



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Πειραματική διερεύνηση συμπεριφοράς ανεπαρκώς οπλισμένων τοιχωμάτων από Σκυρόδεμα



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παπαϊωάννου Δημήτριος-Στυλιανός

Επιβλέπων Καθηγητής:

Κ. Τρέζος

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2013

Ευχαριστίες

Θερμές ευχαριστίες στον Επιβλέπων Καθηγητή Κωνσταντίνο Τρέζο για τη δυνατότητα δημιουργίας του παρόντος πονήματος καθώς και για την επιστημονική καθοδήγηση που μου προσέφερε.

Ξεχωριστές και εγκάρδιες ευχαριστίες στον υποψήφιο Διδάκτορα Κωνσταντίνο Χριστίδη με τον οποίο πορεύτηκα καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Υπήρξε πάντα πρόθυμος να με βοηθήσει ενώ συντόνισε εξαιρετικά την πειραματική διαδικασία.

Ιδιαίτερη μνεία στον αειθαλή, μηχανουργό κ. Παναγιώτη Παπανδρέου καθώς βοήθησε σημαντικά στο στήσιμο της πειραματικής διάταξης.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	i
Περιεχόμενα.....	ii
Περίληψη	v
Abstract.....	vi
Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 1	
Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	3
1.1 Εισαγωγή.....	3
1.2 Συμπεριφορά τοιχίων Ο/Σ.....	4
1.3 Αποτίμηση μελών Ο/Σ.....	7
Κεφάλαιο 2	
Παραδοχές EC2, EC8 και ΚΑΝ.ΕΠΕ.....	8
2.1 Εισαγωγή.....	8
2.2 Παραδοχές EC2	8
2.2.1 Σκυρόδεμα	8
2.2.2 Χάλυβας Οπλισμών	10
2.2.3 Κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη.....	11
2.2.4 Διάτμηση	12
2.3 Παραδοχές ΚΑΝ.ΕΠΕ- EC8.....	13
2.3.1 Καμπύλη εντατικού μεγέθους-παραμόρφωσης “F-δ”	13
2.3.2 Ροπή και καμπυλότητα στη διαρροή	15
2.3.3 Ροπή και καμπυλότητα στην αστοχία.....	17
2.3.4 Παραμόρφωση στη διαρροή- Ενεργός δυσκαμψία	19
2.3.5 Πλαστική-Συνολική γωνία στροφής χορδής στην αστοχία.....	21
2.3.6 Παραμόρφωση αστοχίας-πλαστιμότητα.....	25
2.3.7 Πλάστιμη-ψαθυρή συμπεριφορά.....	25

2.3.8 Διατμητική αντοχή-αστοχία από τέμνουσα.....	26
Κεφάλαιο 3	
Περιγραφή δοκιμών.....	29
3.1 Εισαγωγή.....	29
3.2 Στάδιο κατασκευής-Χαρακτηριστικά δοκιμών	29
Κεφάλαιο 4	
Υπολογισμός αντοχών δοκιμών.....	41
4.1 Εισαγωγή.....	41
4.2 Ιδιότητες υλικών	41
4.2.1 Σκυρόδεμα	41
4.2.2 Χάλυβας Οπλισμών	43
4.3 Καμπτική αντοχή	47
4.4 Καμπτική Διαρροή-Ενεργός Δυσκαμψία.....	49
4.5 Γωνίες Στροφής- Αναπτυχθείσα Πλαστιμότητα.....	50
4.6 Διατμητική αντοχή.....	55
Κεφάλαιο 5	
Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα	57
5.1 Εισαγωγή.....	57
5.2 Πειραματική διαδικασία	57
5.2.1 Πειραματική διάταξη.....	57
5.2.2 Διάταξη βελομέτρων	58
5.3 Πειραματικά αποτελέσματα.....	61
Κεφάλαιο 6	
Συμπεράσματα	84
Βιβλιογραφία	86
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	
Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά και αντοχές δοκιμών.....	A-1

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Αναλυτικός υπολογισμός αντοχών δοκιμίωνB-1

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Αναλυτικός υπολογισμός καμπυλοτήτων και γωνιών στροφής χορδής στη διαρροή και στην αστοχία.....Γ-1

Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς τοιχωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα και η εξαγωγή συμπερασμάτων μέσω της σύγκρισης της ανάλυσης με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Κατασκευάστηκαν για το λόγο αυτό έξι τοιχία, τα τρία εκ των οποίων εξετάζονται σε πειραματικό στάδιο και υπολογίζονται οι αντοχές και οι πλαστιμότητες παραμορφώσεων τους σύμφωνα με τις υποδείξεις των σύγχρονων κανονισμών (KAN.ΕΠΕ, EC2, EC8).

Στο 1^ο κεφάλαιο περιγράφεται η συμπεριφορά τοιχίων από οπλισμένο σκυρόδεμα και γίνεται παράλληλα μία προσπάθεια αποτίμησης, όπως προκύπτει από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παραδοχές των σύγχρονων κανονισμών (EC2, EC8, ΚΑΝ.ΕΠΕ) οι οποίες χρησιμοποιούνται για την κατανόηση της αντισεισμικής συμπεριφοράς των έξι τοιχωμάτων.

Στο 3^ο κεφάλαιο αναλύονται τα στάδια κατασκευής των τοιχίων (T7 έως T12) και εκθέτονται τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ιδιότητες των υλικών (χάλυβα-σκυροδέματος) που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των έξι τοιχωμάτων και παρατίθενται οι μεθοδολογίες των κανονισμών που εφαρμόστηκαν για την αποτίμηση της αντισεισμικής συμπεριφοράς τους.

Στο 5^ο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία για τα τρία τοιχία από οπλισμένο σκυρόδεμα (T7, T9, T11) που έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής.

Στο 6^ο κεφάλαιο εξάγονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματά της μέσω της σύγκρισής τους με τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Τέλος στα δύο παραρτήματα Α,Β,Γ της διπλωματικής αυτής παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των αντοχών των έξι τοιχίων και παρατίθενται οι αναλυτικοί υπολογισμοί διατμητικής αντοχής, της ροπής αντοχής (EC2-EC8, ΚΑΝ.ΕΠΕ), της ροπής διαρροής (ΚΑΝ.ΕΠΕ-EC2) και των γωνιών στροφής χορφής στη διαρροή και την αστοχία (ΚΑΝ.ΕΠΕ- EC8-Part 3).

Abstract

The main purpose of the present thesis is to assess the seismic behavior of reinforced concrete walls and draw conclusions by comparing the analysis with experimental results. Six walls were constructed for this reason, three of which are being tested experimentally, their strength and ductility deformation are calculated according to the instructions of modern codes (KAN.EPE, EC2, EC8).

In chapter 1, the behavior of reinforced concrete walls is described and an attempt of valuation is performed, according to the literature.

In chapter 2, assumptions of modern codes (KAN.EPE, EC2, EC8) are presented, which are used for understanding the seismic behavior of the six wall models.

In chapter 3, the stages of wall models construction (T7 to T12) are analyzed and their geometrical and mechanical characteristics are exhibited.

In chapter 4, the properties of materials (steel-concrete) used for the construction of the six walls are shown and the methodologies of regulations applied to assess the seismic behavior are presented.

In chapter 5, the experimental procedure for the three walls of reinforced concrete (T7, T9, T11) that took place at the Laboratory of Reinforced Concrete of NTUA is –fully detailed- described and the results are presented.

In chapter 6, the conclusions arising from the comparison between the results of the experimental procedure and the analysis are shown.

Finally in the three annexes A, B, C of this thesis the aggregated results of the strength of the six walls and the most detailed calculations of shear strength, resistance moment, yield moment (EC2-EC8, KAN.EPE) and chord rotation at ultimate and yield are presented (KAN.EPE, EC8-Part 3).

Εισαγωγή

Η παρουσία τοιχίων οπλισμένου σκυροδέματος στις κατασκευές είναι πολύ σημαντική, δεδομένου ότι αποτελούν ένα σύστημα ικανό να συμβάλει στην παραλαβή των σεισμικών δυνάμεων. Η διάταξη οπλισμού των τοιχίων, σύμφωνα με τους σύγχρονους κανονισμούς, όπως οι Ευρωκώδικες 2 και 8, χαρακτηρίζεται από την διαμόρφωση ακραίων περισφιγμένων υποστυλωμάτων και συγκεκριμένα ποσοστά διαμήκους και οριζόντιου οπλισμού κορμού, τα οποία εξασφαλίζουν ότι η καμπτική αστοχία θα προηγείται της διατμητικής.

Εντούτοις, σε πολλές χώρες με υψηλή σεισμική έκθεση, όπως η Ελλάδα, υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός υπαρχουσών κατασκευών, που έχουν σχεδιαστεί σύμφωνα με παλαιότερους κανονισμούς (προ του 1985), οι οποίες περιλαμβάνουν τοιχία σχεδιασμένα να μην εμπεριέχουν περισφιγμένα άκρα και να διαμορφώνουν μικρά ποσοστά οριζόντιου οπλισμού (συνδετήρες). Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητο να ερευνηθεί η σεισμική συμπεριφορά αυτών των τοιχίων οπλισμένου σκυροδέματος προκειμένου να αποφασιστεί, εάν είναι απαραίτητο, η κατάλληλη μέθοδος ενίσχυσης.

Η σημασία της αξιολόγησης και του επανασχεδιασμού των υπαρχόντων κτιρίων καταδεικνύεται και από την παρουσία κανονισμών αποτίμησης και ενισχύσεων, όπως και ο Ευρωκώδικας 8 (Μέρος 3), άλλα και ο ελληνικός Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ), οι οποίοι περιέχουν συγκεκριμένες διατάξεις για τη αξιολόγηση και την επέμβαση έναντι σεισμικών δράσεων. Η εφαρμογή των διατάξεων ενίσχυσης απαιτεί την επαρκή σεισμική αποτίμηση των δομικών μελών του υπάρχοντος κτιρίου, όπως τα τοιχία, των οποίων η σεισμική συμπεριφορά δεν αξιολογείται μόνο σε όρους αντοχής, αλλά και σε όρους πλαστιμότητας και ακαμψίας, παρέχοντας, επομένως, μια συνολική εικόνα για τους ενδεχόμενους τύπους αστοχίας και τις μορφές ρωγμών.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αποτελεί τμήμα μιας ευρύτερης έρευνας που πραγματοποιείται στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του ΕΜΠ και αφορά τη μελέτη της συμπεριφοράς και την ενίσχυση ανεπαρκώς οπλισμένων τοιχίων Ο/Σ, δηλαδή τοιχίων παλαιότερων υφιστάμενων κατασκευών. Ωστόσο, η παρούσα εργασία αναφέρεται μόνο στο κομμάτι της αποτίμησης της συμπεριφοράς των τοιχίων και όχι στην ενίσχυση αυτών. Οι μορφές αστοχίας και τα επίπεδα πλαστιμότητας, σε όρους μετακίνησης και στροφής γωνίας χορδής, που αναπτύσσουν τα τοιχία, η επιρροή των περισφιγμένων άκρων στην ανάπτυξη πλαστιμότητας, η

μείωση της ακαμψίας, είναι μερικά από τα εξεταζόμενα ζητήματα. Τα αναλυτικά και πειραματικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 2 και 8 (Μέρος 1 και Μέρος 3) αλλά και με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Κεφάλαιο 1

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1.1 Εισαγωγή

Η συμβολή των τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος στην αντίσταση έναντι σεισμικών φορτίων αρχίζει να γίνεται ευρέως αναγνωρίσιμη τη δεκαετία του 70'. Ξεκινούν, στις αρχές της δεκαετίας αυτής, εμπειριστατωμένες έρευνες, κατά κύριο λόγο στις ΗΠΑ, με θέμα τη διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς αυτών των μελών.

Ο συντονισμός των προσπαθειών την περίοδο αυτή στοχεύει στην αναδιαμόρφωση των ισχυόντων κανονισμών, στόχος ο οποίος θα επιτευχθεί τις επόμενες δύο δεκαετίες. Αναβαθμίζονται οι κανονισμοί σύμφωνα με αποτελέσματα μελετών οι οποίες, στηρίζονται σε δύο βασικές μεθοδεύσεις. Αφενός, η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς πραγματοποιείται σε όρους δυνάμεων αφετέρου τα συμπεράσματα που προκύπτουν και που εισάγονται στους πλέον σύγχρονους κανονισμούς, διαμορφώνουν διατάξεις σχεδιασμού μελών και όχι αποτίμησης. Τα παραμορφωσιακά στοιχεία των μελών ξεκινούν να λαμβάνονται υπόψη από τις αρχές της δεκαετίας του 80' όταν το 1984 (με τα πρόσθετα άρθρα του Β.Δ. 59) υιοθετούνται διατάξεις οι οποίες ακόμη και σήμερα συνιστούν το θεμέλιο των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών.

Οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί εστιάζουν πλέον εκτός από το σχεδιασμό μελών οπλισμένου σκυροδέματος και στην αποτίμηση- ανασχεδιασμό των ήδη υφιστάμενων μελών. Οι νεότερες αντιλήψεις περί ανάλυσης δεν εκτιμούν μόνο τα εντατικά μεγέθη που μπορεί ένα μέλος να αναλάβει αλλά επικεντρώνονται και στην εκτίμηση των παραμορφωσιακών μεγεθών που μπορούν να αναπτύξουν. Τα αποτελέσματα των πιο σύγχρονων ερευνών και η διαμόρφωση των αντίστοιχων προσομοιωμάτων συμπεριλαμβάνονται στους σύγχρονους κανονισμούς περί αποτίμησης και ανασχεδιασμού (EC8-Part3, ΚΑΝ.ΕΠΕ, ATC-40 κ.ά.) οι οποίοι βασίζονται στον προσδιορισμό των παραμορφωσιακών χαρακτηριστικών των μελών.

Ο ανασχεδιασμός υφιστάμενων μελών οπλισμένου σκυροδέματος περιλαμβάνει επισκευές και μεθοδολογίες ενισχύσεων τους όπως η τοποθέτηση μανδύων αλλά και νεότερες μέθοδοι ενίσχυσης όπως τα ΙΟΠ. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει ένας

μεγάλος αριθμός μελετών για ενίσχυση υποστρωμάτων και δοκών σε αντίθεση με τον περιορισμένο όγκο διερευνήσεων πάνω στην ενίσχυση τοιχίων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα πειράματα πάνω σε τοιχώματα που περιλαμβάνουν ενίσχυση είναι συνεπώς περιορισμένα ενώ τα περισσότερα περιλαμβάνουν τοιχώματα πάνω στη λογική των σύγχρονων κανονισμών (διαμόρφωση κρυφοϋποστρωμάτων, πυκνός διατμητικός οπλισμός). Στη συνέχεια αναφέρονται άρθρα από τη διεθνή βιβλιογραφία καθώς και προσομοιώματα τα οποία εφαρμόστηκαν στην παρούσα διπλωματική.

1.2 Συμπεριφορά τοιχίων Ο/Σ

Η μελέτη της συμπεριφοράς τοιχίων οπλισμένου σκυροδέματος είναι ιδιαίτερα σημαντική γι' αυτό και έχει απασχολήσει τη διεθνή βιβλιογραφία ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 80. Τα τοιχώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα αντιπροσωπεύουν ένα από τα πιο διαδεδομένα συστήματα αντιστήριξης για κτίρια. Μετασεισμικές αναγνωριστικές αποστολές καταγράφουν εκπληκτικά καλή συμπεριφορά κτιρίων κατασκευασμένων με τοιχία ενώ από την εκτίμηση των υπάρχοντων κτιρίων σύμφωνα με μοντέρνα πρότυπα συχνά συμπεραίνεται πως δεν υπάρχουν επαρκή περιθώρια ασφαλείας. Ειδικότερα η μελέτη **ανεπαρκώς** οπλισμένων τοιχίων έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα, αλλά σε μικρότερο βαθμό.

Μία από τις πρώτες μελέτες πάνω στη συμπεριφορά τοιχίων οπλισμένου σκυροδέματος είναι αυτή των *Paulay et al. (1982)*, η οποία θίγει θέματα όπως η ανάπτυξη πλαστιμότητας, η παρουσία του διαγώνιου οπλισμού και το φαινόμενο της διατμητικής ολίσθησης, ένα φαινόμενο με το οποίο ασχολήθηκαν εκ των υστέρων και άλλες μελέτες (*Salonikios, 2002*). Η μελέτη της συμπεριφοράς των τοιχίων, των παραμορφωσιακών χαρακτηριστικών τους και των τρόπων αστοχίας τους μελετήθηκαν και στην συνέχεια (*Lefas et al. 1990, Lefas and Kotsovos 1990, Salonikios et al. 1999, Salonikios et al., 2000, Salonikios, 2002*). Οι τύποι αστοχίας περιγράφουν τη φυσική αιτία διάρρηξης ενός δομικού στοιχείου. Εξαιτίας της διαφορετικότητας των χαρακτηριστικών του χάλυβα οπλισμού και του σκυροδέματος, μπορεί να συμβούν διάφοροι τύποι αστοχίας που έχουν άμεση σχέση με παραμέτρους όπως ο τύπος της διατομής, οι λεπτομέρειες και η ποσότητα των οπλισμών, οι ιδιότητες του χάλυβα οπλισμού, η θλιπτική δύναμη σκυροδέματος κ.ά (*Christian Greifenhagen, Pierino Lestuzzi*). Οι *Paulay et al. [7]* έχουν καταγράψει αστοχίες κοντών τοιχίων τα οποία είναι πιθανό να αστοχήσουν σε τέμνουσα.

Επομένως, αστοχία λόγω διαγώνιας εντάσεως μπορεί να πραγματοποιηθεί όταν σχηματισθεί μια, από γωνία σε γωνία, διαγώνια ρωγμή στην περίπτωση ανεπαρκούς ποσότητας οριζόντιου οπλισμού. Επιπρόσθετα, τοιχία με επαρκή ποσότητα οριζόντιου οπλισμού και με μεγάλη καμπτική ικανότητα τα οποία υποβάλλονται σε κυκλική φόρτιση, μπορεί να αστοχήσουν σε διαγώνια θλίψη. Το σκυροδέμα συνθλίβεται στη θλιπτική ζώνη κοντά στη βάση του τοιχώματος. Εμφανίζονται τότε δύο σύνολα διαγώνιων ρωγμών και η σύνθλιψη του σκυροδέματος μπορεί να επεκταθεί σε ολόκληρο το μήκος του τοιχίου εξαιτίας της αποδιοργάνωσης που προκαλεί η ανακύκλιση του φορτίου. Άλλη μία μορφή αστοχίας καταγεγραμμένη από τους *Paulay et al.*[7] είναι η διατμητική ολίσθηση. Προερχόμενη από την κάμψη, μία συνεχής οριζόντια ρωγμή αναπτύσσεται κατά μήκος της βάσης του τοιχίου. Από τη στιγμή που μειώνεται η αποδοτικότητα του συνολικού αλληλοκλειδώματος καθώς ο αριθμός των κύκλων αυξάνεται, η ολίσθηση της ρωγμής γίνεται σημαντική και οι παραμορφώσεις του τοιχίου συνιστούν μία υπολογίσιμη ποσότητα εξαιτίας της ολίσθησης αυτής, ειδικά στις ανακυκλίσεις της έντασης. Το φαινόμενο αυτό καταλήγει στο «τσίμπημα» των βρόγχων υστέρησης δηλαδή, στην απομείωση της ενεργειακής διασποράς.

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 αυτές, ορίζεται ως $\alpha=M/l_w \cdot V$, όπου l_w είναι το μήκος του τοιχίου. Σύμφωνα με τον *EC8-Part1 (2004)* τα τοιχώματα διαχωρίζονται ως προς το λόγο διάτμησης τους, α , και συγκεκριμένα για λόγο διάτμησης μεγαλύτερο ή ίσο με δύο (λιγυρά τοιχία-slender walls) η αντισεισμική συμπεριφορά είναι αρκετά διαφορετική από τοιχία με λόγο διάτμησης μικρότερο του δύο (χθαμαλά τοιχία-low rise walls). Υπό τους χαρακτηρισμούς αυτούς (λιγυρά- χθαμαλά) απαντώνται γενικώς στη διεθνή βιβλιογραφία τα τοιχώματα οπλισμένου σκυροδέματος, εντούτοις παρατηρούνται και περαιτέρω κατηγοριοποιήσεις. Για τοιχώματα με στατικό σύστημα προβόλου ο λόγος διάτμησης ορίζεται ως $\alpha=h/l_w$ (h το ύψος του τοιχίου). 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) και ως εκ τούτου οι ενδιάμεσες καταστάσεις του λόγου διάτμησης μεταξύ του δύο και του τέσσερα ($2<\alpha<4$) διαμορφώνουν το χαρακτηρισμό «μεσαία» τοιχία (medium rise walls) (*Jiang and Kurama, 2010*). Παράλληλα, για λόγο διάτμησης μικρότερο του

ένα ($\alpha < 1$) τα τοιχία αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία και ως «κοντά» (squat walls). Τα προσωνύμια αυτά και οι χαρακτηρισμοί αυτού του είδους (κοντά, χθαμαλά, λιγυρά, ψηλά) δεν περιγράφουν με σαφήνεια την κατηγορία του εκάστοτε τοιχώματος, επομένως κρίνεται αυτονόητο πως για μία πιο σαφή κατανόηση της κατηγοριοποίησης είναι ανάγκη να ορίζεται η ακριβής τιμή του λόγου διάτμησης α .

Η συμπεριφορά τοιχωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το αν διαμορφώνουν ή όχι λεπτομέρειες αντισεισμικότητας ακόμα και σε μέτριας σεισμικότητας περιοχές. Η πειραματική έρευνα (*J. S. Kuang and Y.B. Ho*) κατέδειξε πως μπορεί να επιτευχθεί έμφυτη πλαστιμότητα μετακινήσεων της τάξης του 2,5 με 3,0 σε περιπτώσεις τοιχωμάτων τα οποία δεν συμπεριλαμβάνουν κρυφούποστηλώματα στα άκρα τους. Συνεπώς, τα συνήθη κοντά τοιχώματα τα οποία δεν διαμορφώνουν λεπτομέρειες αντισεισμικότητας στην όπλισή τους υπάρχει πιθανότητα να μην ικανοποιούν την απαίτηση για πλαστιμότητα μεγέθους της τάξης του 3,0, τιμή που προτείνεται να επιτυγχάνεται σε περιοχές μέτριας σεισμικότητας. Αν πραγματοποιούνται λοιπόν οι απαραίτητες τροποποιήσεις στις λεπτομέρειες όπλισης, ενισχύεται η πλαστιμότητα και η ικανότητα ενεργειακού διασκορπισμού, βελτιώνοντας έτσι την σεισμική απόδοση κοντών τοιχίων από οπλισμένο σκυρόδεμα σχεδιασμένων για επαρκή αντίσταση και συμπεριφορά σε σεισμικά γεγονότα μέτριας έντασης. Δείκτης πλαστιμότητας μεγέθους 4,5 με 5,0 μπορεί να επιτευχθεί υιοθετώντας την παρουσία ζωνών περίσφιξης στα άκρα των τοιχωμάτων και τοποθετώντας τους δευτερεύοντες συνδετήρες των άκρων σε επίπεδα ενδιάμεσως των αντίστοιχων του κύριου οριζόντιου οπλισμού. Τα τοιχία που διαμορφώνουν στα άκρα τους ζώνες περίσφιξης (κρυφουποστυλώματα) παρουσιάζουν μικρή βελτίωση στην ικανότητα ενεργειακής διασποράς συγκριτικά με εκείνα που δεν συμπεριλαμβάνουν αυτή τη λεπτομέρεια όπλισης (*J. S. Kuang and Y.B. Ho*).

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται επίσης στην μελέτη της μεταφοράς της διατμητικής δύναμης και στην επιρροή του ποσοστού του διατμητικού οπλισμού στην αντοχή των τοιχίων (*Pilakoutas and Elnashai 1995, Lopez 2000*) καθώς και στην μελέτη της ορθότητας των διαθέσιμων υπολογιστικών μοντέλων για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής των τοιχίων. Επίσης, πλειάδα εργασιών έχουν μελετήσει την θετική επίδραση της χρήσης διαγώνιου οπλισμού, η οποία οδηγεί σε μία πιο ευσταθή υστερητική συμπεριφορά των τοιχίων καθώς και σε μεγαλύτερη διάχυση ενέργειας (*Paulay et al., 1982, Salonikios et al., 1999, Salonikios et al., 2000*), ενώ συγκεκριμένες

εργασίες έχουν ασχοληθεί με την επιρροή του αξονικού φορτίου στην συμπεριφορά του τοιχίου (*Zhang and Wang, 2000*).

Όσον αφορά την μελέτη υπό-οπλισμένων τοιχίων αναφέρονται ενδεικτικά δύο χαρακτηριστικές μελέτες. Η πρώτη (*Greinfenhagen and Lestuzzi, 2005*) μελέτησε την σεισμική συμπεριφορά τοιχίων όχι κατάλληλα σχεδιασμένων για ανάληψη σεισμικών δυνάμεων, ενώ η δεύτερη (*Kuang and Ho, 2008*) προχώρησε σε σύγκριση ελαφρώς οπλισμένων τοιχίων και τοιχίων με διαμόρφωση κρυφοϋποστυλωμάτων και κατέδειξε την μεγαλύτερη ανάπτυξη πλαστιμότητας και διάχυσης ενέργειας που ανέπτυξαν τα δεύτερα.

1.3 Αποτίμηση μελών Ο/Σ

Όσον αφορά την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα στην διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολλά μοντέλα υπολογισμού, κυρίως της διατμητικής αντοχής (*Wood 1990, Gulec et al. 2008, Gulec and Whittaker 2011*). Γνωστό, επίσης, είναι το απλό και το τροποποιημένο μοντέλο UCSD (*Priestley et al. 1994, Kowalsky and Priestley 2000*). Ευρείας αποδοχής έχουν τύχει και τα μοντέλα των *Panagiotakos and Fardis (2001)* και *Biskinis et al. (2004)* 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.

Κεφάλαιο 2

Παραδοχές EC2, EC8 και ΚΑΝ.ΕΠΕ

2.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να προσδιορισθεί η συμπεριφορά των έξι τοιχίων και να αποσαφηνισθούν οι αντοχές τους, χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένες παραδοχές σύμφωνα με το γράμμα τριών κανονισμών: του EC2, του EC8 και του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παραδοχές αυτές.

2.2 Παραδοχές EC2

Για την οριακή κατάσταση αστοχίας χρησιμοποιούνται επιμέρους συντελεστές ασφαλείας υλικών γ_c και γ_s με τιμές $\gamma_c = \gamma_s = 1$ καθώς σκοπός είναι η αποτίμηση, επιθυμείται έτσι ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας της υπολογισθείσας αντοχής.

2.2.1 Σκυρόδεμα

Η τιμή της θλιπτικής αντοχής λαμβάνεται ως :

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

$$a_{cc} = 1$$

(δεν συνεκτιμώνται μακροχρόνιες επιδράσεις στην θλιπτική αντοχή ή δυσμενείς επιρροές από τον τρόπο επιβολής του φορτίου)

όπου f_{ck} λογίζεται ως η μετρηθείσα χαρακτηριστική αντοχή.

Για τον υπολογισμό των διατομών χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση τάσεων παραμορφώσεων, βλ. Σχήμα 2.1 (η θλιπτική παραμόρφωση εμφανίζεται θετική)

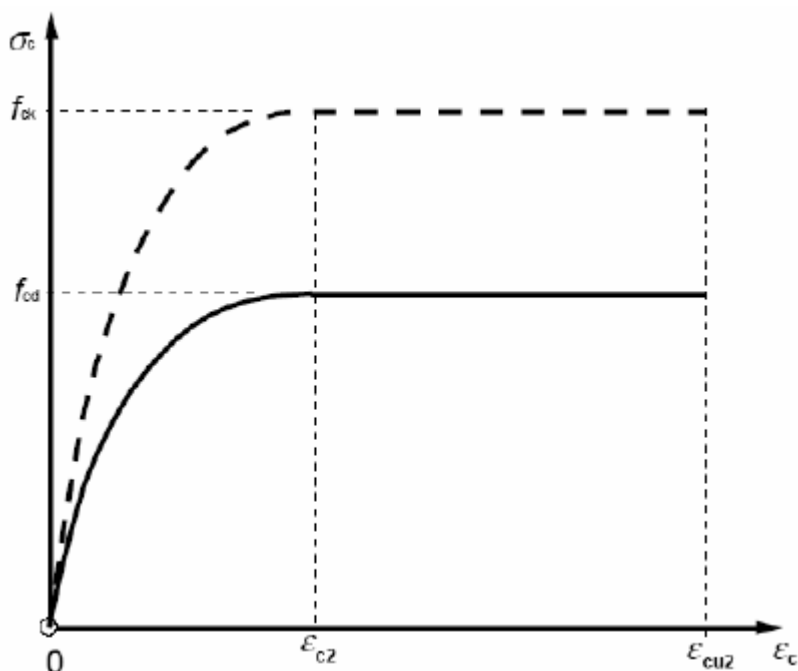
$$\sigma_c = f_{cd}[1 - (1 - \varepsilon_c/\varepsilon_{c2})^2] \quad \text{για } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad (2.2)$$

$$\sigma_c = f_{cd} \quad \text{για } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \quad (2.3)$$

όπου:

ε_{c2} είναι η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη αντοχή

ε_{cu2} είναι η παραμόρφωση αστοχίας



Σχήμα 2.1 Παραβολικό-Ορθογωνικό διάγραμμα για σκυρόδεμα υπό θλίψη

Για τον υπολογισμό της δύναμης σκυροδέματος των τοιχίων T7-T8, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η περίσφιγξη. Στα τοιχία αυτά, προκειμένου να αντιμετωπισθεί η απώλεια αντοχής λόγω αποφλοίωσης του σκυροδέματος, τοποθετήθηκαν επαρκώς κλειστοί συνδετήρες, οι οποίοι φτάνουν στην πλαστική περιοχή εξαιτίας της πλευρικής διόγκωσης του σκυροδέματος. Μεταβάλλεται έτσι η σχέση δρώσας τάσης-παραμόρφωσης ως αποτέλεσμα της αυξημένης αντοχής και των μεγαλύτερων κρίσιμων παραμορφώσεων.

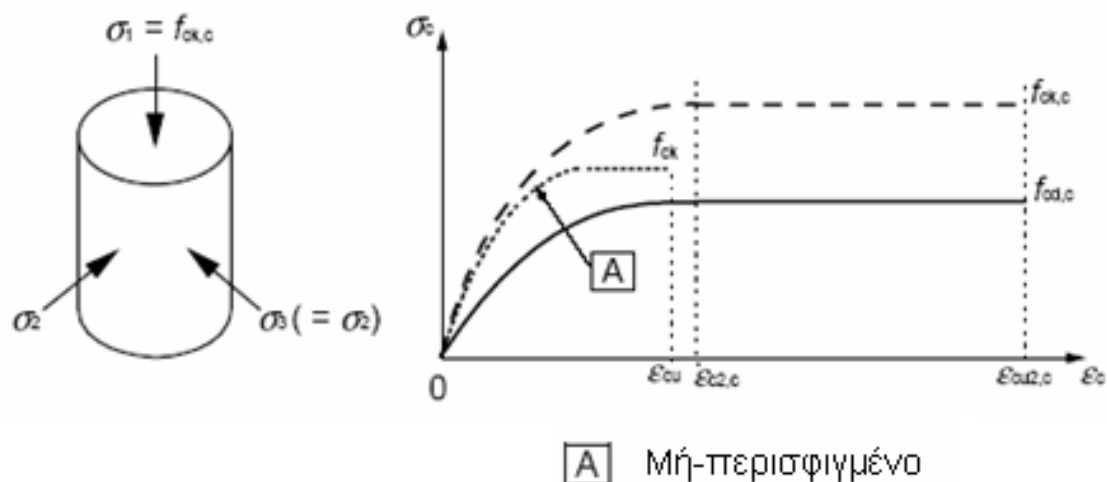
Χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες σχέσεις για τον υπολογισμό της χαρακτηριστικής αντοχής και των παραμορφώσεων:

$$f_{ck,c} = f_{ck}(1,000 + 5,0\sigma_2/f_{ck}) \quad \text{για } \sigma_2 \leq 0,05f_{ck} \quad (2.4)$$

$$f_{ck,c} = f_{ck}(1,125 + 2,50 \sigma_2/f_{ck}) \quad \text{για } \sigma_2 > 0,05f_{ck} \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2}(f_{ck,c}/f_{ck})^2 \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0,2\sigma_2/f_{ck} \quad (2.7)$$



Σχήμα 2.2 Σχέση τάσεων-παραμορφώσεων για το περισφιγμένο σκυρόδεμα

2.2.2 Χάλυβας Οπλισμών

Η αποτίμηση στηρίζεται στο ονομαστικό εμβαδόν διατομής του οπλισμού καθώς και στις τιμές που προκύπτουν ύστερα από επιτόπου μέτρηση της αντοχής.

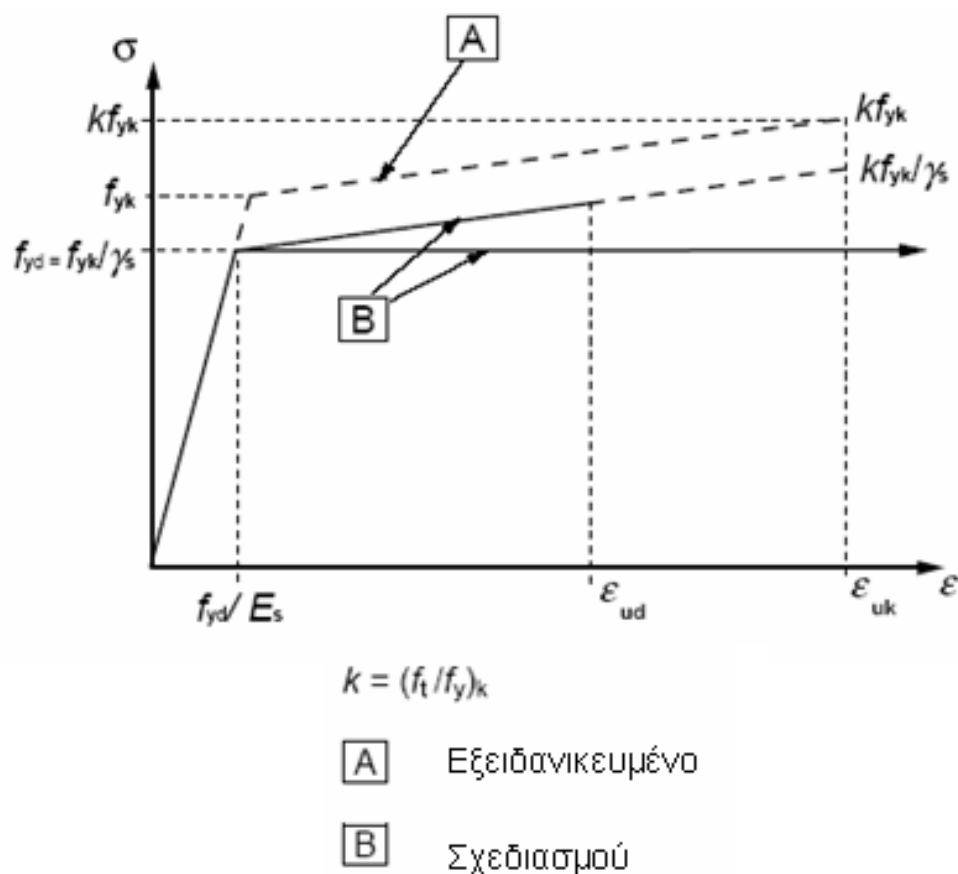
Για συνήθη σχεδιασμό, μπορεί να πραγματοποιηθεί μία από τις παρακάτω παραδοχές:

-Κεκλιμένος δεύτερος κλάδος με όριο παραμόρφωσης ϵ_{ud} και μέγιστη τάση kf_{yk} στην ϵ_{uk} , όπου $k = (f_t/f_y)_k$.

