λεγόμενου «κοντού» ($\alpha_s \approx 1-1,5$) και «μεσαίου» ($2 < \alpha_s < 4$) τύπου τοιχίου. Τα κοντά τοιχία παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες ως προς τον τρόπο απόκρισής τους σε σχέση με τα μεσαία ή τα ψηλά, καθώς οι διατμητικές παραμορφώσεις διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην απόκριση και τον τρόπο αστοχίας τους.

Τα τοιχώματα W7 και W8 ορίστηκαν ως τα δοκίμια αναφοράς. Είναι κατασκευασμένα σύμφωνα με τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς, δηλαδή με διαμόρφωση κρυφοϋποστυλωμάτων στα άκρα τους (ικανοποίηση ικανοτικού ελέγχου σε τέμνουσα) και συνδετήρες περίσφιγξης, πυκνό οριζόντιο διατμητικό οπλισμό και αντίστοιχο διαμήκη οπλισμό των περισφιγμένων άκρων και του κορμού, κάτι το οποίο αφενός μεν τους προσδίδει μεγάλη πλαστιμότητα και αντοχή και αφετέρου εξασφαλίζει ότι η καμπτική τους αστοχία θα προηγηθεί της διατμητικής. Ορίζονται έτσι ως «πλάστιμα τοιχώματα», δηλαδή τοιχώματα πακτωμένα στη βάση τους έτσι ώστε να αποτρέπεται η σχετική περιστροφή της βάσης σε σχέση με την θεμελίωσή της και τα οποία ελέγχονται και διαμορφώνονται με ειδικές λεπτομέρειες ώστε να αποδίδουν ενέργεια σε μια ζώνη καμπτικής πλαστικής άρθρωσης η οποία είναι απαλλαγμένη από ανοίγματα ή μεγάλες οπές.

Τα τοιχώματα W9-W12 κατασκευάστηκαν ελαφρώς οπλισμένα, σύμφωνα με παλαιούς κανονισμούς που δεν προβλέπουν την αντισεισμική απόκριση, και ο τρόπος όπλισής τους δεν ικανοποιεί τις διατάξεις του EC2 για ελάχιστο οπλισμό, τόσο οριζόντιο όσο και κατακόρυφο. Τα τοιχία αυτά επομένως δεν διαμορφώνουν κρυφουποστυλώματα στα άκρα τους ούτε διαθέτουν επαρκείς και σε μικρές αποστάσεις περιμετρικούς συνδετήρες. Περιβάλλονται μόνο από αραιούς συνδετήρες κορμού (διαμέτρου Φ8/400mm για τα δοκίμια W9, W10 και Φ6/400mm για τα 11,12) που εξασφαλίζουν μικρή αντίσταση σε λυγισμό των θλιβόμενων διαμήκων ράβδων και έχουν μικρή συμβολή στη διατμητική αντοχή, τα δε τοιχία W9 και W11 έχουν επιπλέον στα άκρα τους ανοικτούς συνδετήρες Φ8/100mm που σε καμία περίπτωση δε συμβάλλουν στην περίσφιγξή τους, αλλά τοποθετήθηκαν ώστε να «πιάνουν» το λυγισμό των ακραίων θλιβόμενων διαμήκων ράβδων.

Κατά συνέπεια, τα δοκίμια αυτά κινδυνεύουν -σύμφωνα με την ανάλυση που γίνεται από τις παραδοχές των σύγχρονων κανονισμών- να αστοχήσουν διατμητικά, λόγω ανεπάρκειας οπλισμού κυρίως και όχι τόσο λόγω λοξής θλίψης κορμού καθώς το σκυρόδεμα είναι καλής ποιότητας αλλά και γιατί δεν είναι ξεκάθαρα «κοντά» τοιχία.

Μία άλλη πολύ συχνή μορφή αστοχίας που είναι δυνατόν να εμφανίσουν τα ανεπαρκώς οπλισμένα τοιχία είναι αστοχία λόγω λυγισμού των ακραίων θλιβόμενων ράβδων τους, καθώς λόγω της αραιής περιμετρικής διάταξης των συνδετήρων και σε συνάρτηση με τη διάμετρο των διαμήκων ράβδων, το μήκος λυγισμού των θλιβόμενων ράβδων είναι αρκετά μεγάλο. Μια τέτοια κατάσταση βεβαίως, μπορεί να θεωρηθεί ως αστοχία εφόσον ο λυγισμός λάβει χώρα απότομα, πριν την πλήρη αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης και σε μικρές παραμορφώσεις.

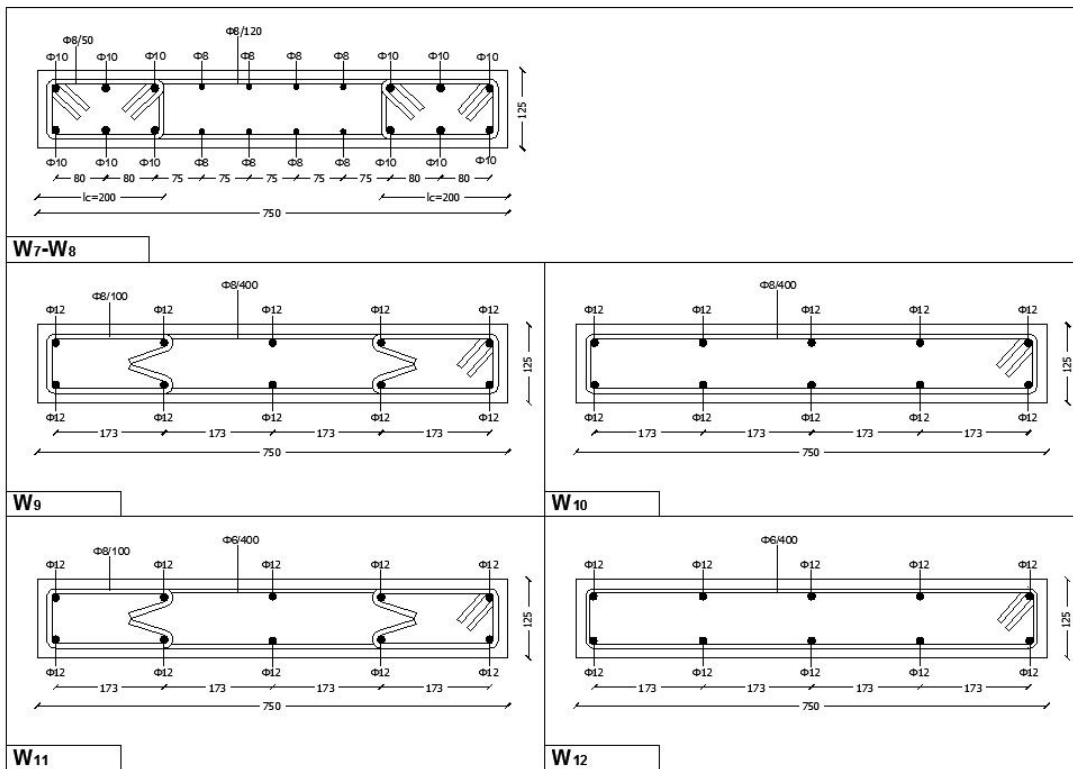


Σχήμα 3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμών

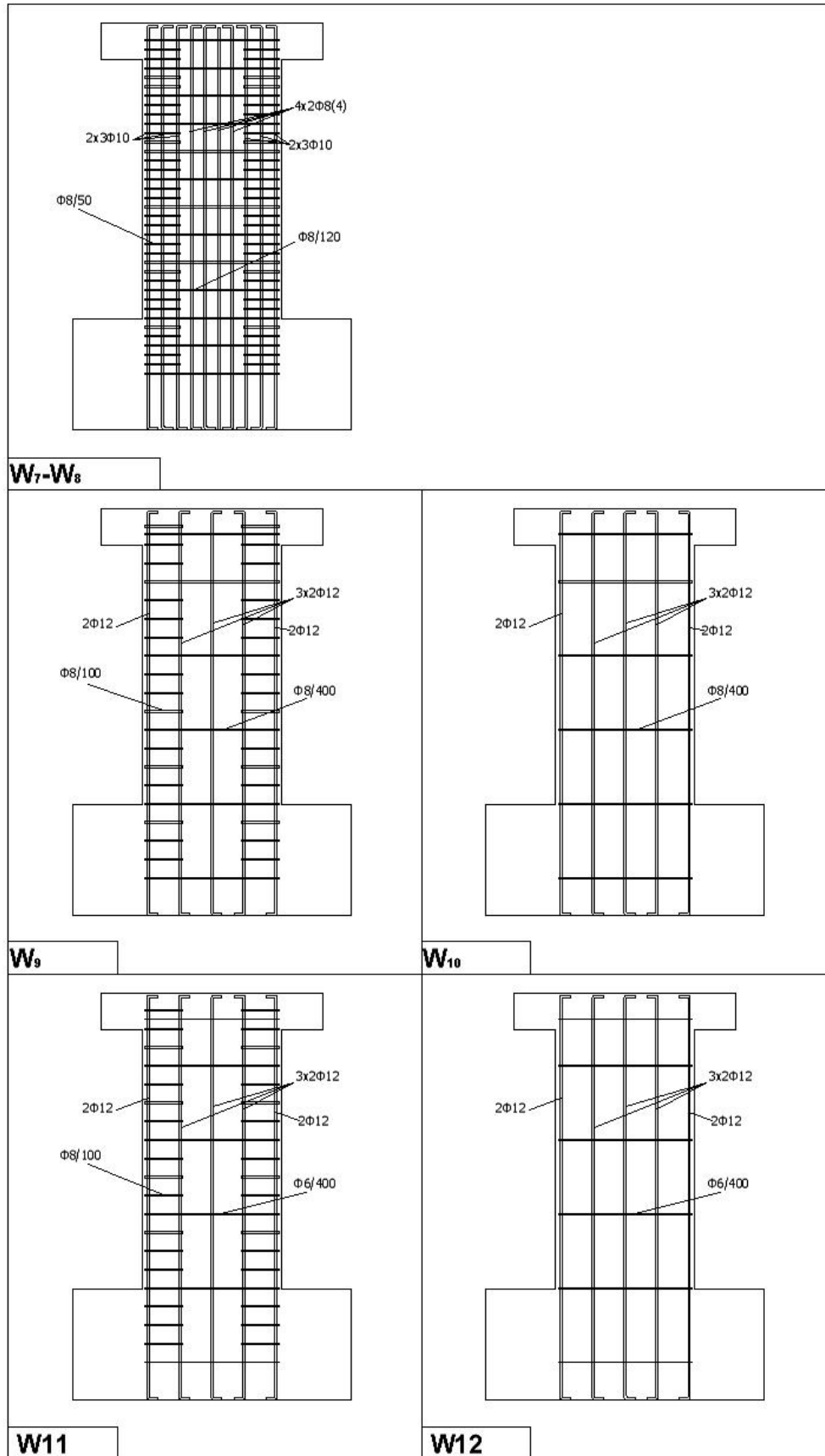
Κεφάλαιο 3: Περιγραφή δοκιμών χωρίς ενίσχυση

Πίνακας 3.2 Διαστασιολόγηση έναντι μεγεθών ορθής έντασης σύμφωνα με τους παλαιότερους (ΕΑΚ-ΕΚΟΣ) και τους νεότερους (ΕΚ8) Κανονισμούς

| | ΕΑΚ – ΕΚΟΣ | ΕΚ8 ΚΠΥ | ΕΚ8 ΚΠΜ | ΕΚ8 ΚΠΧ |
|---|--|--|--|-------------|
| Διαστασιολόγηση έναντι μεγεθών ορθής έντασης: | | | | |
| Ροπές σχεδιασμού: ⁽⁵⁾ | $1.4M_{Ed}/M_{Ed} \leq \eta$ επί ροπή M_{Ed} από ανάλυση, $\geq M_{Ed}/3$, με μήκος μετάθεσης a_1 ⁽⁵⁾ | Αν $H_w/l_w \geq 2$: γραμμική περιβάλλουσα των ροπών M_{Ed} της ανάλυσης, με μήκος μετάθεσης a_1 | | Από ανάλυση |
| Ανηγμ. αξονική $v_d = N_{Ed}/A_c f_{cd}$ ⁽⁶⁾ | - | ≤ 0.35 | ≤ 0.40 | - |
| Διαστασιολόγηση έναντι τέμνουσας: | | | | |
| Πολλαπλασιαστικός συντελεστής e σε V_{Ed} από ανάλυση για σεισμό: ⁽⁶⁾ | $e = 1.4M_{Ed}/M_{Ed} \leq \eta$ | (i) αν $H_w/l_w > 2$ $e = :$ ⁽⁶⁾ $\sqrt{\left(1.2 \frac{M_{Ed}}{M_{Ed}}\right)^2 + 0.1 \left(\frac{S_d(T_c)}{S_d(T_1)}\right)^2} \leq \eta$ (ii) αν $H_w/l_w \leq 2$: $e = 1.2M_{Ed}/M_{Ed} \leq \eta$ | $e = 1.5$ | $e = 1.0$ |
| Τέμνουσα σχεδιασμού τοιχωμάτων δυαδικών συστημάτων με $H_w/l_w > 2$ σε ύψος z από $H_w/3$ έως H_w : ⁽⁷⁾ | Ω ς άνω | $V_{Ed}(z) = \left(\frac{0.75z}{H_w} - \frac{1}{4}\right) \delta V'_{Ed}(0) + \left(1.5 - \frac{1.5z}{H_w}\right) \delta V'_{Ed}\left(\frac{H_w}{3}\right)$ | | |
| V_{Ed} εκτός κρίσιμων περιοχών | $V_{Rd} = 0.8b_w l_w \rho_h f_{td} - V_{cd} (\theta = 45^\circ)$, $V_{cd} = V_{Rd1}$ | Ω ς σε ΕΚ2: $V_{Rd} = 0.8b_w l_w \rho_h f_{wd} \cot \theta$ με $22^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ $V_{cd} = 0$ | | |
| V_{Rd} κρίσιμ. περιοχών - Οριζ. & κατ. οπλισμός κορμού, ρ_h, ρ_v (i) αν $\alpha_s = M_{Ed}/V_{Ed} l_w \geq 2$: $\rho_v = \rho_{v, \min}$, ρ_h από V_{Rd} | $V_{Rd} = 0.8b_w l_w \rho_h f_{td} - V_{cd} (\theta = 45^\circ)$ αν $v_d \leq 0.1$: $V_{cd} = 0.25V_{Rd1}$ αν $v_d > 0.1$: $V_{cd} = 0.7V_{Rd1}$ | Ω ς σε ΕΚ2: $V_{Rd} = 0.8b_w l_w \rho_h f_{wd} \cot \theta$ με $22^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ $V_{cd} = 0$ | | |
| (ii) αν $\alpha_s < 2$: ρ_h από V_{Rd} ρ_v από: ⁽⁸⁾ | V_{Rd} ως άνω αν $2 > \alpha_s > 1.3$: $\rho_v f_{td} \geq \rho_h f_{td} - N_{Ed}/(0.8b_w l_w)$ αν $\alpha_s \leq 1.3$: $\rho_v f_{td} = \rho_h f_{td}$ | $V_{Rd} = V_{Rd1} + 0.75b_w \alpha_s l_w \rho_h f_{td}$ $\rho_v f_{td} \geq \rho_h f_{td} - N_{Ed}/(0.8b_w l_w)$ | V_{Rd} ως σε ΕΚ2: $V_{Rd} = 0.8b_w l_w \rho_h f_{wd} \cot \theta$ με $22^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$, $V_{cd} = 0$ $\rho_v = \rho_{v, \min}$ | |
| $V_{Rd, \max}$ εκτός κρίσιμ. περιοχών | $V_{Rd2} = 0.4(0.7 - f_{ck}(\text{MPa})/200)b_w l_w f_{cd}$ | Ω ς σε ΕΚ2: $V_{Rd, \max} = 0.24(1 - f_{ck}(\text{MPa})/250)b_w l_w f_{cd} \sin 2\theta$ $22^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ 40% της τιμής κατά ΕΚ2 | | |
| $V_{Rd, \max}$ στην κρίσιμη περιοχή | Ω ς άνω | Ω ς σε ΕΚ2 | | |
| Αντοχή σε διαμητική ολίσθηση, με ράβδους συνολικής διατομής A_{s1} υπό γωνία $\pm \phi$ προς οριζόντιο ⁽¹⁰⁾ | Αγνοείται | $V_{Rd3} = A_{s1} f_{td} \cos \phi + A_{s1} \min(0.25f_{td}, 1.3\sqrt{f_{td} f_{cd}}) + 0.3(1 - f_{ck}(\text{MPa})/250)b_w x f_{cd}$ | | - |
| ποσοστό κατακόρυφου οπλισμού ρ_{\min} σε αρμούς διακοπής εργασίας ^{(9), (11)} | $\geq 0.25\%$, $\frac{2.8f_{cd} - \frac{0.7N_{Ed}}{A_c}}{f_{yd}}$ | $\geq 0.25\%$, $\frac{1.3f_{cd} - \frac{N_{Ed}}{A_c}}{f_{yd} + 1.5\sqrt{f_{cd} f_{yd}}}$ | | - 15 |



Σχήμα 3.3 Διαμήκης και οριζόντιος οπλισμών δοκιμών σε εγκάρσια τομή



Σχήμα 3.4 Διαμήκης και εγκάρσιος οπλισμός δοκιμών σε τομή καθύψος

Πίνακας 3.5 Συγκενρωτικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οπλισμός δοκιμών (Παπαϊωάννου 2013)

| α/α | b_w (mm) | l_w (mm) | h_w (mm) | Τρόπος Οπλισής | Ανογμένη αξονική δύναμη N_d | Κατακόρυφος οπλισμός άκρου $\rho_{v,col}$ (%) | Κατακόρυφος οπλισμός κορμού $\rho_{v,web}$ (%) | Συνδετήρες περιφερείς άκρων $\rho_{st,col}$ (%) | Οριζόντιος οπλισμός κορμού $\rho_{h,web}$ (%) | Διαγώνιος οπλισμός ρ_{diag} (%) |
|-----|------------|------------|------------|-------------------------------|-------------------------------|---|--|---|---|--------------------------------------|
| T7 | 0,125 | 0,75 | 1,40 | Διαμόρφωση κρυσταλλοστυλιδίων | 0 | 18,85 | 10,723 | 39,673 | 6,702 | 0 |
| T8 | 0,125 | 0,75 | 1,40 | Διαμόρφωση κρυσταλλοστυλιδίων | 0 | 18,85 | 10,723 | 39,673 | 6,702 | 0 |
| T9 | 0,125 | 0,75 | 1,40 | Αραιή διάταξη συνδετήρων | 0 | - | 12,064 | - | 2,011 | 0 |
| T10 | 0,125 | 0,75 | 1,40 | Αραιή διάταξη συνδετήρων | 0 | - | 12,064 | - | 2,011 | 0 |
| T11 | 0,125 | 0,75 | 1,40 | Αραιή διάταξη συνδετήρων | 0 | - | 12,064 | - | 1,131 | 0 |
| T12 | 0,125 | 0,75 | 1,40 | Αραιή διάταξη συνδετήρων | 0 | - | 12,064 | - | 1,131 | 0 |

Όπου: $\rho_{v,col} = \Sigma A_{st}/A_{cc}$, $A_{cc} = b_w \times a$, $\Sigma A_{st} = \text{άθροισμα κατακόρυφου οπλισμού άκρου}$, $a = \text{μήκος περιεπιγμένης ζώνης}$
 $\rho_{v,web} = \Sigma A_{st}/(b_w \times 2a)$, $\Sigma A_{st} = \text{άθροισμα κατακόρυφου οπλισμού κορμού}$
 $\rho_{h,web} = \Sigma A_{st}/(b_w \times s)$, $s = \text{απόσταση συνδετήρων κορμού}$, $\Sigma A_{st} = \text{εμβαδόν συνδετήρα κορμού}$
 $\rho_{st,col} = (I_{st} \times A_{st,sp}) / (a \times b_w \times s_{st})$, $s_{st} = \text{απόσταση συνδετήρων άκρων}$
 $\rho_{diag} = \Sigma A_{diag} / (b_w \times l_w)$, $\Sigma A_{diag} = \text{άθροισμα διαγώνιου οπλισμού και προς τις δύο διευθύνσεις}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΤΟΧΕΣ ΤΟΙΧΙΩΝ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο αναλυτικός υπολογισμός των αντοχών των δοκιμών πριν την επέμβαση, σύμφωνα με τις κανονιστικές (ΚΑΝ.ΕΠΕ, EC2, EC8 pt.3) σχέσεις και παραδοχές και σύμφωνα με ένα επιπλέον προσομοίωμα υπολογισμού καμπτικής και διατμητικής αντοχής (τροποποιημένο προσομοίωμα UCSO).

4.1 Ιδιότητες σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού

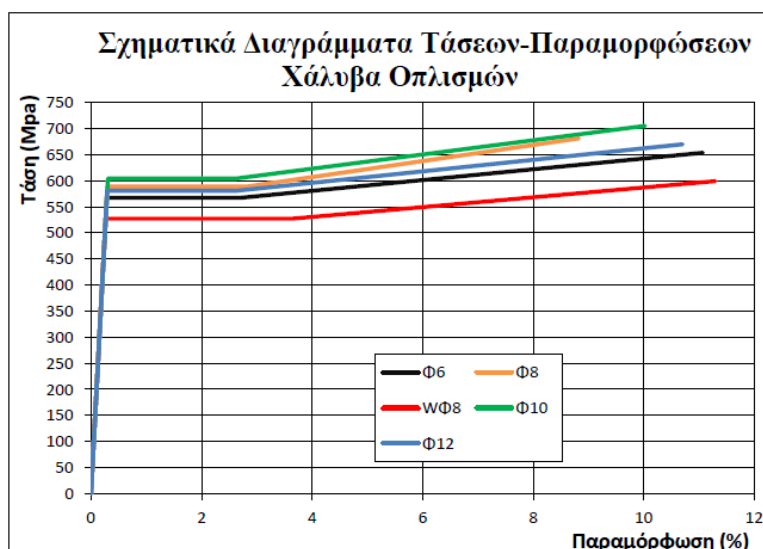
Οι αντοχές και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου σκυροδέματος και χάλυβων έχουν υπολογιστεί με επί τόπου δοκιμές και σκυροδέτηση των δοκιμών στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος από το Νοέμβριο του 2012 έως το Δεκέμβριο του 2012. Η αναλυτική περιγραφή του τρόπου προσδιορισμού των χαρακτηριστικών αυτών περιέχεται στη διπλωματική εργασία του Παπαϊωάννου Δημήτριου-Στυλιανού «Πειραματική διερεύνηση συμπεριφοράς ανεπαρκώς οπλισμένων τοιχωμάτων από Σκυρόδεμα» (Ιουλίου 2013). Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται ως δεδομένα τα αποτελέσματα που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος και των χάλυβων των 6 τοιχωμάτων, ενώ ο υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας γίνεται εκ νέου αναλυτικά.

Ως εκ τούτου, η αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου 15x30 (cm) είναι: $f_{cy1}=31,12 \text{ MPa} \approx 31 \text{ MPa}$. Η καμπτική εφελκυστική αντοχή είναι: $f_{ct,fl}=6,03 \text{ Mpa}$, ενώ η μέση εφελκυστική τάση διάρρηξης προσδιορίστηκε: $f_{ct,sp}=3,35 \text{ Mpa}$. (Παπαϊωάννου 2013)

Ο προσδιορισμός της εφελκυστικής αντοχής του χάλυβα οπλισμών πραγματοποιήθηκε μέσω δοκιμής σε εφελκυσμό έξι ράβδων οπλισμού για κάθε διάμετρο Φ6,Φ8,Φ10,Φ12. Για τον υπολογισμό του οριζόντιου οπλισμού του τοιχίου W8 έγινε μέτρηση διαφορετικής παρτίδας ράβδων διαμέτρου Φ8 (WΦ8). Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών όλων των χάλυβων που έχουν χρησιμοποιηθεί. Επίσης παρατίθεται το Διάγραμμα 4.2 τάσης-παραμόρφωσης των οπλισμών, συνυπολογιζόμενης της κράτυνσης.

Πίνακας 4.1 Μηχανικά χαρακτηριστικά δομικού χάλυβα, μέσες τιμές (Παπαϊωάννου 2013)

| a/a | Τάση διαρροής (MPa) | Παραμόρφωση Διαρροής (%) | Παραμόρφωση στην έναρξη της κράτνσης (%) | Τάση αστοχίας (MPa) | Παραμόρφωση αστοχίας (%) |
|-----|---------------------|--------------------------|--|---------------------|--------------------------|
| Φ6 | 567,44 | 0,28 | 2,72 | 653,56 | 11,06 |
| Φ8 | 588,34 | 0,29 | 2,81 | 680,91 | 8,82 |
| WΦ8 | 527,17 | 0,26 | 3,64 | 599,15 | 11,29 |
| Φ10 | 604,19 | 0,30 | 2,62 | 704,76 | 10,02 |
| Φ12 | 580,45 | 0,29 | 2,63 | 670,01 | 10,70 |



Διάγραμμα 4.2 Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων δομικού χάλυβα (Παπαϊωάννου 2013)

4.2 Καμπτική αντοχή

Για τον υπολογισμό της θλιπτικής δύναμης του απερίσφικτου σκυροδέματος κατά τη διαρροή και αστοχία χρησιμοποιήθηκε ορθογωνικό-παραβολικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων και η δύναμη αυτή υπολογίστηκε σύμφωνα με τις σχέσεις (2.5), (2.6) και (2.7), όπου η τάση f_c του σκυροδέματος είναι η πειραματικώς μετρηθείσα. Για τα τοιχεία W7-W8 που διαθέτουν οπλισμό περίσφιγξης η δύναμη του σκυροδέματος για τον υπολογισμό της ροπής διαρροής (πριν την αποφλοιώση) ισούται με:

$$F_c = f_{cm,c} \cdot b \cdot x \cdot \left[\frac{x}{x_{c2}} - \frac{x^2}{3x_{c2}^2} \right] \quad (4.1)$$

όπου: x το ύψος της θλιβόμενης ζώνης, b το πλάτος της διατομής, $f_{cm,c}$ η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος κατά τη σχέση (2.47) που δίνεται από το προσομοίωμα περίσφιγξης του ΚΑΝ.ΕΠΕ, $\varepsilon_{c2,c}$ η παραμόρφωση «διαρροής» του σκυροδέματος κατά τη σχέση (2.48), $x_{c2} = x \cdot \frac{\varepsilon_{c2,c}}{\varepsilon_{c,y}}$ και $\varepsilon_{c,y}$ η παραμόρφωση του σκυροδέματος κατά τη διαρροή του πλέον εφελκόμενου οπλισμού.

Η δύναμη του σκυροδέματος για τον υπολογισμό της ροπής αντοχής του περισφιγμένου πυρήνα είναι:

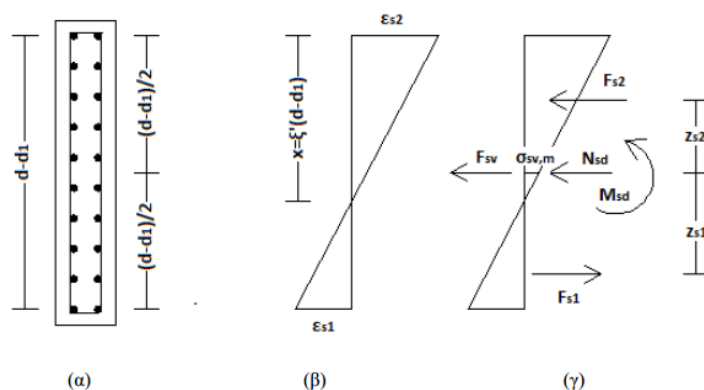
$$F_c = f_{cm,c} \cdot b_c \cdot x \cdot \left[1 - \frac{\varepsilon_{c2,c}}{3 \cdot \varepsilon_{c,u}} \right] \quad (4.2)$$

όπου $\varepsilon_{c,u}$ η παραμόρφωση σκυροδέματος (μικρότερη ή ίση της παραμόρφωσης αστοχίας του περισφιγμένου πυρήνα $\varepsilon_{cu,c}$) που αντιστοιχεί στην αστοχία της διατομής, που όπως προκύπτει από την ανάλυση επέρχεται κατά τη θραύση του πλέον εφελκόμενου οπλισμού, και μετά την αποφλοίωση του μη περισφιγμένου σκυροδέματος, και b_c το πλάτος του περισφιγμένου πυρήνα.

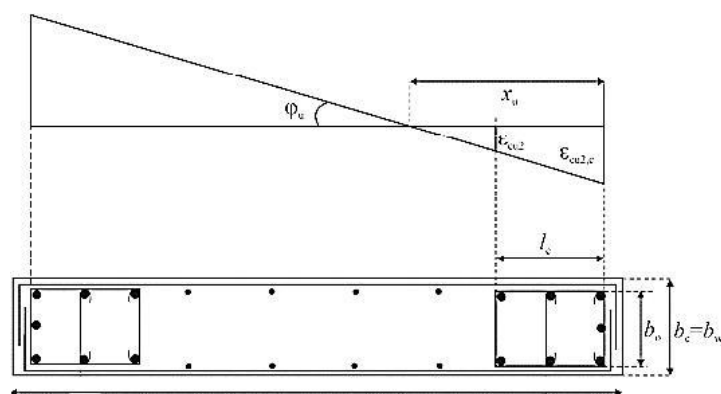
Για τον υπολογισμό της δύναμης του οπλισμού χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις (2.13) και (2.14). Το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των «κρίσιμων» δοκιμίων W10 και W12 που θα ενισχυθούν ήταν το πειραματικό, οριζόντιο μέχρι κάποια παραμόρφωση μετά τη διαρροή (πλατώ διαρροής), και κεκλιμένο μετά το πλατώ ως την αστοχία, με κλίση k (βλέπε Παρ. 2.3).

Η ροπή αντοχής M_u προέκυψε μετά από διαδοχικές δοκιμές ώστε να ικανοποιηθεί η εξίσωση ισοδυναμίας εσωτερικών-εξωτερικών δυνάμεων από τις σχέσεις (2.15) έως (2.18β) και σύμφωνα με τις παραδοχές για κάμψη ορθογωνικής διατομής της Παραγράφου 2.2.3. Για μια τυπική ορθογωνική διατομή τοιχώματος και ομοιόμορφα κατανεμημένο οπλισμό, παρατίθεται το **Σχήμα 4.3** που δείχνει ένα διάγραμμα ισοδυναμίας εσωτερικών-εξωτερικών δυνάμεων και ένα διάγραμμα ανηγμένων παραμορφώσεων σε μια τέτοια διατομή. Για τα τοιχώματα με διαμόρφωση κρυφούποστρωμάτων παρατίθεται το ενδεικτικό διάγραμμα ανηγμένων παραμορφώσεων του **Σχήματος 4.4** στην κατάσταση αστοχίας για αποφλοίωση του σκυροδέματος και παραμόρφωση του περισφιγμένου σκυροδέματος στην οριακή τιμή της.

Για στατικό σύστημα προβόλου, η τέμνουσα στην καμπτική αντοχή, V_{Mu} είναι ίση με M_u/L_v , όπου L_v το μήκος διάτμησης που λαμβάνεται ίσο με το ύψος του τοιχώματος h . Ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων, ορίζεται ως: $z = M/\Sigma F_{\theta\lambda}$. (για ροπή υπολογισμένη ως προς το κέντρο βάρους του πλέον εφελκόμενου οπλισμού, εφόσον η αξονική δύναμη είναι μηδενική).



Σχήμα 4.3 Διάγραμμα παραμορφώσεων (β) και ισοδυναμία εσωτερικών-εξωτερικών δυνάμεων (γ) στην περίπτωση ομοιόμορφα κατανεμημένου οπλισμού τοιχίου (α) (Γραμματικού Σ.Ε., 2013)



Σχήμα 4.4 Οριακές παραμορφώσεις σε τοίχωμα με διαμόρφωση κρυφοϋποστλωμάτων εντός της περισιγμένης ζώνης (Τρέζος, 2010)

4.3 Ροπή διαρροής και Ενεργός δυσκαμψία

Δεν υπάρχει ένας μοναδικός ορισμός για το σημείο διαρροής εκτός από την περίπτωση που η περιβάλλουσα του διαγράμματος δύναμης-μετακίνησης είναι όντως διγραμμική. Διάφοροι ορισμοί για τη μετακίνηση διαρροής έχουν χρησιμοποιηθεί από τους ερευνητές, όπως η μετακίνηση κατά την πρώτη διαρροή ράβδου του εφελκόμενου οπλισμού.

Στην περίπτωση ωστόσο πολλών στρώσεων οπλισμών, όπως στα τοιχώματα, το θεωρητικό αλλά και πραγματικό σημείο διαρροής είναι πιο περίπλοκη υπόθεση, καθώς μπορεί να θεωρηθεί είτε ότι η διαρροή συνίσταται στη διαρροή της στάθμης του πλέον εφελκόμενου χάλυβα, είτε με ροπή και παραμόρφωση διαρροής υπολογισμένες από εμπειρικές σχέσεις όπως αυτές που υιοθετεί ο ΚΑΝ.ΕΠΕ και το σημείο διαρροής αναφέρεται στη διαρροή των πλέον εφελκόμενων οπλισμών ή των πλέον θλιβόμενων ινών, είτε τέλος, μέσω συμβατικής διγραμμικοποίησης με θεώρηση ίσων εμβαδών του ιδεατού διγραμμικού διαγράμματος (με μηδενική ή θετική κλίση του κλάδου μετά τη διαρροή) και του αντίστοιχου πολυγραμμικού διαγράμματος που αποτυπώνει σταδιακά τα σημεία διαρροής από την πρώτη στάθμη διαρροής οπλισμού

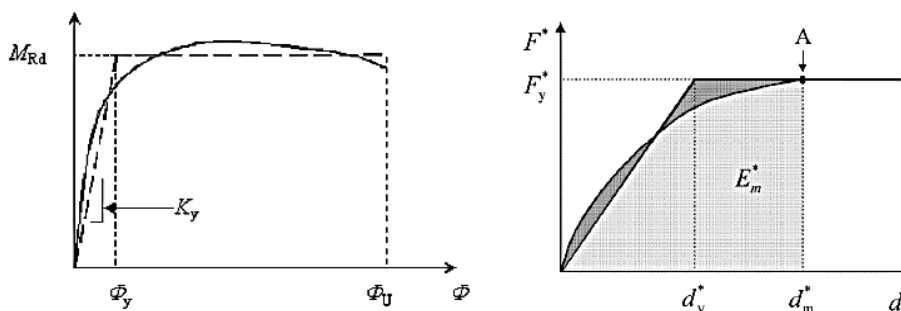
ως τη «διαρροή» του σκυροδέματος και την τελική αστοχία. Η θεώρηση αυτή είναι μάλλον πιά κοντά στην πραγματικότητα για διατομές πολλών στρώσεων οπλισμού καθώς η πλήρης καμπύλωση του διαγράμματος, $P-\delta$, συμβαίνει μετά τη διαρροή της άμεσης γειτονίας των ακραίων εφελκόμενων ράβδων ή των ακραίων θλιβόμενων ινών περιλαμβανομένου και τμήματος του διαμήκους οπλισμού κορμού.

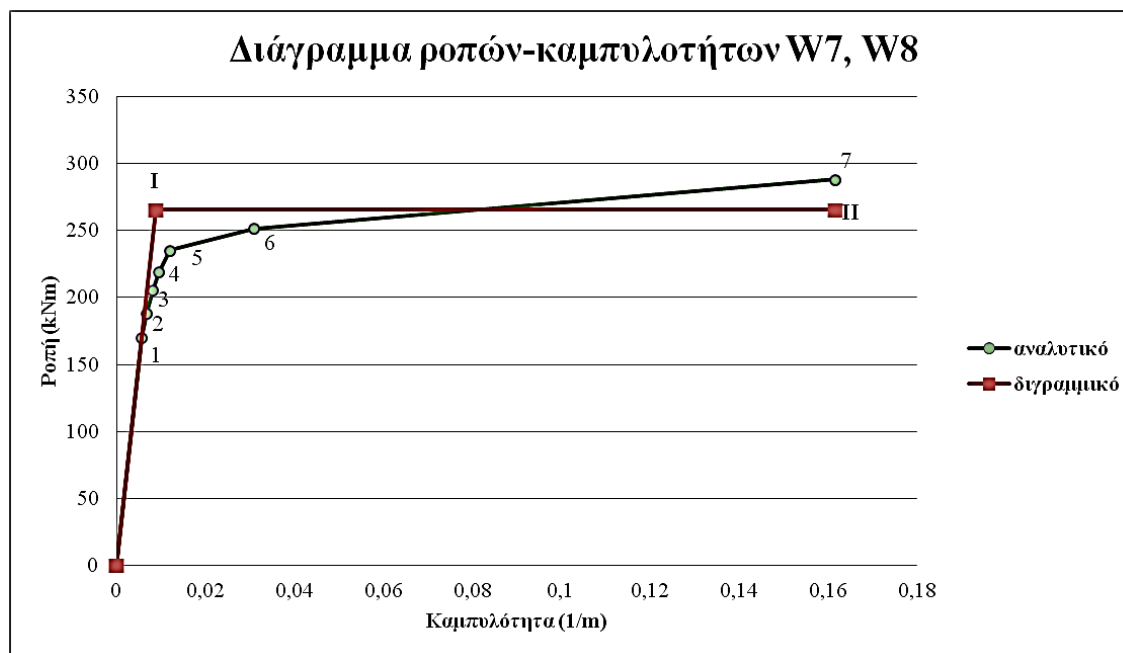
Στην τελευταία προσέγγιση, η θεωρητική καμπυλότητα αστοχίας του διγραμμικού και του πολυγραμμικού διαγράμματος αποτελεί σταθερό μέγεθος που ισούται με το λόγο της παραμόρφωσης σκυροδέματος τη στιγμή της αστοχίας προς το ύψος της θλιβόμενης ζώνης και αντιστοιχεί στη ροπή αντοχής που προκύπτει από την ισοδυναμία των εσωτερικών-εξωτερικών δυνάμεων. Ακόμη, η κλίση του ιδεατού διαγράμματος ταυτίζεται με την κλίση που αντιστοιχεί στην διαρροή του πλέον εφελκόμενου οπλισμού στο πολυγραμμικό διάγραμμα και, τέλος, και στα δύο διαγράμματα παρακάμπτεται το σημείο της πρώτης ρηγμάτωσης καθώς θεωρούμε ότι κατά τη σεισμική δράση οι διατομές είναι ήδη ρηγματωμένες.

Τέλος, ως μεταβλητές θεωρούνται η ροπή και καμπυλότητα διαρροής, δίνεται μια αρχική τιμή στην καμπυλότητα διαρροής και μέσω διαδοχικών δοκιμών προκύπτει η τελική καμπυλότητα και ροπή διαρροής ($M_y = \tan\theta \cdot (1/r)_y$) ώστε να ικανοποιείται η εξίσωση των δύο εμβαδών. Όπως προέκυψε, η ροπή διαρροής (και αστοχίας εφόσον το διάγραμμα είναι μετελαστικά οριζόντιο), αντιστοιχεί περίπου στο 95% της ροπής αντοχής όπως προκύπτει από τις αναλυτικές εξισώσεις ισοδυναμίας κατά την αστοχία.

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής παρουσιάζονται και συγκρίνονται οι τρεις προαναφερθέντες τρόποι προσέγγισης της διαρροής. Παρακάτω παρατίθενται η διγραμμικοποίηση για τα τοιχία W7-W8 και W9-W12 (Διάγραμμα 4.6, Σχήμα 4.7, Διάγραμμα 4.8, Σχήμα 4.9) καθώς και η ροπή και καμπυλότητα διαρροής κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ (Πίνακας 4.10), υπολογισμένες από τις σχέσεις (2.41) και (2.43). Τα δοκίμια W9, W11 και W12 έχουν ίδια καμπτική αντοχή με το W10 καθώς έχουν όλα διαμήκεις οπλισμούς $\Phi 12/173$. Τέλος, δίνεται ο συγκεντρωτικός πίνακας των αντοχών για όλα τα δοκίμια (Πίνακας 4.11). Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το προσομοίωμα διγραμμικοποίησης που προτείνει ο Ευρωκώδικας 8.

Σχήμα 4.5 Η διγραμμική προσέγγιση του EC8 για διαγράμματα $M-\phi$ και καμπύλες αντίστασης κατασκευής (Καραγιάννης Γ./ Κάππος Α.Ι., 2009)



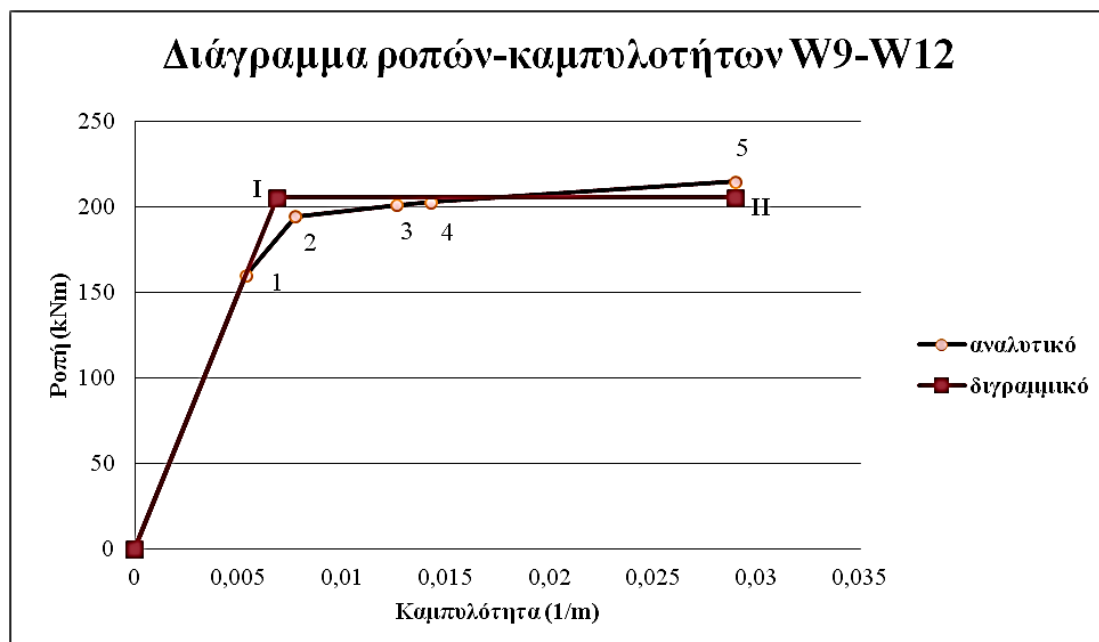


Διάγραμμα 4.6 Διγραμμικό και πολυγραμμικό διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων τοιχίων W7, W8

Πίνακας 4.7 Διγραμμικοποίηση διαγράμματος (M-φ) W8 με εξίσωση εμβαδών

| Σημείο | Ροπή (kNm) | Καμπυλότητα 1/r (m ⁻¹) |
|--------|------------|------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 169,93 | 0,0057 |
| 2 | 188,46 | 0,0067 |
| 3 | 205,49 | 0,0080 |
| 4 | 218,78 | 0,0095 |
| 5 | 235,35 | 0,0120 |
| 6 | 249,87 | 0,0323 |
| 7 | 288,15 | 0,1616 |
| 0 | 0 | 0 |
| I | 265,46 | 0,0089 |
| II | 265,46 | 0,1616 |

Τα σημεία 1, 2, 3, 4, 5 αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τη σταδιακή διαρροή της πρώτης, δεύτερης, τρίτης, τέταρτης και πέμπτης στάθμης εφελκόμενου οπλισμού, το σημείο 6 αντιστοιχεί στην «διαρροή» του περισφιγμένου σκυροδέματος η οποία υπολογίστηκε ίση με 3,85%, και το σημείο 7 αντιστοιχεί στη ροπή αντοχής η οποία προέκυψε για θραύση της ακραίας εφελκόμενης στάθμης οπλισμών για παραμόρφωση αστοχίας χάλυβα $\epsilon_{su} = 100,2\%$ και αντίστοιχη παραμόρφωση αποφλοιωμένου σκυροδέματος $\epsilon_{c,u} = 15\% < \epsilon_{cu,c} = 25,17\%$. Τα σημεία I και II είναι οι προκύπτουσες τιμές από την εξίσωση εμβαδών πολυγραμμικού και διγραμμικού διαγράμματος.



Διάγραμμα 4.8 Δειγματικό και πολυγραμμικό διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων τοιγίων W9-W12

Ομοίως, τα σημεία 1, 2, 3 αντιπροσωπεύουν τη σταδιακή διαρροή των σταθμών εφελκόμενου οπλισμού 1,2 και 3 αντίστοιχα, το σημείο 4 αντιστοιχεί στη «διαρροή» του απερίσφιγτου σκυροδέματος (λαμβάνεται ίση με 2‰) και το σημείο 5 αντιστοιχεί στην αστοχία της διατομής, για συμβατική παραμόρφωση σκυροδέματος $\epsilon_{cu} = 3,5\%$.

Οι καμπυλότητες στις διάφορες φάσεις υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\frac{1}{r} = \frac{\epsilon_c}{x} = \frac{\epsilon_{si}}{di-x},$$

όπου ϵ_{si} , di η παραμόρφωση και το στατικό ύψος αντίστοιχα (απόσταση του κέντρου βάρους των διαμήκων ράβδων από την ακραία θλιβόμενη ίνα) της υπό διαρροή ή αστοχία στάθμης οπλισμού.

Πίνακας 4.9 Δειγματικοποίηση διαγράμματος (M-φ) W9-W12 με εξίσωση εμβαδών

| Σημείο | Ροπή (kNm) | Καμπυλότητα 1/r (m ⁻¹) |
|--------|------------|------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 159,58 | 0,0053 |
| 2 | 194,30 | 0,0078 |
| 3 | 200,97 | 0,0126 |
| 4 | 202,72 | 0,0142 |
| 5 | 214,60 | 0,0290 |
| I | 205,37 | 0,0069 |
| II | 205,37 | 0,0290 |

Από τη σχέση (2.43) του ΚΑΝ.ΕΠΕ,

$$\frac{M_y}{bd^3} = \left(\frac{1}{r}\right)_y \left\{ E_c \frac{\xi_y^2}{2} \left(0,5(1 + \delta') - \frac{\xi_y}{3} \right) + \left[(1 - \xi_y)\rho + (\xi_y - \delta')\rho' + \frac{\rho_v}{6}(1 - \delta') \right] (1 - \delta') \frac{E_s}{2} \right\}$$

συντάσσεται ο Πίνακας 4.10:

Πίνακας 4.10 Ροπή και καμπυλότητα διαρροής κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ

| W8 | | W9-W12 | |
|---|--------------|---|---------------|
| b (m) | 0,125 | b (m) | 0,125 |
| f _y (MPa) | 604 | f _y (MPa) | 580 |
| E _s (MPa) | 200.000 | E _s (MPa) | 200.000 |
| E _{cm} (GPa) | 34,18 | E _{cm} (GPa) | 30,89 |
| d'(m) | 0,0275 | d' (m) | 0,029 |
| d(m) | 0,7225 | d (m) | 0,722 |
| δ' | 0,038 | δ' | 0,040 |
| ρ | 0,002 | ρ | 0,003 |
| ρ' | 0,002 | ρ' | 0,003 |
| ρ _v | 0,011 | ρ _v | 0,008 |
| α | 5,851 | α | 6,474 |
| A | 0,015 | A | 0,013 |
| B | 0,008 | B | 0,007 |
| ξ _y | 0,226 | ξ _y | 0,220 |
| (1/r) _y (m ⁻¹) = | 0,0054 | (1/r) _y (m ⁻¹) = | 0,0052 |
| M_y (kNm) = | 184,4 | M_y (kNm) = | 165,21 |

Στον παραπάνω πίνακα, η τάση για το περισφιγμένο σκυρόδεμα υπολογίζεται κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.:

$$E_{cm(W9-W12)} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} = 22 \cdot \left(\frac{31}{10}\right)^{0,3}$$

$$E_{cm(W8)} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm,c}}{10}\right)^{0,3} = 22 \cdot \left(\frac{43,44}{10}\right)^{0,3}$$

$$f_{cm,c} = f_{cm}(1,125 + 1,25\alpha\omega_w) = 31(1,125 + 1,25 \cdot 0,3448 \cdot 0,6287)$$

$$\text{για } \alpha\omega_w \geq 0,1$$

Πίνακας 4.11 Καμπτική διαρροή και αντοχή όλων των δοκιμίων σύμφωνα με τους τρεις τρόπους επίλυσης

| α/α | Αναλυτικά (με κεκλιμένο δεύτερο κλάδο, EC2) | | | | ΚΑΝ.ΕΠΕ | | Συμβατικά (με οριζόντιο δεύτερο κλάδο, EC8) | |
|-----|---|---------|----------|---------|-------------|------------|---|------------|
| | My (kNm) | Py (kN) | Mu (kNm) | Pu (kN) | My=Mu (kNm) | Py=Pu (kN) | My=Mu (kNm) | Py=Pu (kN) |
| W7 | 168,55 | 112,36 | 289,46 | 192,97 | 184,50 | 123,00 | 267,42 | 178,28 |
| W8 | 169,93 | 113,29 | 288,15 | 192,10 | 184,40 | 122,93 | 265,46 | 176,97 |
| W9 | 159,58 | 106,39 | 214,60 | 143,07 | 165,21 | 110,14 | 205,36 | 136,91 |
| W10 | 159,58 | 106,39 | 214,60 | 143,07 | 165,21 | 110,14 | 205,36 | 136,91 |
| W11 | 159,58 | 106,39 | 214,60 | 143,07 | 165,21 | 110,14 | 205,36 | 136,91 |
| W12 | 159,58 | 106,39 | 214,60 | 143,07 | 165,21 | 110,14 | 205,36 | 136,91 |

Ενεργός Δυσκαμψία

Η πλησιέστερη στην πραγματική εκτίμηση της ενεργού δυσκαμψίας του μήκους διάτμησης, ώστε να ληφθεί υπόψη η απομείωση της γεωμετρικής δυσκαμψίας (EI_g) ενός μέλους κατά τη ρηγμάτωση του, για ένα διγραμμικό μοντέλο δύναμης-παραμόρφωσης μέλους ΟΣ υπό μονοτονική κυρίως φόρτιση, είναι η επιβατική δυσκαμψία του μήκους διάτμησης μέχρι το σημείο διαρροής του μέλους και υπολογίζεται από τη σχέση (2.27):

$$EI_{eff} = \frac{M_y L_v}{3 \theta_y}$$

Ως M_y στη σχέση υπολογισμού ορίστηκε α) η ροπή διαρροής στο διγραμμικό μοντέλο Μ-θ (ή V-δ) β) η ροπή διαρροής κατά τη διαρροή του πρώτου εφελκόμενου οπλισμού και γ) η διάμεσος τιμή της ροπής διαρροής κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ πολλαπλασιασμένη με ένα διορθωτικό συντελεστή 1,03 (Μπισκίνης Δ.Ε 2007). Η τελική τιμή της ενεργού δυσκαμψίας, για πρόβολο μήκους L δίνεται από τη σχέση:

$$K_{eff} = \frac{3EI_{eff}}{L^3} \quad (4.3)$$

Δίνεται ο πίνακας με τις τιμές της γεωμετρικής και της ενεργού δυσκαμψίας ανάλογα με την θεωρητική παραδοχή για τη ροπή διαρροής.

Πίνακας 4.12 Ενεργός και γεωμετρική δυσκαμψία ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού της διαρροής

| | | W8 | W9-10 | W11-12 |
|---------------------------|-----------|---------|---------|---------|
| K _{eff} . (kN/m) | Αναλυτικά | 12800,8 | 12228,4 | 12228,4 |
| | ΚΑΝ.ΕΠΕ | 14737,6 | 12976,3 | 12976,3 |
| | Συμβατικά | 13718,9 | 12676,5 | 12676,5 |
| K _g . (kN/m) | | 120808 | 120808 | 120808 |

4.4 Παραμορφώσεις διαρροής και αστοχίας - πλαστιμότητα

Ο καθολικός δείκτης συμπεριφοράς q ενός δομήματος, διαμορφώνεται από το γινόμενο του παράγοντα υπεραντοχής q_u και του παράγοντα πλαστιμότητας q_p . Ο δείκτης υπεραντοχής, που εκφράζεται σε όρους δυνάμεων, ισούται με τον λόγο της τέμνουσας βάσης V_u κατά το σεισμό που οδηγεί σε γενικευμένη διαρροή πολλών δομικών στοιχείων (έναρξη μηχανισμού ορόφου) ως προς τη δύναμη V_1 που οδηγεί σε διαρροή (υπό κάμψη γενικά) του πρώτου πρωτεύοντος δομικού στοιχείου του «κρίσιμου ορόφου» (του πλέον καταπονούμενου δηλαδή ορόφου κυρίως στα πρωτεύοντα στοιχεία του). Άρα ο παράγοντας υπεραντοχής αναφέρεται στην συνολική κατασκευή.

Ο παράγων πλαστιμότητας q_p εκφράζεται σε όρους παραμόρφωσης (στροφής ή μετακίνησης) και ισούται με το λόγο της οριακής παραμόρφωσης αστοχίας ως προς την παραμόρφωση γενικευμένης διαρροής, έναρξης δημιουργίας μηχανισμού ορόφου, με μετακινήσεις αναφερόμενες στην κορυφή ενός δομήματος, ή στην περιοχή εφαρμογής της συνολικής συνισταμένης σεισμικής δύναμης. Μέσω των παραγόντων αυτών είναι δυνατή η εκτίμηση της απαιτούμενης πλαστιμότητας σε όρους μετακίνησης ή στροφής χορδής σε επίπεδο ορόφου, και μέσω αυτής, της απαιτούμενης πλαστιμότητας για τα επιμέρους πρωτεύοντα στοιχεία του ορόφου.

Για ένα μεμονωμένο μέλος όπως είναι ένα τοιχίο που έχει κατασκευεί ως πρωτεύον στοιχείο του κρίσιμου ορόφου ενός μελλοντικού δομήματος (δηλαδή τοιχία που θα αναλάβουν πάνω από το 60% της τέμνουσας βάσης), η τιμή του δείκτη πλαστιμότητας μπορεί να εκφραστεί σε *απαιτούμενη πλαστιμότητα του κρίσιμου ορόφου σε όρους μετακίνησης ή στροφής χορδής*, $\mu_{d,op} \approx \mu_{\theta,op}$.

Η τιμή του $\mu_{d,op} \approx \mu_{\theta,op}$ μπορεί να εκφραστεί σε όρους πλαστιμότητας καμπυλοτήτων της κρίσιμης περιοχής ενός πρωτεύοντος στοιχείου με την προϋπόθεση όμως ότι η συμπεριφορά του είναι πλάστιμη και όχι ψαθυρή, δηλαδή ότι θα αναπτύξει πλαστική και όχι θραυστική άρθρωση στο άκρο του.

Στην παρούσα εργασία επομένως, λόγω της μορφής των δοκιμίων που πραγματεύεται, κρίσιμος είναι ο παράγοντας του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους μετακινήσεων ή στροφών. Για το σκοπό αυτό υπολογίζονται οι γωνίες στροφής χορδής στη διαρροή και την αστοχία σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ και τον EC8.

Η καμπυλότητα διαρροής υπολογίστηκε έτσι:

α) μέσω εξισώσεων ισοδυναμίας σε επίπεδο διατομής (για θεώρηση διαρροής διατομής τη διαρροή της πλέον εφελκόμενης στάθμης) και είναι ίση με:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_y = \frac{\varepsilon_c}{x}$$

β) με βάση την κλειστού τύπου σχέση (2.39) του ΚΑΝ.ΕΠΕ (καθοριστική της διαρροής σε κάθε δοκίμιο προκύπτει η εξάντληση της τάσης διαρροής του χάλυβα):

$$\left(\frac{1}{r}\right)_y = \frac{f_y}{[E_s(1 - \xi_y)d]}$$

Οι σχέσεις αυτές (α, β) είναι ισοδύναμες αλλά η κάθε μία χρησιμοποιείται ανάλογα με τα δεδομένα που είναι κάθε φορά διαθέσιμα ή τη μέθοδο εκτίμησης.

γ) μέσω δοκιμών κατά τη διγραμμικοποίηση του πολυγραμμικού διαγράμματος ροπών-καμπυλοτήτων ώστε να ικανοποιείται η εξίσωση εμβαδών της πολυγραμμικής καμπύλης συμπεριφοράς της διατομής και της συμβατικής διγραμμικοποιημένης.

-Η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (2.52):

$$\theta_y = \left(\frac{1}{r}\right)_y \frac{L_s + a_v z}{3} + 0,0013 + \frac{\left(\frac{1}{r}\right)_y d_b f_y}{8\sqrt{f_c}}$$

Η παραπάνω εξίσωση, έχει επιλυθεί για καμπυλότητες διαρροής σύμφωνα με τους τρόπους (α), (β) και (γ), ο συντελεστής a_v λαμβάνεται σε όλες τις περιπτώσεις ίσος με 1 καθώς σε καμία περίπτωση δεν προηγείται η λοξή ρηγμάτωση των τοιχιών της καμπτικής διαρροής (δηλαδή $V_{My} > V_{Rd,c}$), το μήκος διάτμησης L_s είναι 1,5m, το μήκος z λαμβάνεται ίσο με 0,8h για παραδοχή λοξής ρηγμάτωσης 45°, η μέση διάμετρος εφελκόμενου οπλισμού είναι για τα τοιχία 9-12 ίση με 0,012m ενώ για τα τοιχία 7, 8 είναι ίση με 0,01m, η μέση θλιπτική τάση του σκυροδέματος, f_{cm} , είναι για το τοιχίο W7 ίση με 44,42MPa, για το τοιχίο W8 ίση με 43MPa, και για τα τοιχία W9-W12 ίση με 31MPa και τέλος, η μέση τιμή τάσης διαρροής των οπλισμών λαμβάνεται για τα δοκίμια 7-8 ίση με 604MPa (Φ10) και για τα δοκίμια 9-12 λαμβάνεται 580MPa (Φ12).

-Η μετατόπιση διαρροής ορίζεται ως το γινόμενο του μήκους διάτμησης επί τη γωνία στροφής χορδής στη διαρροή, δηλαδή $\delta_y = \theta_y \cdot L_s$.

-Η γωνία στροφής χορδής στην αστοχία για όλα τα τοιχία υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση (2.30) κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. και EC8, χωρίς συντελεστή γ_{el} καθώς δεν κάνουμε σχεδιασμό αλλά αποτίμηση, πολλαπλασιασμένη επί 0,58, όπως προβλέπεται από τους κανονισμούς για τοιχώματα, και είναι:

$$\theta_{um} = 0,00928 (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} \min \left(9; \frac{Lv}{h} \right)^{0,35} 25 \left(a_{\rho_{sx}} \frac{f_{yw}}{f_c} \right) (1,25^{100\rho_d})$$

Για τα τοιχώματα 9-12 που έχουν διαστασιολογηθεί με τους παλαιούς κανονισμούς η παραπάνω εξίσωση διαιρείται επιπλέον με 1,2:

$$\theta_{um} = 0,00734 (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01;\omega')}{\max(0,01;\omega)} f_c \right]^{0,225} \min \left(9; \frac{Lv}{h} \right)^{0,35} 25 \left(a \rho_{sx} \frac{f_{yw}}{f_c} \right) (1,25^{100\rho_d})$$

Για τα τοιχία W7-W8:

- $\nu=0$
- $\omega'=0,02366$
- $\omega=0,17884$
- $f_c=44,42\text{MPa}$
- $L_v/h=2$
- $\alpha=0,34481$
- $\rho_{sx}=0,03217$
- $f_{yw}=588,34\text{MPa}$ (W7) και $f_{yw}=527,2\text{MPa}$ (W8)
- $\rho_d=0$

Για τα τοιχία W9-W12:

- $\nu=0$
- $\omega'=0,04681$
- $\omega=0,18725$
- $f_c=31\text{MPa}$
- $L_v/h=2$
- $\alpha=0$
- $\rho_{sx}=0$
- $\rho_d=0$

Για στοιχεία τα οποία από την ανάλυση αστοχούν σε διάτμηση πριν τη διαρροή τους σε κάμψη, ο ΚΑΝ.ΕΠΕ., σε αντίθεση με τον EC8 που δεν αναφέρεται σε αυτό το ενδεχόμενο και δέχεται εμμέσως ότι ακόμα και αυτά τα στοιχεία θα φτάσουν την οριακή καμπτική τους παραμόρφωση, λαμβάνει τη γωνία στροφής στην αστοχία αυξημένη κατά 40% σε σχέση με τη γωνία στροφής στη διαρροή χωρίς περαιτέρω υπολογισμούς, δηλαδή $\theta_u=1,4\theta_y$.

-Η πλαστιμότητα σε όρους στροφών (ή μετατοπίσεων), μ_θ (ή μ_δ), είναι ο λόγος της γωνίας στροφής κατά την αστοχία (ή μετατόπισης αστοχίας) προς τη γωνία στροφής χορδής κατά τη διαρροή (ή μετατόπιση διαρροής). Συνεπώς για τα στοιχεία τα οποία αστοχούν σε διάτμηση πριν διαρρεύσουν σε κάμψη ο λόγος αυτός είναι σταθερός σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ και ίσος με 1,4, καθώς $\theta_u=1,4\theta_y$ άρα $\mu_\theta = \theta_u/\theta_y=1,4$.

Ακολουθούν οι συγκεντρωτικοί πίνακες με τα παραπάνω στοιχεία:

Πίνακας 4.13 Παραμορφώσεις στη διαρροή και την αστοχία δοκιμών W7, W8 και W9-12

| W7 | | | | W8 | | | |
|-----------|------------------------------|--------------|---------------------------|-----------|------------------------------|--------------|---------------------------|
| | $(1/r)_y$ (m ⁻¹) | θ_y | δtop_y (mm) | | $(1/r)_y$ (m ⁻¹) | θ_y | δtop_y (mm) |
| Αναλυτικά | 0,0057 | 0,0059 | 8,90 | Αναλυτικά | 0,0057 | 0,0059 | 8,85 |
| Συμβατικά | 0,0092 | 0,0087 | 13,10 | Συμβατικά | 0,0089 | 0,0086 | 12,90 |
| ΚΑΝ.ΕΠΕ | 0,0054 | 0,0057 | 8,50 | ΚΑΝ.ΕΠΕ | 0,0054 | 0,0057 | 8,60 |
| | $(1/r)_u$ (m ⁻¹) | θ_u | δtop_u (mm) | | $(1/r)_u$ (m ⁻¹) | θ_u | δtop_u (mm) |
| Αναλυτικά | 0,1590 | 0,0283 | 42,40 | Αναλυτικά | 0,1616 | 0,0269 | 40,40 |
| Συμβατικά | 0,1590 | 0,0283 | 42,40 | Συμβατικά | 0,1616 | 0,0269 | 40,40 |
| ΚΑΝ.ΕΠΕ | 0,1590 | 0,0283 | 42,40 | ΚΑΝ.ΕΠΕ | 0,1616 | 0,0269 | 40,40 |
| | | μ_θ | | | | μ_θ | |
| Αναλυτικά | | 4,79 | | Αναλυτικά | | 4,56 | |
| Συμβατικά | | 3,25 | | Συμβατικά | | 3,13 | |
| ΚΑΝ.ΕΠΕ | | 4,96 | | ΚΑΝ.ΕΠΕ | | 4,72 | |

| W9-W12 | | | |
|-----------|------------------------------|--------------|---------------------------|
| | $(1/r)_y$ (m ⁻¹) | θ_y | δtop_y (mm) |
| Αναλυτικά | 0,0053 | 0,0058 | 8,80 |
| Συμβατικά | 0,0069 | 0,0072 | 10,80 |
| ΚΑΝ.ΕΠΕ | 0,0052 | 0,0058 | 8,60 |
| | $(1/r)_u$ (m ⁻¹) | θ_u | δtop_u (mm) |
| Αναλυτικά | 0,0290 | 0,0156 | 23,40 |
| Συμβατικά | 0,0290 | 0,0156 | 23,40 |
| ΚΑΝ.ΕΠΕ | 0,0290 | 0,0156 | 23,40 |
| | | μ_θ | |
| Αναλυτικά | | 2,69 | |
| Συμβατικά | | 2,17 | |
| ΚΑΝ.ΕΠΕ | | 2,69 (ή 1,4) | |

Μήκος πλαστικής άρθρωσης

- I. Μπισκίνης [27]: $L_{pl.(W7-W8)} = 0,09L_s + 0,2h = 0,09 \cdot 1,5 + 0,2 \cdot 0,75 = 0,285m$ (για ανακυκλιζόμενη φόρτιση και για υπολογισμό της μέγιστης βράχυνσης του περισφιγμένου σκυροδέματος από την εξίσωση (2.48))
- II. Σαλονικιός [12] (εξίσωση (2.36)): $L_{pl.(W9-W12)} = 0,044h + 0,014d_b f_y = 0,044 \cdot 1,5 + 0,014 \cdot 0,012 \cdot 580 = 0,163$

$$L_{pl.(W7-W8)} = 0,044 \cdot 1,5 + 0,014 \cdot 0,009 \cdot 596 = 0,14m$$

(για τα τοιχώματα αυτά ως διάμετρος διαμήκους σπλισμού χρησιμοποιήθηκε η μέση διάμετρος και ως τάση διαρροής η μέση τάση διαρροής για χάλυβες Φ8 και Φ10).

$$\text{III. Pristley et al. [21] (εξίσωση (2.37)): } L_{pl} = k(Lv) + 0,1lw + L_{SP} \geq 2L_{SP} = 0,2 \cdot \left(\frac{f_u}{f_y} - 1\right) \cdot \frac{h_w}{k_T} + 0,1l_w + 0,15d_b f_y$$

$$\text{Για τα τοιχία W9-W12: } L_{pl} = 0,2 \cdot \left(\frac{670}{580} - 1\right) \cdot \frac{1,5}{1} + 0,1 \cdot 0,75 + 0,15 \cdot 84,12(ksi) \cdot 0,012 = 0,27m$$

$$\text{Για τα τοιχία W7-W8: } L_{pl} = 0,2 \cdot \left(\frac{652}{596} - 1\right) \cdot \frac{1,5}{1} + 0,1 \cdot 0,75 + 0,15 \cdot 86,42(ksi) \cdot 0,009 = 0,22m$$

4.5 Διατμητική Αντοχή και Καμπτοδιατμητική αλληλεπίδραση

Η οριακή παραμόρφωση ενός στοιχείου που είναι το άθροισμα των καμπτικών αλλά και διατμητικών παραμορφώσεων εξαρτάται από την μετελαστική απομείωση της διατμητικής αντοχής που συμβαίνει κατά τις διαδοχικές ανακυκλίσεις, και έτσι, όπως θα δούμε στα διαγράμματα δύναμης-μετακίνησης / διατμητικής αντοχής που ακολουθούν παρακάτω, η οριακή παραμόρφωση για τοιχία που αναμένεται να αστοχήσουν σε διάτμηση είναι τελικά αυτή η τετμημένη του διαγράμματος στην οποία ο κλάδος απομείωσης της διατμητικής αντοχής τέμνει την καμπύλη αντίστασης. Για στοιχεία τα οποία έχουν διαστασιολογηθεί ώστε να αστοχήσουν σε κάμψη (ικανοτικός σχεδιασμός έναντι τέμνουσας) και διαθέτουν πλαστιμότητα (οπλισμός περίσφιγξης), όπως είναι αναμενόμενο η καμπύλη διατμητικής αντοχής ή δεν τέμνει καθόλου την καμπύλη αντίστασης, ή την τέμνει για μεγάλες παραμορφώσεις πολύ κοντά σε αυτές της καμπτικής αστοχίας.

Για την αποτίμηση της απομείωσης της διατμητικής αντοχής των δοκιμίων με την ανακύκλιση χρησιμοποιήθηκε η σχέση (2.38), κατά EC8-pt. 3 και ΚΑΝ.ΕΠΕ.:

$$V_R = \frac{h-x}{2L_V} \min(N; 0,55A_c f_c) + [1 - 0,05 \min(5; \mu_{\Delta}^{pl})] [0,16 \max(0,5; 100\rho_{tot})] [1 - 0,16 \min\left(5; \frac{L_V}{h}\right)] \sqrt{f_c} A_c + V_w$$

Για τον υπολογισμό της αντοχής σε λοξή θλίψη του κορμού χρησιμοποιήθηκε η σχέση (2.39), κατά EC8-pt. 3 και ΚΑΝ.ΕΠΕ. επίσης:

$$V_{R,max} = 0,85 [1 - 0,06 \min(5; \mu_{\Delta}^{pl})] \left[1 + 1,8 \min\left(0,15; \frac{N}{A_c f_c}\right)\right] [1 + 0,25 \max(1,75; 100\rho_{tot})] \left[1 - 0,2 \min\left(2; \frac{L_V}{h}\right)\right] \sqrt{f_c} b_w z$$

Δίνεται ενδεικτικά ο πίνακας υπολογισμού της διατμητικής αντοχής για τα τοιχία W7-W12 σύμφωνα με την υπολογισθείσα πλαστιμότητα κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.. Το

μέγεθος που αλλάζει μεταξύ των τριών προσεγγίσεων (KAN.ΕΠΕ., Συμβατικά, Αναλυτικά) είναι το πλαστικό μέρος του δείκτη πλαστιμότητας. Ο μοχλοβραχίονας z λαμβάνεται σε όλες τις περιπτώσεις ίσος με $0,8h$ (για γωνία θλιπτήρων 45° κατά Moersch), όσο αναμένεται να είναι το ύψος της κατακόρυφης προβολής μιας κεκλιμένης ρωγμής στον διαμήκη άξονα.

Πίνακας 4.14 Διατμητικές Αντοχές δοκιμίων σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ

| ΚΑΝ.ΕΠΕ | | | | | |
|--------------|--------|--------|--------|---------|----------------|
| | W7 | W8 | W9-W10 | W11-W12 | |
| h | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | m |
| x | 0,10 | 0,102 | 0,122 | 0,122 | m |
| N | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| L_v | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | m |
| A_c | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | m ² |
| f_c | 31 | 31 | 31 | 31 | MPa |
| ρ_{tot} | 0,015 | 0,015 | 0,012 | 0,012 | |
| ρ_w | 0,007 | 0,007 | 0,002 | 0,001 | |
| z | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | m |
| b_w | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | m |
| f_{yw} | 588,34 | 527,2 | 588,34 | 567,44 | MPa |
| V_w | 0,296 | 0,265 | 0,089 | 0,048 | MN |
| $\mu_{0,pl}$ | 3,96 | 3,72 | 1,69 | 1,69 | |
| V_R | 302,48 | 282,00 | 143,44 | 106,27 | kN |
| $V_{R,max}$ | 233,40 | 237,81 | 275,10 | 275,10 | kN |
| $V_{R,y}$ | 377,16 | 346,43 | 156,68 | 116,07 | kN |

Η αντοχή σε τέμνουσα για την οποία δεν απαιτείται οπλισμός διάτμησης υπολογίστηκε από τη σχέση (2.19) του EC2:

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d$$

Ομοίως, παρουσιάζεται ο Πίνακας 4.15 της τέμνουσας για την οποία δεν απαιτείται οπλισμός διάτμησης.