-Οριζόντιος δεύτερος κλάδος χωρίς την ανάγκη ελέγχου του ορίου παραμόρφωσης.

Η μέση τιμή της πυκνότητας μπορεί να θεωρείται ίση προς 7850 kg/m^3 .

Η τιμή σχεδιασμού του μέτρου ελαστικότητας E_s μπορεί να θεωρείται ίση προς 200 GPa .



Σχήμα 2.3 Εξειδανικευμένο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων και διάγραμμα σχεδιασμού χάλυβα οπλισμού(για εφελκυσμό και θλίψη)

2.2.3 Κάμψη με ή χωρίς αξονική δύναμη

Για τον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής των οπλισμένων διατομών λαμβάνονται οι κάτωθι παραδοχές:

-Ισχύει η αρχή της επιπεδότητας των διατομών (Navier-Bernoulli), αγνοούνται έτσι οι διατμητικές παραμορφώσεις.

-Οι χαλαροί οπλισμοί υφίστανται τις ίδιες ανηγμένες παραμορφώσεις με το περιβάλλον σκυρόδεμα ($\epsilon_c = \epsilon_s$).

-Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος αγνοείται (η αντοχή αυτή συνοδεύεται συχνά από συστολή ξηράνσεως ή από τάσεις λόγω θερμικών μεταβολών που δε λαμβάνονται υπόψη στους ελέγχους αστοχίας.)

-οι τάσεις του θλιβόμενου σκυροδέματος υπολογίζονται βάσει των σχέσεων τάσης-παραμόρφωσης εξ.(2.2),(2.3) - σχ.(2.1),(2.2).

-οι τάσεις των χαλαρών οπλισμών υπολογίζονται βάσει των καμπυλών του σχ.(2.3).

-Η μέγιστη παραμόρφωση του σκυροδέματος λαμβάνεται ίση με ϵ_{cu2} ή $\epsilon_{cu2,c}$, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης σχ.(2.1) ή

σχ.(2.2) αντίστοιχα. Η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση του χαλαρού οπλισμού δεν υπερβαίνουν την τιμή ϵ_{ud} (όπου αυτή καθορίζεται).

2.2.4 Διάτμηση

Η γενική διαδικασία προσδιορισμού της αντοχής σε τέμνουσα απαιτεί τον υπολογισμό των εξής μεγεθών (όπου είναι απαραίτητο, γίνονται οι απαραίτητες τροποποιήσεις καθώς δεν πρόκειται για σχεδιασμό αλλά για αποτίμηση στοιχείου).

$-V_{Rd,c}$ είναι η τιμή της αντοχής σε τέμνουσα στοιχείων χωρίς οπλισμό διάτμησης.

$-V_{Rd,s}$ είναι η τιμή της τέμνουσας που μπορεί να αναληφθεί από τον οπλισμό διάτμησης τη στιγμή της διαρροής του.

$-V_{Rd,max}$ είναι η τιμή της μέγιστης τέμνουσας που μπορεί να αναληφθεί από το στοιχείο, όπως καθορίζεται από τη συντριβή των λοξών θλιπτήρων.

Παρακάτω δίνονται οι σχέσεις υπολογισμού των μεγεθών αυτών με πλήρη επεξήγηση:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \quad (2.8)$$

όπου:

f_{ck} σε MPa

$$k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2,0 \quad (d \text{ σε mm})$$

$$\rho_l = A_{sl}/(bd) < 0,02$$

A_{sl} είναι το εμβαδόν του εφελκυσμένου οπλισμού ο οποίος διαπερνά τη ρωγμή η οποία ξεκινά από την εξεταζόμενη θέση (A) και είναι καλά αγκυρωμένος πέραν της ρωγμής.

b_w είναι το ελάχιστο πλάτος της διατομής στην εφελκυσόμενη ζώνη [mm]

$$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c < 0,2f_{cd} \quad [\text{MPa}]$$

N_{Ed} είναι η αξονική δύναμη στη διατομή [N] ($N_{Ed} > 0$ για θλίψη). Η επιρροή των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων στην N_E μπορεί να αγνοείται.

A_c είναι το εμβαδόν της διατομής του σκυροδέματος [mm²]

$V_{Rd,c}$ [N]

$$C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_c$$

$$k_1 = 0,15$$

Ο 1^{ος} όρος της (2.8) $C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3}$ δεν χρειάζεται να είναι μικρότερος από: $v_{min} = 0,035k^{3/2}f_{ck}^{1/2}$.

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} (\cot \theta + \cot \alpha) / (1 + \cot^2 \theta) \quad (2.9)$$

$$V_{Rd,s} = (A_{sw}/s) z f_{ywd} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (2.10)$$

όπου:

$\alpha_{cw} = 1$, για τα μη προεντεταμένα στοιχεία

s η απόσταση των συνδετήρων κατά μήκος του στοιχείου

A_{sw} το συνολικό εμβαδόν των σκελών του συνδετήρα

z ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων

$v_1 = v = 0,6[1 - f_{ck}/250]$ f_{ck} σε MPa, μειωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη μείωση της θλιπτικής αντοχής λόγω της ετερόσημης διαξονικής εντάσεως που επικρατεί στο σκυρόδεμα.

Η εκτίμηση των ακραίων τιμών των αντοχών $V_{Rd,max}$ και $V_{Rd,s}$ πραγματοποιείται για τιμές γωνίας κλίσεως θ του γενικευμένου δικτυώματος Moersch $21,8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ (γωνία θλιβόμενων ράβδων σκυροδέματος) και για γωνία κλίσεως $\alpha = 90^\circ$. Έτσι οι εξ.(2.9),(2.10) μετασχηματίζονται ως εξής:

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta) \quad (2.11)$$

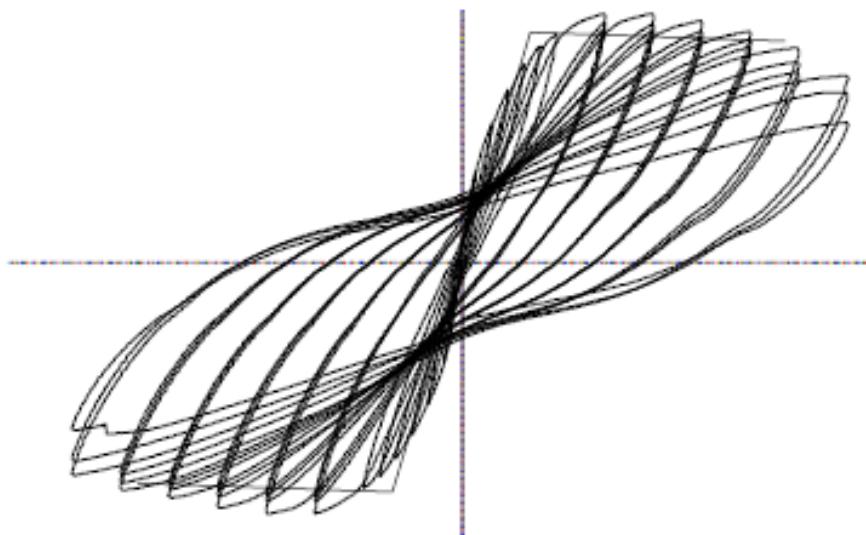
$$V_{Rd,s} = (A_{sw}/s) z f_{ywd} \cot \theta \quad (2.12)$$

2.3 Παραδοχές ΚΑΝ.ΕΠΕ- EC8

Σκοπός είναι η ποσοτική περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς -δηλαδή της αντίστασης (αντοχής), της δυσκαμψίας και της ικανότητας μετελαστικής παραμόρφωσης- δομικών στοιχείων (τοιχίων εν προκειμένω) επιβαλλόμενων σε ανακυκλιζόμενη παραμόρφωση $\mp \delta$, βλ. σχήμα (2.4).

2.3.1 Καμπύλη εντατικού μεγέθους-παραμόρφωσης “F-δ”

Η περιγραφή αυτή επιτυγχάνεται με προσομοιώματα, όπως διαγράμματα εντατικού μεγέθους “F” συναρτήσει της παραμόρφωσης ή σχετικής μετακίνησης “δ”. 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.



Σχήμα 2.4 Ανακυκλίσεις επιβαλλόμενων παραμορφώσεων

Η προσέγγιση της πειραματικής (πραγματικής) συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων γίνεται μέσω ενός διαγράμματος (F- δ).

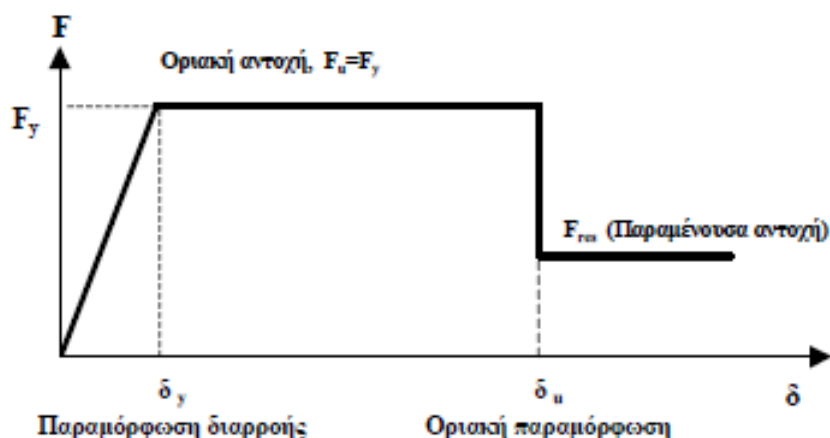
Ο πρώτος ευθύγραμμος κλάδος εκτείνεται από την αρχή των αξόνων μέχρι τη “διαρροή” του στοιχείου μετά την οποία μπορεί να λαμβάνεται μικρή, θετική –λόγω κράτυνσης- κλίση έως την οριακή αντοχή F_u . Προσδίδεται η θετική κλίση του μετελαστικού κλάδου για λόγους αριθμητικής ευστάθειας της ανάλυσης (θα μπορούσε να ληφθεί και οριζόντιος μετελαστικός κλάδος καθώς δεν επηρεάζεται η εκτίμηση της ανελαστικής απόκρισης). Ο μετελαστικός κλάδος εκτείνεται ως την οριακή αντίσταση F_u για τον κρίσιμο τρόπο αστοχίας(διατμητική-καμπτική). Για τιμές παραμόρφωσης πέραν της δ_u , επέρχεται ουσιαστική μείωση της αντίστασης του στοιχείου έναντι της σεισμικής έντασης. Το τελικό στάδιο της αστοχίας του στοιχείου σηματοδοτείται από την απώλεια της φέρουσας ικανότητας ή αντίστασης έναντι κατακόρυφων φορτίων.

Για τον προσδιορισμό του είδους του εντατικού μεγέθους F μπορούν να διακριθούν οι εξής περιπτώσεις, οι οποίες εξάγονται ανάλογα με τον τρόπο αστοχίας του μέλους:

-Για καμπτική αστοχία, με ροπή στο άκρο ίση με M_u λαμβάνεται

- $F_y = M_u$, εφόσον οι F εκφράζονται σε όρους ροπών.

- $F_y = V_{Mu}$ (η τέμνουσα, την στιγμή της καμπτικής αστοχίας), εφόσον οι F εκφράζονται σε όρους τεμνουσών.



Σχήμα 2.5 Διγραμμικό διάγραμμα καμπύλης F-δ

-Για διατμητική αστοχία, όταν δηλαδή $V_u < V_{Mu}$, θα λαμβάνεται

- $F_y = M_{vu}$ (η ροπή, τη στιγμή της αστοχίας από τέμνουσα), εφόσον οι F εκφράζονται σε όρους ροπών.

- $F_y = V_u$, εφόσον οι F εκφράζονται σε όρους τεμνουσών.

$$V_{Mu} = M_u / (\alpha_s h) \quad (2.13)$$

$$\alpha_s = M / (Vh) \quad (2.14)$$

ο “λόγος διατμήσεως” της υπόψη περιοχής κατά την υπό εξέταση εντατική κατάσταση.

Συμπερασματικά λοιπόν, εξετάζεται και εντοπίζεται η εντατική κατάσταση που οδήγησε στην ανελαστική συμπεριφορά. Αν κύρια υπαίτιος αποδειχθεί η κάμψη, κατάλληλα μεγέθη F και δ είναι η ροπή κάμψης M και η καμπυλότητα $1/r$. Σε περίπτωση που καθοριστική της ανελαστικής συμπεριφοράς είναι η διάτμηση, κατάλληλα μεγέθη είναι η τέμνουσα δύναμη V και η γωνιακή (διατμητική) παραμόρφωση γ.

2.3.2 Ροπή και καμπυλότητα στη διαρροή

Εξετάζονται τα μεγέθη αυτά για μέλη ορθογωνικής διατομής όπως τα τοιχώματα που πραγματεύεται το παρόν πόνημα.

Έχουν συνταχθεί εξισώσεις κλειστού τύπου από τους Παναγιωτάκος 1998 και Panagiotakos και Fardis 2001 οι οποίοι στηρίχθηκαν στις εξής παραδοχές:

- Ισχύς της αρχής της επιπεδότητας των διατομών (Navier-Bernoulli).
- Σχέση αναλογίας μεταξύ τάσεων παραμορφώσεων (σ-ε) μέχρι τη διαρροή των υλικών (χάλυβας και σκυρόδεμα).

- Εξάντληση της τάσης διαρροής του χάλυβα, f_y
- Βράχυνση της ακραίας θλιβόμενης ίνας πέραν του:

$$\varepsilon_c = 1,8 f_c / E_c \quad (2.15)$$

-Κριτήριο διαρροής, το προγενέστερο εκ των δύο.

Άμεσο πόρισμα της παραπάνω τελευταίας παραδοχής αποτελεί η σημείωση πως, η έννοια της “διαρροής” δομικού στοιχείου είναι ευρύτερη της διαρροής οπλισμού.

Η συνηθέστερη των περιπτώσεων είναι η “διαρροή” της διατομής να οφείλεται σε διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού με τάση $\sigma_{s1} = f_y$ και παραμόρφωση χάλυβα $\varepsilon_s = f_y / E_s$. Η καμπυλότητα τη στιγμή εκείνη είναι:

$$(1/r)_y = f_y / [E_s(1 - \xi_y)d] \quad (2.16)$$

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

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A \quad (2.17)$$

όπου:

$$A = \rho + \rho' + \rho_v + N / (bdf_y) \quad (2.18)$$

$$B = \rho + \rho'\delta' + 0,5\rho_v(1 + \delta') + N / (bdf_y) \quad (2.19)$$

ρ , ρ' και ρ_v είναι τα ποσοστά του εφελκόμενου, του θλιβόμενου και του μεταξύ τους κατανεμημένου οπλισμού (ανηγμένα στο bd), $\delta' = d'/d$, όπου d' η απόσταση από το κέντρο του θλιβόμενου οπλισμού μέχρι την ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος, b το πλάτος της θλιβόμενης ζώνης και N το αξονικό φορτίο (θετικό σε θλίψη).

Αν η αξονική δύναμη N είναι υψηλή ή το ποσοστό ρ πολύ μεγάλο και τα ρ' , ρ_v μικρά τότε η “διαρροή” ελέγχεται από το θλιβόμενο σκυρόδεμα με $\varepsilon_c \approx 1,8f_c/E_c$ (μη γραμμικότητα των παραμορφώσεων του θλιβόμενου σκυροδέματος), τότε η καμπυλότητα “διαρροής” είναι:

$$(1/r)_y = \varepsilon_c / (\xi_y d) \approx 1,8f_c / (E_c \xi_y d) \quad (2.20)$$

Στην περίπτωση αυτή τα A και B υπολογίζονται ως εξής:

$$A = \rho + \rho' + \rho_v - N/(\varepsilon_c E_s b d) \approx \rho + \rho' + \rho_v - N/(1,8abdf_c) \quad (2.21)$$

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

Έχοντας υπολογίσει πλέον την καμπυλότητα στη διαρροή $(1/r)_y$, η αντίστοιχη ροπή M_y προκύπτει ως:

$$\begin{aligned} \frac{M_y}{bd^3} = (1/r)_y & \left\{ E_c \frac{\xi_y^2}{2} \left(0,5(1 + \delta') - \frac{\xi_y}{3} \right) \right. \\ & \left. + \left[(1 - \xi_y)\rho + (\xi_y - \delta')\rho' + \frac{\rho_v}{6}(1 - \delta') \right] (1 - \delta') \frac{E_s}{2} \right\} \end{aligned} \quad (2.22)$$

2.3.3 Ροπή και καμπυλότητα στην αστοχία

Ομοίως με τον υπολογισμό της ροπής και καμπυλότητας στην διαρροή, η ροπή M_u και η καμπυλότητα $(1/r)_u$ στην αστοχία μπορούν να υπολογισθούν με τις παραδοχές επιπεδότητας των διατομών και των εξισώσεων ισοδυναμίας δυνάμεων και ροπών με τους νόμους τάσεων-παραμορφώσεων σ - ε των υλικών.

Οι λόγοι για τους οποίους η κρίσιμη διατομή φθάνει σε κατάσταση “αστοχίας” είναι δύο. Είτε λόγω θραύσης του εφελκόμενου οπλισμού είτε λόγω αστοχίας του σκυροδέματος σε θλίψη. Φυσικά πρέπει να εξετασθεί παράλληλα το κατά πόσον η αστοχία θα συμβεί πριν ή μετά την αποφλοιώση του απερίσφιγκτου σκυροδέματος της επικάλυψης.

Για αστοχία πριν την αποφλοιώση, η καμπυλότητα αστοχίας λόγω θραύσης του εφελκόμενου χάλυβα είναι:

$$(1/r)_{su} = \varepsilon_{su}/[(1 - \xi_{su})d] \quad (2.23)$$

ενώ λόγω αστοχίας θλιβόμενου σκυροδέματος είναι:

$$(1/r)_{cu} = \varepsilon_{cu}/(\xi_{su}d) \quad (2.24)$$

όπου ξ_{su} , ξ_{su} είναι τα ανηγμένα στο d ύψη της θλιβόμενης ζώνης κατά την αστοχία του χάλυβα και του σκυροδέματος, αντίστοιχα, ε_{su} η ομοιόμορφη μήκυνση αστοχίας του εφελκόμενου οπλισμού και ε_{cu} η βράχυνση αστοχίας της ακραίας θλιβόμενης ίνας σκυροδέματος.

Για αστοχία μετά την αποφλοίωση, 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_{cu2} , αντικαθίσταται από τη μέγιστη παραμόρφωση περισφιγμένου σκυροδέματος $\varepsilon_{cu2,c}$, βλ. σχήμα (2.2).

Σημειώνεται πως ο ΚΑΝ.ΕΠΕ λαμβάνει $(\sigma_2 = \sigma_3)/f_{ck} \sim 0,5\alpha\omega_{wd}$, όπου:

« α » είναι ο συντελεστής αποδοτικότητας της περισφίξεως

« ω_{wd} » είναι το ογκομετρικό μηχανικό ποσοστό των συνδετήρων ή του ελάσματος περισφίξης) και

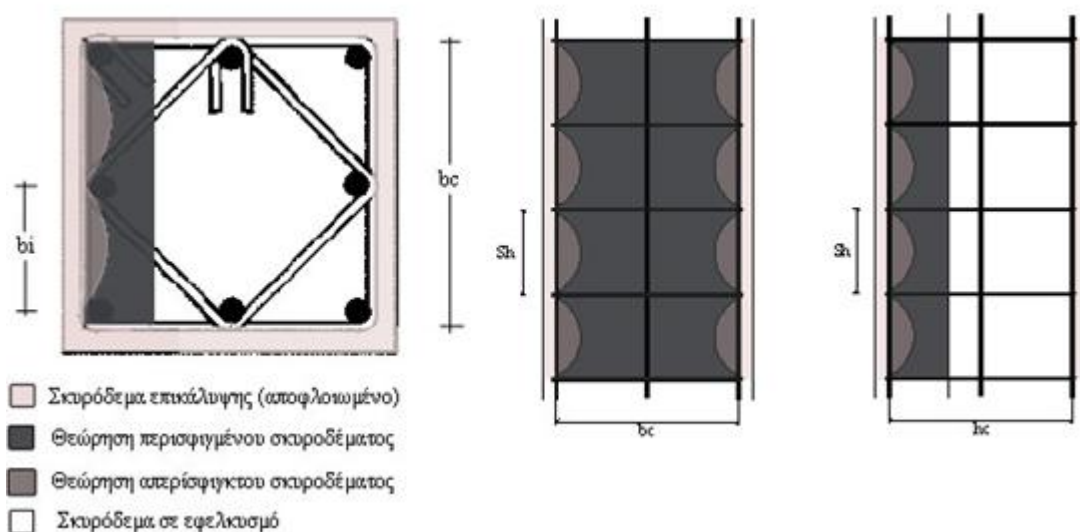
$\alpha\omega_{wd}$, το ενεργό ποσοστό περισφίξεως, υπολογίζεται όπως προβλέπει ο Κανονισμός για τον σχεδιασμό έργων από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Παρατίθενται οι παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό των ανωτέρω μεγεθών:

$$\alpha = [1 - s_h/(2b_c)][1 - s_h/(2h_c)][1 - \sum b_i^2 / (6b_c h_c)] \quad (2.25)$$

όπου s_h η καθαρή απόσταση συνδετήρων, b_c, h_c , οι διαστάσεις του περισφιγμένου πυρήνα (με $h_c \leq 1,5 \div 2,0b_c$) και b_i οι –περίπου ίσες- αποστάσεις μεταξύ διαμήκων ράβδων που συγκρατούνται από συνδετήρα ή άγκιστρο σιγμοειδούς εγκάρσιου συνδέσμου, κατά την περίμετρο της διατομής.

$$\omega_{wd} = \frac{\text{όγκος των βρόγχων περισφίξης}}{\text{όγκος του σκυροδέματος του πυρήνα}} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \quad (2.26)$$



Σχήμα 2.6 Θεώρηση περισφιγμένου πυρήνα για τον υπολογισμό του συντελεστή αποδοτικότητας περισφίξης, α , εξ. (2.23)

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι σχέσεις (2.4) έως (2.7) λαμβάνουν την εξής μορφή:

$$f_{ck,c} = f_{ck}(1,000 + 2,5\alpha\omega_{wd}) \quad \text{για } \alpha\omega_{wd} \leq 0,10 \quad (2.27)$$

$$f_{ck,c} = f_{ck}(1,125 + 1,25\alpha\omega_{wd}) \quad \text{για } \alpha\omega_{wd} > 0,10 \quad (2.28)$$

$$\varepsilon_{c2,c} = 0,002(f_{ck,c}/f_{ck})^2 \quad (2.29)$$

Η βράχυνση αστοχίας της ακραίας ίνας του περισφιγμένου πυρήνα $\varepsilon_{cu2,c}$ μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής (ΚΑΝ.ΕΠΕ):

$$\varepsilon_{cu2,c} = 0,0035 + 0,1\alpha\omega_{wd} \quad (2.30)$$

όπου:

$\varepsilon_{cu2,c}$ η ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην $f_{ck,c}$

$\varepsilon_{cu2,c}$ η ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο f_{ck} μετρούμενη στον φθιτό κλάδο του διαγράμματος σ - ε του περισφιγμένου σκυροδέματος

Κατασκευαστικώς γίνεται η παραδοχή πως αν οι συνδετήρες δεν κλείνουν με άγκιστρο προς το εσωτερικό του σκυροδέματος ($\geq 135^\circ$ στις γωνίες και $\geq 90^\circ$ στο ενδιάμεσο των πλευρών), θα αμελείται η περίσφιγξη και συνεπώς $\alpha = 0$.

Η ροπή αντίστασης κατά την αστοχία υπολογίζεται σύμφωνα με τις διατάξεις του EC2 με χρήση των μέσων τιμών της αντοχής των υλικών, αντί των τιμών σχεδιασμού.

2.3.4 Παραμόρφωση στη διαρροή- Ενεργός δυσκαμψία

Λόγω της σημαντικής λυγηρότητας των συνήθων μελών οπλισμένου σκυροδέματος, ο μηχανισμός της κάμψης μπορεί να θεωρείται ανεξάρτητος από τον μηχανισμό της διάτμησης. Στο κεφάλαιο αυτό, μελετάται η γωνία στροφής χορδής τοιχωμάτων στη διαρροή καθώς και η επιβατική δυσκαμψία στη διαρροή, η οποία λαμβάνεται ως ενεργός δυσκαμψία του μέλους.

Με τον όρο γωνία στροφής χορδής ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της χορδής που συνδέει τα δύο άκρα του μέλους και της εφαπτόμενης στον άξονα του άκρου του μέλους. Το μήκος διάτμησης L_s είναι ο λόγος M/V , στην ακραία διατομή του στοιχείου, δηλαδή η απόσταση της ακραίας διατομής από το σημείο μηδενισμού των ροπών.

Η μεταφορά δυνάμεων σε ένα μέλος πραγματοποιείται μέσω της συμβολής τριών μηχανισμών: μέσω κάμψης, διάτμησης και της επιρροής της εξόλκευσης του

τμήματος των ράβδων πέραν της ακραίας διατομής του στοιχείου. Συμπερασματικά, η παραμόρφωση διαρροής (γωνία στροφής χορδής) υπολογίζεται ως το συνολικό άθροισμα της παραμόρφωσης λόγω κάμψης, λόγω διάτμησης και λόγω ολίσθησης του οπλισμού από την περιοχή αγκύρωσης του.

-Η γωνία στροφής χορδής εκτιμάται σύμφωνα με τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ από την ακόλουθη έκφραση για τοιχώματα:

$$\theta_y = (1/r)_y(L_s + a_v z)/3 + 0,0013 + (1/r)_y d_b f_y / (8\sqrt{f_c}) \quad (2.31)$$

όπου, το τμήμα της θ_y που οφείλεται στην κάμψη λαμβάνεται ίσο με $(1/r)_y(L_s + a_v z)/3$.

Με τον όρο $a_v z$ να εκφράζει την επιρροή του “μήκους μετάθεσης” των ροπών κάμψης σε αυτές, z ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων, ο δε συντελεστής a_v ισούται με 1 εάν η τέμνουσα $V_{rd,c}$ που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση του τοιχίου (υπολογίζεται σύμφωνα με τις διατάξεις του EC2 εξ.(2.8), υπολείπεται της τιμής της τέμνουσας κατά την καμπτική διαρροή $V_{My} = M_y/L_s$, και με 0 αν είναι μεγαλύτερη.

Η καμπυλότητα στη διαρροή $(1/r)_y$ υπολογίζεται από τις εξ.(2.16),(2.20), L_s είναι το μήκος διάτμησης και d_b είναι η διάμετρος των εφελκόμενων ράβδων του διαμήκους οπλισμού. Ο $2^{ος}$ όρος εκφράζει τη συμβολή των διατμητικών παραμορφώσεων και ο $3^{ος}$ όρος εκφράζει την επιρροή της εξόλκευσης του τμήματος των ράβδων πέραν της ακραίας διατομής του στοιχείου. (f_y και f_c η τάση διαρροής του χάλυβα και του σκυροδέματος αντίστοιχα σε MPa).

-Η γωνία στροφής χορδής εκτιμάται σύμφωνα με τις διατάξεις του EC8 από την ακόλουθη έκφραση για τοιχώματα:

$$\theta_y = \left(\frac{1}{r}\right)_y (L_s + a_v z)/3 + 0,002 \left[1 - \frac{0,135L_s}{h}\right] + \varepsilon_y d_b f_y / [(d - d')(6\sqrt{f_c})] \quad (2.32)$$

ή εναλλακτικά από την εξίσωση:

$$\theta_y = \left(\frac{1}{r}\right)_y (L_s + a_v z)/3 + 0,002[1 - 0,125L_s/h] + 0,13 \left(\frac{1}{r}\right)_y d_b f_y / (\sqrt{f_c}) \quad (2.33)$$

όπου κάποια από τα μεγέθη των Εξ.(2.32), (2.33) επεξηγούνται παραπάνω και επιπρόσθετα:

ε_y ισούται με το f_y/E_s ,

d και d' ορίζουν τις θέσεις του εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού, αντίστοιχα.

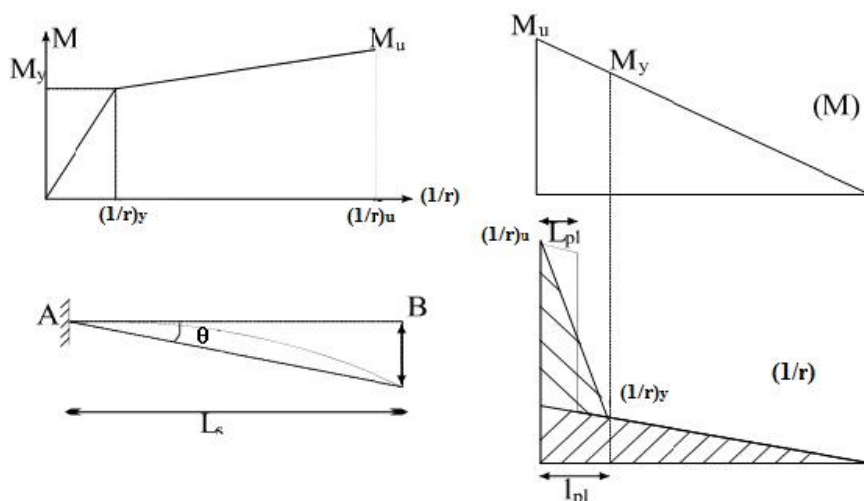
Με δεδομένο το διαμήκη οπλισμό ενός μέλους, μπορεί να υπολογισθεί η ενεργός δυσκαμψία ως εξής:

$$K = M_y L_s / (3\theta_y) \quad (2.34)$$

όπου M_y και θ_y η τιμή της ροπής και της γωνίας στροφής χορδής, αντίστοιχα, στη διαρροή της ακραίας διατομής του στοιχείου.

2.3.5 Πλαστική-Συνολική γωνία στροφής χορδής στην αστοχία

Προκειμένου να προσδιορισθεί η γωνία στροφής χορδής στην αστοχία ενός μέλους χρειάζεται να είναι γνωστά η καμπυλότητα στην αστοχία $(1/r)_u$, βλ. παράγραφο §2.3.3 και το μήκος πλαστικής άρθρωσης L_{pl} . Το μήκος πλαστικής άρθρωσης είναι μικρότερο από το μήκος πλαστικοποίησης του εφελκόμενου οπλισμού στο άκρο Α. Το μήκος πλαστικής άρθρωσης ορίζεται θεωρώντας ότι στο μήκος του, L_{pl} , το πλαστικό τμήμα της καμπυλότητας, $(1/r)_u - (1/r)_y$, είναι σταθερό και ίσο με την τιμή του στο άκρο Α (βλ. Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7 Μήκος πλαστικοποίησης και “μήκος πλαστικής άρθρωσης”, L_{pl} , στο μήκος διάτμησης, L_s

Το τριγωνικό εν γένει διάγραμμα μεταβολής του πλαστικού τμήματος της καμπυλότητας στο πλαστικοποιημένο τμήμα του μέλους αντικαθίσταται με ορθογωνικό ίσου εμβαδού, $[(1/r)_u - (1/r)_y]L_{pl}$. Δηλαδή το πλαστικοποιημένο τμήμα του μέλους προσομοιώνεται με μία άρθρωση στο μέσο του μήκους πλαστικής άρθρωσης L_{pl} και θεωρείται ότι στην πλαστική αυτή άρθρωση αναπτύσσεται γωνία στροφής $\theta_u = [(1/r)_u - (1/r)_y]L_{pl}$. Αυτή η πλαστική γωνία στροφής προστίθεται στην ελαστική γωνία στροφής λόγω κάμψης, $(1/r)_y L_s / 3$.

Η συνολική γωνία στροφής χορδής στο Α είναι:

$$\theta_u = \left(\frac{1}{r}\right)_y L_s/3 + \theta_u^{pl} = \left(\frac{1}{r}\right)_y L_s/3 + \left[\left(\frac{1}{r}\right)_u - \left(\frac{1}{r}\right)_y\right] L_{pl} \left[1 - \frac{0,5L_{pl}}{L_s}\right] \quad (2.35)$$

Παράλληλα με τα όσα γράφονται ανωτέρω, στον ΚΑΝ.ΕΠΕ γίνεται προσπάθεια εμπειρικής εκτίμησης της διαθέσιμης γωνίας πλαστικής στροφής θ_u^{pl} και της διαθέσιμης συνολικής γωνίας στροφής θ_u στο άκρο τοιχωμάτων συναρτήσεως των γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών καθώς και των οπλισμών τους με τη βοήθεια εμπειρικών σχέσεων.

Με την προϋπόθεση πως οι διαμήκεις οπλισμοί είναι νευροχάλυβες χρησιμοποιούνται οι εξής σχέσεις:

-Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ για τη μέση τιμή της γωνίας στροφής χορδής κατά την αστοχία τοιχωμάτων που έχουν διαστασιολογηθεί με τις μετά το 1985 διατάξεις για την αντισεισμικότητα:

$$\theta_{um} = 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01;\omega')}{\max(0,01;\omega)} f_c \right]^{0,225} (\alpha_s)^{0,35} 25^{\left(\alpha_{\rho_s} \frac{f_{yw}}{f_c}\right)} (1,25^{100\rho_d}) \quad (2.36)$$

όπου:

$\alpha_s = M/(Vh)$, ο λόγος διάτμησης.

ω, ω' : μηχανικό ποσοστό εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού (ο ενδιάμεσος διαμήκης οπλισμός μεταξύ εφελκόμενου και θλιβόμενου πέλματος θεωρείται ως εφελκόμενος).

$v = N/(bhf_c)$, (b: πλάτος θλιβόμενης ζώνης).

$\rho_s = A_{sh}/(b_w s_h)$: γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού παράλληλα στη διεύθυνση της φόρτισης.

ρ_d : γεωμετρικό ποσοστό τυχόν δισδιαγώνιου οπλισμού.

α : είναι ο συντελεστής αποτελεσματικότητας της περίσφιγξης σύμφωνα με την εξ.(2.25), παράγραφος § 2.3.3.

-Οι διατάξεις του EC8 (μέρος 3) συμπεριλαμβάνουν εξισώσεις για τον υπολογισμό της οριακής τιμής της συνολικής ικανότητας στροφής της χορδής (ελαστικό συν ανελαστικό μέρος), θ_u , μελών από σκυρόδεμα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση:

$$\theta_{um} = \left(\frac{1}{\gamma_{el}}\right) 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01;\omega')}{\max(0,01;\omega)} f_c \right]^{0,225} (\alpha_s)^{0,35} 25^{\left(\alpha_{\rho_{sx}} \frac{f_{yw}}{f_c}\right)} (1,25^{100\rho_d}) \quad (2.37)$$

όπου τα μεγέθη της (2.37) επεξηγούνται στην εξ.(2.36) και επιπρόσθετα:

γ_{el} : ισούται με 1,5 για κύρια σεισμικά στοιχεία και 1,0 για δευτερεύοντα σεισμικά στοιχεία

ρ_{sx} υπολογίζεται όπως το ρ_s .

Για τους τοίχους οι τιμές που δίδονται από την έκφραση (2.37) θα διαιρούνται δια 1,6.

Για στοιχεία τα οποία δεν διαμορφώνουν λεπτομέρειες αντισεισμικότητας οι τιμές που δίδονται από την έκφραση (2.37) θα πολλαπλασιάζονται επί 0,85.

-Εναλλακτικά, ο EC8 παραθέτει την εξής εξίσωση για τον υπολογισμό της οριακής ικανότητας στροφής της χορδής:

$$\theta_{um} = \left(\frac{1}{\gamma_{el}}\right)\{\theta_y + [(1/r)_u - (1/r)_y]L_{pl}[1 - (0,5L_{pl})/L_s]\} \quad (2.38)$$

Η γωνία στροφής στη διαρροή, θ_y , υπολογίζεται από τις εξ.(2.32) και (2.33).

Για ορθογωνικού τύπου διατομές, η καμπυλότητα διαρροής στην ακραία διατομή, $(1/r)_y$, μπορεί να υπολογίζεται από την παράγραφο § (2.3.2). Η καμπυλότητα αστοχίας υπολογίζεται με βάση την παράγραφο § (2.3.3) όπου για τα κρίσιμα μεγέθη της βράχυνσης αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος, $\epsilon_{cu,c}$, και της μέγιστης μήκυνσης του εφελκόμενου οπλισμού, ϵ_{su} , ο EC8 λαμβάνει τις κάτωθι σχέσεις:

$$\epsilon_{cu,c} = 0,004 + 0,5(\alpha\rho_{sx}f_{yw})/f_{cc} \quad (2.39)$$

όπου:

α βλ. εξ.(2.25)

ρ_{sx} βλ. εξ.(2.36) όπως το ρ_s

f_{yw} η τάση διαρροής των συνδετήρων

$$f_{cc} = f_c \left[1 + 3,7(\alpha\rho_{sx}f_{yw}/f_c)^{0,86}\right] \quad (2.40)$$

Για την τιμή της μέγιστης παραμόρφωσης του εφελκόμενου οπλισμού λαμβάνονται τα εξής:

-Πολύ όλκιμοι χάλυβες, τύπου Ευρωπαϊκού S400 ή Αμερικανικού Grade 60: $\epsilon_{su} = 0.06$

-Νεότεροι όλκιμοι Ευρωπαϊκοί χάλυβες, τύπου Temcore: $\epsilon_{su} = 0.05$

-Ψαθυροί χάλυβες, ψυχρής κατεργασίας: $\epsilon_{su} = 0.025$

Το δε μήκος της πλαστικής άρθρωσης L_{pl} υπολογίζεται ως εξής:

$$L_{pl} = (L_s/30) + 0,2h + 0,11d_b f_y / (\sqrt{f_c}) \quad (2.41)$$

Εναλλακτικά, για προσομοίωμα περίσφιξης όπως στην παράγραφο § 2.2.1, για τιμές μέγιστης μήκυνσης εφελκόμενου οπλισμού ϵ_{su} ως άνω και για $\sigma_2 = \alpha_{ps} f_{yw}$, το μήκος της πλαστικής άρθρωσης υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$L_{pl} = (L_s/10) + 0,17h + 0,24d_b f_y / (\sqrt{f_c}) \quad (2.42)$$

όπου f_y και f_c σε MPa.

-Για τη μέση τιμή του πλαστικού τμήματος της μέσης γωνίας στροφής χορδής κατά την αστοχία τοιχωμάτων σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ:

$$\begin{aligned} \theta_{um}^{pl} &= \theta_u - \theta_y = \\ &= 0,0145 \cdot (0,25^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,3} (f_c)^{0,2} (\alpha_s)^{0,35} 25^{\left(\alpha_{ps} \frac{f_{yw}}{f_c}\right)} (1,275^{100\rho_d}) \end{aligned} \quad (2.43)$$

όπου η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή, θ_y , είναι αυτή η οποία προκύπτει από την εξ. (2.31).

Δεχόμαστε χάριν απλοποίησης πως ο έλεγχος γίνεται για τιμές αξονικής δύναμης και λόγου διάτμησης ίσες με εκείνες που συμβαίνουν στο μέλος κατά τη στιγμή της κρίσιμης μετακίνησης του δομήματος. Στο παρόν εγχείρημα πραγματευόμαστε κατακόρυφα στοιχεία (τοιχία), έτσι η τιμή του λόγου διάτμησης επιτρέπεται να λαμβάνεται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της απόκρισης.

Σημειώνεται πως για τα τοιχία με διαστασιολόγηση και κατασκευή με βάση τα ισχύοντα στην Ελλάδα προ του 1985, με χρήση νευροχαλύβων, τα 2^α μέλη των εξ. (2.36), (2.43) πρέπει να διαιρεθούν με 1,2.

Τα ανωτέρω ισχύουν για τον υπολογισμό της μέσης τιμής της γωνίας στροφής χορδής ή της πλαστικής γωνίας στροφής στην αστοχία. Η μέση τιμή μείον μια τυπική απόκλιση της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία είναι περίπου ίση με τα 65% της τιμής που δίνει η εξ. (2.36), ή του αθροίσματος του αποτελέσματος της εξ. (2.43) και αυτού της (2.31) για τη γωνία στροφής χορδής στη διαρροή. Η μέση τιμή μείον μία τυπική απόκλιση της πλαστικής γωνίας στροφής στην αστοχία είναι περίπου ίση με τα 55% της τιμής που δίνει η εξ. (2.43).

- Για την τιμή του πλαστικού μέρους της ικανότητας γωνίας στροφής χορδής κατά την αστοχία τοιχωμάτων σύμφωνα με τον EC8:

$$\begin{aligned}\theta_{um}^{pl} &= \theta_u - \theta_y \\ &= \left(\frac{1}{\gamma_{el}}\right) \cdot 0,0145(0,25^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c\right]^{0,3} (f_c)^{0,2} (\alpha_s)^{0,35} 25 \left(\alpha_{ps} \frac{f_{yw}}{f_c}\right) (1,275^{100\rho_d})\end{aligned}\quad (2.44)$$

Στους τοίχους η τιμή που δίδεται από τη σχέση (2.44) πολλαπλασιάζεται με το 0,6.

2.3.6 Παραμόρφωση αστοχίας-πλαστιμότητα

Η απώλεια αντίστασης έναντι των φορτίων βαρύτητας ή της φέρουσας ικανότητας σηματοδοτεί το τελικό στάδιο αστοχίας του δομήματος. Η σεισμική δράση προσομοιάζεται με εγκάρσια φόρτιση και η αντίσταση F αντιπροσωπεύει την αναπτυσσόμενη ένταση. Το αρχικό στάδιο της αστοχίας λαμβάνει χώρα τη στιγμή που παρατηρείται σημαντική και ίσως απότομη μείωση της αντίστασης F , ίση περίπου με το 20% της μέγιστης τιμής της. Την ίδια στιγμή παρατηρείται και η τιμή της παραμόρφωσης η οποία αποτελεί την παραμόρφωση αστοχίας δ_u . Μπορεί λοιπόν να ορισθεί και το πλαστικό τμήμα της παραμόρφωσης αστοχίας $\delta_{u,pl} = \delta_u - \delta_y$. Η τυχαία παραμόρφωση δ μπορεί να εκφράζεται ως ανηγμένο μέγεθος εισάγοντας το μέγεθος του δείκτη πλαστιμότητας παραμορφώσεων, $\mu_\delta = \delta/\delta_y$. Η μέγιστη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας παραμορφώσεων θα είναι λοιπόν $\mu_{\delta u} = \delta_u/\delta_y$. Φυσικά με το συμβολισμό “ δ ” χρησιμοποιούμε είτε γωνία στροφής χορδής, θ , (σχετική μετάθεση άκρων στοιχείου), είτε καμπυλότητα $1/r$

2.3.7 Πλάστιμη-ψαθυρή συμπεριφορά

Για τιμές του δείκτη πλαστιμότητας σχετικών μετακινήσεων, μ_δ ή μ_θ μεγαλύτερες του 2,0 η συμπεριφορά του στοιχείου χαρακτηρίζεται πλάστιμη ενώ για μικρότερες χαρακτηρίζεται ψαθυρή. Το όριο για διαθέσιμη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων, $\mu_{1/r}$, λαμβάνεται ίσο με 3,0.

Αν η διαρροή σε διάτμηση προηγείται της διαρροής σε κάμψη, τότε το στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος έχει ψαθυρή συμπεριφορά. Σε περίπτωση όμως που το στοιχείο διαρρέει σε κάμψη πριν από τη διαρροή σε διάτμηση, θεωρείται ότι έχει πλάστιμη συμπεριφορά. Εξαιρέση αποτελούν στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης ($\alpha_s = M/(Vh) < 2,0$) των οποίων η συμπεριφορά μπορεί να ληφθεί ως ψαθυρή, χωρίς υπολογισμό και έλεγχο της διαθέσιμης τιμής του δείκτη

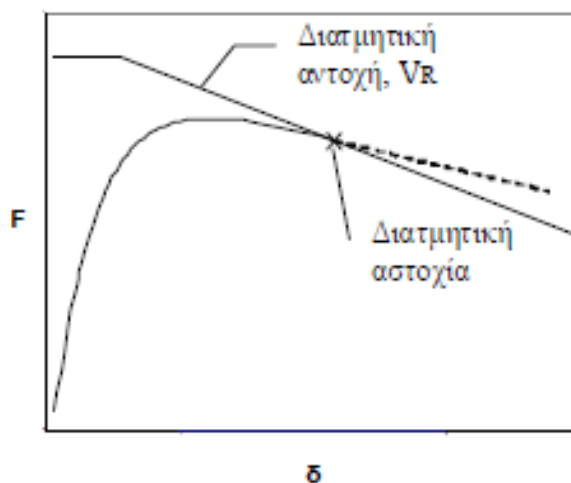
πλαστιμότητας. Στοιχεία τέτοιου είδους βέβαια, δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής.

2.3.8 Διατμητική αντοχή-αστοχία από τέμνουσα

Ο κίνδυνος διατμητικής αστοχίας, αν και ανεπιθύμητος, υφίσταται ακόμα και σήμερα σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος οι οποίες δεν ακολουθούν τις υποδείξεις των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών. Οι τελευταίοι οφείλουν να περιλαμβάνουν αξιόπιστα προσομοιώματα προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Απώτερος στόχος της παραπάνω ενέργειας είναι η επίτευξη υπεραντοχής σε διάτμηση, μέσω του ικανοτικού σχεδιασμού σε τέμνουσα, προσδίδοντας με τον τρόπο αυτό μεγάλες τιμές πλαστιμότητας και παραμορφώσεων των μελών οπλισμένου σκυροδέματος. Έτσι εξασφαλίζεται ότι η καμπτική διαρροή και η καμπτική αστοχία θα προηγηθεί της διατμητικής.

Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ στην περίπτωση που σε ένα δομικό στοιχείο, η αστοχία σε τέμνουσα προηγηθεί της καμπτικής διαρροής ($V_R < V_{M_y}$), τότε λαμβάνεται πλαστική γωνία στροφής (θ_{um}^{pl}) στο άκρο του μετά την εξάντληση της διατμητικής αντοχής ίση με το 40% της αντίστοιχης γωνίας στροφής χορδής στην καμπτική διαρροή, θ_y , κατά την §2.3.4.

Συχνά, με την ανακύκλιση της έντασης, παρατηρείται το φαινόμενο διατμητικής αστοχίας ακόμα και σε περιπτώσεις που αρχικώς η αντίσταση V_R ήταν μεγαλύτερη της τέμνουσας κατά την καμπτική αστοχία V_{Mu} .



Σχήμα 2.8 Διατμητική αστοχία όπου αρχικά ήταν $V_R > V_{Mu}$

Η αντίσταση σε τέμνουσα, μέσω των μετελαστικών ανακυκλίσεων, μειώνεται. Οι μηχανισμοί που οδηγούν στο φαινόμενο αυτό είναι οι εξής:

-Η σταδιακή μείωση της αλληλοεμπλοκής των αδρανών μέσω της λειοτρίβησης των επιφανειών ανάμεσα στις δημιουργούμενες (λόγω των ανακυκλίσεων) ρωγμές

-Η δημιουργία διαμπερών καμπτικών ρωγμών και η συνεπαγόμενη εξασθένηση της συνεισφοράς της θλιβόμενης ζώνης στη διατμητική αντοχή.

-Το άνοιγμα του πλάτους των ρωγμών λόγω των συνεχώς αυξανόμενων μετελαστικών παραμορφώσεων στους συνδετήρες, η μείωση των τάσεων συνάφειας κατά μήκος τους εξαιτίας της ανακύκλισης και ως εκ τούτου η εξασθένηση του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής των αδρανών.

-Η σταδιακή μείωση της δράσης βλήτρου στους διαμήκεις οπλισμούς με την ανακύκλιση.

Το φαινόμενο της εξασθένησης της αντίστασης V_R λαμβάνεται υπόψη εισάγοντας στον υπολογισμό της το δείκτη πλαστιμότητας επιβαλλόμενων μετακινήσεων $\mu_\delta = \mu_\theta = \theta_u/\theta_y$, όπου θ_y κατά την §2.3.4 και θ_u κατά την §2.3.5.

-Στις περιπτώσεις που δεν διατίθεται ακριβέστερο προσομοίωμα, η εξασθένηση της αντοχής εκτιμάται σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ με εμπειρικές μεθόδους όπως αυτές που ακολουθούν (μονάδες MN και m):

$$V_R = [(h - x)/(2L_s)] \min(N; 0,55A_c f_c) + [1 - 0,05 \min(5, \mu_\theta^{pl})][0,16 \max(0,5; 100\rho_{tot}) (1 - 0,16 \min(5; \alpha_s)) \sqrt{f_c} A_c + V_w] \quad (2.45)$$

όπου:

$\mu_\theta^{pl} = \mu_\theta - 1$, είναι το πλαστικό τμήμα του δείκτη πλαστιμότητας γωνίας στροφής χορδής και ισούται με το λόγο του πλαστικού μέρους της μέγιστης τιμής της γωνίας στροφής χορδής (συνολική γωνία μείον γωνία στη διαρροή) προς την υπολογιζόμενη γωνία στροφής στη διαρροή θ_y κατά την εξ.(2.30).

h: ύψος διατομής

x: ύψος θλιβόμενης ζώνης

N: αξονικό φορτίο (θετικό για θλίψη, μηδενικό για εφελκυσμό)

α_s : λόγος διάτμησης

A_c : εμβαδόν της διατομής σκυροδέματος, ίση με $b_w d$ σε διατομές με ορθογωνικό κορμό πάχους b_w και στατικό ύψος d.

f_c : θλιπτική αντοχή σκυροδέματος [MPa]

ρ_{tot} : συνολικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού (εφελκόμενου, θλιβόμενου, ενδιάμεσου)

V_w : συμβολή εγκάρσιου οπλισμού στη διατμητική αντοχή που για διατομές με ορθογωνικό κορμό πάχους b_w ισούται με:

$$V_w = \rho_w b_w z f_{yw} \quad (2.46)$$

όπου:

ρ_w : το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού

z : ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων, ίσος με $0,8h$ σε τοιχώματα ορθογωνικής διατομής

f_{yw} : η τάση διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού.

Η διατμητική αντοχή V_R τοιχώματος δεν μπορεί να ξεπεράσει την οριακή τιμή που αντιστοιχεί σε αστοχία του κορμού σε λοξή θλίψη, $V_{R,max}$, η οποία υπό ανακυκλιζόμενες παραμορφώσεις, ελαστικές ή μετελαστικές, μπορεί να λαμβάνεται από τη σχέση:

$$V_{R,max} = 0,85 [1 - 0,06 \min(5; \mu_{\theta}^{pl})] [1 + 1,8 \min(0,15; (N/A_c f_c))] [1 + 0,25 \max(1,75; 100\rho_{tot})] [1 - 0,2 \min(2; a_s)] \sqrt{f_c} b_w z \quad (2.47)$$

Η τιμή της $V_{R,max}$ πριν την καμπτική διαρροή υπολογίζεται από την (2.47) με $\mu_{\theta}^{pl} = 0$.

-Ο EC8 λαμβάνει το ίδιο προσομοίωμα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ για την εξασθένιση της διατμητικής αντοχής V_R καθώς και για την οριακή τιμή που αντιστοιχεί σε αστοχία του κορμού σε λοξή θλίψη $V_{R,max}$ για τοιχώματα.

Να σημειωθεί πως για την αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας θα ληφθεί η μικρότερη τιμή που θα προκύψει από τις εξ. (2.45) έως (2.47) και (2.8) έως (2.10).

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή δοκιμών

3.1 Εισαγωγή

Για τους σκοπούς της πειραματικής διαδικασίας, προκειμένου δηλαδή να γίνει η αποτίμηση της αντισεισμικής συμπεριφοράς “ανεπαρκώς οπλισμένων” τοιχωμάτων, κατασκευάστηκαν έξι δοκίμια (τοιχία). Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται τα γεωμετρικά αλλά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των τοιχίων αυτών καθώς και το στάδιο κατασκευής τους.

3.2 Στάδιο κατασκευής-Χαρακτηριστικά δοκιμών

Η κατασκευαστική διαδικασία των έξι τοιχωμάτων έλαβε χώρα εξ’ ολοκλήρου στο χώρο του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος του ΕΜΠ. Σε πρώτη φάση, το Νοέμβριο 2012 σκυροδετήθηκε δάπεδο από οπλισμένο σκυρόδεμα με σκοπό να εδρασθεί η επικείμενη σύνθεση των έξι τοιχωμάτων, βλ. εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1 Δάπεδο έδρασης δοκιμών

Εν συνεχεία, τον Δεκέμβριο του 2012 ξεκίνησε η κατασκευή της βάσης των τοιχίων με τον ολοκληρωμένο ξυλότυπο να αποτυπώνεται στην εικόνα 3.2 (βλ. επίσης και Παράρτημα Α).



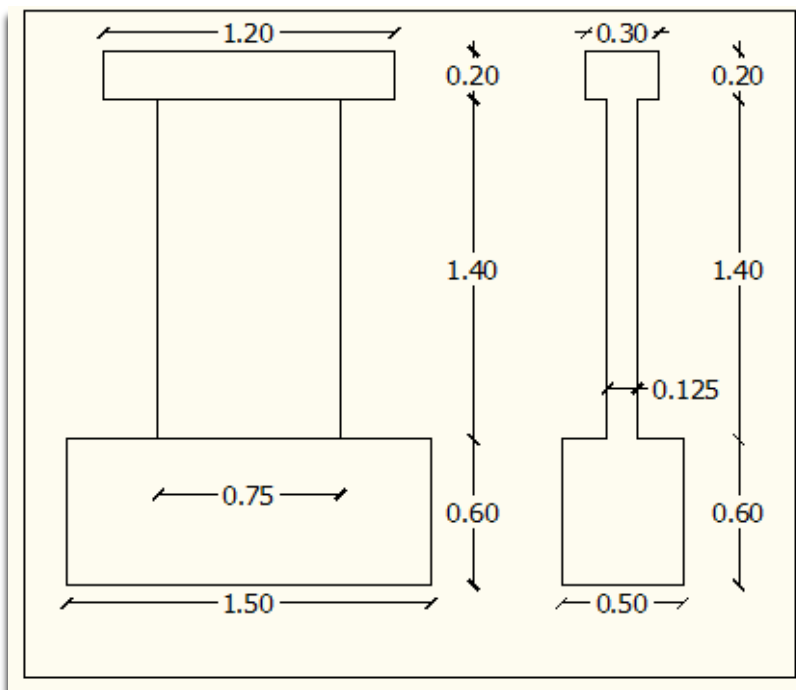
Εικόνα 3.2 Ξυλότυπος βάσης τοιχίων

Στην κύρια αίθουσα του εργαστηρίου πραγματοποιήθηκε η διαμόρφωση των αναγκαίων οπλισμών οι οποίοι τοποθετήθηκαν με στόχο τη δημιουργία των έξι τοιχωμάτων.

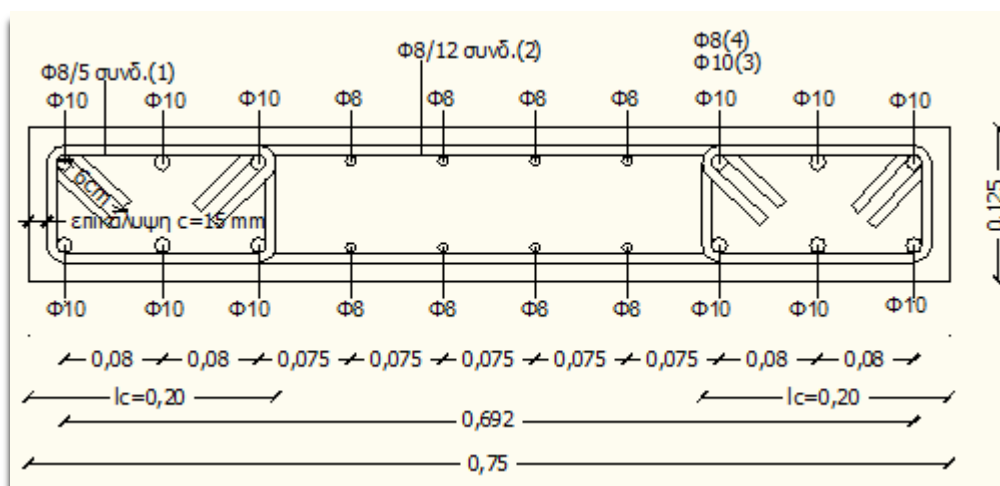
Όλα τα δοκίμια είχαν τις ίδιες διαστάσεις (Σχήμα 3.1): Μήκος $l_w = 0,75m$, πάχος $b_w = 0,125m$ και ύψος $h_w = 1,50m$. Τα δοκίμια έφεραν επίσης, εκτός της προαναφερθείσας βάσης στηρίξεως, την πρισματική δοκό επιβολής του φορτίου στην κεφαλή κάθε τοιχίου.

Τα τοιχία T7, T8 (ο οπλισμός τους φαίνεται στην Εικόνα 3.3 και στο Σχήμα 3.2) αποτελούν τα δοκίμια αναφοράς, καθώς κατασκευάστηκαν με τις μετά το 1985 διατάξεις, δηλαδή με βάση τους σύγχρονους κανονισμούς. Διαμορφώνονται “κρυφά” υποστυλώματα στα άκρα τους ικανοποιώντας παράλληλα τις αρχές του ικανοτικού σχεδιασμού σε τέμνουσα. Τα τοιχώματα T9, T10, T11, T12 χαρακτηρίζονται από την απουσία ακραίων κρυφοϋποστυλωμάτων και την αραιή διάταξη περιμετρικών συνδετήρων που ποικίλει ανάλογα με το τοιχίο ενώ δεν

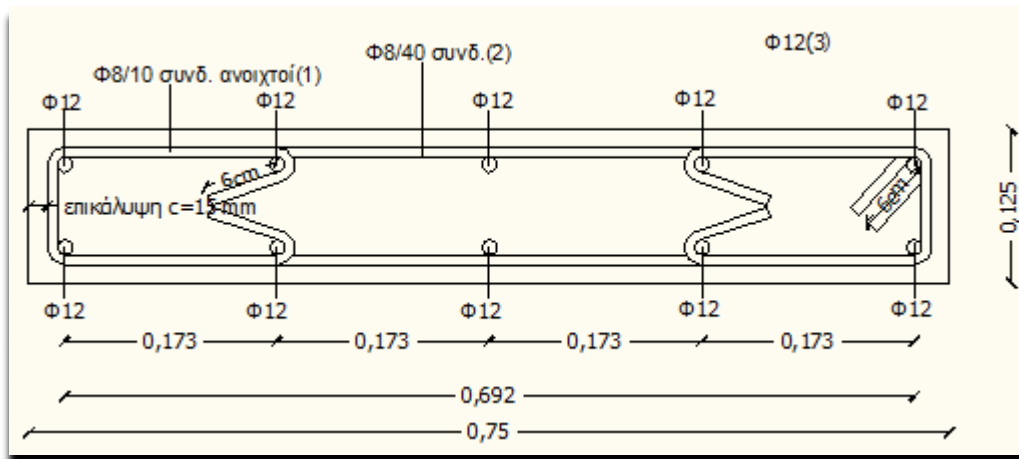
ακολουθούν τις αρχές του ικανοτικού σχεδιασμού σε τέμνουσα. Ο σχεδιασμός αυτός αποσκοπεί στην πλάστιμη συμπεριφορά των τοιχίων T7,T8 και την τελική αστοχία τους λόγω κάμψης. Εξασφαλίζεται μέσω της πυκνής διάταξης των συνδετήρων και της παρουσίας των ακραίων κρυφούποστυλωμάτων η υπεραντοχή σε τέμνουσα. Στα τοιχία T9,T10,T11,T12 διακινδυνεύεται η διατμητική αστοχία κατά τη διάρκεια του πειράματος (σύμφωνα με την ανάλυση). Αν συμβεί αυτό –αν επέλθει δηλαδή η ψαθυρή αυτή αστοχία- θα οφείλεται στην αραιή και ελλιπή διάταξη των περιμετρικών συνδετήρων (στην μη ικανοποίηση του ικανοτικού σχεδιασμού) για τα τοιχία αυτά.



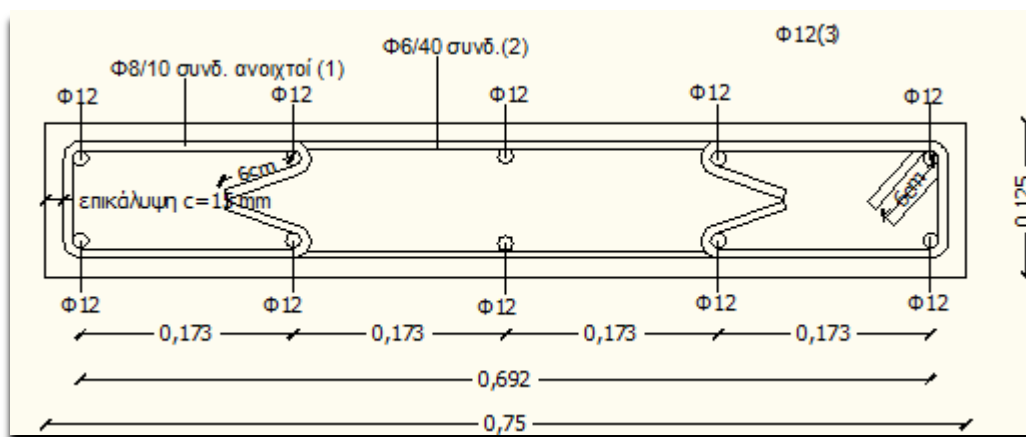
Σχήμα 3.1 Διαστάσεις τοιχωμάτων



Σχήμα 3.2 Οπλισμός τοιχίων T7-T8



Σχήμα 3.3 Οπλισμός τοιχίων T9-T10

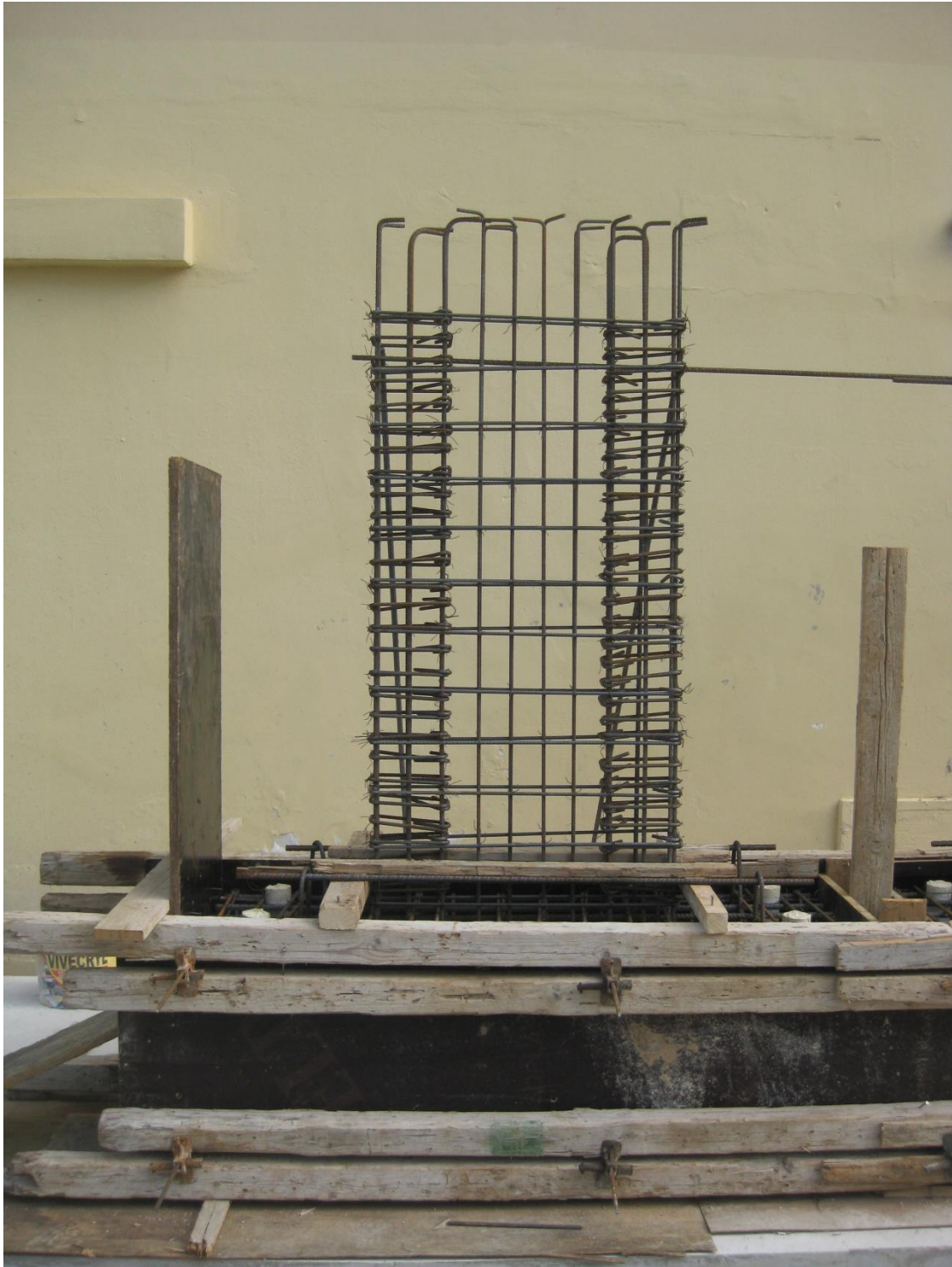


Σχήμα 3.4 Οπλισμός τοιχίων T11-T12

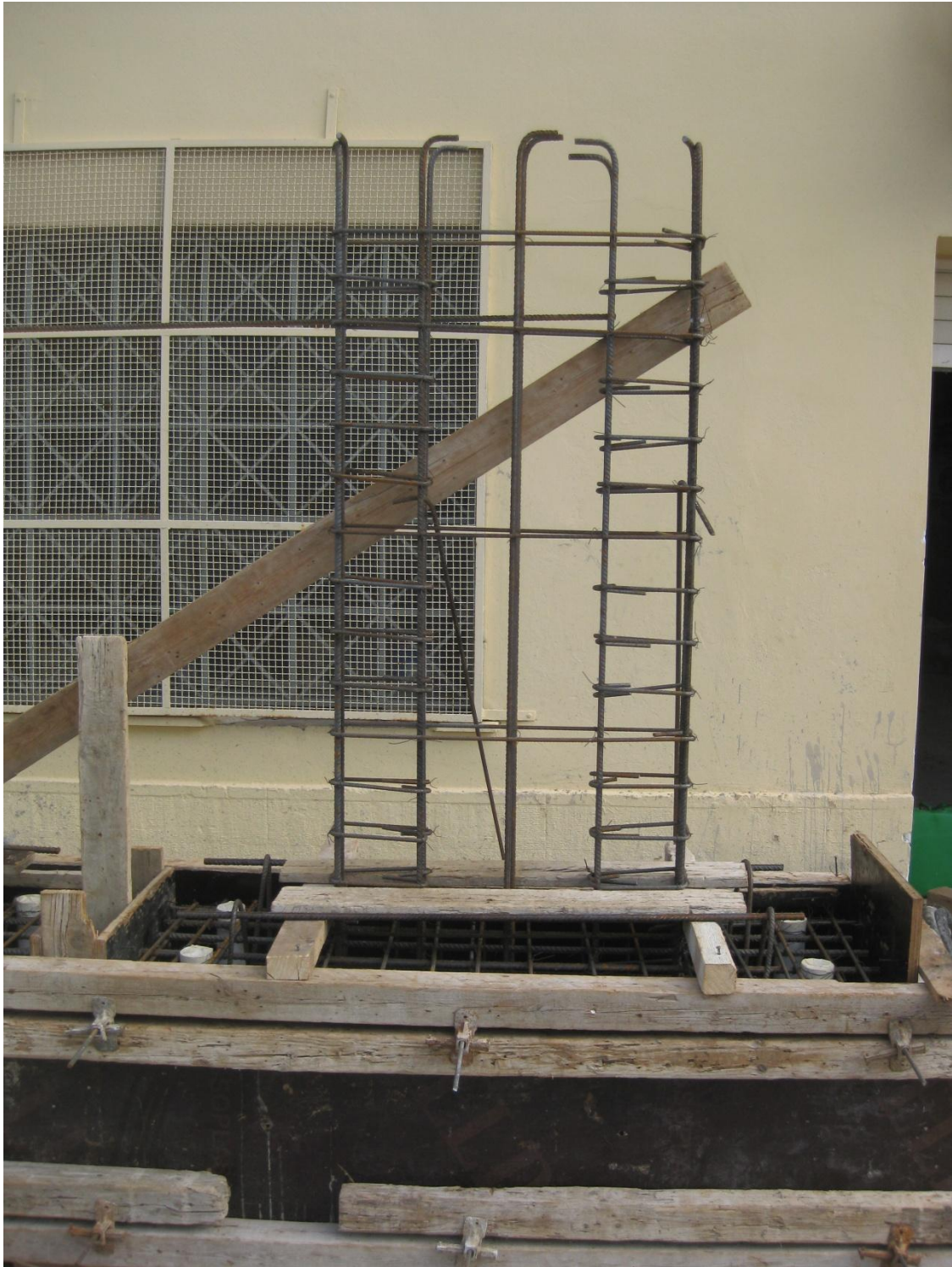
Ο οπλισμός των τοιχωμάτων παρουσιάζεται με πληρότητα τόσο σχεδιαστικά μέσω των Σχημάτων 3.2, 3.3, 3.4 όσο και “εν τη πραγμάτωση” όπως ακριβώς τοποθετήθηκε μέσω των Εικόνων 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8. Παρατίθεται επίσης ο Πίνακας 3.1 με τα ποσοστά των οπλισμών των έξι δοκιμίων. Στις φωτογραφίες που ακολουθούν αποτυπώνεται με εμφανή τρόπο η διαφορά στη διαμόρφωση των οπλισμών των δοκιμίων T7,T8 έναντι των T9,T10,T11,T12. Οι οπλισμοί στα τοιχώματα T7,T8 υπερέχουν στην ποσότητα και πυκνότητα ενώ παράλληλα διαφέρουν ως προς τη διάταξη έναντι των υπολοίπων τοιχίων. Αναμένεται έτσι τα τοιχώματα T7-T8 να παρουσιάσουν μεγαλύτερη δυνατότητα ανακατανομής της έντασης λόγω του υψηλού δείκτη πλαστιμότητας τους συγκριτικά με τα υπόλοιπα. Σημειώνεται πως κατά τη διάρκεια σκυροδέτησης των έξι τοιχίων συλλέχθηκε σκυρόδεμα σε κυβικές και κυλινδρικές μήτρες με σκοπό τη μέτρηση της αντοχής του (Εικόνα 3.9).