Πίνακας 4.15 Διατμητική Αντοχή δοκιμίων W9-W12 χωρίς σπλισμό διάτμησης

| EC2 | | | |
|------------------------|--------|--------|----------------|
| Επικουρικοί μηχανισμοί | | | |
| | W7-W8 | W9-W12 | |
| f_c | 31 | 31 | MPa |
| d | 0,7225 | 0,722 | m |
| k | 1,5261 | 1,5263 | |
| A_{s1} | 0,0012 | 0,0009 | m ² |
| ρ_l | 0,013 | 0,010 | |
| b_w | 0,125 | 0,125 | m |
| l_w | 0,75 | 0,75 | |
| σ_{cp} | 0 | 0 | |
| k_l | 0,15 | 0,15 | |
| $C_{Rd,c}$ | 0,18 | 0,18 | |
| $V_{Rd,c}$ | 85 | 77 | kN |

Η τέμνουσα που μπορεί να αναλάβει ο σπλισμός διάτμησης κατά τη διαρροή του εκφράζεται από την συνιστώσα V_w της εξίσωσης αντοχής V_R κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ./EC8:

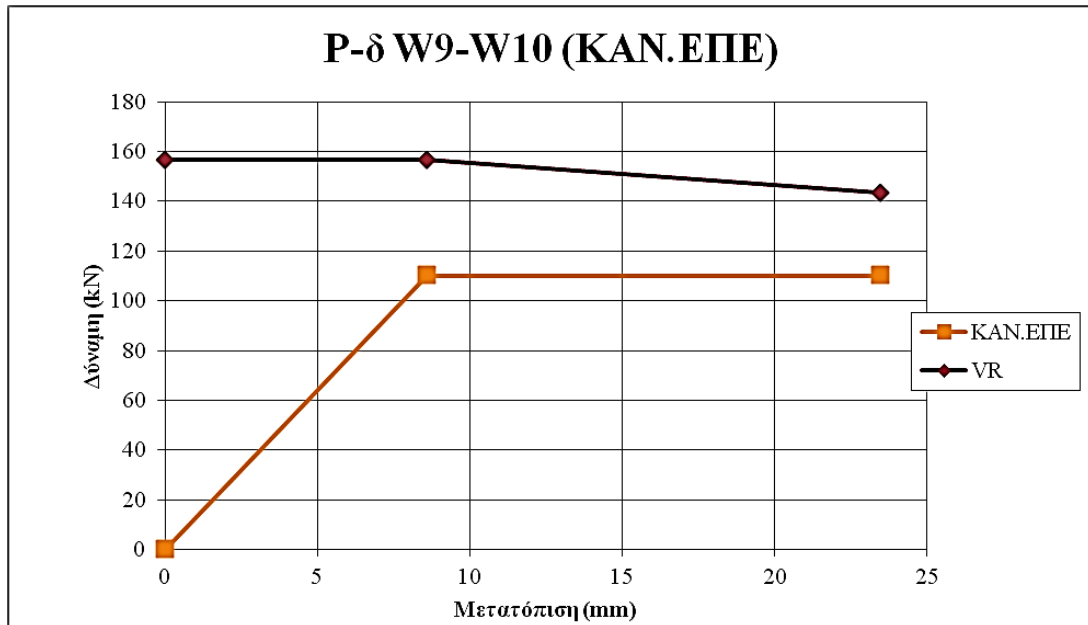
$$V_w = \rho_w b_w f_{yw} z$$

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w \cdot s}$$

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός Πίνακας 4.16 για όλα τα δοκίμια και τις τρεις μεθόδους υπολογισμού.

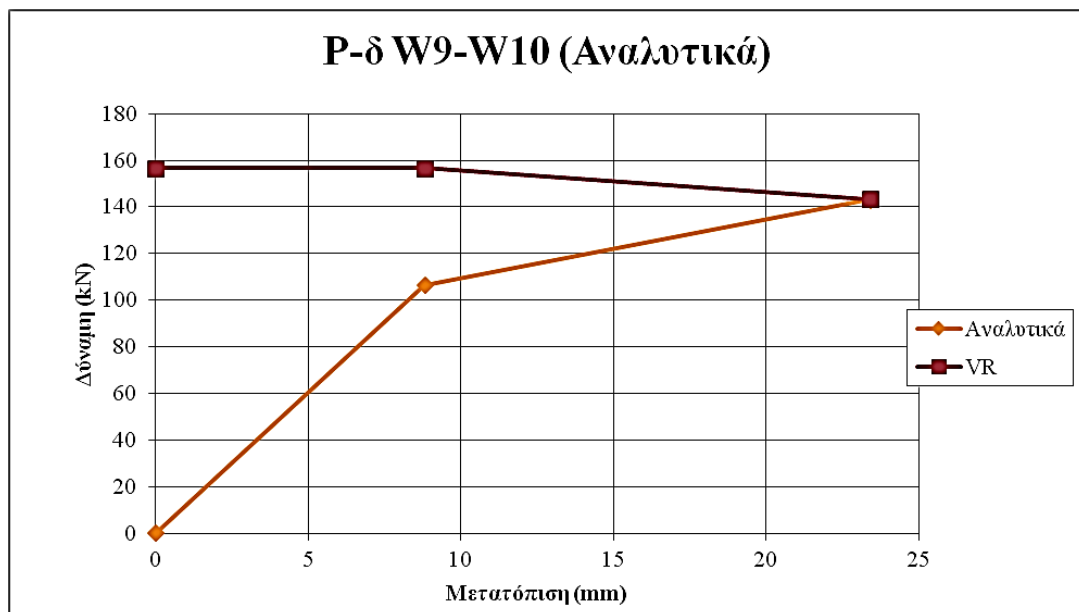
Πίνακας 4.16 Διατμητικές αντοχές δοκιμίων

| α/α | $V_{Rd,c}$ (kN) | $V_{R,max}$ (kN) | | | V_w (kN) | V_R (για $\mu_{\theta,\rho}=0$) (kN) | V_R (kN) | | |
|-----------------|-----------------|------------------|-----------|-----------|------------|--|------------|-----------|-----------|
| | | ΚΑΝ.ΕΠΕ | Αναλυτικά | Συμβατικά | | | ΚΑΝ.ΕΠΕ | Αναλυτικά | Συμβατικά |
| W7 | 85,05 | 233,40 | 234,87 | 264,81 | 295,64 | 377,16 | 302,48 | 305,69 | 334,73 |
| W8 | 85,05 | 237,81 | 240,75 | 267,02 | 264,92 | 346,43 | 282,00 | 284,77 | 309,54 |
| W9 | 76,99 | 275,10 | 275,10 | 284,65 | 88,69 | 156,68 | 143,44 | 143,44 | 147,51 |
| W10 | 76,99 | 275,10 | 275,10 | 284,65 | 88,69 | 156,68 | 143,44 | 143,44 | 147,51 |
| W11 | 76,99 | 275,10 | 275,10 | 284,65 | 48,09 | 116,07 | 106,27 | 106,27 | 109,28 |
| W12 | 76,99 | 275,10 | 275,10 | 284,65 | 48,09 | 116,07 | 106,27 | 106,27 | 109,28 |



Διάγραμμα 4.17 Γράφημα φορτίου-μετατόπισης κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. δοκιμίου W10

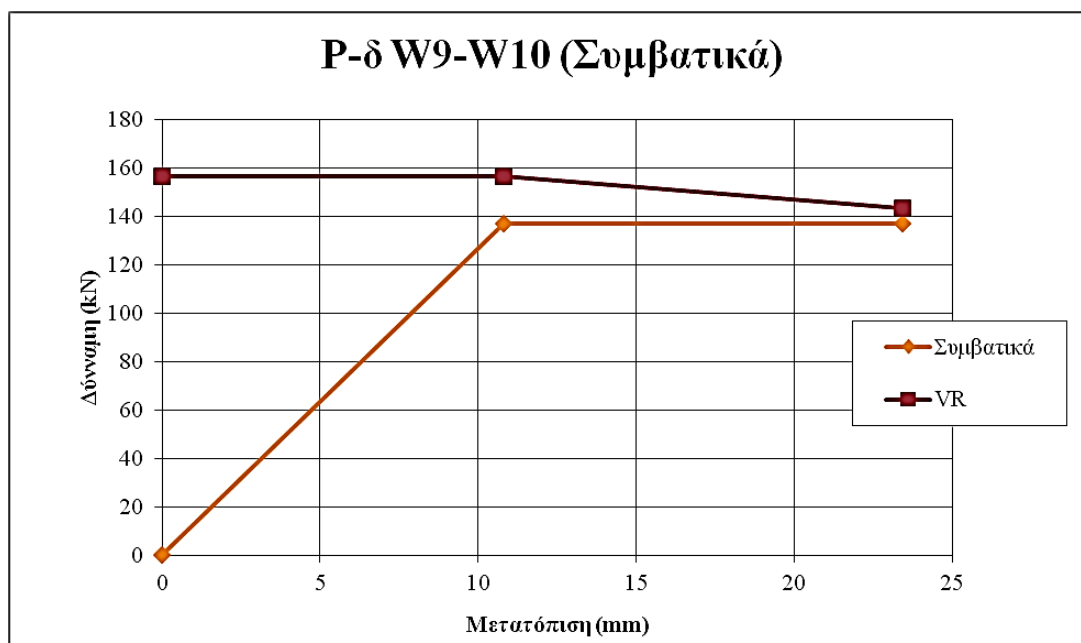
Όπως φαίνεται παραπάνω τα δοκίμια προβλέπεται να αστοχήσουν σε κάμψη (δεν τέμνονται τα διαγράμματα διατμητικής και καμπτικής αντοχής). Προκύπτει $\delta_{αστ.} = 23,4\text{mm}$ και φορτίο $P_{αστ.} = 110,14\text{kN}$. Συνεπώς $\mu = \delta_{αστ.}/\delta_y = 2,72$.



Διάγραμμα 4.18 Γράφημα φορτίου-μετατόπισης κατά EC2-EC8 δοκιμίου W10

Σε αυτή την περίπτωση προβλέπεται καμπτοδιατμητική αστοχία, με την καμπτική και τη διατμητική αντοχή να ταυτίζονται στην αστοχία, για παραμόρφωση $\delta_{αστ.} =$

23,4mm και φορτίο $P_{αστ.} = 143,07 \text{ kN}$. Η αναπτυχθείσα πλαστιμότητα επομένως θα είναι $\mu = 23,4/8,8 = 2,66$.

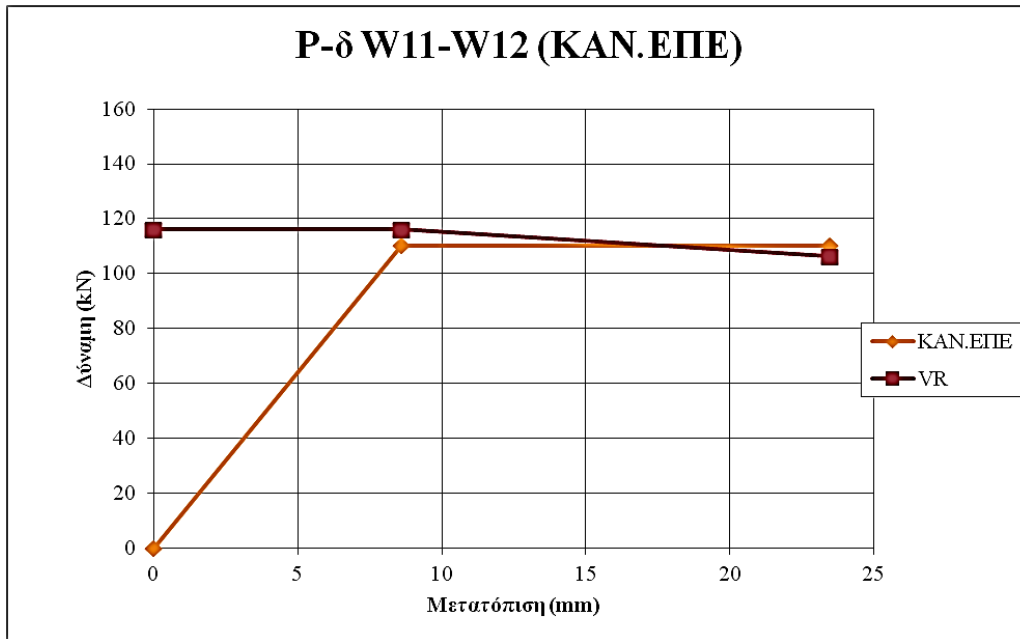


Διάγραμμα 4.19 Συμβατικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου W10

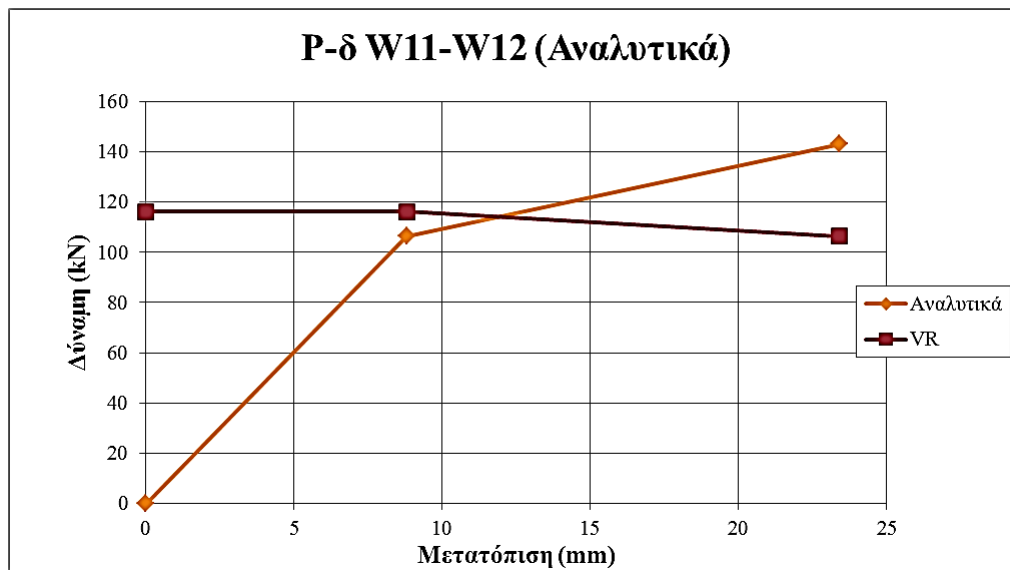
Ομοίως προκύπτει καμπτική αστοχία για παραμόρφωση αστοχίας $\delta_{αστ.}=23,4\text{mm}$ και φορτίο αστοχίας $P_{αστ.}=136,91\text{kN}$. Η πλαστιμότητα είναι $\mu_{\delta}=23,4/10,8=2,16$

Φαίνεται λοιπόν πως παρά τον πολύ αραιό οριζόντιο οπλισμό του τοιχίου επιτυγχάνεται καμπτική αστοχία. Δηλαδή οι συνδετήρες για αυτού του τύπου τα τοιχία (λεπτομέρειες όπλισης, λόγος διάτμησης, γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά) έχουν μάλλον μικρή συνεισφορά στη συνολική διατμητική αντοχή. Η καμπτική αντοχή ωστόσο -υπολογιστικά τουλάχιστον- είναι αρκετά μικρή, λόγω απουσίας κρυφούποστρωμάτων και αραιού διαμήκους οπλισμού. Παρ'όλα αυτά, λίγο μικρότερη διάμετρος συνδετήρων μπορεί να οδηγήσει σε πολύ μειωμένες τιμές διατμητικής αντοχής καθώς μειώνεται σχεδόν στο μισό η αντοχή των συνδετήρων, όπως φαίνεται από τα παρακάτω διαγράμματα για το δοκίμιο W12 το οποίο έχει οριζόντιο οπλισμό Φ6/400 (ενώ το W10 έχει οριζόντιο οπλισμό Φ8/400).

Για τα δοκίμια W11, W12 κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ, προκύπτει διατμητική αστοχία για μετατόπιση $\delta_{αστ.}=18,2\text{mm}$ και φορτίο αστοχίας $P_{αστ.} 110,14\text{kN}$, Η πλαστιμότητα είναι $\mu=18,2/8,6=2,12$. Το προσομοίωμα δηλαδή, για διάμετρο συνδετήρων Φ6 αντί για Φ8 μειώνει τη φέρουσα ικανότητα σε διάτμηση κατά 25%, για ίδια τιμή πλαστικού μέρους δείκτη πλαστιμότητας και ίδια αντοχή όλων των υπόλοιπων μηχανισμών.

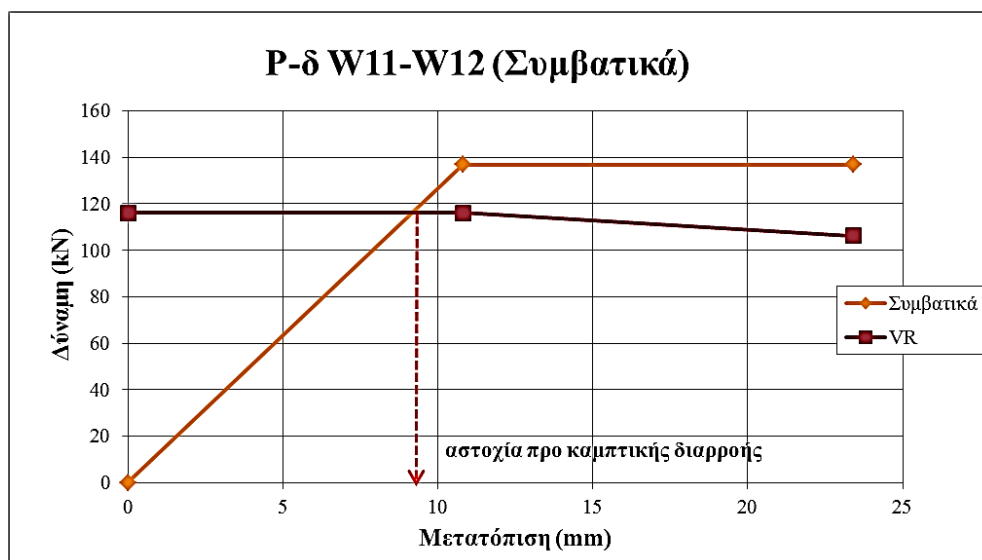


Διάγραμμα 4.20 Γράφημα φορτίου-μετατόπισης κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. δοκιμών W11-W12



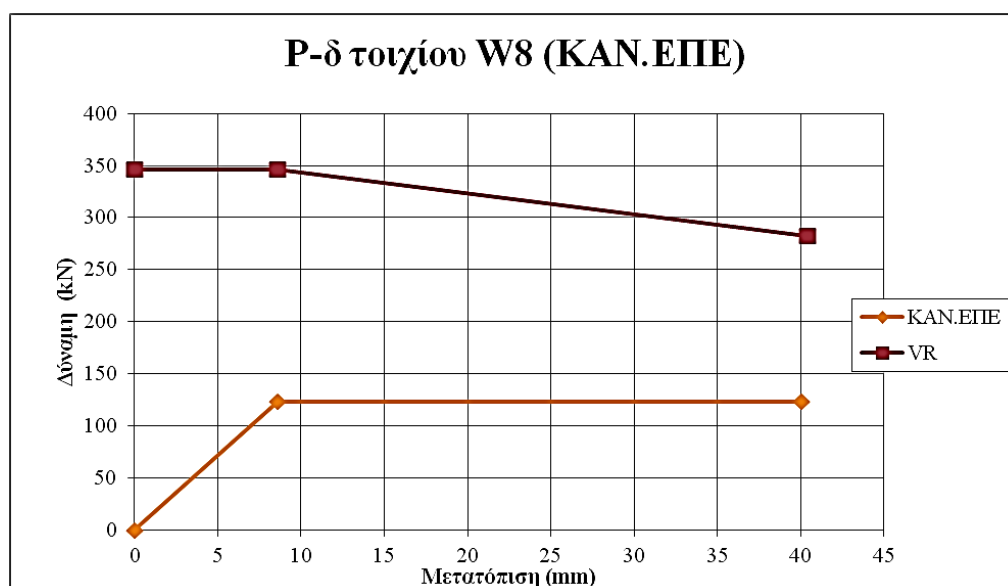
Διάγραμμα 4.21 Γράφημα φορτίου-μετατόπισης κατά EC2-EC8 δοκιμών W11-W12

Και σε αυτό το διάγραμμα βλέπουμε τομή των μετελαστικών κλάδων διατμητικής και καμπτικής αντοχής, σε μετατόπιση αστοχίας $\delta_{αστ.}=12\text{mm}$ και φορτίο αστοχίας $P_{αστ.}=114\text{kN}$. Η πλαστιμότητα μετακινήσεων προκύπτει $\mu=12/8,8=1,36$.



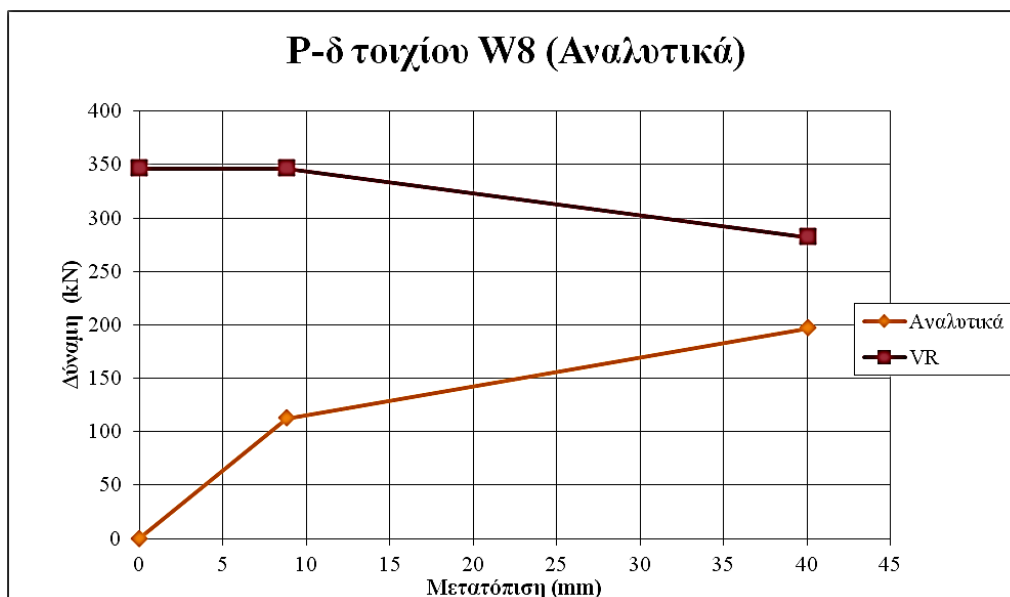
Διάγραμμα 4.22 Συμβατικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίων W11-W12

Προβλέπεται διατμητική αστοχία πριν την καμπτική διαρροή, (συμβατική μέση τιμή μετατόπισης αστοχίας κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ $\delta_{αστ.} = 1,4\delta_y \approx 12\text{mm}$.) Η πλαστιμότητα θα είναι $\mu=1,4$ (κανονικά πρέπει να είναι $\mu=1$ και $\delta_{αστ.}=9\text{mm}$).



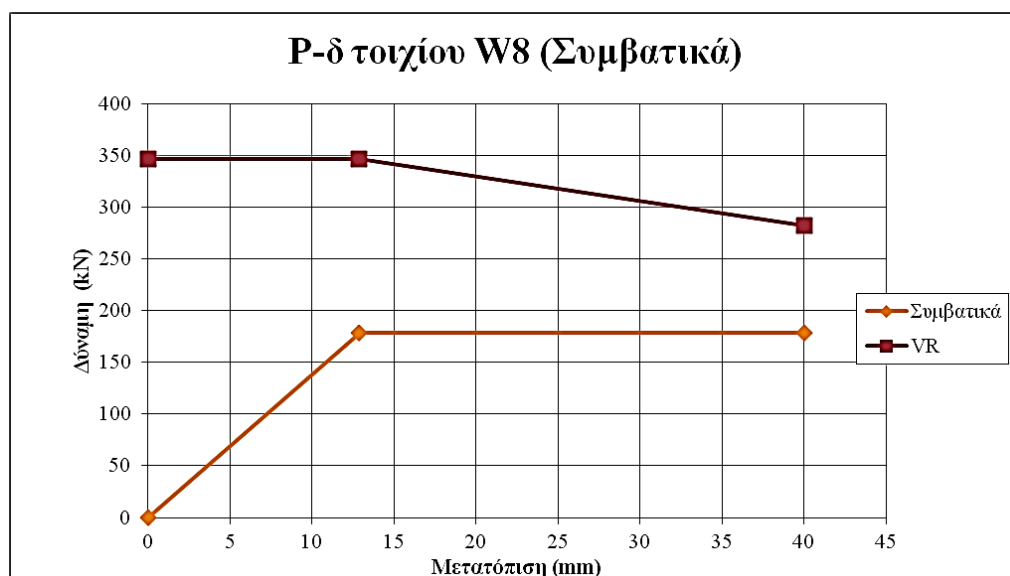
Διάγραμμα 4.23 Γράφημα φορτίου-μετατόπισης κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. δοκιμίου W8

Στο δοκίμιο W8 δεν υπάρχει κίνδυνος διατμητικής αστοχίας. Κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ., θα αστοχήσει καμπτικά φτάνοντας αντοχή $P_{αστ.} = 122,9$ kN και αντίστοιχη παραμόρφωση $\delta_{αστ.} = 40,4\text{mm}$. Η πλαστιμότητα σε αυτή την περίπτωση είναι $\mu=4,72$.



Διάγραμμα 4.24 Γράφημα φορτίου-μετατόπισης κατά EC2-EC8 δοκιμίου W8

Απο το αναλυτικό διάγραμμα των εξισώσεων ισοδυναμίας προκύπτει επίσης καμπτική αστοχία, για φορτίο $P_{αστ.} = 184 \text{ kN}$ και $\delta_{αστ.} = 40,04 \text{ mm}$. Η πλαστιμότητα προκύπτει $\mu=4,56$.



Διάγραμμα 4.25 Συμβατικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου W8

Ομοίως, από το συμβατικό διάγραμμα το φορτίο αστοχίας είναι $P_{αστ.} = 176,97 \text{ kN}$ και $\delta_{αστ.} = 0,042 \text{ m}$. Η πλαστιμότητα είναι $\mu=3,13$.

Σε επίπεδο ανάλυσης λοιπόν, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η επίδραση του διατμητικού μηχανισμού στη διαρροή και την αστοχία είναι αρκετά ασαφής και αυτό αντανακλάται στα υπολογιστικά εργαλεία αποτίμησης, γι' αυτό όσον αφορά στο δοκίμιο W12 προκύπτουν τόσο το ενδεχόμενο καμπτικής όσο και το ενδεχόμενο διατμητικής αστοχίας, ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής της καμπύλης αντίστασης. Στο επόμενο Κεφάλαιο, οι αναλυτικές προβλέψεις ιδίως για τα ελαφρώς οπλισμένα δοκίμια διαψεύδονται, καθώς το τοιχίο W9 (ίδιο με το W10) εν τέλει έφτασε αντοχή μεγαλύτερη από την υπολογισθείσα καμπτική αντοχή του, ανέπτυξε μεγαλύτερη πλαστιμότητα και αστόχησε λόγω έντονης αποδιοργάνωσης της θλιβόμενης ζώνης και λυγισμού των διαμήκων θλιβόμενων ράβδων οπλισμού.

Όσον αφορά στο δοκίμιο W12 με διατμητικό οπλισμό $\Phi 6/400$ έναντι $\Phi 8/400$ του δοκιμίου W10, προκύπτει και στα τρία διαγράμματα διατμητική αστοχία (σε ένα μάλιστα διάγραμμα προκύπτει διατμητική αστοχία πριν την καμπτική διαρροή). Το δοκίμιο W11 (ίδιο με το W12) αστόχησε μεν με θράυση συνδετήρα, αλλά επέδειξε πλαστιμότητα και επίσης ψηλότερες τιμές αντοχής από τις προβλεπόμενες.

Αυτές οι αποκλίσεις και συντηρητικές εκτιμήσεις αφενός έχουν σχέση με τον ελαφρύ οπλισμό των δοκιμίων που θεωρητικά οδηγεί σε πρόωρη καμπτική ή διατμητική αστοχία, ωστόσο τα δύο προσομοιώματα υπολογισμού της διατμητικής αντοχής είτε για αστοχία λόγω διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού είτε λόγω λοξής θλίψης δεν μπορούν να προβλέψουν την διατμητική αντοχή καμπτοδιατμητικών τοιχωμάτων, φανερώνοντας ότι πιο πολύπλοκοι μηχανισμοί οδηγούν ένα τοίχωμα με λόγο διάτμησης ίσο με δύο στην αστοχία (τα δοκίμια είναι οριακά μεταξύ κοντών και λυγηρών κατά EC8). Έτσι, η ανακρίβεια οφείλεται στην ελλειμματικότητα των χρησιμοποιούμενων προσομοιωμάτων προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής καθώς «λειτουργούν» κυρίως για μέλη που έχουν καμπτική συμπεριφορά, λυγηρότητα και αντοχή. Οι υπολογιστικές αποκλίσεις έχουν να κάνουν και με τη δυσκολία ακριβούς προσδιορισμού της παραμορφωσιμότητας ενός μέλους που αστοχεί σε ταυτόχρονη δράση κάμψης και διάτμησης και της καμπτικής και διατμητικής συνιστώσας της συνολικής πλαστιμότητας μετατοπίσεων και τη συνύπαρξη αυτών. Ο υπολογισμός της αναμενόμενης πλαστιμότητας είναι δυσχερής, καθώς από πολλά πειράματα έχει παρουσιάσει σημαντική διασπορά σε σχέση με την εκάστοτε ανάλυση.

Για αυτές τις περιπτώσεις η οριακή διατμητική αντοχή πρέπει να υπολογίζεται με προσαρμοσμένα προσομοιώματα, που ξεφεύγουν από τις απλοποιητικές παραδοχές του κλασικού δικτύωματος Ritter-Morsch. Το πιο διαδεδομένο προσομοίωμα είναι αυτό των Shohara and Kato [1981], το οποίο συνδυάζει το μηχανισμό δικτύωματος 45° και ένα μηχανισμό λοξού θλιπτήρα. Οι Φαρδής και Συνεργάτες [23] [27] συνέταξαν ένα γενικότερο προσομοίωμα οριακής αντοχής υπό μονοαξονική καμπτοδιατμητική ένταση, αποφεύγοντας κάποιες απλοποιητικές παραδοχές των άλλων προσομοιωμάτων, όπως το ότι οι θλιβόμενες διαγώνιοι του μηχανισμού δικτύωματος έχουν πάντα κλίση 45° , ή το ότι δεν εξασφαλίζουν την ισορροπία

εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων στις ακραίες διατομές, συνθήκη που πρέπει να ισχύει πάντα για τη θεώρηση επιπεδότητας των διατομών.

Ο Θ.Ν Σαλονικιός έχει επεξεργαστεί επίσης διάφορα προσομοιώματα αλληλεπίδρασης κάμψης και διάτμησης για τοιχώματα, όχι μόνο χαμηλού λόγου διάτμησης, και προτείνει ένα προσομοίωμα στο οποίο μοντελοποιείται ο μηχανισμός κάμψης και ο μηχανισμός διάτμησης κατά τέτοιο τρόπο ώστε στις εξαγόμενες καμπύλες αντοχής-παραμόρφωσης να περιλαμβάνονται οι μετατοπίσεις λόγω της παραμόρφωσης των δύο παραπάνω μηχανισμών, κάνοντας την παραδοχή της «ίσης αντοχής» των δύο μηχανισμών. Στις περισσότερες περιπτώσεις η προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα γίνεται με ελατήριο, με μη γραμμικό νόμο συμπεριφοράς, το οποίο αναπαριστά τον μηχανισμό με την μικρότερη αντοχή. Στις περιπτώσεις, όπου κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση, παρατηρείται ανελαστική παραμόρφωση ταυτόχρονα σε δύο μηχανισμούς η παραπάνω προσομοίωση δεν προσεγγίζει ορθολογικά την πραγματική κατάσταση. Έτσι απαιτείται η εισαγωγή τουλάχιστον δύο ελατηρίων για την ακριβέστερη προσέγγιση του φαινομένου της ταυτόχρονης ανελαστικής παραμόρφωσης του μηχανισμού κάμψης και διάτμησης και σε μερικές περιπτώσεις η εισαγωγή πεπερασμένων στοιχείων (κάμψης και διάτμησης) κατανεμημένης ευκαμψίας. Το καμπτικό ελατήριο είναι στροφικό και το διατμητικό οριζόντιο γραμμικό. Η διατμητική αντοχή λαμβάνεται ίση με την καμπτική αντοχή με τιμές που αντιστοιχούν στην τελική περιβάλλουσα αντοχής των βρόχων υστέρησης η οποία είτε εκτιμάται αναλυτικά είτε λαμβάνεται πειραματικά (Σαλονικιός, Δημητρακόπουλος [12]).

ΑΝΑΘΕΩΡΗΜΕΝΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ UCSD (J. KROLICKI, J. MAFFEI, G. M. CALVI)

Σε ένα πρόσφατο άρθρο [22] των J. Krolicki, J. Maffei, και G. M. Calvi οι συγγραφείς έχοντας συγκεντρώσει μια βάση πειραματικών και αναλυτικών δεδομένων από προγενέστερες έρευνες προτείνουν μια βελτιστοποιημένη μέθοδο προσδιορισμού της διατμητικής και καμπτοδιατμητικής απόκρισης τοιχωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα, τόσο για σχεδιαστικούς όσο και για αποτιμητικούς σκοπούς. Κατέληξαν στη συλλογή 34 τοιχωμάτων από τη βάση με λόγο διάτμησης έως 2 που παρουσίασαν διατμητική, καμπτοδιατμητική και καμπτική αστοχία και πάνω σε αυτά συνέθεσαν ή τροποποίησαν σχέσεις υπολογισμού της διατμητικής αντοχής. Οι κατασκευαστικές διατάξεις και παραδοχές βασίζονται στον Αμερικάνικο Κανονισμό (ACI-ASCE). Το προτεινόμενο προσομοίωμα είναι τροποποίηση του προσομοιώματος των Kowalski και Priestley [2000] με προτεινόμενες αλλαγές κυρίως για τοιχώματα με χαμηλό ή μεσαίο λόγο διάτμησης.

Η εφαρμογή του προσομοιώματος στην παρούσα εργασία γίνεται για λόγους σύγκρισης για τα μη ενισχυμένα δοκίμια W9 και W11. Για το ενισχυμένο δοκίμιο

W10 η εκτίμηση με αυτό το προσομοίωμα αποφεύγεται, καθώς εμπλέκονται επιπλέον παράγοντες που αφορούν στην επίδραση της ενίσχυσης στον προσανατολισμό των ρωγμών και στην αλληλεπίδρασή της με τους συνδετήρες και το σκυρόδεμα. Αυτά τα ζητήματα χρειάζονται περαιτέρω έρευνα και αξιόπιστες βάσεις δεδομένων.

Η καμπύλη αντίστασης (καμπτική αντοχή) συντάσσεται μέσω διγραμμικοποίησης του διαγράμματος ροπών-καμπυλοτήτων (κατά Priestley et al. [1996]). Οι παραδοχές διγραμμικοποίησης παρατίθενται παρακάτω. Διαφορετικές παραδοχές για εφαρμογή του συγκεκριμένου προσομοιώματος διατμητικής αντοχής οδηγούν ενδεχομένως σε παραπλανητικά αποτελέσματα.

Τέλος σημειώνεται πως τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και οι λεπτομέρειες όπλισης των τοιχίων που αποτελούν αντικείμενο αυτής της εργασίας εμπίπτουν στην πειραματική βάση από την οποία εξάχθηκε το προτεινόμενο προσομοίωμα.

Η προτεινόμενη σχέση που δίνει την *τέμνουσα αντοχής* είναι:

$$V_R = V_c + V_s + V_p \quad (4.4)$$

όπου V_p είναι η *τέμνουσα* που αναλαμβάνεται λόγω αξονικής φόρτισης. Στην περίπτωση μας η συνιστώσα αυτή είναι ίση με μηδέν.

Η συνεισφορά του εγκάρσιου οπλισμού, V_s στη διατμητική αντοχή, σε αντίθεση με τις διατάξεις των EC8 και ΚΑΝ.ΕΠΕ., εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των ραβδών που διαπερνώνται από τη λοξή ρωγμή. Θα συνεισφέρει το ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού που περιλαμβάνεται σε ύψος ίσο με την κατακόρυφη προβολή της ρωγμής στον άξονα του μέλους, h_{cr} , με μέγιστη τιμή της το μήκος διάτμησης. Η κατακόρυφη προβολή της ρωγμής, h_{cr} , ισούται με:

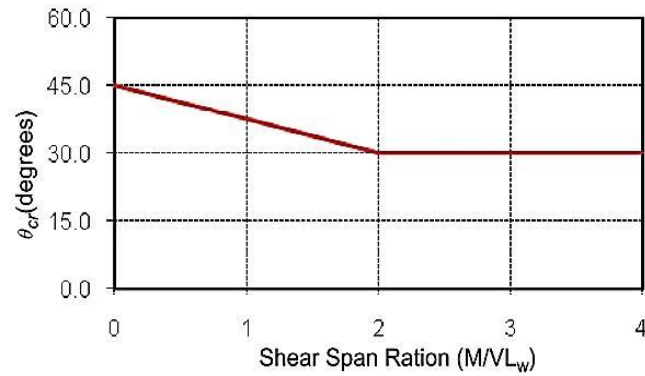
$$h_{cr} = \frac{d-x}{\tan\theta_{cr}} \leq h_w \quad (4.5)$$

Όπως παρατηρήθηκε από πειραματικά αποτελέσματα από τους Priestley et al. [1996], οι ρωγμές εμφανίζονται αρχικά υπό γωνία 45° ως προς τον άξονα του μέλους. Στη συνέχεια, λόγω αλληλεπίδρασης κάμψης-διάτμησης, τείνουν προς τις 30° . Η γωνία ρηγμάτωσης επιδεικνύει την τάση να αυξάνεται όσο μειώνεται ο λόγος διάτμησης, και μπορεί να ποικίλει από 25 έως 65 μοίρες ανάλογα του φορτίου και της απόστασης εφαρμογής του από τη στήριξη. Βάσει αυτών των παρατηρήσεων πρότειναν την παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό της γωνίας ρηγμάτωσης:

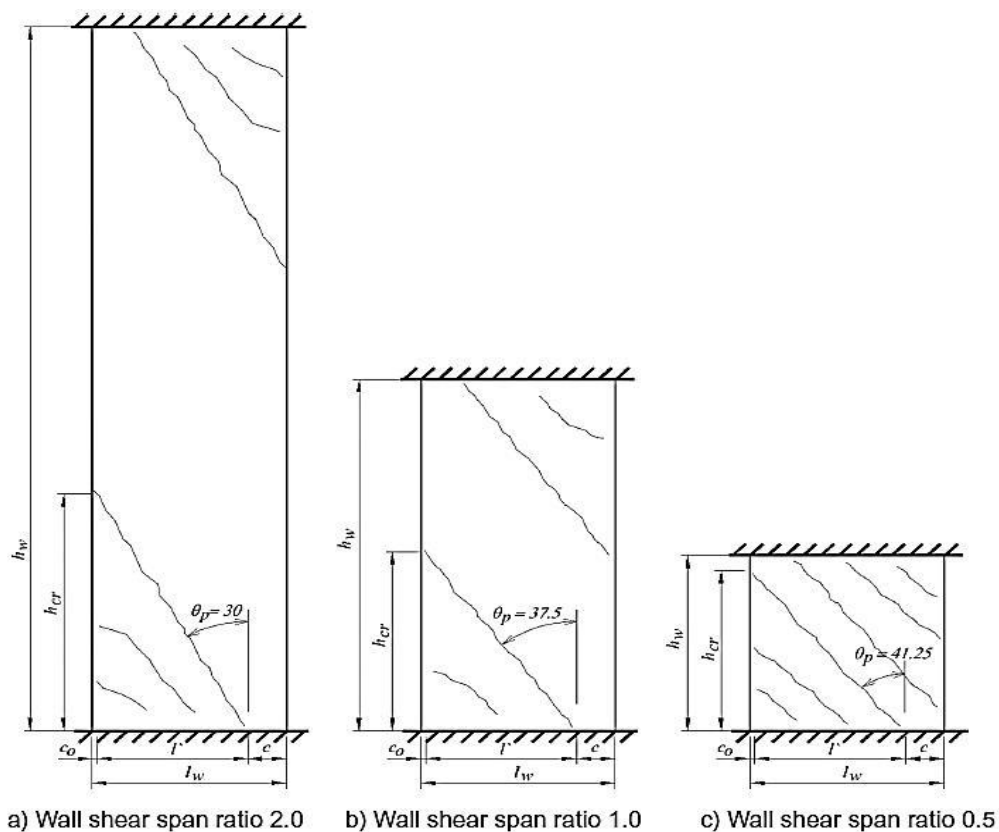
$$\theta_{cr} = \left(\frac{30-45}{2}\right) a_v + 45^\circ \geq 30^\circ \quad (4.6)$$

Για λόγο διάτμησης $a_v = 2$ η κρίσιμη γωνία ρηγμάτωσης προκύπτει ίση με 30° . Για σχεδιασμό λαμβάνεται μια πιο συντηρητική τιμή της κρίσιμης γωνίας ρηγμάτωσης, 35° . Στο **Διάγραμμα 4.26** δίνεται η μεταβολή της γωνίας ρηγμάτωσης συναρτήσει του λόγου διάτμησης. Στο **Σχήμα 4.27** απεικονίζεται η κρίσιμη γωνία διατμητικής

ρηγμάτωσης που διασχίζει τον οριζόντιο οπλισμό σε ύψος h_{cr} όπως προτείνεται από τους Kowalski and Priestley [28].



Διάγραμμα 4.26 Μεταβολή της γωνίας ρηγμάτωσης συναρτήσει του λόγου διάτμησης (Calvi et al., 2011)



Σχήμα 4.27 Ανάπτυξη διατμητικής αντίστασης οριζόντιου οπλισμού στο κρίσιμο ύψος h_{cr} , για διάφορες τιμές του λόγου διάτμησης (Calvi et al., 2011)

Η αντοχή του οριζόντιου οπλισμού είναι συνεπώς:

$$V_s = \rho_w \cdot b_w \cdot f_{yw} \cdot h_{cr}. \quad (4.7)$$

Με βάση τα παραπάνω συντάσσεται ο Πίνακας 4.28 για το δοκίμιο W9 (ισχύει και για το W10 χωρίς ενίσχυση) και ο Πίνακας 4.29 για τα δοκίμια W11, W12.

Πίνακας 4.28 Συνεισφορά του οριζόντιου οπλισμού στη διατμητική αντοχή

| W9-W10 | | W9-W10 | |
|-------------------------|---------------|-------------------------|--------------|
| Krolicki, Maffei, Calvi | | Krolicki, Maffei, Calvi | |
| d (m) | 0,722 | d (m) | 0,722 |
| x (m) | 0,15 | x (m) | 0,15 |
| θ | 30° | θ | 45° |
| tan θ | 0,577 | tan θ | 0,999 |
| h_{cr} (m) | 0,991 | h_{cr} (m) | 0,572 |
| ρ_w (m) | 0,00201 | ρ_w (m) | 0,00201 |
| b_w (m) | 0,125 | b_w (m) | 0,125 |
| f_{yw} (MPa) | 588,34 | f_{yw} (MPa) | 588,34 |
| Vs (kN) | 146,54 | Vs (kN) | 84,62 |

Πίνακας 4.29 Συνεισφορά του οριζόντιου οπλισμού στη διατμητική αντοχή

| W11-W12 | | W11-W12 | |
|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|
| Krolicki, Maffei, Calvi | | Krolicki, Maffei, Calvi | |
| d (m) | 0,722 | d (m) | 0,722 |
| x (m) | 0,15 | x (m) | 0,15 |
| θ | 30° | θ | 45° |
| tan θ | 0,577 | tan θ | 0,999 |
| h_{cr} (m) | 0,991 | h_{cr} (m) | 0,572 |
| ρ_w (m) | 0,00113 | ρ_w (m) | 0,00113 |
| b_w (m) | 0,125 | b_w (m) | 0,125 |
| f_{yw} (MPa) | 588,34 | f_{yw} (MPa) | 588,34 |
| Vs (kN) | 82,38 | Vs (kN) | 47,57 |

Όπως φαίνεται από τους Πίνακες 4.28, 4.29 και τον Πίνακα 4.16 όπου υπολογίζεται η αντοχή των συνδετήρων κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.-ΕC8 για γωνία ρηγμάτωσης 45°, η μεταβολή της γωνίας από τις 45° στις 30° λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση κάμψης και διάτμησης και το λόγο διάτμησης αποτιμά μεγαλύτερη συνεισφορά του οριζόντιου οπλισμού στη συνολική διατμητική αντοχή (άυξηση κατά 40%).

Η συνεισφορά του σκυροδέματος στη διατμητική αντοχή υπολογίζεται ως:

$$V_c = a_p \cdot \gamma_p \cdot \beta \cdot \sqrt{f_c} \cdot (0,8A_{cv}) \quad (4.8)$$

όπου:

- a_p είναι συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του την επιρροή του λόγου διάτμησης
- γ_p είναι συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του τη μείωση της διατμητικής αντοχής του σκυροδέματος με την αύξηση της πλαστιμότητας και του εύρους ρωγμής λόγω ανακύκλισης
- β είναι συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του την αύξηση της διατμητικής αντοχής με την αύξηση του ποσοστού του διαμήκους οπλισμού στον κορμό
- f_c είναι η αντοχή του σκυροδέματος σε MPa
- $0,8 A_{cv}$ είναι η ενεργός επιφάνεια για ύψος θλιβόμενης ζώνης $0,2l_w$

Προτείνεται από τους Krolicki, Maffei και Calvi [2011] οι συντελεστές a_p, γ_p να λαμβάνονται ίσοι με:

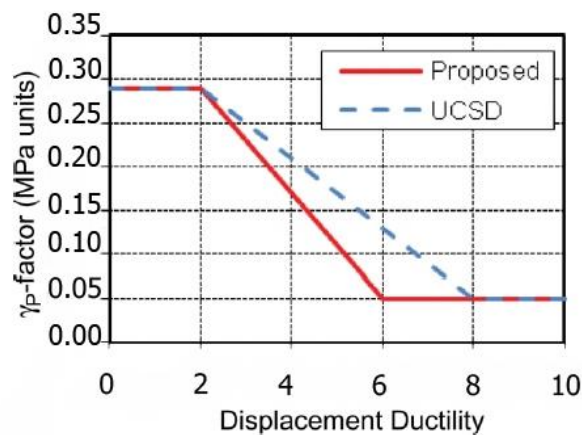
$$a_p = 3 - \frac{L_v}{h} \geq 1 \rightarrow a_p = 3 - 2 = 1$$

$$\gamma_p = 0,29MPa \text{ για } \mu_\delta \leq 2$$

$$\gamma_p = 0,05MPa \text{ για } \mu_\delta \geq 6$$

Για πολύ μικρή πλαστιμότητα (<2) η διατμητική αντοχή του σκυροδέματος δε μειώνεται ως την αστοχία εφόσον δεν έχει προλάβει να εκτονωθεί πλήρως η ανακύκλιση. Ομοίως για μεγάλες τιμές πλαστιμότητας (>6) δεν υπάρχει περαιτέρω μείωση της διατμητικής αντοχής.

Για ενδιάμεσες τιμές πλαστιμοτήτων ο συντελεστής γ_p υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή.



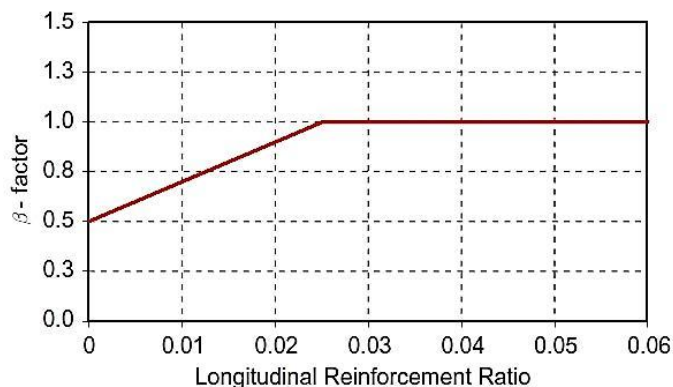
Διάγραμμα 4.30 Μεταβολή του συντελεστή γ_p συναρτήσει της πλαστιμότητας μετατοπίσεων (Calvi et al.,2011)

Για πλαστιμότητες μετατοπίσεων $\mu=2,5$ που προκύπτει από τη διγραμμικοποίηση των διαγραμμάτων F- δ των δοκιμίων W9-W10 και W11-W12 (βλέπε παρακάτω), προκύπτει $\gamma_p = 0,28$. Για γωνία ρηγμάτωσης 45° προκύπτει αστοχία των δοκιμίων W11-W12 πριν την καμπτική διαρροή, οπότε ο συντελεστής λαμβάνεται 0,29 σε αυτή την περίπτωση. ($\mu_\delta < 2$). Ο συντελεστής β λαμβάνεται:

$$\beta = 0,5 + 20\rho_g \leq 1 \tag{4.9}$$

Το όριο του 1 δηλώνει ότι αύξηση του ποσοστού του διαμήκους οπλισμού πάνω από κάποιο ποσοστό δε συμβάλλει σε περαιτέρω άυξηση της διατμητικής αντοχής.

Για $\rho_g = \frac{A_{l,tot}}{A_c} = 0,012$ (ογκομετρικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού κορμού των τοιχίων W9-W12), $\beta=0,741$



Διάγραμμα 4.31 Μεταβολή του συντελεστή β συναρτήσει του ογκομετρικού ποσοστού του διαμήκους οπλισμού (Calvi et al.,2011)

Άρα:

$$V_{c(W9-W10)} = 1 \cdot 0,741 \cdot 0,28 \cdot \sqrt{31} (MPa) \cdot 0,8 \cdot 0,09043(m^2) = 0,08344MN = 83,59kN$$

$$V_{c(W11-W12,\theta=45)} = 1 \cdot 0,741 \cdot 0,29 \cdot \sqrt{31} (MPa) \cdot 0,8 \cdot 0,09043(m^2) = 0,08658MN = 86,58kN$$

Για $\theta=30$:

$$V_{s(W9-W10)} = \rho_w b_w f_{yw} h_{cr} = 146,54kN$$

$$V_{R(W9-W10)} = V_c + V_s = 83,59 + 146,54 = 230,13kN$$

$$V_{s(W11-W12)} = \rho_w b_w f_{yw} h_{cr} = 82,38kN$$

$$V_{R(W11-W12)} = V_c + V_s = 83,59 + 82,38 = 165,97kN$$

Για $\mu=1$ (διαρροή), $\gamma_p = 0,29$, $V_c = 86,58kN$

$$\text{Άρα, } V_{Ry(W9-W10)} = 86,58 + 146,54 = 233,12kN$$

$$V_{Ry(W11-W12)} = 86,58 + 82,38 = 168,96kN$$

Για $\theta=45$:

$$V_{s(W9-W10)} = \rho_w b_w f_{yw} h_{cr} = 84,62kN$$

$$V_{R(W9-W10)} = V_c + V_s = 83,59 + 84,62 = 168,21kN$$

$$V_{s(W11-W12)} = 47,57kN$$

$$V_{R(W11-W12)} = 86,58 + 47,57 = 134,15kN$$

Για $\mu=1$ (διαρροή), $\gamma_p = 0,29$, $V_c = 86,58kN$

$$\text{Άρα, } V_{R,y(W9-W10)} = 86,58 + 84,62 = 171,20kN$$

$$V_{R,y(W11-W12)} = 134,15kN$$

Και σε αυτό το προσομοίωμα μείωση της διαμέτρου των συνδετήρων προκαλεί αρκετή μείωση στη συνολική αντοχή, ωστόσο αφενός η ευελιξία στη σχέση υπολογισμού των συνδετήρων μέσω εισαγωγής της μεταβλητής γωνίας ανάλογης του λόγου διάτμησης και αφετέρου η αύξηση της συνεισφοράς του σκυροδέματος για τοιχία μικρού και μεσαίου λόγου διάτμησης δίνουν μεγαλύτερες διατμητικές αντοχές, πράγμα που επιβεβαιώθηκε και πειραματικά. Το προσομοίωμα του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι βασισμένο σε γραμμικές συσχετίσεις και δικτύωμα Morsch σταθερής γωνίας θλιπτήρων, οπότε αλλαγές στις μεταβλητές που υπεισέρχονται στη σχέση υπολογισμού της διατμητικής αντοχής δίνουν αρκετά ασταθή αποτελέσματα (ειδικά η αλλαγή του μήκους z). Τα αποτελέσματα που δίνονται έτσι από τα δύο προσομοιώματα συγκλίνουν μόνο στον υπολογισμό της αντοχής των συνδετήρων για γωνία ρηγμάτωσης 45° .

Όσον αφορά στις παραμορφώσεις, αναλύονται στην καμπτική και τη διατμητική τους συνιστώσα. Σε κάθε φάση απόκρισης του δοκιμίου, δηλαδή καμπτική ρηγμάτωση, διατμητική ρηγμάτωση, διαρροή και αστοχία, πρέπει να υπολογίζονται οι αντίστοιχες παραμορφώσεις λόγω κάμψης και λόγω διάτμησης. Από την επαλληλία των παραμορφώσεων και τα φορτία συντάσσεται η τελική Καμπύλη Αντίστασης του δοκιμίου, η οποία στη συνέχεια τοποθετείται σε κοινό διάγραμμα με αυτό της διατμητικής αντοχής και εντοπίζεται το σημείο τομής τους-εάν υπάρχει-, που ορίζει θεωρητικά την αστοχία. Οι παραμορφώσεις και τα φορτία υπολογίζονται από τις εξής παραδοχές:

Καμπτική ρηγμάτωση

$$M_{cr,fl} = \frac{bh^3}{12} \cdot f_{ct} = \frac{0,125m \cdot 0,75^3 m^2}{12} \cdot \frac{6030kN}{m^2} = 44,17kNm \quad (4.10)$$

$$\varphi_{cr,fl} = \frac{M_{cr}}{EI_g} = \frac{44,17kNm}{135909,7kN/m^2} = 0,000325m^{-1} \quad (4.11)$$

$$EI_g = 30890900 \frac{kN}{m^2} \cdot \frac{0,125m \cdot 0,75^3 m^3}{12} = 135751,03kN/m^2$$

$$\delta_{cr,fl} = k_T \cdot \frac{\varphi_{cr,fl} \cdot L_{ss}^2}{3} = 1 \cdot \frac{0,000325 \cdot 1,5^2}{3} = 0,00024m = 0,24mm, \quad (4.12)$$

$$F_{cr} = \frac{M_{cr}}{1,5} = 29,4kN$$

Για μονή καμπυλότητα ο συντελεστής k_T λαμβάνεται ίσος με 1.

Καμπτική παραμόρφωση στη διαρροή (ιδεατή διγραμμική καμπύλη)

$$\varphi_{y,fl} = \varphi'_y \cdot \frac{M_n}{M_y} = 0,0053 \cdot \frac{202,72}{159,58} = 0,0067 = 1,33\varphi_{y'} \quad (4.13)$$

Η ροπή M_y είναι αυτή που υπολογίστηκε αναλυτικά από τις εξισώσεις ισοδυναμίας για διαρροή της πρώτης στάθμης εφελκόμενου οπλισμού. Αντίστοιχα και η καμπυλότητα $\varphi_{y'}$ είναι αυτή της πρώτης διαρροής. Η ροπή M_n είναι αυτή που αντιστοιχεί στη «διαρροή» του σκυροδέματος (δηλαδή για παραμόρφωση σκυροδέματος $\varepsilon_c=2\%$). Για περισφιγμένες διατομές η ροπή αυτή πρέπει να αντιστοιχεί είτε στην παραμόρφωση αστοχίας του μη περισφιγμένου σκυροδέματος της επικάλυψης (3,5%) είτε σε παραμόρφωση χαλύβων 15%, για άνοιγμα ρωγμής 1mm, ανάλογα με το ποιο από τα δύο συμβαίνει πρώτο. Η ροπή αστοχίας υπολογίστηκε επίσης από τις εξισώσεις ισοδυναμίας για παραμόρφωση μη περισφιγμένου σκυροδέματος 3,5%.

$$\delta_{y'} = k_T \cdot \frac{\varphi_{y'}(L_{ss}+L_{sp})^2}{3} = 1 \cdot \frac{0,0053 \cdot (1,5+0,15)^2}{3} = 0,0048m = 4,81mm, \quad (4.14)$$

$$F_y = \frac{M_y}{1,5} = 106,39kN$$

$$\delta_{n,fl} = k_T \cdot \frac{\varphi_{y,fl}(L_{ss}+L_{sp})^2}{3} = 1 \cdot \frac{0,0067 \cdot (1,5+0,15)^2}{3} = 6,10mm \quad (4.15)$$

$$F_n = \frac{M_n}{1,5} = 135,15kN$$

Για το L_{sp} και το μήκος πλαστικής άρθρωσης L_p βλέπε εξίσωση (2.37), **Κεφάλαιο 2**.

Πλαστική παραμόρφωση λόγω κάμψης (ιδεατή διγραμμική καμπύλη)

$$\delta_{p,fl} = k_T \cdot (\varphi_u - \varphi_y) \cdot L_p \cdot \left[L_{ss} - \left(\frac{L_p}{2} - L_{sp} \right) \right] = (0,029 - 0,0067) \cdot 0,27 \cdot (1,5 - 0,135 + 0,15) = 9,12mm \quad (4.16)$$

$$\delta_{u,fl} = \delta_{n,fl} + \delta_{p,fl} = 15,22mm, \quad F_u = \frac{M_u}{1,5} = 143,06kN$$

Η οριακή παραμόρφωση μπορεί να υπολογιστεί και από την εξίσωση (2.33) πολλαπλασιασμένη επί $L_{ss}(=L_y)$.

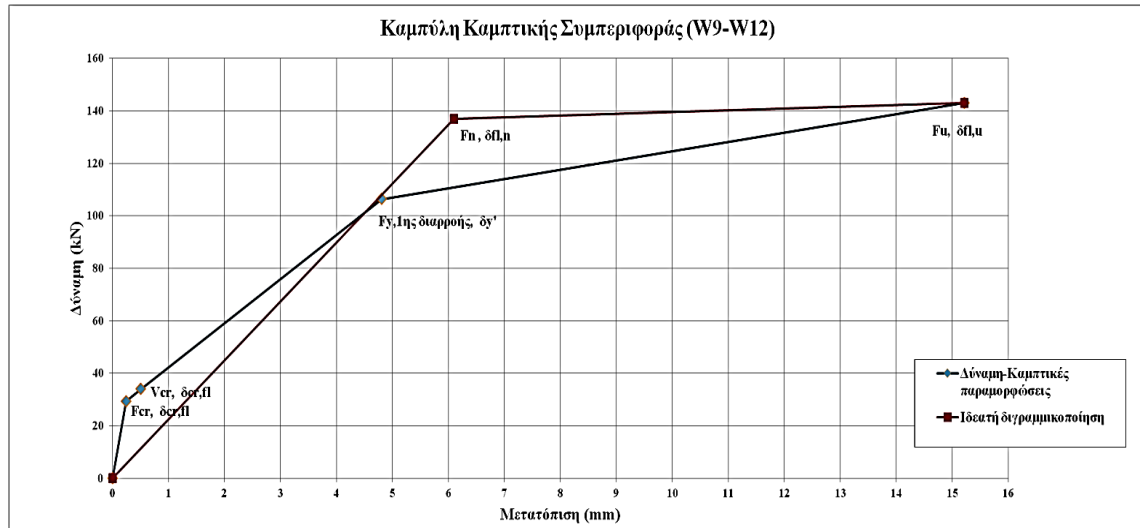
Για οποιοδήποτε σημείο της πολυγραμμικής καμπύλης μετά την πρώτη διαρροή ισχύει:

$$\delta_i = \delta_{y'} + k_T \cdot (\varphi_i - \varphi_{y'}) \cdot L_p \cdot \left[L_{ss} - \left(\frac{L_p}{2} - L_{sp} \right) \right] \quad (4.17)$$

Έτσι, η πλαστική καμπτική παραμόρφωση μετά την πρώτη διαρροή και ως την αστοχία είναι:

$$\delta_{p,fl,y'} = k_T \cdot (\varphi_u - \varphi_{y'}) \cdot L_p \cdot \left[L_{ss} - \left(\frac{L_p}{2} - L_{sp} \right) \right] = (0,029 - 0,0053) \cdot 0,27 \cdot (1,5 - 0,135 + 0,15) = 9,70mm$$

Συντάσσεται κατόπιν η Καμπτική Καμπύλη Συμπεριφοράς.



Διάγραμμα 4.32 Καμπτική απόκριση δοκιμίων W9-W12

Διατμητική ρηγμάτωση

Προτείνεται η παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό της δύναμης κατά την πρώτη διατμητική ρηγμάτωση, η οποία έπεται συνήθως της καμπτικής.

$$V_{cr} = a_p \cdot \beta \cdot 3,5 \cdot \sqrt{f_c} \cdot 0,8A_c = 1 \cdot 0,741 \cdot 3,5 \cdot \sqrt{31000} \cdot 0,8 \cdot 0,125 \cdot 0,75 = 34kN \quad (4.18)$$

Προκύπτει σχεδόν ταυτόχρονη διατμητική και καμπτική ρηγμάτωση.

Υπολογισμός διατμητικών παραμορφώσεων κατά την καμπτική και διατμητική ρηγμάτωση, την πρώτη διαρροή και μέχρι την αστοχία .

Η δυσστησία μιας αρηγμάτωσης δοκού δίνεται από τους Park and Paulay [1975]:

$$k_{sh,e} = \frac{GA_{cv}}{1,2} = \frac{(0,3 \div 0,4) \cdot E_c \cdot 0,8A_c}{1,2} = 579205 \text{ kN/m} \quad (4.19)$$

Η διατμητική παραμόρφωση κατά την καμπτική ρηγμάτωση είναι λόγω ελαστικότητας:

$$\delta_{sh,e} = \frac{F_{cr}}{k_{sh,e}} = 0,051\text{mm} \quad (4.20)$$

Μετά την καμπτική ρηγμάτωση, η δυσστησία μειώνεται αναλογικά με τη μείωση της δυσκαμψίας:

$$k_{sh,f} = k_{sh,e} \cdot \frac{EI_{eff}}{EI_g} = 579205 \cdot \frac{18952}{135751,03} = 0,14 \cdot k_{sh,e} = 80862\text{kN/m} \quad (4.21)$$

Η διατμητική μετατόπιση από την καμπτική μέχρι τη διατμητική ρηγμάτωση είναι:

$$\delta_{sh,f} = \frac{V_{cr}-F_{cr}}{k_{sh,f}} = 0,056mm \quad (4.22)$$

Η ενεργός δυσκαμψία, για πρόβολο μήκους L υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K_{eff} = \frac{3EI_{eff}}{L^3} \rightarrow EI_{eff} = \frac{L^3 \cdot \left(\frac{F_y - F_{cr}}{\delta_{y'l} - \delta_{cr,fl}} \right)}{3} = 18952kN/m^2 \quad (4.23)$$

Μετά τη διατμητική ρηγμάτωση και ως την πρώτη διαρροή:

$$W9 - W10: k_{sh,y} = \frac{0,25\rho_w}{0,25+10\rho_w} E_s b_w d = \frac{0,25 \cdot 0,00201}{0,25+0,0201} \cdot \frac{200000000kN}{m^2} \cdot 0,125m \cdot 0,722m = 33581kN/m \quad (4.24)$$

$$\delta_{sh,y(W9-W10)} = \frac{F_y - V_{cr}}{k_{sh,y}} = 2,16mm \quad (4.25)$$

$$W11 - W12: k_{sh,y} = \frac{0,25\rho_w}{0,25+10\rho_w} E_s b_w d = \frac{0,25 \cdot 0,00113}{0,25+0,0113} \cdot \frac{200000000kN}{m^2} \cdot 0,125m \cdot 0,722m = 19515kN/m$$

$$\delta_{sh,y(W11-W12)} = \frac{F_y - V_{cr}}{k_{sh,y}} = 3,71mm$$

Οι ΚΑΝ.ΕΠΕ. και EC8 λαμβάνουν τη διατμητική παραμόρφωση στη διαρροή (πρώτη ή γενικευμένη διαρροή) σταθερή και ίδια σε κάθε διαφορετική περίπτωση δοκιμίου, ίση με 2mm. (βλ. Παρ. 2.3.3, Σχέση (2.28)).

Μετά την πρώτη διαρροή η διατμητική παραμόρφωση αυξάνεται αναλογικά με την καμπτική παραμόρφωση, κι έτσι:

$$\delta_{sh} = \delta_{fl} \frac{\delta_{sh,y}}{\delta_{y'l}} \quad (4.26)$$

Απο το σημείο διαρροής ως την αστοχία:

$$W9 - W10: \delta_{u,sh} = \delta_{p,fl,y'l} \frac{\delta_{sh,y}}{\delta_{y'l}} = 9,69 \cdot \frac{0,051+0,056+2,16}{4,81} = 4,57mm$$

$$W11 - W12: \delta_{u,sh} = \delta_{p,fl,y'l} \frac{\delta_{sh,y}}{\delta_{y'l}} = 9,69 \cdot \frac{0,051+0,056+3,71}{4,81} = 7,69mm$$

Από την αρχική φάση μέχρι το σημείο διαρροής της ιδεατής διγραμμικής καμπύλης καμπτικής αντίστασης (F_n, δ_n), η διατμητική παραμόρφωση είναι:

$$W9 - W10: \delta_{n,sh} = \delta_{n,fl} \frac{\delta_{sh,y}}{\delta_{y'l}} = 6,1 \cdot \frac{0,051+0,056+2,16}{4,81} = 2,87mm$$

$$W11 - W12: \delta_{n,sh} = \delta_{n,fl} \frac{\delta_{sh,y}}{\delta_{y'l}} = 6,1 \cdot \frac{0,051+0,056+3,71}{4,81} = 4,84mm$$

Απο το σημείο διαρροής της διγραμμικής καμπύλης ως την αστοχία:

$$W9 - W10: \delta_{u,sh} = \delta_{p,fl} \frac{\delta_{sh,y}}{\delta_{y'l}} = 9,12 \cdot \frac{0,051+0,056+2,16}{4,81} = 4,30mm$$

$$W11 - W12: \delta_{u,sh} = \delta_{p,fl} \frac{\delta_{sh,y}}{\delta_{y'}} = 9,12 \cdot \frac{0,051+0,056+3,71}{4,81} = 7,24mm$$

Στην αστοχία η διατμητική παραμόρφωση προκύπτει ως το άθροισμα των διατμητικών παραμορφώσεων κατά τις διαδοχικές ρηγματώσεις ως τη διαρροή και της διατμητικής παραμόρφωσης από τη διαρροή ως την αστοχία.