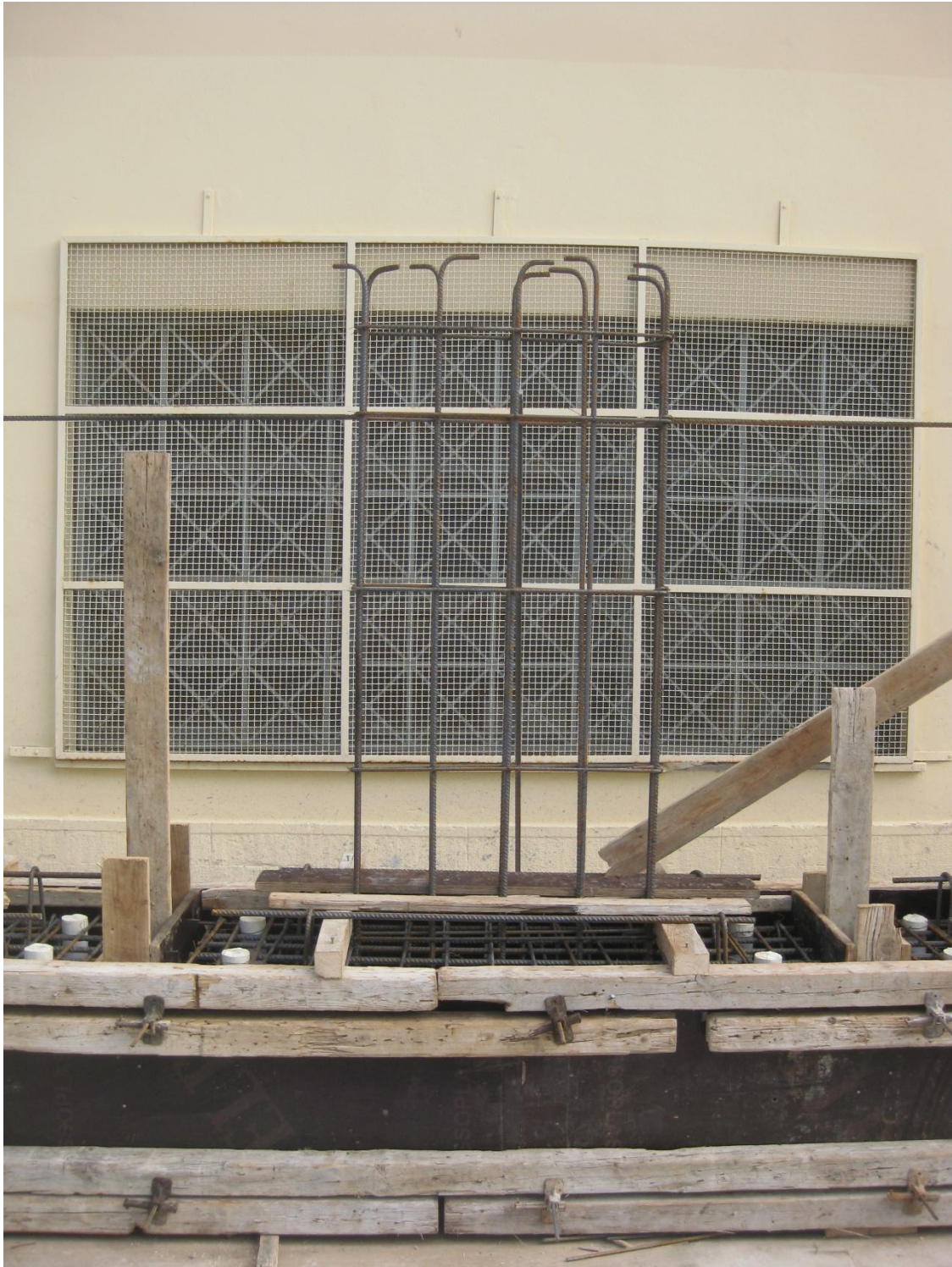
Εικόνα 3.3 Διαμόρφωση οπλισμού τοιχίου T7



Εικόνα 3.4 Διαμόρφωση οπλισμού τοιχίου T8



Εικόνα 3.5 Διαμόρφωση οπλισμού τοιχίου T9



Εικόνα 3.6 Διαμόρφωση οπλισμού τοιχίου T10



Εικόνα 3.7 Διαμόρφωση οπλισμού τοιχίου T11



Εικόνα 3.8 Διαμόρφωση οπλισμού τοιχίου T12



Εικόνα 3.9 Συλλογή σκυροδέματος τοιχίων σε μήτρες

Πίνακας 3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οπλισμός δοκιμών

α/α	b_w(m)	l_w(m)	h_w(m)	Τρόπος Όπλισης	Ανοιγμένη αξονική δύναμη ν_d	Κατακόρυφος οπλισμός άκρου ρ_{v,col}(‰)	Κατακόρυφος οπλισμός κορμού ρ_{v,web}(‰)	Συνδετήρες περίσφιξης άκρων ρ_{st,col}(‰)	Οριζόντιος οπλισμός κορμού ρ_{h,web}(‰)	Διαγώνιος οπλισμός ρ_{diag}(‰)
T7	0,125	0,75	1,40	Διαμόρφωση κρυφούποστρωμάτων	0	18,85	10,723	39,673	6,702	0
T8	0,125	0,75	1,40	Διαμόρφωση κρυφούποστρωμάτων	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: $\rho_{v,col} = \Sigma A_{sv} / A_{cc}$, $A_{cc} = b_w \times a$, ΣA_{sv} = άθροισμα κατακόρυφου οπλισμού άκρου, a = μήκος περισφιγμένης ζώνης

$\rho_{v,web} = \Sigma A_s / b(l_w - 2a)$, ΣA_s = άθροισμα κατακόρυφου οπλισμού κορμού

$\rho_{h,web} = \Sigma A_{sh} / b_w \times s$, s = απόσταση συνδετήρων κορμού , ΣA_{sh} = εμβαδόν συνδετήρα κορμού

$\rho_{st,col} = (l_{stir} \times A_{stir}) / (a \times b_w \times s_{stir})$, s_{stir} = απόσταση συνδετήρων άκρων

$\rho_{diag} = \Sigma A_{diag} / b_w \times l_w$, ΣA_{diag} = άθροισμα διαγώνιου οπλισμού και προς τις δύο διευθύνσεις

Κεφάλαιο 4

Υπολογισμός αντοχών δοκιμίων

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι ιδιότητες των υλικών (χάλυβα-σκυροδέματος) όπως προέκυψαν από επιτόπου δοκιμές στο εργαστήριο. Πραγματοποιείται ο αναλυτικός υπολογισμός των αντοχών χρησιμοποιώντας τις παραδοχές των κανονισμών (EC2-EC8-KANEΠΕ) και παρατίθενται όλες εκείνες οι μεθοδολογίες που απαιτούνται ούτως ώστε να προσδιορισθεί η αντισεισμική συμπεριφορά των έξι τοιχωμάτων.

4.2 Ιδιότητες υλικών

4.2.1 Σκυρόδεμα

Ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε μέσω δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη 6 κυβικών δοκιμίων 10x10x10 (cm). Ενδεικτικά παρατίθεται η αστοχία ενός από τα δοκίμια (Εικόνα 4.1). Οι αντοχές όλων των δοκιμίων παρατίθενται στον Πίνακα 4.1.



Εικόνα 4.1 Αστοχία δοκιμίου 2 σε μονοαξονική θλίψη.

Πίνακας 4.1 Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

α/α	Είδος δοκιμίου	Ανω διατομή		Κάτω διατομή		Εμβαδόν διατομής (mm ²)	Βάρος δοκιμίου (gr)	Μέγιστο Φορτίο (kN)	Θλιπτική τάση (MPa)
		b1	b2	b3	b4				
1	κυβικό	100.47	100.60	98.42	100.33	9990.88	2299.86	402.20	40.26
2	κυβικό	99.26	101.28	99.13	100.51	10008.30	2311.22	414.30	41.40
3	κυβικό	99.27	100.18	100.27	99.91	9981.42	2312.46	425.50	42.63
4	κυβικό	98.47	100.94	99.42	100.21	9951.22	2314.52	411.90	41.39
5	κυβικό	99.37	101.01	98.35	100.73	9972.08	2306.15	401.10	40.22
6	κυβικό	98.23	101.06	100.10	100.96	10016.61	2331.77	387.30	38.67
M.O									40.76
T.A									1.36

Οι παραπάνω τιμές αναφέρονται σε κυβικά δοκίμια 10x10x10 (cm). Η αναγωγή σε αντοχή κυλίνδρων $d \times h = 15 \times 30$ γίνεται ως εξής (Neville, 1995):

- Διαίρεση με το συντελεστή μετατροπής, 1,04, από κυβικά δοκίμια 10x10x10 (cm) σε κυβικά δοκίμια 15x15x15 (cm). Άρα:

$$f_{\text{cub},15} = \frac{f_{\text{cub},10}}{1,04} = \frac{40,76}{1,04} = 38,90 \text{ MPa}$$

- Πολλαπλασιασμός με το συντελεστή μετατροπής, 0,8, από κυβικά δοκίμια 15x15x15 (cm) σε κυλινδρικά δοκίμια 15x30 (cm). Άρα:

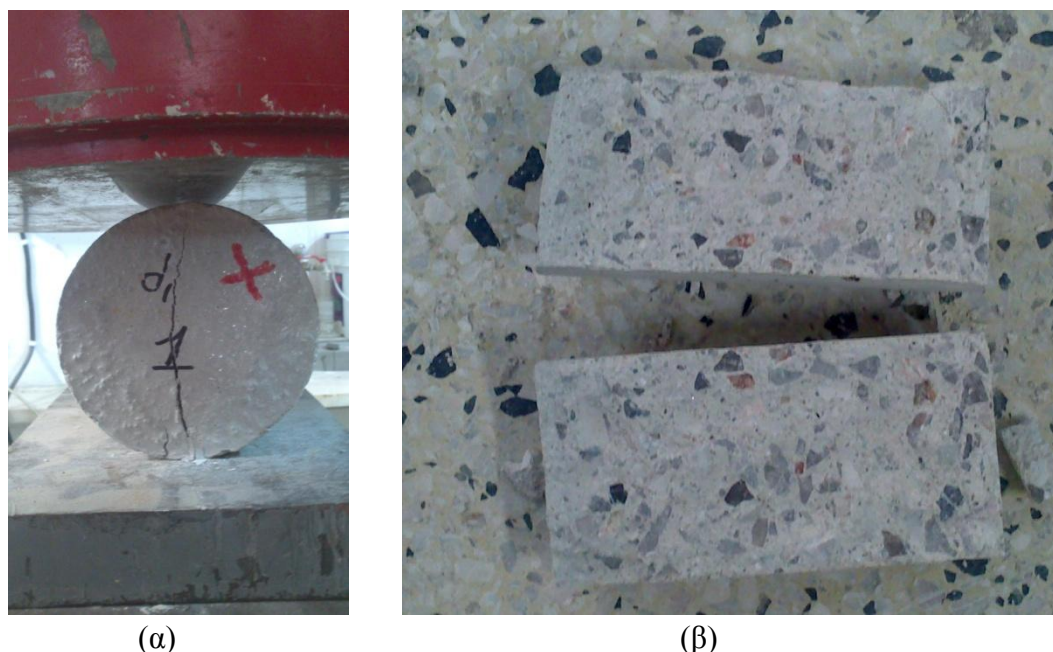
$$f_{\text{cyl}} = 0,8 \cdot f_{\text{cub},10} = 0,8 \cdot 38,90 = 31,12 \text{ MPa}$$

Ο προσδιορισμός της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε μέσω δοκιμής σε διάρρηξη 3 κυλινδρικών δοκιμών 10x15 (cm). Ενδεικτικά παρατίθεται η αστοχία ενός από τα δοκίμια (Εικόνα 4.2). Οι αντοχές όλων των δοκιμών παρατίθενται στον Πίνακα 4.2. Ο προσδιορισμός της εφελκυστικής τάσης σε διάρρηξη γίνεται μέσω της σχέσης (4.1):

$$f_{\text{ct,sp}} = (2 \cdot F_{\text{ct,sp}}) / (\pi \cdot d \cdot h) = (0,64 \cdot F_{\text{ct,sp}}) / (d \cdot h) \quad (4.1)$$

Η καμπτική εφελκυστική αντοχή υπολογίζεται μέσω της σχέσης (4.2):

$$f_{\text{ct,fl}} = 1,8 \cdot f_{\text{ct,sp}} \quad (4.2)$$



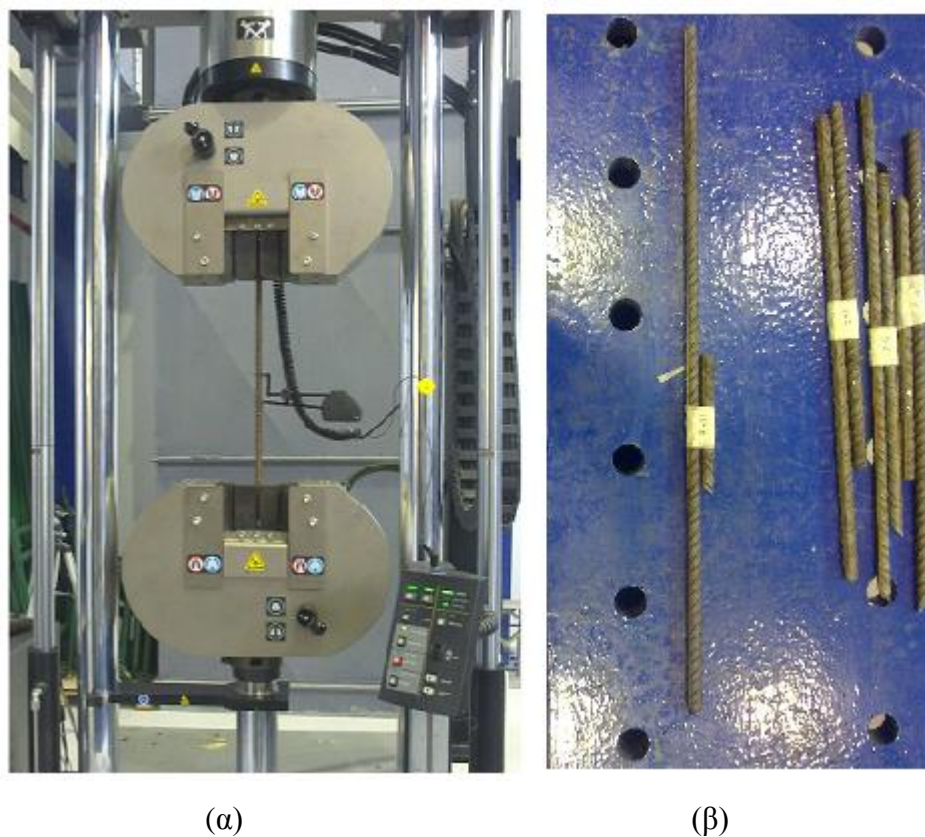
Εικόνα 4.2 Αστοχία σε διάρρηξη κυλινδρικού δοκιμίου από σκυρόδεμα

Πίνακας 4.2 Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος

a/a	Είδος δοκιμίου	Διάμετρος Άνω d1 (mm)	Διάμετρος -Κάτω d2 (mm)	Ύψος δοκιμίου (mm)	dxh (mm ²)	Βάρος δοκιμίου (gr)	Μέγιστο Φορτίο F _{ct,sp} (kN)	Εφελκυστική τάση διάρρηξης f _{ct,sp} (MPa)	Καμπτική Εφελκυστική τάση f _{ct,l} (MPa)
1	κυλινδρικό	100.54	101.71	150.00	15168.75	3613.90	96.70	4.08	
2	κυλινδρικό	100.36	100.73	150.00	15081.75	3653.90	68.80	2.92	
3	κυλινδρικό	100.76	100.13	150.00	15066.75	3627.90	72.00	3.06	
M.O								3.35	6.03
T.A								0.63	

4.2.2 Χάλυβας Οπλισμών

Ο προσδιορισμός της εφελκυστικής αντοχής του χάλυβα οπλισμών πραγματοποιήθηκε μέσω δοκιμής σε εφελκυσμό έξι ράβδων οπλισμού για κάθε διάμετρο Φ6,Φ8,Φ10,Φ12 (Εικόνα 4.2). Σημειώνεται πως για τον υπολογισμό του οριζόντιου οπλισμού του τοιχίου T8 έγινε μέτρηση διαφορετικής παρτίδας ράβδων διαμέτρου Φ8 (WΦ8). Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα οπλισμών (μέσες τιμές). Στο Διάγραμμα 4.1 αποτυπώνεται η συμπεριφορά του χάλυβα όλων των διαμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα 4.3 Αστοχία σε εφελκυσμό χάλυβα οπλισμού τοιχωμάτων

Πίνακας 4.3 Μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα διαμέτρου Φ6

Φ6 (T11,T12)										
a/a	Εργαστήριο	ρυθμός φόρτισης (mm/sec)	Μάζα (gr)	Μήκος (cm)	Πραγματική Διάμετρος (mm)	Τάση διαρροής (Mpa)	Παραμόρφωση διαρροής (%)	Παραμόρφωση στην έναρξη της κράτνσης (%)	Τάση αστοχίας (MPa)	Παραμόρφωση αστοχίας (%)
1,0	ΚΕΔΕ	60,00	154,18	71,50	5,92	639,44		2,59	718,97	12,26
2,0	ΚΕΔΕ	60,00	153,98	73,00	5,85	622,19		2,46	706,22	10,87
3,0	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	154,64	72,60	5,88	509,41		3,07	604,49	13,05
4,0	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	152,61	71,60	5,88	563,15		2,84	640,86	10,68
5,0	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	151,40	71,10	5,88	529,22		2,50	626,91	8,07
6,0	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	152,86	71,70	5,88	541,20		2,85	623,94	11,46
Σγόλια					M.O	567,44	0,28	2,72	653,56	11,06
					T.A	52,38				

Πίνακας 4.4 Μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα διαμέτρου Φ8

Φ8 (T7, T9-T12 Συνδετήρες +κατακόρυφα, κατακόρυφα T8)											
a/a	Εργαστήριο	ρυθμός φόρτισης (mm/sec)	Μάζα (gr)	Μήκος (mm)	Πραγματική Διάμετρος (mm)	Τάση διαρροής (MPa)	Παραμόρφωση διαρροής (%)	Παραμόρφωση στην έναρξη της κράτνυσης (%)	Τάση αστοχίας (MPa)	Παραμόρφωση αστοχίας (%)	
1,0	ΚΕΔΕ	60,00	221,05	55,60	8,03	599,54		3,33	671,74	12,00	
2,0	ΚΕΔΕ	60,00	223,14	57,10	7,96	571,92		3,18	661,95	13,92	
3,0	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	219,39	50,40	8,40	573,99		2,50	680,05	5,33	
4,0	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	212,40	56,10	7,84	606,22		2,45	695,22	8,09	
5,0	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	218,91	54,00	8,11	652,70		2,50	673,34	2,66	
6,0	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	217,53	53,00	8,16	590,06		2,58	695,60	4,78	
Σγόλια					M.O	588,34	0,29	2,81	680,91	8,82	
Δεν έχει ληφθεί υπόψη το 5.					T.A	29,58					

Πίνακας 4.5 Μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα διαμέτρου Φ8 (συνδετήρες τοιχίου T8)

WΦ8 (Συνδετήρες T8)											
a/a	Εργαστήριο	ρυθμός φόρτισης (mm/sec)	Μάζα (gr)	Μήκος (mm)	Πραγματική Διάμετρος (mm)	Τάση διαρροής (MPa)	Παραμόρφωση διαρροής (%)	Παραμόρφωση στην έναρξη της κράτνυσης (%)	Τάση αστοχίας (MPa)	Παραμόρφωση αστοχίας (%)	
1,0	ΚΕΔΕ	60,00	307,70	77,80	8,01	620,09		0,07	730,33	0,75	
2,0	ΚΕΔΕ	60,00	294,66	74,50	8,01	620,77		0,24	742,22	5,62	
3,0	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	300,43	75,50	8,04	514,90		3,96	584,79	11,07	
4,0	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	305,38	76,70	8,04	531,20		3,60	607,71	9,35	
5,0	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	301,18	75,50	8,05	520,89		3,54	597,04	15,35	
6,0	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	308,95	77,40	8,05	541,67		3,45	607,06	9,40	
Σγόλια					M.O	527,17	0,26	3,64	599,15	11,29	
Δεν έχουν ληφθεί υπόψη τα 1 και 2.					T.A	49,02					

Πίνακας 4.6 Μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα διαμέτρου Φ10

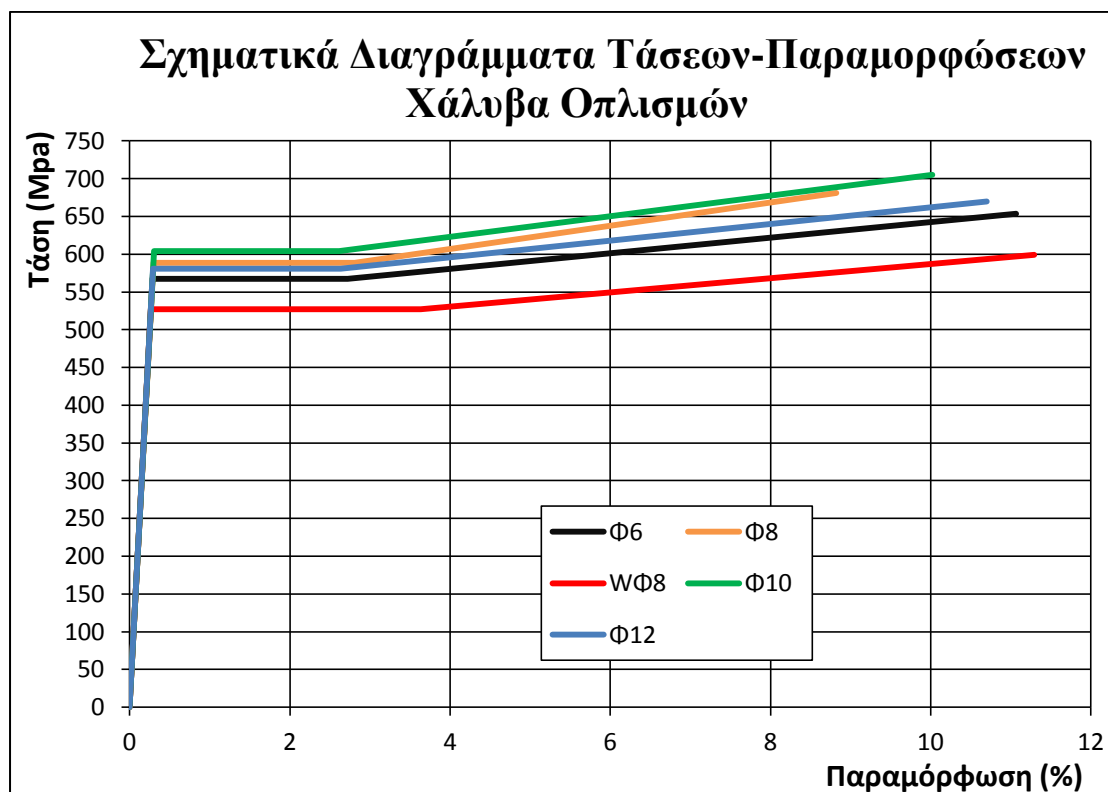
Φ10											
a/a	Εργαστήριο	ρυθμός φόρτισης (mm/sec)	Μάζα (gr)	Μήκος (mm)	Πραγματική Διάμετρος (mm)	Τάση διαρροής (MPa)	Παραμόρφωση διαρροής (%)	Παραμόρφωση στην έναρξη της κράτνυσης (%)	Τάση αστοχίας (MPa)	Παραμόρφωση αστοχίας (%)	
1,0	ΚΕΔΕ	60,00	322,69	52,30	10,01	624,30		2,54	732,14	11,22	
2,0	ΚΕΔΕ	60,00	319,70	51,90	10,00	611,41		2,54	716,09	12,62	
3,0	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	310,52	50,40	10,00	607,49		2,52	709,73	9,67	
4,0	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	347,22	56,10	10,02	602,88		2,62	694,49	8,69	
5,0	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	335,46	54,00	10,04	585,92		2,72	688,23	9,35	
6,0	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	328,45	53,00	10,03	593,16		2,75	687,88	8,55	
Σγόλια					M.O	604,19	0,30	2,62	704,76	10,02	
					T.A	13,60					

Πίνακας 4.7 Μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα διαμέτρου Φ12

Φ12										
a/a	Εργαστήριο	ρυθμός φόρτισης (mm/sec)	Μάζα (gr)	Μήκος (mm)	Πραγματική Διάμετρος (mm)	Τάση διαρροής (MPa)	Παραμόρφωση διαρροής (%)	Παραμόρφωση στην έναρξη της κράτνσης (%)	Τάση αστοχίας (MPa)	Παραμόρφωση αστοχίας (%)
1,0	ΚΕΔΕ	60,00	565,66	66,00	11,79	608,07		2,52	690,53	11,15
2,0	ΚΕΔΕ	60,00	602,62	70,20	11,80	610,02		2,60	695,09	11,64
A1	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	558,86	65,30	11,78	563,91		3,00	657,87	10,87
A2	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	452,95	52,80	11,80	561,66		2,73	656,46	9,09
A3	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	501,43	58,40	11,80	576,52		2,50	662,65	11,96
B1	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	551,92	64,20	11,81	564,30		2,58	645,22	10,19
B2	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	585,29	69,00	11,73	572,83		2,38	672,24	9,04
B3	ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ	10,00	587,64	69,40	11,72	586,27		2,74	667,77	12,36
Σγόλια					Μ.Ο	580,45	0,29	2,63	670,01	10,70
					Τ.Α	9,48				

Πίνακας 4.8 Μηχανικά χαρακτηριστικά χάλυβα οπλισμών (μέσες τιμές)

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 4.1 Σχηματικά διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμών

4.3 Καμπτική αντοχή

Για τον υπολογισμό της αντοχής σε κάμψη χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα Excel. Η θλιπτική δύναμη σκυροδέματος προσδιορίστηκε λαμβάνοντας παραβολικό (ακριβές) διάγραμμα τάσεων- παραμορφώσεων (Σχήμα 2.1 και Σχήμα 2.2) και ισούται με:

$$F_c = f_c \cdot b \cdot x \cdot [1 - \varepsilon_{c2} / (3\varepsilon_{cu,2})] \quad (4.3)$$

όπου:

Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής f_c δεν λαμβάνεται υπόψη ο μειωτικός συντελεστής γ_c και ο συντελεστής α_{cc} ισούται με 1 καθώς το σκυρόδεμα δεν υφίσταται μακροχρόνιες επιδράσεις ούτε τυχούσες δυσμενείς επιρροές φόρτισης, αφού το φορτίο είναι πλήρως ελεγχόμενο.

b το πλάτος της ορθογωνικής διατομής

x το ύψος της θλιβόμενης ζώνης

Τα υπόλοιπα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στην Εξ(4.1) επεξηγούνται πλήρως στην παράγραφο §2.2.1.

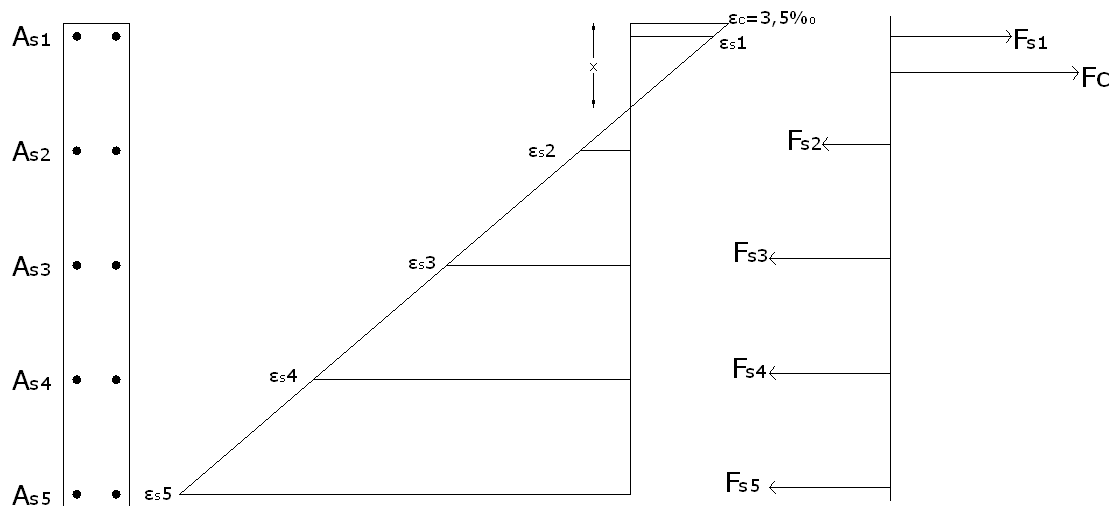
Η δύναμη του χάλυβα ισούται με:

$$F_s = A_s \cdot \varepsilon_s \cdot E \quad \text{για } \sigma_s < f_y \quad (4.3)$$

$$F_s = A_s \cdot [f_y + (f_u - f_y) \cdot (\epsilon_s - \epsilon_y) / (\epsilon_u - \epsilon_y)] \quad \text{για } \sigma_s \geq f_y \quad (4.4)$$

Χρησιμοποιείται διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων με κεκλιμένο δεύτερο κλάδο με όριο παραμόρφωσης ϵ_u και μέγιστη τάση kf_y στην ϵ_u , όπου $k = (f_u/f_y)_k$

Η ροπή αντοχής M_{Rd} προκύπτει ύστερα από διαδοχικές δοκιμές του ύψους της θλιβόμενης ζώνης x ώστε να ικανοποιείται η ισοδυναμία εσωτερικών-εξωτερικών δυνάμεων.



Σχήμα 4.1 Ισοδυναμία εσωτερικών δυνάμεων τοιχίων (γενικό σχήμα)

Η ισοδύναμη τέμνουσα προκύπτει ίση με:

$$P_u = M_{Rd}/L_s \quad (4.5)$$

Ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών-εξωτερικών δυνάμεων προκύπτει ίσος με:

$$z = M_{Rd}/\Sigma F_{\theta l} \quad (4.6)$$

Τα δεδομένα που εισάγονται είναι:

- Οι παραμορφώσεις σκυροδέματος και χάλυβα ϵ_{c2} , ϵ_{s1}
- Οι διάμετροι και το πλήθος των διαμήκων ράβδων ϕ_i και n_i αντίστοιχα
- Το πλάτος b της ορθογωνικής διατομής και τα στατικά ύψη d_i των οπλισμών
- Οι αντοχές σκυροδέματος και χάλυβα f_c , f_y , f_{yw}
- Η διάμετρος των συνδετήρων $\phi_{\sigma\upsilon\upsilon\delta}$ και η απόστασή τους s
- Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα E_s
- Το μήκος διάτμησης L_s και τέλος

·Οι αποστάσεις της διάταξης των συνδετήρων που δημιουργούν συνθήκες περισφίξεως: $s_h, h_c, b_c, \Sigma b_i^2$.

Παρακάτω δίδεται ο συγκεντρωτικός Πίνακας 4.9 όπου παρουσιάζονται οι ροπές αντοχής M_{Rd} και οι ισοδύναμες τέμνουσες P_u όλων των τοιχωμάτων T7 έως T12.

4.4 Καμπτική Διαρροή-Ενεργός Δυσκαμψία

Ο πρώτος τρόπος για τον υπολογισμό της ροπής διαρροής, M_y , πραγματεύεται πανομοιότυπη μεθοδολογία με την παραπάνω για τον προσδιορισμό της ροπής αντοχής, M_{Rd} , με τη διαφορά πως το κριτήριο σε αυτήν την περίπτωση είναι η διαρροή του πλέον εφελκυσμένου χάλυβα ($\varepsilon_{s1} = \varepsilon_y$).

Ο δεύτερος τρόπος προσδιορισμού της ροπής διαρροής, M_y , λαμβάνει υπόψη τις κάπως πιο εμπειρικές υποδείξεις του ΚΑΝΕΠΕ οι οποίες αναλύονται διεξοδικά στην παράγραφο §2.3.2 και καταλήγουν στην τελική Εξ.(2.22).

Ο υπολογισμός της ενεργού δυσκαμψίας έγινε σύμφωνα με τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ και αποτελεί το πιο κατάλληλο μέγεθος για να ληφθεί υπόψη η απομείωση της γεωμετρικής δυσκαμψίας EI_{gr} όπου $I = bh^3/12$ για ορθογωνικές διατομές.

Η ενεργός δυσκαμψία EI_{eff} υπολογίζεται εντός του μήκους διάτμησης L_s σε συνάρτηση με τη ροπή M_y και τη γωνία στροφής στη διαρροή φ_y της ακραίας διατομής του στοιχείου και δίδεται από την Εξ.(2.34).

Η τελική τιμή K_{eff} (Πίνακας 4.10) προκύπτει με βάση τον τύπο:

$$K_{eff} = 3EI_{eff}/L^3 \quad \text{ο οποίος ισχύει για πρόβολο μήκους } L \quad (4.8)$$

Χάριν της παρουσίασης των αποτελεσμάτων για τη ροπή αντοχής και για τη ροπή διαρροής και με τις δύο υποδειγμένες μεθοδολογίες μορφώνεται ο κάτωθι συγκεντρωτικός πίνακας (Πίνακας 4.9) (βλ Παράρτημα Β).

Πίνακας 4.9 Καμπτική αντοχή-διαρροή τοιχωμάτων (βλ. Παράρτημα Β)

α/α	ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ				ΚΑΝ.ΕΠΕ	
	M_{Rd} (kNm)	P_u (kN)	M_y (kNm)	P_y (kN)	M_y (ΚΑΝ.ΕΠΕ) (kNm)	P_y (ΚΑΝ.ΕΠΕ) (kN)
T7	289,336	192,891	169,525	113,016	184,499	123,000
T8	288,768	192,512	169,824	113,216	184,405	122,936
T9	217,386	144,924	148,856	99,237	165,150	110,100
T10	217,386	144,924	148,856	99,237	165,150	110,100
T11	217,386	144,924	148,856	99,237	165,150	110,100
T12	217,386	144,924	148,856	99,237	165,150	110,100

Πίνακας 4.10 Ενεργός-γεωμετρική δυσκαμψία τοιχωμάτων

	α/α	T7	T8	T9	T10	T11	T12
Ενεργός Δυσκαμψία (ΚΑΝ.ΕΠΕ)	K_{eff} (KN/m)	14766,76	14732,207	12928,48	12928,48	12928,48	12928,48
Γεωμετρική Δυσκαμψία	K_{gr} (KN/m)	120807,69	120807,69	120807,69	120807,69	120807,69	120807,69

4.5 Γωνίες Στροφής- Αναπτυχθείσα Πλαστιμότητα

Ο αναλυτικός υπολογισμός της αναπτυχθείσας πλαστιμότητας μετακινήσεων έγινε σύμφωνα με τις υποδείξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Οι τελευταίες μεταφράζουν το δείκτη πλαστιμότητας συνολικών μεταθέσεων μ_δ σε όρους τοπικής πλαστιμότητας γωνιών στροφής άκρων στοιχείων μ_θ ως εξής:

-Αν εξασφαλίζεται η αποφυγή πλαστικού μηχανισμού ορόφου (διάταξη τοιχίων που αναλαμβάνουν πάνω από το 60% της τέμνουσας βάσης):

$$\mu_{\delta} = \mu_{\theta}$$

-Σε διαφορετική περίπτωση:

$$\mu_{\delta} = \mu_{\theta} \cdot \left(\frac{H_{\text{ορόφου}}}{H_{\text{tot}}} \right)$$

Ο πιο σημαντικός δείκτης λοιπόν για την τελική επιλογή του δείκτη μ μιας υφιστάμενης κατασκευής είναι η πλαστιμότητα γωνιών στροφής, μ_{θ} . Υπολογίζονται για το σκοπό αυτό οι γωνίες στροφής χορδής στη διαρροή, θ_y , και στην αστοχία, θ_u . Εφαρμόζονται οι σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ αλλά και οι διατάξεις του EC8 (Part 3) για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων μεγεθών:

-Η καμπυλότητα διαρροής υπολογίζεται με δύο μεθοδολογίες, αναλυτικά αλλά και σύμφωνα με τις υποδείξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ ως εξής:

$$\cdot (1/r)_y = \varepsilon_{c2}/x \quad \text{όπου } x \text{ το ύψος της θλιβόμενης ζώνης}$$

$$\cdot \text{Σύμφωνα με την Εξ.(2.16):} \quad (1/r)_y = f_y / [E_s(1 - \xi_y)d]$$

-Η γωνία στροφής χορδής κατά τη διαρροή θ_y για τοιχώματα υπολογίζεται σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ από την Εξ.(2.31):

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

- Η γωνία στροφής χορδής κατά την αστοχία θ_u για τοιχώματα υπολογίζεται σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ αλλά και σύμφωνα με τον EC8 (Part 3) από την Εξ.(2.36):

$$\theta_{um} = 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} (\alpha_s)^{0,35} 25 \left(\alpha_{ps} \frac{f_{yw}}{f_c} \right) (1,25^{100\rho_d})$$

όπου:

·Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ:

- Για όλα τα τοιχώματα T7-T12 το 2^ο μέλος της Εξ.(2.36) χρειάζεται να πολλαπλασιασθεί με 0,58 (ο συντελεστής γίνεται 0,009).

- Στα τοιχία T9-T10-T11-T12 τα οποία έχουν διαστασιολογηθεί και κατασκευασθεί με βάση τα ισχύοντα στην Ελλάδα προ του 1985 και χρησιμοποιούν νευροχάλυβες η τιμή που υπολογίζεται με βάση την Εξ.(2.36) διαιρείται με 1,2.

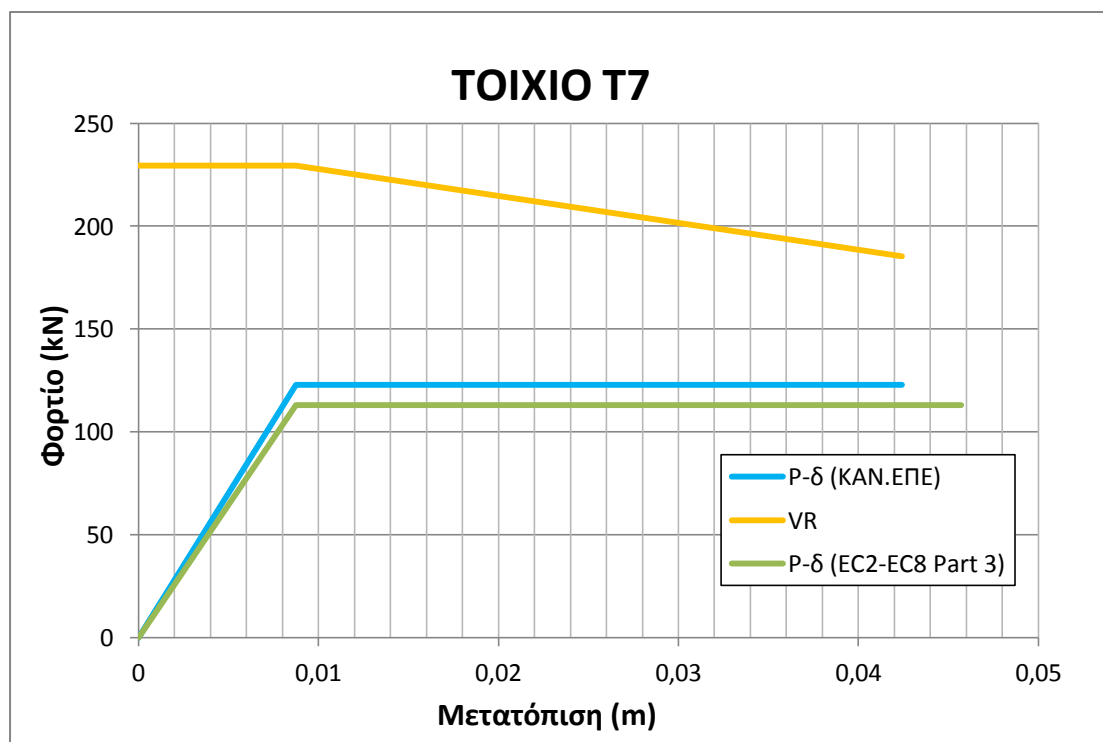
- Στα τοιχεία T11-T12 όπου σύμφωνα με τους υπολογισμούς της ανάλυσης το στοιχείο αστοχεί από τέμνουσα προτού διαρρεύσει σε κάμψη (§7.2.4.2(α) ΚΑΝ.ΕΠΕ), υιοθετείται παραμόρφωση αστοχίας $\theta_u = 1,4\theta_y$.

·Σύμφωνα με τον EC8 (Part 3):

-Για όλα τα τοιχώματα T7-T12 το 2^ο μέλος της Εξ.(2.36) χρειάζεται να διαιρεθεί με 1,6.

-Στα τοιχεία T9-T10-T11-T12 τα οποία έχουν διαστασιολογηθεί και κατασκευασθεί με βάση τα ισχύοντα στην Ελλάδα προ του 1985 και χρησιμοποιούν νευροχάλυβες η τιμή που υπολογίζεται με βάση την Εξ.(2.36) πολλαπλασιάζεται με 0,85.

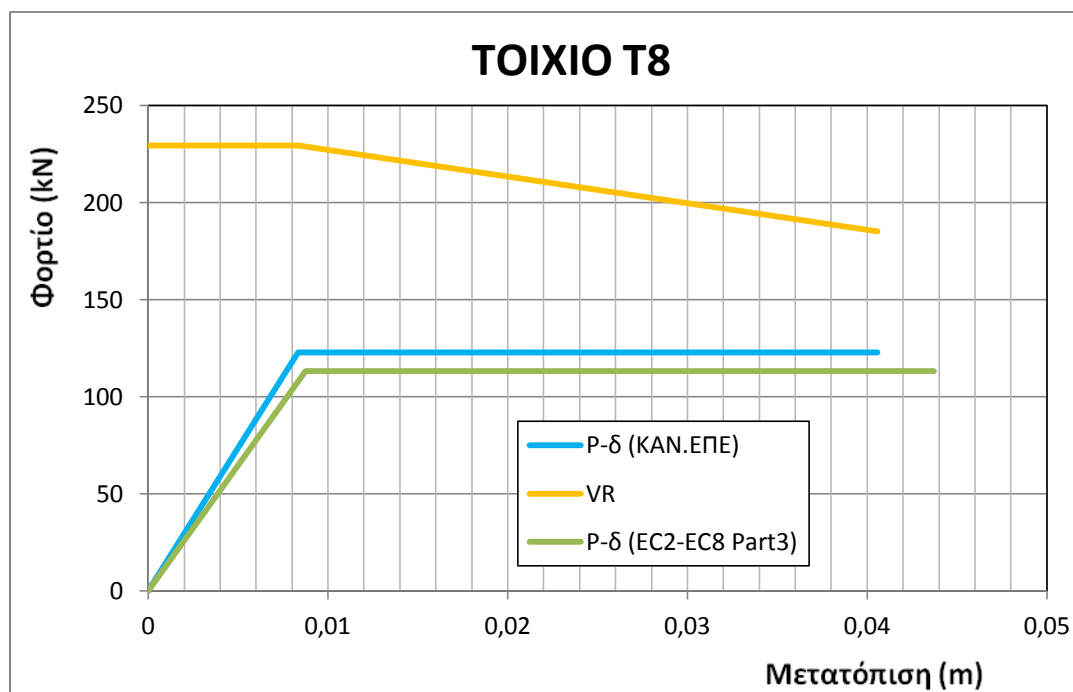
Για τον αναλυτικό υπολογισμό της γωνίας στροφής στην αστοχία, θ_u , σύμφωνα με τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ (§7.2.4.2) μορφώνονται τα παρακάτω διαγράμματα Φορτίου- Μετατόπισης (P-δ) μέσω των οποίων εξετάζεται η πιθανή προγενέστερη της διαρροής σε κάμψη, P_y , αστοχία σε τέμνουσα, V_R .



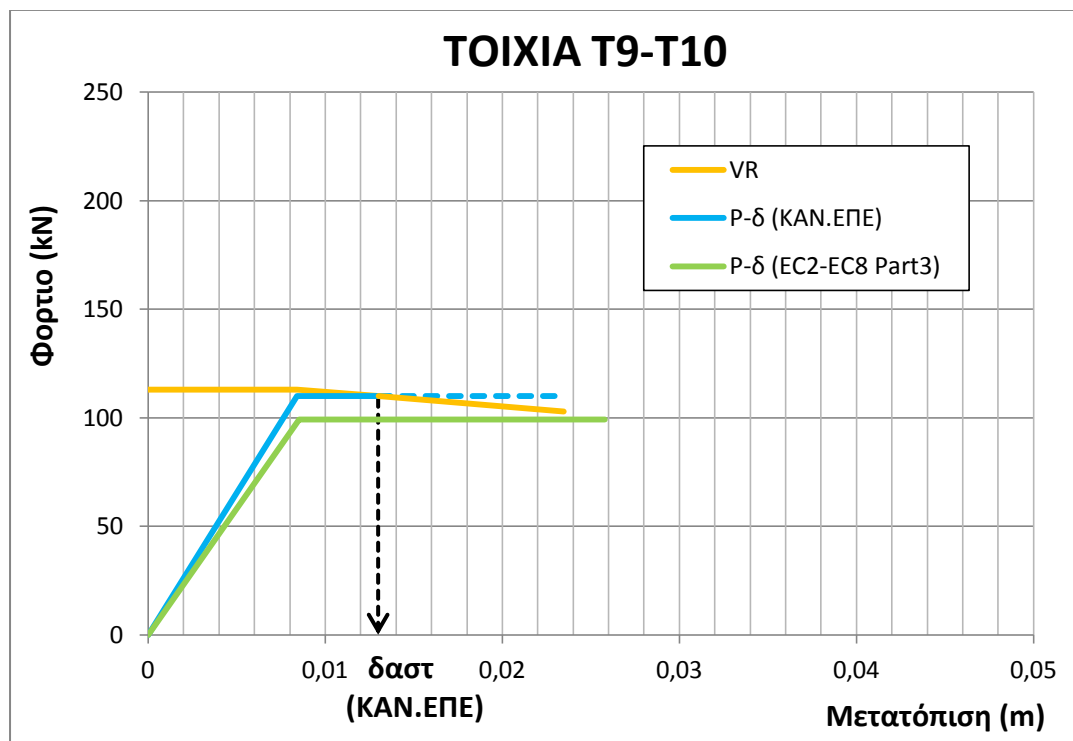
Διάγραμμα 4.2 Γράφημα Φορτίου-Μετατόπισης (P-δ) τοιχείου T7

Σύμφωνα με την ανάλυση, παρατηρείται πως για τα τοιχεία T7, T8 δεν υφίσταται θέμα διατμητικής αστοχίας πριν τη διαρροή σε κάμψη, επομένως η γωνία στροφής στην αστοχία υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξ.(2.36):

$$\theta_{um} = 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} (\alpha_s)^{0,35} 25 \left(\alpha_{ps} \frac{f_{yw}}{f_c} \right) (1,25^{100\rho_d})$$

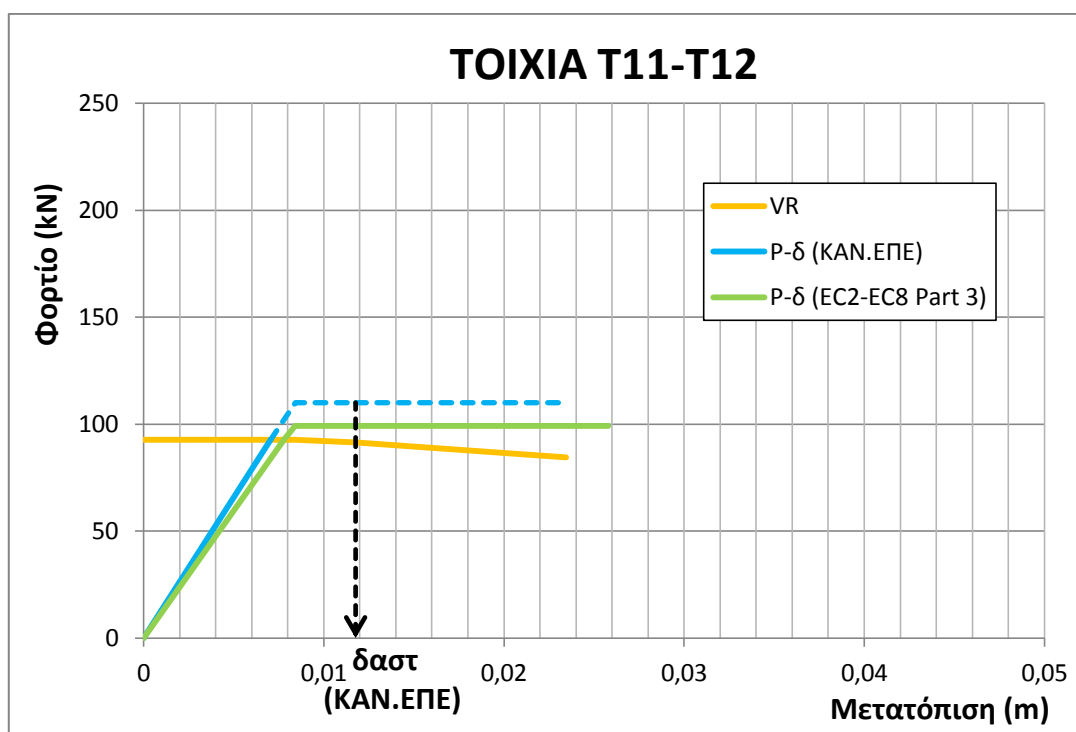


Διάγραμμα 4.3 Γράφημα Φορτίου-Μετατόπισης (P-δ) τοιχίου T8



Διάγραμμα 4.4 Γράφημα Φορτίου-Μετατόπισης (P-δ) τοιχίων T9-T10

Στα τοιχεία **T9**, **T10** υπολογίζεται (κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ) πως η διατμητική αστοχία πραγματοποιείται για $\delta_{αστ}=0,013\text{m}$ ($\theta_u=0,008667$) και για φορτίο $P=110,1\text{kN}$. Αρχικώς η αντοχή σε τέμνουσα, V_R , ήταν μεγαλύτερη του φορτίου διαρροής σε κάμψη, P_y , όμως με την ανακύκλιση των παραμορφώσεων και την συνεπαγόμενη εξασθένηση της διατμητικής αντοχής, V_R , πραγματοποιείται διατμητική αστοχία.



Διάγραμμα 4.5 Γράφημα Φορτίου-Μετατόπισης (P-δ) τοιχίων T11-T12

Στο τοιχίο **T11** υπολογίζεται πως η διατμητική αστοχία θα προηγηθεί της διαρροής σε κάμψη και επομένως λαμβάνεται $\delta_{αστ} = 1,4 \cdot \delta_y = 1,4 \cdot 0,008411 = 0,011775\text{m}$ ($\theta_u = 0,00785$) (KAN.EΠE §7.2.4.2).

Με βάση τα παραπάνω καταρτίζεται ο επόμενος Πίνακας 4.11 ο οποίος περιλαμβάνει τις υπολογιστικές τιμές πλαστιμότητας:

Πίνακας 4.11 Υπολογιστικές πλαστιμότητες τοιχωμάτων

α/α	Αναλυτικά EC2-EC8(Part 3)				KAN.EΠE			
	$(1/r)_y$	θ_y	θ_u	μ_θ	$(1/r)_y$	θ_y	θ_u	μ_θ
T7	0,00575	0,00583	0,03046	5,22	0,00540	0,00555	0,02827	5,09
T8	0,00573	0,00583	0,02913	5,00	0,00540	0,00556	0,02704	4,86
T9	0,00525	0,00568	0,01719	3,03	0,00516	0,00561	0,00867	1,54
T10	0,00525	0,00568	0,01719	3,03	0,00516	0,00561	0,00867	1,54
T11	0,00525	0,00568	0,01719	3,03	0,00516	0,00561	0,00785	1,40
T12	0,00525	0,00568	0,01719	3,03	0,00516	0,00561	0,00785	1,40

4.6 Διατμητική αντοχή

Ο αναλυτικός υπολογισμός της διατμητικής αντοχής των έξι τοιχωμάτων έγινε σύμφωνα με τις υποδείξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ και του EC2 και προσδιορίστηκε με δύο μεθοδολογίες.

· Η πρώτη μεθοδολογία προκύπτει από διατάξεις των EC2 και πραγματεύεται τον υπολογισμό των εξής μεγεθών:

- Αντοχή σε τέμνουσα στοιχείων χωρίς οπλισμό διάτμησης σύμφωνα με την Εξ.(2.8):

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d$$

-Τέμνουσα που μπορεί να αναληφθεί από τον οπλισμό διάτμησης τη στιγμή της διαρροής του, Εξ.(2.12):

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

- Η μέγιστη τέμνουσα που μπορεί να αναληφθεί από το στοιχείο, όπως καθορίζεται από τη συντριβή των λοξών θλιπτήρων, Εξ.(2.11):

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

· Η δεύτερη μεθοδολογία προκύπτει από διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ ο οποίος λαμβάνει υπόψη την εξασθένιση της διατμητικής αντοχής μέσω του δείκτη πλαστιμότητας μ_θ και πραγματεύεται τον υπολογισμό των μεγεθών μέσω των εξής εμπειρικών σχέσεων:

-Διατμητική αντοχή V_R τοιχώματος, σύμφωνα με την Εξ.(2.45):

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

όπου:

- Συμβολή εγκάρσιου οπλισμού στη διατμητική αντοχή V_w που για διατομές με ορθογωνικό κορμό πάχους b_w ισούται με την Εξ.(2.46):

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

- Οριακή τιμή που αντιστοιχεί σε αστοχία του κορμού σε λοξή θλίψη, $V_{R,max}$ σύμφωνα με την Εξ.(2.47):

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

Πίνακας 4.12 Διατμητική αντοχή κατά EC2- KAN.EΠΕ

a/a	EC2			KAN.EΠΕ	
	$V_{Rd,c}$ (KN)	$V_{Rd,s}^1$ (KN)	$V_{Rd,max}^1$ (KN)	V_R^2 (KN)	$V_{R,max}$ (KN)
T7	85,481	210,831 (527,116)	(404,071) 585,934	182,536 (229,476)	231,441
T8	85,481	210,440 (526,137)	(396,314) 574,685	185,189 (229,476)	235,696
T9	77,994	63,800 (159,510)	(304,014) 440,843	102,900 (113,004)	273,808
T10	77,994	63,800 (159,510)	(304,014) 440,843	102,900 (113,004)	273,808
T11	77,994	34,612 (86,537)	(304,014) 440,843	84,417 (92,710)	273,808
T12	77,994	34,612 (86,537)	(304,014) 440,843	84,417 (92,710)	273,808

¹ Οι τιμές εκτός παρένθεσης προκύπτουν για γωνία θλιπτήρων $\theta=45^\circ$, ενώ οι εντός παρένθεσης για $\theta=21,8^\circ$

² Οι τιμές εκτός παρένθεσης προκύπτουν για $\mu_{\theta,pl} = \mu_{\theta,pl,max}$, δηλαδή περιγράφουν την τιμή της απομειωμένης διατμητικής αντοχής κατά KAN.EΠΕ ενώ οι εντός παρένθεσης προκύπτουν για $\mu_{\theta,pl}=0$.

Κεφάλαιο 5

Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα

5.1 Εισαγωγή

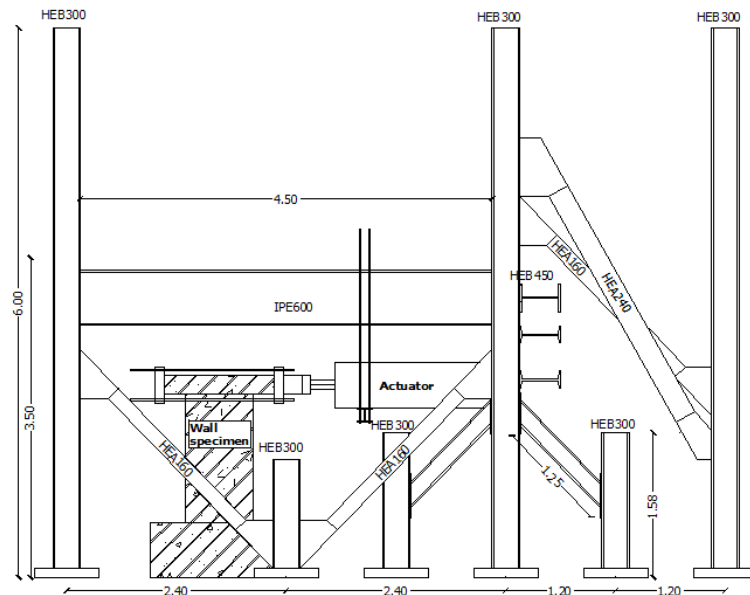
Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται με λεπτομέρεια η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την αποτίμηση της αντισεισμικής συμπεριφοράς των τριών τοιχωμάτων T7, T9, T11. Παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος και παρατίθεται η διάταξη των βελομέτρων που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος καταρτίζονται πίνακες και διατίθενται σχήματα και φωτογραφίες όπου περιγράφονται αναλυτικά τα πειραματικά αποτελέσματα των τοιχίων.

5.2 Πειραματική διαδικασία

5.2.1 Πειραματική διάταξη

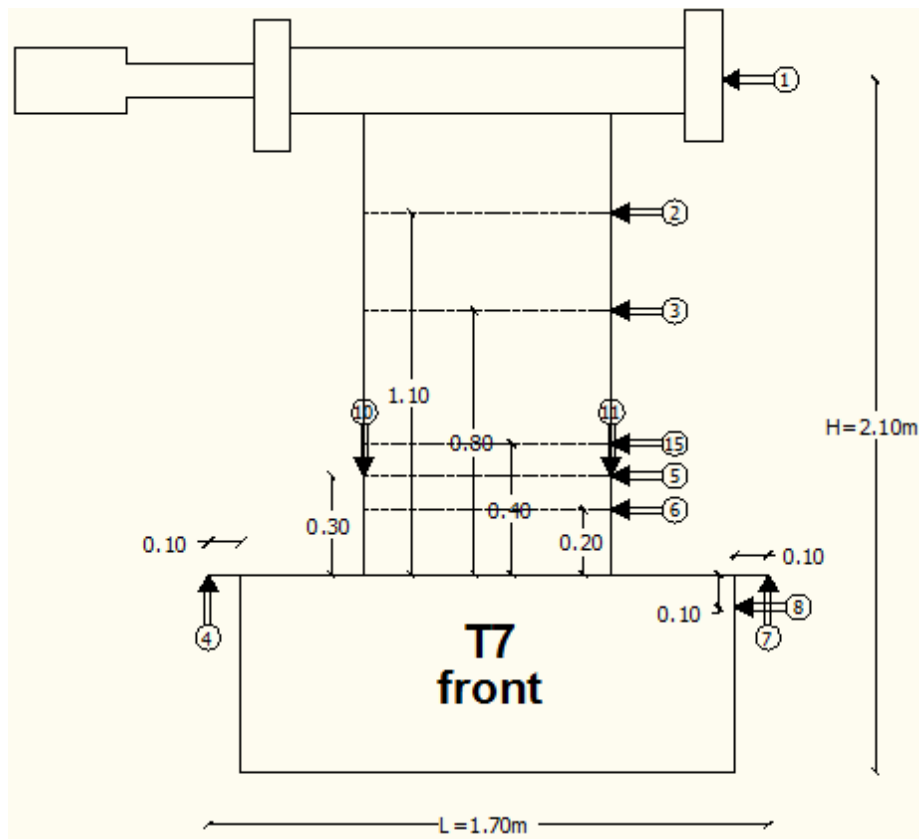
Η μελέτη και ο σχεδιασμός της διπλωματικής αυτής αφορά έξι δοκίμια-τοιχώματα με γεωμετρική διάταξη και μηχανικά χαρακτηριστικά που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3. Ωστόσο, στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας μελετήθηκαν πειραματικά μόνο τα τρία τοιχία εξ' αυτών (T7, T9, T11). Τα δοκίμια μελετήθηκαν ως καμπτικοί πρόβολοι, σε στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Τα τοιχώματα εξασφαλίζουν τη μεταφορά των φορτίων στο έδαφος με ασφάλεια 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. Γίνεται σύνδεση της κεφαλής του επενεργητή με πλάκα επί της πρισματικής δοκού στο άνω μέρος του τοιχώματος. Μία όμοια πλάκα συνδέεται με την αρχική μέσω τεσσάρων ντιζών προκειμένου να επιτευχθεί η εναλλασσόμενη φόρτιση (σεισμική προσομοίωση). Οι δύο αυτές πλάκες προσανατολίζονται με τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η κεντρική φόρτιση επενεργητή-πρισματικής δοκού. Στο Σχήμα 5.1 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η ανωτέρω περιγραφή της πειραματικής διάταξης.



Σχήμα 5.1 Πειραματική διάταξη Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος

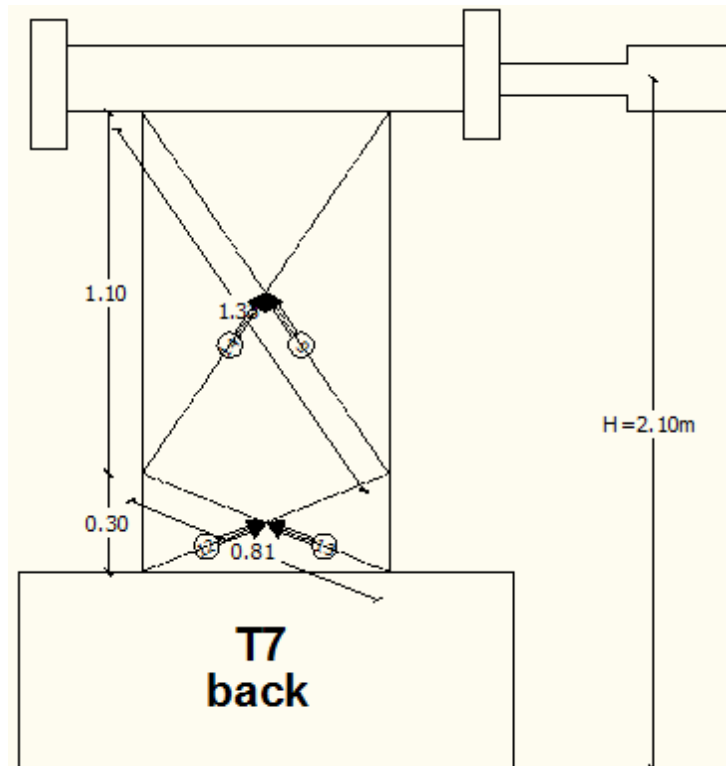
5.2.2 Διάταξη βελομέτρων



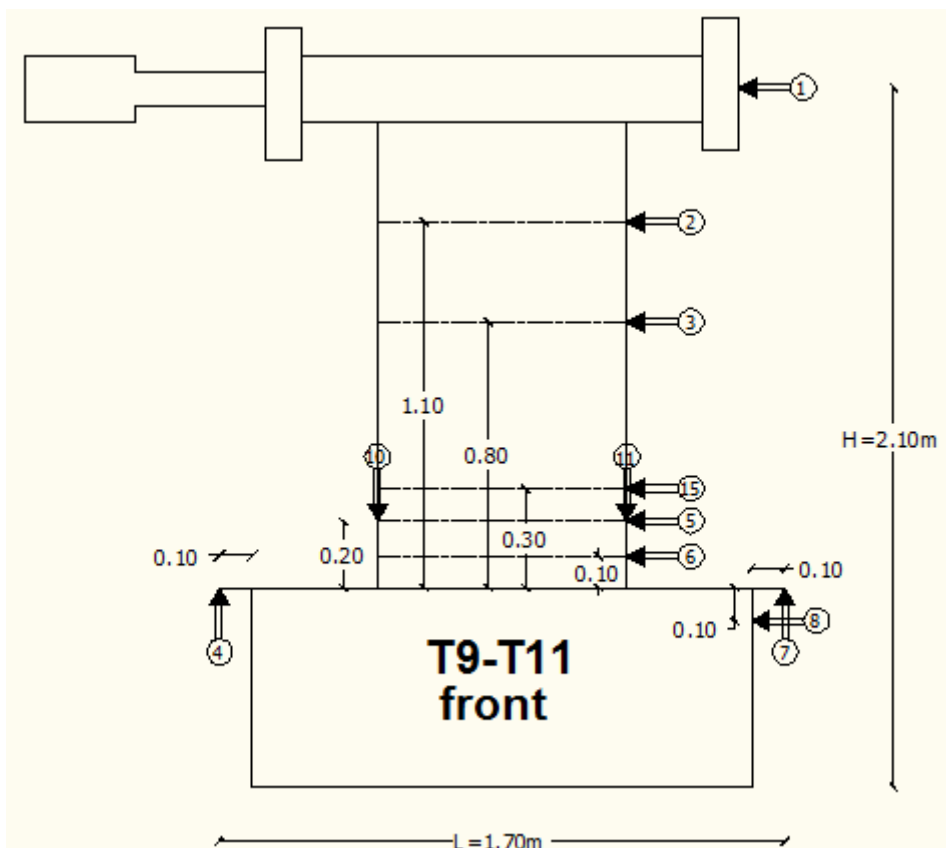
Σχήμα 5.2 Διαστάσεις μπροστινής όψεως και διάταξη βελομέτρων τοιχίου T7

Για την ακριβή μέτρηση των μετατοπίσεων σε ποικίλα σημεία ενδιαφέροντος των δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκαν δεκαπέντε βελόμετρα με δυνατότητα μέτρησης

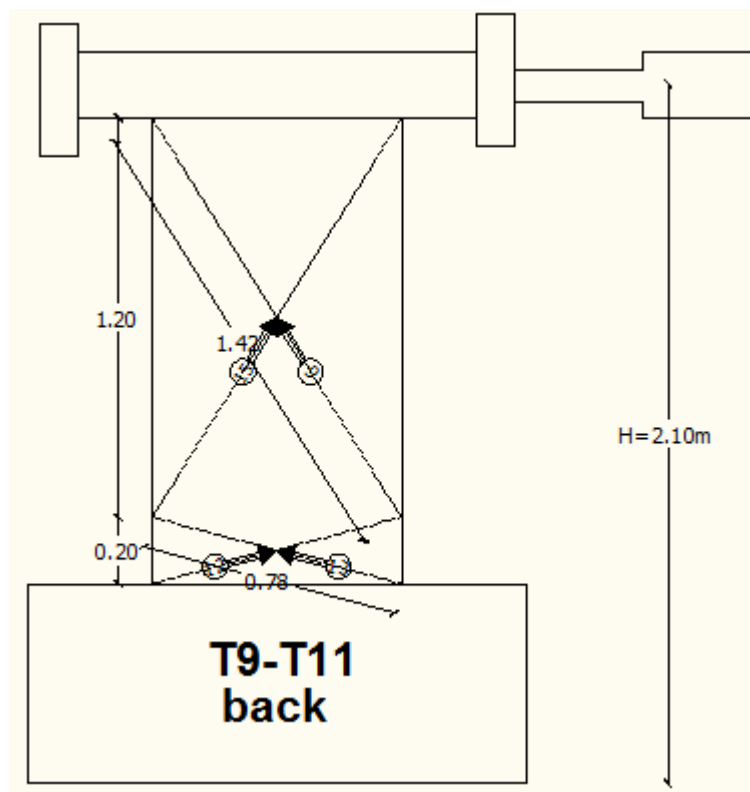
μέγιστης μετατόπισης 50mm ,100mm και 200mm. Οι ακριβείς τους θέσεις απεικονίζονται στα Σχήματα 5.2 έως 5.5.