Η τελική Καμπύλη Αντίστασης προκύπτει από την επαλληλία των παραμορφώσεων λόγω κάμψης και λόγω διάτμησης. Όλα τα σημεία συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 4.33 Καμπτικές και διατμητικές παραμορφώσεις κατά τις διάφορες φάσεις φόρτισης (W9,W10)

| W9-W10 | Φορτίο (kN) | Μετατόπιση (mm) | | |
|------------------------|-------------|-----------------|----------|--------------|
| | | Κάμψη | Διάτμηση | Σύνολο |
| | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Καμπτική ρηγμάτωση | 29,40 | 0,24 | 0,05 | 0,29 |
| Διατμητική ρηγμάτωση | 34,00 | 0,50 | 0,11 | 0,61 |
| Διαρροή πρώτης στάθμης | 106,39 | 4,81 | 2,32 | 7,08 |
| Απο διαρροή ως αστοχία | 143,07 | 9,70 | 4,57 | 14,27 |

Πίνακας 4.34 Διγραμμικοποιημένη Καμπύλη Αντίστασης (W9,W10)

| ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ (W9-W10) | Φορτίο (kN) | Μετατόπιση (mm) | | | μδ |
|-----------------------------------|-------------|-----------------|----------|--------------|-----|
| | | Κάμψη | Διάτμηση | Σύνολο | |
| | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,5 |
| Διαρροή | 136,91 | 6,10 | 2,87 | 8,97 | |
| Αστοχία | 143,07 | 15,22 | 7,17 | 22,40 | |

Πίνακας 4.35 Μεταβολή διατμητικής αντοχής με την ανακύκλιση και τις διαφορετικές γωνίες ρηγμάτωσης

| VR (W9-W10) | | |
|-------------|--------|--------|
| δ | θ=30° | θ=45° |
| 0 | 233,12 | 171,2 |
| 2δn | 233,12 | 171,2 |
| δu | 230,13 | 168,21 |

Πίνακας 4.36 Καμπτικές και διατμητικές παραμορφώσεις κατά τις διάφορες φάσεις φόρτισης (W11,W12)

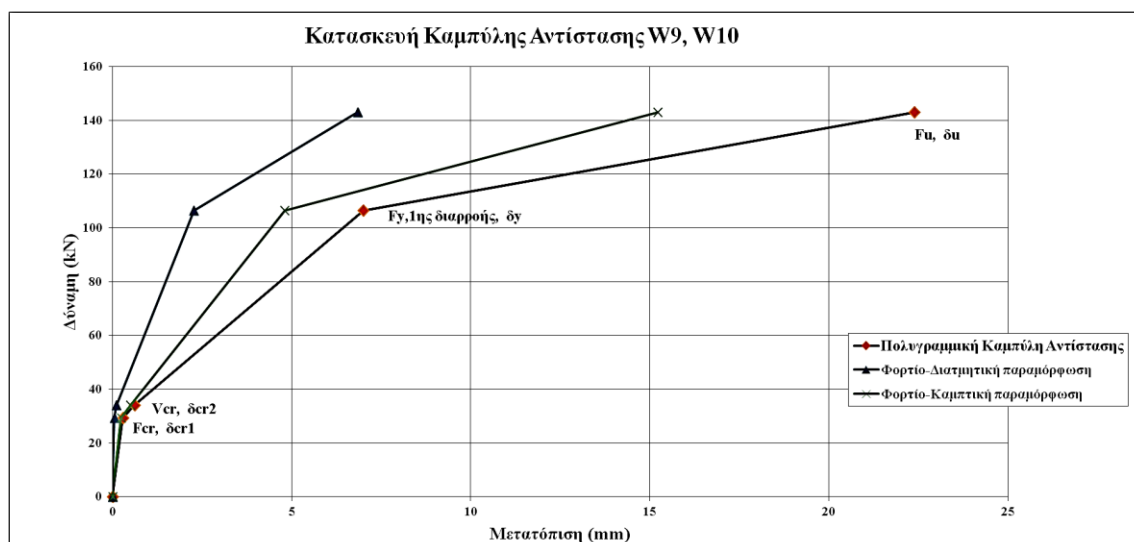
| W11-W12 | Φορτίο (kN) | Μετατόπιση (mm) | | |
|------------------------|-------------|-----------------|----------|--------------|
| | | Κάμψη | Διάτμηση | Σύνολο |
| | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Καμπτική ρηγμάτωση | 29,40 | 0,24 | 0,05 | 0,29 |
| Διατμητική ρηγμάτωση | 34,00 | 0,50 | 0,11 | 0,61 |
| Διαρροή πρώτης στάθμης | 106,39 | 4,81 | 3,82 | 8,63 |
| Από διαρροή ως αστοχία | 143,07 | 9,69 | 7,69 | 17,38 |

Πίνακας 4.37 Διγραμμικοποιημένη Καμπύλη Αντίστασης (W11,W12)

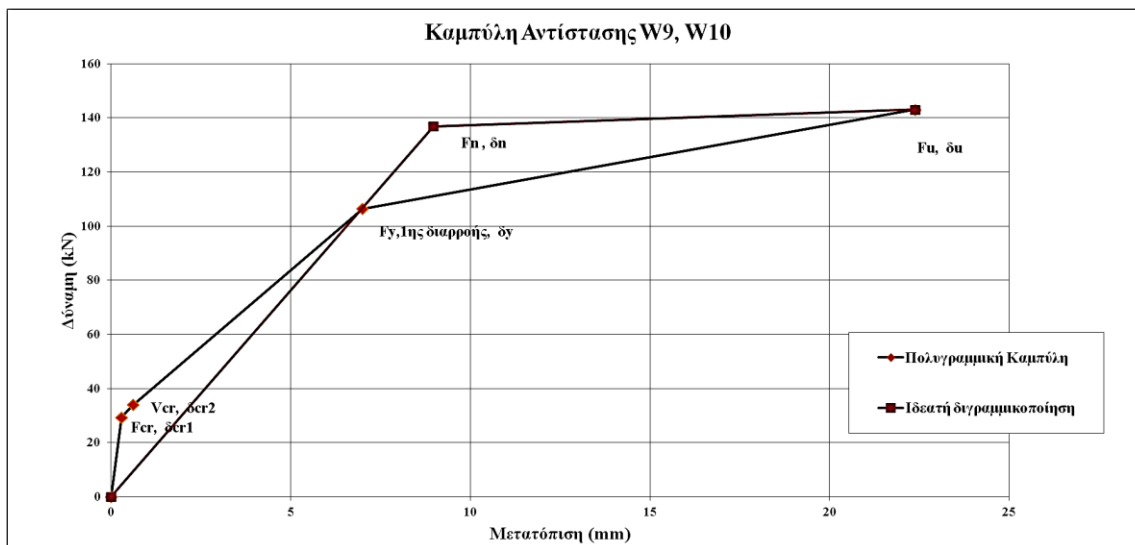
| ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ (W11-W12) | Φορτίο (kN) | Μετατόπιση (mm) | | | μδ |
|------------------------------|-------------|-----------------|----------|--------------|-----|
| | | Κάμψη | Διάτμηση | Σύνολο | |
| | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,5 |
| Διαρροή | 136,91 | 6,10 | 4,84 | 10,94 | |
| Αστοχία | 143,07 | 15,22 | 12,08 | 27,30 | |

Πίνακας 4.38 Μεταβολή διατμητικής αντοχής με την ανακύκλιση και τις διαφορετικές γωνίες ρηγμάτωσης

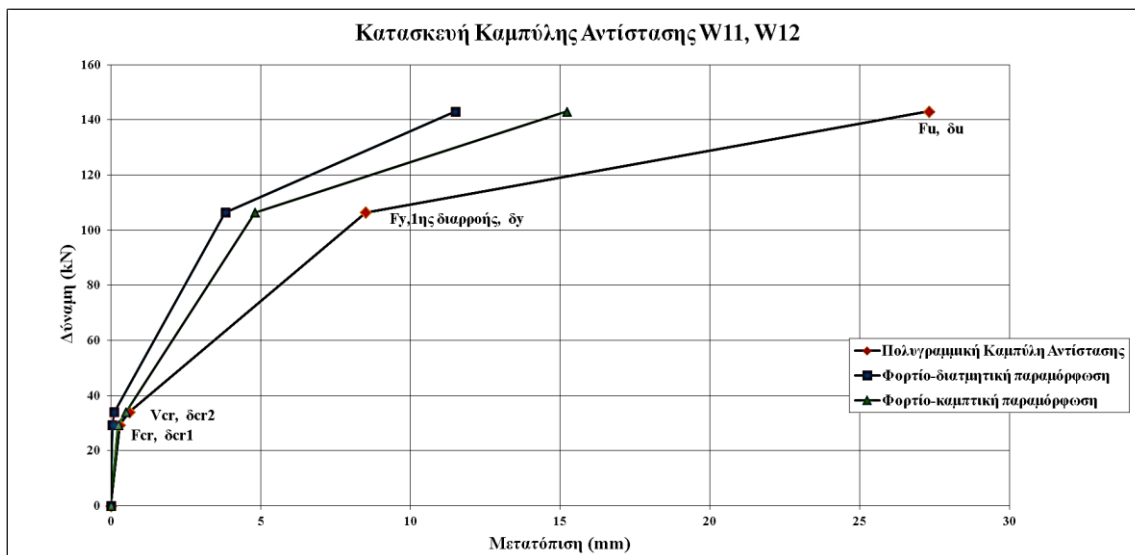
| VR (W11-W12) | | |
|--------------|--------|--------|
| δ | θ=30° | θ=45° |
| 0 | 169,00 | 134,15 |
| 2δn | 169,00 | 134,15 |
| δu | 166,00 | 134,15 |



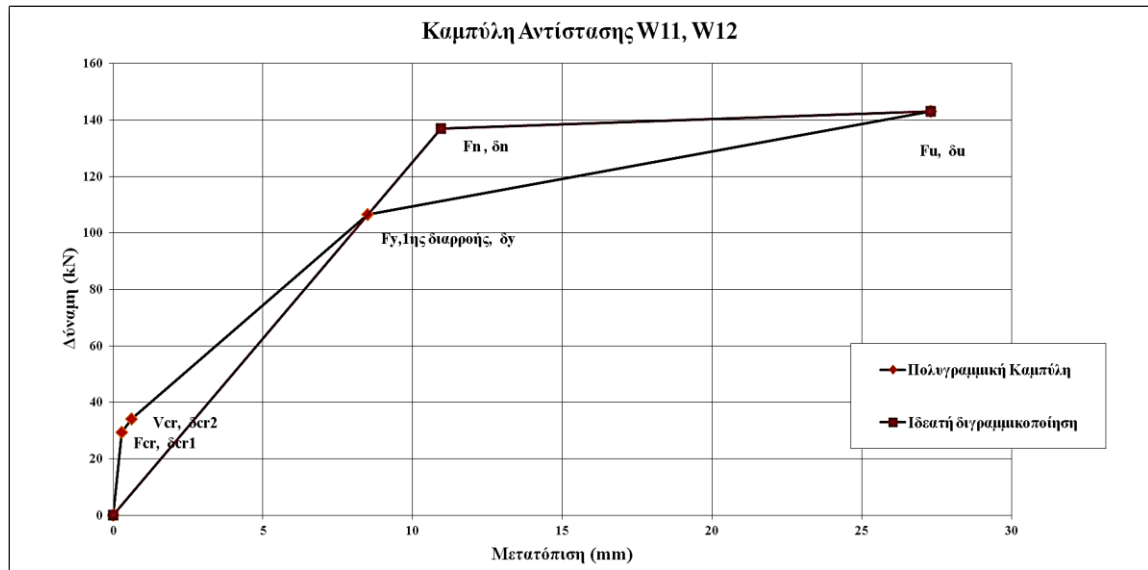
Διάγραμμα 4.39 Σύνθεση της Καμπύλης Αντίστασης απο την καμπτική και διατμητική συμπεριφορά



Διάγραμμα 4.40 Καμπύλη Αντίστασης δοκιμών W9-W10

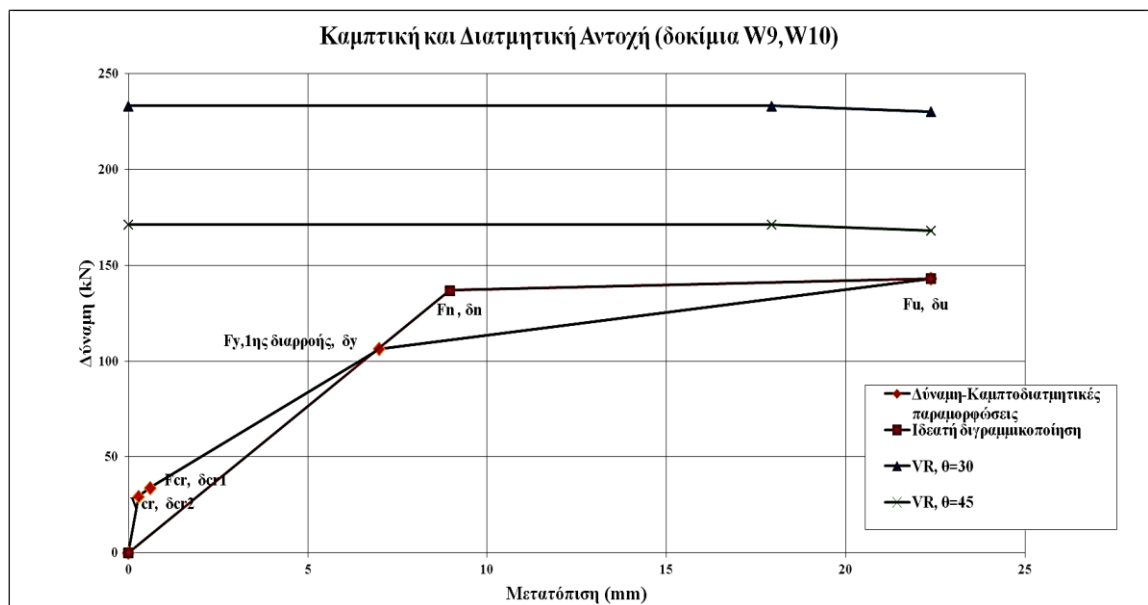


Διάγραμμα 4.41 Σύνοψη της Καμπύλης Αντίστασης από την καμπτική και διατμητική συμπεριφορά

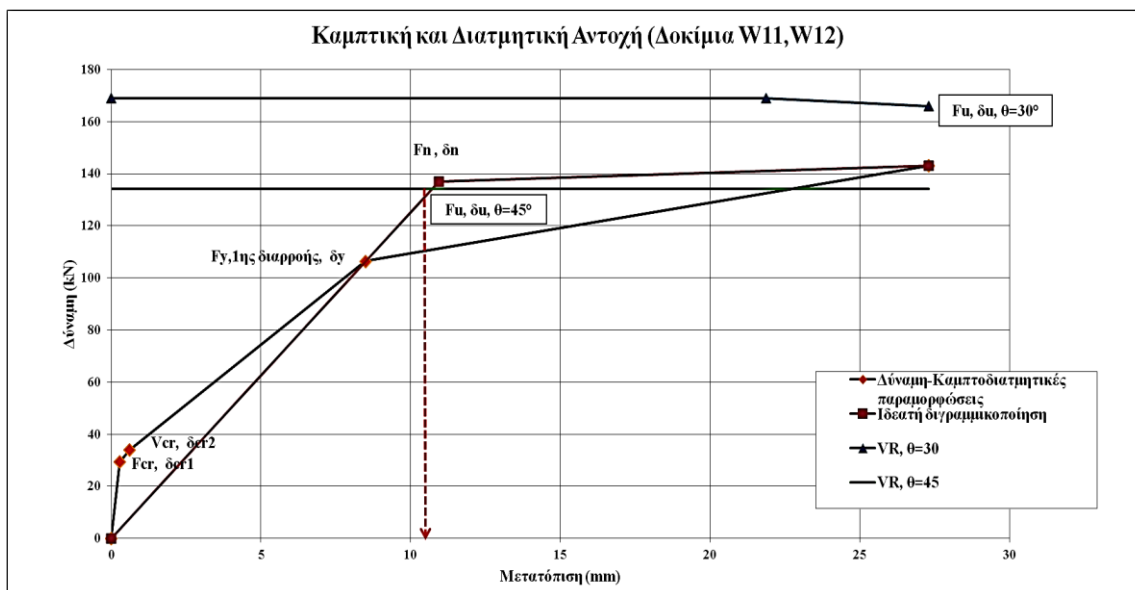


Διάγραμμα 4.42 Καμπύλη Αντίστασης δοκιμίων W11.W12

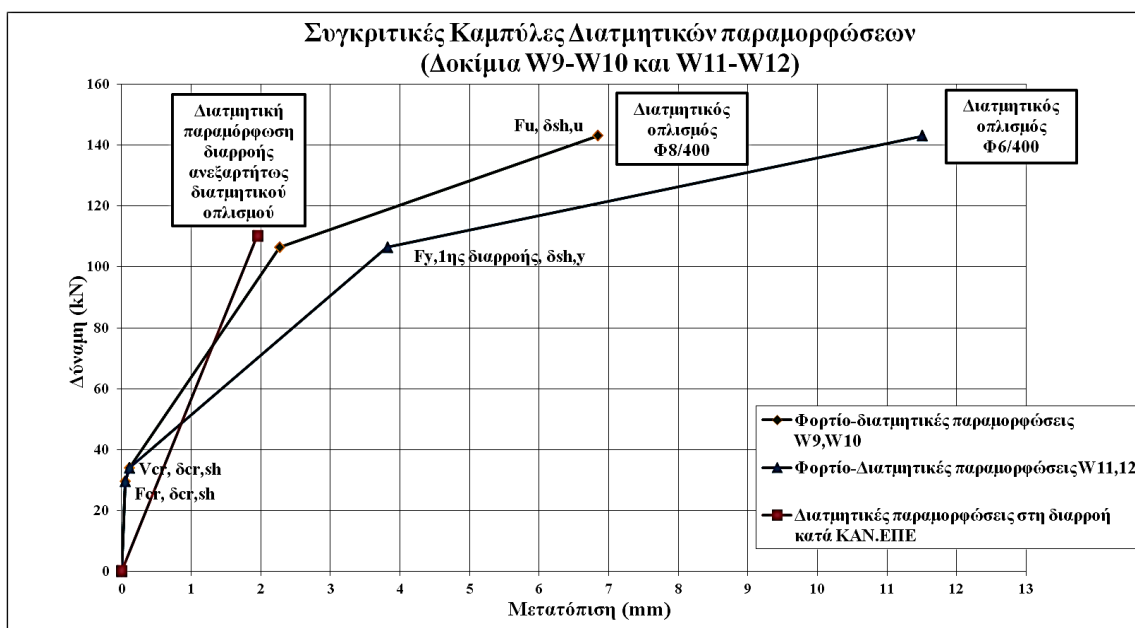
Τέλος , πάνω στη διγραμμικοποιημένη τελική καμπύλη αντίστασης τοποθετούνται τα διαγράμματα απομείωσης της διατμητικής αντοχής, για γωνίες ρηγμάτωσης 30 και 45 μοίρες.



Διάγραμμα 4.43 Καμπτοδιατμητική συμπεριφορά δοκιμίων W9-W10



Διάγραμμα 4.44 Καμπτοδιατμητική συμπεριφορά δοκιμίων W11-W12



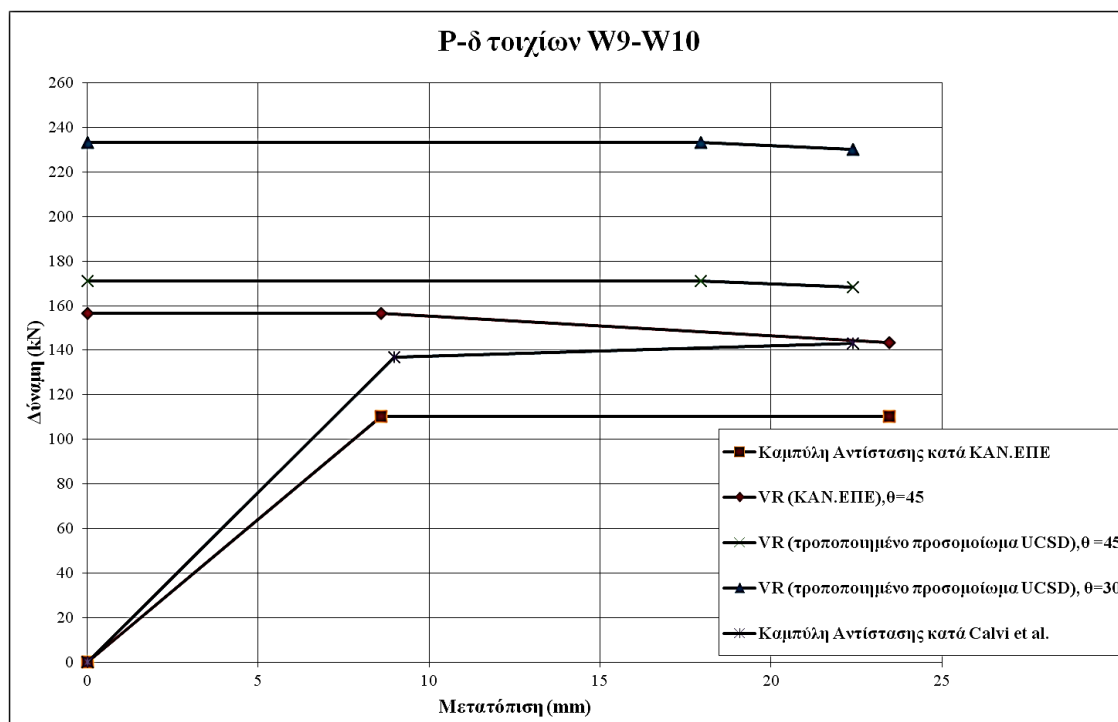
Διάγραμμα 4.45 Φορτίο-Διατμητικές παραμορφώσεις ανάλογα με το διατμητικό οπλισμό

Πίνακας 4.46 Συγκριτικός πίνακας καμπτικών και διατμητικών παραμορφώσεων στη διαρροή κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ και κατά το τροποποιημένο προσομοίωμα (W9-W10)

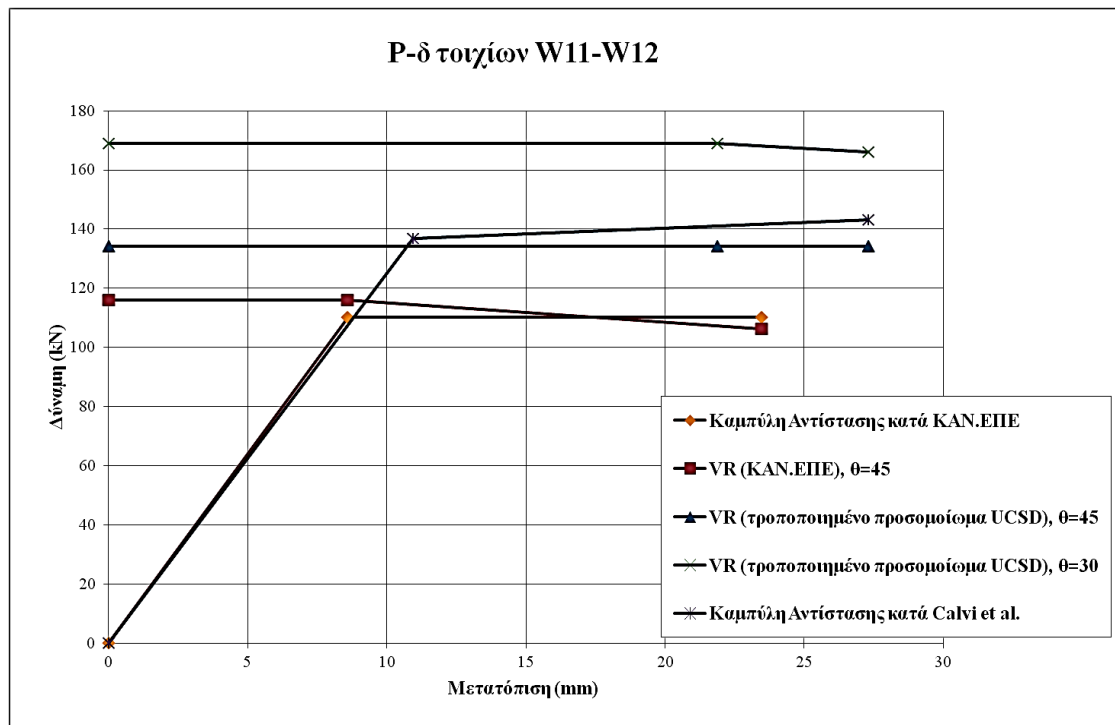
| W9-W10 | $\delta y, fl.$ (mm) | $\delta y, sh$ (mm) | $\delta u, fl$ (mm) | $\delta u, sh$ (mm) |
|--------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ΚΑΝ.ΕΠΕ | 5,5 | 2 | - | - |
| Calvi et al. | 4.8 | 2,3 | 15,2 | 6,8 |

Πίνακας 4.47 Συγκριτικός πίνακας καμπτικών και διατμητικών παραμορφώσεων στη διαρροή κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ και κατά το τροποποιημένο προσομοίωμα (W11-W12)

| W11-W12 | $\delta y, fl.$ (mm) | $\delta y, sh$ (mm) | $\delta u, fl$ (mm) | $\delta u, sh$ (mm) |
|--------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ΚΑΝ.ΕΠΕ | 5,5 | 2 | - | - |
| Calvi et al. | 4.8 | 3,82 | 15,2 | 11,5 |



Διάγραμμα 4.48 Καμπτικές και διατμητικές καμπύλες δοκιμών 11,12 κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. και κατά Calvi et al.



Διάγραμμα 4.49 Καμπτικές και διατμητικές καμπύλες δοκιμίων 9,10 κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. και κατά Calvi et al.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα και πίνακες το τροποποιημένο προσομοίωμα δίνει μεγαλύτερες τιμές διατμητικής αντοχής και διατμητικών παραμορφώσεων άμεσα συναρτώμενων από το ποσοστό διατμητικού οπλισμού σε σύγκριση με το προσομοίωμα των ΚΑΝ.ΕΠΕ. και EC8. Οι τροποποιήσεις αυτές επικεντρώθηκαν στη συνεισφορά του σκυροδέματος και του οριζόντιου οπλισμού κορμού στη συνολική διατμητική αντοχή ενός μέλους. Για να προσδιοριστεί η συνεισφορά του κάθε μηχανισμού ξεχωριστά, βελτιώθηκε η σχέση υπολογισμού της αντοχής του σκυροδέματος αυξάνοντας τη συνεισφορά του και εισάγεται η έννοια της εξάρτησης της (μεταβλητής) γωνίας θλιπτήρων από το λόγο διάτμησης του μέλους. Το προσομοίωμα αυτό τέλος, επιδιώκει να μειώσει τη συνεισφορά του οριζόντιου οπλισμού στην αντοχή για μέλη με χαμηλό λόγο διάτμησης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων που υπολογίστηκαν από τους συντάκτες του άρθρου με βάση το προσομοίωμα αυτό με τα πειραματικά αποτελέσματα δοκιμίων με ελάχιστο οριζόντιο οπλισμό διάτμησης έδωσε πολύ ικανοποιητική σύγκλιση. Παρ' όλα αυτά, όπως θα δούμε και παρακάτω στα πειραματικά αποτελέσματα, το δοκίμιο W9 σημείωσε τιμές αντοχής μεγαλύτερες από την υπολογισθείσα καμπτική του αντοχή, με γωνίες ρηγμάτωσης που κυμάνθηκαν από 30° έως και 50°. Ομοίως, το δοκίμιο W11 αστόχησε διατμητικά σε λοξό εφελκυσμό με θραύση συνδετήρα, αλλά επέδειξε πλαστιμότητα και διατμητική αντοχή πολύ κοντά στην υπολογισθείσα από το παραπάνω προσομοίωμα για γωνία ρηγμάτωσης 30°.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΘΛΙΠΤΗΡΑ-ΕΛΚΥΣΤΗΡΑ

Λόγω απόκλισης θεωρητικών με τις πειραματικές τιμές στα δοκίμια με ελαφρύ διατμητικό σπλισμό αλλά κυρίως λόγω του σχετικά μικρού λόγου διάτμησής τους είναι πιθανό να μην αναπτύχθηκε ο μηχανισμός δικτύωματος Morsch, αλλά η αντοχή να προσδιορίζεται καλύτερα μέσω ενός απλού προσομοιώματος θλιπτήρα σκυροδέματος-ελκυστήρων. Αυτό σημαίνει ότι η αντοχή είναι η συνισταμένη των δυνάμεων που παράγονται από ένα λοξό θλιπτήρα σκυροδέματος και κατακόρυφους ελκυστήρες τις ακραίες εφελκυσόμενες διαμήκειες ράβδους, ελαχιστοποιώντας έτσι τη συμβολή των συνδετήρων, ειδικά όταν είναι τοποθετημένοι σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους.

Από εφαρμογές της μεθόδου που έκαναν οι Bay, Franz, Leonhardt και Thurlimann σε στοιχεία σπλισμένου σκυροδέματος που βρίσκονται κάτω από επίπεδη ένταση, όπως οι υψίκορμες δοκοί και οι βραχείς πρόβολοι, προέκυψε ότι η ανάλυση με την χρήση του αναλόγου των ελκυστήρων και θλιπτήρων έδινε αποτελέσματα που προσέγγιζαν την πραγματικότητα με μεγάλη συνέπεια.

Σύμφωνα με την μέθοδο αναλύεται η κατασκευή βάσει της δοσμένης γεωμετρίας και φόρτισης, μέσω διαδρομών που ακολουθούν τα εσωτερικά και τα εξωτερικά φορτία, ώστε στο τέλος να παράγεται ένα δικτύωμα που να υπακούει στην ισορροπία εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων.

Ο λοξός θλιπτήρας μπορεί είτε να ακολουθεί διαδρομή απευθείας από το σημείο εφαρμογής του φορτίου μέχρι τη στήριξη υπό σταθερή γωνία αν το ύψος του δοκιμίου είναι μικρό, με μέγιστο πλάτος και τάση στο μέσον, είτε να αναπτύσσεται δικτύωμα με πέλματα τις ακραίες εφελκυσόμενες ράβδους, ορθοστάτες τους συνδετήρες και λοξές θλιβόμενες διαγωνίους σκυροδέματος, αλλά όχι υπό σταθερή γωνία θλιπτήρων. Όλα αυτά βέβαια είναι υποθέσεις που εγείρονται από την πειραματική συμπεριφορά ενός μικρού εύρους δοκιμίων που πραγματεύεται η παρούσα εργασία με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Αν παραμβλέποντας τη συνεισφορά των συνδετήρων υποτεθεί ότι το πλάτος του θλιπτήρα είναι όσο το πλάτος της διατομής (b_w), το πάχος του (κάθετα στη διεύθυνσή του) είναι b_c και η τάση που αναπτύσσεται στον σκυρόδεμα είναι f_c , η δύναμη ενός λοξού θλιπτήρα είναι:

$$F_c = f_c \cdot b_c \cdot b_w \quad (4.27)$$

Στην οριακή αντοχή οι ορθές τάσεις φθάνουν την αντοχή του σκυροδέματος στο πλήρες πλάτος του θλιπτήρα. Επί το δυσμενέστερο μπορεί να θεωρηθεί σταθερό το πλάτος και οι τάσεις του θλιπτήρα σε όλο το μήκος του.

Η εγκάρσια στο διαμήκη άξονα συνιστώσα της δύναμης ενός θλιπτήρα είναι:

$$P_{F_c} = F_c \cdot \sin\theta, \quad (4.28)$$

όπου θ είναι η κλίση του θλιπτήρα ως προς το διαμήκη άξονα του μέλους.

Η προβολή της δύναμης του θλιπτήρα στο διαμήκη άξονα του μέλους αποτελεί μέρος της συνολικής θλιπτικής δύναμης του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη και είναι ίση με:

$$N_{F_c} = F_c \cdot \cos\theta \quad (4.29)$$

Σε μέλη με μικρό λόγο διάτμησης η συνθήκη επιπεδότητας των διατομών δεν ισχύει οπότε η ισοροπία των δυνάμεων δεν είναι απαραίτητη συνθήκη, σε μέλη ωστόσο που έχουν μεν χαμηλό λόγο διάτμησης αλλά η συμπεριφορά τους προσεγγίζει την καμπτική απόκριση, η παραβίαση της συνθήκης μπορεί να οδηγήσει σε μη ρεαλιστικές εκτιμήσεις.

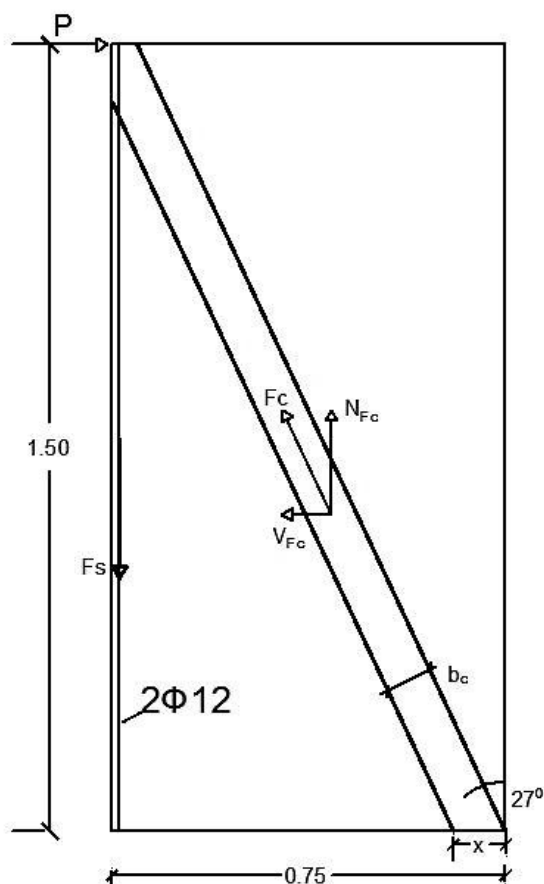
Από την ισοροπία στην κατακόρυφη διεύθυνση για τη δύναμη των ελκυστήρων ισχύει:

$$F_s = \Sigma f_s \cdot A_s = \frac{P}{\tan\theta} = N_{F_c} = F_c \cdot \cos\theta \quad (4.30)$$

Κάθε στάθμη οπλισμού κατά μήκος της διατομής αποτελείται από δύο ράβδους. Αν στο μηχανισμό θλιπτήρα ελκυστήρα συμμετέχει μόνο η ακραία εφελκύμενη στάθμη με δυο ράβδους $\Phi 12$ (W9-W12), το εμβαδό είναι $0,000226\text{m}^2$. Αν συμμετέχει και η δεύτερη στάθμη, το εμβαδό είναι $0,000452\text{m}^2$. Αν συμμετέχει και η τρίτη στάθμη, το εμβαδό είναι $0,000678\text{m}^2$ κ.ο.κ. Για χάλυβα με κράτυνση, από τη δοκιμή των ράβδων διαμέτρου $\Phi 12$ η τάση διαρροής προκύπτει 580MPa και η τάση θραύσης 670MPa .

Αρχικά δοκιμάστηκε το απλοποιημένο προσομοίωμα ενός θλιπτήρα και των δύο ακραίων εφελκύμενων ράβδων ως ελκυστήρες ($A_s=0,000226\text{m}^2$) που υπακούει στη δεδομένη γεωμετρία των δοκιμίων (δηλαδή για μήκος $d=l_w=0,75\text{m}$ και ύψος $h_1=L_v=1,5\text{m}$). Οι τάσεις έτσι διανέμονται μέσω ενός ορθογωνίου τριγώνου με υποτεινούσα τον θλιπτήρα που ξεκινά από το σημείο εφαρμογής του φορτίου και καταλήγει στην στήριξη υπό τη γεωμετρική γωνία ($\tan\theta=1,5/0,75=26,56^\circ$) και κάθετη πλευρά τους ελκυστήρες. Η μέγιστη δύναμη που μπορούν να αναλάβουν 2 ράβδοι των $\Phi 12$ είναι $F_{s,\max}=151\text{kN}$. Για να ικανοποιείται η ισοροπία στην κατακόρυφη διεύθυνση επομένως περιορίζεται η τάση ή το πλάτος που μπορεί να αναπτύξει ο θλιπτήρας και το οριζόντιο φορτίο P που μπορεί να μεταφερθεί κυμαίνεται στα 76kN .

Στη συνέχεια συμπεριλήφθηκαν στο προσομοίωμα περισσότερες εφελκύμενες ράβδοι (4 και 6), πράγμα που μίκρυνε τη γωνία μιας και η κατακόρυφη συνιστώσα του τριγώνου τοποθετείται πλέον στο κέντρο βάρους των ελκυστήρων. (δηλαδή για $d=0,6-0,65\text{m}$ και $h_1=L_v$, $\theta=21^\circ-23^\circ$).

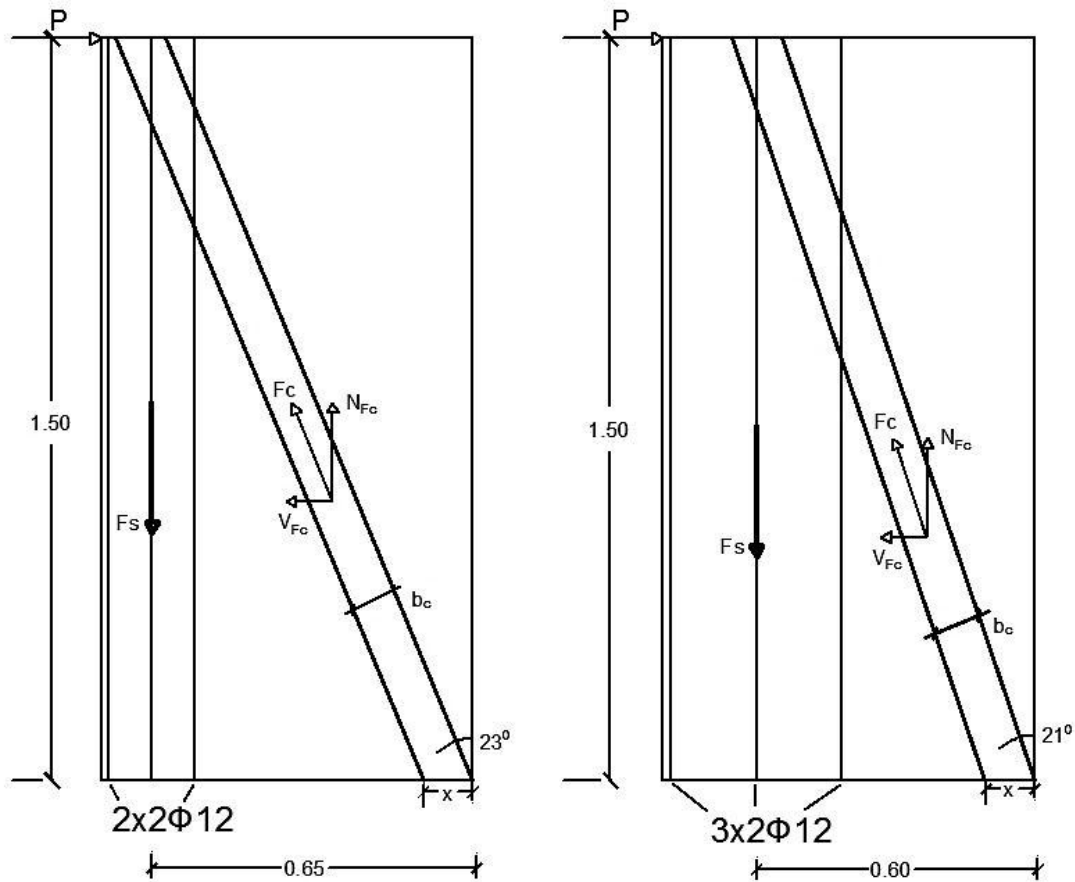


Εικόνα 4.50 Απλοποιημένο Προσομοίωμα θλιπτήρα-ελκυστήρα

Πίνακας 4.51 Δοκιμές για το απλοποιημένο Προσομοίωμα θλιπτήρα-ελκυστήρα

| 2 ραβδοί | L_v (m) | d (m) | b (m) | θ | $\sin\theta$ | $\cos\theta$ |
|----------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------|---------------|--------------|
| | 1.5 | 0.75 | 0.125 | 26,56 | 0.447 | 0.8945 |
| | A_s (m ²) | f_{sy} (kN/m ²) | f_{su} (kN/m ²) | F_{sy} (kN) | F_{su} (kN) | |
| | 0.000226 | 580000 | 670000 | 131 | 151 | |

| f_s (kN/m ²) | F_s (kN) | F_c (kN) | b_c (m) | f_c (kN/m ²) | P (kN) |
|----------------------------|------------|------------|-----------|----------------------------|----------|
| 580000 | 131 | 147 | 0,05 | 23520 | 66 |
| 580000 | 131 | 147 | 0,1 | 11760 | 66 |
| 580000 | 131 | 147 | 0,15 | 7840 | 66 |
| 580000 | 131 | 147 | 0,2 | 5880 | 66 |
| 600000 | 136 | 152 | 0,05 | 24320 | 68 |
| 600000 | 136 | 152 | 0,1 | 12160 | 68 |
| 600000 | 136 | 152 | 0,15 | 8107 | 68 |
| 600000 | 136 | 152 | 0,2 | 6080 | 68 |
| 670000 | 151 | 169 | 0,05 | 27040 | 76 |
| 670000 | 151 | 169 | 0,1 | 13520 | 76 |
| 670000 | 151 | 169 | 0,15 | 9013 | 76 |
| 670000 | 151 | 169 | 0,2 | 6760 | 76 |



Εικόνα 4.52 Προσομοίωμα θλιπτήρα-ελκυστήρα για 4 και 6 ελκυστήρες αντίστοιχα

Από την παραδοχή της επιπεδότητας των διατομών οι τάσεις στις διαμήκεις ράβδους θα έπρεπε να μειώνονται γραμμικά από την ακραία εφελκυόμενη ως την ακραία θλιβόμενη στάθμη οπλισμού. Κάτι τέτοιο ωστόσο περιπλέκει αρκετά το προσομοίωμα μιας και για κάθε στάθμη παράγεται ένας αντίστοιχος θλιπτήρας.

Γίνεται η παραδοχή ότι ενεργοποιείται ένας «ελκυστήρας» στο κέντρο βάρους των σταθμών των διαμήκων ράβδων που συμμετέχουν στο δικτύωμα και η τάση που αναπτύσσει είναι η τάση διαρροής (έως αστοχίας) μιας ράβδου $\Phi 12$ επί το συνολικό εμβαδόν όλων των ράβδων.

Πίνακας 4.53 Δοκιμές για το Προσομοίωμα θλιπτήρα-ελκυστήρα με 4 διαμήκεις ράβδους

| 4 ραβδοί | Lv (m) | d (m) | b (m) | θ° | $\sin\theta$ | $\cos\theta$ |
|----------|----------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| | 1.5 | 0.65 | 0.125 | 23 | 0.39 | 0.92 |
| | As (m ²) | fsy (kN/m ²) | fsu (kN/m ²) | ΣF_{sy} (kN) | ΣF_{su} (kN) | |
| | 0,000452 | 5800000 | 670000 | 262 | 303 | |

| fs (kN/m ²) | Fs (kN) | Fc (kN) | bc (m) | fc (kN/m ²) | P (kN) |
|-------------------------|---------|---------|--------|-------------------------|--------|
| 580000 | 262 | 285 | 0,05 | 45565 | 111 |
| 580000 | 262 | 285 | 0,1 | 22783 | 111 |
| 580000 | 262 | 285 | 0,15 | 15188 | 111 |
| 580000 | 262 | 285 | 0,2 | 11391 | 111 |
| 600000 | 271 | 295 | 0,05 | 47130 | 115 |
| 600000 | 271 | 295 | 0,1 | 23565 | 115 |
| 600000 | 271 | 295 | 0,15 | 15710 | 115 |
| 600000 | 271 | 295 | 0,2 | 11783 | 115 |
| 670000 | 303 | 329 | 0,05 | 52696 | 128 |
| 670000 | 303 | 329 | 0,1 | 26348 | 128 |
| 670000 | 303 | 329 | 0,15 | 17565 | 128 |
| 670000 | 303 | 329 | 0,2 | 13174 | 128 |

Πίνακας 4.54 Δοκιμές για το Προσομοίωμα θλιπτήρα-ελκυστήρα με 6 διαμήκεις ράβδους

| 6 ραβδοί | Lv (m) | d (m) | b (m) | θ° | $\sin\theta$ | $\cos\theta$ |
|----------|----------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| | 1.5 | 0.56 | 0.125 | 21 | 0.36 | 0.93 |
| | As (m ²) | fsy (kN/m ²) | fsu (kN/m ²) | ΣF_{sy} (kN) | ΣF_{su} (kN) | |
| | 0,000678 | 5800000 | 670000 | 393 | 454 | |

| fs (kN/m ²) | Fs (kN) | Fc (kN) | bc (m) | fc (kN/m ²) | P (kN) |
|-------------------------|---------|---------|--------|-------------------------|--------|
| 580000 | 393 | 423 | 0,05 | 67613 | 152 |
| 580000 | 393 | 423 | 0,1 | 33806 | 152 |
| 580000 | 393 | 423 | 0,15 | 22538 | 152 |
| 580000 | 393 | 423 | 0,2 | 16903 | 152 |
| 600000 | 407 | 438 | 0,05 | 70022 | 158 |
| 600000 | 407 | 438 | 0,1 | 35011 | 158 |
| 600000 | 407 | 438 | 0,15 | 23341 | 158 |
| 600000 | 407 | 438 | 0,2 | 17505 | 158 |
| 670000 | 454 | 488 | 0,05 | 78108 | 176 |
| 670000 | 454 | 488 | 0,1 | 39054 | 176 |
| 670000 | 454 | 488 | 0,15 | 26036 | 176 |
| 670000 | 454 | 488 | 0,2 | 19527 | 176 |

Πίνακας 4.55 Μεταβολή του φορτίου για μείωση της γωνίας του προσομοιώματος, υπό την προϋπόθεση ότι δεν προηγείται αστοχία σε λοξή θλίψη του σκυροδέματος

| | Fs | cos θ | Fc | sin θ | V _{Fc} | N _{Fc=Fs} | P |
|-----------------|----|--------------|----|--------------|-----------------|--------------------|----|
| ΜΕΙΩΣΗ θ | ↑ | ↑ | ↑ | ↓ | ↑↓ | ↑ | ↑↓ |
| | ↑↑ | ↑ | ↑↑ | ↓ | ↑ | ↑↑ | ↑ |

Παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνονται οι ελκυστήρες στο δυναμοτρίγωνο αυξάνεται η δύναμη που μπορεί να αναλάβει ο θλιπτήρας –μέχρις ότου βέβαια να φτάσει το σκυρόδεμα την αντοχή του σε λοξή θλίψη-, και κατά συνέπεια αυξάνεται η διατμητική δύναμη που μπορεί να μεταφερθεί στη θεμελίωση. Έτσι αν και γενικώς όσο μεγαλώνει η γωνία ρηγμάτωσης η εγκάρσια στον άξονα δύναμη που αναπτύσσει ο θλιπτήρας μεγαλώνει επίσης, βλέπουμε ότι και ο ενδιάμεσος διαμήκης οπλισμός έχει σημαντική συνεισφορά στο μηχανισμό μεταβίβασης του φορτίου, παρ’ ότι η γωνία ρηγμάτωσης με την αύξηση του διαμήκους οπλισμού στο συγκεκριμένο προσομοίωμα μειώνεται. Ακόμη, αν η αντοχή του σκυροδέματος είναι αρκετά μεγάλη, αύξηση της γωνίας ρηγμάτωσης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της συνολικής αντοχής ακόμα και για λιγότερους διαμήκεις ελκυστήρες να συμμετέχουν στο μηχανισμό.

Πίνακας 4.56 Μεταβολή του φορτίου για αύξηση της γωνίας του προσομοιώματος, υπό την προϋπόθεση ότι δεν προηγείται αστοχία σε λοξή θλίψη του σκυροδέματος

| | F_s | cosθ | F _c | sinθ | V _{F_c} | N _{F_c} =F _s | P |
|----------|----------------------|------|----------------|------|----------------------------|--|----|
| ΑΥΞΗΣΗ θ | ↓ | ↓ | ↑↓ | ↑ | ↑ | ↓ | ↑ |
| | ↑ | ↓ | ↑↑ | ↑ | ↑↑ | ↑ | ↑↑ |

Τέλος, το εύρος τιμών που προκύπτει από τη θεώρηση έξι έναντι δύο ελκυστήρων και γωνία θλιπτήρα περίπου 21° ξεπερνάει (KAN.ΕΠΕ.) ή συγκλίνει ικανοποιητικά (Calvi et al., Συμβατική διγραμμική Καμπύλη Αντίστασης) με την αντοχή που υπολογίστηκε από τα προαναφερθέντα προσομοιώματα για γωνία ρηγμάτωσης 45° για τα ελαφρώς οπλισμένα δοκίμια. Το δοκίμιο W11 με συνδετήρες Φ6/400 έναντι Φ8/400 του W9 αστόχησε με θράυση συνδετήρα (δηλαδή διατμητικά) αλλά επέδειξε μεγαλύτερη αντοχή (140kN) από την προβλεπόμενη κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ., και πολύ κοντά στην προβλεπόμενη τιμή διατμητικής αντοχής κατά Calvi et al για κρίσιμη γωνία ρηγμάτωσης 45°. Έτσι η *διατμητική* αντοχή γι’ αυτό το δοκίμιο είναι δυνατόν να προσδιοριστεί σε επίπεδο ανάλυσης με ένα προσομοίωμα σαν αυτό της μεταβλητής γωνίας του Calvi ή και με το προσομοίωμα θλιπτήρα-ελκυστήρα με 6 διαμήκεις ράβδους ως ελκυστήρες, παρ’ ότι οι πειραματικές γωνίες ρηγμάτωσης προδίδουν μια πιο σύνθετη γεωμετρία τάσεων κατά την αστοχία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΑ ΤΟΙΧΙΑ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗ

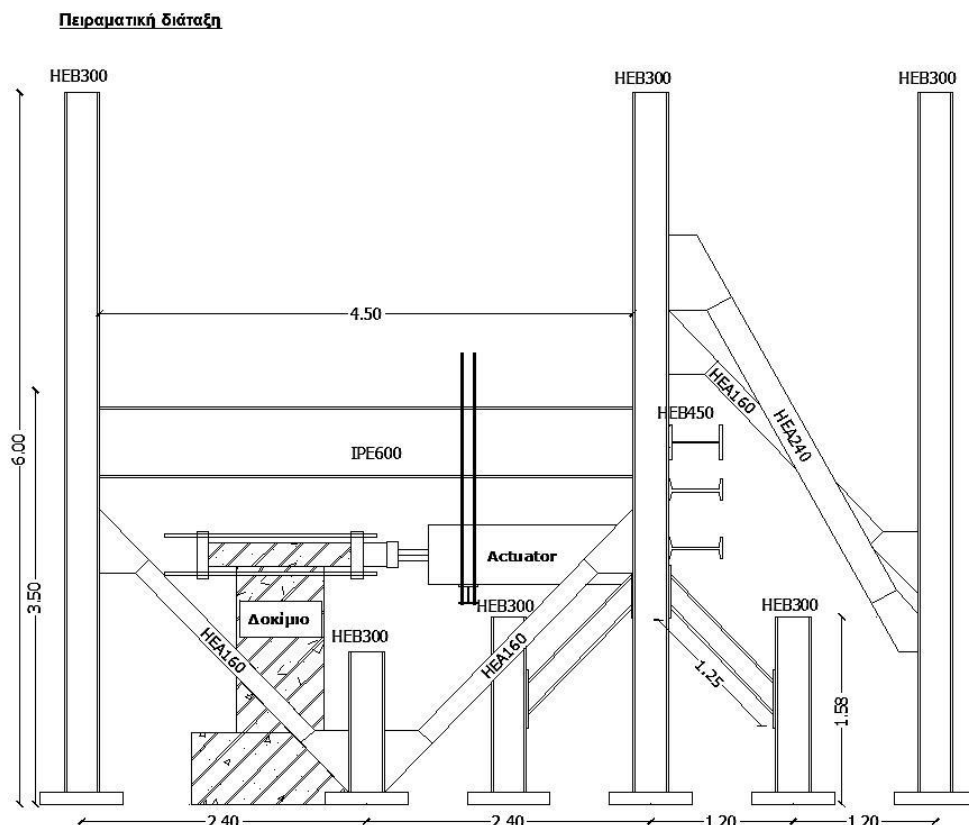
5.1 Πειραματική διάταξη

Στόχος της πειραματικής διαδικασίας είναι η σύνθεση μιας απλής πειραματικής διάταξης, η οποία θα επιτρέπει την εύκολη καταγραφή, περιορίζοντας το σφάλμα μέτρησης. Στην περίπτωση τοιχώματος με στατικό σύστημα προβόλου, όπου το φορτίο επιβάλλεται στην κορυφή, το διάγραμμα ροπών έχει τριγωνική κατανομή με μηδενική τιμή στην κορυφή και μέγιστη στη βάση. Το μήκος διάτμησης, L_s , ισούται με το ύψος του δοκιμίου ως το σημείο επιβολής του φορτίου. Η παραμόρφωση δ μετράται στο σημείο επιβολής του φορτίου και αν διαιρεθεί με το μήκος διάτμησης, L_s , προκύπτει η γωνία στροφής χορδής, θ .

Κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του ΕΜΠ έξι δοκίμια στη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2012-2013 τα δύο εκ των οποίων σύμφωνα με τα σύγχρονα αντισεισμικά πρότυπα και τα υπόλοιπα τέσσερα σύμφωνα με τους παλαιότερους (προ του 1985) κανονισμούς.

Στο πλαίσιο της πειραματικής διαδικασίας που έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Ε.Μ.Π. το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013, μελετήθηκε πειραματικά η αντισεισμική απόκριση των τοιχωμάτων W7, W9 και W11 σε συνθήκες στατικής ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Στόχος ήταν η καταγραφή των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις που διεξάχθηκαν κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων κατά ένα γενικό τρόπο έτσι ώστε να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα.

Τα τοιχώματα εξασφάλισαν τη μεταφορά των φορτίων στο έδαφος μέσω πάκτωσης της βάσης θεμελιώσεως τους στο εργαστηριακό δάπεδο. Τέσσερα αγκύρια διέρχονται διαμπερώς τη βάση του τοιχίου στα άκρα της και βιδώνονται σε τέσσερις οπές του καννάβου του εργαστηριακού δαπέδου. Έγινε σύνδεση της κεφαλής του επενεργητή (actuator) με πλάκα επί της πρισματικής δοκού στο άνω μέρος του τοιχώματος. Μία όμοια πλάκα συνδέθηκε με την αρχική μέσω τεσσάρων ντιζών προκειμένου να επιτευχθεί η εναλλασσόμενη φόρτιση (σεισμική προσομοίωση). Οι δύο αυτές πλάκες προσανατολίστηκαν με τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η κεντρική φόρτιση της πρισματικής δοκού.



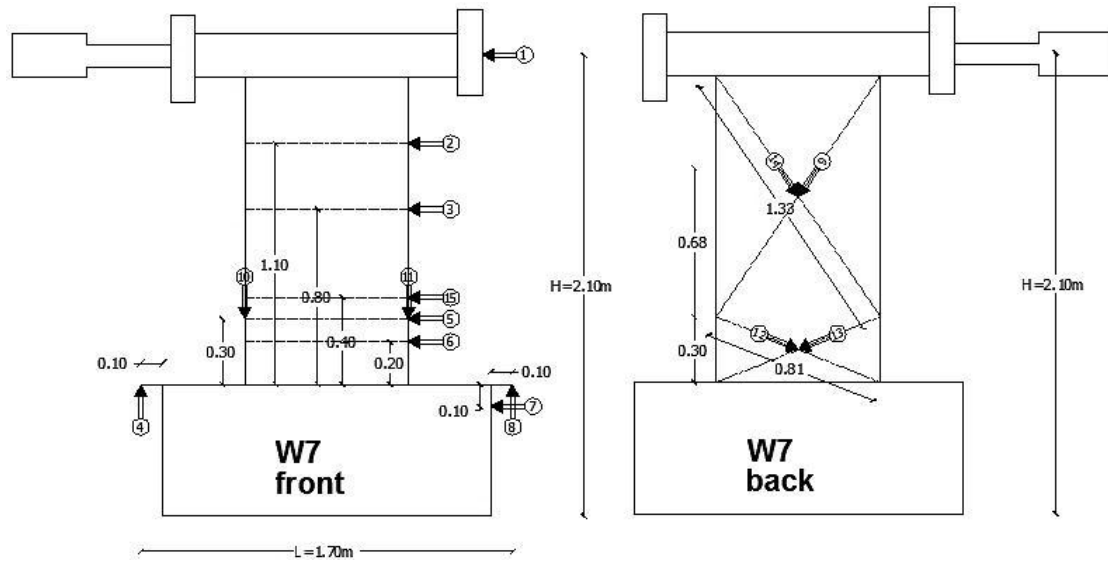
Σχήμα 5.1 Πειραματική διάταξη

5.2 Βελόμετρα

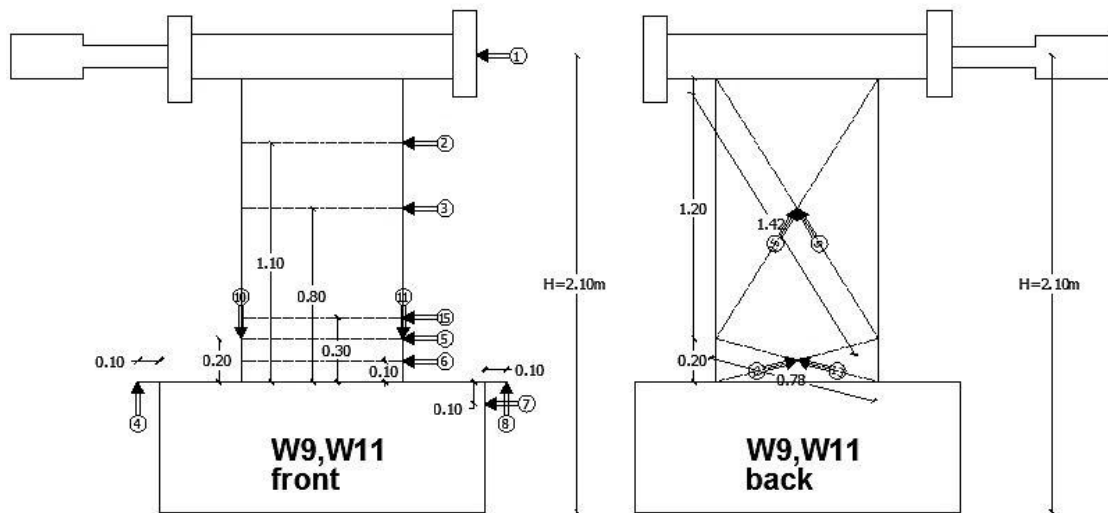
Για την ακριβή μέτρηση των μετατοπίσεων στα διαφορετικά «κρίσιμα» σημεία των δοκιμών, χρησιμοποιήθηκαν δεκαπέντε βελόμετρα με δυνατότητα μέτρησης μέγιστης μετατόπισης 50mm ,100mm και 200mm.



Εικόνα 5.2 Βελόμετρα



Σχήμα 5.3 Διάταξη βελομέτρων δοκιμίου W7



Σχήμα 5.4 Διάταξη βελομέτρων δοκιμίων W9,W11

Η οριζόντια μετατόπιση κορυφής του τοιχώματος, δ_{top} , είναι το άθροισμα της μετατόπισης λόγω καμπτικών και της μετατόπισης λόγω διατμητικών παραμορφώσεων. Υπολογίστηκε αφαιρώντας από την τιμή καταγραφής του βελομέτρου 1, την τιμή καταγραφής της ολίσθησης της βάσης θεμελίωσης (βελόμετρο 7) και τη στροφή της ως στερεό σώμα (βελόμετρα 4 και 8). Ο τύπος διόρθωσης είναι:

$$\delta_{top} = \delta_1 - \delta_7 - (\delta_8 - \delta_4) \cdot \frac{(H-l_1)}{L} \quad (5.1)$$

Η είναι το συνολικό ύψος του τοιχίου από το δάπεδο ως το ύψος του βελομέτρου 1, L είναι η απόσταση μεταξύ των βελομέτρων 4 και 8 και l_1 είναι η απόσταση από το δάπεδο ως το βελόμετρο 7.

Για τον υπολογισμό της οριζόντιας μετατόπισης στα σημεία που είναι τοποθετημένα τα βελόμετρα 2, 3, 15, 5, 6, αφαιρείται από την τιμή που καταγράφουν η ολίσθηση στη βάση και η μετατόπιση λόγω στροφής. Τα βελόμετρα 10 και 11 καταγράφουν με άθροιση των τιμών τους τη στροφή της άνω διατομής του πλαστικοποιημένου μήκους.

Τέλος, τα τέσσερα χιαστί βελόμετρα 9, 12, 13, 14 στην όψη όπισθεν του τοιχίου τοποθετούνται για τη μέτρηση της διατμητικής παραμόρφωσης στην πλαστική περιοχή και στο υπόλοιπο άνω τμήμα του τοιχώματος.

5.3 Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων

Τα πειραματικά αποτελέσματα του πρώτου κύκλου μετρήσεων αφορούν στα δοκίμια W7, W9 και W11. Τα δοκίμια W8 και W10 μελετώνται πειραματικά υπό την συμβολή της χαλύβδινης ενίσχυσης στην παρούσα εργασία. Η ενίσχυση του δοκιμίου W12 θα αποτελέσει πιθανώς αντικείμενο επόμενης εργασίας. Παρατίθενται ωστόσο τα κυριότερα αποτελέσματα και κρίσιμα συμπεράσματα που προέκυψαν για τα τοιχία 7,9,11 και οδήγησαν στην απόφαση επέμβασης στα δοκίμια 8,10,12.

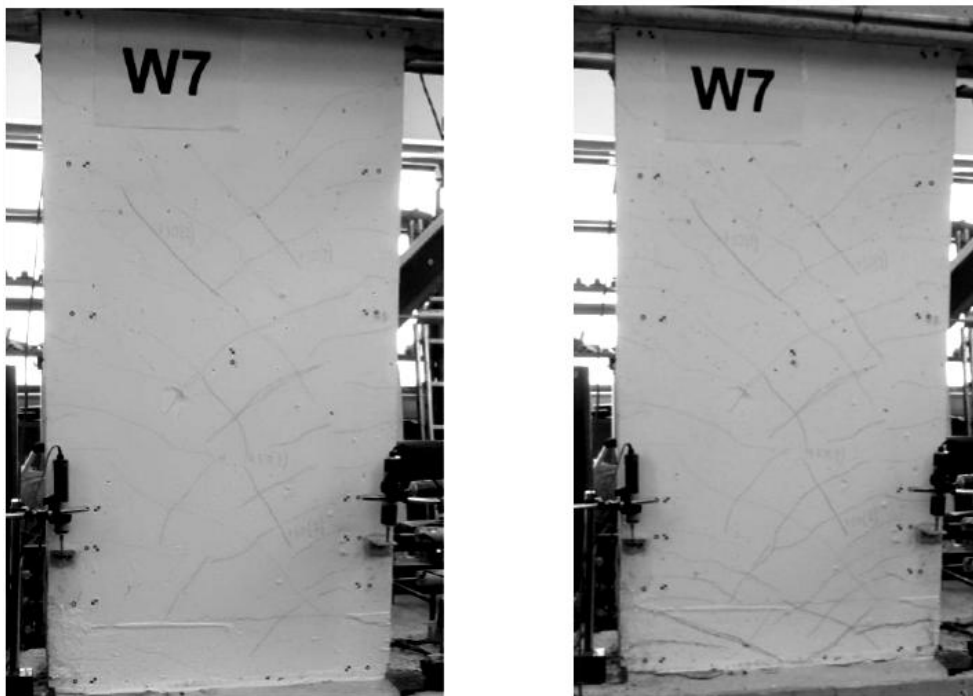
5.3.1 Διαδικασία και κύκλοι φόρτισης

Επιβλήθηκαν μέσω του επενεργητή ελεγχόμενες μετατοπίσεις οι οποίες ξεκινώντας από το μηδέν αυξάνονται σταδιακά προς τα θετικά και στη συνέχεια αναστρέφονται προς τα αρνητικά με ακραίες τιμές, αρχικά, $\pm 10\text{mm}$ ύστερα $\pm 20\text{mm}$ αυξάνοντας έτσι συνεχώς κατά 10mm τη μετατόπιση έως ότου παρατηρηθεί αστοχία του δοκιμίου. Για κάθε μία μέγιστη τιμή μετατόπισης πραγματοποιήθηκαν τρεις κύκλοι φόρτισης, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Ταυτόχρονα υπολογίζονται μέσω του προγράμματος που αναλύει τις καταγραφές των βελομέτρων και οι αντίστοιχες αναπτυσσόμενες δυνάμεις στις ακραίες τιμές.

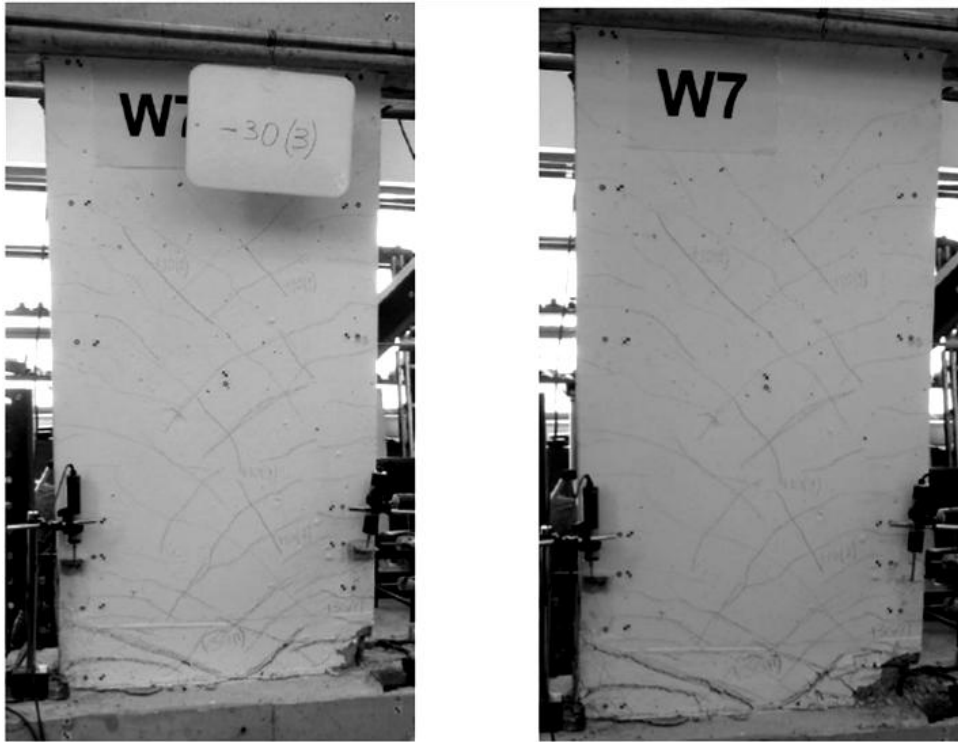
5.3.2 Υστερητική συμπεριφορά δοκιμίων

Δοκίμιο W7

Το δοκίμιο στους κύκλους των $\pm 10\text{mm}$ εμφάνισε μικρού εύρους και μήκους οριζόντιες και κεκλιμένες τριχοειδείς ρωγμές καθύψος ενώ διατήρησε την αρχική του δυσκαμψία, στους κύκλους των $\pm 20\text{mm}$ οι κεκλιμένες ρωγμές διευρύνθηκαν ελαφρά και παρουσιάστηκαν νέες κοντά στη βάση. Στον πρώτο κύκλο των ± 30 το δοκίμιο σημείωσε τη μέγιστη αντίστασή του η οποία ήταν ίση με $P_{\max} = 203,08 \text{ kN}$. Οι ρωγμές βάσης διευρύνθηκαν περισσότερο και παρουσιάστηκε μικρή αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης. Ταυτόχρονα έγινε εμφανής ο λυγισμός των ακραίων χαλύβων. Στους κύκλους των ± 40 οι ρωγμές και η αποφλοιώση του σκυροδέματος έγιναν εντονότερες και θραύστηκε μια ράβδος εφελκύμενου οπλισμού. Στον κύκλο των ± 50 η αποδιοργάνωση έγινε πλέον εντονότατη, ωστόσο ακόμα και σε αυτές τις μετατοπίσεις το δοκίμιο επέδειξε ψηλές τιμές αντίστασης (πάνω από το 80% της μέγιστης), και παραμόρφωση αστοχίας $51,75\text{mm}$, μεγαλύτερη από την υπολογισθείσα ($42,4\text{mm}$). Η μετατόπιση διαρροής από την τριγυραμμοποίηση της Περιβάλλουσας Καμπύλης Υστέρησης υπολογίστηκε ίση με $12,55\text{mm}$. Η πειραματική πλαστιμότητα του δοκιμίου ήταν έτσι: $\mu = 4,13$. Στις παρακάτω **Εικόνες 5.5, 5.6, 5.7** φαίνεται η ρηγμάτωση του δοκιμίου μέχρι το τέλος του πειράματος.



Εικόνα 5.5 Ρηγμάτωση δοκιμίου W7 στους κύκλους των $\pm 10\text{mm}$ και $\pm 20\text{mm}$

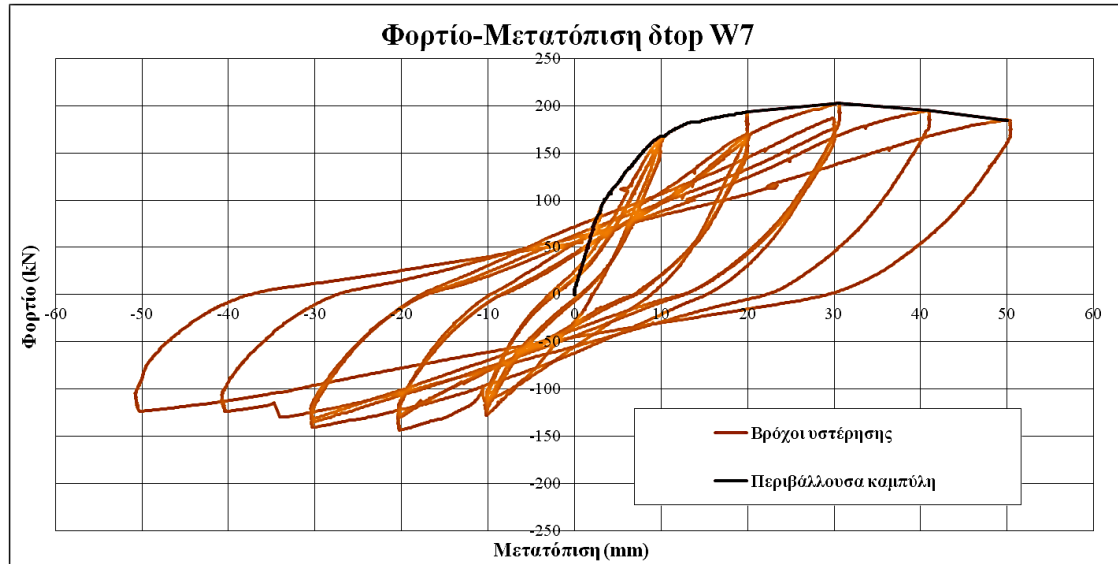


Εικόνα 5.6 Ρηγμάτωση δοκιμίου W7 στους κύκλους των $\pm 30\text{mm}$ και $\pm 40\text{mm}$



Εικόνα 5.7 Ρηγμάτωση δοκιμίου W7 στον κύκλο των $+50\text{mm}$ και μετά το τέλος του πειράματος

Στο **Διάγραμμα 5.8** δίνεται η υστερητική απόκριση του τοιχίου και η περιβάλλουσα των βρόχων υστέρησης για θετικές μετατοπίσεις (όπου και σημειώθηκαν οι μέγιστες αποκρίσεις). Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα αυτό, το δοκίμιο διατήρησε πάνω από το 80% της μέγιστης αντίστασής του (για την ακρίβεια $0,91P_{max}$) μέχρι και τους κύκλους των $\pm 50\text{mm}$.



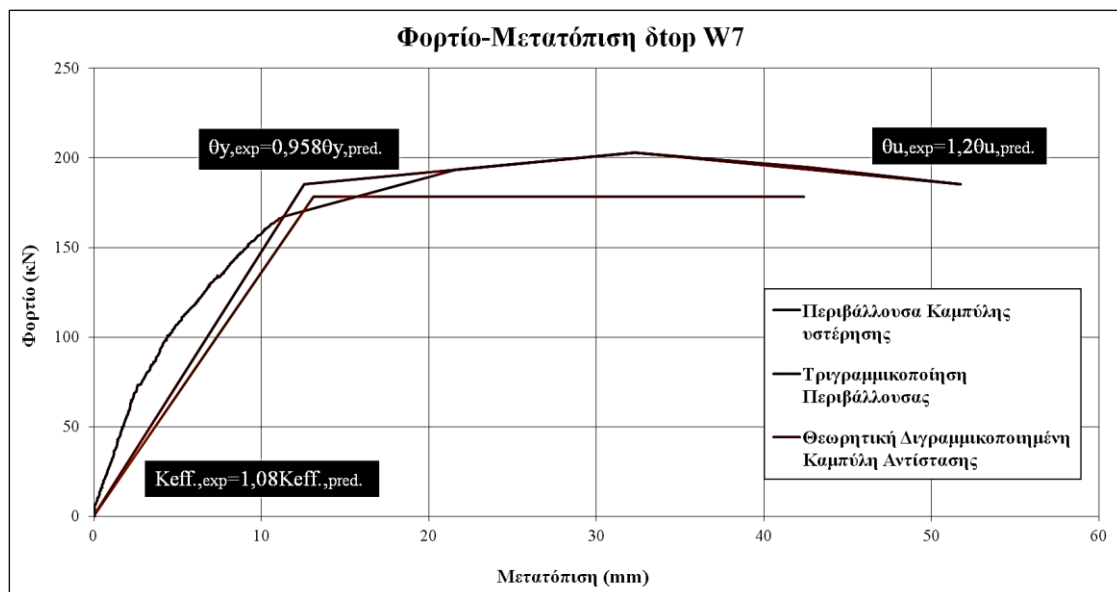
Διάγραμμα 5.8 Βρόγχοι Υστέρησης και Περιβάλλουσα βρόγχων (W7)

Από την τριγραμμικοποίηση της περιβάλλουσας (αναλυτικά για τον τρόπο τριγραμμικοποίησης βλ. Κεφάλαιο 7) και το συμβατικό διγραμμικοποιημένο διάγραμμα P-δ της ανάλυσης προέκυψε το **Διάγραμμα 5.9** όπου συγκρίνεται η θεωρητική με την πραγματική απόκριση. Η παραμόρφωση και η ενεργός δυσκαμψία προσεγγίστηκαν θεωρητικά με καλή ακρίβεια, το ίδιο και η τέμνουσα διαρροής. Η παραμόρφωση αστοχίας υποεκτιμήθηκε ελαφρώς.