Σχήμα 5.3 Διαστάσεις όψεως όπισθεν και διάταξη βελομέτρων τοιχίου T7



Σχήμα 5.4 Διαστάσεις μπροστινής όψεως και διάταξη βελομέτρων τοιχίων T9-T11



Σχήμα 5.5 Διαστάσεις όψεως όπισθεν και διάταξη βελομέτρων τοιχίων T9-T11

Η οριζόντια μετατόπιση κορυφής του τοιχώματος, Δ_{top} , υπολογίζεται αν από την τιμή καταγραφής του βελόμετρου 1, αφαιρεθούν η τιμή καταγραφής της ολίσθησης της βάσης θεμελιώσεως (βελόμετρο7) και η στροφή της (βελόμετρα 4 και 8).

Παρατίθεται η εξίσωση υπολογισμού:

$$\Delta_{top} = \delta_1 - \delta_{ολίσθ} - \delta_{στροφ} \quad (5.1)$$

όπου

$$\delta_{στροφ} = (\delta_4 + \delta_8) \cdot H/L \quad (5.2)$$

Ομοίως για τον υπολογισμό της οριζόντιας μετατόπισης του τοιχίου στα σημεία που καταδεικνύονται από τα βελόμετρα 2, 3, 15, 5, 6 (Σχήμα 5.2, 5.4) χρησιμοποιείται η Εξ.(5.1). Διορθώνεται επί της ουσίας η τιμή που καταγράφουν τα βελόμετρα 2, 3, 15, 5, 6 μέσω της αφαίρεσης της τιμής που καταγράφουν αθροιστικά τα βελόμετρα 4, 7, 8.

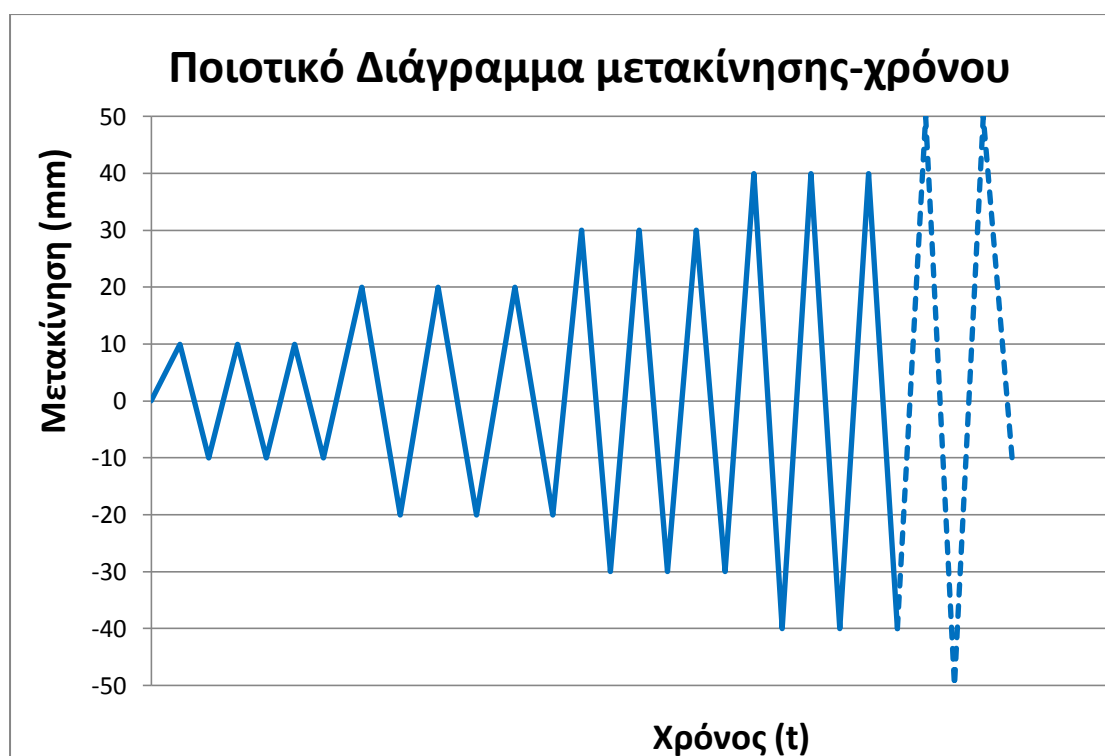
Τα βελόμετρα 10 και 11 καταγράφουν (αν αθροιστεί η τιμή τους) τη στροφή της άνω διατομής της πλαστικής ζώνης. Η πλαστική περιοχή έχει ορισθεί έτσι ώστε οι τιμές των ροπών να είναι μεγαλύτερες της ροπής διαρροής ($M > M_y$).

Τα τέσσερα χιαστί βελόμετρα 9, 12, 13, 14 στην όψη όπισθεν του τοιχίου τοποθετούνται για τη μέτρηση της παραμόρφωσης στην πλαστική περιοχή και στο υπόλοιπο άνω τμήμα του τοιχώματος (Σχήμα 5.3).

5.3 Πειραματικά αποτελέσματα

Πειραματικά αποτελέσματα εξάγονται μόνον για τα τρία δοκίμια, T7, T9, T11, ασχέτως αν κατασκευάστηκαν αρχικώς έξι. Στα υπόλοιπα τρία τοιχώματα T8, T10, T12, θα μελετηθεί μελλοντικά η σεισμική συμπεριφορά τους υπό την προσθήκη πιθανής ενίσχυσης.

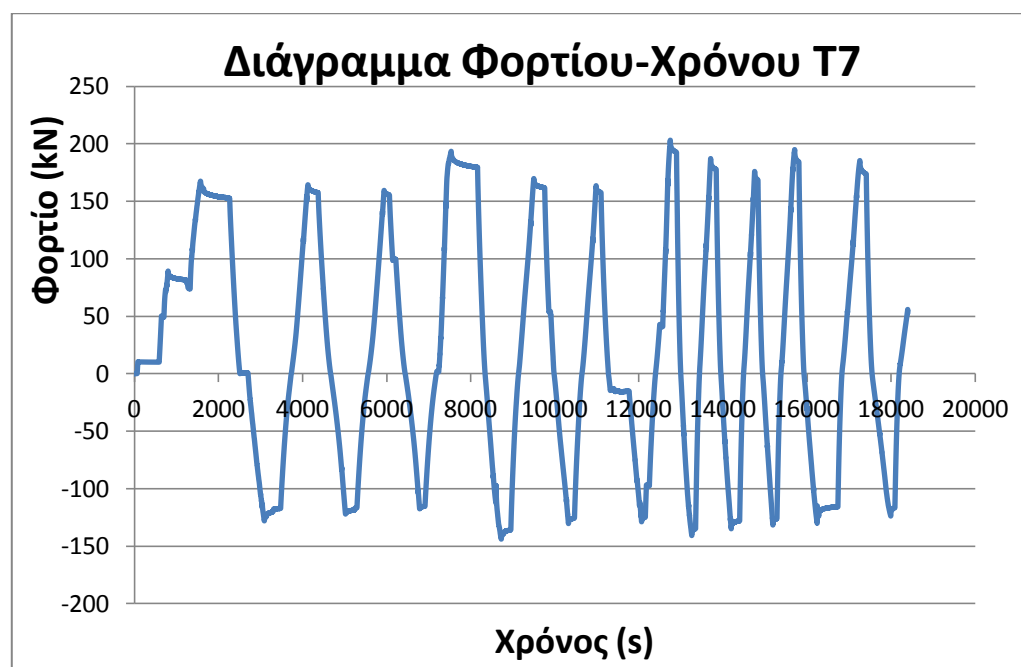
Επιβάλλονται ελεγχόμενες μετατοπίσεις (υπολογίζοντας παράλληλα τις αντίστοιχες δυνάμεις) οι οποίες ξεκινώντας από το μηδέν αυξάνονται σταδιακά προς τα θετικά και στη συνέχεια αναστρέφονται προς τα αρνητικά με ακραίες τιμές, αρχικά, $\pm 10\text{mm}$ ύστερα $\pm 20\text{mm}$ αυξάνοντας έτσι συνεχώς κατά 10mm τη μετατόπιση έως ότου επέλθει αστοχία του δοκιμίου. Για κάθε μία μέγιστη τιμή μετατόπισης πραγματοποιούνται τρεις κύκλοι φόρτισης όπως ενδεικτικά παρουσιάζεται στο παρακάτω ποιοτικό Διάγραμμα 5.1.



Διάγραμμα 5.1 Ιστορία φόρτισης

Τοιχίο T7

Διάγραμμα 5.2 Γράφημα μετακίνησης-χρόνου τοιχίου T7



Διάγραμμα 5.3 Γράφημα φορτίου-χρόνου τοιχίου T7

Αναφορικά με το σχηματισμό ρωγμών και τις μορφές αστοχίας παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια των τριών κύκλων για μετατόπιση $\pm 10\text{mm}$ ξεκινούν να εμφανίζονται ρωγμές μικρού πάχους και εύρους κατά μήκος της βάσης του τοιχίου και κεκλιμένες ρωγμές πολύ μικρού πάχους (τριχοειδείς) σε μεγαλύτερο ύψος (Εικόνα 5.1). Κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου των $\pm 20\text{mm}$ οι κεκλιμένες ρωγμές διευρύνθηκαν ελαφρώς ενώ παρουσιάστηκαν νέες ρωγμές κατά μήκος της

βάσης του τοιχίου. Στους επόμενους δύο κύκλους των $\pm 20\text{mm}$ παρατηρήθηκαν απειροελάχιστες επεκτάσεις των προηγούμενων ρωγμών, χωρίς κάποια σημαντική διαφοροποίηση (Εικόνα 5.2). Κατά τις μετακινήσεις των $\pm 30\text{mm}$ και συγκεκριμένα κατά τον πρώτο κύκλο, παρατηρείται περαιτέρω διεύρυνση των ρωγμών της βάσης ενώ παρουσιάζεται μία μικρής έκτασης αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης ενώ σε αυτό τον κύκλο παρατηρείται και το μεγαλύτερο φορτίο $F_{\max} = 203,08 \text{ kN}$. Στους δύο επόμενους κύκλους των $\pm 30\text{mm}$ η διεύρυνση των ρωγμών της βάσης γίνεται εντονότερη και επεκτείνεται η αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης. Η αποδιοργάνωση έχει φθάσει σε τέτοιο σημείο, ώστε γίνεται ορατά αντιληπτός ο λυγισμός του πλέον θλιβόμενου χάλυβα (Εικόνα 5.3). Στον κύκλο των $\pm 40\text{mm}$, οι κεκλιμένες ρωγμές που ήδη υπάρχουν διευρύνονται ενώ εμφανίζονται νέες σε άλλα σημεία. Το πλάτος των ρωγμών βάσης διευρύνεται επίσης ενώ παρατηρείται στο σημείο αυτό θραύση του εφελκύμενου χάλυβα (Εικόνα 5.4, 5.7). Η μεγαλύτερη αποδιοργάνωση του τοιχίου παρατηρήθηκε στις μετακινήσεις $\pm 50\text{mm}$. Το πείραμα τερματίστηκε όταν η μετακίνηση γύρισε σε μηδενική τιμή χωρίς να παρατηρηθεί αστοχία του δοκιμίου, καθώς κρίθηκε πως θα ήταν καλό να συνεχιστεί μελλοντικά η πειραματική διαδικασία υπό την προσθήκη πιθανής ενισχύσεως. Αξίζει να σημειωθεί πως δεν παρατηρήθηκε απότομη πτώση του φορτίου γεγονός που καταδεικνύει πως το τοιχίο επέδειξε υψηλές τιμές αντίστασης ακόμα και σε μετακινήσεις των $\pm 50\text{mm}$.



Εικόνα 5.1

Ρωγμές για τους κύκλους $\pm 10\text{mm}$ 

Εικόνα 5.2

Ρωγμές για τους κύκλους $\pm 20\text{mm}$



Εικόνα 5.3

Ρωγμές για τους κύκλους $\pm 30\text{mm}$



Εικόνα 5.4

Ρωγμές για τους κύκλους $\pm 40\text{mm}$



Εικόνα 5.5

Ρωγμές για τους κύκλους $\pm 50\text{mm}$



Εικόνα 5.6

Ρωγμές τοιχίου T7 μετά το τέλος του πειράματος

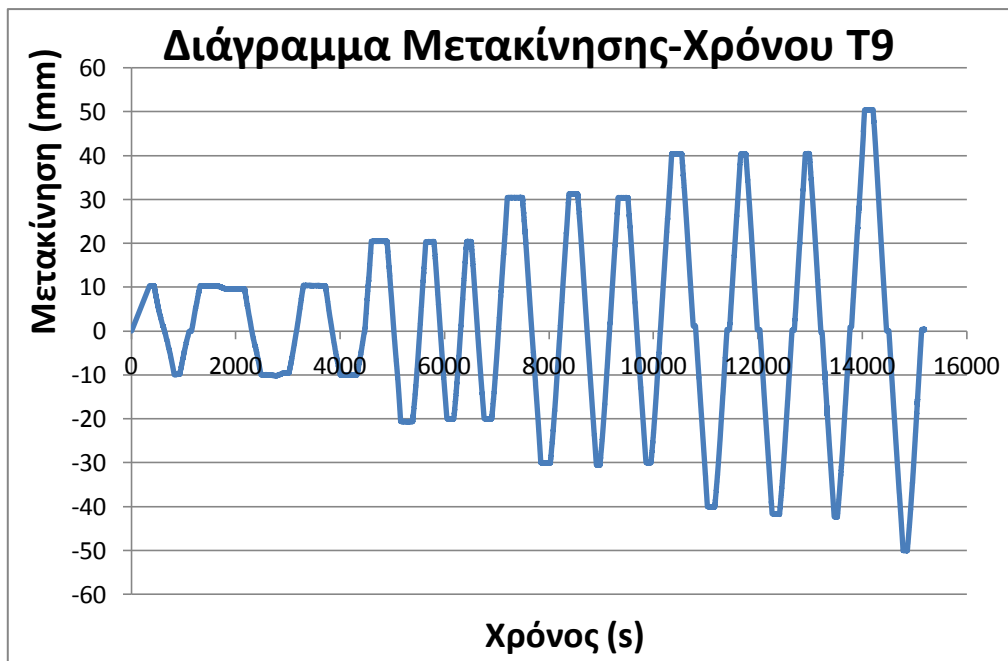


Εικόνα 5.7 Θραύση σε εφελκυσμό ακραίας ράβδου οπλισμού τοιχίου T7

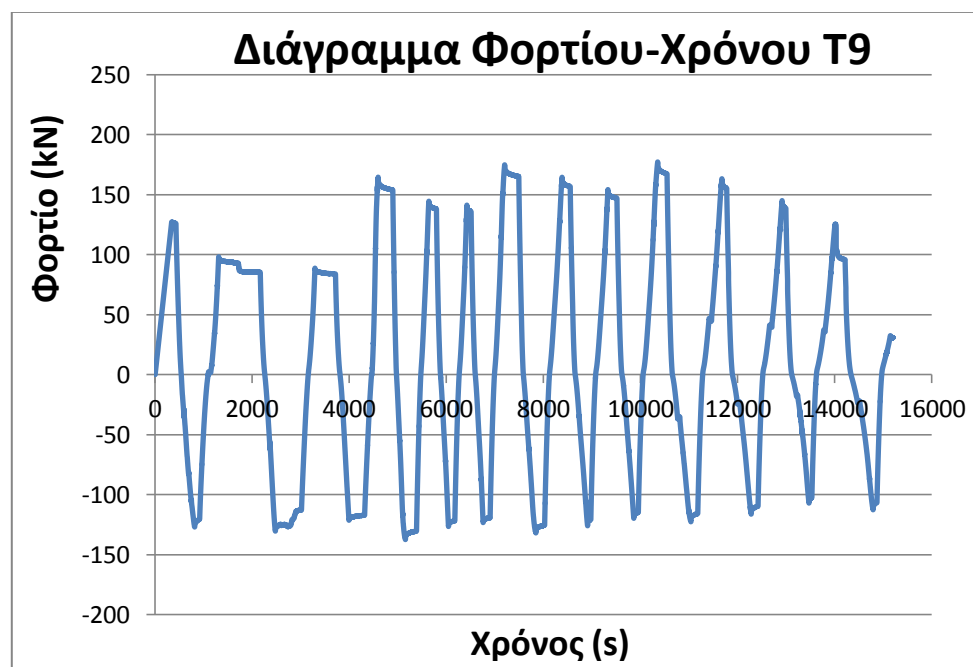


Διάγραμμα 5.4 Καμπύλη υστέρησης τοιχίου T7

Τοιχίο T9



Διάγραμμα 5.5 Γράφημα μετακίνησης-χρόνου τοιχίου T9



Διάγραμμα 5.6 Γράφημα φορτίου-χρόνου τοιχίου T9

Όσον αφορά το σχηματισμό ρωγμών και τη μορφή αστοχίας, κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου των **+10mm** εμφανίζονται μικρού πάχους κεκλιμένες ρωγμές με κλίση αυξανόμενη καθ' ύψος του τοιχίου. Αντίστοιχες με αντίθετη κλίση εμφανίζονται κατά τον κύκλο των **-10mm**. Οι τριχοειδείς ρωγμές αυτές διευρύνονται ελαφρώς και επεκτείνονται κατά τους δύο επόμενους κύκλους των **±10mm**. Κατά τις

μετακινήσεις των $\pm 20\text{mm}$ και συγκεκριμένα κατά τον πρώτο κύκλο, παρουσιάστηκαν νέες κεκλιμένες ρωγμές και ρωγμές στη βάση του τοιχίου. Στους δύο επόμενους κύκλους των $\pm 20\text{mm}$ το πλάτος των ρωγμών αυτών διευρύνθηκε σημαντικά ενώ κυριαρχούν σε πλάτος και εύρος δύο κεκλιμένες ρωγμές. Κατά τον πρώτο κύκλο των μετακινήσεων των $\pm 30\text{mm}$ το πλάτος των δύο κεκλιμένων ρωγμών αυξάνεται περισσότερο ενώ κατά τους δύο επόμενους κύκλους των $\pm 30\text{mm}$ παρουσιάζονται έντονες ρωγμές στο ύψος κοντά στη βάση και συγκεκριμένα στην περιοχή που θλίβεται κατά τις θετικές μετατοπίσεις. Οι ρωγμές αυτές οδηγούν τελικά στην έναρξη της αποδιοργάνωσης της θλιβόμενης περιοχής κατά τον πρώτο κύκλο των $\pm 40\text{mm}$ ενώ κατά τον κύκλο αυτό παρατηρείται και το μέγιστο δυνατό φορτίο $F_{\max} = 177,14 \text{ kN}$. Στους επόμενους δύο κύκλους των $\pm 40\text{mm}$ συνεχίζεται η αποδιοργάνωση της θλιβόμενης περιοχής και διευρύνεται περαιτέρω το πλάτος των κεκλιμένων ρωγμών συνεχίζοντας ωστόσο το δοκίμιο να αναλαμβάνει υψηλές τιμές φορτίου. Παράλληλα στον κύκλο αυτό παρατηρήθηκε στη θλιβόμενη ζώνη έντονος λυγισμός των ακραίων ράβδων οπλισμού. Σημαντική πτώση στην τιμή του φορτίου παρατηρείται κατά το πρώτο κύκλο των $\pm 50\text{mm}$ όπου και φθάνει στην τιμή των $125,45 \text{ kN}$. Οι περιοχές της θλιβόμενης ζώνης εμφανίζονται πλήρως αποδιοργανωμένες με έντονο λυγισμό του διαμήκους οπλισμού. Το πείραμα τερματίστηκε μετά το τέλος του πρώτου κύκλου των $\pm 50\text{mm}$ αφού ο γρύλλος επέστρεψε σε μηδενική μετακίνηση.



Εικόνα 5.8

Ρωγμές για τους κύκλους $\pm 10\text{mm}$ 

Εικόνα 5.9

Ρωγμές για τους κύκλους $\pm 20\text{mm}$



Εικόνα 5.10

Ρωγμές για τους κύκλους $\pm 30\text{mm}$



Εικόνα 5.11

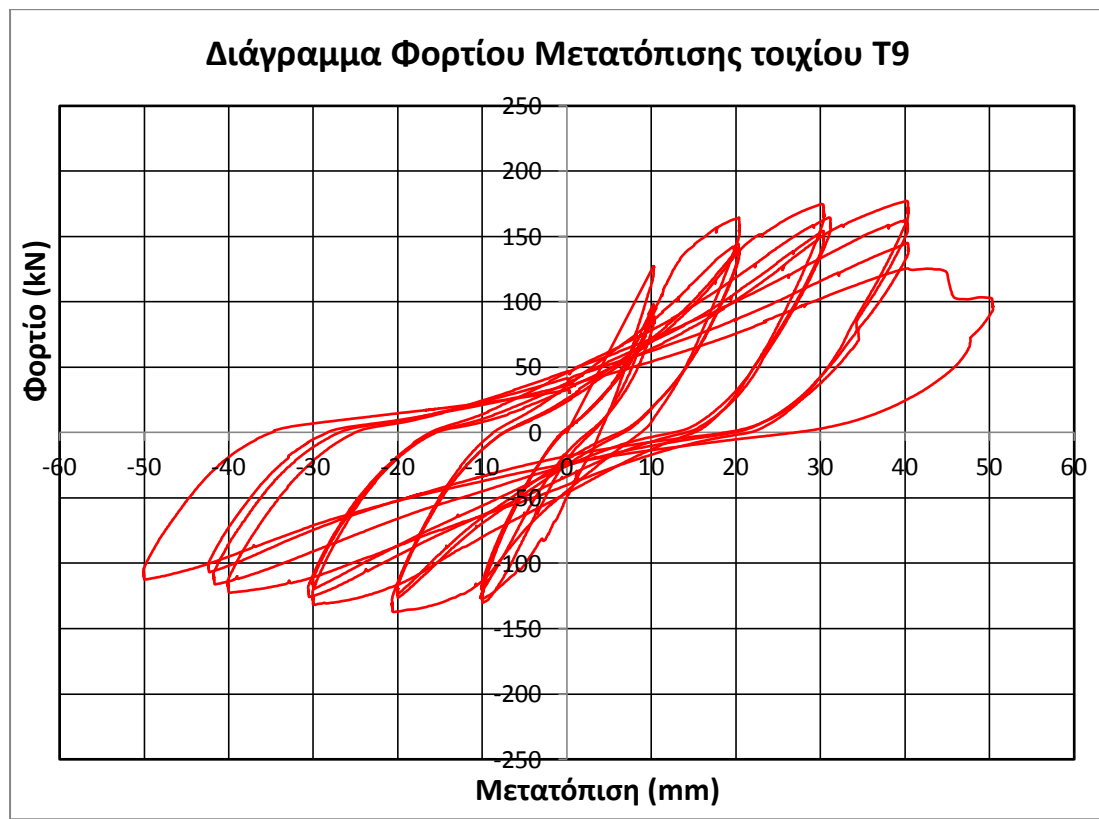
Ρωγμές για τους κύκλους $\pm 40\text{mm}$



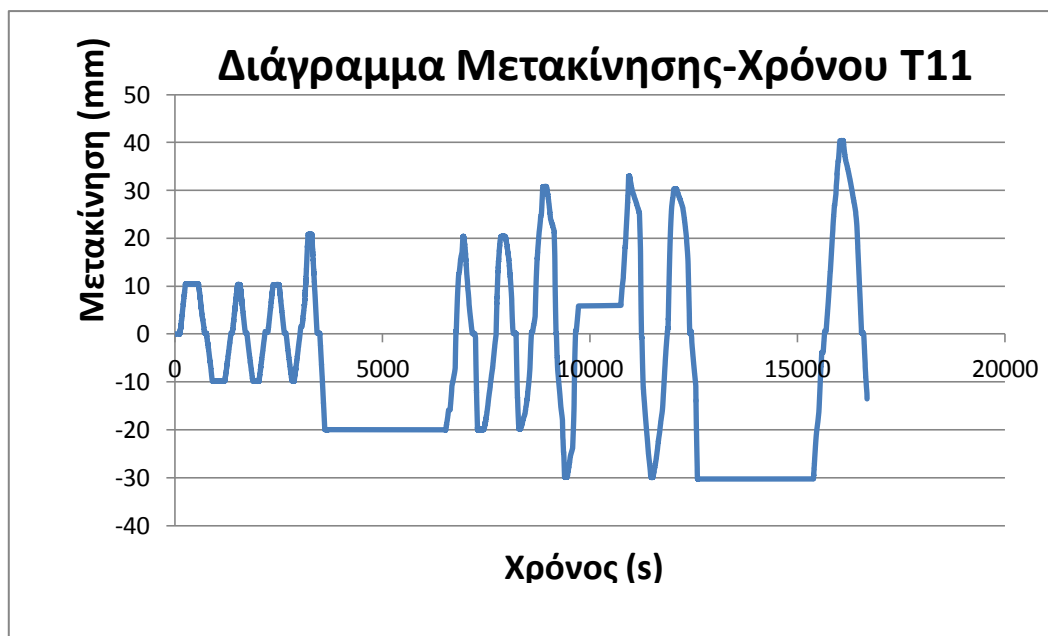
Εικόνα 5.12 Ρωγμές τοιχείου T9 μετά το τέλος του πειράματος



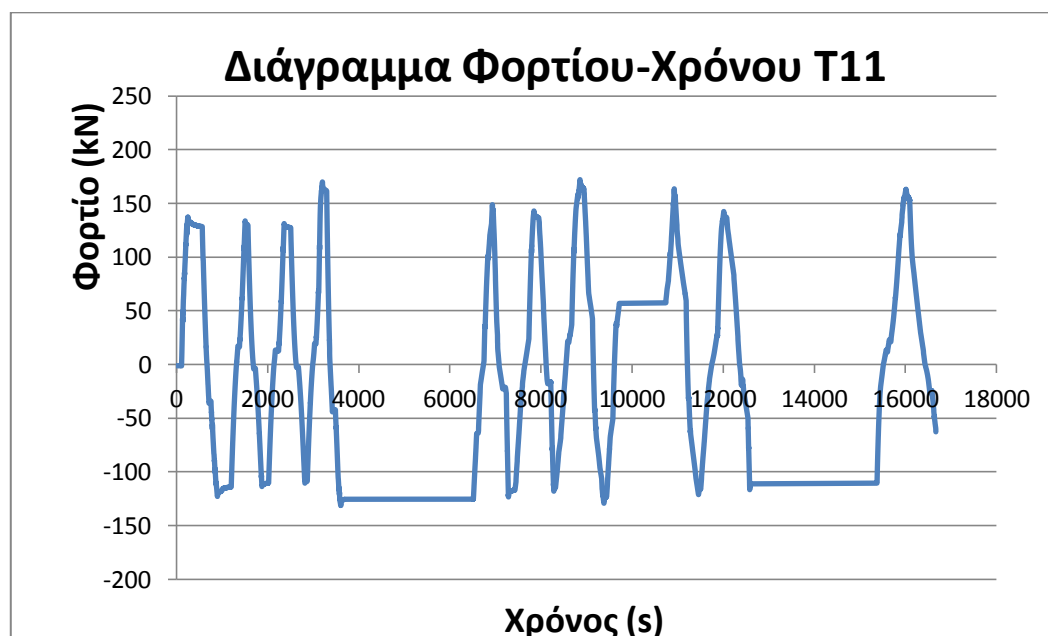
Εικόνα 5.13 Λυγισμός ακραίων ράβδων τοιχίου T9



Διάγραμμα 5.7 Καμπύλη υστέρησης τοιχίου T9

Τοιχίο T11

Διάγραμμα 5.8 Γράφημα μετακίνησης-χρόνου τοιχίου T11



Διάγραμμα 5.9 Γράφημα φορτίου-χρόνου τοιχίου T11

Αναφορικά με τη χρονοϊστορία του πειράματος, κατά τη διάρκεια των μετατοπίσεων των $\pm 10\text{mm}$ και συγκεκριμένα στον πρώτο κύκλο, παρουσιάζονται κεκλιμένες ρωγμές μικρού πάχους (τριχοειδείς) σε όλο το ύψος του τοιχίου και οι οποίες γίνονται πιο εμφανείς και παραμένουσες στους δύο επόμενους κύκλους (Εικόνα 5.14). Κατά τη διάρκεια των μετατοπίσεων των $\pm 20\text{mm}$ οι ήδη υπάρχουσες κεκλιμένες ρωγμές διευρύνονται σε μήκος και πλάτος ενώ εμφανίζονται νέες κεκλιμένες ρωγμές κατά τη διάρκεια του πρώτου κύκλου των -20mm . Το φορτίο

σημειώνει σημαντική αύξηση στον πρώτο κύκλο των **+20mm** πλησιάζοντας την τιμή των 169,98 kN. Στους δύο επόμενους κύκλους των **±20mm** παρατηρούνται και οι πρώτες ρωγμές στην περιοχή κοντά στη βάση του τοιχίου (Εικόνα 5.15). Τη μέγιστη τιμή του φορτίου την παρατηρούμε στον πρώτο κύκλο των **±30mm** οπότε και φθάνει στην τιμή των 172,11 kN ενώ στον κύκλο αυτό το πλάτος και το μήκος των κεκλιμένων ρωγμών αυξάνονται σημαντικά (Εικόνα 5.16). Κατά τους 2 επόμενους κύκλους των **±30mm**, οι διαγώνιες ρωγμές καθ' ύψος του τοιχίου αυξάνονται σε πλήθος ενώ μεγαλώνει το πάχος των ήδη υπάρχοντων. Κατά τις μετατοπίσεις των **±40mm**, οι ρωγμές αυτές διευρύνονται ακόμα περισσότερο ενώ οι διαγώνιες ρωγμές που προέκυψαν κατά τις θετικές μετατοπίσεις συναντώνται, κατά τους κύκλους των **±40mm**, με διαγώνιες ρωγμές οι οποίες είχαν προκύψει κατά τις αρνητικές μετατοπίσεις. Συνέπεια των διαγώνιων αυτών συναντήσεων αποτελεί η δημιουργία μίας κατακόρυφης, μεγάλου εύρους ρωγμή ταυτιζόμενη με τον άξονα ο οποίος ισαπέχει από τα άκρα του τοιχίου. Παράλληλα, κατά τον πρώτο κύκλο των **±40mm** παρατηρείται η έναρξη της αποδιοργάνωσης της θλιβόμενης ζώνης. Στον πρώτο κύκλο των **±50mm** επέρχεται διατμητική-ψαθυρή αστοχία (θραύση) του οριζόντιου οπλισμού («κόψιμο» συνδετήρα) η οποία συνοδεύεται από απότομη πτώση του φορτίου στην τιμή $P=109,19\text{kN}$. Το πείραμα τερματίστηκε μετά το τέλος του πρώτου κύκλου των **±50mm** αφού ο γρύλλος επέστρεψε σε μηδενική μετακίνηση.

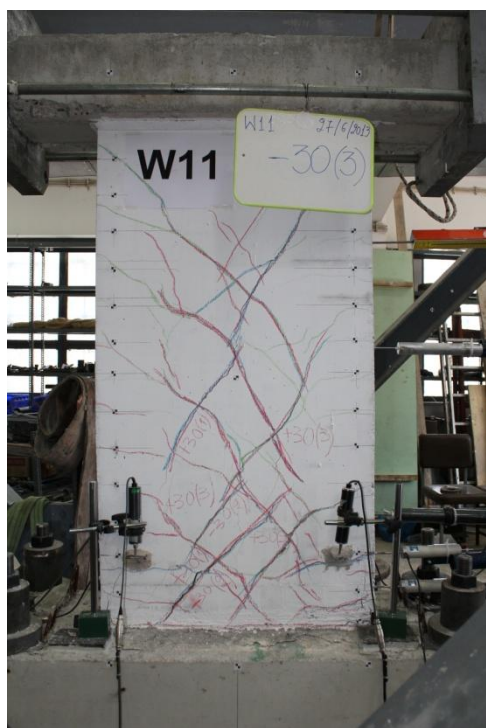


Εικόνα 5.14

Ρωγμές για τους κύκλους $\pm 10\text{mm}$ 

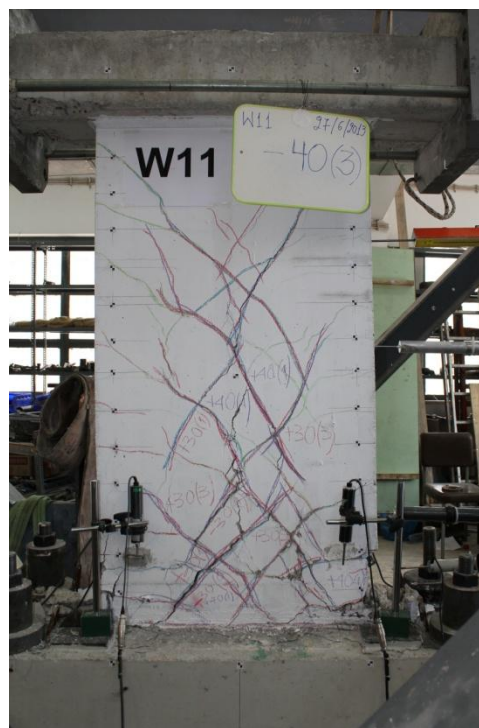
Εικόνα 5.15

Ρωγμές για τους κύκλους $\pm 20\text{mm}$



Εικόνα 5.16

Ρωγμές για τους κύκλους $\pm 30\text{mm}$



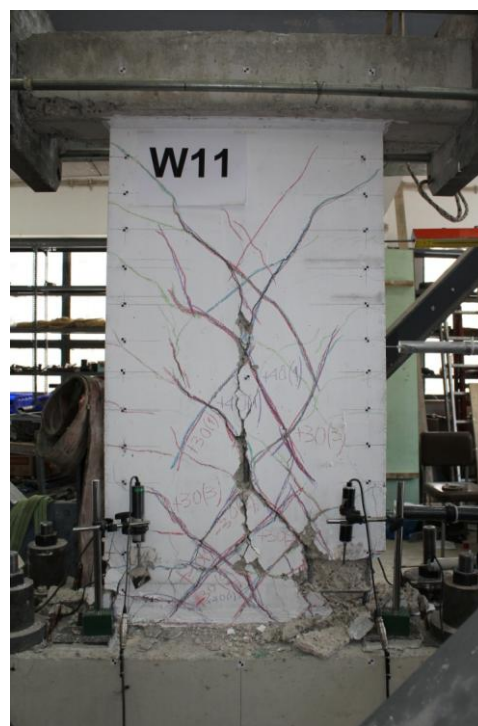
Εικόνα 5.17

Ρωγμές για τους κύκλους $\pm 40\text{mm}$



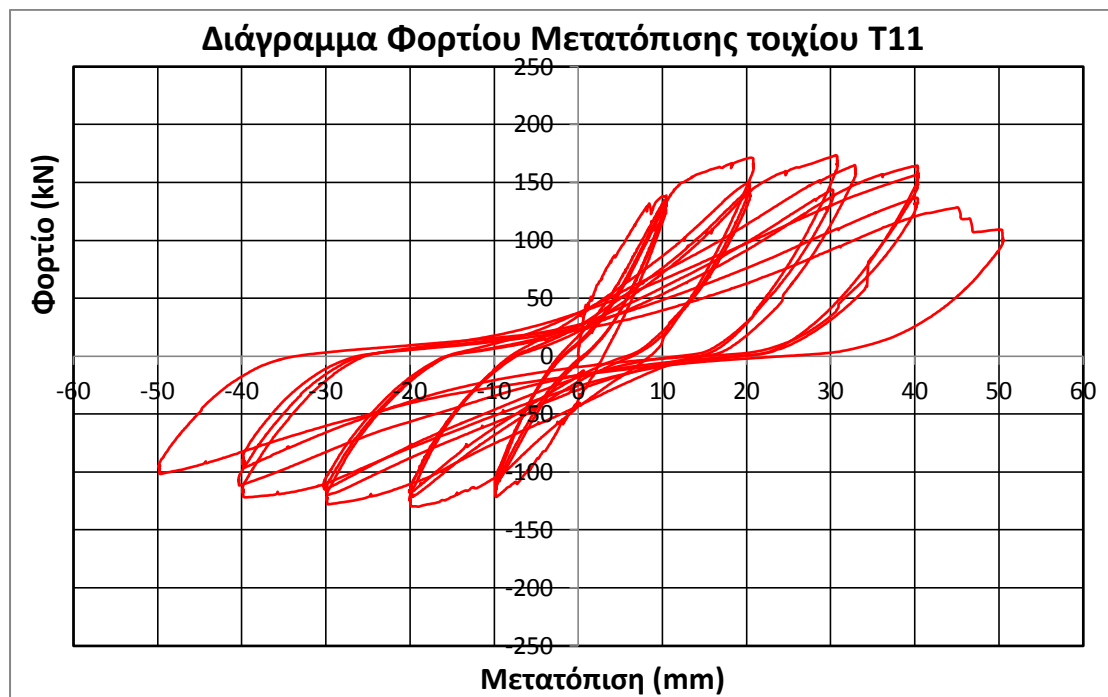
Εικόνα 5.18

Θραύση οριζόντιου οπλισμού
(«κόψιμο συνδετήρα»)



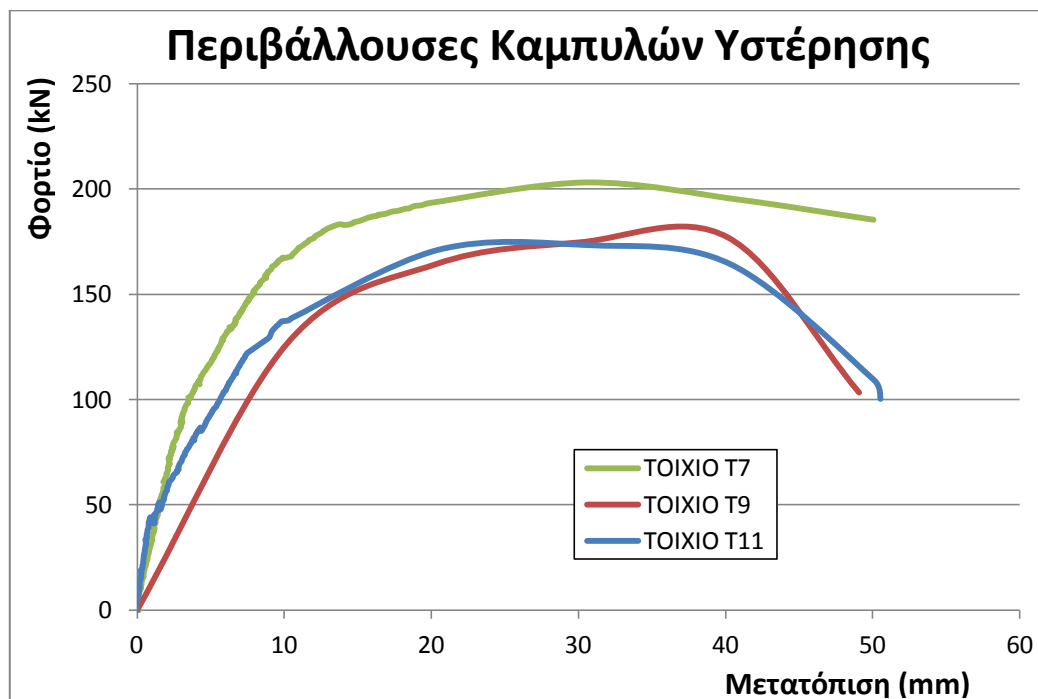
Εικόνα 5.19

Ρωγμές τοιχίου T11 μετά το τέλος
του πειράματος



Διάγραμμα 5.10 Καμπύλη υστέρησης τοιχίου T11

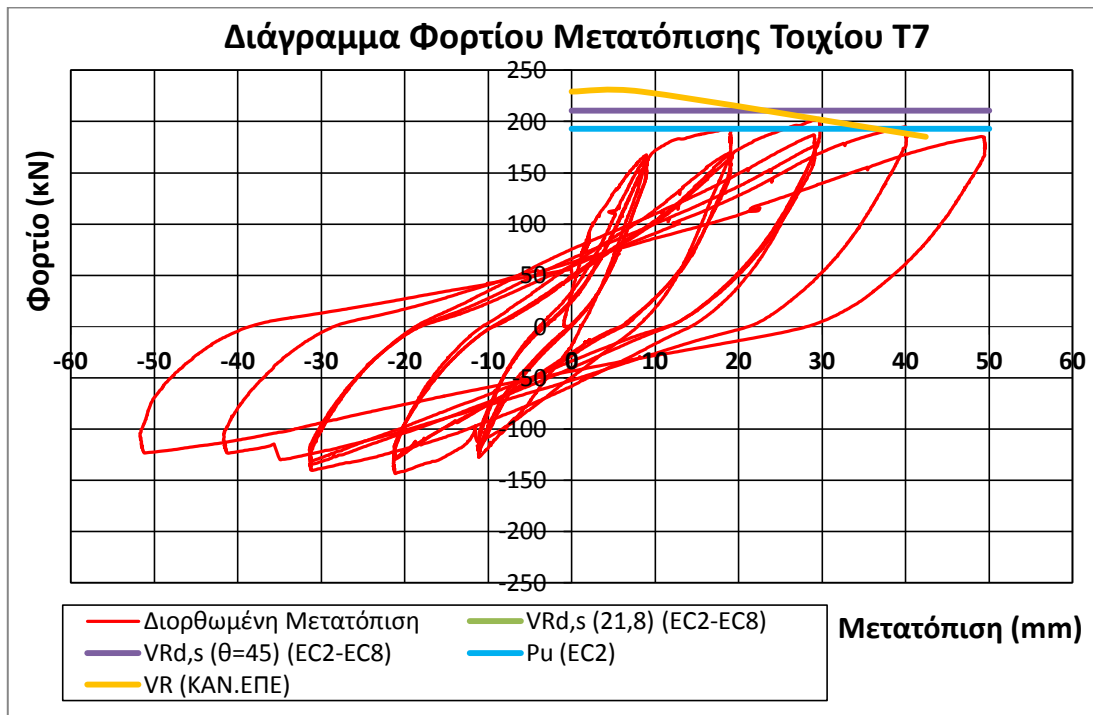
Περιβάλλουσες Καμπυλών Υστέρησης (κοινό διάγραμμα)



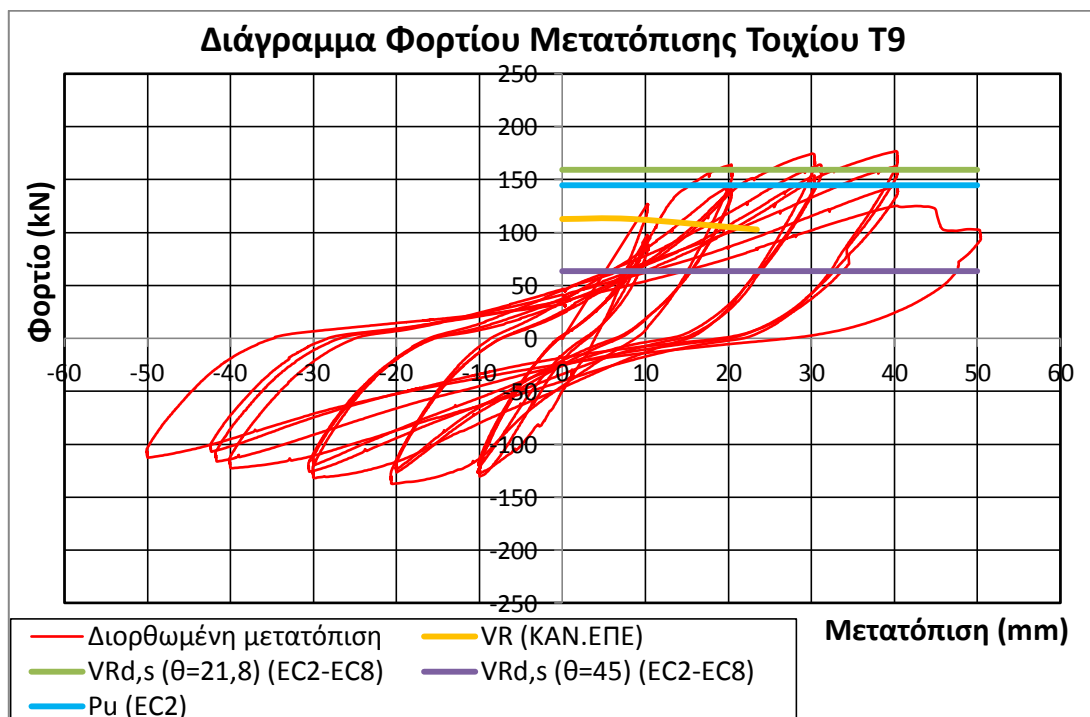
Διάγραμμα 5.11 Περιβάλλουσες καμπυλών υστέρησης τοιχίων

Όσον αφορά τις **αντοχές των τοιχίων**, η συμπεριφορά τους γίνεται πλήρως κατανοητή μέσω των επόμενων διαγραμμάτων (Φορτίου- Μετατόπισης) όπου και σημειώνονται εκτός της πειραματικής συμπεριφοράς (καμπύλη υστέρησης) και οι υπολογιστικές αντοχές σε: **1)** κάμψη κατά EC2, **2)** τέμνουσα (αστοχία συνδετήρων) κατά EC2-EC8 ($\theta=21.8^\circ$ και $\theta=45^\circ$), **3)** τέμνουσα (αστοχία συνδετήρων) κατά

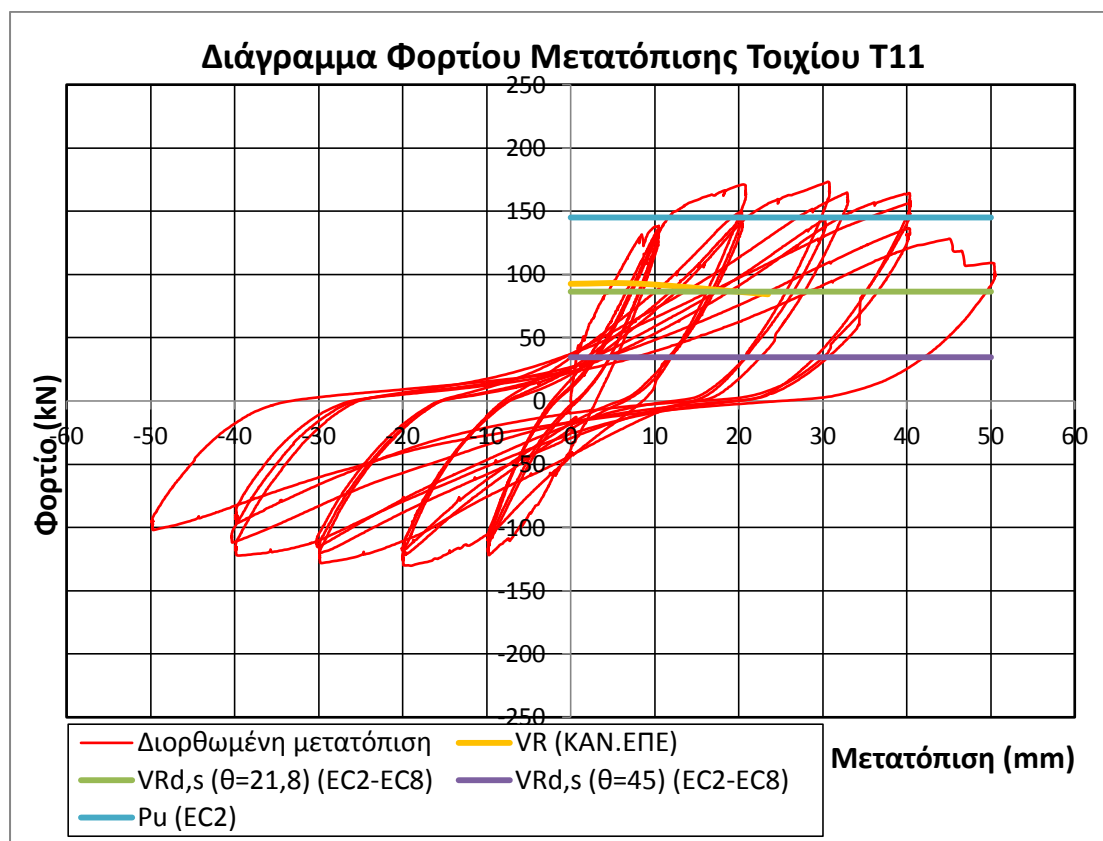
ΚΑΝ.ΕΠΕ. Παρατηρείται πως στο τοίχιο T7, το οποίο διαμορφώνει λεπτομέρειες αντισεισμικότητας, οι σύγχρονοι κανονισμοί συμφωνούν σε ικανοποιητικό βαθμό με τα πειραματικά ευρήματα σε αντίθεση με τα τοιχία T9, T11 στα οποία οι ισχύουσες διατάξεις των σύγχρονων κανονισμών δείχνουν να υποεκτιμούν τη διατμητική αντοχή καθώς πειραματικά προέκυψε σημαντικά μεγαλύτερη. Τα ισοδύναμα φορτία αντοχής παρατηρείται πως προκύπτουν παρόμοια με τα αντίστοιχα της ανάλυσης.



Διάγραμμα 5.12 Υπολογιστικές και πειραματικές αντοχές τοιχίου T7



Διάγραμμα 5.13 Υπολογιστικές και πειραματικές αντοχές τοιχίου T9



Διάγραμμα 5.14 Υπολογιστικές και πειραματικές αντοχές τοιχίου T11

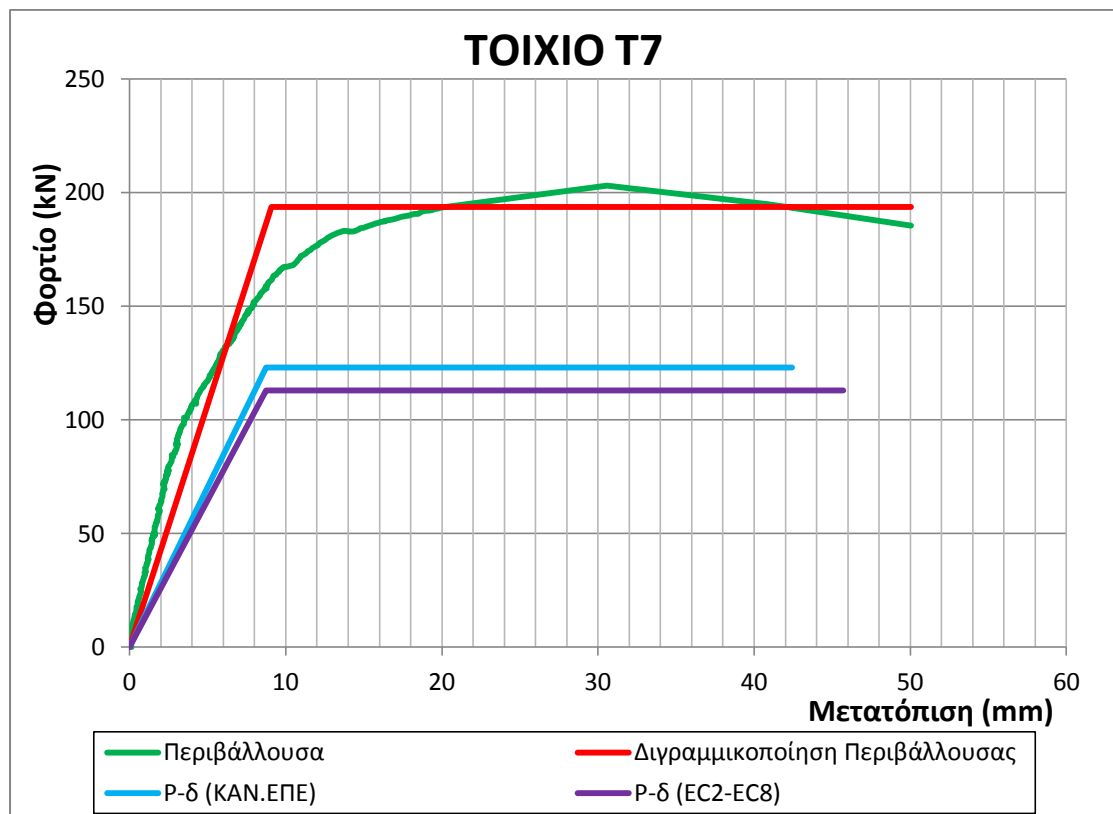
Παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 5.1 οι πραγματικές γωνίες θλιπτήρων των τοιχίων T7, T9, T11.

Πίνακας 5.1 Πραγματικές γωνίες θλιπτήρων τοιχίων T7, T9, T11

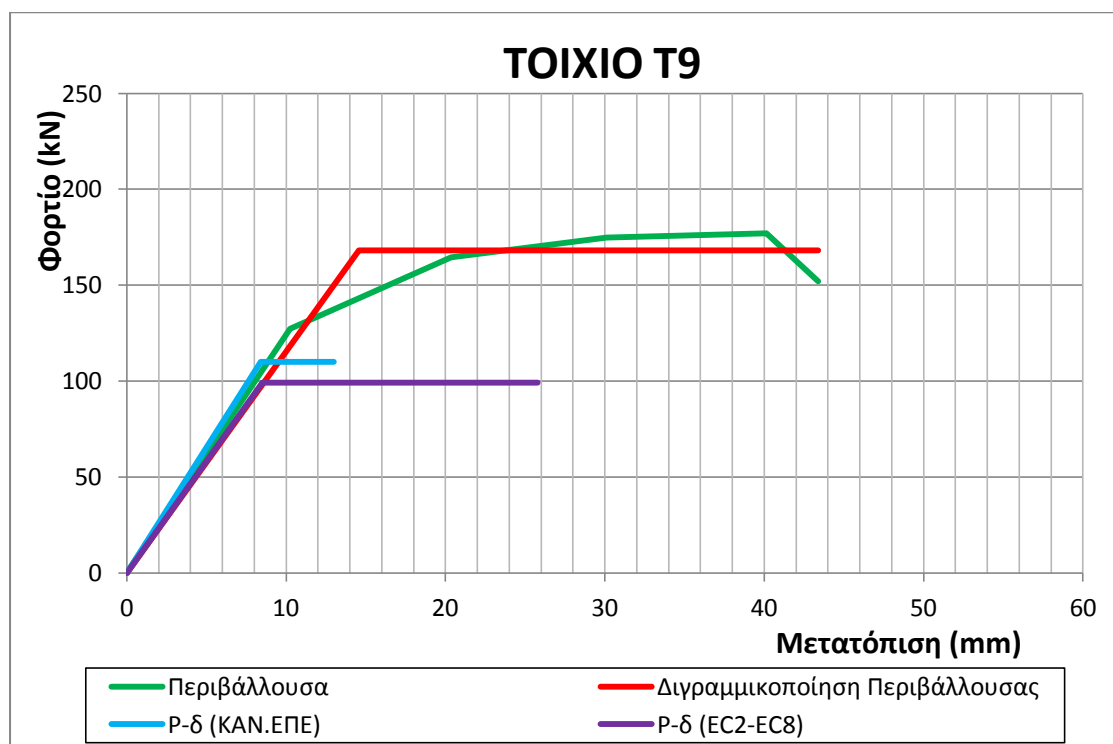
	T7	T9	T11
θ°	41-67	31-60	46-49

Πειραματική πλαστιμότητα

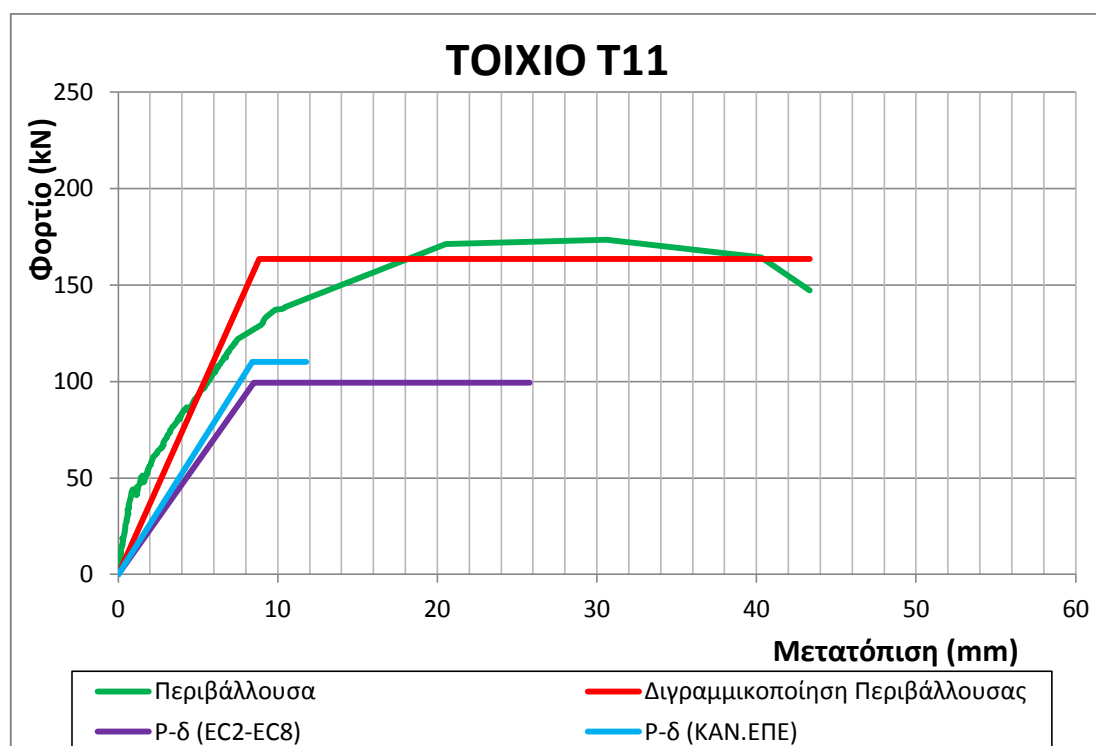
Όσον αφορά την αναπτυχθείσα **πειραματική πλαστιμότητα**, ακολουθούν παρακάτω τα διαγράμματα Φορτίου-Μετατόπισης όπου παρατίθενται η περιβάλλουσα καμπύλης υστέρησης, η διγραμμικοποίηση αυτής και το διγραμμικό διάγραμμα (P-δ) σύμφωνα με τις υποδείξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ.



Διάγραμμα 5.15 Γράφημα Φορτίου-Μετατόπισης (P-δ) τοιχίου T7



Διάγραμμα 5.16 Γράφημα Φορτίου-Μετατόπισης (P-δ) τοιχίου T9



Διάγραμμα 5.17 Γράφημα Φορτίου-Μετατόπισης (P-δ) τοιχίου T11

Η υπολογιστική αντοχή διαρροής και αστοχίας διαφέρει από την πειραματική. Κατά τους υπολογισμούς θεωρήθηκε ως σημείο διαρροής η διαρροή του πλέον εφελκόμενου οπλισμού. Αντίθετα η πειραματική μετατόπιση διαρροής προέκυψε μετά από διγραμμικοποίηση της καμπύλης υστέρησης, ενώ σαν σημείο αστοχίας θεωρήθηκε το σημείο εκείνο στο οποίο $P=0,85 \cdot P_{max}$. Η πειραματική τιμή του φορτίου κατά τη διαρροή θεωρήθηκε $P_y=0,95 \cdot P_{max}$. Οι πλαστιμότητες κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ προκύπτουν εμφανώς μειωμένες συγκριτικά με τις πλαστιμότητες κατά EC2 και τις πειραματικές και αυτό οφείλεται εν πολλοίς στην απομειωμένη γωνία στροφής χορδής κατά την αστοχία (βλ. §4.5 της παρούσης διπλωματικής). Όλα αυτά έχουν ως συνέπεια οι πειραματικές γωνίες στροφής να μην συμπίπτουν με τις θεωρητικές.

Πίνακας 5.2 Υπολογιστικές- Πειραματικές πλαστιμότητες τοιχίων σε όρους γωνιών στροφών

α/α	Αναλυτικά (EC2-EC8)				ΚΑΝ.ΕΠΕ				Πειραματικά		
	$(1/r)_y$	θ_y	θ_u	μ_θ	$(1/r)_y$	θ_y	θ_u	μ_θ	θ_y	θ_u	μ_θ
T7	0,00575	0,00583	0,03046	5,22	0,00540	0,00555	0,02827	5,09	0,00606	0,03337	5,51
T9	0,00525	0,00568	0,01719	3,03	0,00516	0,00561	0,00867	1,54	0,00970	0,02891	2,98
T11	0,00525	0,00568	0,01719	3,03	0,00516	0,00561	0,00785	1,40	0,00590	0,02889	4,90

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα αλλά και λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση για την αναμενόμενη υπολογιστική πλαστιμότητα (§4.5) καταρτίζεται ο άνωθι συγκεντρωτικός Πίνακας 5.2 όπου παρατίθενται οι πλαστιμότητες και οι γωνίες στροφής χορδής στη διαρροή και την αστοχία για τα τοιχώματα T7, T9, T11.

Ισχύει: $\delta_u = \theta_u \cdot L_s = \theta_u \cdot 1500(\text{mm})$, επομένως ο πίνακας 5.1 λαμβάνει τη μορφή του Πίνακα 5.3.

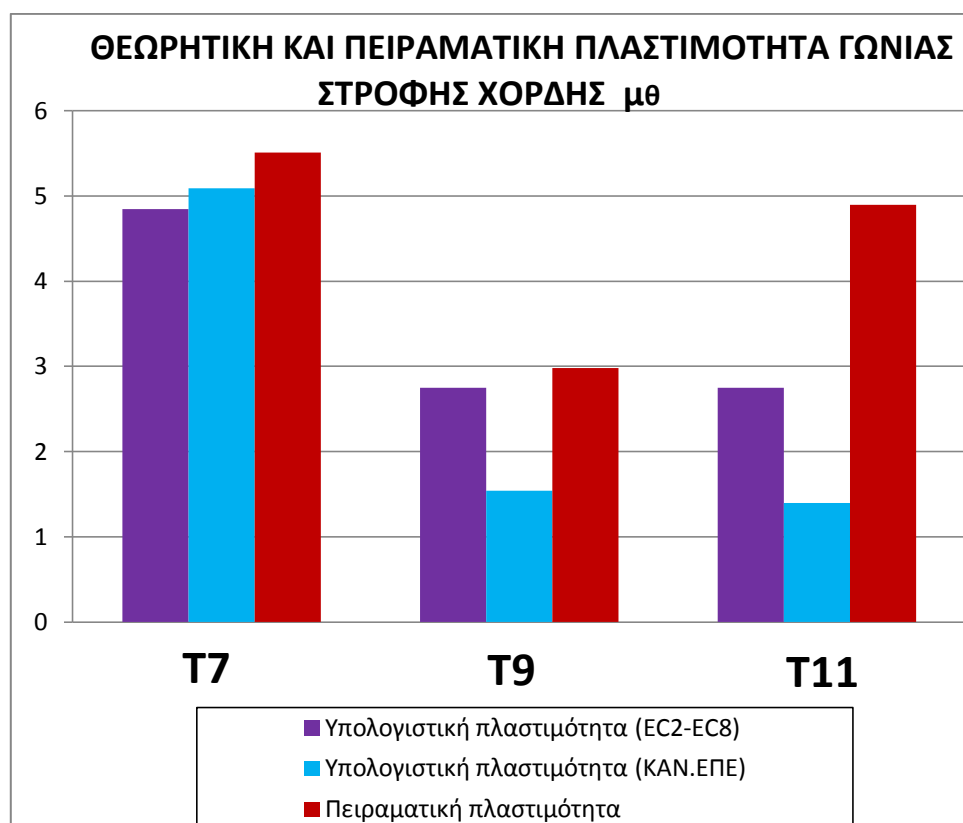
Πίνακας 5.3 Υπολογιστικές- Πειραματικές πλαστιμότητες τοιχίων σε όρους μετακινήσεων

α/α	Αναλυτικά (EC2-EC8)				KAN.ΕΠΕ				Πειραματικά		
	$(1/r)_y$	δ_y (mm)	δ_u (mm)	μ_θ	$(1/r)_y$	δ_y (mm)	δ_u (mm)	μ_θ	δ_y (mm)	δ_u (mm)	μ_θ
T7	0,00575	8,745	45,690	5,22	0,00540	8,325	42,405	5,09	9,09	50,550	5,51
T9	0,00525	8,520	25,785	3,03	0,00516	8,415	13,005	1,54	14,55	43,365	2,98
T11	0,00525	8,520	25,785	3,03	0,00516	8,415	11,775	1,40	8,85	43,335	4,90

Από τις τιμές των Πινάκων 5.2, 5.3 αλλά και από τα Διαγράμματα 5.15 έως 5.17 γίνεται αντιληπτό πως οι υπολογιστικές πλαστιμότητες μετακινήσεων, μ_δ , και οι υπολογιστικές (EC2-EC8, KAN.ΕΠΕ) τιμές των ισοδύναμων φορτίων των ροπών διαρροής, P_y , παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις με τις αντίστοιχες πειραματικές.