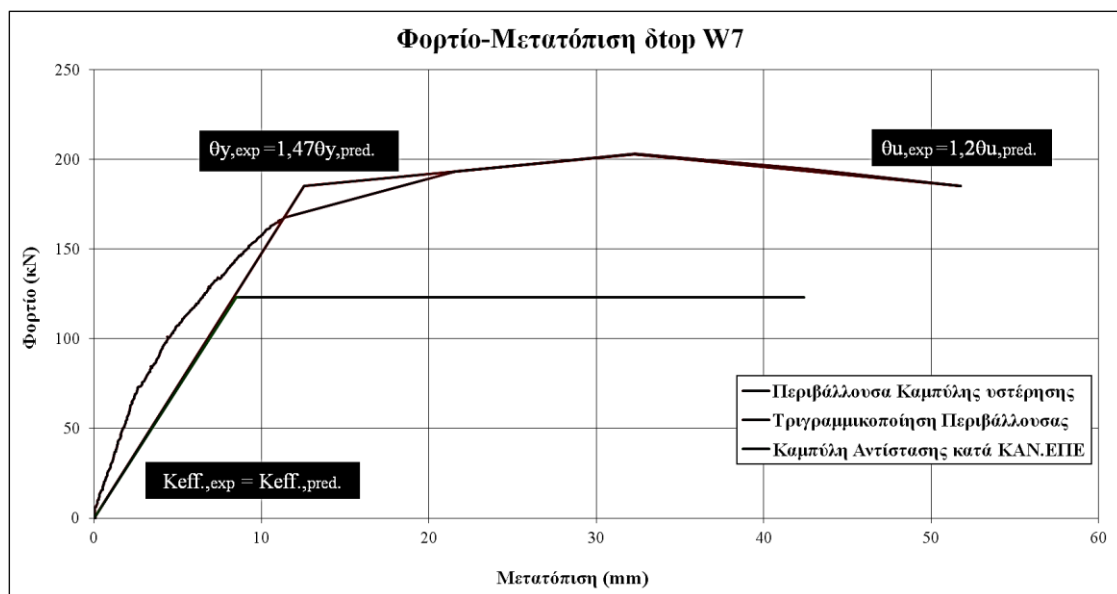
Αντίστοιχα, από την τριγραμμική περιβάλλουσα καμπύλη και την καμπύλη αντίστασης κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ προκύπτει το **Διάγραμμα 5.10**. Η ενεργός δυσκαμψία εκτιμάται με πάρα πολύ καλή ακρίβεια, σε αντίθεση με την παραμόρφωση και δύναμη διαρροής που υποεκτιμώνται αρκετά.

Παρατίθεται ο **Πίνακας 5.11** με τα συγκριτικά μεγέθη.

Τέλος, προκύπτει ότι η πειραματική ενεργός δυσκαμψία είναι μόλις το 12,21% της EI_{gross} (βλέπε **Πίνακα 4.12**)



Διάγραμμα 5.9 Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για την θεωρητική και πειραματική Καμπύλη Αντίστασης (W7)

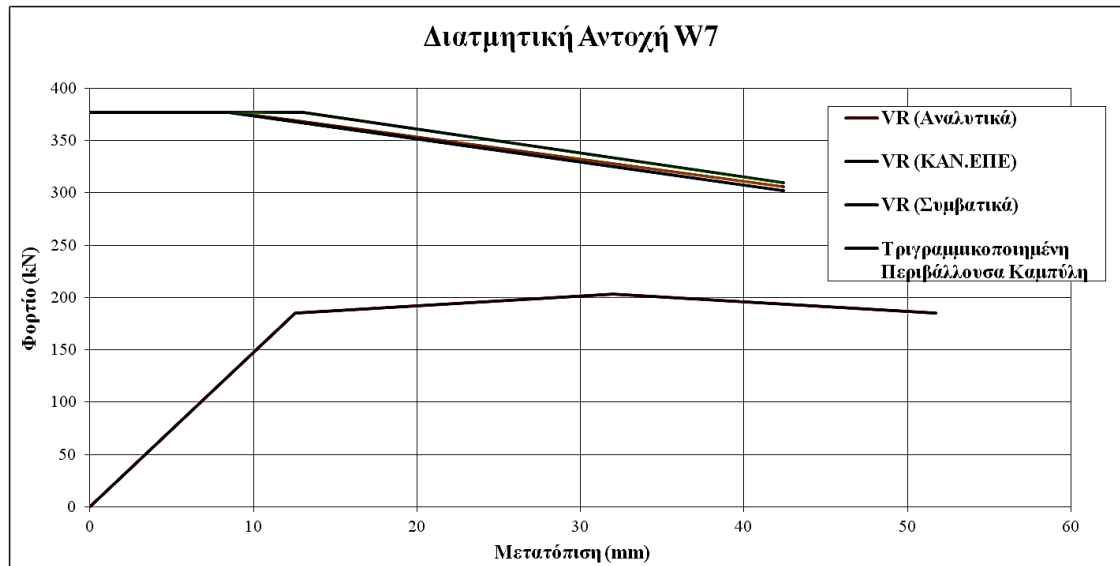


Διάγραμμα 5.10 Σύγκριτικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ και πειραματικά (W7)

Αντίστοιχα, από τη σύνταξη της πειραματικής τριγραμμικής Καμπύλης Αντίστασης και τη θεωρητική Διατμητική Αντοχή όπως προκύπτει και από τους τρεις τρόπους ανάλυσης (ΚΑΝ.ΕΠΕ-EC8, EC2, Συμβατικά), προκύπτει το Διάγραμμα 5.12 όπου και επιβεβαιώνεται ότι ο μηχανισμός αστοχίας σε κάμψη είναι ο κρίσιμος.

Πίνακας 5.11 Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών μεγεθών

| Μέγεθος | W7 | | |
|-------------------|-------------|-----------|---------|
| | ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ | ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ | |
| | Τριγωνικό | Συμβατικό | ΚΑΝ.ΕΠΕ |
| P_y (kN) | 185 | 178 | 123 |
| P_u (kN) | 185 | 178 | 123 |
| δ_y (mm) | 12,55 | 13,10 | 8,50 |
| δ_u (mm) | 51,75 | 42,40 | 42,40 |
| μ_δ | 4,13 | 3,25 | 4,96 |
| $K_{eff.}$ (kN/m) | 14746 | 13661 | 14738 |



Διάγραμμα 5.12 Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης της θεωρητικής Διατμητικής Αντοχής και της πειραματικής Καμπύλης Αντίστασης (W7)

Δοκίμιο W9

Το δοκίμιο W9 στους κύκλους των $\pm 10\text{mm}$ εμφάνισε μικρές αλλά επιμήκεις τριχοειδείς κεκλιμένες ρωγμές με αυξανόμενη κλίση καθ' ύψος. Στους κύκλους των ± 20 οι ρωγμές αυτές διευρύνθηκαν ενώ δημιουργήθηκαν νέες μαζί με μια διακριτή περίπου οριζόντια ρωγή στη βάση, ενώ κυριαρχούν σε εύρος και άνοιγμα ως το τέλος των κύκλων αυτών δυο κεκλιμένες διατμητικές ρωγμές.

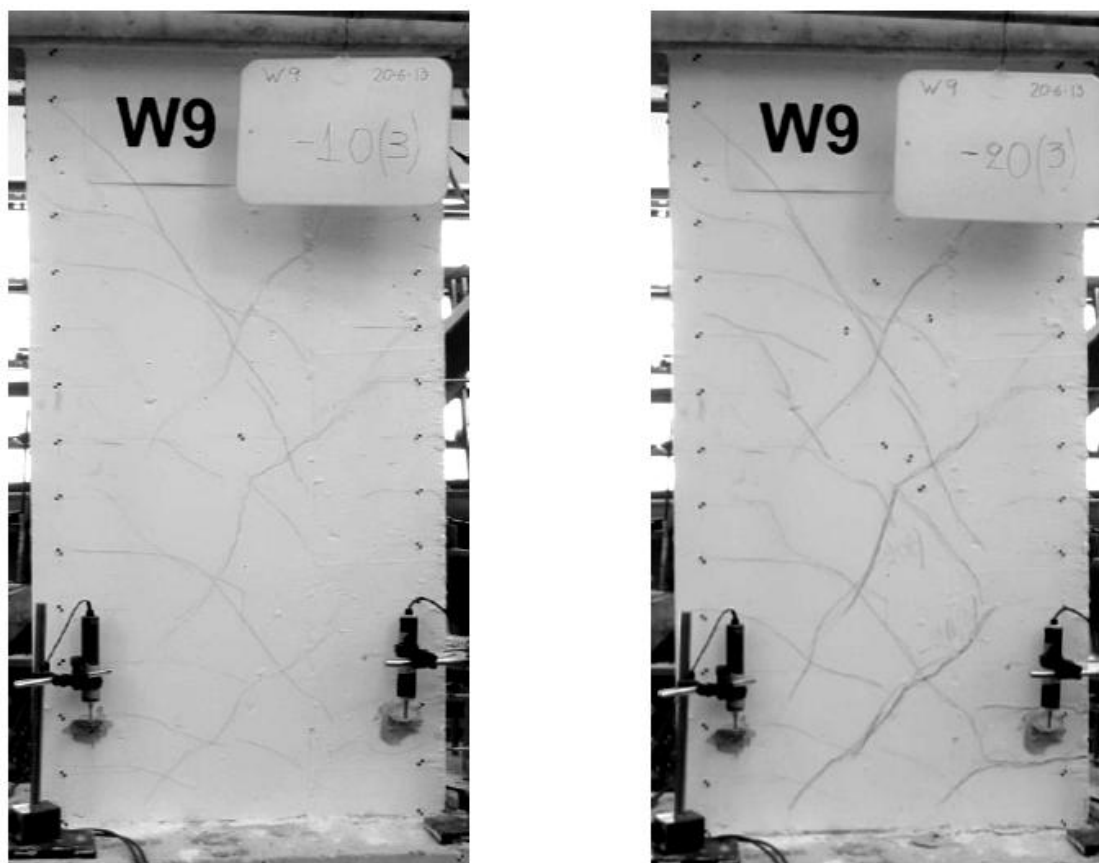
Στους κύκλους των $\pm 30\text{mm}$ η ρηγμάτωση εντείνεται και επεκτείνεται έντονα στη θλιβόμενη περιοχή κοντά στη βάση, και στον πρώτο κύκλο των 40mm αρχίζει η

αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης και σημειώνεται η μέγιστη αντίσταση του δοκιμίου, $P_{max} = 177,14 \text{ kN}$.

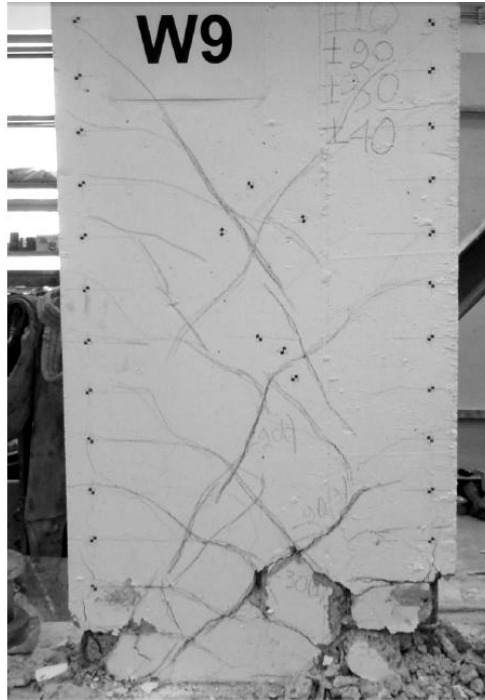
Στους επόμενους κύκλους των $\pm 40\text{mm}$ η αποφλοιώση του σκυροδέματος γίνεται ακόμα πιο έντονη και γίνεται εμφανής ο λυγισμός των θλιβόμενων διαμήκων ράβδων, ωστόσο το δοκίμιο συνεχίζει να αναλαμβάνει αρκετά ψηλές τιμές φορτίου.

Απότομη πτώση του φορτίου παρατηρείται κατά το πρώτο κύκλο των $\pm 50\text{mm}$ όπου φθάνει στην τιμή των $125,45 \text{ kN}$ και σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα το φορτίο πέφτει απότομα στα 100kN περίπου. Οι περιοχές της θλιβόμενης ζώνης εμφανίζονται πλήρως αποδιοργανωμένες με έντονο εκτός επιπέδου λυγισμό του διαμήκους οπλισμού.

Η μετατόπιση διαρροής από την τριγωνικοποίηση της Περιβάλλουσας Καμπύλης Υστέρησης υπολογίστηκε ίση με $13,72\text{mm}$. Η μετατόπιση αστοχίας για πτώση της αντοχής στο 80% της μέγιστης υπολογίστηκε ίση με $44,47\text{mm}$, σχεδόν διπλάσια από όση προέβλεψε η θεωρητική αποτίμηση. Η πλαστιμότητα μετακινήσεων ήταν κατά συνέπεια: $\mu = 44,47/13,72 = 3,24$.

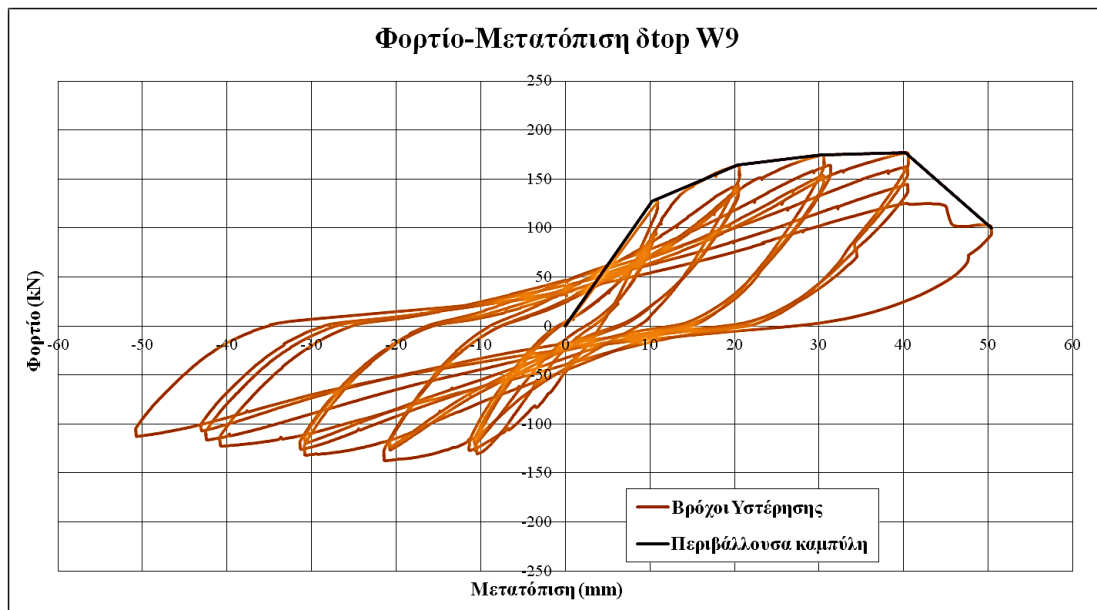


Εικόνα 5.13 Ρηγμάτωση δοκιμίου στους κύκλους των $\pm 10\text{mm}$ και $\pm 20\text{mm}$



Εικόνα 5.14 Ρηγμάτωση δοκιμίου κατά την αστοχία

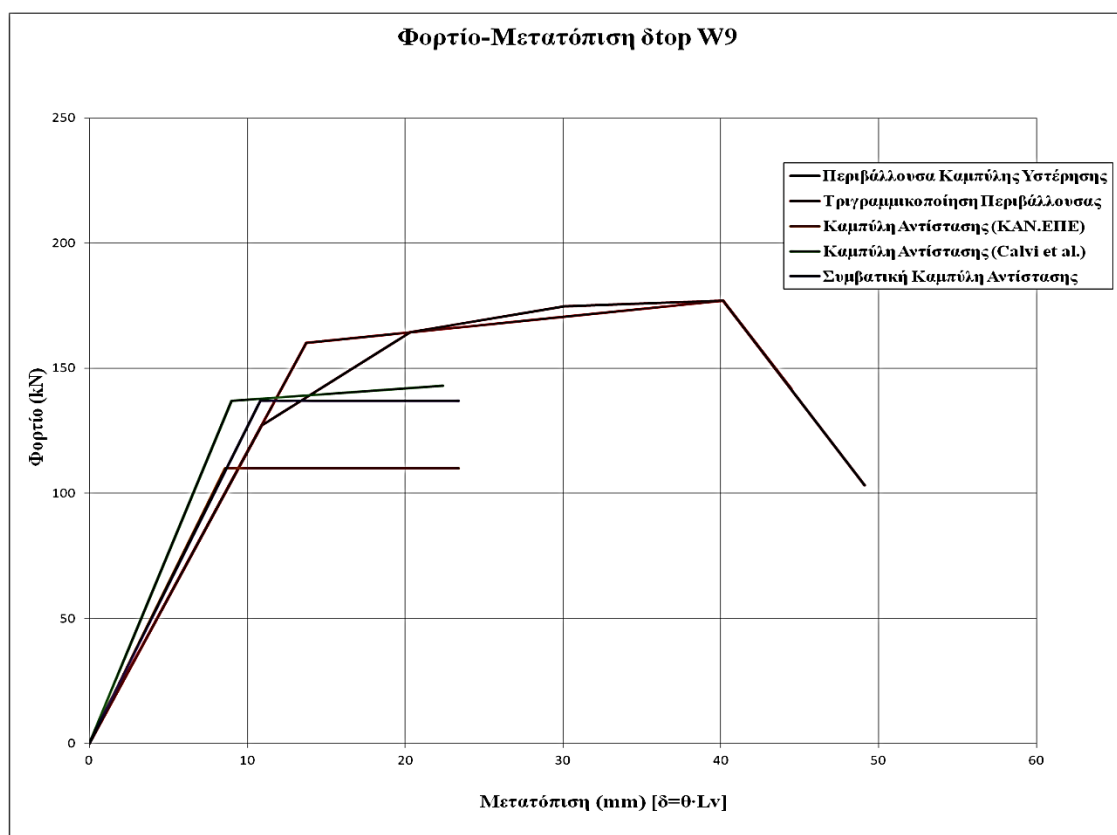
Στο Διάγραμμα 5.15 καταγράφεται η υστερητική απόκριση του τοιχείου και η περιβάλλουσα των βρόχων υστέρησης. Από την τριγωνικοποίηση της περιβάλλουσας και τις θεωρητικές διγραμμικές προσεγγίσεις των ΚΑΝ.ΕΠΕ και Calvi et al. συντάχθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα Φορτίου-Μετατόπισης, όπου συγκρίνονται οι θεωρητικές αντοχές με την πραγματική.



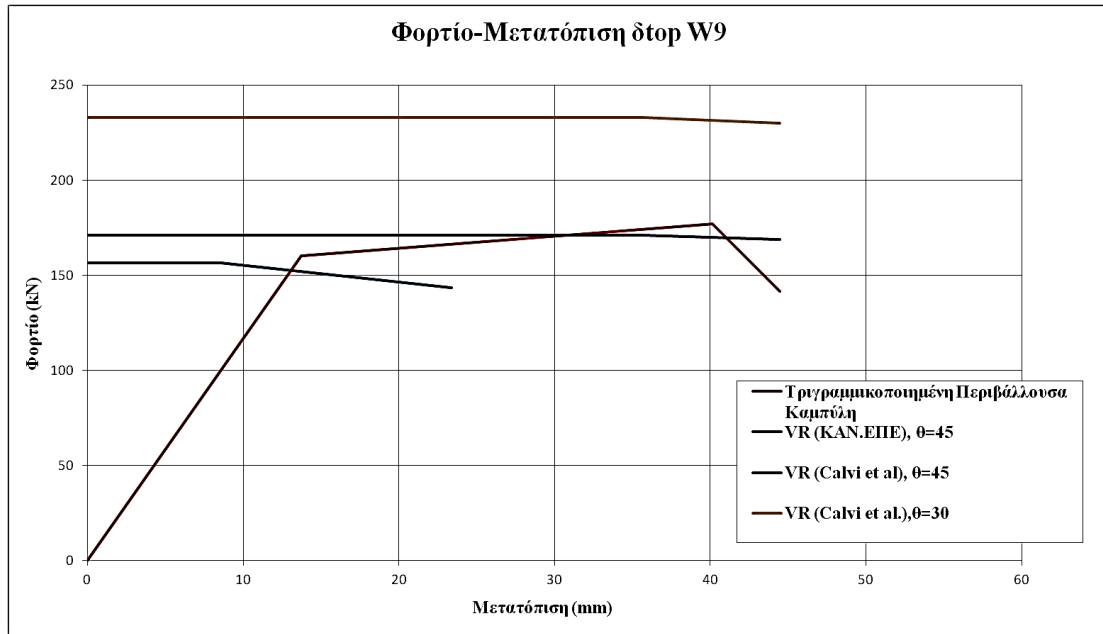
Διάγραμμα 5.15 Βρόχοι Υστέρησης και Περιβάλλουσα βρόχων (W9)

Η ενεργός δυσκαμψία έχει υπερεκτιμηθεί θεωρητικά ελαφρώς και από τα δύο προσομοιώματα, ωστόσο αυτό δεν είναι βέβαιο συμπέρασμα καθότι στους αρχικούς κύκλους τα βελόμετρα «πήδηξαν» τιμές. Μεγάλη αλλά λογική απόκλιση παρουσιάζεται στην παραμόρφωση αστοχίας (δικλείδες ασφαλείας κανονισμών έναντι σχετικά χαμηλών αντοχών). Το προσομοίωμα των Calvi et al. δίνει μεγαλύτερη αντοχή, πολύ κοντά στην προκύψασα τέμνουσα αστοχίας αλλά κατώτερη της μέγιστης αντίστασης. Η απόκλιση έγκειται κατά κύριο λόγο στην πρόβλεψη της καμπτικής απόκρισης.

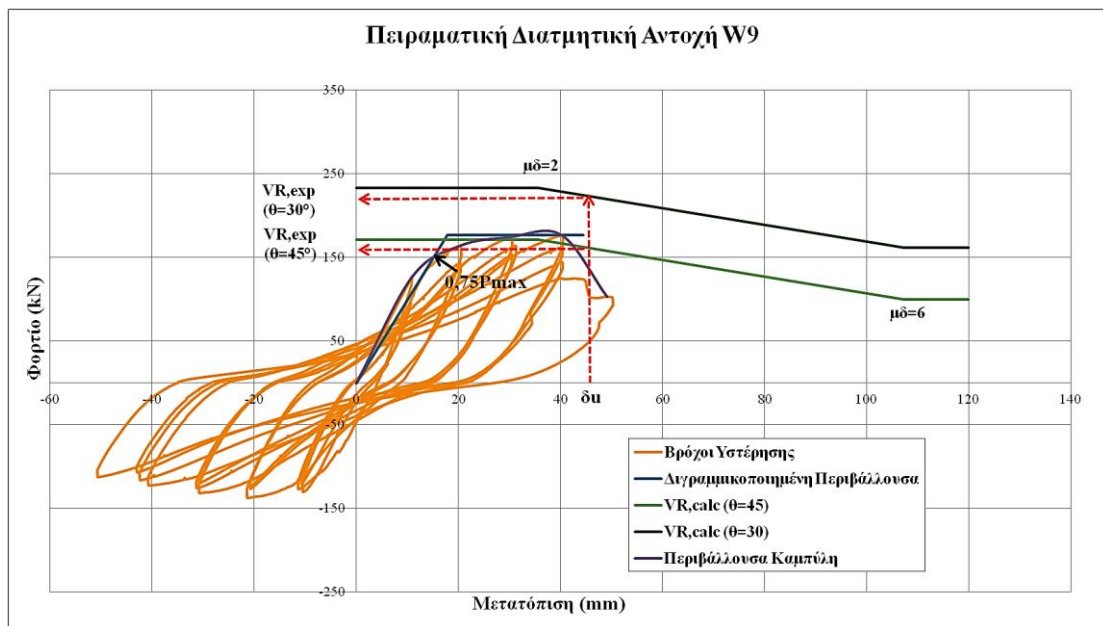
Χρήση του τροποποιημένου προσομοιώματος UCSD για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής δίνει μεγαλύτερες τιμές αντοχής μέσω αύξησης της συνεισφοράς του σκυροδέματος (Διάγραμμα 5.16). Η πειραματική εκτίμηση της διατμητικής αντοχής σύμφωνα με το προσομοίωμα γίνεται με τοποθέτηση των θεωρητικών καμπυλών διατμητικής αντοχής στην διγραμμικοποιημένη περιβάλλουσα καμπύλη (τρόπος Α Παραγράφου 7.4.2). Από την παραμόρφωση αστοχίας που προκύπτει για πτώση της αντοχής κατά 20% φέρεται κατακόρυφος και εκεί που τέμνει τις καμπύλες διατμητικής αντοχής αναμένεται να είναι η αντοχή σε διάτμηση του δοκιμίου. Η μείωση της διατμητικής αντοχής σηματοδοτείται για πειραματική πλαστιμότητα μετατοπίσεων 2. Για πλαστιμότητα μεγαλύτερη του 6 δε μπορεί να μειωθεί περαιτέρω η αντοχή.



Διάγραμμα 5.16 Θεωρητικές και πειραματική Καμπύλη Συμπεριφοράς



Διάγραμμα 5.17 Συγκριτικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης της θεωρητικής Διατμητικής Αντοχής και της πειραματικής Καμπύλης Αντίστασης (W9)



Διάγραμμα 5.18 Πειραματική διερεύνηση διατμητικής αντοχής κατά Calvi et al.

Όπως φαίνεται και από τα Διαγράμματα 5.16, 5.17 και τον Πίνακα 5.19, οι θεωρητικές προσεγγίσεις που βασίζονται στις σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. δεν μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά δοκιμίων (ιδιαίτερος τοιχείων) με καμπτοδιατμητική συμπεριφορά.

Πίνακας 5.19 Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών χαρακτηριστικών μεγεθών δοκιμίου W9

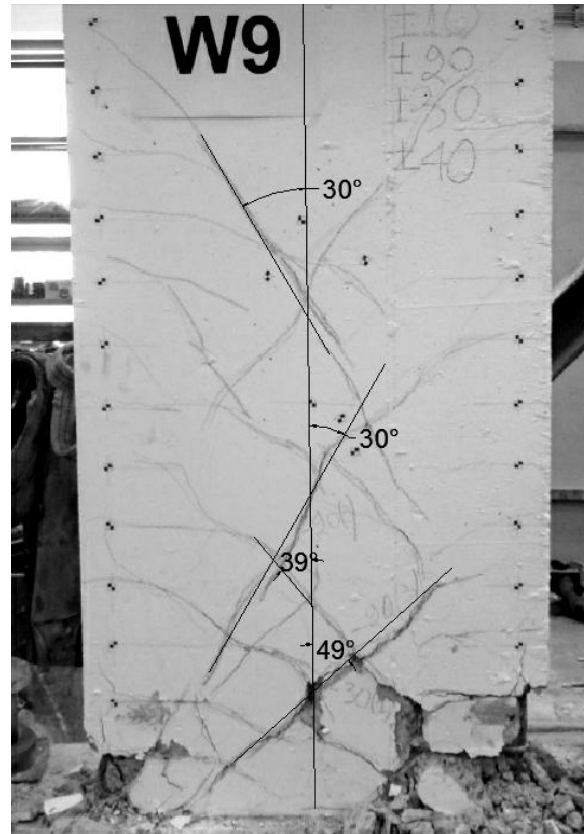
| Μέγεθος | W9 | | | | |
|-------------------|-------------|-------|-----------|---------|--------------|
| | ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ | | ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ | | |
| | Τριγραμμικό | Park | Συμβατικό | KAN.EΠΕ | Calvi et al. |
| P_y (kN) | 160 | 177 | 137 | 110 | 135 |
| P_u (kN) | 142 | 177 | 137 | 110 | 143 |
| δ_y (mm) | 13,72 | 17,88 | 10,80 | 8,60 | 8,97 |
| δ_u (mm) | 44,47 | 44,47 | 23,40 | 23,40 | 22,40 |
| μ_δ | 3,24 | 2,50 | 2,17 | 2,69 | 2,50 |
| $K_{eff.}$ (kN/m) | 11670 | 9910 | 12677 | 12976 | 15066 |

Το δοκίμιο «έπιασε» σχετικά υψηλές τιμές αντοχής, αστόχησε καμπτικά αλλά ψαθυρά καθώς η πτώση της αντίστασής του ήταν απότομη, συνοδευόμενη από μεγάλες κεκλιμένες διατμητικές ρωγμές καθ' ύψος.

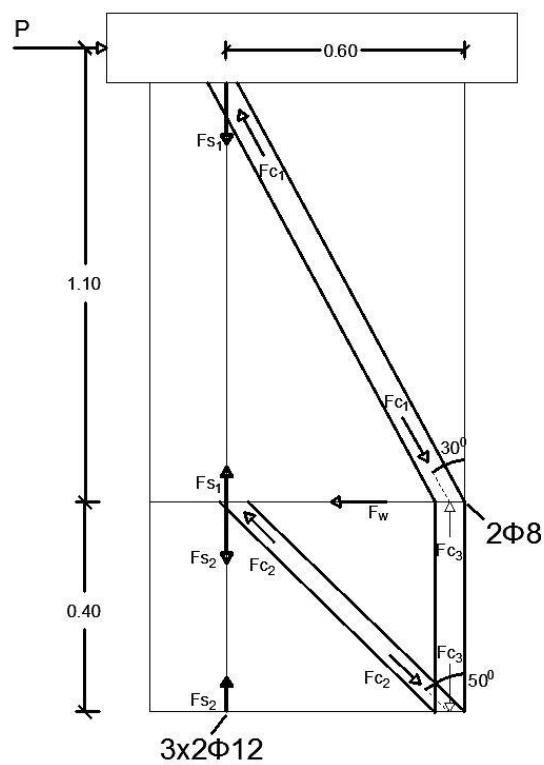
Ωστόσο στις περιπτώσεις χαμηλής αντοχής η ενέργεια απορροφάται κυρίως μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης και σε μικρό βαθμό αποθηκεύεται ως ελαστική ενέργεια. Συνέπεια αυτού είναι ότι η μέγιστη μετακίνηση δεν εξαρτάται τόσο από τη δυσκαμψία αλλά από την αντοχή (όριο διαρροής σε διγραμμικά μοντέλα). Στις περιπτώσεις αυτές ο ΚΑΝ.ΕΠΕ προτείνει να ελέγχεται η αντοχή σε όρους δυνάμεων και όχι μετακινήσεων ώστε να καλύπτεται και με αρκετή ασφάλεια. Ταυτοχρόνως, με τη μείωση των συνολικών μετακινήσεων κατά κανόνα επιτυγχάνεται και μείωση των ανελαστικών παραμορφώσεων των μελών, πράγμα απαραίτητο στις περιπτώσεις που δε διαθέτουν επαρκή πλαστιμότητα. Σε αυτή τη λογική βασίζεται η συντηρητική εκτίμηση της οριακής παραμόρφωσης διατμητικού τύπου (θεωρητικά) στοιχείων.

Στην **Εικόνα 5.20** αποτυπώνονται οι κυρίαρχες πειραματικές γωνίες ρηγμάτωσης οι οποίες κυμάνθηκαν από 30° έως και 50°, με μια διαμπερή διατμητική ρωγή στη βάση να κυμαίνεται στις 45°-50°.

Η πειραματική εικόνα (ρηγμάτωση και αστοχία) έδειξε ότι θα μπορούσε να αναπτυχθεί δικτύωμα με δύο λοξούς και έναν κατακόρυφο θλιπτήρα. Η θλιπτική αστοχία στη βάση προήλθε από την συνάντηση των θλιπτικών πεδίων του λοξού και κατακόρυφου θλιπτήρα.



Εικόνα 5.20 Γωνίες ρηγμάτωσης δοκιμίου κατά την αστοχία



Εικόνα 5.21 Πιθανό πειραματικό προσομοίωμα

Αναζητείται το (καμπτικό) φορτίο αστοχίας $P_u=142\text{kN}$ μέσω ισορροπίας των μηχανισμών δικτυώματος και θλιπτήρων-ελκυστήρα για γωνίες ρηγμάτωσης τις πειραματικές (30° στο ανώτερα 1m του μήκους διάτμησης και 50° σε ύψος περίπου 0,4-0,5m από τη βάση). Η κλίση των ρωγμών υποδεικνύει ενεργοποίηση περισσότερων των δύο εφελκυόμενων ράβδων. Ακόμη η ανάπτυξη αυτού του δικτυώματος προϋποθέτει ενεργοποίηση οριζόντιου σπλισμού σε ύψος 0,4-0,5m.

Από τη στατική επίλυση του δικτυώματος προκύπτουν οι δυνάμεις που μεταφέρονται από κάθε «ράβδο» του δικτυώματος.

Πίνακας 5.22 Δυνάμεις δικτυώματος για $P=P_u$

| $P_u=142\text{ kN}$ | $F_{c1}\text{ (kN)}$ | $F_{c2}\text{ (kN)}$ | $F_{c3}\text{ (kN)}$ | $F_{s1}\text{ (kN)}$ | $F_{s2}\text{ (kN)}$ | $F_w\text{ (kN)}$ |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| | 276 | 185 | 237 | 237 | 355 | 142 |

Η δύναμη διαρροής ωστόσο 2Φ8 είναι $F_{yw}=59\text{kN}$. Κατά συνέπεια για να «στέκει» αυτό το δικτύωμα θα έπρεπε να έχει αστοχήσει το δοκίμιο διατμητικά, μέσω διαρροής των συνδετήρων. Η αστοχία όμως όπως είδαμε στα προηγούμενα χωρία επήλθε καμπτικά μέσω αποδιοργάνωσης της θλιβόμενης ζώνης της βάσης.

Επανερχόμαστε επομένως στο προσομοίωμα θλιπτήρα-ελκυστήρα της Παραγράφου 4.5. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του χρησιμοποιηθέντος σκυροδέματος είναι 31MPa. Σε έκκεντρη θλίξη η αντοχή εκτιμάται στα 15-20MPa. Για αυτή την αντοχή και ένα μέσο πάχος θλιπτήρα 0,15-0,2m, υπολογίζεται το φορτίο που προκαλεί αστοχία στο θλιπτήρα. Αντίστοιχα υπολογίζεται το φορτίο που προκαλεί αστοχία στον «ελκυστήρα» για 4 και 6 διαμήκειες ράβδους.

Συνοψίζοντας τα δεδομένα του πειραματικού (παρόν Κεφάλαιο) και υπολογιστικού σκέλους (Κεφάλαιο 4) για το δοκίμιο W9, φαίνεται πως εν τέλει ένα απλοποιημένο προσομοίωμα θλιπτήρα-ελκυστήρα είναι δυνατό να περιγράψει με σχετική επάρκεια την απόκριση δοκιμίων με μεσαίο ή μικρό λόγο διάτμησης. Με μεγαλύτερη σιγουρία μπορεί κανείς να ισχυριστεί ότι δεν είναι επαρκές εργαλείο αποτίμησης το κλασικό δικτύωμα Morsch για επίπεδους φορείς όπως τα τοιχώματα, ιδίως δε αν έχουν μικρό μήκος διάτμησης. Τέλος, το καμπτοδιατμητικό προσομοίωμα των Calvi et al. αποτελεί επίσης καλό εργαλείο αποτίμησης, μιας και παρέχει ευέλικτες σχέσεις υπολογισμού της διατμητικής αντοχής και επιπλέον επιχειρεί την άμεση συσχέτιση τους με τα πειραματικά δεδομένα. Παρατίθεται ο συγκεντρωτικός Πίνακας 5.23.

Πίνακας 5.23 Πίνακας Αντοχών χρησιμοποιηθέντων προσομοιωμάτων και Πειραματική Αντοχή

| W9 | ΦΟΡΤΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ (kN) | | | | | | | | |
|--|----------------------|----------------------|------------|--------------------------------|-------------------|---------|--|--|--|
| | Κάμψη | Διάτμηση | | Αστοχία θλιπτήρα | Αστοχία Ελκυστήρα | | | | |
| | | Λοξός Εφελκυσμός | Λοξή Θλίψη | | | | | | |
| ΚΑΝ.ΕΠΕ (θ=45°) | 110 | 144 | 275 | - | - | | | | |
| Συμβατικό διάγραμμα (EC8-Pt.3) (θ=45°) | 137 | 148 | 285 | - | - | | | | |
| Calvi-Priestley (θ=30°-45°) | 143 | θ=30°: 230 | 356 | - | - | | | | |
| | | θ=45°: 168 | | | | | | | |
| | | Exp. Calc. : 160-220 | | | | | | | |
| θλιπτήρας-ελκυστήρας (θ=21°-23°) | - | - | - | fc,u=15MPa, bc=0,15-0,2m, 4Φ12 | 110-146 | 111-128 | | | |
| | | | | fc,u=20MPa, bc=0,15-0,2m, 4Φ12 | 146-195 | 111-128 | | | |
| | | | | fc,u=15MPa, bc=0,15-0,2m, 6Φ12 | 101-135 | 152-176 | | | |
| | | | | fc,u=20MPa, bc=0,15-0,2m, 6Φ12 | 135-180 | 152-176 | | | |
| | | | | Πείραμα | 142 | | | | |

5.3.3 Παραμορφωσιακή συμπεριφορά δοκιμίων στη διαρροή

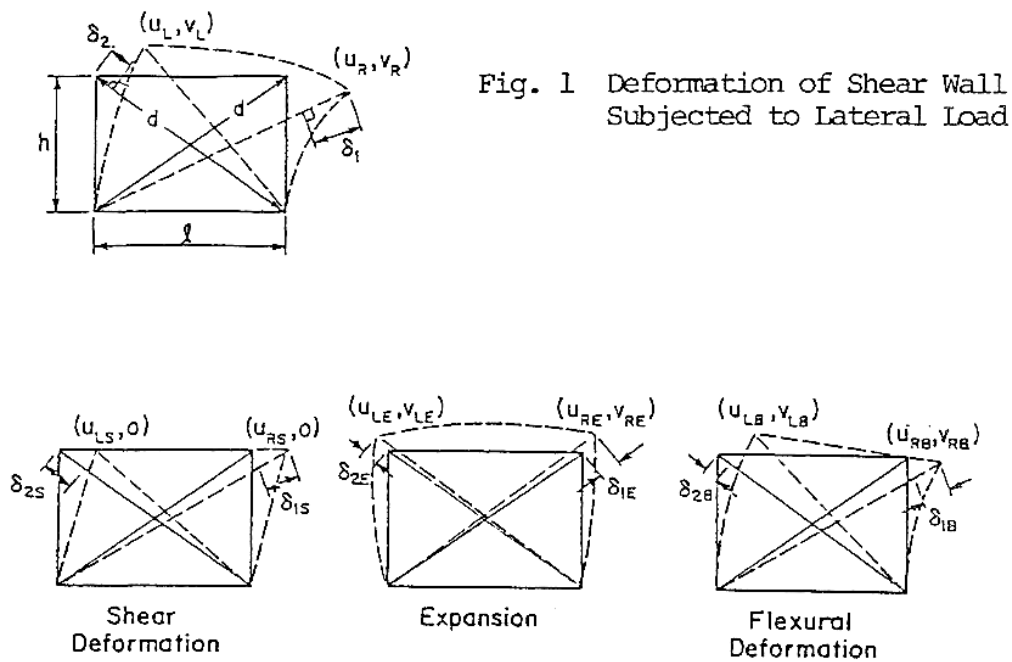


Fig. 1 Deformation of Shear Wall Subjected to Lateral Load

Εικόνα 5.24 Παραμόρφωση τοιχείου υποβαλλόμενου σε οριζόντια φόρτιση (Hiraishi,1983)

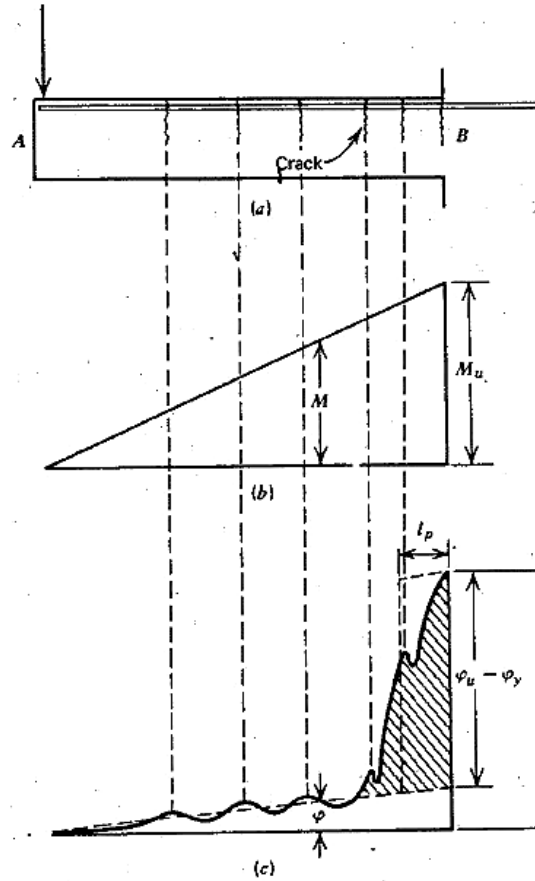
Όπως περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 2**, η συνολική παραμορφώση σε μια διατομή ενός μέλους στη διαρροή προέρχεται από την κάμψη, τη διάτμηση και την ολίσθηση των ράβδων στην αγκύρωση. Η μορφή των συνιστώσων αυτών φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Είναι δυνατή και η πειραματική αποτίμηση τους, πέραν της παραμόρφωσης λόγω ολίσθησης των ράβδων από την περιοχή της αγκύρωσης η οποία δεν είναι μετρήσιμη, τουλάχιστον με την παρούσα πειραματική διάταξη.

A. Καμπτική παραμόρφωση (flexural deformation)

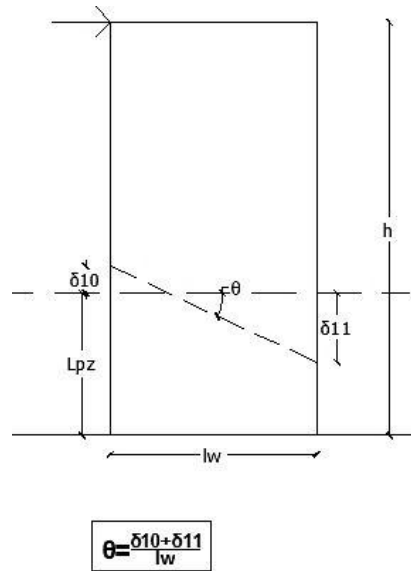
Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφηκε η μεθοδολογία με την οποία προκύπτει η καμπυλότητα στην διαρροή, φ_y , ανάλογα με τη θεωρητική προσέγγιση της διαρροής. Στην ελαστική περιοχή, κατ' αναλογία με τις ροπές, οι καμπυλότητες θεωρούνται ότι έχουν περίπου γραμμική κατανομή κατά μήκος του μήκους διάτμησης του μέλους, κάτι το οποίο αποτελεί καλή προσέγγιση και σε πειραματικό επίπεδο μέχρι τη φερόμενη ως πειραματική διαρροή του μέλους. Η ακριβής κατανομή της καμπυλότητας υπο καμπτική καταπόνηση δίνεται στην **Εικόνα 5.25**, όπου φαίνεται πως κάθε άνοιγμα ρωγμής μεταβάλλει ακανόνιστα την κατανομή της καμπυλότητας σε εκείνο το σημείο. Στην αστοχία, δεν ισχύει η επιπεδότητα των διατομών, η ρηγμάτωση είναι εκτεταμένη και οι παραμορφώσεις μη γραμμικές, συνεπώς ο υπολογισμός της καμπυλότητας έχει αυξημένες δυσχέρειες πειραματικά. Ένας τρόπος εκτίμησής της θα ήταν με τη μέτρηση της σχετικής στροφής δύο διατομών στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης. Για ενισχυμένα μέλη η πλαστικοποίηση (παραμορφώσεις) συγκεντρώνεται σε μικρότερη περιοχή, όπως θα δούμε παρακάτω, οπότε η μέτρηση θα πρέπει να γίνεται σε δύο διατομές που απέχουν λίγο μεταξύ τους.

Η μέτρηση της καμπυλότητας σε μια διατομή πειραματικά απαιτεί δυο βελόμετρα στα άκρα της διατομής που μέσω κατακόρυφων μετατοπίσεων μετρούν τη στροφή λόγω κάμψης στη διατομή αυτή. Τέτοια βελόμετρα στην περίπτωση μας τοποθετήθηκαν στη στάθμη της πλαστικής περιοχής, σε ύψη 0,2-0,335m από τη βάση για κάθε δοκίμιο. Οι παραμορφώσεις που καταγράφουν αυτά τα βελόμετρα περιλαμβάνουν αναπόφευκτα εκτός από τη στροφή λόγω κάμψης και τη μετατόπιση λόγω της ολίσθησης των ράβδων στην αγκύρωση, η οποία πειραματικά δε μπορεί να διαχωριστεί.

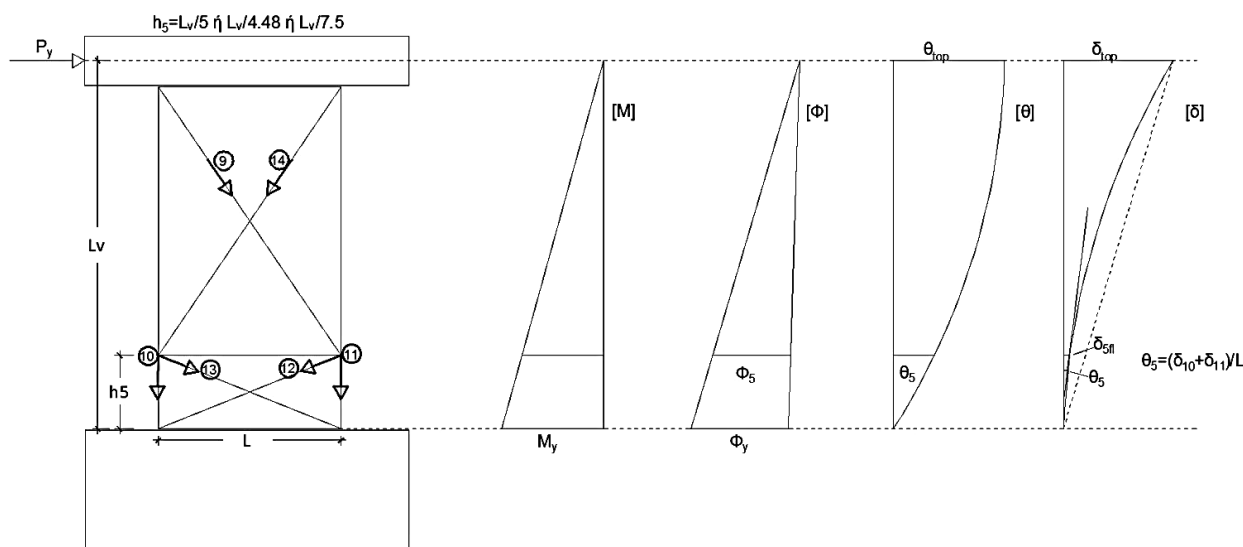
Μέσω ολοκλήρωσης της καμπυλότητας σε μια διατομή ορίζεται η στροφή, η γωνία δηλαδή που σχηματίζεται από την εφαπτομένη στην ελαστική γραμμή ενός παραμορφωμένου στοιχείου και τον κατακόρυφο άξονα. Αυτή η στροφή (που μετρούν έμμεσα τα δυο αυτά βελόμετρα) είναι η στροφή που προέρχεται από την καμπτική παραμόρφωση. Η γωνία στροφής χορδής αντίθετα, είναι η γωνία μεταξύ της εφαπτομένης στον άξονα στο άκρο υπό διαρροή και της χορδής που συνδέει το άκρο αυτό με το άκρο του ανοίγματος διάτμησης (Παράγραφος **2.3.2**). Σημειώνεται πως αν είχαν τοποθετηθεί κατακόρυφα βελόμετρα και στο ύψος της κορυφής του δοκιμίου θα ήταν δυνατή η ακριβέστερη μέτρηση της καμπυλότητας στη διαρροή.



Εικόνα 5.25 Πραγματική κατανομή της καμπυλότητας για συγκεντρωμένο φορτίο στο άκρο (Park and Paulay ,1975)



Σχήμα 5.26 Πειραματική μέτρηση στροφής διατομής μέσω δυο κατακόρυφων βελομέτρων



Σχήμα 5.27 Πειραματική εκτίμηση μέσω καμπτικών παραμορφώσεων στην πλαστική ζώνη

Η στροφή ελαστικής γραμμής ορίζεται ως:

$$\theta = \int \varphi(x) dx \quad (1) \text{ και } \theta_{exp.} = \frac{\delta_{10} + \delta_{11}}{L_{(10-11)}} \quad (2)$$

Η εξίσωση της καμπυλότητας για γραμμική κατανομή είναι εξίσωση ευθείας της μορφής:

$$\varphi(x) = ax + b$$

Για $x=0$ (βάση), $b = \varphi_y$

Για $x=L_v$ (κορυφή), $a = -\frac{\varphi_y}{L_v}$

Συνεπάγεται ότι: $\varphi(x) = -\frac{\varphi_y}{L_v}x + \varphi_y \quad (3)$

Από (3), η (1) προκύπτει: $\theta(x) = -\frac{\varphi_y}{L_v} \cdot \frac{x^2}{2} + \varphi_y \cdot x$

W7

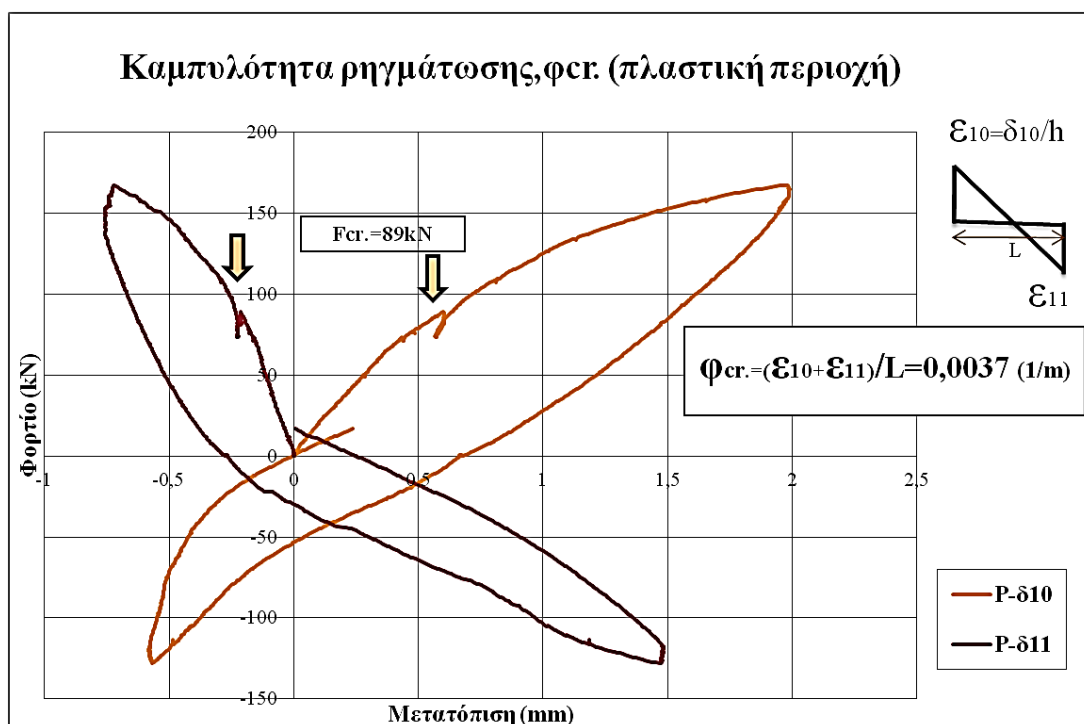
Για $\delta_{top} = \delta_{y,exp.} = 12,55\text{mm}$: $\delta_{10} = 2,33\text{mm}$, $\delta_{11} = 1,12\text{mm}$, $L = 710\text{mm}$, $h_5 = 300\text{mm}$
 $\theta_5 = 0,0049$:

Από (1), (2), (3) $\theta_5 = \int_0^{h_5} \varphi(x) dx \rightarrow 0,0049 = -\frac{\varphi_y}{L_v} \cdot \frac{h_5^2}{2} + \varphi_y h_5 \rightarrow \varphi_{y(W7)} = 0,018\text{m}^{-1} > \varphi_{y,th.} = 0,0054 \div 0,0092\text{m}^{-1}$. Η τιμή είναι αρκετά μεγάλη καθώς συμπεριλαμβάνεται η παραμόρφωση λόγω ολίσθησης των διαμήκων οπλισμών στην περιοχή της αγκύρωσης. Ακόμα, η πειραματική μετατόπιση διαρροής είναι

μεγαλύτερη από τη θεωρητική, οπότε λογικά και η καμπυλότητα θα είναι μεγαλύτερη. Πέραν τούτων όμως, η παραδοχή τριγωνικής κατανομής της καμπυλότητας στη διαρροή είναι απλοποιητική και όχι απόλυτα ακριβής.

Η καμπυλότητα κατά την πρώτη ρηγμάτωση στη στάθμη h_5 μπορεί να υπολογιστεί άμεσα και με μεγαλύτερη αξιοπιστία από τις κατακόρυφες παραμορφώσεις που καταγράφουν τα βελόμετρα δ_{10} και δ_{11} στα σημεία του **Διαγράμματος 5.28** που φαίνεται η αστάθεια των βρόχων όταν ανοίγει μια ρωγμή.

Ομοίως μπορεί να υπολογιστεί η καμπυλότητα φ_5 κατά τη συμβατική πειραματική διαρροή (για $\delta_{top} = \delta_{y,exp.}$) στη στάθμη h_5 (**Διάγραμμα 5.29**).



Διάγραμμα 5.28 Μέτρηση καμπυλότητας ρηγμάτωσης στην πλαστική περιοχή (στάθμη h_5), W7

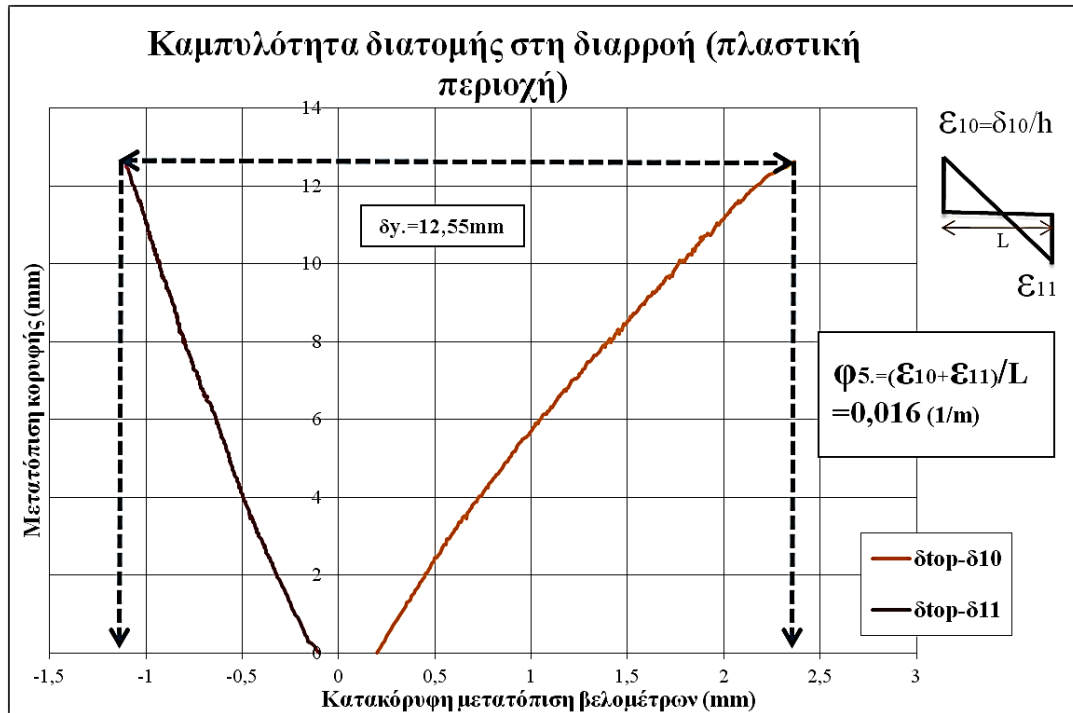
Η μετατόπιση λόγω καμπτικών παραμορφώσεων είναι το διπλό ολοκλήρωμα της καμπυλότητας, κι έτσι:

$$\delta_{fl} = \iint \varphi(x) dx = \int \theta(x) dx \quad (4)$$

Απο τη βάση του δοκιμίου ως τη στάθμη 5, προκύπτει από ολοκλήρωση:

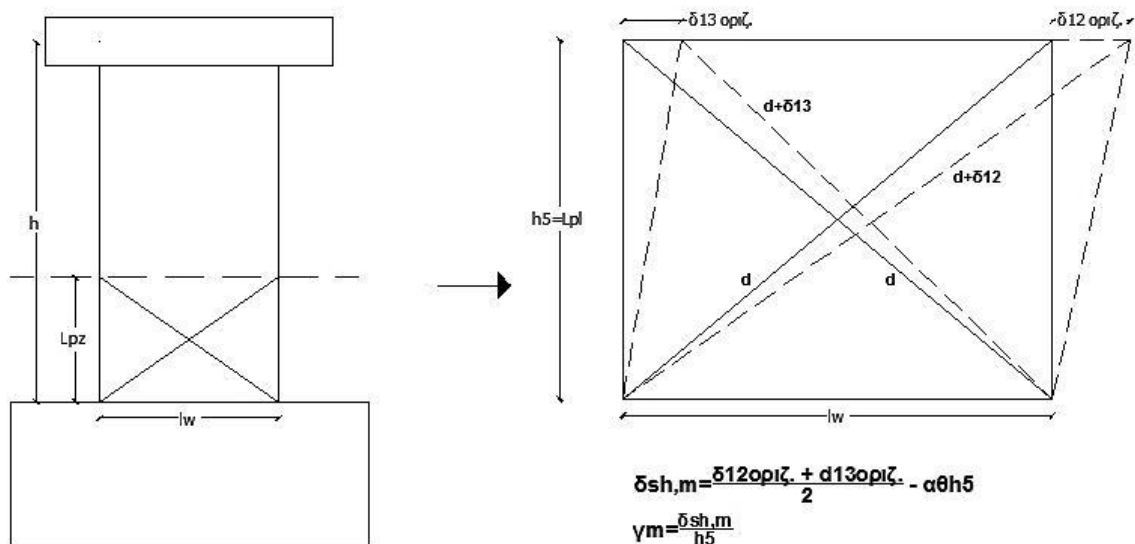
$$\delta_{5,fl} = 0,52 \cdot \theta_5 \cdot h_5$$

$$\text{Άρα, } \delta_{5,fl.+sl.(W7)} = 0,763mm$$



Διάγραμμα 5.29 Μέτρηση καμπυλότητας στην πλαστική περιοχή (στάθμη h5) κατά τη διαρροή, W7

B. Διατμητική παραμόρφωση (shear deformation)



Σχήμα 5.30 Μέση διατμητική παραμόρφωση στο πλαστικό τμήμα

Η μέση διατμητική παραμόρφωση αρχικά ορίστηκε από τον Oosterle ως:

$$\delta_{shear,m} = d \cdot \frac{(\delta_{12} - \delta_{13})}{2l_w} \quad (5)$$

όπου d είναι το μήκος των διαγωνίων και δ_{12} , δ_{13} είναι οι επιμήκυνση ή βράχυνση των διαγώνιων όπου είναι τοποθετημένα τα βελόμετρα 12 και 13 (**Σχήμα 5.30**).

Σε περίπτωση όμως που η καμπυλότητα δεν είναι σταθερή, ο Hiraishi παρατήρησε ότι η συνολική οριζόντια μετατόπιση περιέχει και μια συνιστώσα που προέρχεται από την κάμψη και πρέπει να αφαιρεθεί [29]. Έτσι η παραπάνω εξίσωση υπερεκτιμά τις μέσες διατμητικές παραμορφώσεις. Ορθότερη εξίσωση υπολογισμού μέσω διατμητικών παραμορφώσεων είναι:

$$\delta_{5, shear, m., exp.} = \frac{\delta_{12, οριζ.} + \delta_{13, οριζ.}}{2} - \alpha \cdot \theta_5 \cdot h_5 \quad (6)$$

$$0,5 \leq \alpha < 1$$

$\delta_{12, οριζ.}$ και $\delta_{13, οριζ.}$ είναι οι οριζόντιες προβολές των διαγώνιων παραμορφώσεων και προκύπτουν από τη γεωμετρία:

$$\delta_{οριζ.} = \delta_{διαγ.} \cdot \sqrt{\left(\frac{h_5}{l_w}\right)^2 + 1}$$

Ο συντελεστής α λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της καμπυλότητας καθ' ύψος και η τιμή του σε μια διατομή προκύπτει από ολοκλήρωση της καμπτικής στροφής στη διατομή (εξίσωση (4)).

W7

Για $\delta_{top} = \delta_{y, exp} = 12,55 \text{ mm}$:

$\delta_{12} = 1,754 \text{ mm}$, $\delta_{13} = -0,019 \text{ mm}$, $\delta_{12, οριζ.} = 1,89 \text{ mm}$, $\delta_{13, οριζ.} = 0,021 \text{ mm}$, $l_w = 750 \text{ mm}$, $h_5 = 300 \text{ mm}$, $\alpha = 0,52$

$$(6) \rightarrow \delta_{shear, m., exp. (W7)} = 0,191 \text{ mm}$$

W9

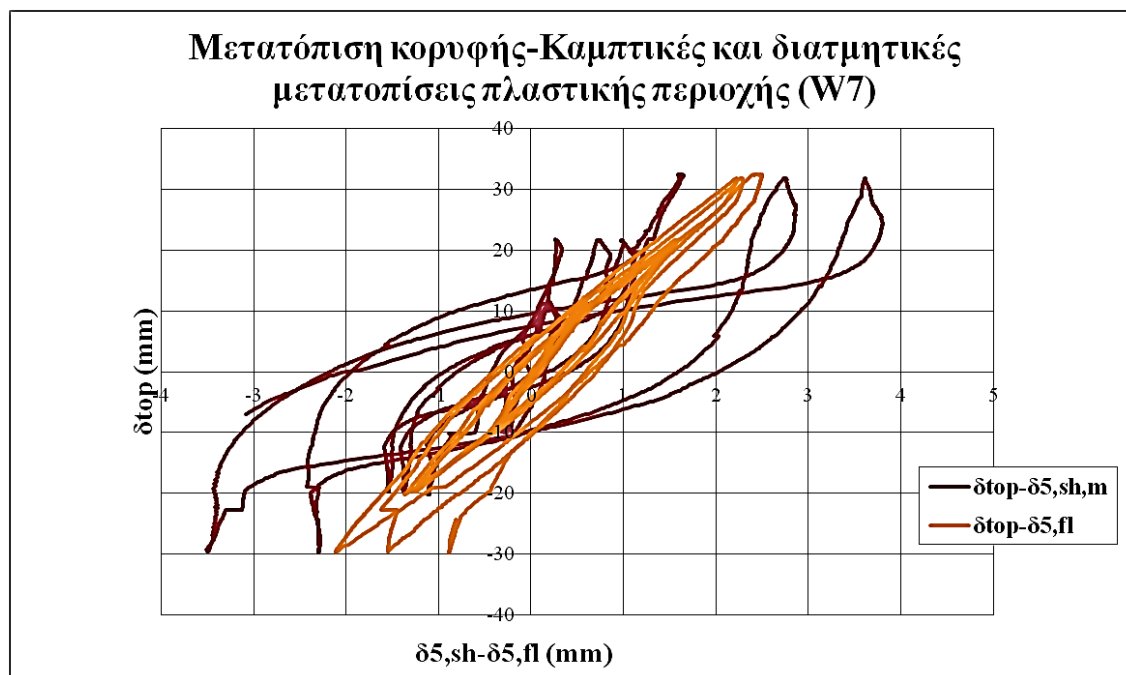
Για $\delta_{top} = \delta_{y, exp} = 13,72 \text{ mm}$:

$\theta_5 = 0,002$, $\delta_{10} = 0,787 \text{ mm}$, $\delta_{11} = 0,418 \text{ mm}$, $L = 600 \text{ mm}$, $\delta_{12} = 1,39 \text{ mm}$, $\delta_{13} = 0,53 \text{ mm}$, $\delta_{12, οριζ.} = 1,435 \text{ mm}$, $\delta_{13, οριζ.} = 0,55 \text{ mm}$, $l_w = 750 \text{ mm}$, $h_5 = 200 \text{ mm}$, $\alpha = 0,51$:

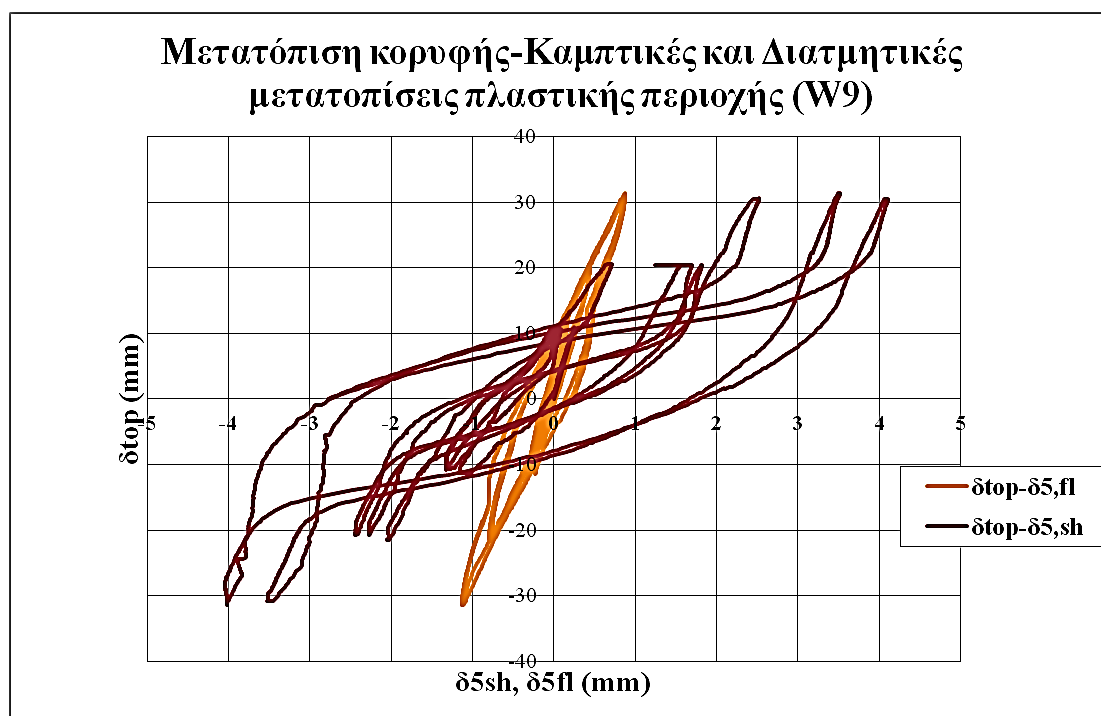
$$(1), (2), (3) \rightarrow 0,002 = \int_0^{h_5} \varphi(x) dx \rightarrow \varphi_{y(W9)} = 0,011 \text{ m}^{-1} > \varphi_{y, th.} = 0,0052 - 0,0072 \text{ m}^{-1}.$$

$$(4) \rightarrow \delta_{5, fl.+sl. (W9)} = 0,51 \theta_5 h_5 = 0,204 \text{ mm} \ll \delta_{5, fl.+sl. (W7)}$$

$$(6) \rightarrow \delta_{shear, m., exp. (W9)} = 0,789 \text{ mm} \gg \delta_{shear, m., exp. (W7)}$$



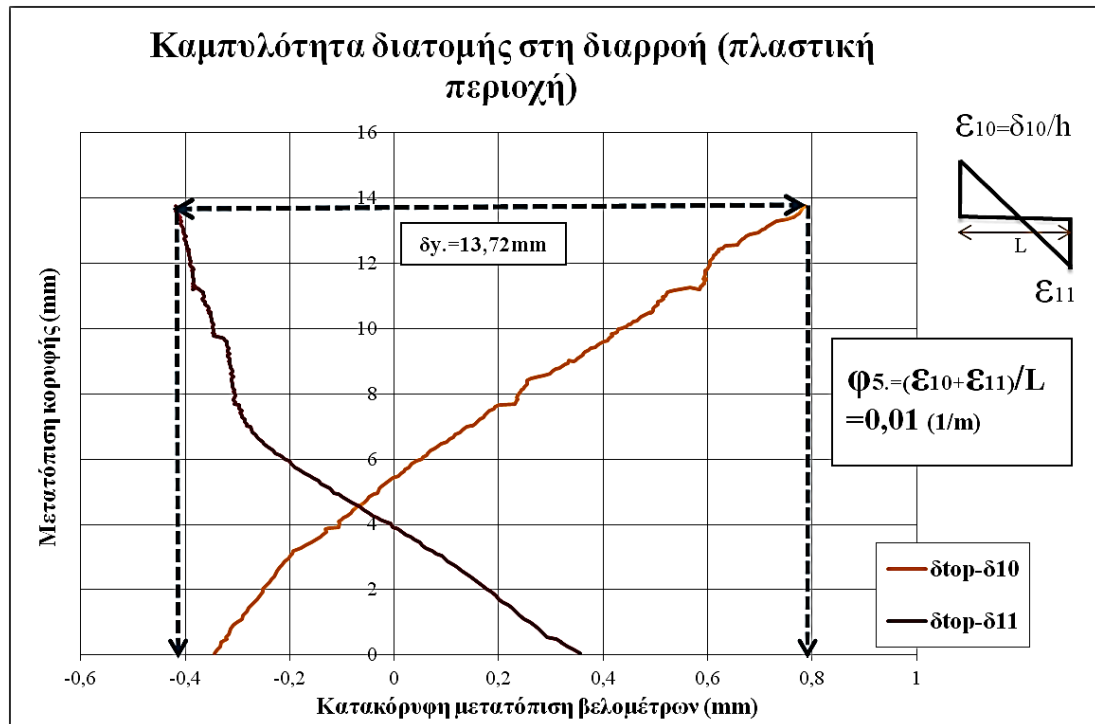
Διάγραμμα 5.31 Μετατόπιση κορυφής και καμπτικές, διατμητικές μετατοπίσεις στο πλαστικό τμήμα της βάσης



Διάγραμμα 5.32 Μετατόπιση κορυφής και καμπτικές, διατμητικές μετατοπίσεις στο πλαστικό τμήμα της βάσης

Οι διατμητικές και καμπτικές παραμορφώσεις που υπολογίστηκαν παραπάνω ωστόσο δεν είναι οι συνολικές στη διαρροή, αλλά μόνο ως τη στάθμη μέτρησης. Οι συνολικές διατμητικές παραμορφώσεις θα ήταν το άθροισμα των παραπάνω τιμών με τις τιμές που θα προέκυπταν και από τις διαγωνίους του πάνω τμήματος, αν είχε μετρηθεί η

στροφή στην κορυφή (έτσι θα ήταν συγκρίσιμες οι τιμές με την τιμή 0,0013L_v που δίνεται από τους ΚΑΝ.ΕΠΕ.-EC8). Όμοια και οι καμπτικές παραμορφώσεις θα προέκυπταν από τη στροφή στην κορυφή. Ειδικά στο δοκίμιο W9 οι παραμορφώσεις των διαγωνίων άρα και οριζόντιων προβολών τους στο πάνω τμήμα ήταν αρκετά μεγάλες (της τάξης των 11mm), οπότε και οι συνολικές διατμητικές παραμορφώσεις είναι αρκετά μεγαλύτερες.



Η καμπυλότητα κατά την πρώτη ρηγμάτωση δεν ήταν δυνατό να προσδιοριστεί για το δοκίμιο W9 γιατί τα βελόμετρα στην αρχή της φόρτισης «πήδηξαν» απότομα τιμές.

Δίνεται επίσης το διάγραμμα των μέσων καμπτικών και διατμητικών μετατοπίσεων στο ύψος της πλαστικής περιοχής συναρτήσεως της μετατόπισης κορυφής. Είναι εμφανής η υπεροχή των διατμητικών παραμορφώσεων έναντι των καμπτικών από τους πρώτους κύκλους, καθώς και η μη γραμμική επέκτασή τους με την αύξηση της ρηγμάτωσης. Από το διάγραμμα έχουν αφαιρεθεί οι τιμές των τελευταίων κύκλων όπου τα βελόμετρα πιθανώς λόγω κουνήματος από τη θέση τους κατέγραψαν μη ρεαλιστικές τιμές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΟΧΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η ανάγκη αποφυγής της απότομης ψαθυρής αστοχίας των δοκιμίων με ανεπαρκή διατμητικό σπλισμό οδήγησε στην απόφαση ενίσχυσης τους, στη βελτίωση δηλαδή των χαρακτηριστικών εκείνων, ώστε να εξασφαλιστεί ότι η πλάστιμη καμπτική και όχι η διατμητική αστοχία θα είναι η καθοριστική της απόκρισης. Ο τύπος ενίσχυσης που επιλέχθηκε στοχεύει στη βελτίωση της υστερητικής απόκρισης των ελαφρώς σπλισμένων, όχι σε συνολικό επίπεδο αλλά κυρίως όσον αφορά στη διατμητική τους συμπεριφορά.

Για το λόγο αυτό, ως μέσο ενίσχυσης χρησιμοποιήθηκαν λάμες από δομικό χάλυβα S235 ορθογωνικής διατομής 30x5mm, οι οποίες με τη βοήθεια εποξειδικής κόλλας επικολλήθηκαν ανά σταθερές αποστάσεις (20cm για το δοκίμιο W8, 15cm για το δοκίμιο W10) κάθετα στο διαμήκη άξονα του μέλους με στόχο την ανάληψη σημαντικών εφελκυστικών τάσεων που προκαλούν τη διαγώνια ρηγμάτωση καλύπτοντας σχεδόν όλο το διατμητικό μήκος και «αγκαλιάζοντας» όλη τη διατομή του τοιχείου με τη βοήθεια ηλεκτροσυγκολλήσεων στις γωνίες μεταξύ των τεμαχίων όψης και πλευρών. Ανέλαβαν έτσι το ρόλο *εξωτερικών συνδετήρων*.

6.2 Εποξειδικές ρητίνες

Οι εποξειδικές ρητίνες παρουσιάζουν εξαιρετικά μηχανικά χαρακτηριστικά, μεγάλη εφελκυστική αντοχή και συγκολλητική ικανότητα, υψηλή ανθεκτικότητα στις περιβαλλοντικές επιδράσεις, την κόπωση και τη χημική διάβρωση και χαμηλή συστολή ξήρανσης. Πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι οι ιδιότητες εξαρτώνται σημαντικά από τη ρητίνη βάσης και τις χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή τους. Η κόλλα (κατά κανόνα εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών, ρητίνη και σκληρυντής) εφαρμόζεται μεταξύ του σκυροδέματος και του επικολλούμενου υλικού εξασφαλίζοντας έτσι τη συνεργασία τους και τη μεταφορά τάσεων από το πρώτο στο δεύτερο.

Η χρήση εποξειδικών ρητινών προϋποθέτει την κατανόηση τριών βασικών εννοιών. Η πρώτη είναι ο χρόνος εργασιμότητας (pot life), η δεύτερη ο χρόνος εφαρμογής (open time) και η τρίτη είναι η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (glass transition temperature).

Ο χρόνος εργασιμότητας είναι αυτός που διαθέτει κάποιος για να χρησιμοποιήσει την κόλλα πριν αρχίσει να μειώνεται το ιξώδες της και να σκληρύνεται στο δοχείο όπου έγινε η ανάμιξη. Εξαρτάται από τον τύπο κόλλας, από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά και από την ποσότητα κόλλας που προκύπτει με την ανάμιξη δύο συστατικών. Ενδεικτικοί χρόνοι για ποσότητα (τυπικής) κόλλας 5Kg είναι 90min σε 15 °C και 30min σε 35 °C.

Ο χρόνος εφαρμογής αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο η κόλλα είναι ενεργή, δηλαδή έχει ικανοποιητικές συγκολλητικές ιδιότητες. Μέσα σε αυτό το διάστημα θα πρέπει να ολοκληρώνεται η επικόλληση του οπλισμού ενίσχυσης στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

Τέλος, στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (χαρακτηριστική ιδιότητα όλων των πολυμερών), οι κόλλες υφίστανται ραγδαία απομείωση του μέτρου ελαστικότητας, οπότε έχουν περιορισμένη πλέον ικανότητα μεταφοράς δυνάμεων.

Οι συγκολλητικές ουσίες, λόγω της υγρής τους φύσης, ρέουν πάνω και ανάμεσα στις ανωμαλίες της επιφάνειας του δομικού στοιχείου και καθώς έρχονται σε επαφή με αυτήν αλληλεπιδρούν μέσω μοριακών δυνάμεων. Στην συνέχεια, η ουσία στερεοποιείται και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η σύνδεση των δύο υλικών. Η στρώση της εποξειδικής ρητίνης για την επικόλληση ελασμάτων πρέπει να έχει πάχος της τάξης του 1.5-3mm. Στην περίπτωση του επιτόπου εμποτισμού των χαλύβδινων ελασμάτων ή άλλης μεθόδου ενίσχυσης, η κόλλα θα πρέπει να έχει τη κατάλληλη ρευστότητα και να χρησιμοποιείται στην κατάλληλη ποσότητα ώστε να εξασφαλίζεται πλήρης εμποτισμός των ελασμάτων. Στον Πίνακα 6.1 δίνονται οι μέσες ιδιότητες των εποξειδικών ρητινών σε σύγκριση με το σκυρόδεμα και το χάλυβα.

Πίνακας 6.1 Ιδιότητες εποξειδικής ρητίνης σε σύγκριση με το σκυρόδεμα και τον δομικό χάλυβα

| Ιδιότητα (σε 20° C) | Εποξειδική ρητίνη | Σκυρόδεμα | Χάλυβας |
|------------------------------------|-------------------|-----------|---------|
| Πυκνότητα (Kg/m ³) | 1100-1700 | 2350 | 7800 |
| Μέτρο Ελαστικότητας(GPa) | 0.5-20 | 20-50 | 205 |
| Μέτρο Διάτμησης(GPa) | 0.2-8 | 8-21 | 80 |
| Λόγος Poisson | 0.3-0.4 | 0.2 | 0.3 |
| Εφελκυστική αντοχή(MPa) | 9-30 | 1-4 | 200-600 |
| Διατμητική αντοχή(MPa) | 10-30 | 2-5 | 150-400 |
| Θλιπτική αντοχή(MPa) | 55-110 | 25-150 | 200-600 |
| Οριακή παραμόρφωση σε εφελκυσμό(%) | 0.5-5 | 0.015 | 20-25 |

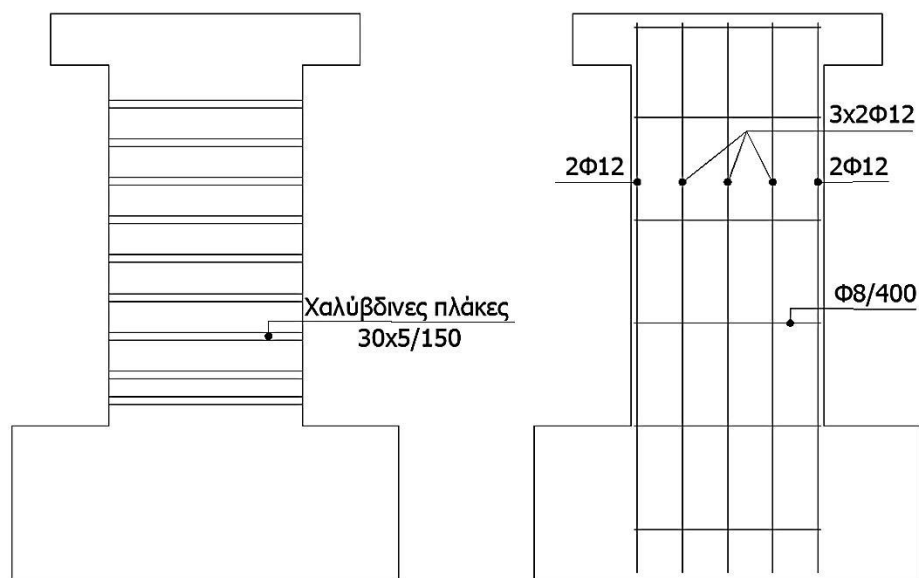
Η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο για το συγκεκριμένο προϊόν έχει διατμητική αντοχή 14MPa. Έτσι, η διατμητική δύναμη που είναι ικανή να παραλάβει η κόλλα στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-ελάσματος είναι ίση με:

$$V_p = \tau \cdot A = 1,4 \frac{kN}{cm^2} \cdot 3cm \cdot 60cm = 252kN$$

Η επιφάνεια στην οποία η ρητίνη ενεργοποιήθηκε είναι μικρότερη (60-70cm) από το μήκος των ελασμάτων (75-77cm) στην εγκάρσια διεύθυνση, καθώς λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύχθηκαν κατά τις ηλεκτροσυγκολλήσεις ένα μέρος της κόλλας στις γωνιακές περιοχές του δοκιμίου καταστράφηκε.

6.3 Χαλύβδινα ελάσματα

Χρησιμοποιήθηκε δομικός χάλυβας S235 ορθογωνικής διατομής 30x5mm. Ο χάλυβας κόπηκε σε τεμάχια των 12,5cm για τις πλευρές του τοιχίου και σε τεμάχια των 77cm περίπου για τις δύο όψεις του.



Σχήμα 6.2 Οπλισμός ενίσχυσης και αρχικός οπλισμός δοκιμίου W10

Τα τεμάχια των 12,5cm και 77cm ηλεκτροσυγκολλήθηκαν στις 4 γωνίες της εγκάρσιας διατομής των τοιχίων ώστε να θεωρηθεί η ενίσχυση κλειστή και να αποφευχθεί όσο το δυνατόν η αποκόλληση των λαμών, ο λυγισμός των θλιβόμενων διαμήκων ράβδων και η στρόφη του δοκιμίου συνολικά. Οι ολόπλευρη αυτή μορφή ενίσχυσης δεν συνεισφέρει στην περίσφιγξη των διατομών, καθώς αυτές είναι επιμήκεις και δεν μπορεί να επιτευχθεί κατάσταση τριαξονικής θλίψης στο σκυρόδεμα.

Προκειμένου να σταθεροποιηθούν οι λάμες επάνω στο δοκίμιο κατά τη φάση στερεοποίησης της κόλλας και για τη μεγιστοποίηση της πρόσφυσης τους πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου, χρησιμοποιήθηκαν έναντι σφικτήρων απλές βίδες διαμέτρου Φ12 (W8) και Φ6 (W10). Διανοίχτηκαν έτσι 3 οπές των 14mm (W8) και 4 οπές των 8mm (W10) σε κάθε λάμα της μπροστινής και πίσω όψης πριν την επάλειψη με την εποξειδική πάστα, με αποτέλεσμα κατά την επικόλληση των λαμών και την ταυτόχρονη σφήνωση των βιδών στο σκυρόδεμα να δημιουργηθούν αρκετές, ακόμα και διαμπερείς (W8), οπές στον κορμό του δοκιμίου. Οι βίδες έχουν μικρή συνεισφορά στην διατμητική αντίσταση της διεπιφάνειας ιδίως αυτές στο τοιχίο W10 ώστε μπορεί να αγνοηθεί η διατμητική αντοχή τους ως βλήτρων (KAN.ΕΠΕ., Παρ. 6.1.1.5, 6.1.1.6, 6.1.2.2). Η διατμητική αντίσταση στη διεπιφάνεια προέρχεται συνεπώς κυρίως από την τριβή λόγω εξωτερικών φορτίων και την κόλλα.

Η συμβολή των βιδών στην διατμητική αντίσταση της διεπιφάνειας για το τοιχίο W8 εκφράζεται ως:

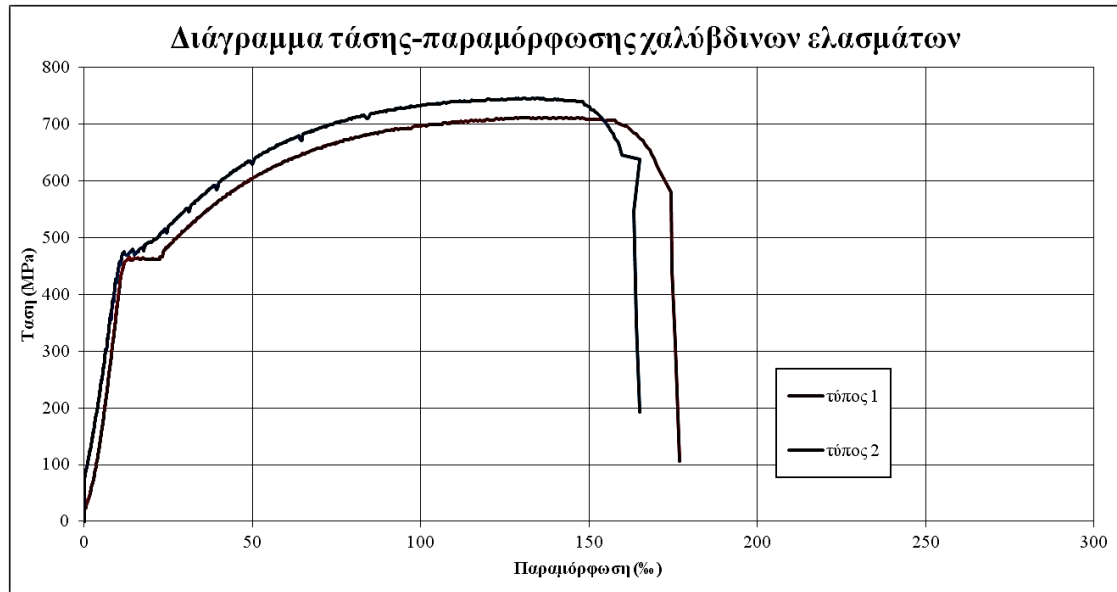
$$F_{ud} = \min \left\{ 1,3 \cdot \sum A_j \cdot \sqrt{f_{cd} \cdot f_{yd}} ; 0,25 \cdot \sum A_j \cdot f_{yd} \right\} = \\ = 0,25 \cdot 3 \cdot \frac{\pi \cdot 1,4^2}{4} (cm^2) \cdot 23,5 \left(\frac{kN}{cm^2} \right) = 27,11 kN$$

όπου $\sum A_j$ το συνολικό εμβαδό των βιδών ανά έλασμα κατά τη διεύθυνση της φόρτισης (3 βίδες), f_{yd} η τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής της βίδας που λαμβάνεται συμβατικά ίση με την τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής του συμβατικού χάλυβα S235 και f_{cd} είναι η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.

Η αντίστοιχη αντοχή για τις βίδες διαμέτρου Φ6 που τοποθετήθηκαν 4 ανά έλασμα είναι:

$$F_{ud} = 26,56 kN$$

Η εφελκυστική αντοχή των χαλύβων μετρήθηκε μέσω δοκιμών αξονικού εφελκυσμού στο Εργαστήριο. Ως τιμή σχεδιασμού σ_{jd} της ενίσχυσης για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε η μέση τάση διαρροής που προέκυψε από τη μονοτονική φόρτιση των δύο αυτών παρτίδων και η οποία είναι ίση με $f_{yd,m} = 475,06 \text{ Mpa}$. Κανονικά σε φάση σχεδιασμού η μέγιστη τάση για αποφυγή της αποκόλλησης ή της αστοχίας του υλικού πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή μονολιθικότητας k κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ και διαιρείται με ένα συντελεστή ασφαλείας υλικού γ_m . Στην παρούσα εργασία τα χρησιμοποιούμενα υλικά είναι γνωστά και η αποτίμησή τους γίνεται με επιτόπου δοκιμές των αντοχών τους, οπότε δε χρειάζονται συντελεστές ασφαλείας σχεδιασμού. Δίνεται το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης των τριών παρτίδων των ελασμάτων και τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους.



Διάγραμμα 6.3 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων χαλύβδινων πλακών (μονοτονική φόρτιση)

Πίνακας 6.4 Γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά χαλύβδινων ελασμάτων

| Χαρακτηριστικά | Τύπος 1 | Τύπος 2 |
|------------------|---------|---------|
| L (cm) | 45,00 | 43,80 |
| l (cm) | 31,70 | 28,00 |
| t (cm) | 4,96 | 4,90 |
| b (cm) | 29,62 | 30,35 |
| w (gr) | 504,87 | 497,18 |
| f_y (MPa) | 467,41 | 482,70 |
| f_u (MPa) | 710,61 | 744,38 |
| ϵ_y (‰) | 13,59 | 12,88 |
| ϵ_u (‰) | 140,32 | 129,39 |
| $f_{y,m}$ (MPa) | 475 | |

Η διατμητική αντοχή των ελασμάτων υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (2.55), για οριζόντια τοποθέτηση των λαμών ($\alpha=90^\circ$) και γωνία λοξών θλιπτήρων $\theta=45^\circ$. Η νέα τέμνουσα αντοχής σχεδιασμού λόγω οπλισμού διάτμησης δόθηκε από τη σχέση (2.53)

Στο δοκίμιο W8 οι λάμες τοποθετήθηκαν ανά 20cm, κι έτσι η αντοχή τους προκύπτει:

$$(2.55) \rightarrow V_{jd} = \frac{2A_j}{s_j} h_{j,eff} \cdot f_y = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 3(\text{cm}^2)}{20(\text{cm})} \cdot \left(\frac{2}{3}\right) \cdot 72,25(\text{cm}) \cdot 47,51 \left(\frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}\right) = 343,26 \text{ kN}$$

Η τέμνουσα αντοχής σχεδιασμού λόγω οπλισμού διάτμησης (συνδετήρες και λάμες) είναι:

$$(2.53) \rightarrow V_{Rd,tot.} = V_{jd} + V_w = 343,26 \text{ kN} + 264,92 \text{ kN} = 608,18 \text{ kN}$$

Στο δοκίμιο W10 οι λάμες τοποθετήθηκαν ανά 15cm, κι έτσι προκύπτουν αντίστοιχα:

$$(2.55) \rightarrow V_{jd} = 457,37 \text{ kN}$$

$$(2.53) \rightarrow V_{Rd,tot.} = 546,055 \text{ kN}$$

Για τον υπολογισμό της απομείωσης της διατμητικής αντοχής των δοκιμίων με την ανακύκλιση χρησιμοποιήθηκε η σχέση (2.38), με πρόσθεση του όρου της αντοχής των χαλύβδινων λαμών, V_{jd} . Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 6.5 Απομείωση της διατμητικής αντοχής του δοκιμίου W8 υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση με τη συνεισφορά των χαλύβδινων ενισχύσεων

| W8 (reinforced) | | |
|------------------------|----------|----------------|
| h | 0,75 | m |
| x | 0,10252 | m |
| N | 0 | |
| L_v | 1,5 | m |
| A_c | 0,090313 | m ² |
| f_c | 31 | MPa |
| ρ_{tot} | 0,0149 | |
| ρ_w | 0,0067 | |
| z | 0,6 | m |
| b_w | 0,125 | m |
| f_{yw} | 527,2 | MPa |
| V_w | 0,264918 | MN |
| V_j | 343,26 | kN |
| $\mu_{0,pl}$ | 3,72 | |
| V_R | 625,26 | kN |
| V_{R,y} | 689,69 | kN |

Πίνακας 6.6 Απομείωση της διατμητικής αντοχής υπό ανακύκλιση του δοκιμίου W10 με τη συνεισφορά των χαλύβδινων ενισχύσεων

| W10 (reinforced) | | |
|-------------------------|----------|----------------|
| h | 0,75 | m |
| x | 0,122 | m |
| N | 0 | |
| L_v | 1,5 | m |
| A_c | 0,090313 | m ² |
| f_c | 31 | MPa |
| ρ_{tot} | 0,012549 | |
| ρ_w | 0,00201 | |
| z | 0,6 | m |
| b_w | 0,125 | m |
| f_{yw} | 588,34 | MPa |
| V_w | 0,088692 | MN |
| V_j | 457,37 | kN |
| $\mu_{\theta,pl}$ | 1,69 | |
| V_R | 600,80 | kN |
| V_{R,y} | 614,04 | kN |

Έτσι, συντάχθηκαν τα **Διαγράμματα 6.7, 6.8** με τις υπολογιστικές καμπτικές και διατμητικές αντοχές των δοκιμίων. Στο **Διαγράμμα 6.8** φαίνεται πώς η χαλύβδινη ενίσχυση συμβάλλει θεωρητικά στην υπεραντοχή σε τέμνουσα του δοκιμίου W10.

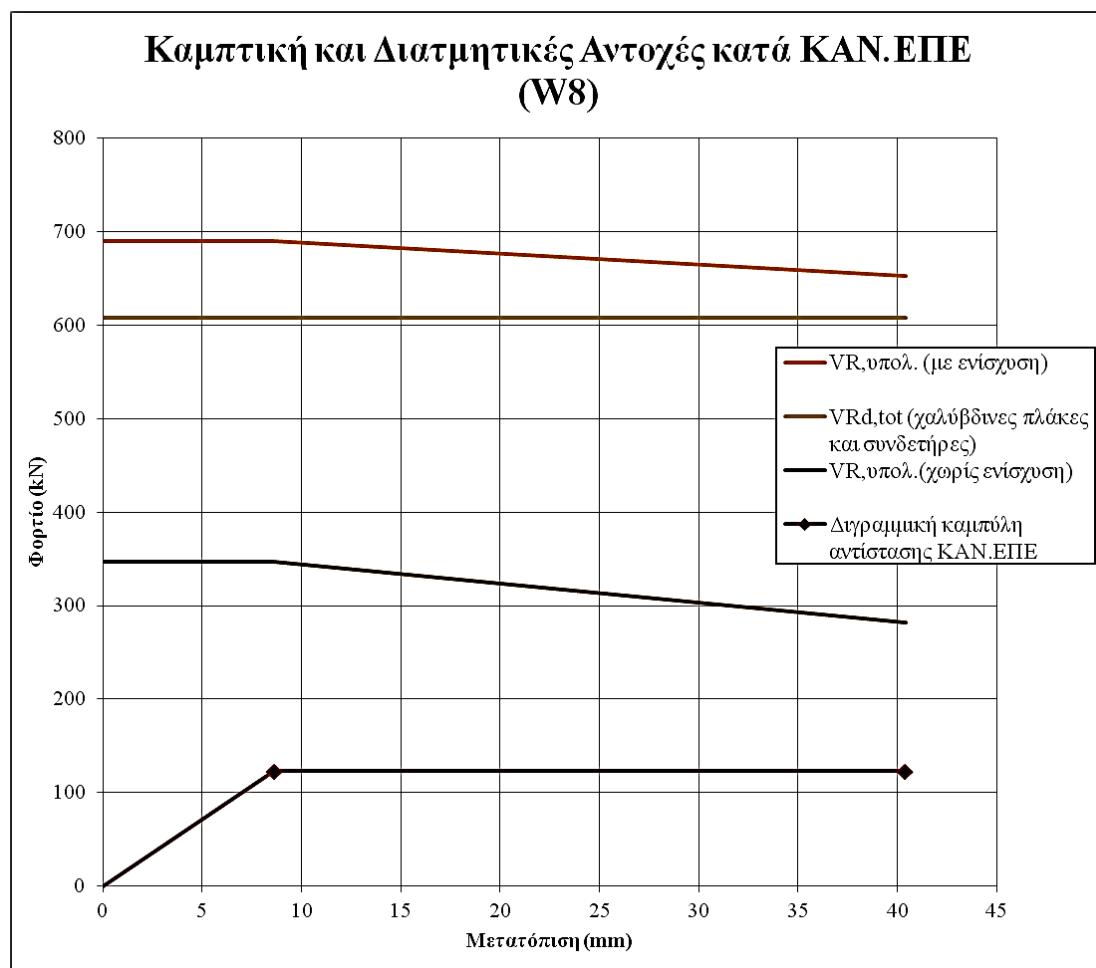
Οι αντοχές ωστόσο αυτές είναι καθαρά θεωρητικές και απλοποιητικές, μιας και αφενός η διατμητική αντοχή του ενισχυμένου στοιχείου δεν είναι πιθανό να είναι το άθροισμα των ταυτόχρονα αναπτυσσόμενων αντοχών διαρροής των συνδετήρων και των εξωτερικών λαμών ενώ δε λαμβάνεται υπόψιν και η συμβολή του σκυροδέματος, αφετέρου η σχέση που δίνει τη μείωση της διατμητικής αντοχής με την ανακύκλιση και περιέχει τον όρο της αντοχής του σκυροδέματος και του οπλισμού ενίσχυσης δεν είναι αξιόπιστη μιας και το πλαστικό μέρος του δείκτη πλαστιμότητας είναι αυτό που υπολογίστηκε για την καμπτική αντοχή μη λαμβάνοντας με καλή ακρίβεια υπόψη την αλληλεπίδραση κάμψης και διάτμησης, αλλά κυρίως την αλληλεπίδραση μεταξύ των τριών μηχανισμών που συμμετέχουν στην ανάληψη της συνολικής τέμνουσας (σκυρόδεμα, συνδετήρες, λάμες).

Το πρόβλημα του προσδιορισμού της αλληλεπίδρασης των συνδετήρων με τον οπλισμό ενίσχυσης ειδικά δεν έχει ακόμα επιλυθεί στη διεθνή βιβλιογραφία, πέρα από κάποιες πρόσφατες έρευνες και προσομοιώματα αντοχής που ωστόσο αφορούσαν στη διατμητική ενίσχυση δοκών με σύνθετα υλικά.

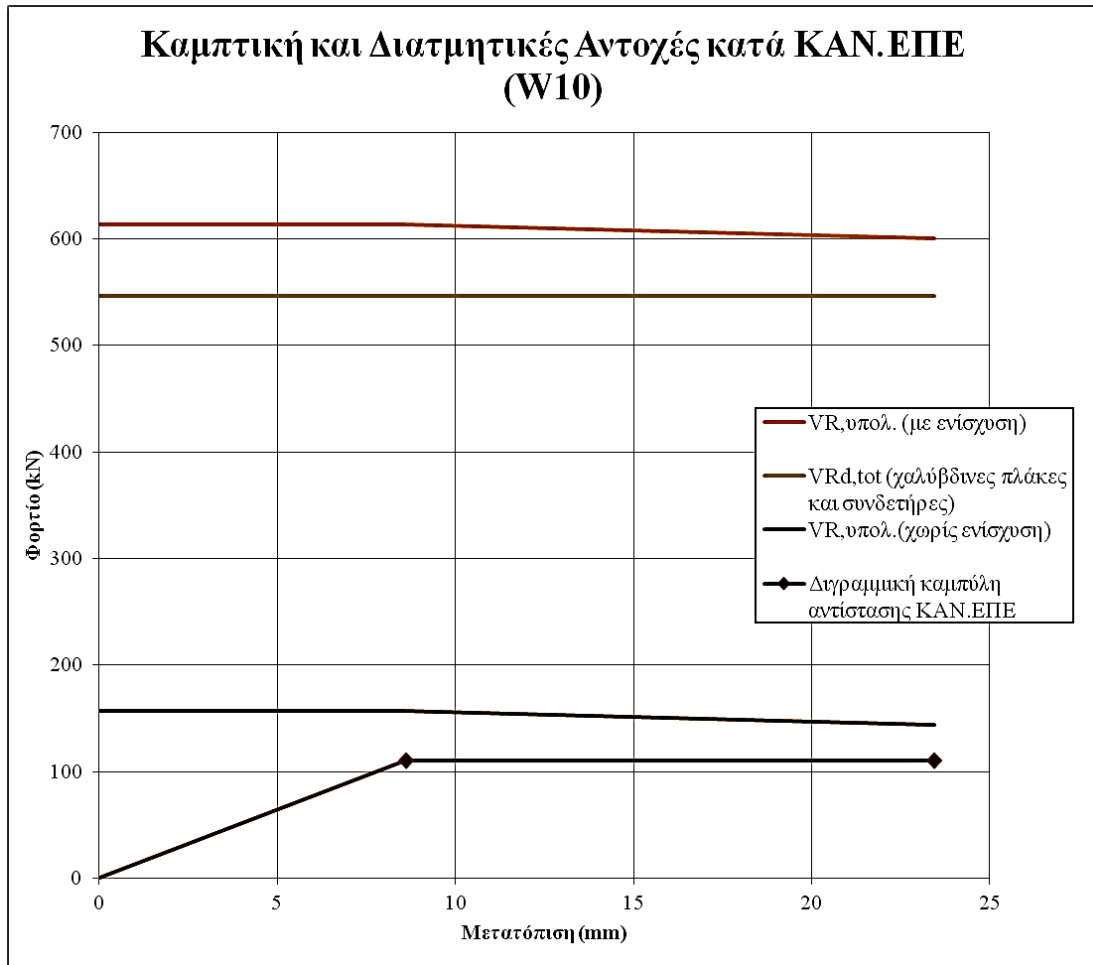
Κατά κύριο λόγο η αστοχία ενός ενισχυμένου σε διάτμηση στοιχείου επέρχεται λόγω αποκόλλησης του υλικού στην περιοχή ανοίγματος της κρίσιμης διατμητικής ρωγμής

όπου συγκεντρώνονται τάσεις, ειδικά δε όταν το υλικό ενίσχυσης δεν έχει αγκυρωθεί επαρκώς στα άκρα του στοιχείου ώστε να ενεργοποιείται πλήρως. Έτσι, αφενός μπορεί να θεωρηθεί ότι το σκυρόδεμα συμμετέχει στη συνολική τέμνουσα φτάνοντας την αντοχή του, ο εξωτερικός οπλισμός όμως βρίσκεται υπό ένταση πολύ μικρότερη της οριακής αντοχής του. Επίσης οι συνδετήρες που διαπερνώνται από την κρίσιμη ρωγμή δεν είναι βέβαιο ότι θα βρίσκονται όλοι υπό διαρροή, με αποτέλεσμα τη μικρότερη συμβολή αυτών που δεν εντείνονται ιδιαίτερα στη συνολική τέμνουσα.

Για την πρόβλεψη αυτού του φαινομένου απαιτούνται κατάλληλοι μειωτικοί συντελεστές για τον εξωτερικό οπλισμό και τους συνδετήρες που σχετίζονται με τις μέσες τάσεις που αναπτύσσονται τοπικά στα δύο υλικά και το μέγεθος του ανοίγματος της ρωγμής.



Διάγραμμα 6.7 Θεωρητικές αντοχές δοκιμίου W8 κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. πριν και μετά την ενίσχυση



Διάγραμμα 6.8 Θεωρητικές αντοχές δοκιμίου W10 κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. πριν και μετά την ενίσχυση

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται λεπτομέρειες της ενίσχυσης των δοκιμίων.



Εικόνα 6.9 Λεπτομέρεια ηλεκτροσυγκόλλησης (δοκίμιο W8)



Εικόνα 6.10 Διάνοξη οπών στις λάμες πριν την επικόλληση στο δοκίμιο W8



Εικόνα 6.11 Επικόλληση των λαμών στις δύο όψεις του δοκιμίου W10

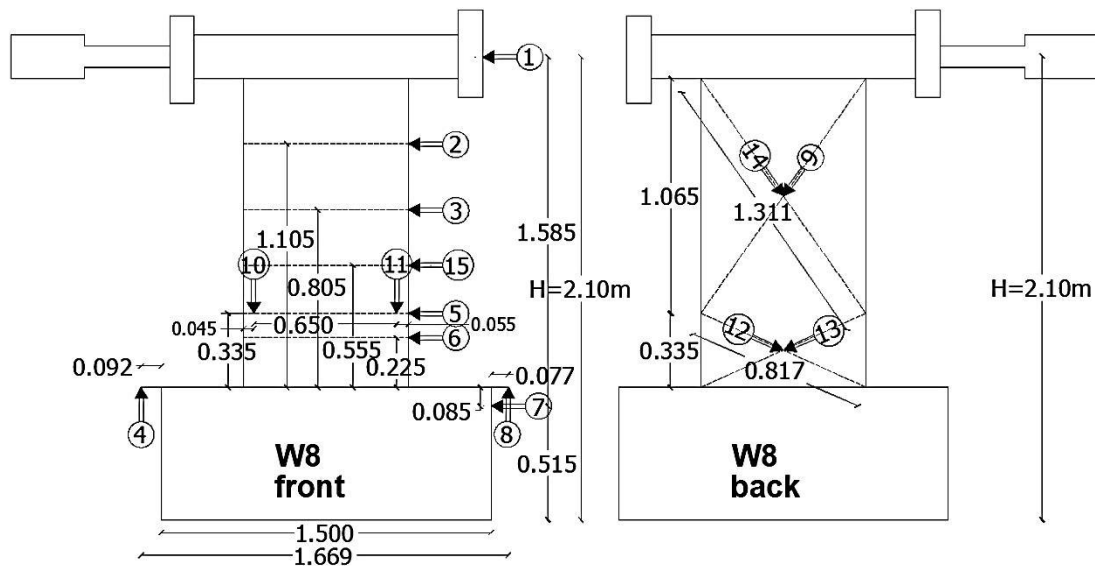
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

7.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη για τη μελέτη της απόκρισης των ενισχυμένων δοκιμίων W8, W10 είναι παρόμοια με αυτήν που περιγράφεται στην Παράγραφο 5.1. Δηλαδή, επιβάλλονται ξανά ελεγχόμενες μετατοπίσεις ανα 10mm (καταγραφές επενεργητή) σε τρεις κύκλους φόρτισης, από το μηδέν στα θετικά, μετά πάλι στο μηδεν και στη συνέχεια στα αρνητικά και πάλι πίσω στο μηδεν (αυτός είναι ένας κύκλος φόρτισης). Οι μετατοπίσεις ξεκινούν να καταγραφονται από τα +10mm, και η καταγραφή παύει όταν παρατηρηθεί αστοχία στο εκάστοτε δοκίμιο.

7.2 Βελόμετρα

Τα 15 βελόμετρα για τα 3 δοκίμια τοποθετήθηκαν με τρόπο όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.

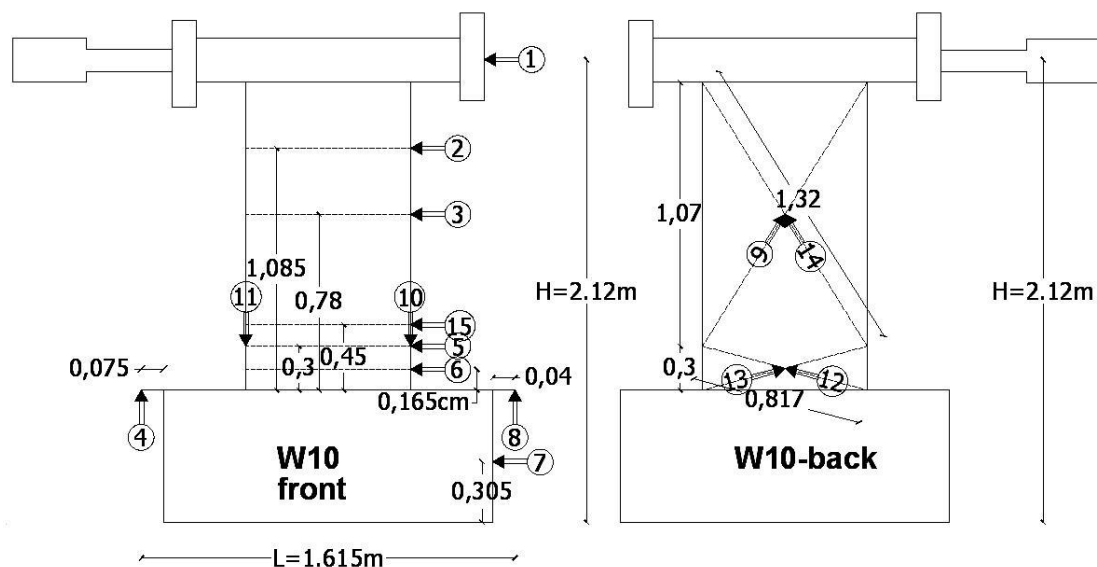


Σχήμα 7.1 Διάταξη βελομέτρων επί του τοιχίου W8

Η μετατόπιση κορυφής, δ_{top} , του δοκιμίου μετράται μέσα από τη σχέση διορθωσης (5.1) του Κεφαλαίου 5:

$$\delta_{top} = \delta_1 - \delta_7 - (\delta_8 - \delta_4) \cdot \frac{(H-l_1)}{L}$$

Ομοίως για τις διορθώσεις των υπόλοιπων βελομέτρων ισχύουν τα της Παραγράφου 5.2.



Σχήμα 7.2 Διάταξη βελομέτρων επί του τοιχίου W10

7.3 Επιμηκυνσιόμετρα (Strain-gages ή Strain-gauges)

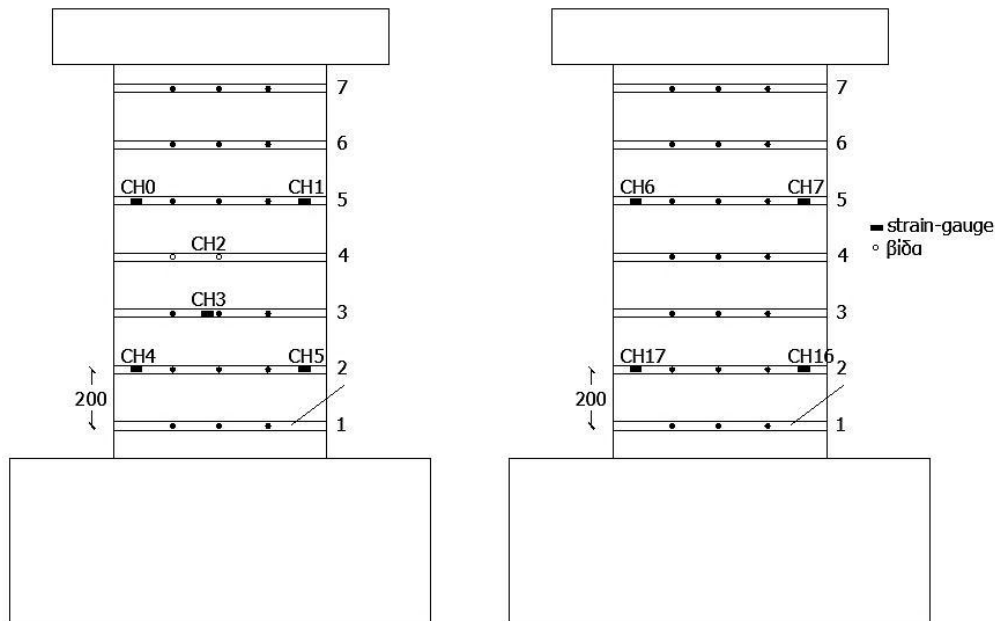
Εκτός των βελομέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση των παραμορφώσεων σε διάφορες περιοχές καθ' ύψος των δοκιμίων κατά τη διάρκεια της φόρτισής τους, έπρεπε να μετρηθούν και οι παραμορφώσεις (και κατ' επέκταση και οι δυνάμεις) που αναπτύχθηκαν στις χαλύβδινες ενισχύσεις για τον έλεγχο τυχόν πρόωρης αστοχίας τους σε εφέλκυσμό.

Ένας αισθητήρας παραμόρφωσης ή αλλιώς επιμηκυνσιόμετρο είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της παραμόρφωσης ενός αντικειμένου, στην προκειμένη περίπτωση της χαλύβδινης λάμας. Αποτελείται από εύκαμπτο μονωτικό υλικό που υποστηρίζει ένα μοτίβο μεταλλικού φύλλου. Το όργανο μέτρησης της επιμήκυνσης είναι προσαρτημένο στη λάμα με κατάλληλη μονωτική ταινία (τύπου superglue). Καθώς ο χάλυβας παραμορφώνεται, το μοτίβο μεταλλικού φύλλου παραμορφώνεται επίσης, προκαλώντας αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση του οργάνου. Όταν ένας ηλεκτρικός αγωγός τεντωθεί εντός των ορίων της ελαστικότητάς του, δηλαδή χωρίς να προκληθεί μόνιμη παραμόρφωση (δηλαδή η παραμόρφωση είναι σύμφωνα με το νόμο του Hooke ανάλογη της δύναμης), μειώνεται η ηλεκτρική αντίστασή του από άκρο σε άκρο. Από τη μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση του strain-gage μπορεί να μετρηθεί και το ποσό της εφαρμοσμένης επιμήκυνσης.

Ένα τυπικό επιμηκυνσιόμετρο έχει τη μορφή μακριού και λεπτού αγωγίμου καλωδίου σε διαμόρφωση ζικ-ζαγκ παράλληλων γραμμών. Οι αισθητήρες εξόδου μπορεί να παρέχουν πληροφορία είτε σε αναλογικό είτε σε ψηφιακό σήμα και αυτή η πληροφορία (παραμόρφωση) είναι έτσι είτε σε μορφή δυαδικού αριθμού είτε σε μορφή σειράς παλμών.

W8

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διάταξη των strain-gages στο δοκίμιο W8 επί των λαμών (σύμβολο CH) σε 10 θέσεις και η λεπτομέρεια τοποθέτησής της. Οι μαύρες τελείες που φαίνονται στο σχήμα είναι οι χάρτινοι «στόχοι» οι οποίοι επικολλήθηκαν στα τοιχία ως επιπλέον εργαλείο μέτρησης των παραμορφώσεων της διαδοχικές φορτίσεις όπου λαμβάνονταν διαδοχικά φωτογραφικά στιγμιότυπα (μέθοδος φωτομετρίας).

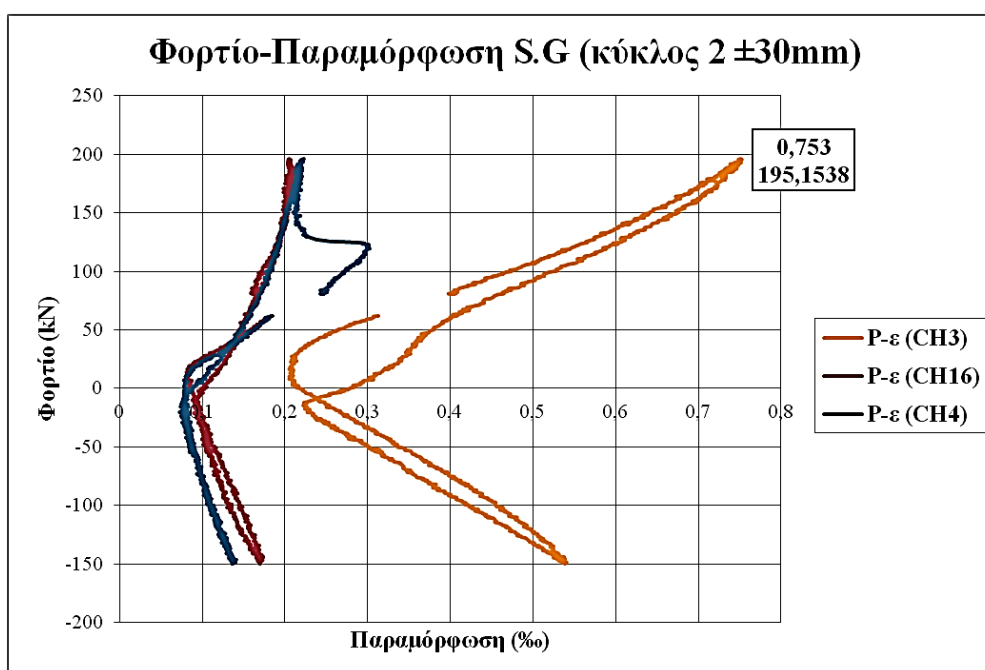


Σχήμα 7.3 Διάταξη strain-gauges επί του τοιχίου W8

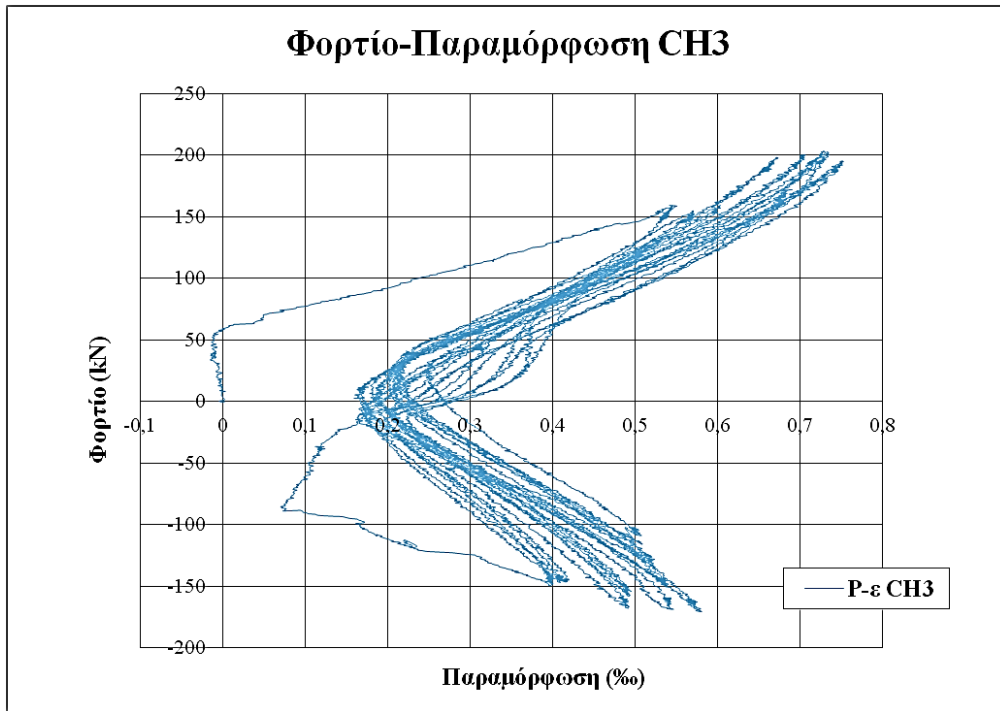
Οι καταγραφές των strain-gauges για το δοκίμιο δεν ήταν ιδιαίτερα ενδεικτικές. Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ ο επιθυμητός τρόπος αστοχίας του στοιχείου είναι το υλικό ενίσχυσης να φτάνει στη συμβατική παραμόρφωση αστοχίας του, ενώ το σκυρόδεμα στη θλιβόμενη ζώνη να έχει παραμόρφωση $\leq 3,5\%$. Η μέγιστη παραμόρφωση που καταγράφηκε από τα strain-gauges ήταν $0,075\%$ στο επιμηκυνσιόμετρο CH3 κατά τον δεύτερο κύκλο των $\pm 30\text{mm}$. Από τη δοκιμή θράυσης σε εφελκυσμό μιας πλάκας η παραμόρφωση αυτή αντιστοιχεί σε αναλαμβανόμενη δύναμη 14kN (περίπου το $\frac{1}{4}$ της δύναμης διαρροής της λάμας), ενώ κατά τον κύκλο αυτό το φορτίο φτάνει στα 195kN και αναλαμβάνεται από δύο λάμες

σε κάθε στάθμη που υπάρχει ενίσχυση, από το σκυρόδεμα και από τους ήδη υπάρχοντες συνδετήρες. Στο σημείο σχηματίστηκε ρωγμή το μέγιστο εύρος της οποίας σημειώθηκε στον κύκλο αυτό, γι' αυτό και καταγράφηκε αυτή η παραμόρφωση. Όπως είναι προφανές η παραμόρφωση αυτή απέχει κατά πολύ από την μετρηθείσα παραμόρφωση αστοχίας του υλικού ενίσχυσης (βλ. Πίνακα 6.3), αν και δεν είναι τόσο αξιόπιστη η εξαγωγή συμπερασμάτων καθώς η παραμόρφωση αστοχίας της λάμας μετρήθηκε χωρίς αυτή να είναι συνδεδεμένη με άλλο υλικό, και χωρίς να είναι δυνατή η εκτίμηση του βαθμού μονολιθικότητας της σύνδεσης αυτής. Οι καταγεγραμμένες παραμορφώσεις δηλαδή είναι τοπικές και απλά καταδεικνύουν ρωγμές που περνούν ακριβώς από το σημείο μέτρησης. Σημειώνεται πως σε αντίθεση με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ., ο Ευρωκώδικας 8 είναι πιο συντηρητικός και απαιτεί όχι μόνο το υλικό ενίσχυσης να παραμένει στην ελαστική περιοχή του κατά την αστοχία του συνολικού στοιχείου, αλλά και να αναλαμβάνει τέμνουσα κάτω από το 50% της δύναμης που αντιστοιχεί στη διαρροή του.

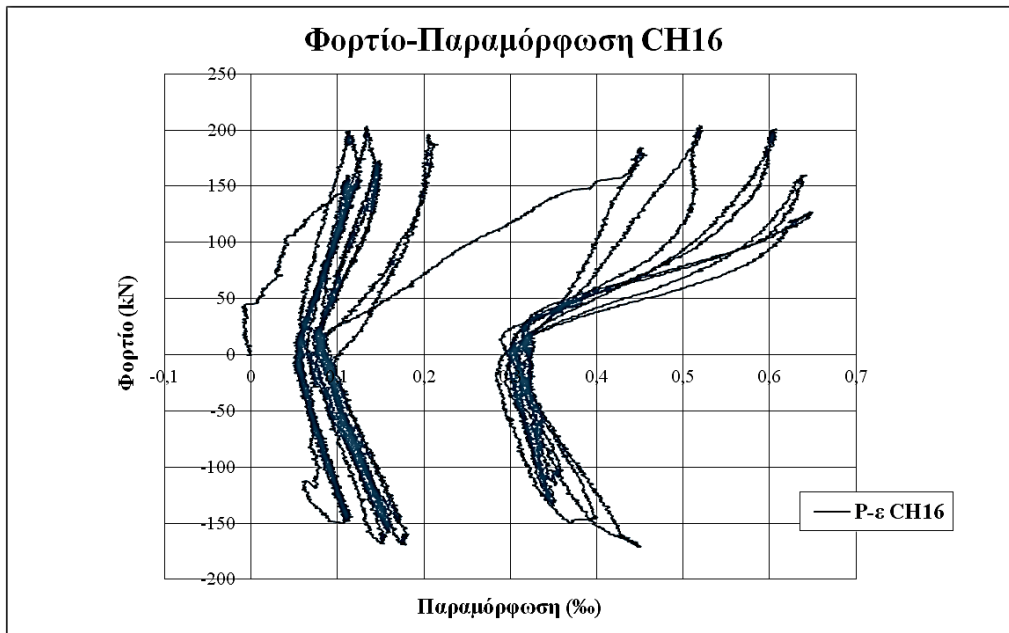
Δίνονται ενδεικτικά τα διαγράμματα δύναμης-παραμόρφωσης των strain-gauge CH3 και CH16 καθ'όλη τη διάρκεια του πειράματος και των strain-gauges CH3, CH4 και CH16 κατά τον δεύτερο κύκλο των $\pm 30\text{mm}$ (τα CH4 και CH16 είναι τοποθετημένα στην μπροστα και πίσω όψη, από την ίδια πλευρά του δοκιμίου και στο ίδιο ύψος, καταγράφουν δε ίδιο εύρος τιμών).



Διάγραμμα 7.4 Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης για τα strain-gauges CH3, CH4, CH16 στον δεύτερο κύκλο των $\pm 30\text{mm}$



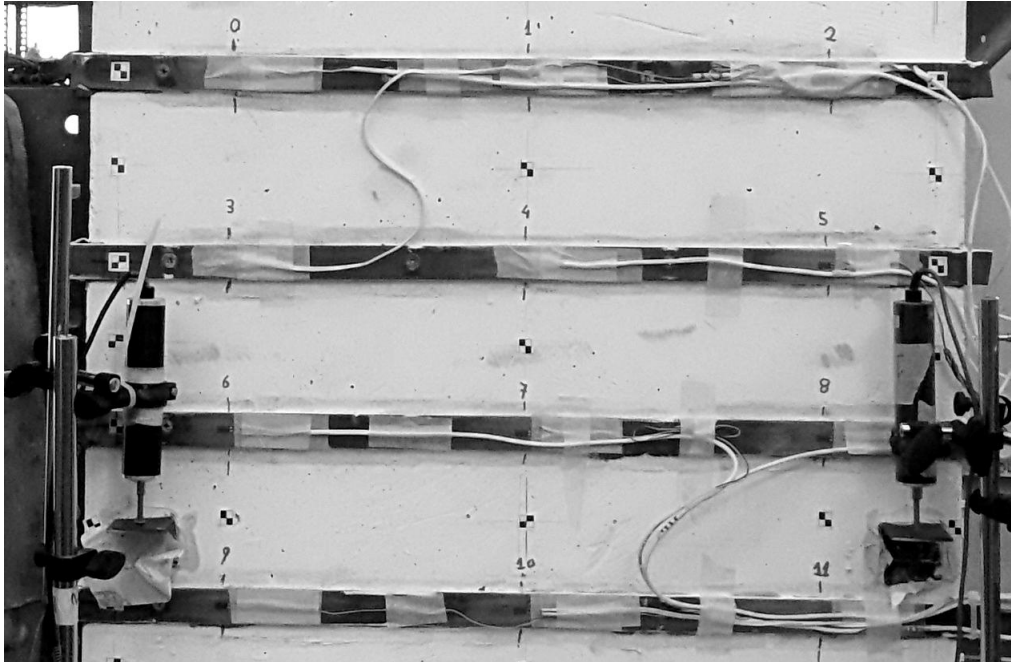
Διάγραμμα 7.5 Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης strain-gauge CH3 για όλους τους κύκλους



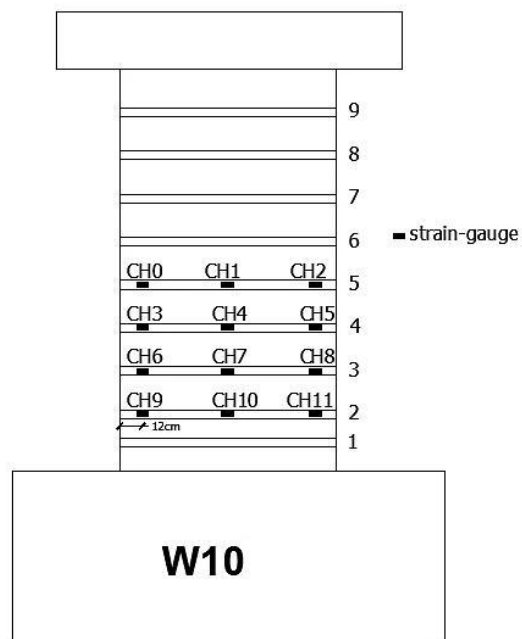
Διάγραμμα 7.6 Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης strain-gauge CH16 για όλους τους κύκλους

W10

Στο δοκίμιο W10 τα strain-gauges τοποθετήθηκαν στην μπροστινή όψη όπως φαίνεται στα παρακάτω εικόνα και σχήμα.



Εικόνα 7.7 Διάταξη strain-gauges επί του δοκίμιου W10



Σχήμα 7.8 Διάταξη strain-gauges επί του δοκίμιου W10

Η μέγιστη επιμήκυνση που καταγράφηκε από τα strain-gauges είναι 0,681‰ κατά των πρώτο κύκλο των $\pm 50\text{mm}$ για μετατόπιση +50,3mm (κατά την αστοχία δηλαδή) από το s.g CH11 και η μέγιστη βράχυνση είναι 0,128‰ από το s.g CH3. Στην κατάσταση αστοχίας δεν σημειώθηκε θράυση συνδετήρα. Η τέμνουσα αστοχίας (150kN) είναι άθροισμα της διατμητικής αντοχής του σκυροδέματος (θλιβόμενη ζώνη στο ανώτερο τμήμα της κεκλιμένης διατμητικής ρωγμής), της τέμνουσας που αναλαμβάνουν οι συνδετήρες του στοιχείου (ένας κλωβός) και της τέμνουσας που αναλαμβάνουν οι λάμες. Παραμόρφωση 0,68‰ αντιστοιχεί σε δύναμη 13,8kN. Αν υποθεθεί ότι και η πίσω λάμα αναλαμβάνει περίπου την ίδια δύναμη, συνολικά από την ενίσχυση στην περιοχή της βάσης αναλαμβάνεται δύναμη 28kN. Οι συνδετήρες στην περιοχή της βάσης συνεπώς ανέλαβαν δύναμη περίπου ίση με:

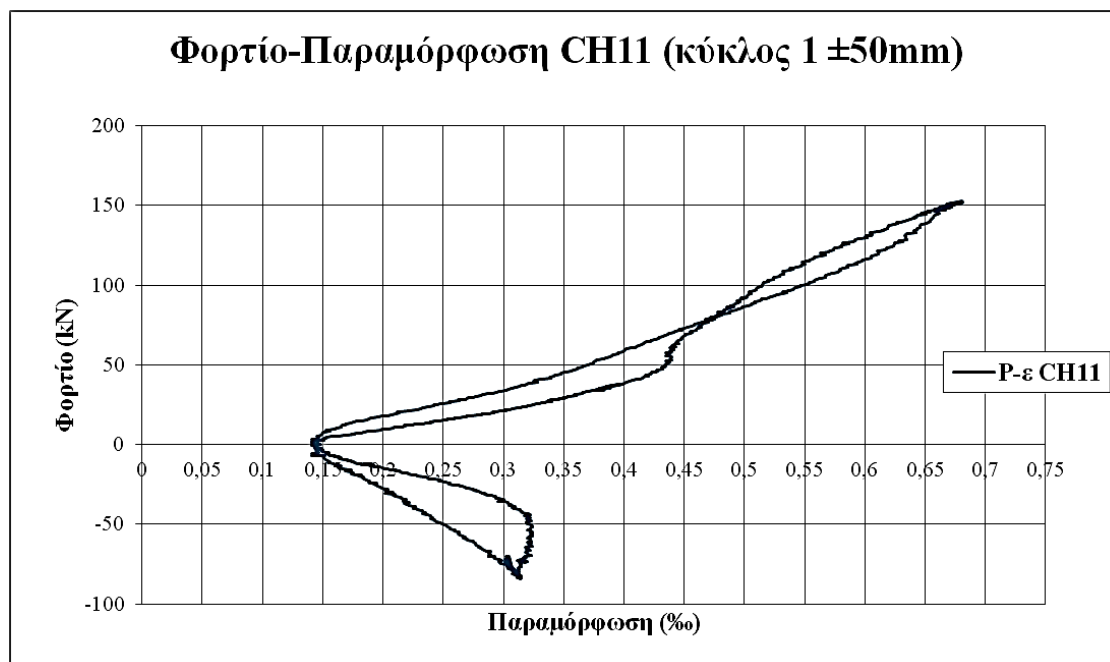
$$V_w = V_u - V_c - V_j \approx 150 - 80 - 28 = 42\text{kN} < F_{yw} = 59,16\text{kN} (= \text{δύναμη διαρροής ενός κλωβού}).$$

Οι καταγραφές και σε αυτό το δοκίμιο κυμάνθηκαν στα ίδια επίπεδα με αυτές του δοκιμίου W8, με τη διαφορά ότι σημείωσαν μεγαλύτερες ελαστικές βραχύνσεις (αρνητικές καταγραφές) και μεγαλύτερες παραμορφώσεις στο μέσον συγκριτικά με τα άκρα, πράγμα εύλογο καθώς όπως και οι συνδετήρες, οι λάμες αναλαμβάνουν μεγαλύτερη δύναμη στο μέσον του κορμού παρά στα άκρα τους κατά το λοξό εφελκυσμό.

Πίνακας 7.9 Μέγιστες επιμηκύνσεις και βραχύνσεις των strain-gauges

| Μέγιστες παραμορφώσεις των strain-gauges (‰) | | |
|---|---------|---------|
| | MAX (+) | MAX (-) |
| CH0 | 0,418 | -0,018 |
| CH1 | 0,407 | -0,035 |
| CH2 | 0,301 | -0,057 |
| CH3 | 0,493 | -0,128 |
| CH4 | 0,447 | -0,116 |
| CH5 | 0,384 | -0,03 |
| CH6 | 0,397 | -0,019 |
| CH7 | 0,649 | -0,008 |
| CH8 | 0,415 | -0,065 |
| CH9 | 0,636 | -0,011 |
| CH10 | 0,584 | -0,014 |
| CH11 | 0,681 | -0,015 |

Παρατίθεται το διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης του επιμηκυνσιομέτρου CH11 κατά τον πρώτο κύκλο των $\pm 50\text{mm}$.



Διάγραμμα 7.10 Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης strain-gauge CH11 κατά την αστοχία

7.4 Πειραματική Επεξεργασία

7.4.1 Κύκλοι φόρτισης

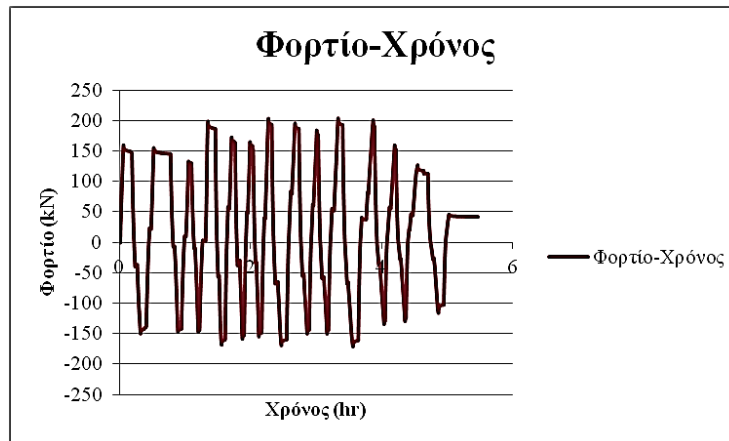
ΤΟΙΧΙΟ W8



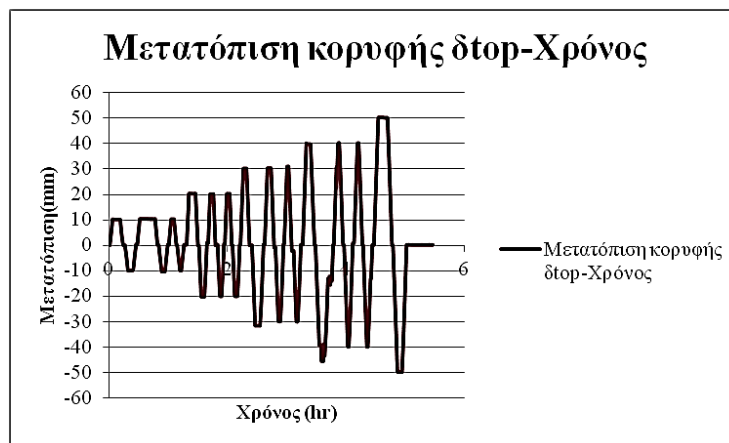
Εικόνα 7.11 Δοκίμιο W8 πριν το πείραμα

Το δοκίμιο υποβλήθηκε σε επιβαλλόμενες μετατοπίσεις από $\pm 10\text{mm}$ έως $\pm 50\text{mm}$, ώστε εκτός των άλλων να είναι συγκρίσιμη η κατάσταση του με το όμοιο του δοκίμιο W7 που μελετήθηκε χωρίς να έχει ενισχυθεί.

Δίνονται τα διαγράμματα φορτίου και μετατόπισης κορυφής συναρτήσει της χρονιστορίας φόρτισης.



Διάγραμμα 7.12 Γράφημα φορτίου συναρτήσει της χρονικής διάρκειας του πειράματος (W8)



Διάγραμμα 7.13 Γράφημα της διορθωμένης μετατόπισης κορυφής συναρτήσει του χρόνου (W8)

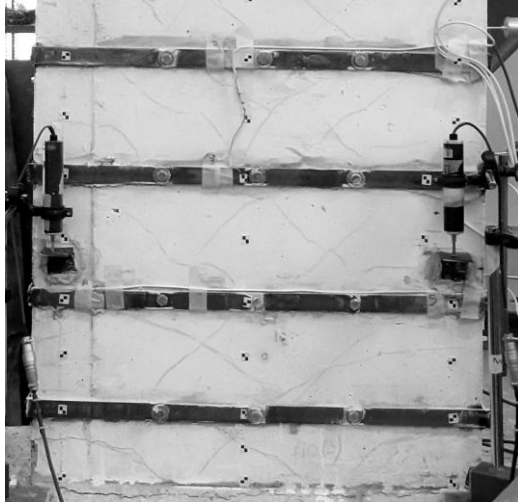
Το ενισχυμένο δοκίμιο W8 στους πρώτους κύκλους των $\pm 10\text{mm}$ εμφάνισε πολύ μικρού πάχους κεκλιμένες τριχοειδείς ρωγμές καθ' ύψος κυρίως στις περιοχές μεταξύ του ενισχυτικού υλικού και μικρές περίπου οριζόντιες καμπτικές ρωγμές κοντά στην περιοχή της βάσης. Είχε δηλαδή παρόμοια συμπεριφορά με το μη ενισχυμένο.



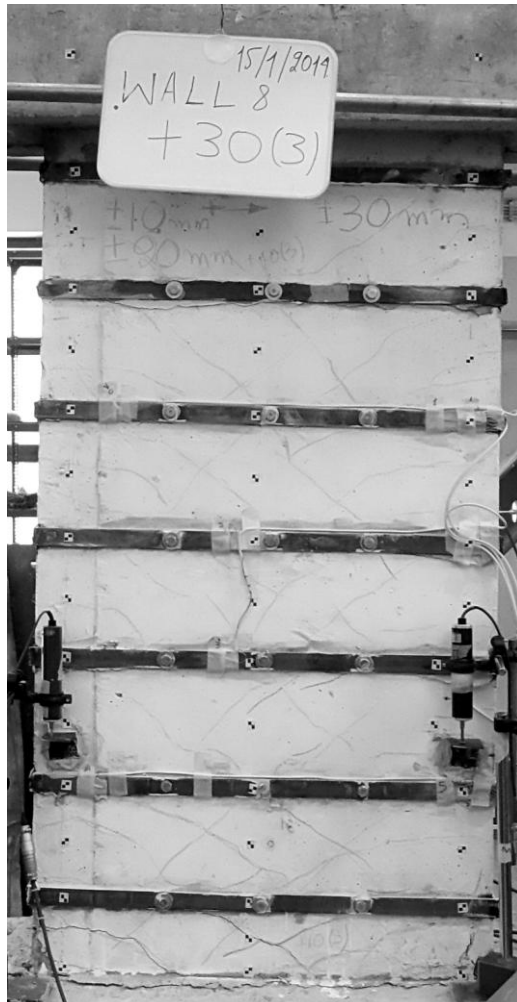
Εικόνα 7.14 Ρωγμές δοκιμίου στους κύκλους των $\pm 10\text{mm}$

Όσον αφορά στους κύκλους των $\pm 20\text{mm}$, στον πρώτο κύκλο σε μετατόπιση -20mm δημιουργήθηκαν δύο διακριτές οριζόντιες ρωγμές στην περιοχή της βάσης εκ των οποίων η μία ξεκίνησε από την κάτω παρειά της λάμας. Στο δεύτερο κύκλο, στα $+20\text{mm}$ οι ρωγμές αυτές έκλεισαν. Οι κεκλιμένες ρωγμές που προϋπήρχαν διευρύνθηκαν, ενώ ταυτόχρονα δημιουργήθηκαν και νέες στον κορμό, διασταυρούμενες με τις ήδη υπάρχουσες. Στη βάση σημειώθηκε ελαφρά ολίσθηση στην άνω παρειά της θεμελίωσης και μικρή αποφλοιώση του σκυροδέματος στην κάτω αριστερά γωνία του κορμού. Στον τρίτο κύκλο των $\pm 20\text{mm}$ το δοκίμιο είχε την ίδια απόκριση με τον προηγούμενο κύκλο, χωρίς να σημειωθούν περαιτέρω αξιοσημείωτες ρηγματώσεις.

Στους κύκλους των $\pm 30\text{mm}$ οι ρηγματώσεις της βάσης έγιναν κυρίαρχες, προσημαίνοντας καμπτικού τύπου αστοχία. Στον πρώτο κύκλο οι περίπου οριζόντιες ρωγμές επεκτάθηκαν από τις παρειές προς το μέσον του κορμού και μεγάλωσαν σε εύρος. Ταυτόχρονα δημιουργήθηκε και μια κεντρική κεκλιμένη ρωγμή στη βάση που «πιάστηκε» από την κάτω λάμα. Οι ρωγμές στον πρώτο κύκλο για μετατόπιση -30mm ήταν εντονότερες από την αντίστοιχη μετατόπιση $+30\text{mm}$. Στο δεύτερο κύκλο έγινε διακριτή η αποφλοιώση του σκυροδέματος, που έγινε εντονότερη με το τέλος των κύκλων αυτών.

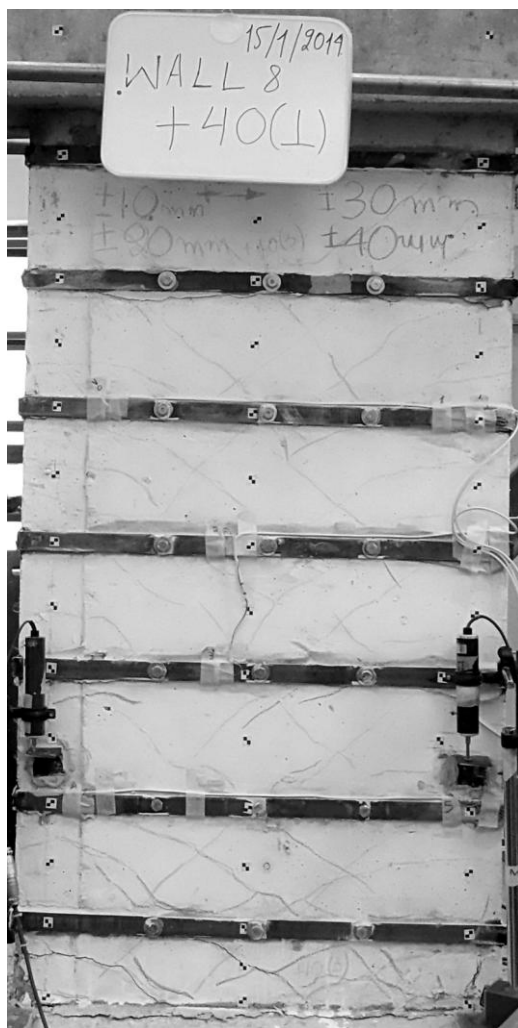


Εικόνα 7.15 Ρωγμές δοκιμίου στους κύκλους των $\pm 20\text{mm}$



Εικόνα 7.16 Ρωγμές δοκιμίου στους κύκλους των $\pm 30\text{mm}$

Οι κύκλοι των $\pm 40\text{mm}$ ήταν καθοριστικοί για το δοκίμιο. Στον πρώτο κύκλο το τοιχίο σημείωσε τη μεγαλύτερη αντίστασή του για μετατόπιση $+36\text{mm}$, δηλαδή φορτίο $P_{\max} = 203,82\text{kN}$. Ταυτοχρόνως η ρηγμάτωση έγινε αρκετά έντονη τόσο με κεκλιμένες ρωγμές καθ' ύψος αλλά και κοντά στη βάση όσο και με οριζόντιες. Στην μετατόπιση των -40mm αποφλοιώθηκε σημαντικά το σκυρόδεμα στην κάτω παρειά. Στους επόμενους δύο κύκλους παρατηρήθηκε έντονη αποδιοργάνωση της επικάλυψης στη βάση, απότομη μείωση της δυσκαμψίας και πτώση του φορτίου, ενώ δεν αποφεύχθηκε και ο λυγισμός του ακραίου θλιβόμενου οπλισμού που συνοδεύτηκε και με θραύση της συγκόλλησης της κάτω ακραίας ενίσχυσης.



Εικόνα 7.17 Ρωγμές δοκιμίου στον πρώτο κύκλο των $\pm 40\text{mm}$ όπου σημειώθηκε η μέγιστη αντίσταση

Στον πρώτο κύκλο των $\pm 50\text{mm}$ που ήταν και ο μοναδικός αυτού του εύρους μετατοπίσεων η αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης ήταν εντονότατη, η πτώση της αντίστασης έφτασε το 40% ενώ για μετατόπιση από -38mm έως και -45mm θραύστηκε ο ακραίος εφελκυσμένος οπλισμός.



Εικόνα 7.18 Ρωγμές δοκιμίου στον κύκλο των $\pm 50\text{mm}$ όπου θραύστηκε ο εφελκόμενος οπλισμός

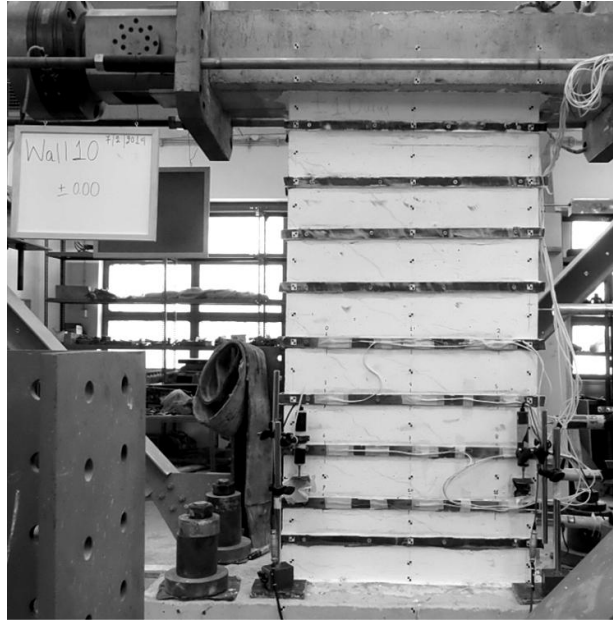
Συμπερασματικά, το δοκίμιο αστόχησε καμπτικά αλλά σχετικά ψαθυρά με απότομη και όχι σταδιακή πτώση της δυσκαμψίας και της αντίστασής του κατά τους κύκλους των $\pm 40\text{mm}$ και καθοριστικούς παράγοντες την μεγάλη καταπόνηση της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος της κρίσιμης περιοχής (που καταπονήθηκε ακόμη περισσότερο με την πλευρική πίεση που άσκησε η ενίσχυση), και τον τοπικό λυγισμό των θλιβόμενων ράβδων οπλισμού, οι οποίες λόγω απομείωσης της αντοχής τους θραύστηκαν κατά τον εφελκισμό τους. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που καθόρισε την απόκριση του δοκιμίου ήταν ότι λόγω της υπερόπλισής του έγινε αρκετά «δύσκαμπτο» στον κορμό (μικρότερη παραμορφωσιμότητα) και αποτόνωσε το μεγαλύτερο μέρος της απορροφούμενης ενέργειας στην βάση του μέσω έντονης ρηγμάτωσης. Αυτό γίνεται αντιληπτό και από το συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των δοκιμίων 7 και 8 της Παραγράφου 7.4.3, στο οποίο φαίνεται ότι η κρίσιμη περιοχή (πλαστική) ανέπτυξε μεγαλύτερες παραμορφώσεις και ανέλαβε μεγάλες τέμνουσες νωρίτερα λόγω μεγαλύτερης αρχικής δυσκαμψίας απ' ότι στο δοκίμιο 7, όπου η διάχυση της ενέργειας έγινε πιο ομοιόμορφα καθ' ύψος.



Εικόνα 7.19 Θράυση των διαμήκων εφελκόμενων ράβδων



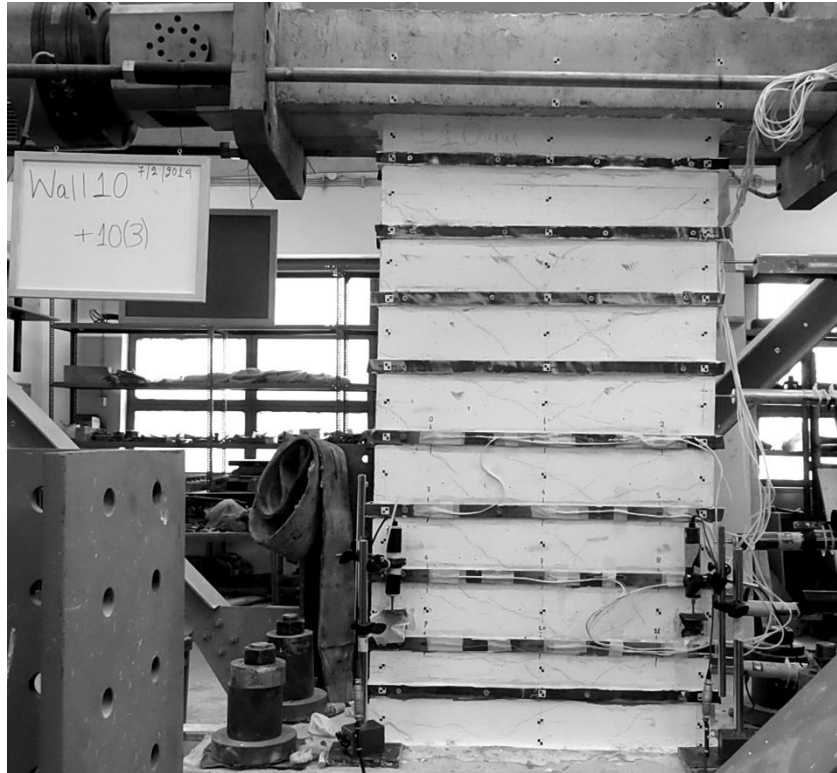
Εικόνα 7.20 Ελαφρύς λυγισμός των διαμήκων θλιβόμενων ράβδων

ΤΟΙΧΙΟ W10

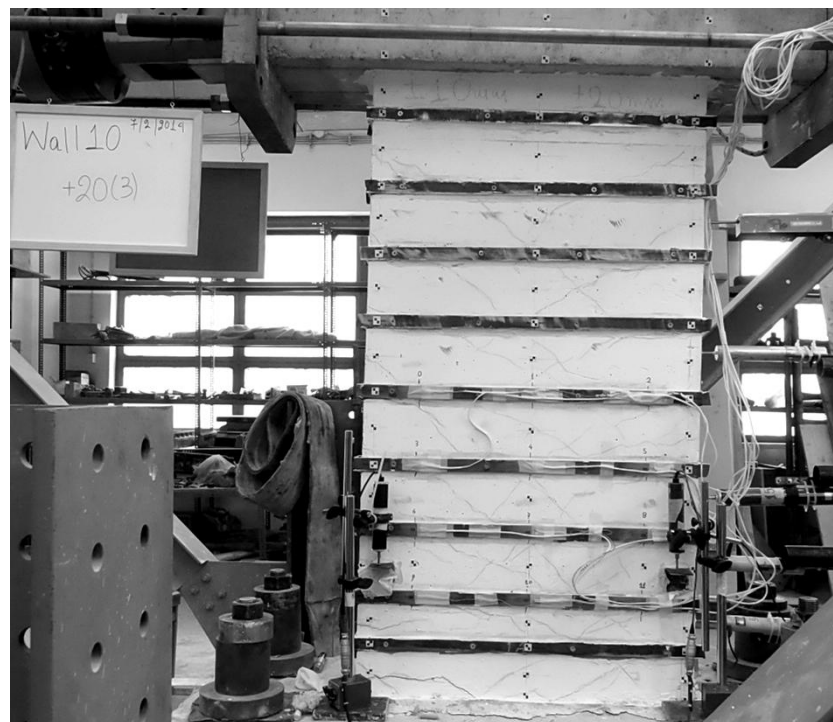
Εικόνα 7.21 Δοκίμιο W10 πριν το πείραμα

Το δοκίμιο υποβλήθηκε σε επιβαλλόμενες μετατοπίσεις από $\pm 10\text{mm}$ έως $\pm 50\text{mm}$. Το ενισχυμένο δοκίμιο κατά τον πρώτο κύκλο των $\pm 10\text{mm}$ εμφάνισε ελάχιστες κεκλιμένες ρωγμές κορμού, οι οποίες δε διευρύνθηκαν ούτε δημιουργήθηκαν αξιοσημείωτες νέες ως το τέλος των τριών πρώτων κύκλων. Οι ρωγμές είχαν μορφή χιαστή και η γωνία των θλιπτήρων ήταν περίπου 45° . Το μέγιστο φορτίο κατά τους κύκλους των ± 10 ήταν αρκετά υψηλό (152kN) και σημειώθηκε στο δεύτερο κύκλο για θετικές μετατοπίσεις.

Στον πρώτο κύκλο των $\pm 20\text{mm}$, δημιουργήθηκαν μια περίπου οριζόντια ρωγή βάσης για θετικές μετατοπίσεις, και κεκλιμένες ρωγμές που γίνονταν οριζόντιες όταν συναντούσαν τη λάμα στην περιοχή της βάσης για αρνητικές μετατοπίσεις (κίνδυνος απόσχισης στο άκρο), ενώ καθ' ύψος διατηρήθηκαν οι προϋπάρχουσες ρωγμές χωρίς να παρατηρηθούν νέες. Το φορτίο έφτασε την τιμή των $183,2\text{kN}$, κοντά στη μέγιστη αντίστασή του. Το αντίστοιχο μέγιστο φορτίο για αρνητικές μετατοπίσεις ήταν μόνο 129kN . Στους επόμενους δύο κύκλους σχηματίστηκαν λίγες μικρες κεκλιμένες ρωγμές με αυξανόμενη κλίση καθ' ύψος, και στη βάση διευρύνθηκαν οι κεκλιμένες ρωγμές κυρίως στην δεξιά μεριά του δοκιμίου (εφελκυσμός για αρνητικές μετατοπίσεις) και σημειώθηκε πολύ μικρή αποφλοίωση σκυροδέματος και ελαφριά ολίσθηση βάσης. Το δοκίμιο W9 στους ίδιους κύκλους είχε ήδη ρηγματωθεί αρκετά με επιμήκεις κεκλιμένες ρωγμές στον κορμό.



Εικόνα 7.22 Ρηγμάτωση του δοκιμίου κατά τον τρίτο κύκλο των +10mm



Εικόνα 7.23 Ρηγμάτωση του δοκιμίου κατά τον τρίτο κύκλο των +20mm



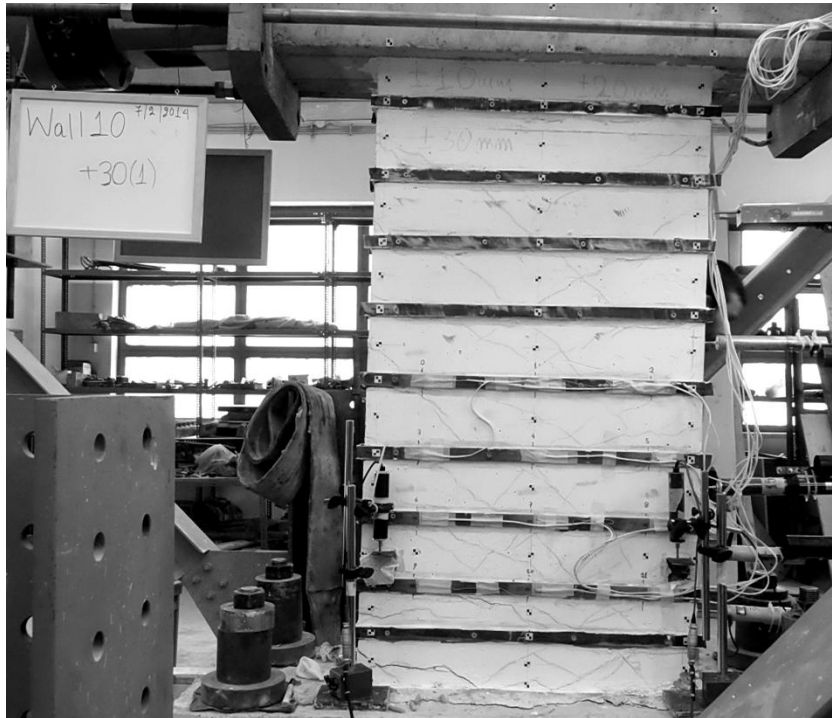
Εικόνα 7.24 Ρηγμάτωση του δοκιμίου κατά τον τρίτο κύκλο των -20mm

Στον πρώτο κύκλο των +30mm το τοίχιο σημείωσε τη μέγιστη αντίστασή του, ήτοι 189,34kN. Κυριάρχη έγινε μια ρωγμή βάσης οριζόντια στο άκρο και με κλίση προς το μέσο της διατομής βάσης. Στους επόμενους κύκλους το φορτίο διατήρησε ψηλές τιμές και είχε ομαλή πτώση. Η αποφλοίωση του σκυροδέματος στη δεξιά παρειά επεκτάθηκε. Μεγαλύτερη ρηγμάτωση σημειώθηκε για αρνητικές μετατοπίσεις, όπου η τιμή του φορτίου κυμάνθηκε σε χαμηλές τιμές, από 110 έως 130kN. Οι ρηγματώσεις στο ανώτερο και μεσαίο τμήμα του κορμού συνέχισαν να είναι ανεπαίσθητες.

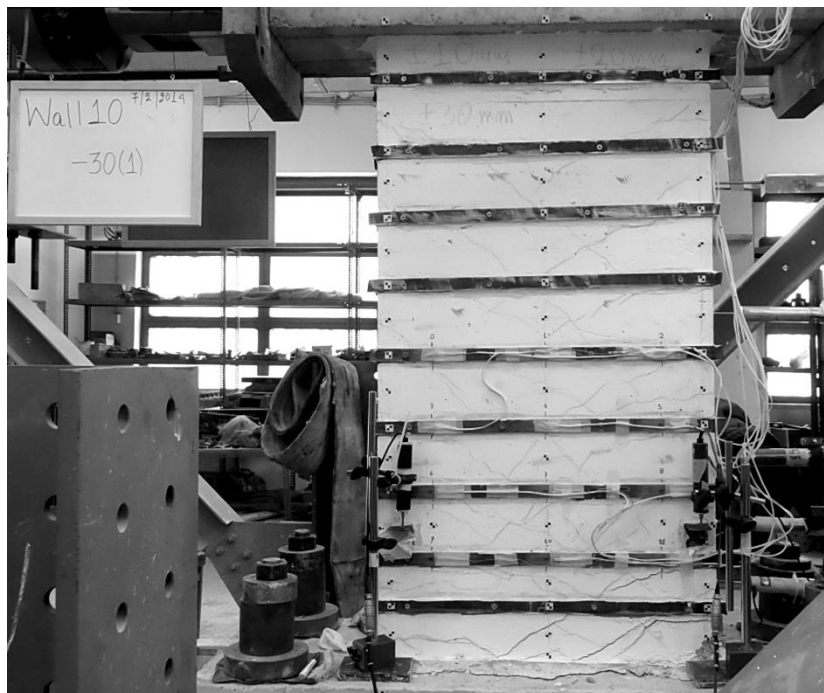
Στους δύο πρώτους κύκλους των ± 40 mm το δοκίμιο διατήρησε πολύ ψηλές τιμές αντίστασης (182,6kN στον πρώτο κύκλο για θετικές μετατοπίσεις, 172kN στον δεύτερο), ενώ στον τρίτο κύκλο έπεσε απότομα η δυσκαμψία και θράυστηκε μια ράβδος εφελκόμενου οπλισμού για φορτίο 130kN.

Παρά τη θράυση της ράβδου, κατά τις μετατοπίσεις των ± 50 mm το δοκίμιο ανέλαβε ξανά μεγάλες τιμές φορτίου, φτάνοντας στον πρώτο κύκλο για θετικές μετατοπίσεις φορτίο 152,54kN χωρίς να θραυστεί η άλλη ράβδος οπλισμού που είχε σπάσει στον προηγούμενο κύκλο. Ωστόσο θράυστηκε μια ράβδος στην απέναντι παρειά κατά τις αρνητικές μετατοπίσεις (για φορτίο 84kN). Τέλος, το δοκίμιο υποβλήθηκε και σε δεύτερο κύκλο ± 50 mm όπου θράυστηκε και η δεύτερη ράβδος για θετικές

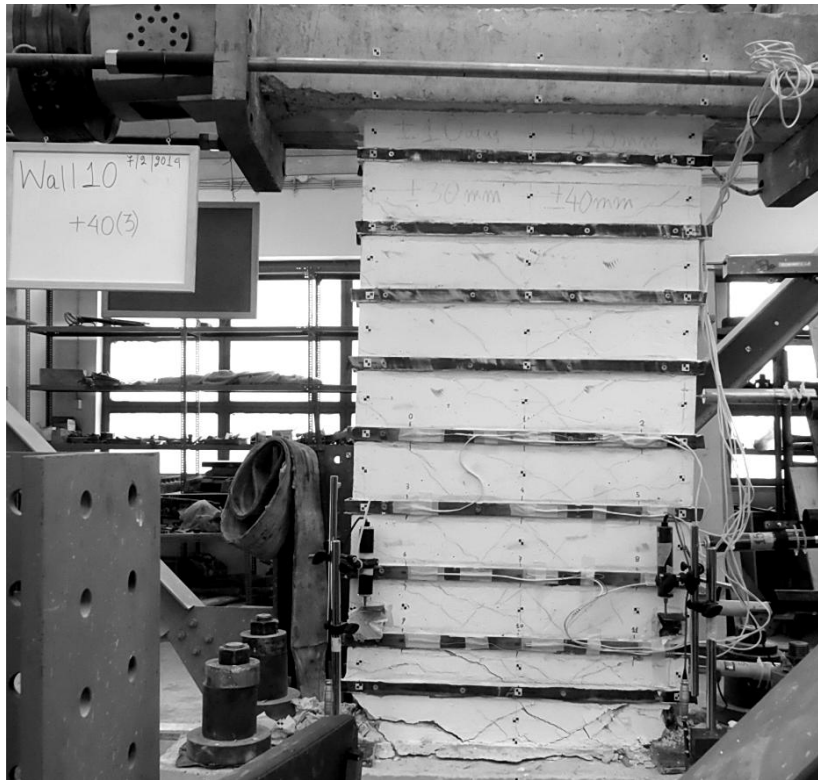
μετατοπίσεις (φορτίο στα 121,43kN). Ο επενεργητής γύρισε στο μηδεν χωρίς να επιβληθεί αρνητική μετατόπιση εφόσον είχε αστοχήσει το δοκίμιο.



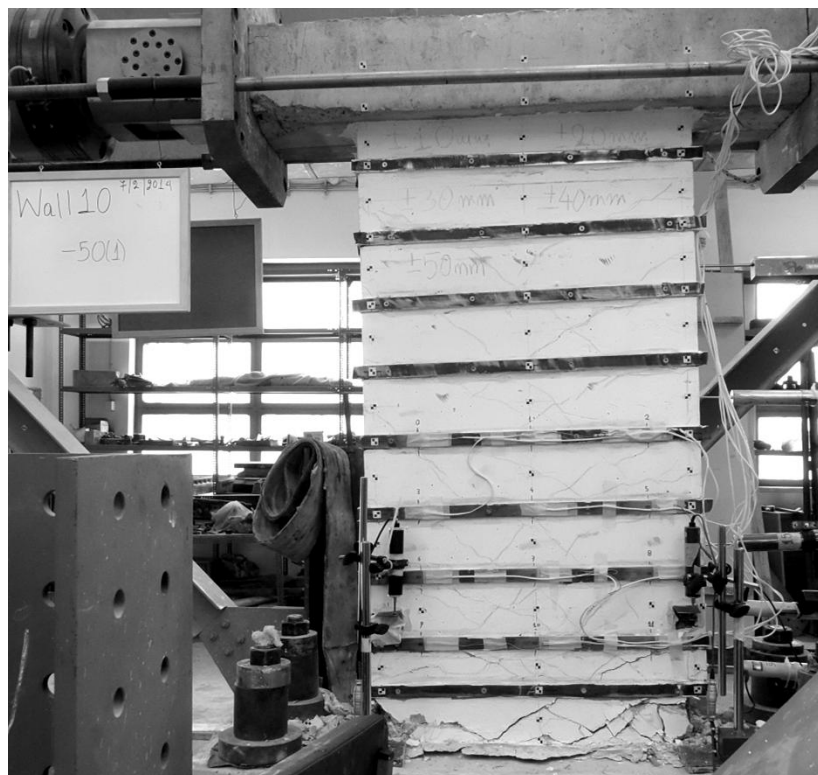
Εικόνα 7.25 Ρηγμάτωση του δοκίμιου για τη μέγιστη αντίσταση κατά τον πρώτο κύκλο των +30mm



Εικόνα 7.26 Ρηγμάτωση του δοκίμιου για τη μέγιστη αντίσταση κατά τον πρώτο κύκλο των -30mm



Εικόνα 7.27 Ρηγμάτωση του δοκιμίου κατά τη θράυση του εφελκόμενου οπλισμού στον τρίτο κύκλο των +40mm



Εικόνα 7.28 Ρηγμάτωση του δοκιμίου κατά τη θράυση του εφελκόμενου οπλισμού για αρνητικές μετατοπίσεις στον πρώτο κύκλο των $\pm 50\text{mm}$



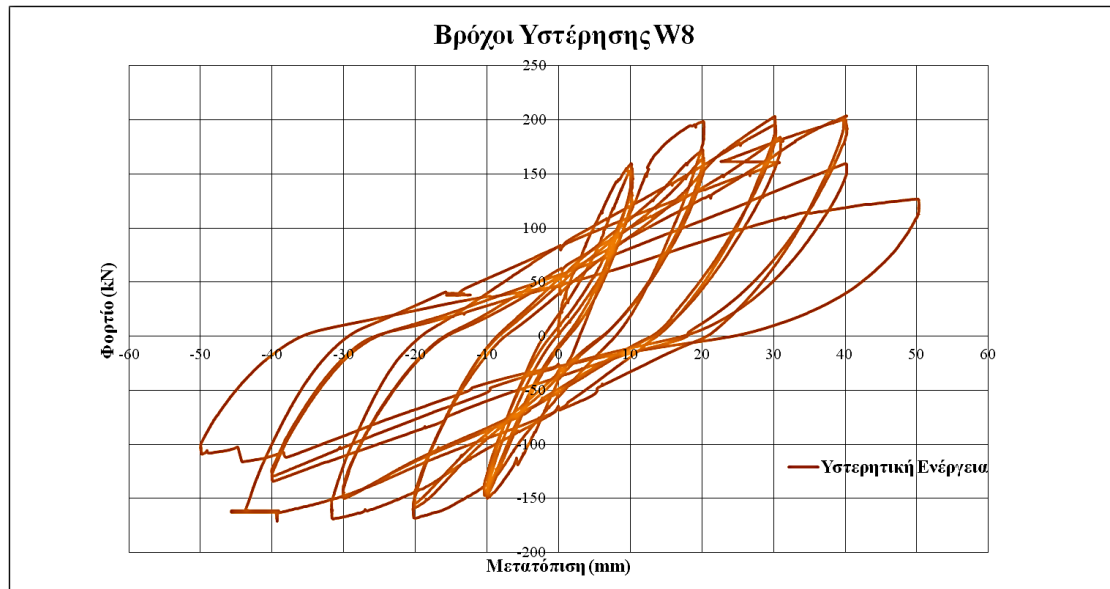
Εικόνα 7.29 Θράυση του εφελκόμενου οπλισμού



Εικόνα 7.30 Λυγισμός του θλιβόμενου οπλισμού

7.4.2 Υστερητική συμπεριφορά ενισχυμένων δοκιμίων

Δοκίμιο W8



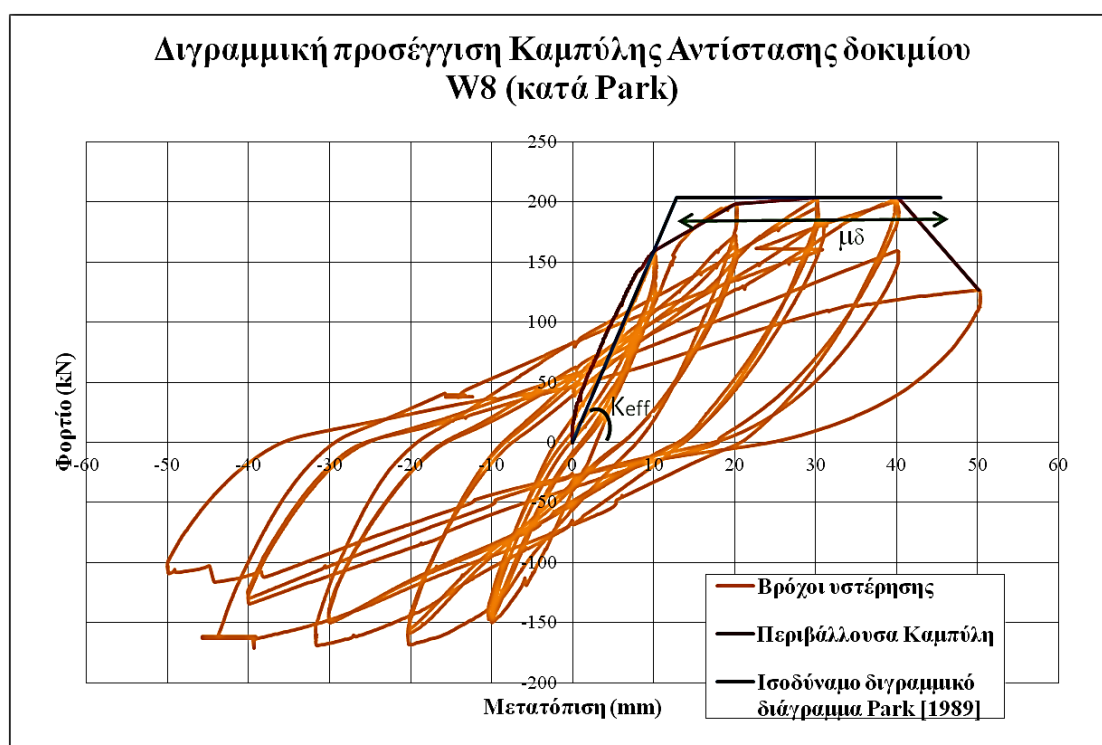
Διάγραμμα 7.31 Βρόχοι Υστερητικής Ενέργειας τοιχίου W8

Στο **Διάγραμμα 7.31** παρουσιάζεται η υστερητική συμπεριφορά του δοκιμίου κατά την πειραματική στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η υστερητική συμπεριφορά αφορά στην ενεργοποίηση μηχανισμών ανάληψης επιβαλλόμενων οριζόντιων μετατοπίσεων, άρα και φορτίων για τους διαδοχικούς κύκλους και την συνακόλουθη απορρόφηση και εκτόνωση ενέργειας που αντιστοιχεί στη σεισμική δόνηση. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα το δοκίμιο είχε καμπτική συμπεριφορά. Η πτώση της αντίστασης του πραγματοποιήθηκε για μετατοπίσεις $\pm 40\text{mm}$ και απεικονίζεται στο διάγραμμα με την απότομη μείωση της κλίσης των βρόγχων κατά τους κύκλους αυτούς.

Για τον προσδιορισμό μεγεθών όπως είναι η πλαστιμότητα μετατοπίσεων, η ενεργός δυσκαμψία και οι μετατοπίσεις διαρροής και αστοχίας απαιτούνται ψευδο-ελαστικές μέθοδοι προσέγγισης των μη γραμμικών Καμπυλών Υστέρησης. Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι διγραμμικοποίησης διαγραμμάτων συμπεριφοράς. Στο παρόν εκπόνημα παρουσιάζονται για λόγους πληρότητας και σύγκρισης δυο από αυτές:

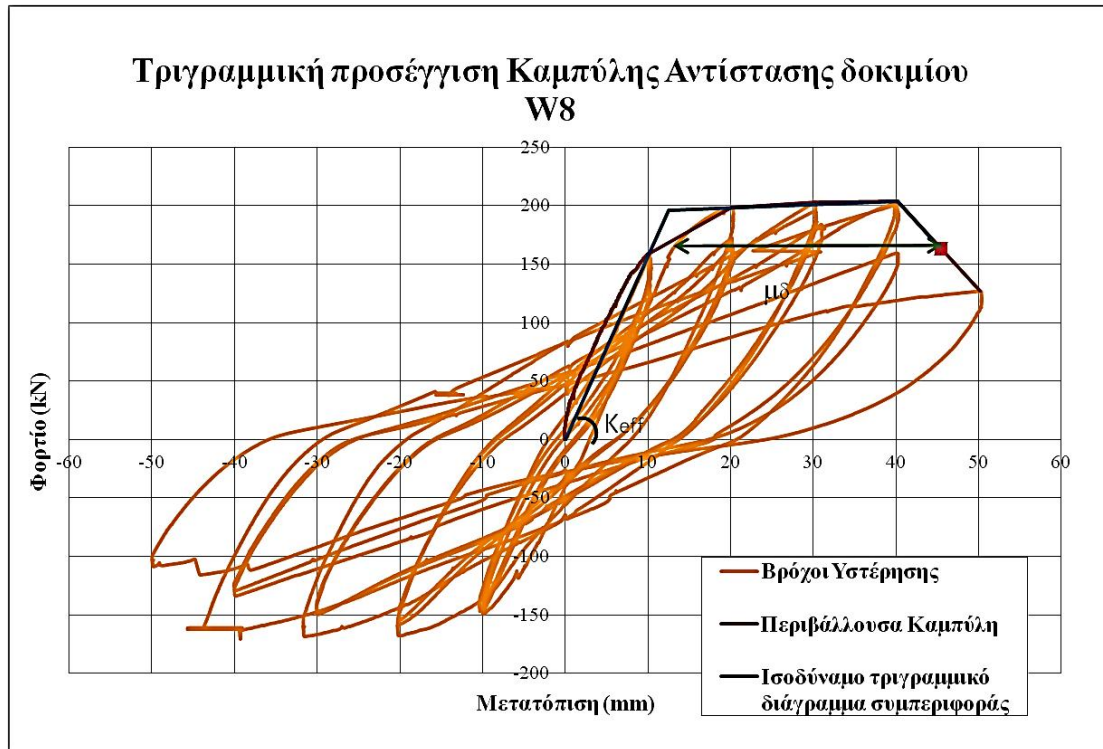
Α. Ο ορισμός που προτάθηκε από τον Park [1989] στηρίζεται σε ένα ισοδύναμο διγραμμικό μοντέλο. Σχεδιάζεται μία οριζόντια γραμμή στην περιβάλλουσα του διαγράμματος P-δ στη στάθμη του μέγιστου φορτίου και άλλη μία από την αρχή του διαγράμματος και του σημείου πάνω στην περιβάλλουσα όπου η δύναμη είναι ίση με το 75% της μέγιστης δύναμης. Το σημείο στο οποίο τέμνονται οι δύο γραμμές

ορίζεται ως σημείο διαρροής. Ως μετακίνηση στην αστοχία θεωρείται η μετακίνηση που αντιστοιχεί στον πρώτο κύκλο ή το σύνολο των κύκλων του ίδιου εύρους, η μέγιστη αντίσταση των οποίων έχει φτάσει το 80% της μέγιστης αντίστασης που σημειώθηκε στο πείραμα.



Διάγραμμα 7.32 Περιβάλλουσα βρόχων και διγραμμικοποίηση Περιβάλλουσας κατά Park

B. Το ισοδύναμο τριγραμμικό μοντέλο αποτελείται από τρεις κλάδους. Ο πρώτος αντιπροσωπεύει τον αρχικό ελαστικό. Ο δεύτερος συνδέει το σημείο διαρροής με το σημείο μέγιστης δύναμης. Η κλίση του είναι μικρότερη του πρώτου και προσδιορίζεται από την ευθεία που ενώνει το σημείο μέγιστης αντίστασης και το σημείο των βρόγχων όπου παρουσιάζεται πτώση της δυσκαμψίας μετά τη διαρροή. Το σημείο τομής του ελαστικού με τον κλάδο μειωμένης δυσκαμψίας δίνει τη μετατόπιση και το φορτίο διαρροής. Ο τρίτος κλάδος έχει φθίνουσα κλίση και συνδέει το σημείο της μέγιστης δύναμης με το σημείο που αντιστοιχεί στην αστοχία, το σημείο δηλαδή του βρόγχου σε προχωρημένους κύκλους που αντιστοιχεί σε πτώση της αντοχής κατά 20% σε σχέση με τη μέγιστη.



Διάγραμμα 7.33 Περιβάλλουσα βρόχων και τριγωνικοποίηση Περιβάλλουσας

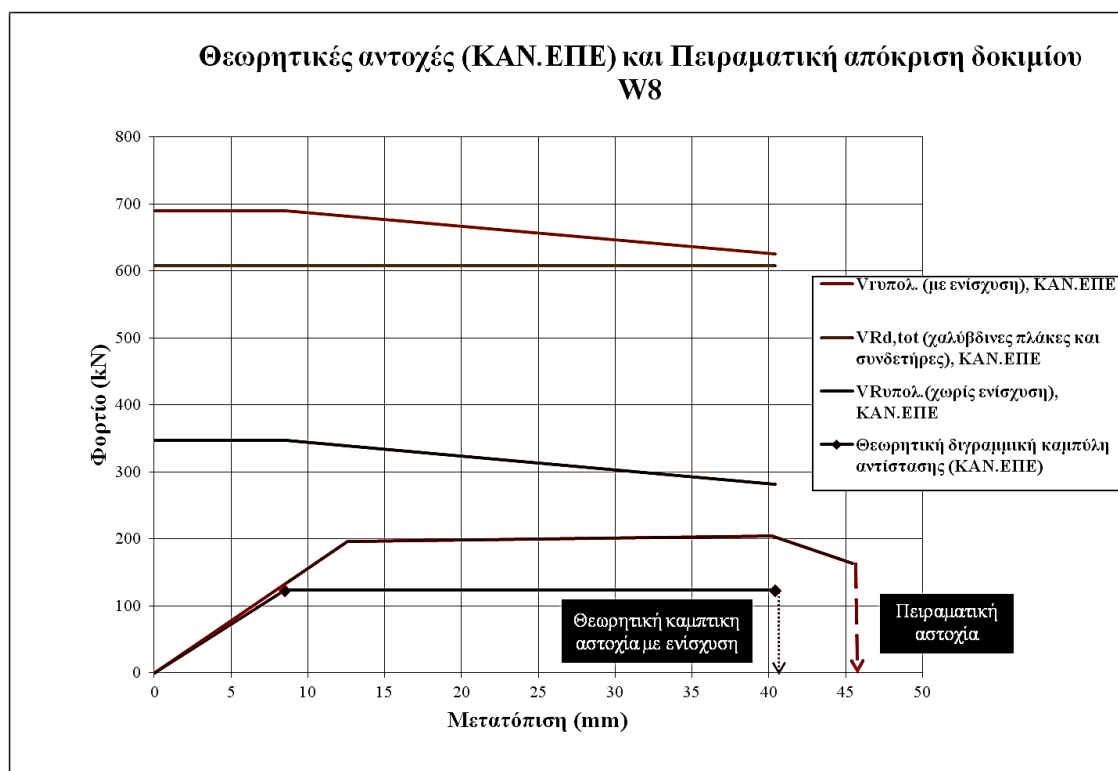
Στον Πίνακα 7.34 συγκεντρώνονται τα μεγέθη που εξάγονται από τους δύο τρόπους γραμμικοποίησης της περιβάλλουσας και τα αντίστοιχα θεωρητικά.

Πίνακας 7.34 Βασικά μεγέθη συμπεριφοράς για την πειραματική απόκριση και τους θεωρητικούς υπολογισμούς

| Μέγεθος | W8 | | | | |
|------------------|-------------|-----------|-----------|---------|-----------|
| | ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ | | ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ | | |
| | Park | Τριγωνικό | Αναλυτικά | ΚΑΝ.ΕΠΕ | Συμβατικά |
| P_y (kN) | 204 | 196 | 113 | 123 | 177 |
| P_u (kN) | 204 | 163 | 184 | 123 | 177 |
| δ_y (mm) | 12,80 | 12,56 | 8,85 | 8,60 | 12,90 |
| δ_u (mm) | 45,46 | 45,46 | 42,04 | 42,04 | 42,04 |
| μ_δ | 3,55 | 3,62 | 4,56 | 4,72 | 3,13 |
| K_{eff} (kN/m) | 15923 | 15641 | 12801 | 14738 | 13719 |

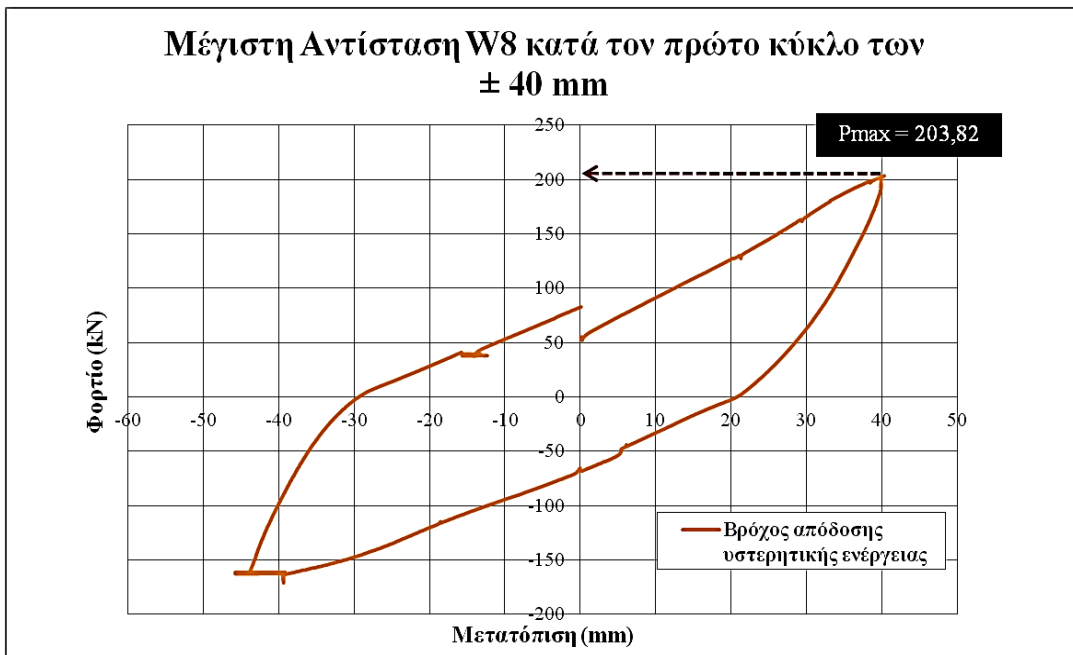
Η θεωρητικές τιμές της ενεργού δυσκαμψίας είναι μικρότερες από τις πειραματικές τιμές, ωστόσο η θεωρητική δυσκαμψία δεν είχε υπολογιστεί για το ενισχυμένο δοκίμιο. Η η παραμόρφωση διαρροής και αστοχίας προσαρμόζονται επίσης σε

ικανοποιητικό βαθμό στις αντίστοιχες τιμές που προβλέφθηκαν από τη Συμβατική αναλυτική προσέγγιση. Η πλαστιμότητα μετατοπίσεων πειραματικά προκύπτει απομειωμένη σε σχέση με τη θεωρητική ανάλυση, κάτι που υποδεικνύει ότι η προσθήκη της ενίσχυσης καταπόνησε έντονα την πλαστική περιοχή μέσω μεταβίβασης της έντασης στη βάση με αποτέλεσμα τη γρηγορότερη αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης. Η προσθήκη της ενίσχυσης δηλαδή δεν μετέβαλλε προς κάποια θετική κατεύθυνση την απόκριση του δοκιμίου με το να του προσδίδει υπεραντοχή σε τέμνουσα, όπως εξηγείται και στην Παράγραφο 7.4.3 όπου συγκρίνεται με το μη ενισχυμένο δοκίμιο W7. Στο παρακάτω διάγραμμα δίνονται οι θεωρητικές διατμητικές αντοχές και η καμπτική αντοχή όπως υπολογίζονται σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ., σε σύγκριση με την πειραματική τριγωνική καμπύλη αντίστασης.

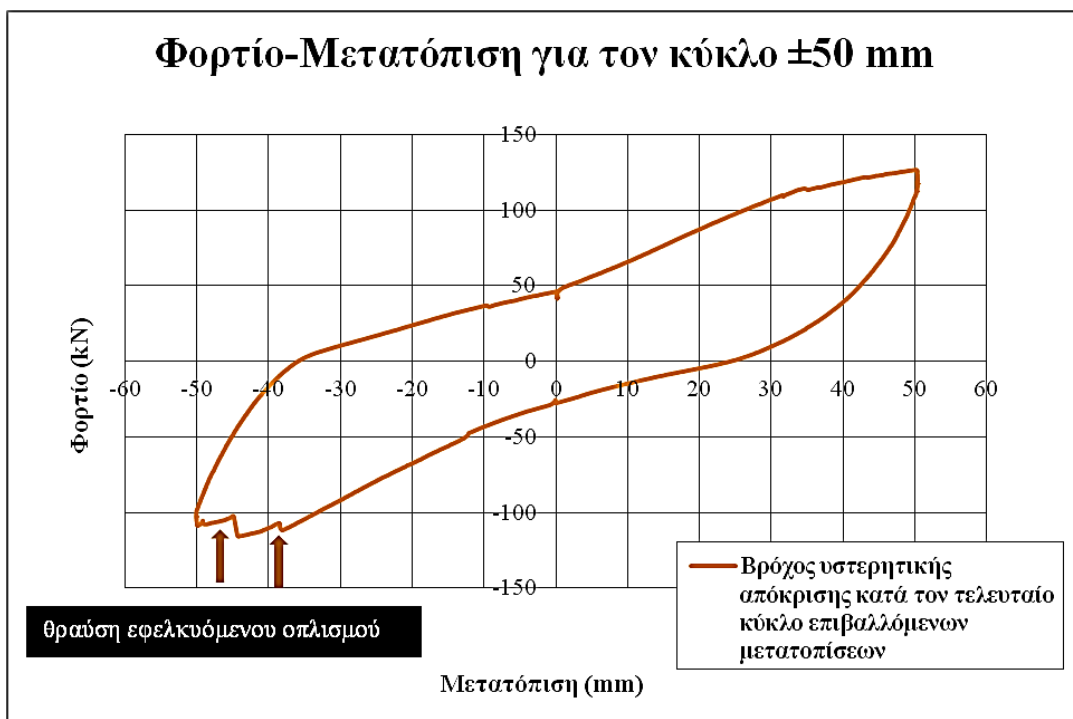


Διάγραμμα 7.35 θεωρητικές αντοχές δοκιμίου κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. και πειραματική συμπεριφορά

Τέλος, παρατίθενται τα Διαγράμματα 7.36 και 7.37, όπου απομονώνονται οι βρόχοι υστερητικής ενέργειας κατά τη μέγιστη αντίσταση και την αστοχία του δοκιμίου.



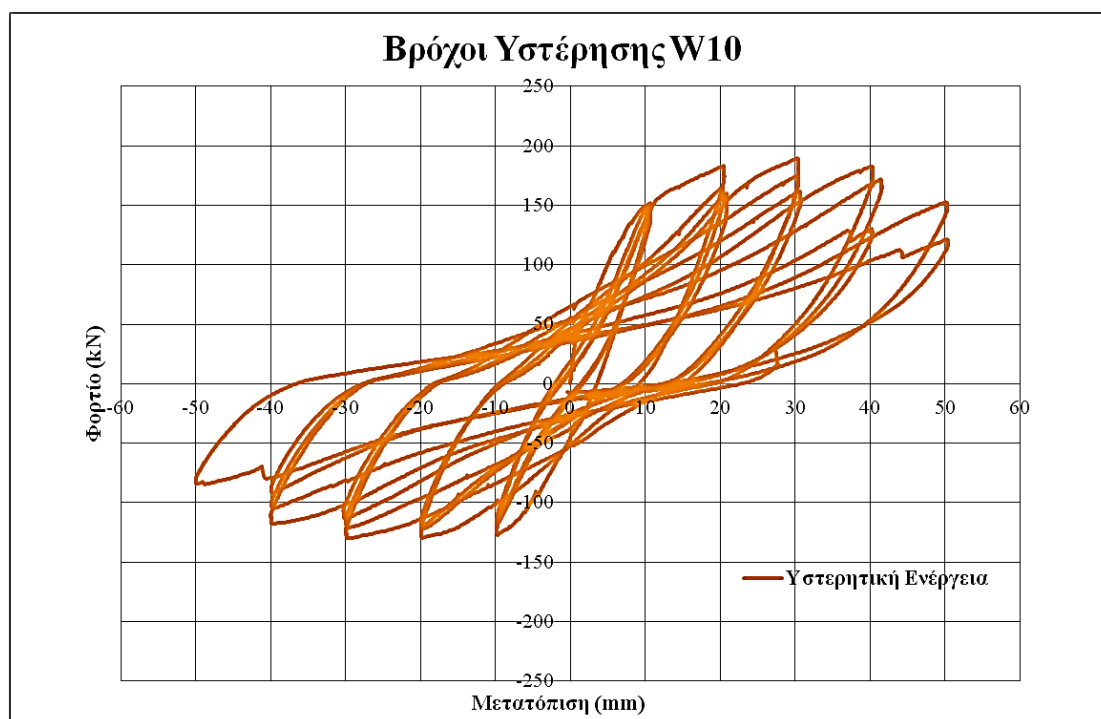
Διάγραμμα 7.36 Μέγιστη Αντίσταση δοκιμίου W8



Διάγραμμα 7.37 «Τσίμπημα» των βρόχων κατά τη θράυση του εφελκόμενου οπλισμού

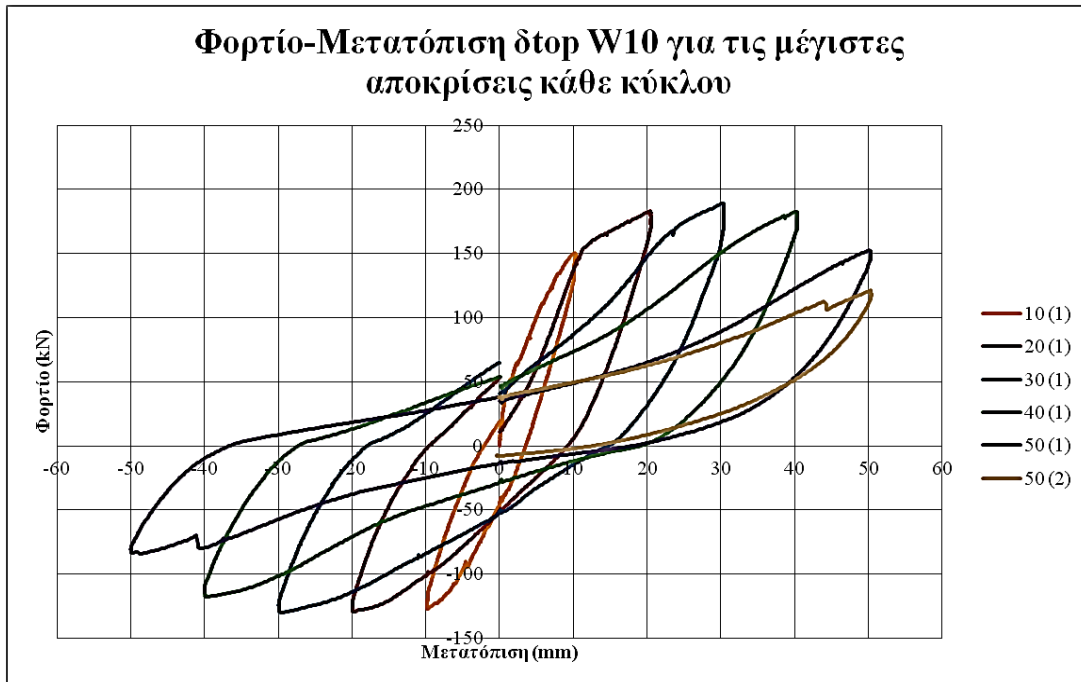
Δοκίμιο W10

Στο παρακάτω διάγραμμα των βρόχων υστέρησης του δοκιμίου φαίνεται πως το ενισχυμένο δοκίμιο επέδειξε καμπτική συμπεριφορά ως το τέλος του πειράματος, αφού σε κανέναν κύκλο δεν παρατηρήθηκε απότομη πτώση της δυσκαμψίας ή της αντίστασής του ούτε «τσιμπημα» των βρόχων. Το διάγραμμα δείχνει την μεταβολή του μέγιστου φορτίου για κάθε ομάδα κύκλων συναρτήσει της μετατόπισης. Οι μέγιστες αποκρίσεις σημειώθηκαν στους πρώτους από τους τρεις κύκλους των ± 20 , ± 30 , ± 40 και ± 50 mm, εκτός από τους κύκλους των ± 10 mm όπου το μέγιστο φορτίο σημειώθηκε στο δεύτερο κύκλο. Σε αυτούς τους κύκλους επίσης που καταγράφεται το μέγιστο φορτίο της ομάδας τους το εμβαδόν των βρόχων είναι επίσης το μέγιστο.

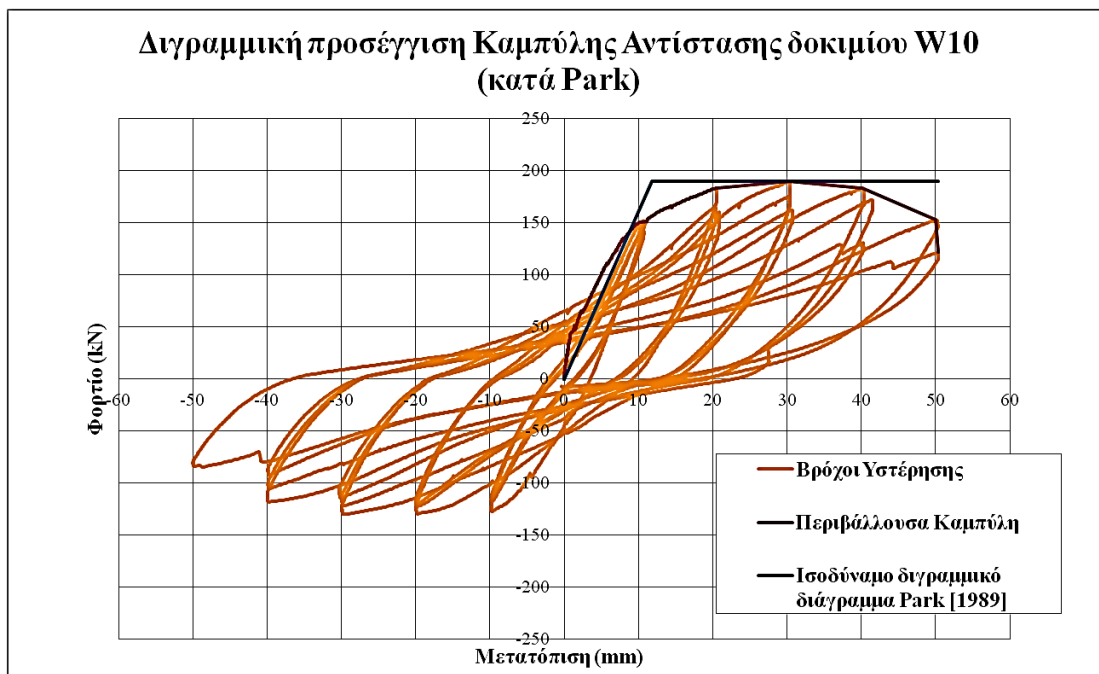


Διάγραμμα 7.38 Βρόχοι Υστερητικής Ενέργειας τοιχίου W10

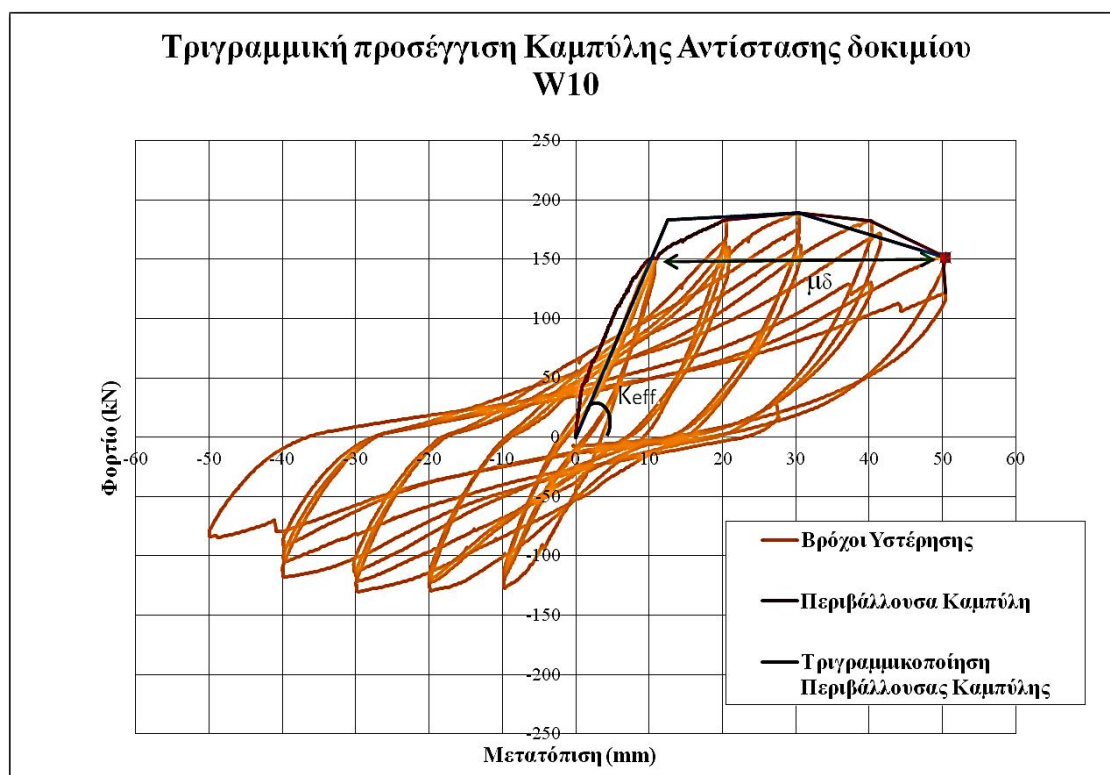
Με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε για το δοκίμιο W8 παραπάνω συντάχθηκαν και τα **Διαγράμματα 7.40, 7.41** γραμμικοποίησης της περιβάλλουσας καμπύλης.



Διάγραμμα 7.39 Μέγιστες αντιστάσεις κάθε κύκλου



Διάγραμμα 7.40 Περιβάλλουσα βρόχων και διγραμμικοποίηση Περιβάλλουσας κατά Park



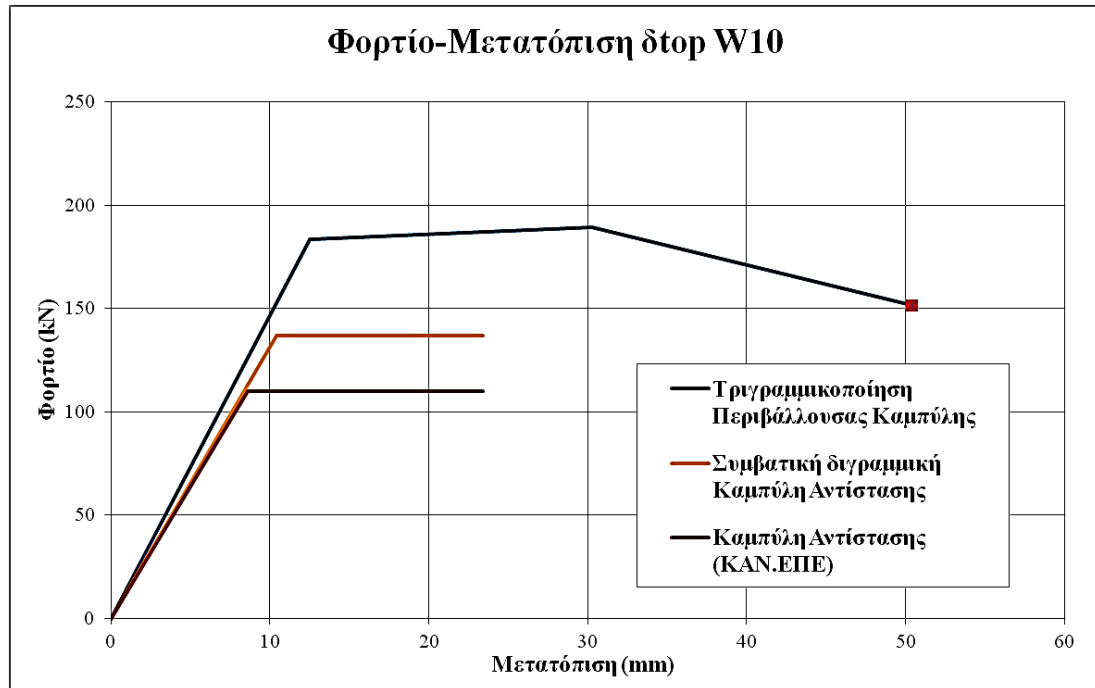
Διάγραμμα 7.41 Περιβάλλουσα βρόχων και τριγωνικοποίηση Περιβάλλουσας

Από τη διγραμμικοποίηση και τριγωνικοποίηση της περιβάλλουσας εξάγονται τα μεγέθη του Πίνακα 7.42, ώστε να είναι συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα θεωρητικά, αλλά και μεταξύ τους.

Πίνακας 7.42 Βασικά μεγέθη συμπεριφοράς για την πειραματική απόκριση και τους θεωρητικούς υπολογισμούς

| Μέγεθος | W10 | | | | |
|------------------|-------------|-----------|-----------|---------|-----------|
| | ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ | | ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ | | |
| | Park | Τριγωνικό | Αναλυτικά | ΚΑΝ.ΕΠΕ | Συμβατικά |
| P_y (kN) | 189 | 183 | 106 | 110 | 137 |
| P_u (kN) | 189 | 151 | 143 | 110 | 137 |
| δ_y (mm) | 11,87 | 12,50 | 8,80 | 8,60 | 10,80 |
| δ_u (mm) | 50,40 | 50,40 | 23,40 | 23,40 | 23,40 |
| μ_δ | 4,25 | 4,03 | 2,69 | 2,69 | 2,17 |
| K_{eff} (kN/m) | 15956 | 14700 | 12228 | 12976 | 12677 |

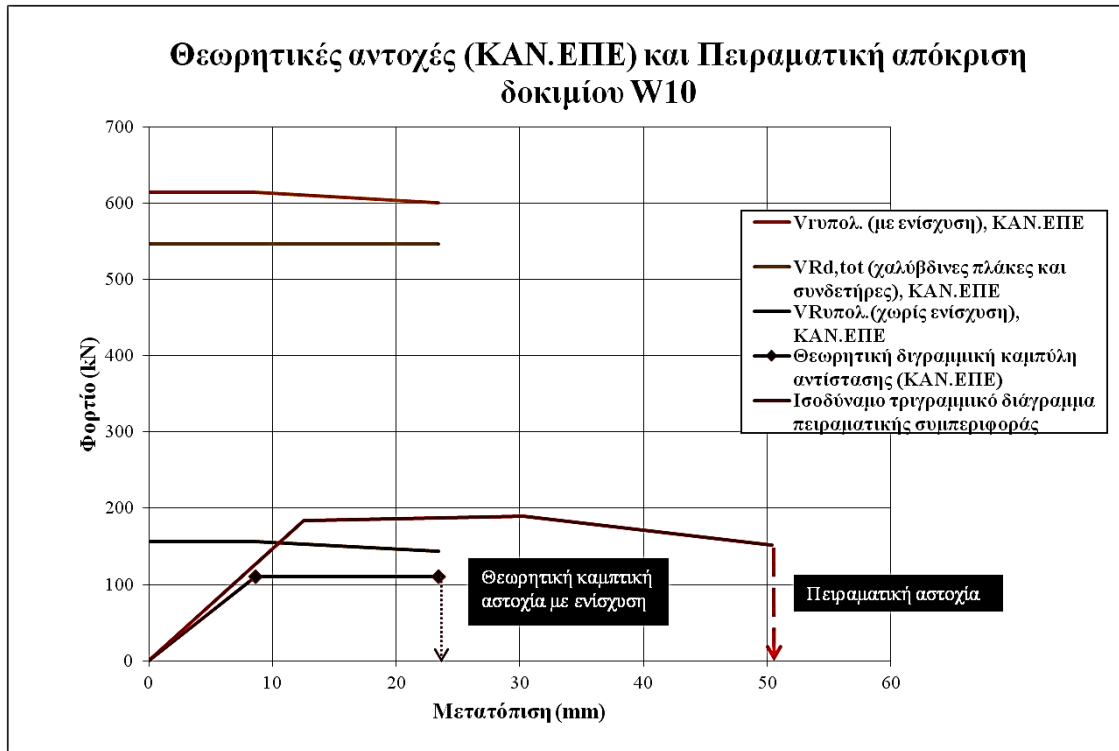
Η σύγκριση τόσο των θεωρητικών με τις πειραματικές τιμές στα επόμενα διαγράμματα, όσο και των δοκιμίων μεταξύ τους γίνεται με βάση το τριγραμμικό διάγραμμα συμπεριφοράς.



Διάγραμμα 7.43 Τριγραμμική Περιβάλλουσα βρόχων και Θεωρητική καμπτική αντοχή

Στο **Διάγραμμα 7.43** συγκρίνεται η πειραματική με την θεωρητική καμπτική αντοχή του δοκιμίου, υποθέτοντας ότι η ενίσχυση δε μετέβαλλε την καμπτική αντοχή του δοκιμίου τόσο σε επίπεδο υπολογισμών όσο και πειραματικά. Η αναντιστοιχία μεταξύ θεωρίας και πραγματικής απόκρισης είναι προφανής, ωστόσο σε καμία περίπτωση αυτό δεν είναι ένδειξη ότι είναι ανεπαρκή τα θεωρητικά εργαλεία, ειδικά σε επίπεδο σχεδιασμού.

Στο **Διάγραμμα 7.44** επίσης συγκρίνονται οι θεωρητικές αντοχές του ενισχυμένου και του μη ενισχυμένου δοκιμίου με την πειραματική καμπύλη αντίστασης του ενισχυμένου δοκιμίου (τα θεωρητικά διαγράμματα είναι κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ. μιας και σύμφωνα με αυτόν τον κανονισμό υπολογίστηκε η ενίσχυση). Στο διάγραμμα δείχνεται πώς η συμβολή της ενίσχυσης θα αυξήσει θεωρητικά τη συνολική διατμητική αντοχή του δοκιμίου, δίνοντας διατμητική υπεραντοχή και για καμπτική συμπεριφορά αυτή του πειράματος (και για μεγαλύτερη δηλαδή καμπτική αντοχή).



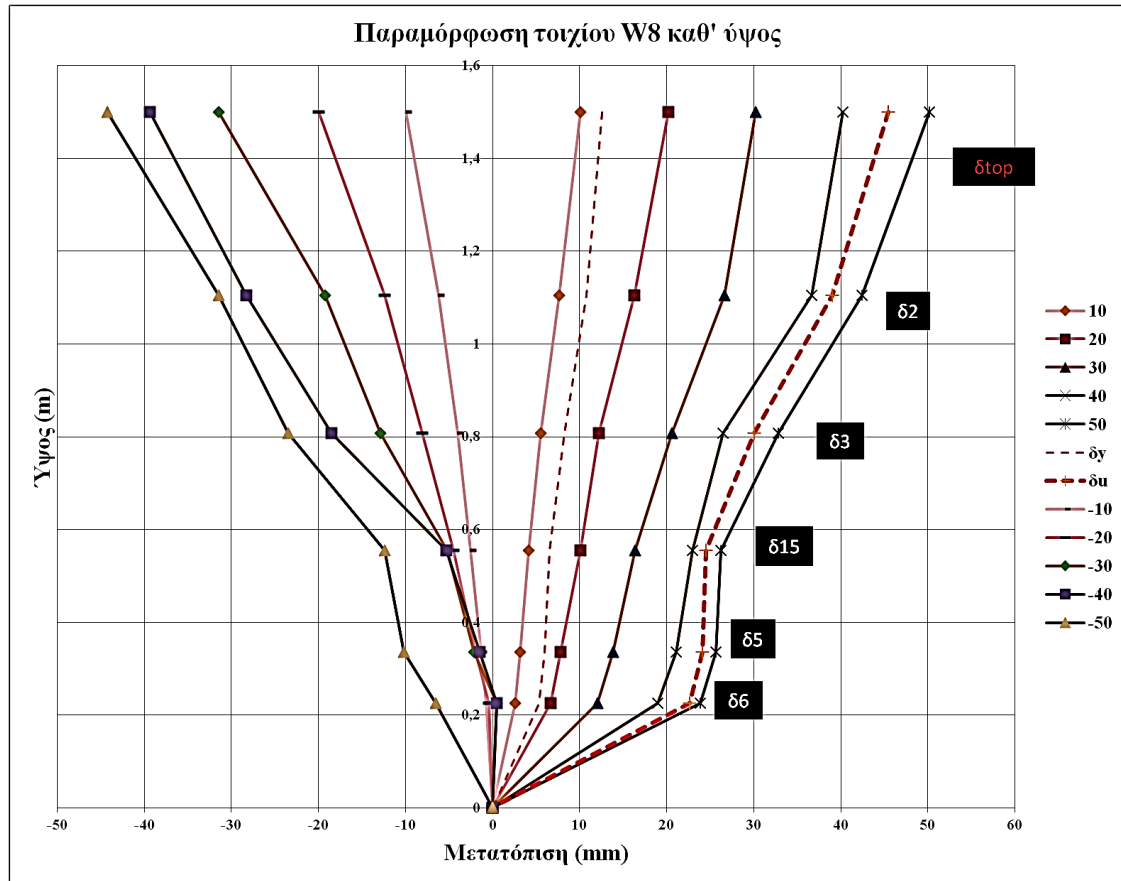
Διάγραμμα 7.44 Θεωρητικές αντοχές με και χωρίς την ενίσχυση και Πειραματική συμπεριφορά



Εικόνα 7.45 Γωνίες ρηγμάτωσης καθ' ύψος του δοκιμίου κατά τη θραύση εφελκόμενης ράβδου

7.4.3 Παραμορφωσιακή συμπεριφορά ενισχυμένων δοκιμίων

Δοκίμιο W8



Διάγραμμα 7.46 Παραμορφώσεις δοκιμίου καθ' ύψος για τις μέγιστες αποκρίσεις κάθε κύκλου

Πίνακας 7.47 Παραμορφώσεις βελομέτρων καθ' ύψος για θετικές μετατοπίσεις

| Βελόμετρο | H (m) | Θετικές μετατοπίσεις (mm) | | | | | | |
|------------------|-------|---------------------------|---------------|---------------|---------------|--------|---------------|---------------|
| | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | δγ | δu |
| 1 (top) | 1,5 | 10,05 | 20,16 | 30,19 | 40,21 | 50,15 | 12,56 | 45,46 |
| 2 | 1,105 | 7,63 | 16,32 | 26,62 | 36,65 | 42,43 | 10,81 | 38,98 |
| 3 | 0,808 | 5,55 | 12,19 | 20,55 | 26,49 | 32,78 | 8,27 | 30,03 |
| 15 | 0,555 | 4,10 | 10,05 | 16,34 | 22,93 | 26,22 | 6,58 | 24,47 |
| 5 | 0,335 | 3,18 | 7,82 | 13,85 | 21,08 | 25,63 | 5,95 | 24,07 |
| 6 | 0,225 | 2,58 | 6,66 | 12,03 | 18,98 | 23,88 | 5,29 | 22,67 |
| άνω παρειά βάσης | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Pmax (kN) | | 159,70 | 198,74 | 203,24 | 203,82 | 126,89 | 196,44 | 163,06 |

Πίνακας 7.48 Παραμορφώσεις βελομέτρων καθ' ύψος για αρνητικές μετατοπίσεις

| Βελόμετρο | H (m) | Αρνητικές μετατοπίσεις (mm) | | | | | | |
|---------------------|-------|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|----|----|
| | | -10 | -20 | -30 | -40 | -50 | δy | δu |
| 1 (top) | 1,5 | -9,95 | -19,96 | -31,50 | -39,34 | -44,23 | - | - |
| 2 | 1,105 | -6,22 | -12,41 | -19,26 | -28,25 | -31,45 | - | - |
| 3 | 0,808 | -3,98 | -8,09 | -12,87 | -18,51 | -23,45 | - | - |
| 15 | 0,555 | -2,51 | -4,48 | -5,25 | -5,32 | -12,41 | - | - |
| 5 | 0,335 | -1,34 | -1,98 | -2,12 | -1,47 | -10,19 | - | - |
| 6 | 0,225 | -0,78 | -0,45 | 0,45 | 0,47 | -6,54 | - | - |
| άνω παρειά βάσης | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - | - |
| Pmax (kN) | | -149,49 | -167,88 | -168,73 | -170,75 | -115,69 | - | - |

Στο **Διάγραμμα 7.46** απεικονίζεται η μορφή της παραμόρφωσης του δοκιμίου καθ' ύψος, από τις τιμές των βελομέτρων σε έξι στάθμες. Αποτυπώνεται η παραμορφωσιακή κατάσταση και κατά την υπολογισμένη πειραματική διαρροή και αστοχία. Για τη διαρροή η παραμόρφωση καθ' ύψος είναι σχεδόν ελαστική. Παρατηρείται επίσης όσο προχωράνε οι κύκλοι συγκέντρωση μεγάλων παραμορφώσεων στο πλαστικό μήκος (σε ύψος 0,335m), που όπως εξηγείται και παραπάνω οφείλεται στη σχεδόν απευθείας μεταβίβαση των θλιπτικών τάσεων στη βάση.

Κατά τη διαδικασία που περιγράφηκε στην Παράγραφο **5.3.3**, εκτιμάται η καμπυλότητα διαρροής, οι καμπτικές και διατμητικές παραμορφώσεις.

Για $\delta_{top} = \delta_{y,exp.} = 12,56\text{mm}$:

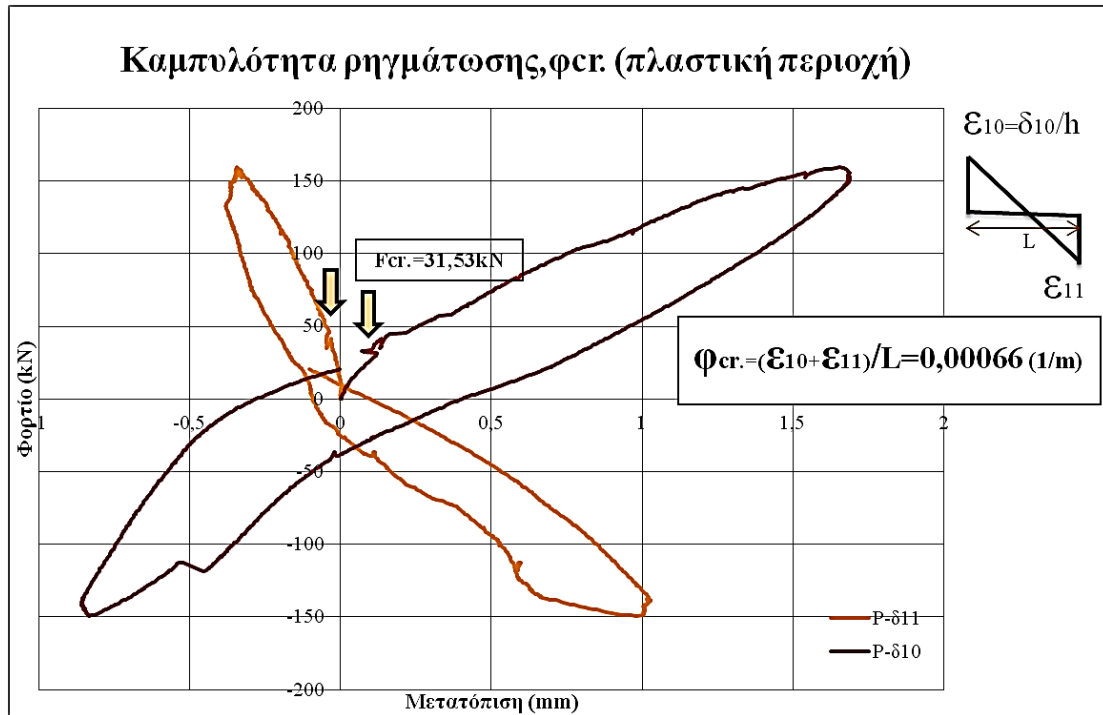
$\theta_5 = 0,0039$, $\delta_{10} = 1,88\text{mm}$, $\delta_{11} = 0,649\text{mm}$, $L = 0,650\text{mm}$, $\delta_{12} = 1,462\text{mm}$, $\delta_{13} = -0,342\text{mm}$, $\delta_{12οριζ.} = 1,600\text{mm}$, $\delta_{13οριζ.} = 0,375\text{mm}$, $l_w = 0,75\text{mm}$, $h_5 = 335\text{mm}$, $\alpha = 0,52$

$$\text{Απο (1), (2), (3)} \rightarrow 0,0039 = \int_0^{h_5} \varphi(x) dx \rightarrow \varphi_{y(W8)} = 0,013\text{m}^{-1}$$

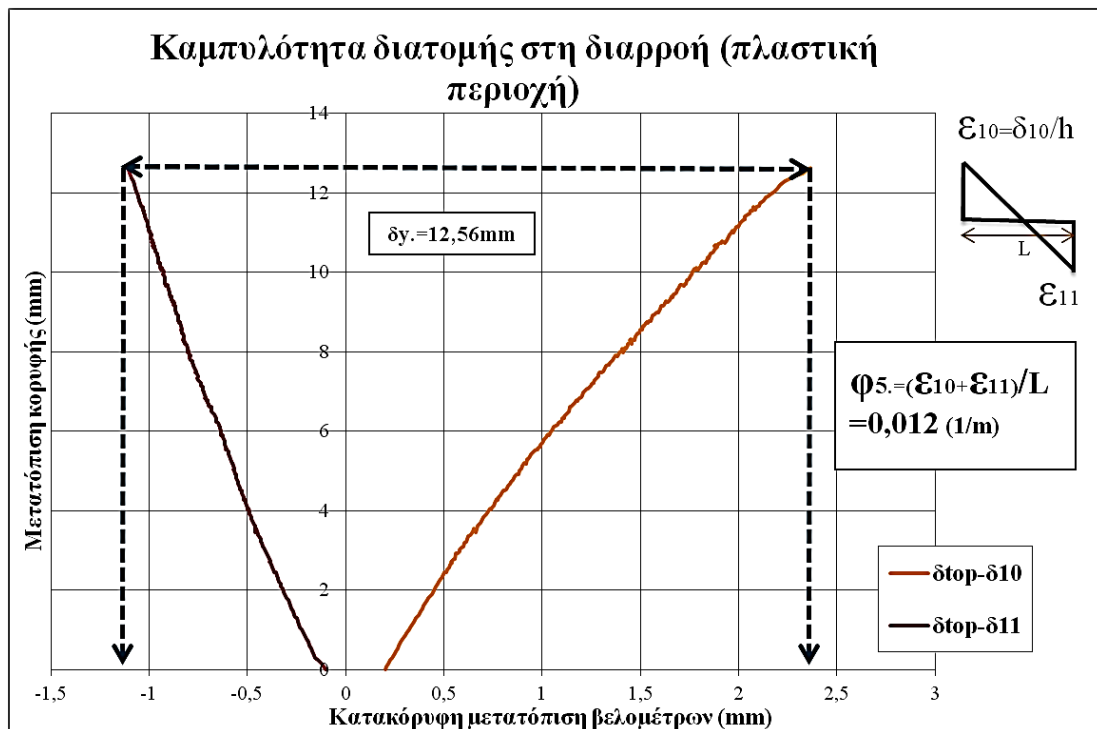
$$(4) \rightarrow \delta_{5,fl.+sl.(W8)} = 0,52\theta_5 h_5 = 0,679\text{mm} < \delta_{5,fl.+sl.(W7)}$$

$$(6) \rightarrow \delta_{shear,m.,exp.(W8)} = 0,322\text{mm} > \delta_{shear,m.,exp.(W7)}$$

Από το παρακάτω **Διάγραμμα 7.49** φαίνεται ότι η πρώτη ρηγμάτωση του δοκιμίου στην περιοχή της βάσης συμβαίνει αρκετά νωρίς, και για μικρό φορτίο, καθώς ήδη από την αρχή της διαδικασίας φόρτισης η μεταβίβαση του φορτίου γίνεται στην πιο «αδύναμη» περιοχή, προσπερνώντας τους αρκετά ισχυρότερους μηχανισμούς που δημιουργούνται στην ενισχυμένη ζώνη.



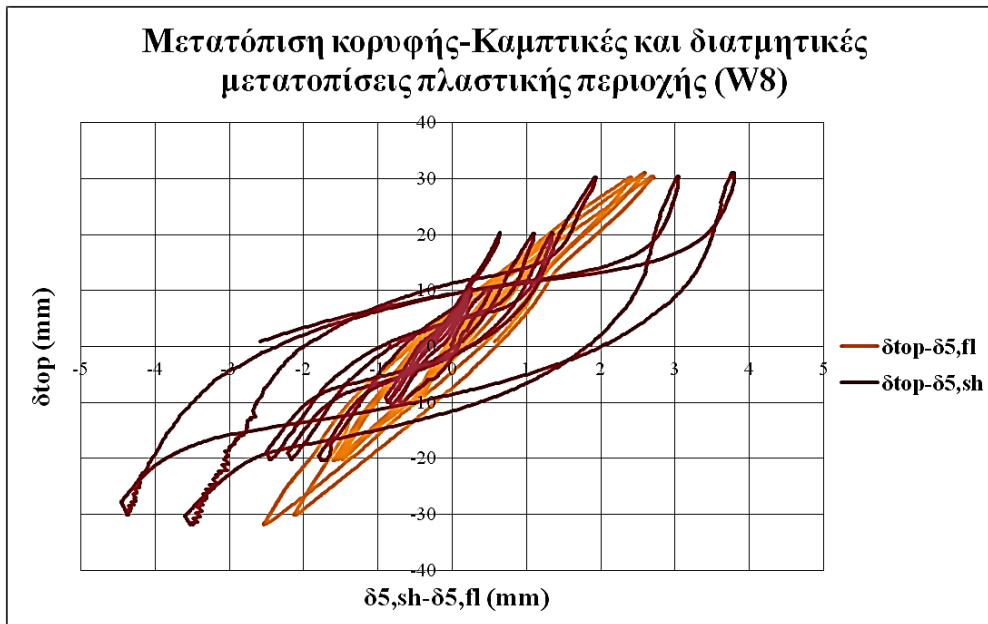
Διάγραμμα 7.49 Καμπυλότητα ρηγμάτωσης στην πλαστική περιοχή (W8)



Διάγραμμα 7.50 Μέτρηση καμπυλότητας στην πλαστική περιοχή (στάθμη h5) κατά τη διαρροή (W8)

Απο το **Διάγραμμα 7.50** παρατηρείται ότι η καμπυλότητα είναι περίπου σταθερή από τη βάση ως το πλαστικό μήκος ($\phi_y \approx \phi_5$). Αυτό οφείλεται στη μετάθεση των εφελκυστικών τάσεων σε διατομές με μικρότερη ροπή καθώς η διαρροή του

εφελκόμενου οπλισμού επεκτείνεται στο τμήμα του μήκους από την ακραία διατομή μέχρι το σημείο όπου η πρώτη διαγώνια ρωγμή από το άκρο του μέλους συναντά τον εφελκόμενο οπλισμό. Οι Beyer et al. αναφέρουν ότι όταν οι παραμορφώσεις συγκεντρώνονται στη βάση, όπως συνέβη λόγω ενίσχυσης στο δοκίμιο W8 ο συντελεστής α των καμπτικών παραμορφώσεων τείνει στη μονάδα, ενώ για σταθερή καμπυλότητα καθ' ύψος ο συντελεστής λαμβάνεται ίσος με 0,5. Έτσι αν η στροφή ήταν μετρημένη στην κορυφή οι καμπτικές παραμορφώσεις θα ήταν $\theta_{top} \cdot L_V$.

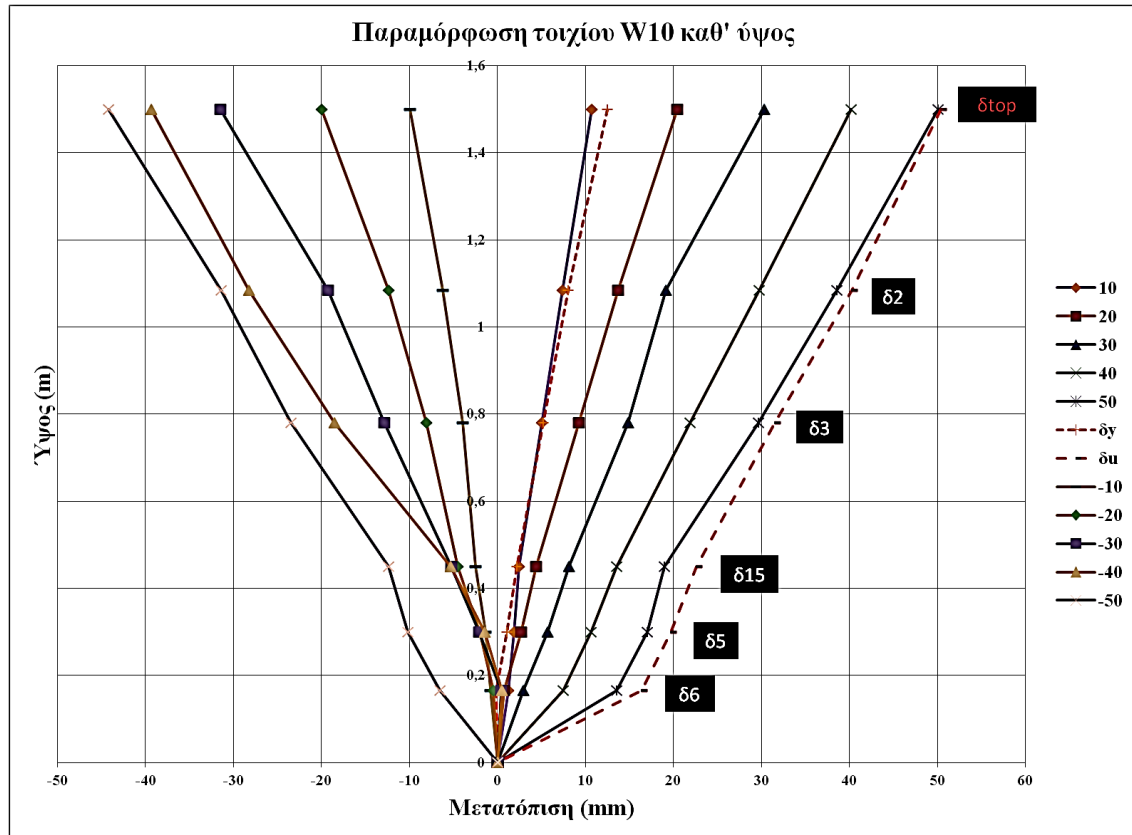


Διάγραμμα 7.51 Μετατόπιση κορυφής και καμπτικές, διατμητικές μετατοπίσεις στο πλαστικό τμήμα της βάσης



Διάγραμμα 7.52 Γωνία στροφής χορδής (drift) και καμπτική στροφή στην πλαστική ζώνη

Δοκίμιο W10



Διάγραμμα 7.53 Παραμορφώσεις δοκιμίου καθ' ύψος για τις μέγιστες αποκρίσεις κάθε κύκλου

Πίνακας 7.54 Παραμορφώσεις βελομέτρων καθ' ύψος για θετικές μετατοπίσεις

| Βελόμετρο | H (m) | θετικές μετατοπίσεις (mm) | | | | | | |
|------------------|-------|---------------------------|--------|---------------|--------|--------|---------------|---------------|
| | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | δγ | δu |
| 1 (top) | 1,5 | 10,68 | 20,46 | 30,28 | 40,16 | 50,04 | 12,50 | 50,40 |
| 2 | 1,085 | 7,39 | 13,73 | 19,12 | 29,71 | 38,53 | 8,05 | 40,27 |
| 3 | 0,78 | 5,06 | 9,27 | 14,86 | 21,87 | 29,66 | 5,18 | 31,55 |
| 15 | 0,45 | 2,47 | 4,43 | 8,08 | 13,50 | 18,99 | 2,18 | 22,64 |
| 5 | 0,3 | 1,91 | 2,69 | 5,71 | 10,61 | 17,04 | 1,11 | 19,70 |
| 6 | 0,165 | 1,21 | 0,73 | 2,94 | 7,43 | 13,51 | -0,16 | 16,39 |
| άνω παρειά βάσης | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| P (kN) | | 152,06 | 183,20 | 189,34 | 182,69 | 152,54 | 183,40 | 151,47 |

Η παραμόρφωση του ενισχυμένου τοιχίου είναι ομαλή καθ' ύψος και ελεγχόμενη, κατ'αντιστοιχία με τον περιορισμό της ρηγμάτωσης που επιτυγχάνεται με τις λάμες.

Πίνακας 7.55 Παραμορφώσεις βελομέτρων καθ' ύψος για αρνητικές μετατοπίσεις

| Βελόμετρο | H (m) | Αρνητικές μετατοπίσεις (mm) | | | | | | δy | δu |
|------------------|-------|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---|----|----|
| | | -10 | -20 | -30 | -40 | -50 | | | |
| 1 (top) | 1,5 | -9,95 | -19,96 | -31,50 | -39,34 | -44,23 | - | - | |
| 2 | 1,085 | -6,22 | -12,41 | -19,26 | -28,25 | -31,45 | - | - | |
| 3 | 0,78 | -3,98 | -8,09 | -12,87 | -18,51 | -23,45 | - | - | |
| 15 | 0,45 | -2,51 | -4,48 | -5,25 | -5,32 | -12,41 | - | - | |
| 5 | 0,3 | -1,34 | -1,98 | -2,12 | -1,47 | -10,19 | - | - | |
| 6 | 0,165 | -0,78 | -0,45 | 0,45 | 0,47 | -6,54 | - | - | |
| άνω παρειά βάσης | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - | - | |
| P (kN) | | -149,49 | -167,88 | -168,73 | -170,75 | -115,69 | - | - | |

Στην πλαστική περιοχή (βελόμετρα δ6, δ5, δ15) για αρνητικές μετατοπίσεις στους κύκλους των ± 20 , ± 30 και ± 40 mm, το πιθανό άνοιγμα ρωγμών κατά τους αντίστοιχους θετικούς κύκλους δεν επέτρεψε στα βελόμετρα (άρα και στην πλαστική ζώνη) να ακολουθήσουν την αλλαγή φοράς της φόρτισης.

Η πορεία που ακολουθείται και για αυτό το δοκίμιο για τον προσδιορισμό των διατμητικών και καμπτικών παραμορφώσεων στη διαρροή είναι η ίδια με αυτή της Παραγράφου 5.3.3.

Για $\delta_{top} = \delta_{y,exp.} = 12,50$ mm:

$\theta_5 = 0,0053$, $\delta_{10} = 0,527$ mm, $\delta_{11} = 2,923$ mm, $L = 0,650$ mm, $\delta_{12} = 1,841$ mm, $\delta_{13} = -0,393$ mm, $\delta_{12,οριζ.} = 1,983$ mm, $\delta_{13,οριζ.} = -0,424$ mm $l_w = 0,75$ mm, $h_5 = 300$ mm, $\alpha = 0,52$

Απο (1), (2), (3) $\rightarrow 0,0039 = \int_0^{h_5} \varphi(x) dx \rightarrow \varphi_{y(W10)} = 0,013m^{-1}$

(4) $\rightarrow \delta_{5,fl.+sl.(W10)} = 0,52\theta_5 h_5 = 0,827$ mm $\gg \delta_{5,fl.+sl.(W9)}$

(6) $\rightarrow \delta_{shear,m.,exp.(W10)} = 0,376$ mm $\ll \delta_{shear,m.,exp.(W9)}$

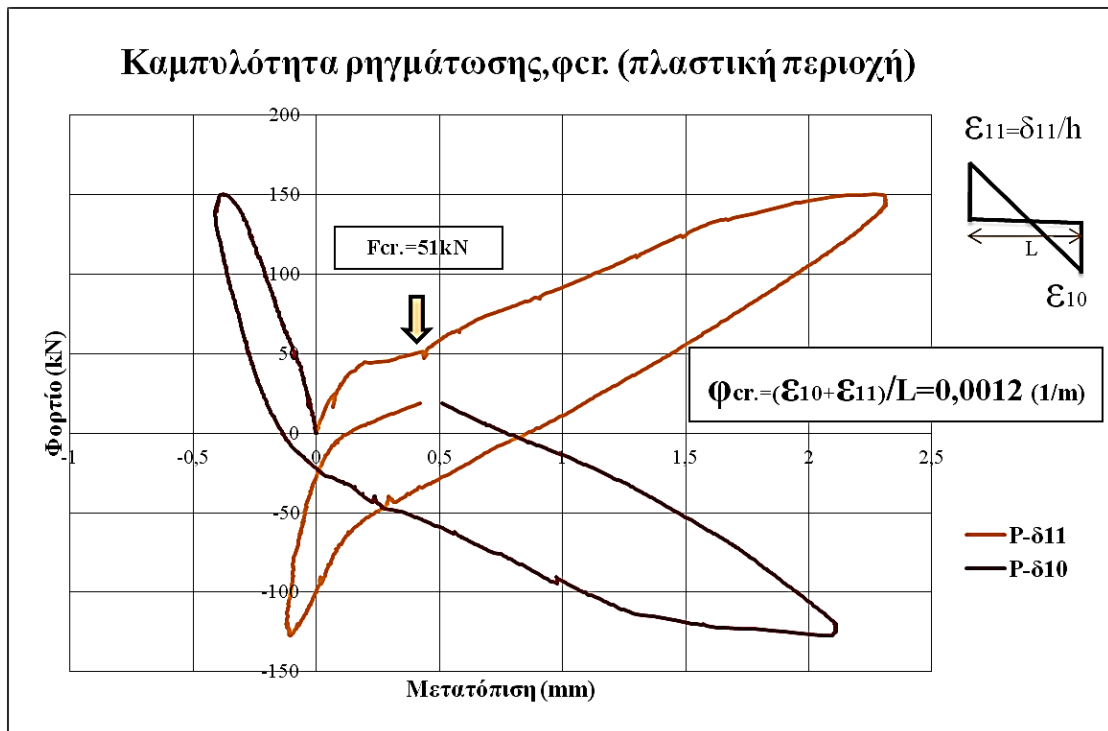
Στο ενισχυμένο δοκίμιο παρατηρήθηκε όπως αναφέρθηκε παραπάνω σημαντικός περιορισμός ρηγμάτωσης και παραμορφώσεων στα άνω 2/3 του μήκους διάτμησης, αλλά και στο πλαστικό μήκος, σε σύγκριση με το δοκίμιο W9. Αυτό φάνηκε και από τις καταγραφές των διαγωνίων στο άνω τμήμα οι οποίες ήταν της τάξης του ενός χιλιοστού ακόμα και για μεγάλους κύκλους.

Κατά συνέπεια, μπορούμε χωρίς σημαντικό σφάλμα να υποθέσουμε ότι οι διατμητικές παραμορφώσεις στο ύψος h_5 ήταν και οι συνολικές. Συγκρίνοντας λοιπόν την παραπάνω τιμή 0,376mm με αυτή που δίνει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. στη διαρροή (0,39mm) προκύπτει ικανοποιητική σύγκλιση. Αυτό εξηγείται και επειδή το ενισχυμένο δοκίμιο

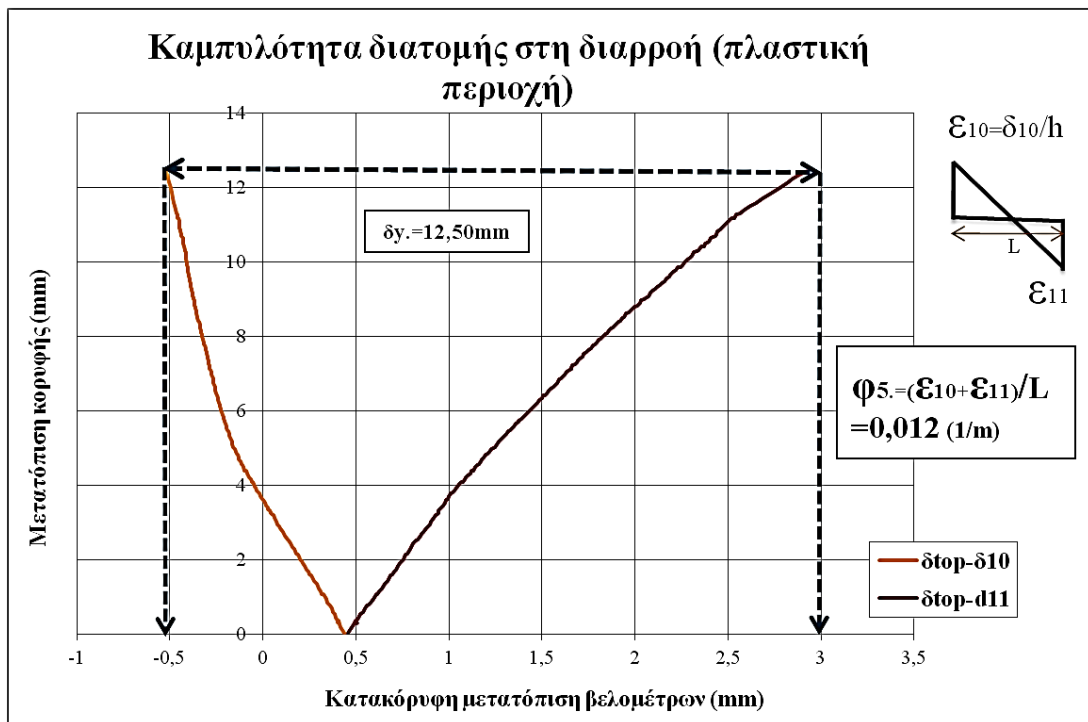
επέδειξε καθαρά καμπτική συμπεριφορά, και οι σχέσεις των Κανονισμών έχουν εξαχθεί με βάση καμπτικά δοκίμια.



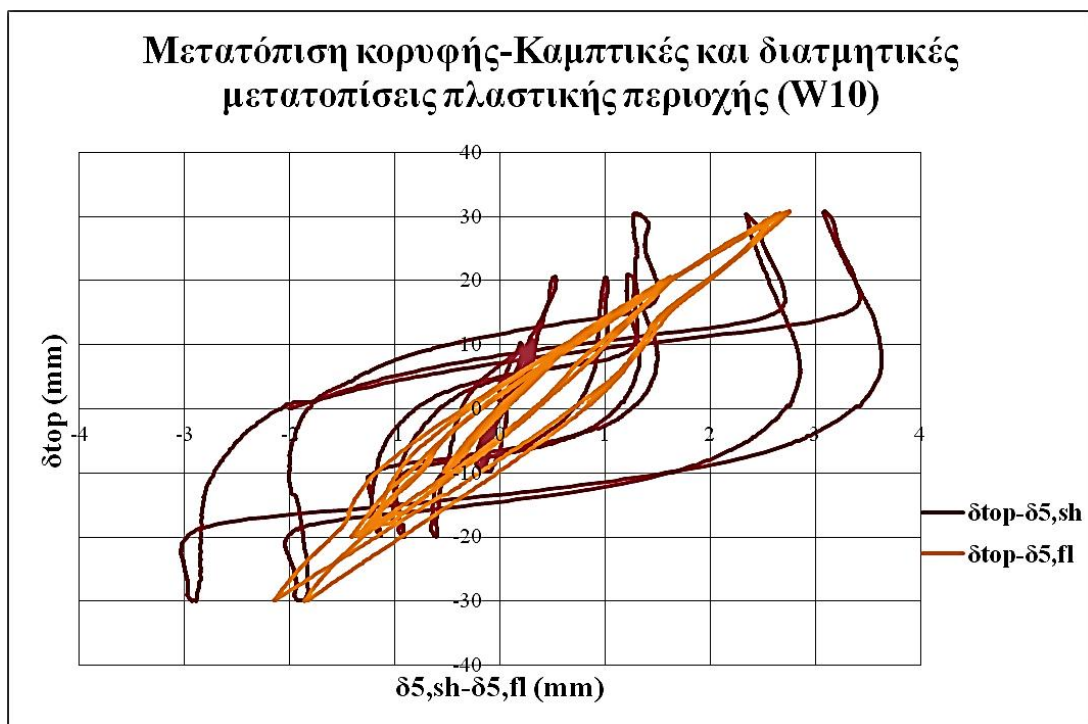
Διάγραμμα 7.56 Παραμορφώσεις διαγωνίων πάνω και κάτω τμήματος δσυναρτήσει του φορτίου (W10)



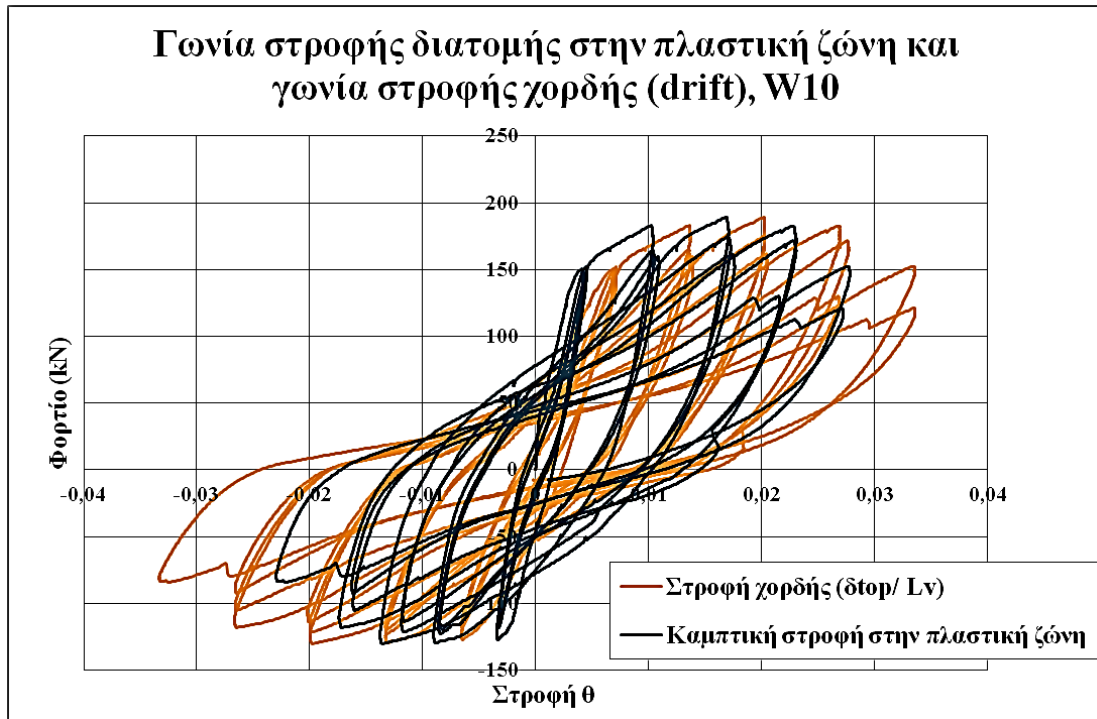
Διάγραμμα 7.57 Εντοπισμός πρώτης ρηγμάτωσης και μέτρηση καμπυλότητας στη διατομή



Διάγραμμα 7.58 Μέτρηση καμυλότητας διατομής κατά την πειραματική διαρροή



Διάγραμμα 7.59 Μετατόπιση κορυφής και καμπτικές-διατμητικές μετατοπίσεις στο πλαστικό τμήμα της βάσης



Διάγραμμα 7.60 Γωνία στροφής χορδής (drift) και καμπτική στροφή στην πλαστική ζώνη

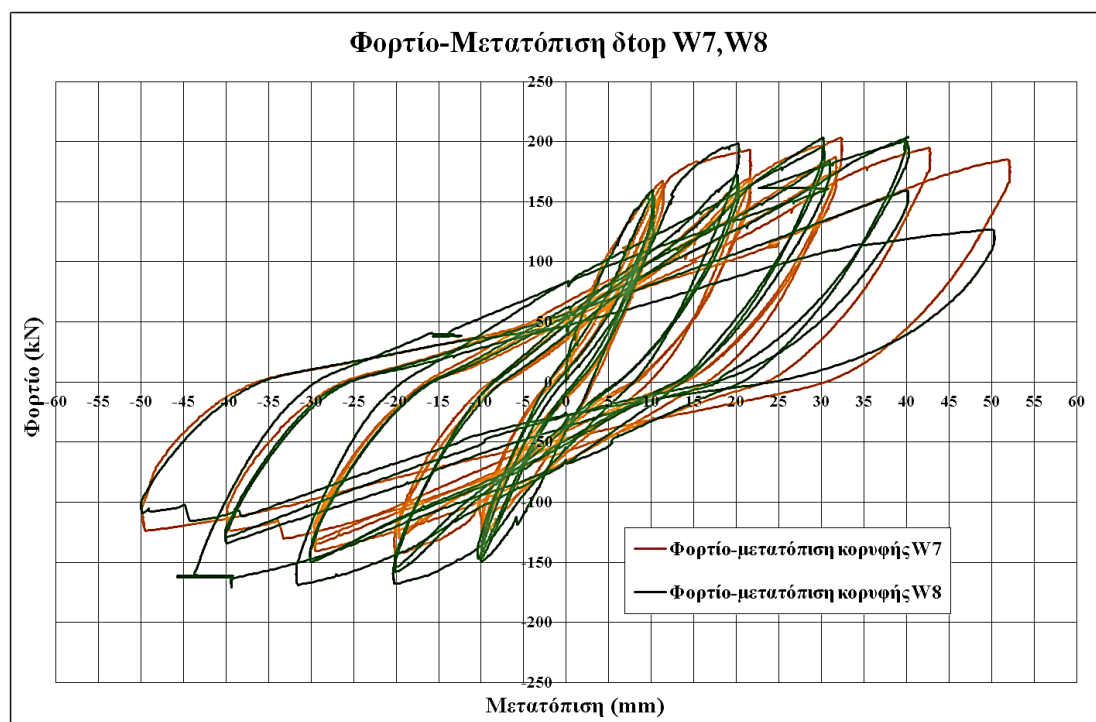
Στο **Διάγραμμα 7.60** επίσης παρατηρείται ότι η συνολική μετατόπιση κορυφής (λόγω κάμψης, διάτμησης, ολίσθησης) συνίσταται περισσότερο από την καμπτική παραμόρφωση της πλαστικής περιοχής και λιγότερο από τους άλλους μηχανισμούς. (βλέπε και **Διάγραμμα 7.52** όπου φαίνεται ότι η καμπτική στροφή ακόμα και του «πολύ καμπτικού» δοκιμίου W8 δεν είναι τόσο επικρατούσα όσο είναι στο δοκίμιο W10). Η καμπτική στροφή στην πλαστική ζώνη κατά την αστοχία του δοκιμίου W8 είναι $\theta_{u\pi}=0,023$ ενώ του δοκιμίου W10 είναι $\theta_{u\pi}=0,027$. Περαιτέρω συγκρίσεις γίνονται στην αμέσως επόμενη Παράγραφο **7.4.4**.

7.4.4 Σύγκριση ενισχυμένων και μη ενισχυμένων δοκιμίων

W7-W8

Τα τοιχία όντας κατασκευασμένα με ειδικές λεπτομέρειες όπλισης ώστε να ικανοποιούν τον ικανοτικό σχεδιασμό σε τέμνουσα δεν χρειάζεται θεωρητικά να ενισχυθούν. Ωστόσο το δοκίμιο W8 ενισχύθηκε για να διαπιστωθεί αν τεχνικά είναι πρόσφορη η δοκιμαζόμενη μέθοδος ενίσχυσης (δοκίμιο αναφοράς).

Στο παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνονται οι υστερητικοί βρόχοι των δυο δοκιμίων.



Διάγραμμα 7.61 Υστερητική απόκριση ενισχυμένου (W8) και μη ενισχυμένου (W7) δοκιμίου

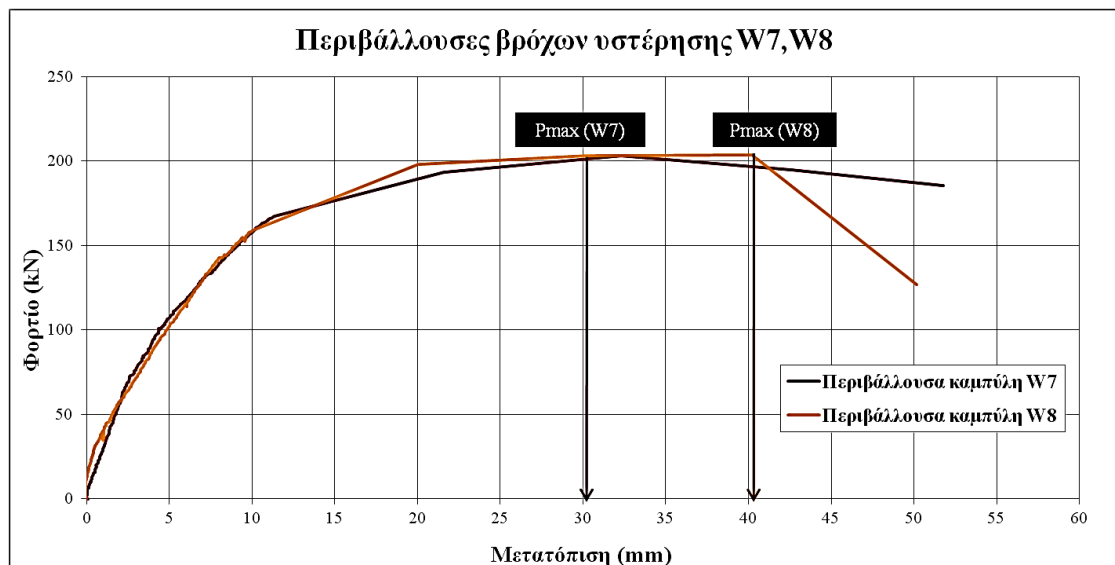
Το ενισχυμένο δοκίμιο επέδειξε μεγαλύτερη αρχική δυσκαμψία καθώς και ταχύτερη απομείωση της στους κύκλους των $\pm 10\text{mm}$, μικρότερη πλαστικότητα μετακινήσεων και μικρότερο φορτίο αστοχίας σε σχέση με το μη ενισχυμένο. Η αναπτυχθείσα πλαστικότητα και το φορτίο αστοχίας προέκυψαν μικρότερα ίσως επειδή το δοκίμιο W7 υποβλήθηκε σε μετατοπίσεις $\pm 40\text{mm}$ μόνο μια φορά αντί τριών που υποβλήθηκε το W8. Έτσι η «ψαθυρότερη» απόκριση του ενισχυμένου δοκιμίου με την πιο

απότομη πτώση του φορτίου κατά τον τρίτο κύκλο των ± 40 δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί.

Ωστόσο το δοκίμιο W8 ανέλαβε τρεις φορές τιμές φορτίου κοντά στην μέγιστη αντίστασή του (200kN) ήδη από τους κύκλους των ± 20 mm και ως τους κύκλους των ± 40 mm ενώ το δοκίμιο W7 έφτασε αυτή την τιμή μόνο μια φορά.

Η ανάληψη μεγάλου φορτίου σε μετατοπίσεις των ± 20 mm, ± 30 mm και ± 40 mm οδήγησε στην γρηγορότερη και εντονότερη ρηγματώσή του τοιχίου W8 στην περιοχή της βάσης όπου και συγκεντρώθηκε η ένταση, καθώς και στην εξασθένηση της αντίστασης των ακραίων διαμήκων ράβδων οι οποίες από τους κύκλους των ± 20 mm ανέλαβαν μεγάλο θλιπτικό φορτίο με συνέπεια το λυγισμό και την τελική θράυση τους σε εφελκυσμό.

Ένα ακόμα στοιχείο παρατήρησης είναι ότι κατά τους αρνητικούς κύκλους το ενισχυμένο δοκίμιο ανέλαβε μεγαλύτερο φορτίο από το μη ενισχυμένο. Η καμπτική αντίσταση των δύο δοκιμίων είναι ίδια, ωστόσο παρουσιάζεται σε διαφορετικούς κύκλους και συχνότητα, όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα.

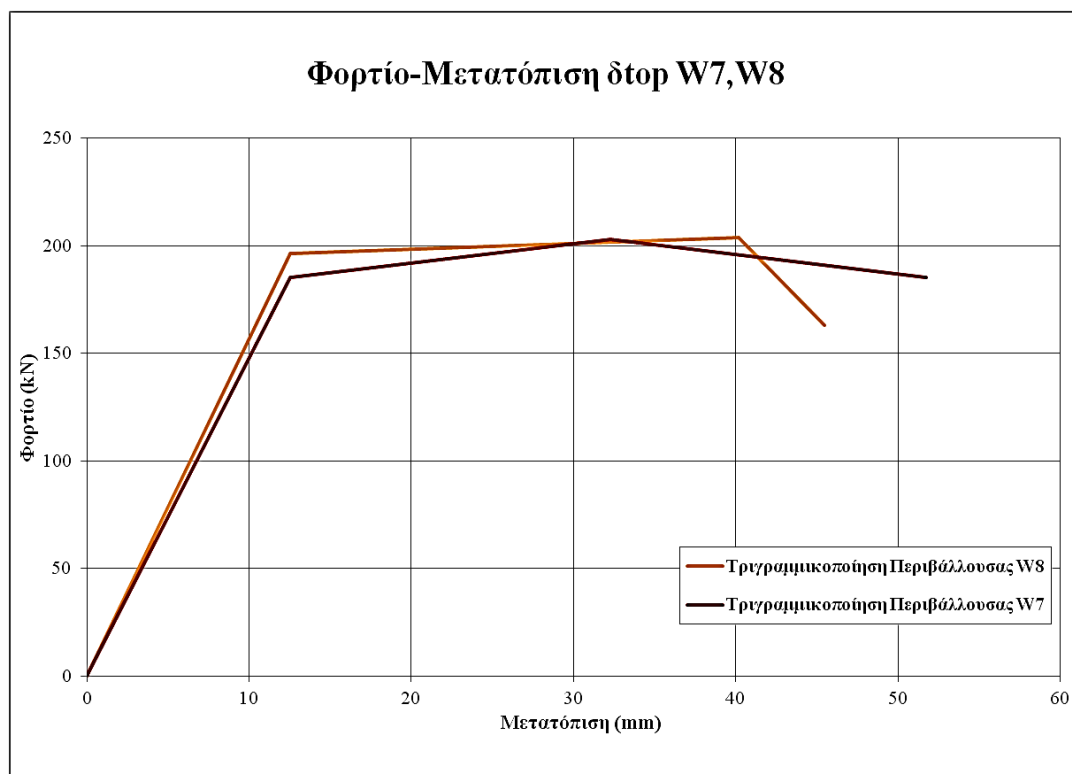


Διάγραμμα 7.62 Υστερητική απόκριση ενισχυμένου (W8) και μη ενισχυμένου (W7) δοκιμίου

Το σημαντικότερο όμως στοιχείο που προκύπτει από τη σύγκριση της συμπεριφοράς των δύο δοκιμίων, είναι η μεταβολή στην παραμορφωσιμότητα καθ' ύψος, που οφείλεται στον τρόπο που επέδρασε η ενίσχυση στη διαδρομή των τάσεων ως την πλαστική περιοχή.

Ο καμπτικός μηχανισμός, που είναι ούτως ή άλλως ο πιο «αδύναμος» σε ένα τοιχίο αντισεισμικά κατασκευασμένο, επιβαρύνθηκε υπερβολικά. Η συσσώρευση των πλαστικών παραμορφώσεων γίνεται κατά κανόνα στους οπλισμούς που διασχίζουν

τις ρωγμές. Το τμήμα του κορμού του ενισχυμένου δοκιμίου πάνω από το πλαστικό μήκος δεν είχε λόγω ενίσχυσης τη δυνατότητα εκτόνωσης μέρους της συνολικής δύναμης μέσω ρηγματώσης και παραμόρφωσης.



Διάγραμμα 7.63 Τριγωνικές Καμπύλες Αντίστασης (W7, W8)

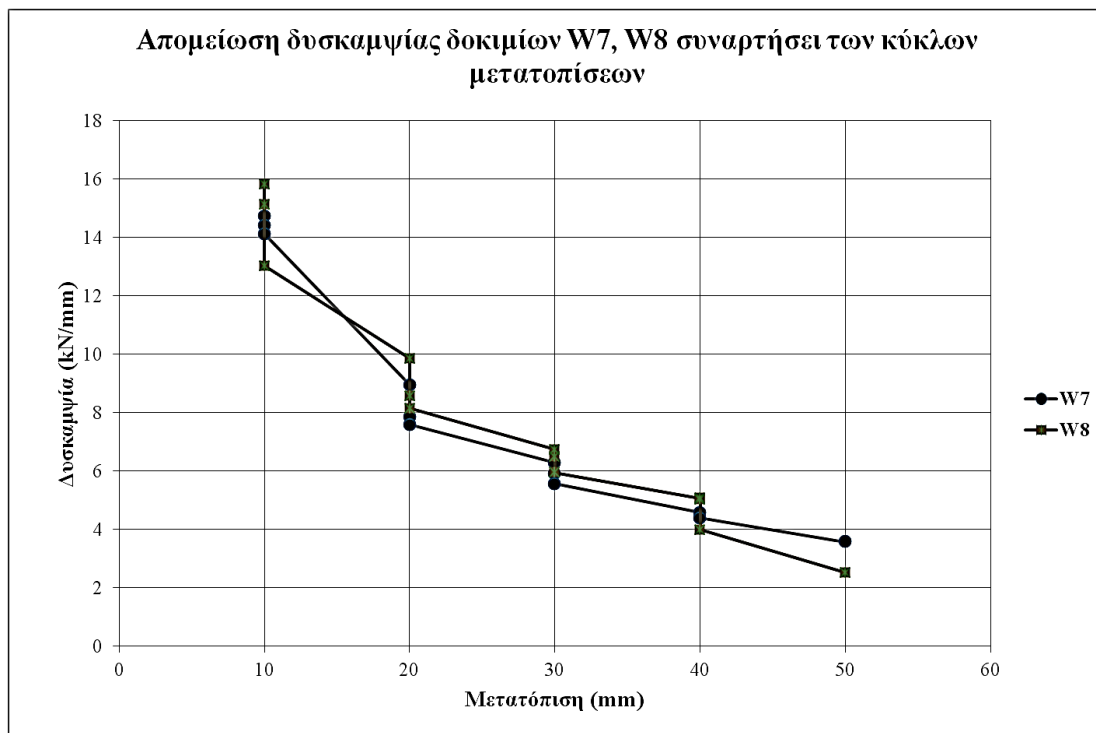
Ενώ η αρχική δυσκαμψία του ενισχυμένου δοκιμίου ήταν ελαφρώς μεγαλύτερη, ήδη από τον τρίτο κύκλο των $\pm 10\text{mm}$ σημειώθηκε μεγαλύτερη απομείωσή της από τους αντίστοιχους κύκλους για το δοκίμιο W7 λόγω της πρόωρης ρηγματώσης της βάσης και την κατανάλωση μεγαλύτερης ποσότητας ενέργειας σε αυτή την περιοχή.

Δίνεται ο συγκριτικός Πίνακας 7.64 όπου αντιπαραβάλλονται τα κυριότερα μεγέθη που προέκυψαν από την τριγωνικοποίηση των περιβαλλουσών καμπυλών των τοιχιών (τρόπος Β της παραγράφου 7.4.2).

Ακόμη παρατίθεται το Διάγραμμα 7.65 όπου αποτυπώνεται η πτώση της επιβατικής δυσκαμψίας σε όλους τους κύκλους για τα δύο δοκίμια.

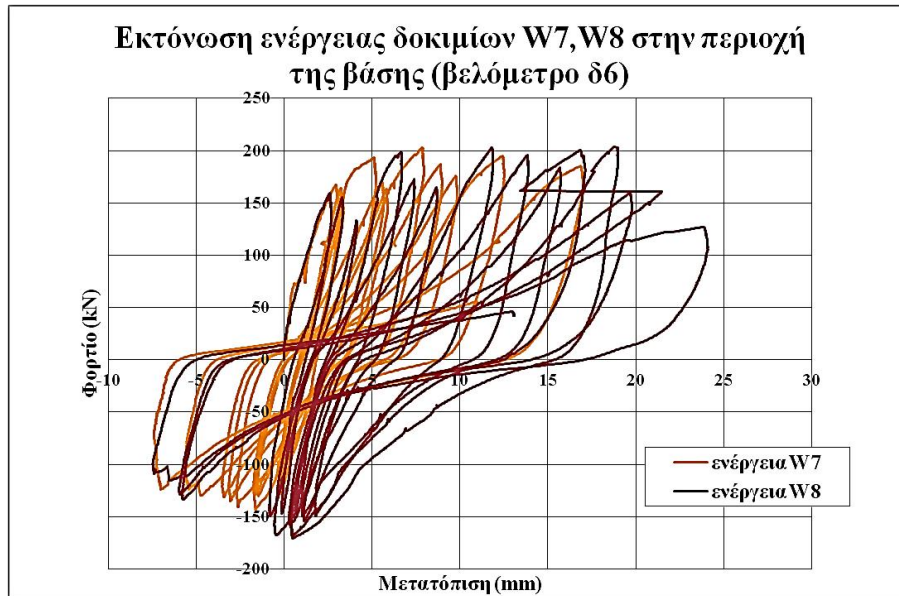
Πίνακας 7.64 Συγκριτικά πειραματικά μεγέθη ενισχυμένου και μη ενισχυμένου δοκιμίου

| Μέγεθος | W7-W8 | |
|-------------------|--------------------------------|-------|
| | W7 | W8 |
| | Τριγωνικοποιημένη Περιβάλλουσα | |
| P_y (kN) | 185 | 196 |
| P_u (kN) | 185 | 163 |
| δ_y (mm) | 12,55 | 12,56 |
| δ_u (mm) | 51,75 | 45,46 |
| μ_δ | 4,12 | 3,62 |
| $K_{eff.}$ (kN/m) | 14746 | 15641 |

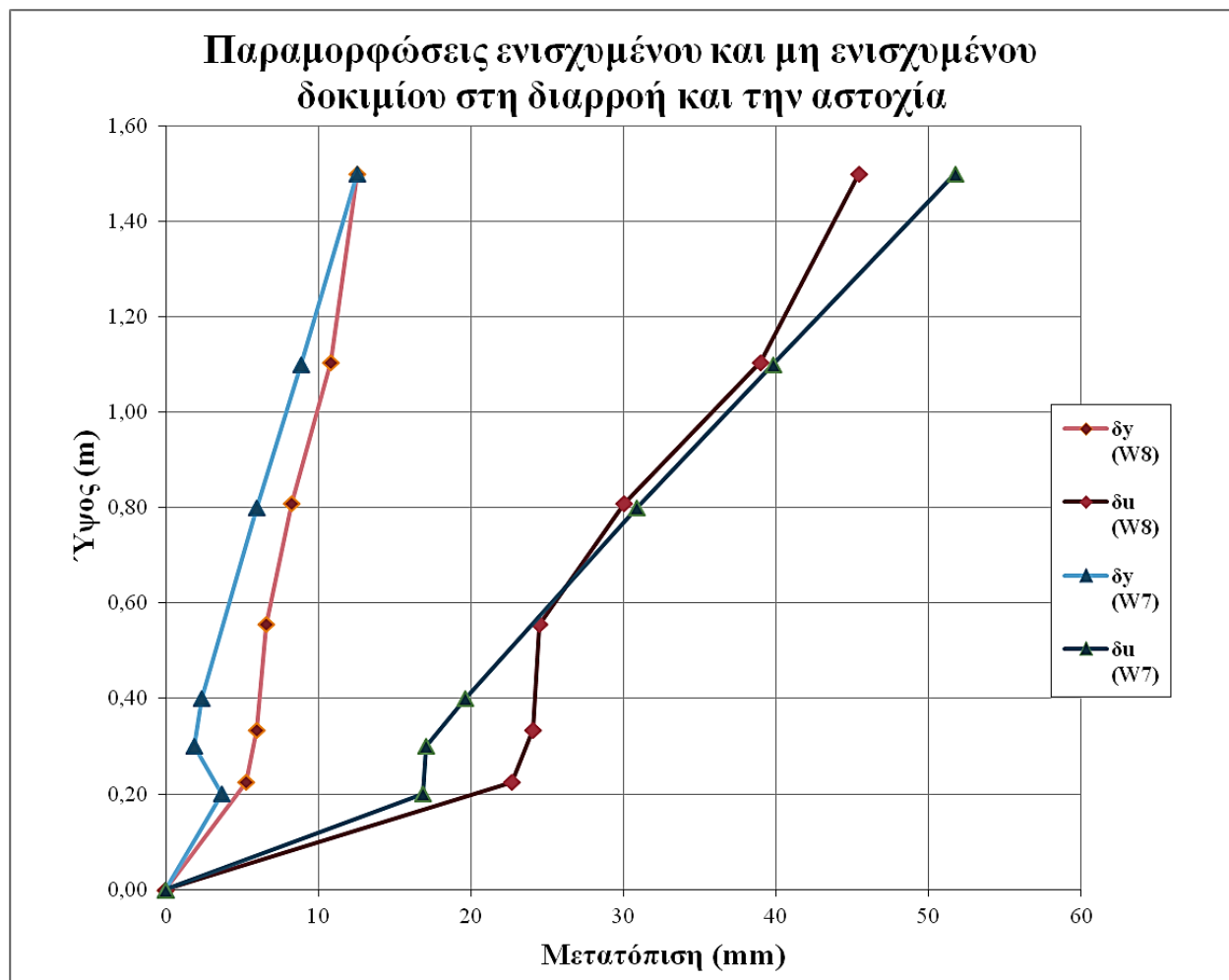


Διάγραμμα 7.65 Απομείωση της επιβατικής δυσκαμψίας κατά τους κύκλους φόρτισης

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η επίδραση της ενίσχυσης στην παραμορφωσιμότητα καθ' ύψος. Παρατηρείται έντονη πλαστικοποίηση στη βάση του ενισχυμένου δοκιμίου, μεγαλύτερη καμπτική στροφή, αλλά και γωνιακή παραμόρφωση στη βάση λόγω εντονότερης ρηγμάτωσης, και εν τέλει μεγαλύτερη αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος.



Διάγραμμα 7.66 Δύναμη-παραμόρφωση δοκιμίων W7, W8 στην περιοχή της βάσης

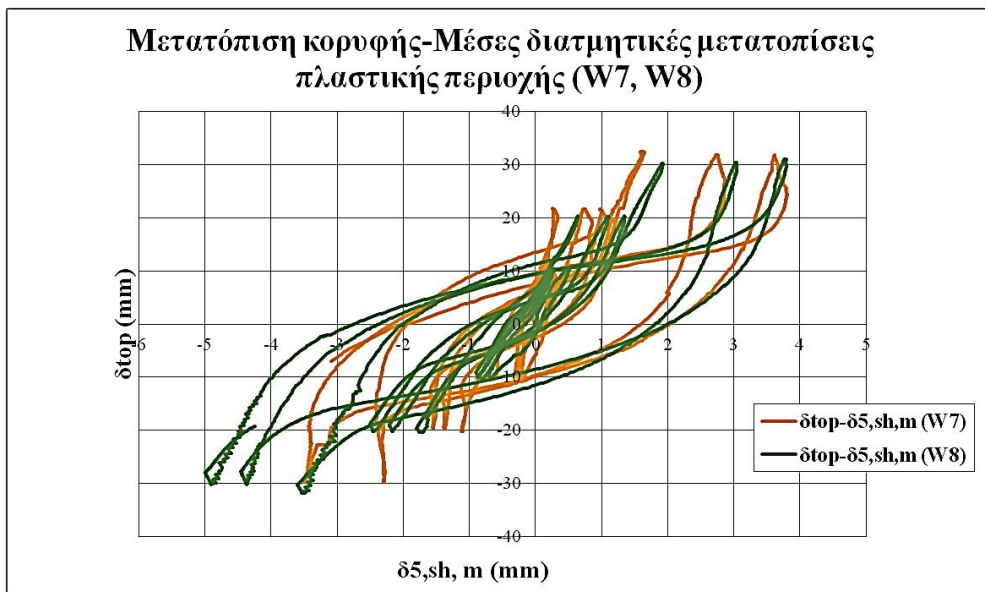


Διάγραμμα 7.67 Παραμόρφωση δοκιμίων W9, W10 καθ' ύψος κατά τα διαρροή και την αστοχία

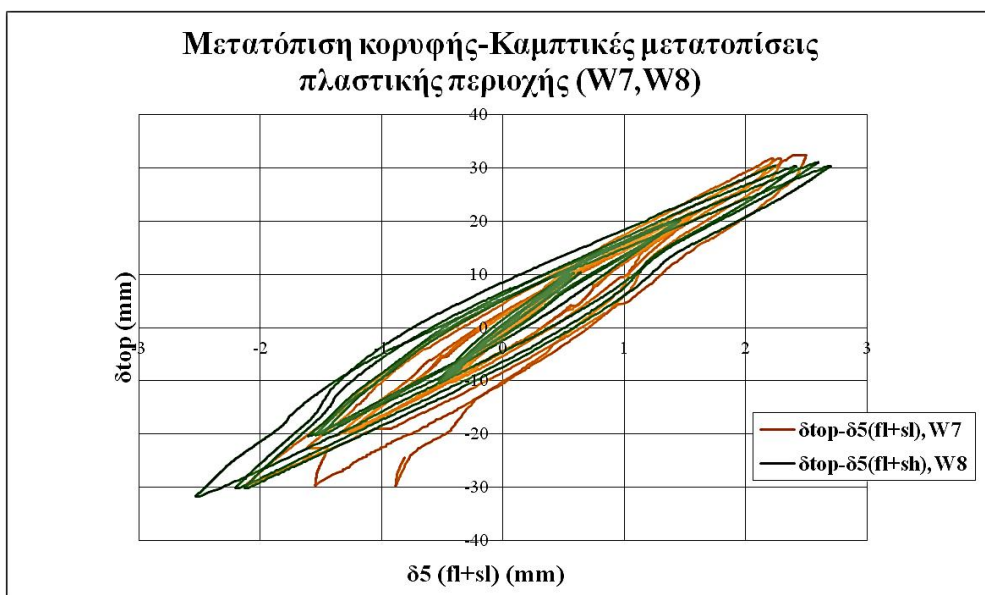
Πίνακας 7.68 Παραμόρφωση δοκιμίων W9, W10 καθ' ύψος κατά τα διαρροή και την αστοχία

| W7 | Βελόμετρο | H (m) | δy (mm) | δu (mm) |
|--------|------------------|-------|-----------------|-----------------|
| | 1 (top) | 1,5 | 12,55 | 51,75 |
| | 2 | 1,1 | 8,86 | 39,82 |
| | 3 | 0,8 | 5,98 | 30,86 |
| | 15 | 0,4 | 2,35 | 19,65 |
| | 5 | 0,3 | 1,87 | 17,06 |
| | 6 | 0,2 | 3,66 | 16,85 |
| | άνω παρειά βάσης | 0 | 0,00 | 0,00 |
| P (kN) | | | 185,11 | 185,31 |

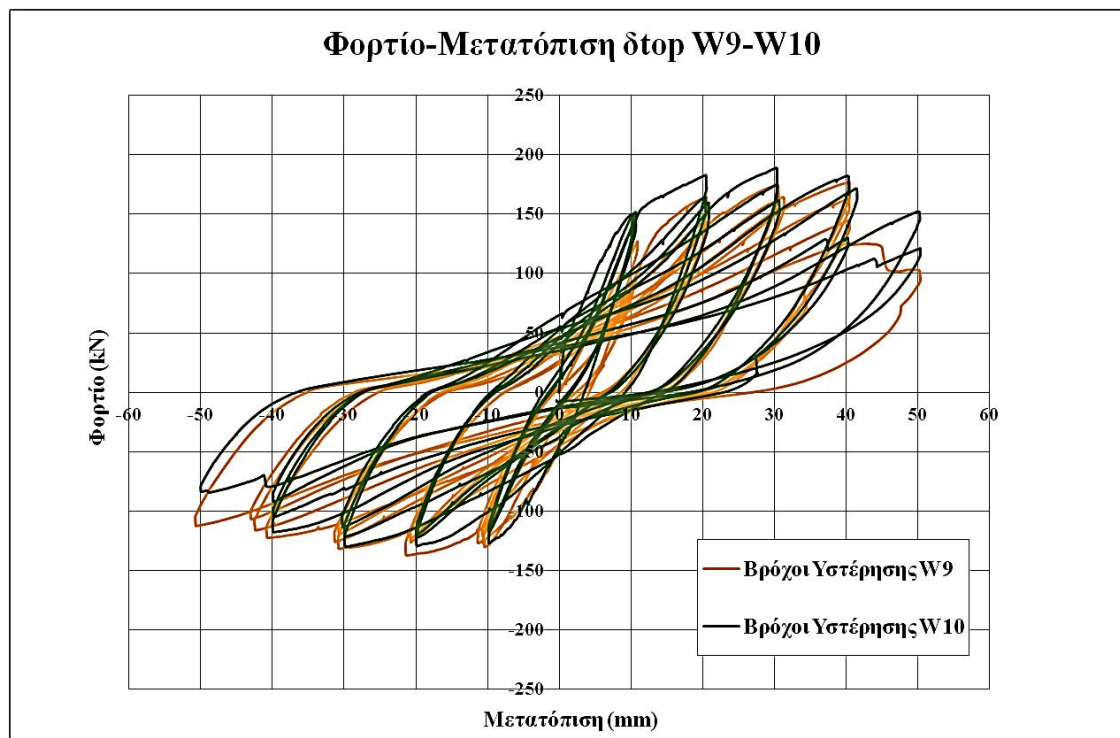
| W8 | Βελόμετρο | H (m) | δy (mm) | δu (mm) |
|--------|------------------|-------|-----------------|-----------------|
| | 1 (top) | 1,5 | 12,56 | 45,46 |
| | 2 | 1,105 | 10,81 | 38,98 |
| | 3 | 0,808 | 8,27 | 30,03 |
| | 15 | 0,555 | 6,58 | 24,47 |
| | 5 | 0,335 | 5,95 | 24,07 |
| | 6 | 0,225 | 5,29 | 22,67 |
| | άνω παρειά βάσης | 0 | 0,00 | 0,00 |
| P (kN) | | | 196,44 | 163,06 |



Διάγραμμα 7.69 Επίδραση της ενίσχυσης στις μέσες διατμητικές παραμορφώσεις



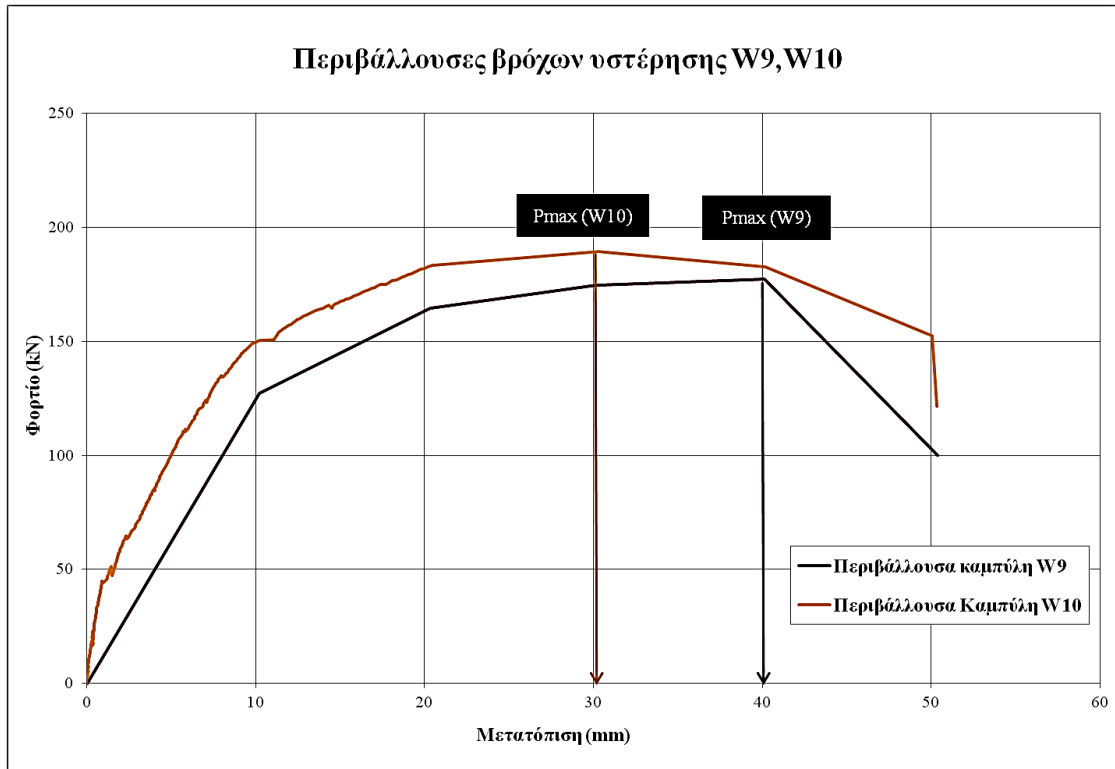
Διάγραμμα 7.70 Επίδραση της ενίσχυσης στις μέσες καμπτικές παραμορφώσεις

W9-W10

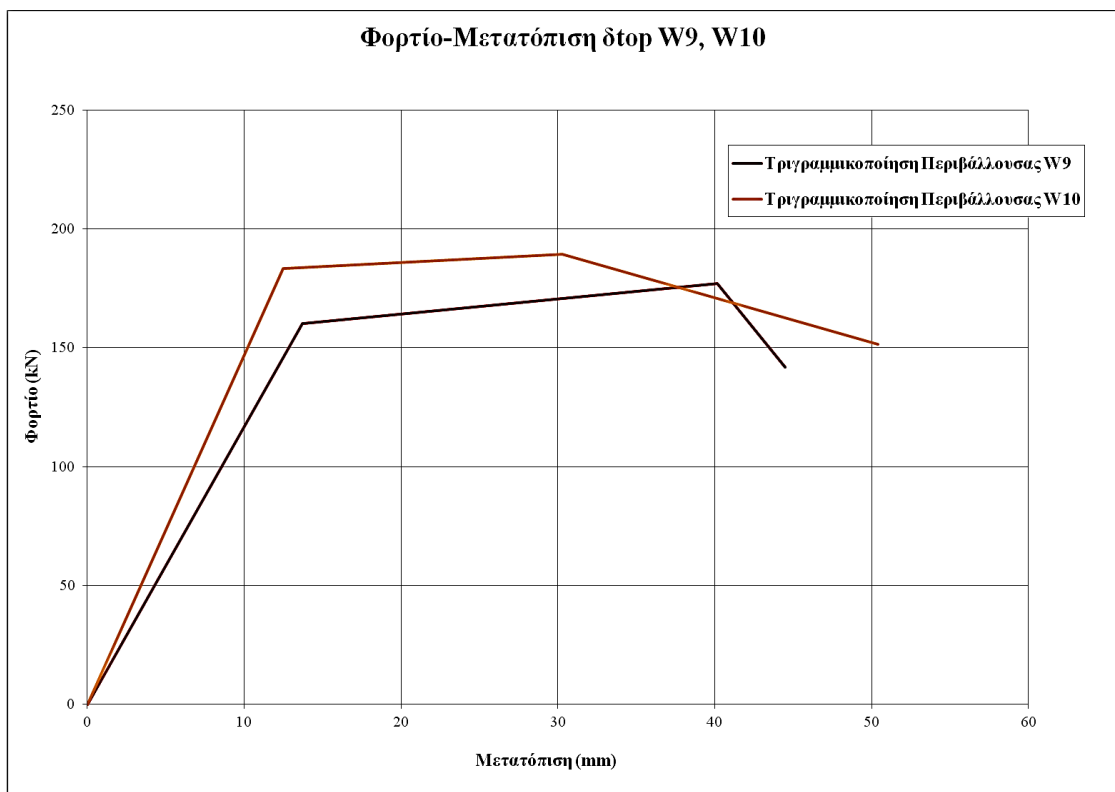
Διάγραμμα 7.71 Υστερητική απόκριση ενισχυμένου (W10) και μη ενισχυμένου (W9) δοκιμίου

Οι βρόχοι υστερητικής ενέργειας των δυο δοκιμίων έχουν ίδια μορφή σε γενικές γραμμές, καθώς και τα δυο δοκίμια αστόχησαν καμπτικά. Τα εμβαδά των βρόχων (βαθμός απορρόφησης ενέργειας) στους κύκλους των $\pm 30\text{mm}$ και $\pm 40\text{mm}$ ήταν περίπου ίδια για τα δοκίμια. Στους αρχικούς κύκλους το ενισχυμένο τοίχιο W10 επέδειξε δυσκαμψία 20% μεγαλύτερη (βλέπε και κλίση των βρόχων στο **Διάγραμμα 7.71**) και διέρρευσε για φορτίο 13% μεγαλύτερο. Οι μετατοπίσεις διαρροής δεν είναι αξιόπιστα συγκρίσιμες λόγω του κολλήματος των βελομέτρων στο δοκίμιο W9 στον πρώτο κύκλο. Τέλος και τα δύο δοκίμια σημείωσαν ίδιας τάξης πλαστιμότητα και το ενισχυμένο δοκίμιο αστόχησε για φορτίο 7% μεγαλύτερο, με τη διαφορά ότι όπως φαίνεται και από το παρακάτω **Διάγραμμα 7.72** η πτώση της αντοχής στο τοίχωμα W9 έλαβε χώρα πίο απότομα, με το που έφτασε την μέγιστη αντίστασή του. Αυτό οφείλεται στην έντονη χιαστί ρηγμάτωση σε αρκετά μεγάλο ύψος και την αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης σε συνδυασμό με τον εκτός επιπέδου λυγισμό των ακραίων θλιβόμενων ράβδων.

Όμοια με τα δοκίμια W7, W8 το μέγιστο φορτίο σημειώθηκε σε διαφορετικούς κύκλους, και κυμάνθηκε στα ίδια επίπεδα. Η ενίσχυση δηλαδή δεν είχε καμία επίδραση στη φέρουσα ικανότητα, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο μιάς και ο σκοπός της ενίσχυσης ήταν η βελτίωση της διατμητικής και όχι της καμπτικής συμπεριφοράς. Η παραμόρφωση αστοχίας επίσης κυμάνθηκε στα ίδια επίπεδα.



Διάγραμμα 7.72 Υστερητική απόκριση ενισχυμένου (W10) και μη ενισχυμένου (W9) δοκιμίου



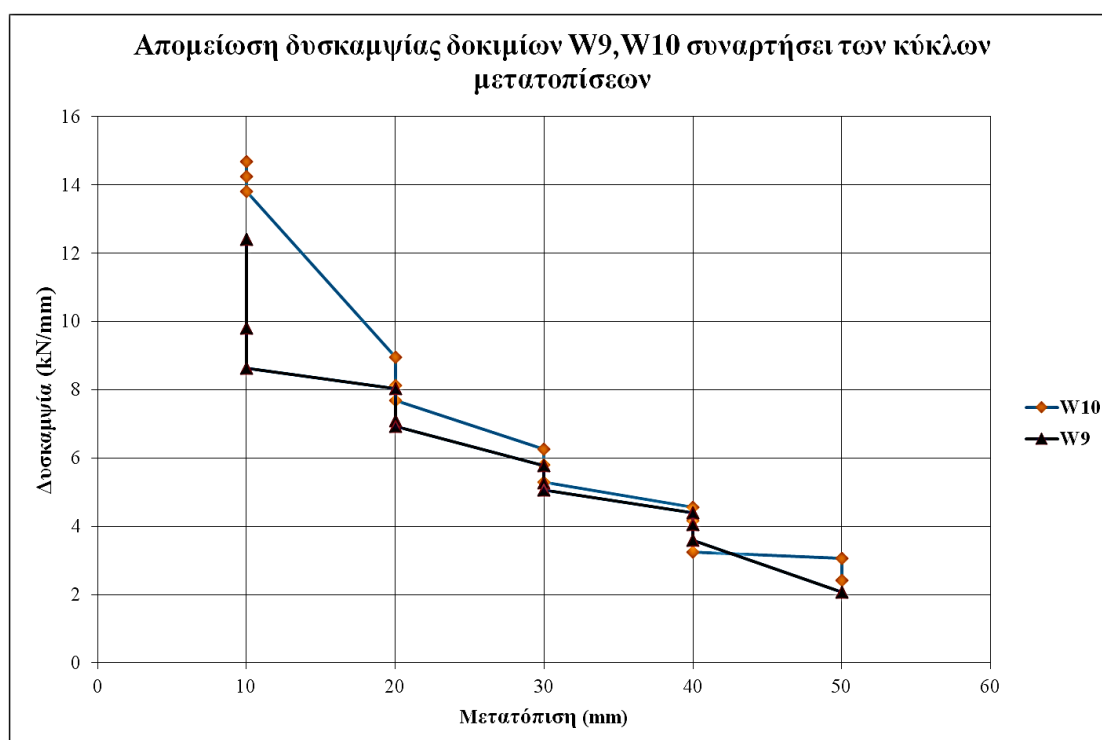
Διάγραμμα 7.73 Τριγωνικές Καμπύλες Αντίστασης (W9, W10)

Πίνακας 7.74 Συγκριτικά πειραματικά μεγέθη ενισχυμένου και μη ενισχυμένου δοκιμίου

| Μέγεθος | W9-W10 | |
|------------------|--------------------------------|-------|
| | W9 | W10 |
| | Τριγωνικοποιημένη Περιβάλλουσα | |
| P_y (kN) | 160 | 183 |
| P_u (kN) | 142 | 151 |
| δ_y (mm) | 13,72 | 12,5 |
| δ_u (mm) | 44,47 | 50,4 |
| $\mu\delta$ | 3,24 | 4,03 |
| K_{eff} (kN/m) | 11670 | 14700 |

Στο συγκριτικό Πίνακα 7.74 αντιπαραβάλλονται τα κυριότερα μεγέθη που προέκυψαν από την τριγωνικοποίηση των περιβαλλουσών καμπύλων των τοιχίων (τρόπος Β της παραγράφου 7.4.2).

Στο Διάγραμμα 7.75 αποτυπώνεται η πτώση της επιβατικής δυσκαμψίας σε όλους τους κύκλους για τα δύο δοκίμια.



Διάγραμμα 7.75 Απομείωση της επιβατικής δυσκαμψίας κατά τους κύκλους φόρτισης

Η συνεισφορά των χαλύβδινων πλακών έγκειται κατά κύριο λόγο στον περιορισμό της ρηγματώσης καθ' ύψος και κατ' επέκταση της παραμόρφωσης, ιδίως της γωνιακής (διατμητικής).

Το μήκος και το άνοιγμα των ρωγμών ελαχιστοποιήθηκαν, δίνοντας τη θέση τους στην καμπτική παραμόρφωση (στροφή), ενώ ταυτοχρόνως τα παραμορφωσιακά και εντατικά φαινόμενα συγκεντρώθηκαν στο πλαστικό μήκος. Σε αντίθεση με το ενισχυμένο δοκίμιο W8, αυτή η συγκέντρωση της έντασης και παραμόρφωσης στην περιοχή της βάσης είχε περισσότερο θετική επίδραση στην απόκριση του ενισχυμένου δοκιμίου W10, το οποίο πρωτύτερα (χωρίς ενίσχυση) καθοριζόταν από την καμπτοδιατμητική αλληλεπίδραση και την μεγαλύτερη πιθανότητα ψαθυρής (απότομης) αστοχίας με θράυση συνδετήρα ή απώλεια ευστάθειας λόγω του αξιοσημείωτου λυγισμού των ακραίων θλιβόμενων οπλισμών σε ενδεχόμενη επόμενη ανακυκλική διέγερση.

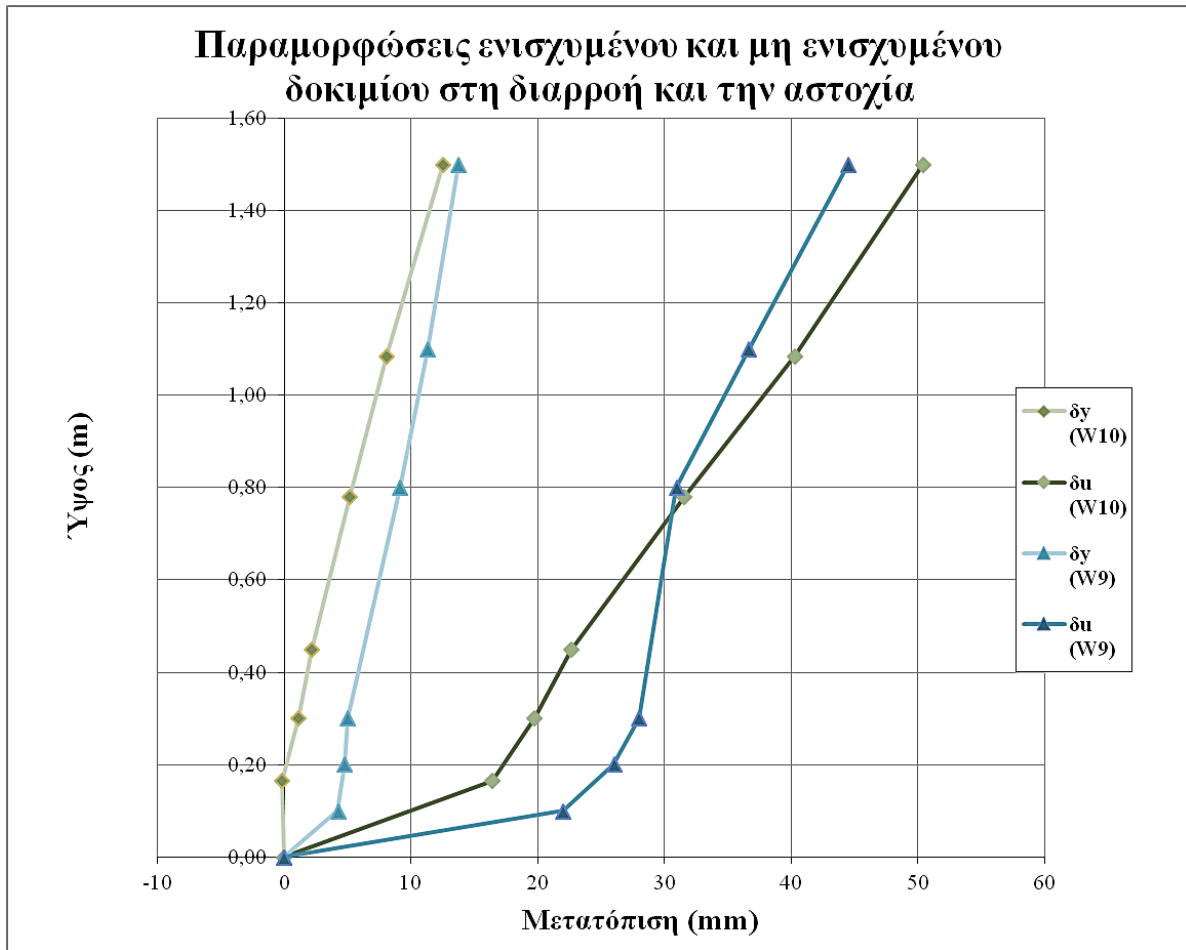
Τα παραπάνω γίνονται αντιληπτά και μέσω του **Διαγράμματος 7.78**. Τα βελόμετρα δ_9 , δ_{14} , που ήταν τοποθετημένα σε χιαστί μεταλλικές διαγωνίους ώστε να μετρούν τις γωνιακές παραμορφώσεις στην πλαστική περιοχή και στο ανώτερο μέρος του κορμού αντίστοιχα, αποδεικνύουν τη συσσώρευση των ρωγμών άρα και παραμορφώσεων στην πλαστική ζώνη για το ενισχυμένο δοκίμιο.

Το ανώτερο τμήμα έμεινε σχεδόν άθικτο μέχρι και την αστοχία. Μπορούμε να πούμε επομένως ότι οι συνολικές (διατμητικές και καμπτικές) παραμορφώσεις της κορυφής προέρχονται βασικά από τις παραμορφώσεις της πλαστικής ζώνης, οι οποίες με τη σειρά τους είναι κυρίως καμπτικές (στροφή).

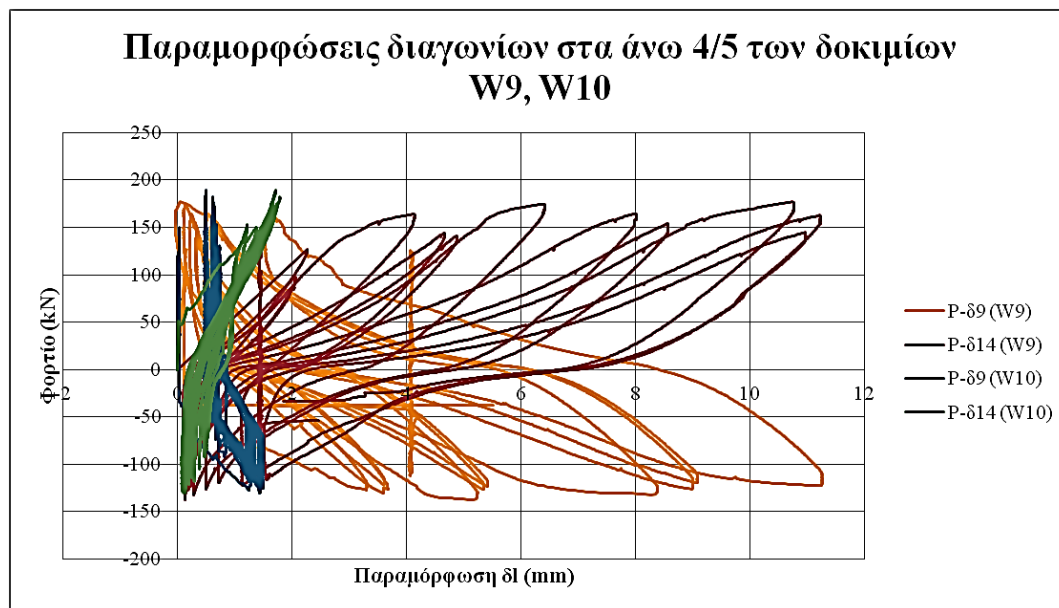
Πίνακας 7.76 Παραμόρφωση δοκιμίων W9, W10 καθ' ύψος κατά τη διαρροή και την αστοχία

| W9 | Βελόμετρο | H (m) | δy (mm) | δu (mm) |
|----|------------------|-------|-----------------|-----------------|
| | 1 (top) | 1,5 | 13,72 | 44,47 |
| | 2 | 1,1 | 11,31 | 36,66 |
| | 3 | 0,8 | 9,10 | 30,93 |
| | 15 | 0,3 | 4,97 | 28,00 |
| | 5 | 0,2 | 4,76 | 26,00 |
| | 6 | 0,1 | 4,22 | 22,00 |
| | άνω παρειά βάσης | 0 | 0,00 | 0,00 |
| | P (kN) | | 160,13 | 141,71 |

| W10 | Βελόμετρο | H (m) | δy (mm) | δu (mm) |
|-----|------------------|-------|-----------------|-----------------|
| | 1 (top) | 1,5 | 12,50 | 50,40 |
| | 2 | 1,085 | 8,05 | 40,27 |
| | 3 | 0,78 | 5,18 | 31,55 |
| | 15 | 0,45 | 2,18 | 22,64 |
| | 5 | 0,3 | 1,11 | 19,70 |
| | 6 | 0,165 | -0,16 | 16,39 |
| | άνω παρειά βάσης | 0 | 0,00 | 0,00 |
| | P (kN) | | 183,40 | 151,47 |

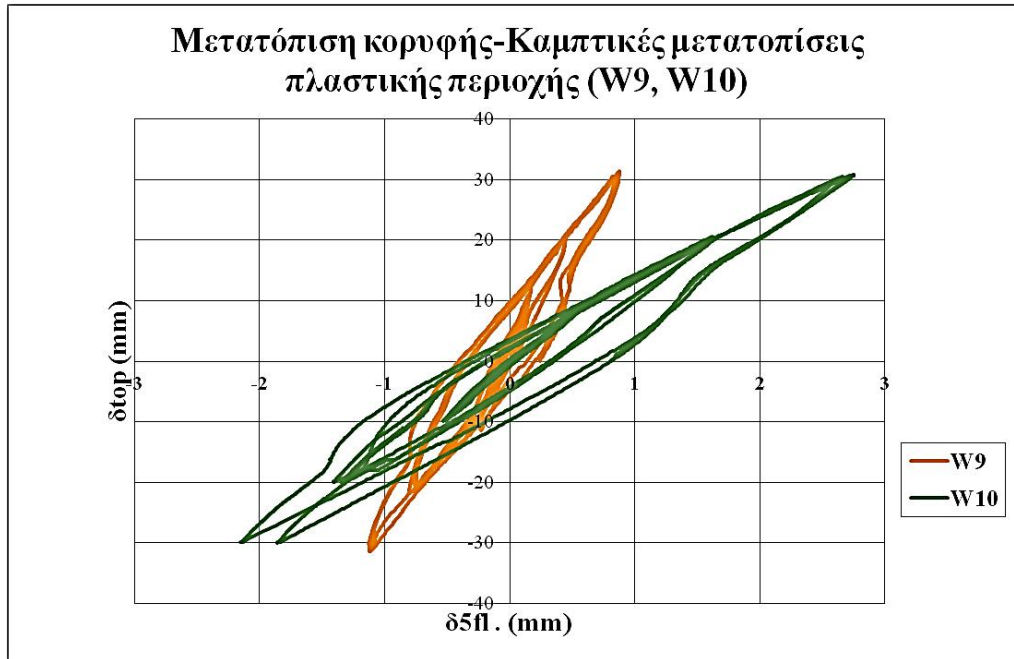


Διάγραμμα 7.77 Παραμόρφωση δοκιμίων W9, W10 καθ' ύψος κατά τη διαρροή και την αστοχία

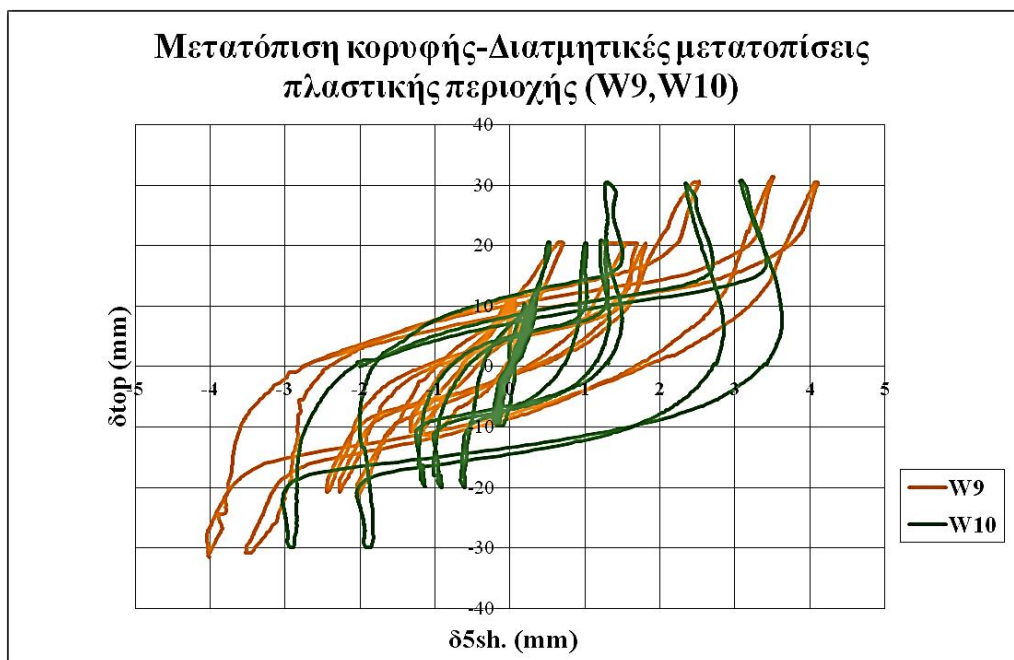


Διάγραμμα 7.78 Επίδραση της ενίσχυσης στον περιορισμό της γωνιακής παραμόρφωσης στον κορμό

Αντιθέτως -όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενες παραγράφους- στο δοκίμιο W9 η διάτμηση ήταν σημαντικός παράγοντας της απόκρισης του τοιχείου, αν όχι ο κυριότερος, παρά την αστοχία λόγω αποδιοργάνωσης της θλιβόμενης ζώνης και όχι λόγω θράυσης συνδετήρα. Δίνονται και τα αντίστοιχα συγκριτικά διαγράμματα καμπτικής και διατμητικής συμπεριφοράς των δύο δοκιμίων.

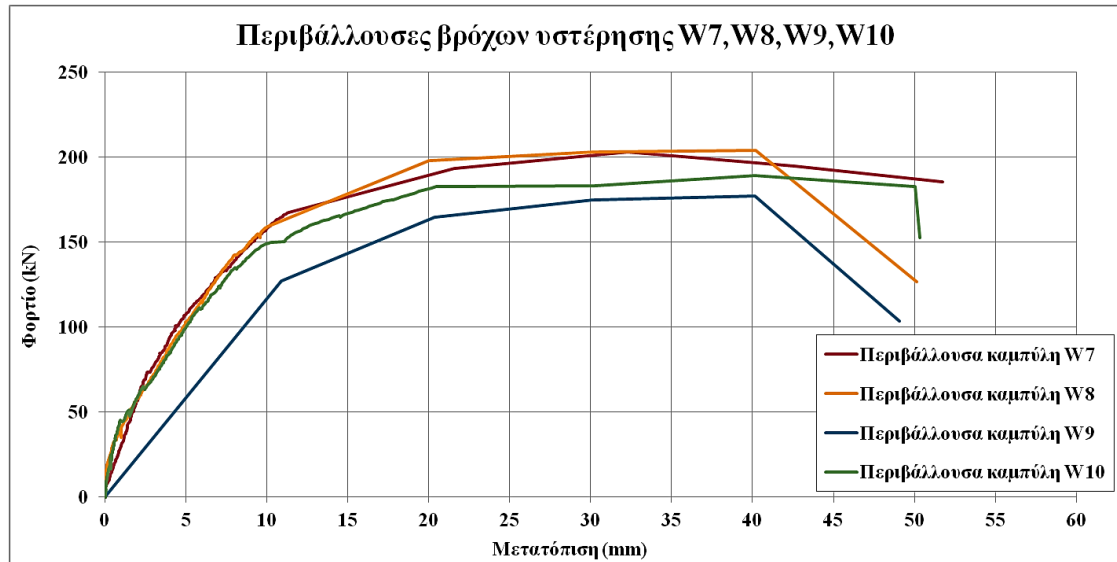


Διάγραμμα 7.79 Επίδραση της ενίσχυσης στον τρόπο απόκρισης και αστοχίας (κυρίαρχη καμπτική συμπεριφορά)

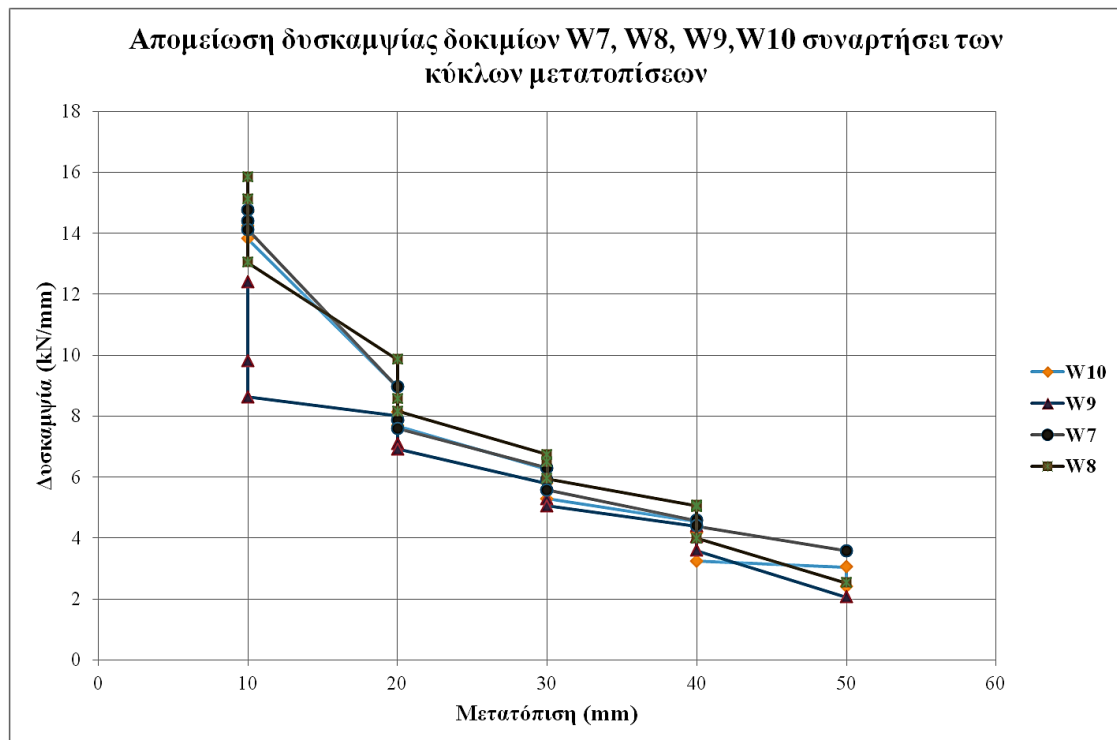


Διάγραμμα 7.80 Επίδραση της ενίσχυσης στον τρόπο απόκρισης και αστοχίας (αντίσταση στη γωνιακή-διατμητική παραμόρφωση)

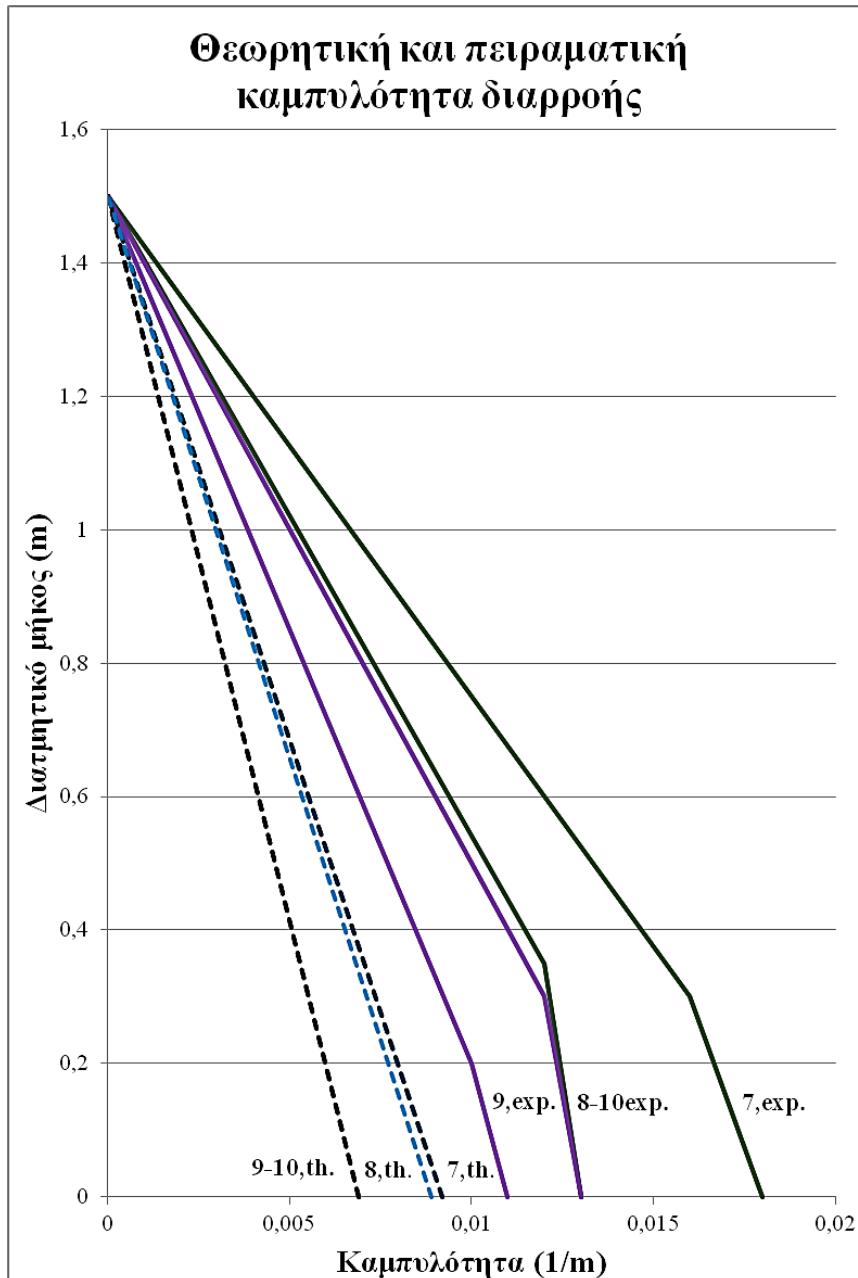
Συνοψίζοντας την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, παρατίθενται σε κοινό διάγραμμα οι Περιβάλλουσες Καμπύλες και των τεσσάρων δοκιμών που αναλύθηκαν θεωρητικά και πειραματικά, η απομείωση της δυσκαμψίας τους κατά την πειραματική διαδικασία καθώς και η καμπυλότητα διαρροής όπως εκτιμήθηκε πειραματικά και από τις αναλυτικές εξισώσεις.



Διάγραμμα 7.81 Περιβάλλουσες Βρόχων Υστέρησης όλων των δοκιμών

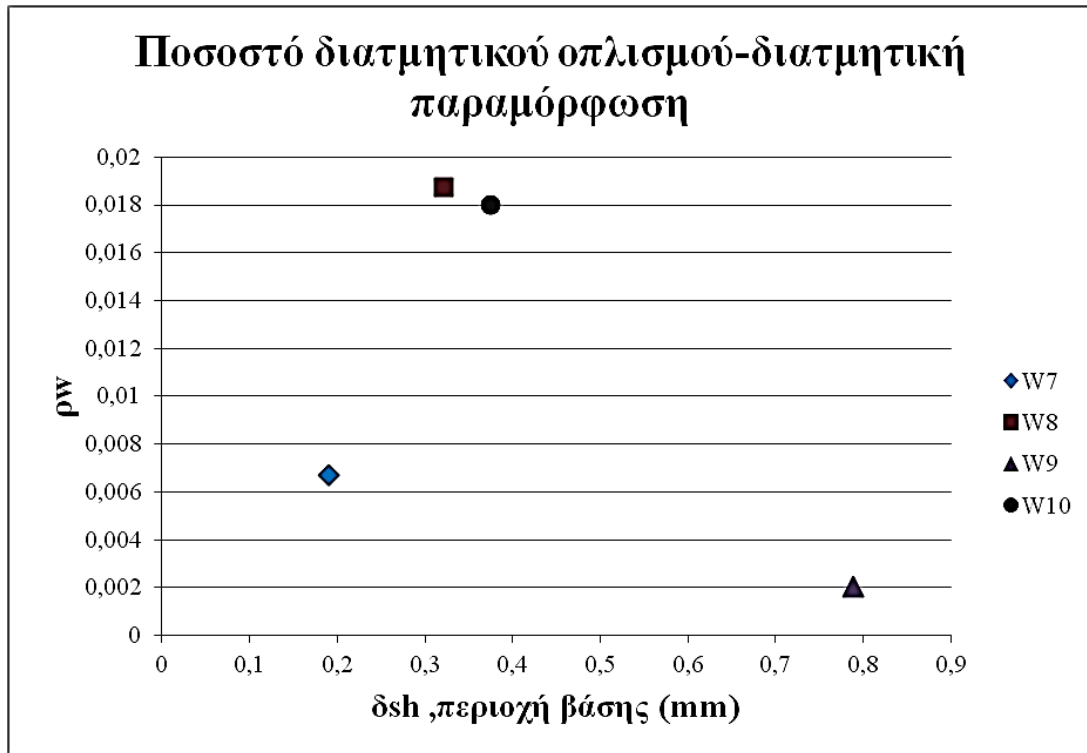


Διάγραμμα 7.82 Πορεία απομείωσης της δυσκαμψίας όλων των δοκιμών κατά τις διαδοχικές φορτίσεις

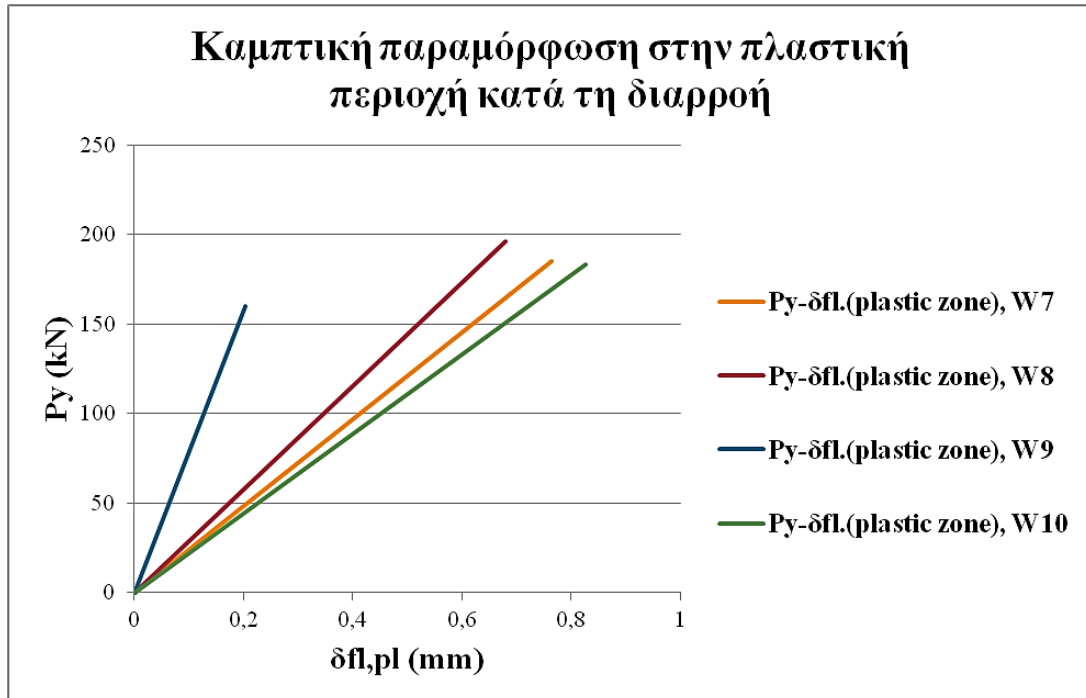


Διάγραμμα 7.83 Θεωρητική (εξισώσεις ισοδυναμίας) και Πειραματική καμπυλότητα διαρροής όλων των δοκιμίων

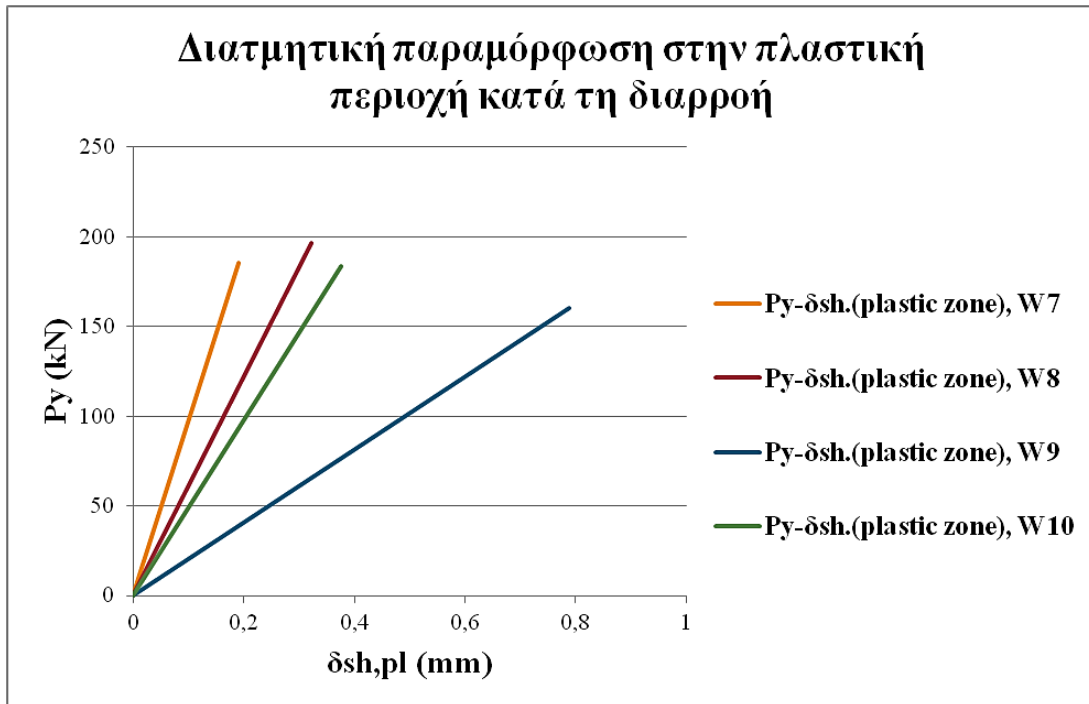
Παρατίθενται, τέλος, τα **Διαγράμματα 7.84, 7.85, 7.86** όπου απεικονίζεται συγκριτικά για όλα τα δοκίμια η επίδραση του διατμητικού οπλισμού στην ανάπτυξη των διατμητικών και καμπτικών παραμορφώσεων και η υπερίσχυση των πρώτων-κατ'επέκταση και των διατμητικών φαινομένων που τις συνοδεύουν- σε σχέση με τις δεύτερες για μικρό ποσοστό του οπλισμού αυτού. Επαναλαμβάνεται πως τα εν λόγω Διαγράμματα έχουν συνταχθεί για την πειραματική μετατόπιση κορυφής διαρροής λόγω μεγαλύτερης αξιοπιστίας των μετρήσεων στα αρχικά στάδια της πειραματικής διαδικασίας.



Διάγραμμα 7.84 Επίδραση του διατμητικού οπλισμού στην ανάπτυξη των διατμητικών παραμορφώσεων (διαρροή)



Διάγραμμα 7.85 Καμπτική παραμόρφωση όλων των δοκιμών στην πλαστική περιοχή για παραμόρφωση $\delta_{top} = \delta_{y,exp}$.



Διάγραμμα 7.86 Διατμητική παραμόρφωση όλων των δοκιμίων στην πλαστική περιοχή για παραμόρφωση $\delta_{top} = \delta_{y,exp}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Πέντε τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος υποβλήθηκαν σε στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Ε.Μ.Π. κατά τα Ακαδημαϊκά Έτη 2012-2014. Τέσσερα από αυτά αποτιμώνται θεωρητικά και πειραματικά στο παρόν τεύχος. Τα δύο κατασκευάστηκαν σύμφωνα με τις διατάξεις των σύγχρονων Κανονισμών (Ευρωκώδικας 2, Ευρωκώδικας 8), και τα άλλα δύο είναι κατασκευασμένα σύμφωνα με Κανονισμούς προ του 1985 (Β.Δ. 59') που δεν προέβλεπαν επαρκώς την σεισμική συμπεριφορά κατά το σχεδιασμό. Ένα τοίχιο από την ομάδα των «σύγχρονων» και ένα από την ομάδα των «παλαιών» ενισχύθηκαν σε διάτμηση μέσω επικολητών ελασμάτων δομικού χάλυβα. Τα ανεπαρκώς οπλισμένα τοιχεία επέδειξαν φέρουσα ικανότητα πολύ κοντά στην προβλεπόμενη καμπτική τους αντοχή. Από την παρούσα μικρού εύρους πειραματική διερεύνηση και από σχετικές έρευνες της διεθνούς βιβλιογραφίας μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα και προτάσεις, που θα πρέπει να συνοδεύονται από τον ανάλογο βαθμό επιφύλαξης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Το όριο διαρροής και αστοχίας των διατομών είναι βασικής σημασίας κατά την ελαστοπλαστική ανάλυση ενός φορέα. Σε μια ελαστική ανάλυση η ένταση κατανέμεται βάσει της σχέσης μεταξύ των δυσκαμψιών και επομένως κυμαίνεται εντός των ορίων της ελαστικότητας. Μετά την υπέρβαση όμως του ορίου διαρροής σε μια διατομή οι εντάσεις ανακατανέμονται κατά διαφορετικό τρόπο ο οποίος χρίζει αξιόπιστων πρόβλεψεων. Κατά συνέπεια είναι μείζονος σημασίας οι **παραδοχές διγραμμικών μοντέλων συμπεριφοράς** που υιοθετούνται κάθε φορά, καθώς διαφορετικές παραδοχές διγραμμικοποίησης οδηγούν σε διαφορετικές τιμές ορίων διαρροής και αστοχίας, άρα και μετελαστικής ικανότητας παραμόρφωσης. Για τοιχεία καμπτικού τύπου, η θεωρητική Καμπύλη Αντίστασης που κατασκευάζεται μέσω **διγραμμικοποίησης του διαγράμματος Ροπών- Καμπυλοτήτων (εξισώσεις ισοδυναμίας)** και μέσω προσαρμογής των σχέσεων υπολογισμού της **γωνίας στροφής χορδής των ΚΑΝ.ΕΠΕ και ΕΚ8** προσαρμόζεται πολύ καλύτερα στην πειραματική Περιβάλλουσα Καμπύλη από αυτή που προβλέπεται από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. Για μέλη με ενδιάμεσο οπλισμό **η διαρροή δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένη** ως διαρροή της ακραίας εφελκυόμενης στάθμης όπως ορίζει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ μέσω των εμπειρικών σχέσεων υπολογισμού της καμπτικής διαρροής. Η καμπύλωση του διαγράμματος Ροπής-Καμπυλότητας ή Δύναμης-Μετακίνησης συμβαίνει μετά τη διαρροή της ευρύτερης γειτονίας των ακραίων εφελκυόμενων ράβδων.

- Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ ωστόσο προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια την πειραματική (για τριγραμμική Καμπύλη Συμπεριφοράς) ενεργό δυσκαμψία τοιχίων που επιδεικνύουν προέχουσα καμπτική συμπεριφορά.
- Η υποτίμηση της παραμόρφωσης αστοχίας σε όρους στροφής χορδής, ιδίως για τα ανεπαρκώς οπλισμένα δοκίμια, είναι παράγωγη των περιθωρίων ασφαλείας των σύγχρονων διατάξεων έναντι ενδεχόμενων ψαθυρών τύπων αστοχίας για κατασκευές μικρών αντοχών και, επιπλέον, είναι αποτέλεσμα εμπειρικών σχέσεων βασισμένων στα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά δομημάτων με καμπτική συμπεριφορά. **Μηδενισμός του όρου που αφορά στην περίσφιγξη του σκυροδέματος απομειώνει θεαματικά την οριακή παραμόρφωση που προβλέπεται από αυτές τις σχέσεις.** Είναι σαφής δε η δυσκολία προσδιορισμού της οριακής παραμόρφωσης μέσω εκτίμησης της οριακής καμπυλότητας, καθώς δεν ισχύει η επιπεδότητα των διατομών στη φάση αστοχίας.
- Η θεώρηση του Ευρωκώδικα 2 για μεταβολή της γωνίας των θλιβόμενων διαγωνίων από 21° μέχρι το άνω όριο των 45° δεν ανταποκρίνεται στις πειραματικές γωνίες ρηγμάτωσης και τη μορφή αστοχίας των τοιχωμάτων. Προδίδεται σαφής αδυναμία του δικτύωματος Morsch, και μάλιστα σταθερής (κατά ΕΚ8-3, ΚΑΝ.ΕΠΕ) γωνίας (45°) των λοξών θλιπτήρων. Η ανεπάρκεια του δικτύωματος για επίπεδους φορείς έγκειται στην ανομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στις επιμήκεις διατομές τους, αλλά και στη μορφή της φόρτισης (συγκεντρωμένο φορτίο στην κορυφή του μέλους). Ακόμη, το προσομοίωμα του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι βασισμένο σε γραμμικές συσχετίσεις, οπότε αλλαγές στις μεταβλητές που υπεισέρχονται στη σχέση υπολογισμού της διατμητικής αντοχής δίνουν αρκετά ασταθή αποτελέσματα (ειδικά η αλλαγή του μήκους z). Οι δύο παράμετροι που ενδεχομένως επηρεάζουν τη γωνία ρηγμάτωσης κατά την αστοχία είναι ο λόγος των μηχανικών και γεωμετρικών ποσοστών διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού και ο λόγος διάτμησης, ο οποίος φαίνεται να διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο για το αν η συμπεριφορά θα είναι καμπτική η διατμητική. Τα ποσοστά του διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού που ενεργοποιούνται κατά τη μεταφορά οριζόντιας δύναμης είναι και αυτά συνάρτηση του λόγου διάτμησης. **Όσο μειώνεται ο λόγος διάτμησης η γωνία τείνει να αυξάνεται, ο βαθμός ενεργοποίησης του σκυροδέματος επίσης αυξάνεται, ενώ το ποσοστό ενεργοποίησης του οπλισμού διάτμησης μειώνεται.**
- Η αντοχή σε λοξή θλίψη του σκυροδέματος και η συμπεριφορά του διαμήκους οπλισμού υπό οριζόντια φόρτιση μικρού ή μεσαίου ύψους τοιχωμάτων δε διερευνάται επαρκώς από κανένα χρησιμοποιηθέν προσομοίωμα, ιδίως από αυτό των ΚΑΝ.ΕΠΕ./ΕΚ8-Μέρος 3.

- Για τοιχία μικρού λόγου διάτμησης ο διατμητικός οπλισμός έχει μικρή επιρροή στη φέρουσα ικανότητα. Σε πειραματικό επίπεδο η κύρια λειτουργία των συνδετήρων κορμού έγκειται στην ενεργοποίηση τους στο ύψος της κρίσιμης (διαμπερούς) διατμητικής ρωγμής που τους διαπερνά. Ο διατμητικός οπλισμός επηρεάζει ωστόσο την υστερητική απόκριση (μορφή αστοχίας) όσο προσεγγίζεται η οριακή αντοχή μέσω ανάπτυξης μεγάλων γωνιακών παραμορφώσεων και ρωγμών που δεν κλείνουν κατά την αλλαγή φοράς της επιβαλλόμενης μετατόπισης παρά την πτώση της δυσκαμψίας και αντίστασης.
- Όταν προσεγγίζεται μια μορφή αστοχίας οι αντίστοιχες καμπτικές ή διατμητικές παραμορφώσεις γίνονται κυρίαρχες και προοιωνίζουν τον τρόπο αστοχίας. Καθώς όμως οι διατμητικές παραμορφώσεις και η καμπτική στροφή είναι αλληλένδετες στα τοιχώματα, είναι δυσχερής ο διαχωρισμός τους τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά.
- Η μείωση των ανελαστικών παραμορφώσεων και της ρηγμάτωσης υφιστάμενων μελών που δεν έχουν σχεδιαστεί με τις σύγχρονες διατάξεις ώστε να αποδίδουν ενέργεια μέσω σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων και άρα δεν έχουν επαρκή πλαστιμότητα είναι σημαντική. Από αυτή την άποψη επομένως η επίδραση της ενίσχυσης στο δοκίμιο W9 με έντονη τη διατμητικού τύπου ρηγμάτωση είναι ευνοϊκή.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

- Η αποτίμηση της διατμητικής συμπεριφοράς τοιχωμάτων με μικρό ή μεσαίο λόγο διάτμησης καταδεικνύει ότι για να είναι οι εκτιμήσεις επιτυχείς πρέπει να στηρίζονται σε ένα ρεαλιστικό καμπτοδιατμητικό προσομοίωμα άμεσα συναρτώμενο με την διακριτοποιημένη συμπεριφορά όλων των μηχανισμών ανάληψης της τέμνουσας μετελαστικά και με το λόγο διάτμησης. Ένα τέτοιο προσομοίωμα μπορεί να είναι συνδυασμός ενός μοντέλου θλιπτήρα-ελκυστήρα και ενός δικτυώματος μεταβλητής γωνίας ρηγμάτωσης που θα προκύπτει από την επαλληλία των γωνιών των δύο μηχανισμών. Μπορεί ακόμη να χρειάζεται να υιοθετηθεί μια διαφορετική προσέγγιση ανάλυσης, όπως είναι η μέθοδος της τροχιάς των θλιπτικών τάσεων ή τα πεπερασμένα στοιχεία.
- Απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση του τρόπου υπολογισμού της καμπτικής και διατμητικής συνιστώσας της συνολικής παραμόρφωσης για το μεγαλύτερο δυνατό εύρος δοκιμίων, με διαφορετικό λόγο διάτμησης και ίδιο ή και μικρότερο ποσοστό οριζόντιου οπλισμού κορμού. Πειραματικά, χρειάζεται κατάλληλη διάταξη βελομέτρων που να μετρούν σε διάφορες

διατομές καθ' ύψος την καμπτική στοφή, τη γωνιακή παραμόρφωση και ανομοιόμορφη πλευρική διόγκωση αλλά και την παραμόρφωση λόγω της εξόλκευσης του διαμήκους οπλισμού από την περιοχή της αγκύρωσής του.

- Όσον αφορά στη συγκεκριμένη μέθοδο ενίσχυσης, η **αλληλεπίδραση της εποξειδικής πάστας με τις χαλύβδινες λάμες και τους υποκείμενους συνδετήρες** είναι ασαφής. Στη σχέση υπολογισμού της διατμητικής αντοχής υπό τη συνεισφορά της ενίσχυσης χρειάζεται πιθανώς να εισαχθούν **κατάλληλοι μειωτικοί συντελεστές** για τους συνδετήρες και τις πλάκες που σχετίζονται με τις μέσες τάσεις που αναπτύσσονται τοπικά στα δύο υλικά και το μέγεθος ανοίγματος ρωγμής.
- Ο **συνδυασμός ηλεκτροσυγκόλλησης και αγκυρίων** μπορεί να είναι αποτελεσματικό μέσο για την αποτροπή της αποκόλλησης των πλακών, τον **περιορισμό** της σχετικής **στροφής** του κορμού του τοιχείου αλλά και τη **μείωση του εκτός επιπέδου λυγισμού** των ακραίων θλιβόμενων ράβδων.
- Η αποτελεσματικότητα της τεχνικής πρέπει να ελεγχθεί σε τοιχώματα με διαφορετικό λόγο διάτμησης και ενδεχόμενα με προσθήκη **μηχανικών μέσων σταθεροποίησης ή αγκύρωσης των ελασμάτων** έναντι ηλεκτροσυγκόλλησης.
- Πέραν τούτων, μείζονος σημασίας είναι η **εργασιμότητα** και **οικονομικότητα** της μεθόδου εξωτερικής επέμβασης που θα επιλεγεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] P. A. Hidalgo, C. A. Ledezma και R. M. Jordan, «Seismic behavior of squat reinforced concrete shear walls,» *Earthquake Spectra*, τόμ. 18, αρ. 2, pp. 287-308, 2002.
- [2] H. Beck, «Contribution to the analysis of coupled shear walls,» *Proc. J. Am. Concr. Inst.*, τόμ. 59, pp. 1055-1070, 1962.
- [3] R. Rosman, «Approximate analysis of shear walls subjected to lateral loads,» *Proc. J. Am. Concr. Inst.*, τόμ. 61, pp. 717-733, 1964.
- [4] M. Fintel, «Ductile shear walls in earthquake resistant multistory buildings,» *ACI Structural Journal*, τόμ. 71, αρ. 19, pp. 296-305, 1974.
- [5] T. Paulay, M. N. Priestley και A. J. Synges, «Ductility in Earthquake Resisting Squat Shearwalls,» *ACI Structural Journal*, τόμ. 79, αρ. 4, pp. 257-269, 1982.
- [6] T. N. Salonikios, «Shear strength and deformation patterns of R/C walls with aspect ratio 1.0 and 1.5 designed to Eurocode 8 (EC8),» *Engineering Structures*, τόμ. 24, pp. 39-49, 2002.
- [7] A. Coull και B. Stafford Smith, «Tall buildings structures: analysis and design,» 1991.
- [8] T. Paulay και M. N. Priestley, «Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings,» *Wiley Interscience Press Publication*, 1992.
- [9] European Committee for Standardization, «Eurocode 8 (Design of structures for earthquake resistance) Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. EN 1998-1:2004,» 2004.
- [10] T. Salonikios, I. Tegos, A. Kappos και G. Penelis, «Squat RC Walls Under Inelastic Shear Reversals,» *11th World Conference on Earthquake Engineering Paper No. 749*.
- [11] T. N. Salonikios, A. J. Kappos, I. A. Tegos και G. G. Penelis, «Cyclic load behavior of lowslenderness R/C walls: failure modes, strength and deformation analysis, and design implications,» *ACI Structural Journal*, τόμ. 97, αρ. 1, pp. 132-141, 2000.

- [12] Θ. Ν. Σαλονικιός και Η. Γ. Δημητρακόπουλος, «Προσομοίωση της Αλληλεπίδρασης Μεταξύ Κάμψης και Διάτμησης στις Κρίσιμες Περιοχές Τοιχωμάτων».
- [13] T. Paulay, «The design of ductile reinforced concrete structural walls for earthquake resistance,» *Earthquake Spectra*, τόμ. 2, αρ. 4, pp. 318-337, 1986.
- [14] I. Lefas, M. Kotsovos και N. Ambraseys, «Behavior of reinforced concrete structural walls: strength, deformation characteristics, and failure mechanisms,» *ACI Structural Journal*, τόμ. 87, αρ. 1, pp. 23-31, 1990.
- [15] C. Greifenhagen και P. Lestuzzi, «Static Cyclic Tests on Lightly Reinforced Concrete Shear Walls,» *Engineering Structures*, τόμ. 27, pp. 1703-1712, 2005.
- [16] J. S. Kuang και Y. B. Ho, «Seismic Behavior and Ductility of Squat Reinforced Concrete Shear Walls with Nonseismic Detailing,» *ACI Structural Journal*, τόμ. 105, αρ. 2, pp. 225-231, 2008.
- [17] S. L. Wood, «Shear Strength of Low-Rise Reinforced Concrete Walls,» *ACI Structural Journal*, τόμ. 87, αρ. 1, pp. 99-107, 1990.
- [18] K. C. Gulek και A. S. Whittaker, «Shear Strength of Squat Rectangular Reinforced Concrete Walls,» *ACI Structural Journal*, τόμ. 105, αρ. 4, pp. 488-497, 2008.
- [19] K. C. Gulek και A. S. Whittaker, «Empirical Equations for Peak Shear Strength of Low Aspect Reinforced Concrete Walls,» *ACI Structural Journal*, τόμ. 108, αρ. 1, pp. 80-89, 2011.
- [20] M. Priestley, R. Verma και Y. Xiao, «Seismic shearstrength of reinforced concrete columns,» *Journal of Structural Engineering*, τόμ. 120, αρ. 8, pp. 2310-2329, 1994.
- [21] M. Priestley, G. M. Calvi και M. J. Kowalsky, «Displacement based seismic design of structures,» *IUSS Press*, p. 720, 2007.
- [22] J. Krolicki, J. Maffei και G. M. Calvi, «Shear Strength of Reinforced Concrete Walls Subjected to Cyclic Loading,» *Journal of Earthquake Engineering*, τόμ. 15, αρ. 1, pp. 30-71, 2011.
- [23] M. N. Fardis και T. B. Panagiotakos, «Deformations of Reinforced Concrete Members at Yielding and Ultimate,» *ACI Structural Journal*, τόμ. 98, αρ. 2, pp. 135-148, 2001.

-
- [24] D. Biskinis, G. Roupakias και M. N. Fardis, «Degradation of shear strength of RC members with inelastic cyclic displacements,» *ACI Structural Journal*, τόμ. 101, αρ. 6, pp. 773-783, 2004.
- [25] European Committee for Standardization, «Eurocode 8 (Design of structures for earthquake resistance) Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. EN 1998-3:2005,» 2005.
- [26] «ΠΡΟΣΩΡΙΝΕΣ ΕΘΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ (ΠΕΤΕΠ, 14-01-13-01),» Έκδοση 1.0-Μάιος 2006.
- [27] Δ. Μπισκίνης, «Αντοχή και ικανότητα παραμόρφωσης μελών οπλισμένου σκυροδέματος με ή χωρίς ενίσχυση,» *Διδακτορική διατριβή*, 2007.
- [28] M. Priestley και M. J. Kowalski, «Direct displacement based seismic design of concrete buildings,» *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, τόμ. 33, αρ. 4, pp. 403-420, 2000.
- [29] H. Hiraishi, «Evaluation of Shear and Flexural Deformations of Flexural Type Shear Walls,» σε *Third South Pacific Regional Conference on Earthquake Engineering*, Wellington, 1983.
- [30] European Committee for Standardization, «Eurocode 2 (Design of concrete structures) Part 1-1: General rules for buildings. E.N 1992-1-1:2004,» 2004.
- [31] M. N. Fardis, «Seismic design, assessment and retrofitting of concrete buildings-based on EN-Eurocode 8,» *Springer*, τόμ. 8, 2009.
- [32] B. S. S. Council, Επιμ.«NEHRP Handbook of Techniques for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings,» *National Earthquake Hazards Reduction Program*, 1992.
- [33] A. S. Elnashai και R. Pinho, «Repair and Retrofitting of RC Walls using selective techniques,» *Journal of Earthquake Engineering*, τόμ. 2, αρ. 4, pp. 525-568, 1998.
- [34] M. Z. Jumaat, M. A. Rahman, M. A. Alam και M. M. Rahman, «Premature failures in plate bonded strengthened RC beams with an emphasis on premature shear: A review,» *International Journal of the Physical Sciences*, τόμ. 6, αρ. 2, pp. 156-168, 18 January 2011.
- [35] A. Khalifa, W. J. Gold και M. I. AbdelAziz, «Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of Flexural Members,» *ASCE-Journal of Composites for Construction*, τόμ. 2, αρ. 4, pp. 195-203, November 1998.
-

- [36] J. Lombard, D. T. Lau, J. L. Humar, S. Foo και M. S. Cheung, «Seismic Strengthening and Repair of Reinforced Concrete Shear Walls,» *12th World Conference on Earthquake Engineering*.
- [37] J. Maier και B. Thürlimann, «Bruchversuche an Stahlbetonscheiben,» *Bericht / Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich Nr. 8003-1*, 1985.
- [38] R. G. Oesterle, J. D. Aristizabal-Ochoa, A. E. Fiorato, H. G. Russell και W. G. Corley, «Earthquake Resistant Structural Walls-Tests of Isolated Walls-Phase II,» *Report to National Science Foundation, Grant. No. ENV77-15333*, October 1979.
- [39] R. G. Oesterle, A. E. Fiorato, L. S. Johal, J. E. Carpenter, H. G. Russell και W. G. Corley, «Earthquake Resistant Structural Walls-Tests of Isolated Walls,» *Report to National Science Foundation (RANN), Grant No. GI-43880*, November 1976.
- [40] K. Pilakoutas και S. A. Elnashai, «Cyclic Behavior of Reinforced Concrete Cantilever Walls, Part II: Discussions and Theoretical Comparisons,» *ACI Structural Journal*, τόμ. 92, αρ. 4, pp. 425-433, 1995.
- [41] Θ. Π. Τάσιος, Π. Ι. Γιαννόπουλος, Κ. Γ. Τρέζος και Ι. Γ. Τσουκαντάς, «Οπλισμένο Σκυρόδεμα,» 1998.
- [42] Θ. Τάσιος, Ε. Βιντζηλαίου, Π. Γιαννόπουλος, Π. Πλαίνης, Ι. Σιγάλας, Κ. Τρέζος και Σ. Τσουκαντάς, «Σημειώσεις για τις Κατασκευές από ΩΣ,» 2003.
- [43] Θ. Σαλονικιός, «Πειραματική έρευνα της συμπεριφοράς τοίχων ΩΣ με λόγο διάτμησης 1 και 1.5 με συμβατικές και μη συμβατικές διατάξεις όπλισης υπό ανακυκλιζόμενη οριζόντια φόρτιση (πειραματική και αναλυτική παραμετρική μελέτη,» *Διδακτορική διατριβή*, 1998.
- [44] Γ. Παναγόπουλος και Α. Κάππος, «Διγραμμική προσέγγιση διαγραμμάτων μεγεθών δυνάμεων – παραμορφώσεων,» σε *16ο Συνέδριο Σκυροδέματος*, Πάφος, Κύπρος, 2009.
- [45] Χ. Γ. Καραγιάννης, «Σχεδιασμός Κατασκευών από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα Έναντι Σεισμού».
- [46] Α. Κανελλόπουλος, «Αντισεισμικός Σχεδιασμός και Ενισχυση Κτιριων απο Οπλισμενο Σκυροδεμα».
- [47] Σ. Ε. Γραμματικού, «Αντοχή, ικανότητα παραμόρφωσης και τρόποι αστοχίας τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος υπό σεισμική φόρτιση,» *Διατριβή μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης*, 2013.

-
- [48] A. A. Tasnimi, «Strength and deformation of mid-rise shear walls under load reversal,» *Engineering Structures*, τόμ. 22, pp. 311-322, 2000.
- [49] . S. Takahashi, K. Yoshida, T. Ichinose, Y. Sanada, K. Matsumoto, H. Fukuyama και H. Suwada, «Flexural Drift Capacity of Reinforced Concrete Wall with Limited Confinement,» *ACI Structural Journal*, January-February 2013.
- [50] M. Taghdi, M. Bruneau και M. Saatcioglu, «Seismic retrofitting of low-rise masonry and concrete walls using steel strips,» *Journal of Structural Engineering*, September 2000.
- [51] T. N. Salonikios, A. J. Kappos και G. G. Penelis, «Cyclic load behavior of lowslenderness R/C walls: design basis and test results,» *ACI Structural Journal*, τόμ. 96, αρ. 4, pp. 649-660, 1996.
- [52] S. L. Wood, «Performance of reinforced concrete buildings during the 1985 Chile earthquake: implications for the design of structural walls,» *Earthquake Spectra*, τόμ. 7, αρ. 4, pp. 607-637, 1991.
- [53] T. Paulay και R. L. Williams, «The analysis and design of the evaluation of design actions for reinforced concrete ductile shear walls,» *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, τόμ. 13, αρ. 2, pp. 108-143, 1980.
- [54] Δ.-Σ. Παπαϊωάννου, «Πειραματική διερεύνηση συμπεριφοράς ανεπαρκώς οπλισμένων τοιχωμάτων από Σκυρόδεμα,» *Διπλωματική Εργασία*, Ιούλιος 2013.
- [55] Ο.Α.Σ.Π., «ΚΑΝ.ΕΠΕ. (ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ), 1η Αναθεώρηση Ιούλιος 2013».
- [56] Γ. Ν. Ψυχάρης, «Αντισεισμικός σχεδιασμός με στάθμες επιτελεστικότητας,» 2010.
- [57] M. Priestley, «Performance based seismic design,» σε *Proceedings of 12th World conference on earthquake engineering*, Auckland, New Zealand, 2000.
- [58] R. Park και T. Paulay, «Reinforced Concrete Structures,» 1975.
- [59] M. J. N. Priestley, F. Seible και G. M. Calvi, «Seismic Design and Retrofit of Bridges,» 1996.
- [60] K. Beyer, A. Dazio και M. J. N. Priestley, «Shear Deformations of Slender Reinforced Concrete Walls under Seismic Loading,» *ACI Structural Journal*, March-April 2011.
-

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΜΕΘΟΔΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

Πέραν των αναλυτικών και πειραματικών μεθόδων αποτίμησης της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς των δοκιμίων, ένας ακόμη τρόπος εποπτείας είναι μέσω λήψης φωτογραφικών στιγμιότυπων στις διαδοχικές φάσεις επιβολής παραμορφώσεων κατά την πειραματική διαδικασία. Σε χαρακτηριστικές θέσεις επάνω στα δοκίμια τοποθετήθηκαν σημεία-στόχοι που χρησιμοποιήθηκαν για την σχεδίαση ενός πλέγματος (καννάβου) επί του δοκιμίου μέσω χρήσης προγράμματος Autocad. Η κλίμακα σε κάθε φωτογραφία διατηρήθηκε σταθερή. Από τις συντεταγμένες x και y των σημείων μετρήθηκαν οι μεταξύ τους αποστάσεις και από κέντρο σε κέντρο στόχου χάραχθηκαν γραμμές μήκους όσο η διαφορά των συντεταγμένων των δυο σημείων που ορίζουν την κάθε γραμμή. Έχοντας ως σημείο αναφοράς τις διαστάσεις του φορέα σε ένα στάδιο φόρτισης, οι σχετικές ανηγμένες παραμορφώσεις από κύκλο σε κύκλο θετικών ή αρνητικών μετατοπίσεων μετρήθηκαν ως $\varepsilon = \Delta L / L = L_i - L_j / L_j$, όπου L_j η απόσταση δυο σημείων για μετατόπιση $p_x + 10\text{mm}$ και L_i η απόσταση των ίδιων σημείων για μετατόπιση στο στάδιο των $+20\text{mm}$. Αν η μέθοδος ήταν ακριβής, η ποσότητα ΔL για τη μετατόπιση ενός στόχου στην κορυφή του τοίχου από κύκλο σε κύκλο θα έπρεπε να προκύπτει ίση με 10mm (τα στιγμιότυπα λαμβάνονται για επιβαλλόμενη μετατόπιση $0, +10, +20, +30, +40, +50$ και $0, -10, -20, -30, -40, -50$ αντίστοιχα). Ακόμη, μέσω μέτρησης των σχετικών παραμορφώσεων μεταξύ ακραίων στηλών (αριστερή και δεξιά παρειά) παράλληλων στο διαμήκη άξονα, μπορεί να εκτιμηθεί η καμπυλότητα σε διάφορες διατομές καθ' ύψος. Για να μπορέσει ωστόσο να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα η μέθοδος πρέπει να τηρούνται με αυστηρότητα κάποιες προϋποθέσεις:

- ❖ Σταθερή τοποθέτηση της μηχανής σε μια θέση μέχρι το τέλος του πειράματος και προσεκτική λήψη των στιγμιότυπων ώστε να μην εκτρέπεται καθόλου από τη θέση της.
- ❖ Καθετότητα της γωνίας λήψης με τις δυο όψεις του δοκιμίου. Ακόμη ωστόσο και αν επιτυγχάνεται η καθετότητα ώστε να μην διαστρεβλώνονται οι εντός και εκτός επιπέδου διαστάσεις του τοιχίου, η αναπόφευκτη εκτός επιπέδου φόρτισης στροφή αλλά και η πιθανή περι τον διαμήκη άξονα στροφή καθιστούν ανακριβείς τις μετρούμενες οριζόντιες και κάθετες βραχύνσεις και επιμηκύνσεις στις διάφορες περιοχές του δοκιμίου. Για το λόγο αυτό οι μετρήσεις δεν έδωσαν ρεαλιστικά αποτελέσματα (πχ. προέκυψαν βραχύνσεις εκεί όπου θα έπρεπε να προκύπτει εφελκυσμός και αντίστροφα προέκυψαν επιμηκύνσεις στη θλιβόμενη παρειά).

Δίνονται ωστόσο τα αποτελέσματα της επεξεργασίας και ο τρόπος χρήσης των φωτογραφιών στο Autocad για τη μέτρηση των ανηγμένων παραμορφώσεων. Σημειώνεται πως δεν έγινε αναγωγή της κλίμακας του Autocad στην πραγματική, για ελαχιστοποίηση της ανακρίβειας των μετρήσεων (οι φωτογραφίες είχαν όλες τις ίδιες

διαστάσεις και οι συντεταγμένες (κλίμακα) ορίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα χωρίς να παραλλάσσει τις διαστάσεις των φωτογραφιών). Γι' αυτό και μετρήθηκαν οι ανηγμένες παραμορφώσεις αντί της διαφοράς μηκών.

W8

| | ΜΗΚΗ (κλίμακα Autocad) | | | | | | W8 | ΑΝΗΓΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ | | | | | |
|----|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----|
| | 0 | +10 | +20 | +30 | +40 | +50 | | 10 με 0 | 20 με 10 | 30 με 20 | 40 με 30 | 50 με 40 | |
| a | 0,3992 | 0,3996 | 0,3997 | 0,4002 | 0,3996 | 0,4006 | ΔL/L | 0,001 | 0,000 | 0,001 | -0,001 | 0,003 | a |
| b | 0,4012 | 0,4003 | 0,4008 | 0,4007 | 0,4008 | 0,4074 | | -0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,016 | b |
| 1 | 0,2377 | 0,2371 | 0,2375 | 0,2376 | 0,2381 | 0,2400 | | -0,003 | 0,002 | 0,000 | 0,002 | 0,008 | 1 |
| 2 | 0,2380 | 0,2373 | 0,2376 | 0,2377 | 0,2381 | 0,2398 | | -0,003 | 0,001 | 0,000 | 0,002 | 0,007 | 2 |
| 3 | 0,2278 | 0,2371 | 0,2377 | 0,2377 | 0,2379 | 0,2399 | | 0,041 | 0,003 | 0,000 | 0,001 | 0,008 | 3 |
| 4 | 0,2384 | 0,2378 | 0,2382 | 0,2382 | 0,2383 | 0,2402 | | -0,003 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,008 | 4 |
| 5 | 0,2382 | 0,2379 | 0,2381 | 0,2381 | 0,2383 | 0,2401 | | -0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,008 | 5 |
| 6 | 0,2391 | 0,2387 | 0,2389 | 0,2388 | 0,2389 | 0,2406 | | -0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,007 | 6 |
| 7 | 0,2378 | 0,2378 | 0,2379 | 0,2381 | 0,2381 | 0,2397 | | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,007 | 7 |
| 8 | δεν διακρίνονται οι στόχοι | | 0,2216 | 0,2212 | 0,2211 | 0,2222 | | | | -0,002 | 0,000 | 0,005 | 8 |
| 9 | 0,2196 | 0,2194 | 0,2196 | 0,2195 | 0,2195 | 0,2206 | | -0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 9 |
| 10 | 0,2373 | 0,2373 | 0,2373 | 0,2374 | 0,2373 | 0,2385 | | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 10 |
| 11 | 0,2371 | 0,2369 | 0,2371 | 0,2372 | 0,2370 | 0,2388 | | -0,001 | 0,001 | 0,000 | -0,001 | 0,008 | 11 |
| 12 | 0,2381 | 0,2380 | 0,2381 | 0,2382 | 0,2380 | 0,2397 | | 0,000 | 0,000 | 0,000 | -0,001 | 0,007 | 12 |

Στην παρακάτω εικόνα δίνεται το πλέγμα σημείων που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε κύκλο για τη μέτρηση των παραπάνω μηκών και παραμορφώσεων. Το σύμβολο 00 κάτω αριστερά δηλώνει ότι το συγκεκριμένο στιγμιότυπο λήφθηκε πριν ξεκινήσει η διαδικασία (φόρτιση $\pm 0,0\text{mm}$). Μετρήθηκαν και συγκρίθηκαν σε κάθε κύκλο τα μήκη των στηλών a και b και των γραμμών 1, 2, 3, 4 κ.λ.π. Η ίδια διαδικασία εφαρμόστηκε και για το δοκίμιο W10.