Πίνακας 5.4 Υπολογιστικές- Πειραματικές τιμές μεγεθών στη διαρροή

α/α	Αναλυτικά (EC2-EC8)				Αναλυτικά (KAN.ΕΠΕ)				Πειραματικά	
	$(1/r)_y$ (m ⁻¹)	θ_y	M_y (kNm)	P_y (kN)	$(1/r)_y$ (m ⁻¹)	θ_y	M_y (kNm)	P_y (kN)	θ_y	P_y (kN)
T7	0,00575	0,00583	169,53	113,01	0,00540	0,00555	184,50	123,00	0,00606	192,92
T9	0,00525	0,00568	148,86	99,24	0,00516	0,00561	165,15	110,10	0,00987	168,28
T11	0,00525	0,00568	148,86	99,24	0,00516	0,00561	165,15	110,10	0,00575	164,40



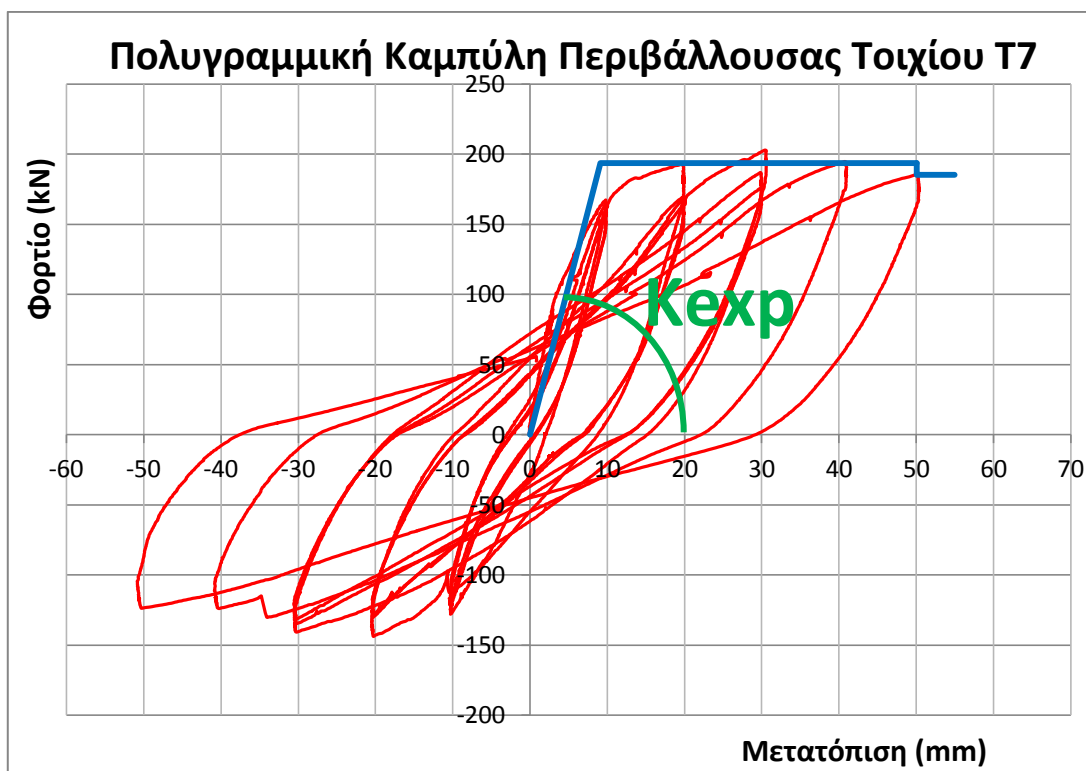
Διάγραμμα 5.18 Σύγκριση υπολογιστικής και πειραματικής πλαστιμότητας $\mu\theta$

Δυσκαμψίες

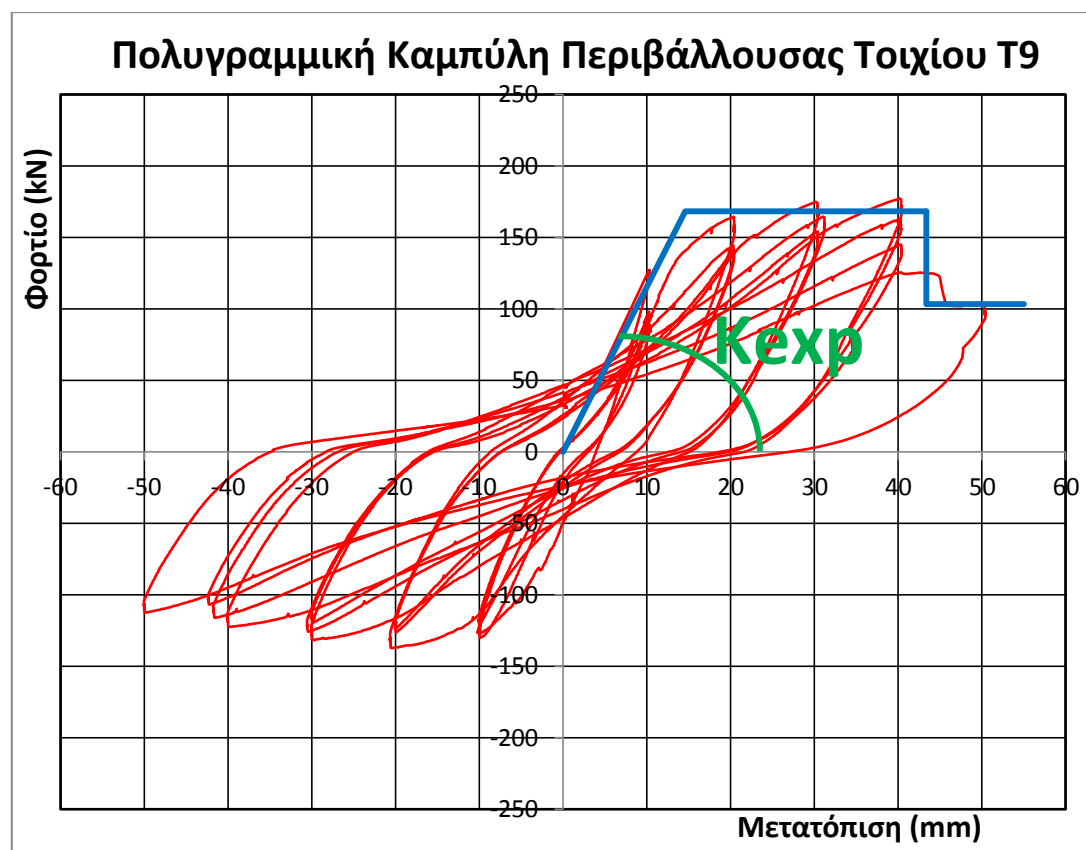
Όσον αφορά την **οιονεί ελαστική δυσκαμψία**, με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα για τα τοιχεία T7, T9, T11, υπολογίζεται από την κλίση του ελαστικού κλάδου της πολυγραμμικής καμπύλης, η οποία προσεγγίζει τη συμπεριφορά των τοιχείων (KAN.EΠE §7.1.2.2). Η ενεργός και η γεωμετρική δυσκαμψία έχουν υπολογισθεί αναλυτικά στην §4.4 της παρούσης διπλωματικής. Η γεωμετρική δυσκαμψία έχει υπολογισθεί με μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος όπως αυτό προκύπτει από την πειραματική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Παρατίθενται παρακάτω ο Πίνακας 5.5 και το Διάγραμμα 5.22 όπου συγκρίνονται η πειραματική και η υπολογιστική δυσκαμψία για κάθε τοίχιο.

Πίνακας 5.5 Σύγκριση πειραματικής, ενεργού και γεωμετρικής δυσκαμψίας τοιχείων

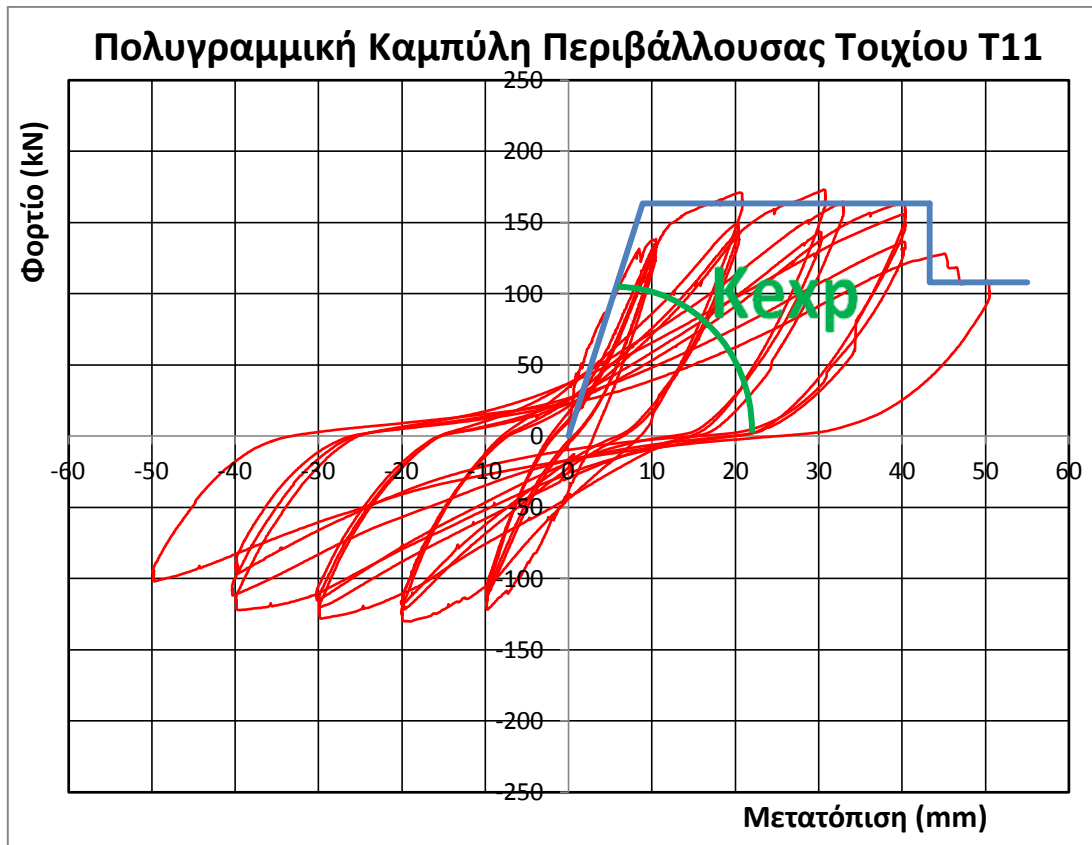
α/α		T7	T9	T11
Ενεργός Δυσκαμψία (KAN.EΠE)	K_{eff} (KN/m)	14766,76	13090,12	13090,12
Γεωμετρική Δυσκαμψία	K_{gr} (KN/m)	120807,69	120807,69	120807,69
Πειραματική Δυσκαμψία	K_{exp} (KN/m)	21299,23	11367,20	18965,84



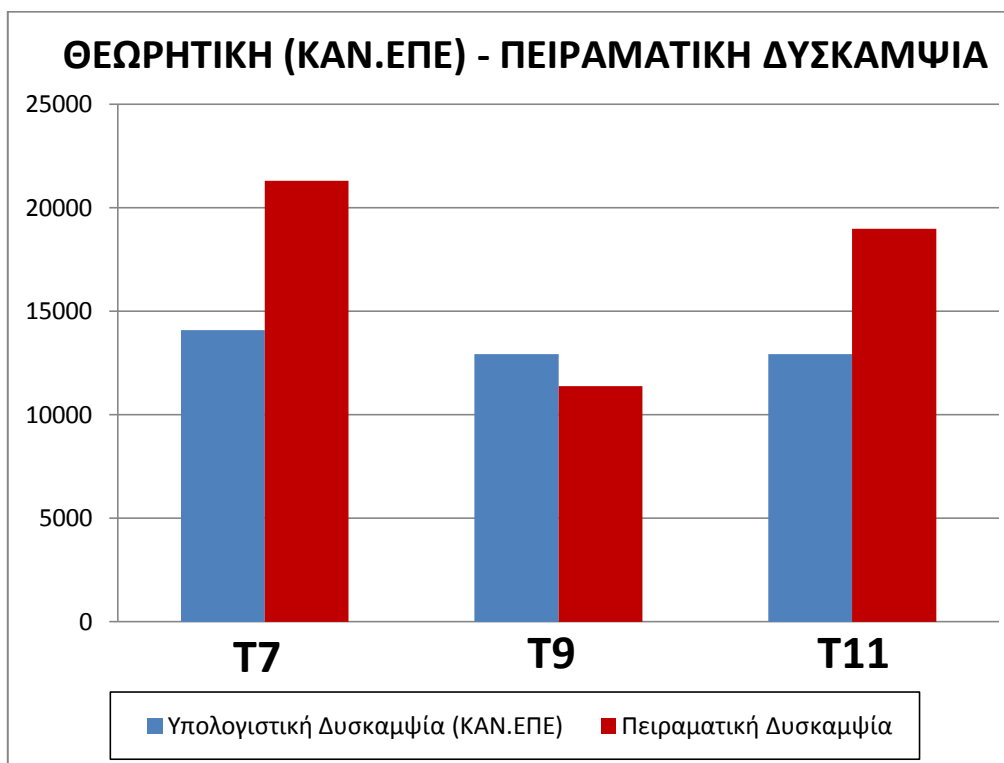
Διάγραμμα 5.19 Υπολογισμός οιονεί ελαστικής δυσκαμψίας τοιχίου T7



Διάγραμμα 5.20 Υπολογισμός οιονεί ελαστικής δυσκαμψίας τοιχίου T9



Διάγραμμα 5.21 Υπολογισμός οιονεί ελαστικής δυσκαμψίας τοιχίου T11



Διάγραμμα 5.22 Σύγκριση πειραματικής-υπολογιστικής δυσκαμψίας (ΚΑΝ.ΕΠΕ)

Μέθοδος φωτομετρίας για τον υπολογισμό παραμορφώσεων

Ελήφθησαν φωτογραφίες σε όλα τα στάδια των ανακυκλίσεων της πειραματικής διαδικασίας των τριών τοιχίων T7, T9, T11 από μία φωτογραφική μηχανή για κάθε όψη (μπροστινή- όπισθεν) ενώ παράλληλα τοποθετήθηκαν στόχοι (πριν την έναρξη της διαδικασίας) σε πολλά σημεία του επιπέδου των τριών τοιχωμάτων και στο επίπεδο της πρισματικής δοκού και της βάσης θεμελιώσεως. Επί των φωτογραφιών και κατόπιν εισαγωγής τους σε πρόγραμμα Autocad μετρήθηκαν οι συντεταγμένες κρίσιμων σημείων (μεταξύ των οποίων και των στόχων). Μετρήθηκαν επίσης και καταγράφηκαν οι πραγματικές αποστάσεις μεταξύ των κρίσιμων σημείων.

Κάνοντας χρήση των συντεταγμένων που προέκυψαν μέσω προγράμματος Autocad έγινε προσδιορισμός των μετατοπίσεων αλλά και των ανηγμένων παραμορφώσεων έτσι ώστε να γίνει σύγκριση των τιμών αυτών με τις αντίστοιχες τιμές των βελομέτρων. Ο προσδιορισμός της απόστασης δύο τυχαίων σημείων σε μία φωτογραφία πραγματοποιήθηκε ως εξής:

$$L = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}$$

όπου $x_i, x_{i-1}, y_i, y_{i-1}$: οι συντεταγμένες κάθε σημείου, αποτυπωμένου σε φωτογραφία μέσω Autocad.

Στη συνέχεια υπολογίσθηκαν οι ζητούμενες παραμορφώσεις μεταξύ των φωτογραφιών, για π.χ. (απαραμόρφωτο τοίχωμα- τοίχωμα με παραμόρφωση $\Delta_{top}=+10\text{mm}$, απαραμόρφωτο τοίχωμα- τοίχωμα με παραμόρφωση $\Delta_{top}=+20\text{mm}$, κ.ό.κ). Σκοπός ήταν η σύγκριση των τιμών αυτών με τις καταγεγραμμένες τιμές των βελομέτρων και η συνεπαγόμενη πιθανή επαλήθευση της αξιοπιστίας των μετρήσεων.

Δυστυχώς τα αποτελέσματα δεν είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά (βλ. Παράρτημα Γ5) καθώς εκτός του γεγονότος ότι οι τιμές που προκύπτουν, δεν συγκλίνουν με τις τιμές των βελομέτρων, σε αρκετές περιπτώσεις αποκλίνουν σε τέτοιο βαθμό ώστε να προκύπτει προβληματισμός ως προς την αξιοπιστία και την εγκυρότητα της μεθόδου αυτής καθεαυτής.

Η διαφανόμενη αποτυχία της «φωτομετρικής» μεθοδολογίας αυτής διεγείρει τους εξής προβληματισμούς ως προς την μελλοντική πιθανή τελειοποίηση της:

- Ίσως τίθεται θέμα γωνίας λήψεως -πιθανής μη καθετότητας του φακού- ως προς το επίπεδο του τοιχώματος. Δεδομένου ότι η επίτευξη απόλυτης καθετότητας παρουσιάζει μεγάλες δυσχέρειες, η προσθήκη μίας δεύτερης φωτογραφικής μηχανής και η εκ νέου διπλή φωτογραφική λήψη, υπό δύο γωνίες, πιθανώς να οδηγούσε σε μία καλύτερη εποπτεία της προοπτικής και της παραμόρφωσης σε επίπεδο κάθετο στο επίπεδο του φακού και του τοιχώματος.
- Το σύστημα συντεταγμένων και ο υπολογισμός (μέσω αυτού) των ζητούμενων αποστάσεων πιθανώς να οδηγεί σε μία αναγωγή πραγματικής

απόστασης- απόστασης σε Autocad η οποία αλλοιώνει το επιθυμητό αποτέλεσμα.

- Η χρήση κάποιου πιο εξειδικευμένου προγράμματος ή και ακόμα μια διαφορετική αντιμετώπιση στο ίδιο πρόγραμμα (Autocad) μπορεί να παρουσιάσει καλύτερα αποτελέσματα μιας και η παρούσα ανάλυση βρίσκεται στο πιο πρώιμο στάδιο της.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας κατασκευάστηκαν στο χώρο του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, έξι τοιχώματα, τα τρία εκ των οποίων διερευνήθηκαν σε πειραματικό στάδιο και προσδιορίστηκαν οι αντοχές τους σύμφωνα με τις υποδείξεις των σύγχρονων κανονισμών (KAN.ΕΠΕ, EC2, EC8).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης και της πειραματικής διαδικασίας και λαμβάνοντας υπόψη πειράματα της διεθνούς βιβλιογραφίας, οδηγηθήκαμε στα παρακάτω συμπεράσματα σχετικά με την αντισεισμική συμπεριφορά των τοιχωμάτων:

- Παρατηρείται αρκετά ικανοποιητική σύγκλιση της αναπτυσσόμενης πειραματικής αντοχής με τις αντίστοιχες τιμές που εκτιμώνται από τους σύγχρονους κανονισμούς. Συγχρόνως, οι αναπτυσσόμενες πειραματικές αντοχές μεταξύ τους κυμαίνονται στα ίδια περίπου επίπεδα, ειδικά στα τοιχεία T9, T11.
- Η διατμητική αντοχή, τοιχίων τα οποία δεν διαμορφώνουν λεπτομέρειες αντισεισμικότητας (κρυφούποστυλώματα- πυκνό διατμητικό οπλισμό), υποεκτιμάται από τους σύγχρονους κανονισμούς (υποεκτιμάται η συμβολή των συνδετήρων). Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει τόσο για τη υπολογιστική διατμητική αντοχή κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ όσο και για την υπολογιστική διατμητική αντοχή κατά EC2-EC8 (Part 3). Αμφότερες οι δύο μεθοδολογίες υιοθετούν το δικτύωμα του Moersch, συνεπώς ίσως ανακύπτει προβληματισμός σχετικά με το κατά πόσον το δικτύωμα αυτό εξάγει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής. Οι πειραματικά μετρούμενες γωνίες θλιπτήρων τείνουν σε μεγάλο βαθμό στη γωνία $\theta=45^\circ$, αποδεικνύεται έτσι πως η υποεκτίμηση της διατμητικής αντοχής δεν οφείλεται σε εσφαλμένη επιλογή γωνίας αλλά στην ίδια τη μεθοδολογία υπολογισμού.
- Άμεση συνέπεια του παραπάνω συμπεράσματος αποτελεί το γεγονός πως ο ΚΑΝ.ΕΠΕ υποεκτιμά τις αναπτυσσόμενες γωνίες στροφής χορδής στην αστοχία σε τοιχώματα ανεπαρκώς οπλισμένα, προτείνοντας πλαστιμότητα πολύ μικρότερης τάξης μεγέθους συγκριτικά με την πειραματική.

- Εν γένει, η πλαστιμότητα για παλαιού τύπου, ανεπαρκώς οπλισμένα τοιχία προκύπτει σαφώς μικρότερη τόσο πειραματικά όσο και αναλυτικά με την πλαστιμότητα τοιχίων τα οποία διαμορφώνουν λεπτομέρειες αντισεισμικότητας.
- Οι διατάξεις των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών και τα προτεινόμενα προσομοιώματα τους έχουν βασιστεί κυρίως σε πειραματικά δεδομένα της διεθνούς βιβλιογραφίας τοιχωμάτων τα οποία διαμορφώνουν λεπτομέρειες αντισεισμικότητας. Αυτό έχει ως συνέπεια να μην μπορούν να αποτυπώσουν με ακρίβεια προσομοιώματα τα οποία προσεγγίζουν τη συμπεριφορά ανεπαρκώς οπλισμένων τοιχίων, ιδιαίτερα στην εκτίμηση της γωνίας στροφής στην αστοχία και συνεπώς της πλαστιμότητας μετακινήσεων.
- Η μεθοδολογία κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ υποεκτιμά ελαφρώς την ενεργό δυσκαμψία (στο τοιχίο T9 λείπουν οι τιμές του πρώτου κύκλου της περιβάλλουσας συνεπώς δεν παρατηρείται αυτή η υποεκτίμηση).

Βιβλιογραφία

1. **CEN Eurocode 2. 2004.** *Design of concrete structures-Part 1-1:General rules for buildings.* EN 1992-1-1:2004. Brussels : European Committee for Standardization, 2004.
2. **CEN Eurocode 8. 2004.** *Design of structures for earthquake resistance-Part 1:General rules, seismic actions and rules for buildings, EN 1998-1:2004.* Brussels : European Committee for Standardization, 2004.
3. **CEN Eurocode 8. 2004. 2005.** *Design of structures for earthquake resistance-Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, EN 1998-3:2005.* Brussels : European Committee for Standardization, 2005.
4. **Greifenhagen Christian, Lestuzzi Pierino. 2005.** Static cyclic tests on lightly reinforced concrete shear walls. *Engineering Structures.* June, 2005, Vol. 27, Issue 11, pg 1703-1712.
5. **Gulec C. Kerem, Whittaker S. Andrew. 2011.** Empirical Equations for Peak Shear Strength of Low Aspect Reinforced Concrete Walls. *ACI Structural Journal.* January-February 2011, Vol. 108, Issue 1, pg 80-89.
6. **Gulec K. Cevdet, Whittaker S. Andrew, Stojadinovic Bozidar. 2008.** Shear Strength of Squat Rectangular Reinforced Concrete Walls. *ACI Structural Journal.* 2008, Vol. 105, Issue 4, pg. 488-497.
7. **Hidalgo Pedro A., Ledezma Christian A., Jordan Rodrigo M. 2002.** Seismic Behavior of Squat Reinforced Concrete Shear Walls. *Earthquake Spectra.* 2002, Vol. 18, No. 2, pg. 287–308.
8. **Kotsovos M.G., Cotsovos M.D., Kotsovos D.M., Kounadis N.A. 2011.** Seismic behaviour of RC walls: An attempt to reduce reinforcement congestion. *Magazine of Concrete Research.* 2011, Vol. 63, Issue 4, pg. 235-246.
9. **Kuang J.S., Ho Y.B. 2008.** Seismic Behavior and Ductility of Squat Reinforced Concrete Shear Walls with Nonseismic Detailing. *ACI Structural Journal.* 2008, Vol. 105, Issue 2, pg. 225-231.
10. **Lefas D. Ioannis, Kotsovos D. Michael, Ambraseys N. Nicholas. 1990.** Behavior of Reinforced Concrete Structural Walls: Strength, Deformation Characteristics, and Failure Mechanism. *ACI Structural Journal.* 1990, Vol. 87, Issue 1, pg 23-31.

- 11.Lefas D. Ioannis, Kotsovos D. Michael. 1990.** Strength and Deformation Characteristics of Reinforced Concrete Walls Under Load Reversals. *ACI Structural Journal*. 1990, Vol. 87, Issue 6, pg. 716-726.
- 12.Lopes S.M. 2001.** Experimental shear-dominated response of RC walls.Part I: Objectives, methodology and results. *Engineering Structures*. March, 2001, Vol. 23, Issue 3, pg 229-239.
- 13.Lopes S.M. 2001.** Experimental shear-dominated response of RC walls. Part II: Discussion of results and design implications. *Engineering Structures*. May, 2001, Vol. 23, Issue 5, pg 564-574.
- 14.Massone M. Leonardo. 2010.** Strength prediction of squat structural walls via calibration of a shear-flexure interaction model. *Engineering Structures*. April, 2010, Vol. 32, Issue 4, pg. 922-932.
- 15. Neville A.M** *Properties of concrete*, fourth edition, Longman
- 16.Panagiotakos B.Telemachos, Fardis N. Michael. 2001.** Deformations of Reinforced Concrete Members at Yielding and Ultimate. *ACI Structural Journal*. 2001, Vol. 98, Issue 2, pg.135-148.
- 17.Paulay T., Priestley M.J.M.,Synge A.J. 1982.** Ductility in Earthquake Resisting Squat Shearwalls. *ACI Structural Journal*. July-August, 1982, pg 257-269.
- 18.Pilakoutas K., Elnashai S. A. 1995.** Cyclic Behavior of Reinforced Concrete Cantilever Walls,Part II: Discussions and Theoretical Comparisons. *ACI Structural Journal*. July-August, 1995, Vol. 92, Issue 4, pg 425-433.
- 19.Pilakoutas kypros, Elnashai Arm. 1995.** Cyclic Behavior of Reinforced Concrete Cantilever Walls,Part I: Experimental Results. *ACI Structural Journal*. May-June, 1995, Vol. 92, Issue 3, pg. 271-281.
- 20.Salonikios Thomas N. 2002.** Shear strength and deformation patterns of R/C walls with aspect ratio 1.0 and 1.5 designed to Eurocode 8 (EC8). *Engineering Structures*. July, 2002, Vol. 24, Issue 1,pg 39-49.
- 21.Salonikios Thomas N., Kappos Andreas J.,Tegos Ioannis A., Penelis Georgios G.1999.** Cyclic Load Behavior of Low-Slenderness Reinforced Concrete Walls:Design Basis and Test Results. *ACI Structural Journal*. July-August, 1999, Vol. 96, Issue 4,pg 649-660.
- 22.Salonikios Thomas N., Kappos Andreas J.,Tegos Ioannis A., Penelis Georgios G.2000.** Cyclic Load Behavior of Low-Slenderness Reinforced Concrete

Walls: Failure Modes, Strength and Deformation Analysis, and Design Implications. *ACI Structural Journal*. January-February, 2000, Vol. 97, Issue 1, pg 132-142.

23. Thomson D. Edward, Perdomo E. María, Picón Ricardo, Marante E. María, Flórez-López Julio. 2009. Simplified model for damage in squat RC shear walls. *Engineering Structures*. October, 2009, Vol. 31, Issue 10, pg. 2215-2223.

24. Wood Sharon L. 1990. Shear Strength of Low-Rise Reinforced Concrete Walls. *ACI Structural Journal*. 1990, Vol. 87, Issue 1, pg. 99-107.

25. Zhang Yunfeng, Wang Zhihao. 2000. Seismic Behavior of Reinforced Concrete Shear Walls Subjected to High Axial Load. *ACI Structural Journal*. September-October, 2000, Vol. 97, No.5, pg 739-750.

26. ΚΑΝ.ΕΠΕ 2012. Κανονισμός Επεμβάσεων. σ.λ. : ΟΑΣΠ

27. Μπισκίνης Δ.Ε Αντοχή και ικανότητα παραμόρφωσης μελών οπλισμένου σκυροδέματος με ή χωρίς ενίσχυση ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ Πάτρα, 2007

28. Τάσιος Θ, Βιντζηλαίου Ε, Γιαννόπουλος Π, Πλαίνης Π, Σιγάλας Ι, Τρέζος Κ, Τσουκαντάς Σ. Σημειώσεις για τις Κατασκευές από ΩΣ. Αθήνα : Εκδόσεις ΕΜΠ, 2003.

29. Τάσιος Θ.Π, Γιαννόπουλος Π.Ι, Τρέζος Κ.Γ, Τσουκαντάς Ι.Γ. Οπλισμένο Σκυρόδεμα. Αθήνα : Εκδόσεις ΕΜΠ, 1998.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά και αντοχές δοκιμίων

Πίνακας Α.1 Χαρακτηριστικά τοιχίων

α/α	b _w (m)	l _w (m)	h _w (m)	Τρόπος Όπλισης	Αντοχή σκυροδέματος (MPa)	Όριο διαρροής διαμήκων ράβδων (MPa)*		Όριο διαρροής συνδετήρων (MPa)*	Ανηγμένη αξονική δύναμη (ν _d)	Κατακόρυφος οπλισμός άκρου ρ _{v,col}	Κατακόρυφος οπλισμός κορμού ρ _{v,web}	Συνδετήρες περίσφιξης άκρων ρ _{st,col}	Οριζόντιος οπλισμός κορμού ρ _{h,web}	Διαγώνιος οπλισμός ρ _{diag}
						(Φ10) 604,19	(Φ8) 588,34							
T7	0,125	0,75	1,40	Διαμόρφωση κρυφ/των	31120	(Φ10) 604,19	(Φ8) 588,34	588,34	0	1,885%	1,0723%	39,673‰	0,6702%	0
T8	0,125	0,75	1,40	Διαμόρφωση κρυφ/των	31120	(Φ10) 604,19	(Φ8) 588,34	588,34 (527,17)	0	1,885%	1,0723%	39,673‰	0,6702%	0
T9	0,125	0,75	1,40	Αραιή διάταξη συνδετήρων	31120	580,45		588,34	0	-	1,2064%	-	0,2011%	0
T10	0,125	0,75	1,40	Αραιή διάταξη συνδετήρων	31120	580,45		588,34	0	-	1,2064%	-	0,2011%	0
T11	0,125	0,75	1,40	Αραιή διάταξη συνδετήρων	31120	580,45		567,44	0	-	1,2064%	-	0,1131%	0
T12	0,125	0,75	1,40	Αραιή διάταξη συνδετήρων	31120	580,45		567,44	0	-	1,2064%	-	0,1131%	0

Όπου: $\rho_{v,col} = \Sigma A_{sv} / A_{cc}$, $A_{cc} = b_w \times \alpha$, ΣA_{sv} = άθροισμα κατακόρυφου οπλισμού άκρου, α = μήκος περισφιγμένης ζώνης
 $\rho_{v,web} = \Sigma A_s / (b_w (l_w - 2\alpha))$, ΣA_s = άθροισμα κατακόρυφου οπλισμού κορμού
 $\rho_{h,web} = \Sigma A_{st} / (b_w * s)$, s = απόσταση συνδετήρων κορμού, ΣA_{sh} = εμβαδόν συνδετήρα κορμού
 $\rho_{st,col} = (l_{stir} \times A_{stir}) / (\alpha \times b_w \times s_{stir})$, s_{stir} = απόσταση συνδετήρων άκρων
 $\rho_{diag} = \Sigma A_{diag} / (b_w * l_w)$, ΣA_{diag} = άθροισμα διαγώνιου οπλισμού και προς τις δύο διευθύνσεις
 * Μέσες τιμές 6 δοκιμίων.

Στο τοίχιο T8, το όριο διαρροής συνδετήρων (τιμή σε παρένθεση) αναφέρεται στους συνδετήρες περίσφιξης.

Πίνακας Α.2 Αντοχές δοκιμίων

α/α	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ*						ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (KN)
		Αντοχή στοιχείου χωρίς οπλισμό διάτμησης	Αντοχή σε λοξή θλίψη κορμού		Αντοχή τοιχείου με οπλισμό διάτμησης		Αντοχή σε διατμητική ολίσθηση	
	EC2-EC8(KNm) (Ισοδύναμη τέμνουσα) (KN)	EC2-EC8 VRd,c (KN)	EC2-EC8 VRd,max (KN)	ΚΑΝ.ΕΠΕ VR,max (KN)	EC2-EC8 VRd,s (KN)	ΚΑΝ.ΕΠΕ VR (KN)	EC2-EC8 VRd,s (KN)	
T7	289,336 192,891	85,481	(301,394) 437,044	231,441	210,831 (527,116)	182,536	346,97	203,80
T8	288,768 192,512	85,481	(300,834) 436,232	235,696	210,440 (526,137)	185,189	346,97	-
T9	217,386 144,924	77,994	(304,014) 440,843	273,808	63,800 (159,510)	102,896	271,26	177,14
T10	217,386 144,924	77,994	(304,014) 440,843	273,808	63,800 (159,510)	102,896	271,26	-
T11	217,386 144,924	77,994	(304,014) 440,843	273,808	34,612 (86,537)	84,417	271,26	172,11
T12	217,386 144,924	77,994	(304,014) 440,843	273,808	34,612 (86,537)	84,417	271,26	-

* Οι τιμές εκτός παρένθεσης προκύπτουν για γωνία θλιπτήρων $\theta=45^\circ$, ενώ οι εντός παρένθεσης για $\theta=21,8^\circ$.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Αναλυτικός υπολογισμός αντοχών δοκιμίων

Β1) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΟΠΗΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑ ΚΑΝ.ΕΠΕ

Υπολογισμός M_y (§2.3.2)

Τοιχίο T₇

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

$$= 0,125 \cdot 0,7225^3 \cdot 0,005398 \cdot \{ 34411,21 \cdot 1000 \cdot (0,22542^2/2)(0,5(1 + 0,0381) - 0,22542/3) + [(1 - 0,22542)0,001739 + (0,22542 - 0,0381) \cdot 0,001739 + (0,01141/6)(1 - 0,0381)](1 - 0,0381) (200000/2) \} =$$

$$184,50 \text{ KNm}$$

$$\boxed{M_y = 184,50 \text{ KNm}}$$

όπου:

$$(1/r)_y = \frac{f_y}{E_s(1 - \xi_y)d} = \frac{604,19}{200000 \cdot (1 - 0,22542) \cdot 0,7225} = 0,005398 \text{ m}^{-1}$$

$$b = 0,125\text{m}$$

$$d = 0,7225\text{m}$$

$$E_c = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} = 22 \cdot \left(\frac{44,421}{10} \right)^{0,3} = 34,411 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$\delta' = \frac{d'}{d} = \frac{0,0275}{0,7225} = 0,0381$$

$$\rho = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot \frac{1,0^2}{4} \cdot 10^{-4}}{0,125 \cdot 0,7225} = 0,001739$$

$$\rho' = 0,001739$$

$$\rho_v = \frac{8 \cdot 3,14 \cdot \frac{1,0^2}{4} \cdot 10^{-4} + 8 \cdot 3,14 \cdot \frac{0,8^2}{4} \cdot 10^{-4}}{0,125 \cdot 0,7225} = 0,01141$$

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2\alpha B)^{1/2} - \alpha A = (5,812^2 \cdot 0,0149^2 + 2 \cdot 5,812 \cdot 0,0077275)^{1/2} - 5,812 \cdot 0,0149 = 0,22542$$

όπου:

$$\alpha = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{34411,21} = 5,812$$

$$A = \rho + \rho' + \rho_v + N/(bdf_y) = 0,001739 + 0,001739 + 0,01141 + 0 = 0,0149$$

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

$$= 0,001739 + 0,001739 \cdot 0,0381 + 0,5 \cdot 0,01141 \cdot (1 + 0,0381) + 0$$

$$= 0,0077275$$

Ομοίως για τα υπόλοιπα τοιχία προκύπτουν:

	T8	T9	T10	T11	T12
(1/r)_y(m⁻¹)	0,00540	0,00516	0,00516	0,00516	0,00516
b(m)	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125
d(m)	0,7225	0,721	0,721	0,721	0,721
E_c(MPa)	34,182	30,927	30,927	30,927	30,927
E_s(MPa)	200000	200000	200000	200000	200000
δ'	0,03806	0,04022	0,04022	0,04022	0,04022
ρ	0,001739	0,00251	0,00251	0,00251	0,00251
ρ'	0,001739	0,00251	0,00251	0,00251	0,00251
ρ_v	0,011410	0,00753	0,00753	0,00753	0,00753
ξ_y	0,225963	0,22051	0,22051	0,22051	0,22051
α	5,8510	6,4669	6,4669	6,4669	6,4669
A	0,01488	0,01255	0,01255	0,01255	0,01255
B	0,00773	0,00653	0,00653	0,00653	0,00653
M_y(kNm)	184,40	165,15	165,15	165,15	165,15

Τοιχίο T₈

$$M_y = 184,41 \text{ KNm}$$

Τοιχίο T₉

$$M_y = 165,15 \text{ KNm}$$

Τοιχίο T₁₀

$$M_y = 165,15 \text{ KNm}$$

Τοιχίο T₁₁

$$M_y = 165,15 \text{ KNm}$$

Τοιχίο T₁₂

$$M_y = 165,15 \text{ KNm}$$

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑ EC2

Τοιχίο T₇

Ο υπολογισμός της ροπής διαρροής κατά EC2 πραγματοποιείται μέσω εξισώσεων ισοδυναμίας δρώντων μεγεθών με αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη. Κριτήριο διαρροής υιοθετείται η διαρροή του πλέον εφελκυσμένου χάλυβα (στάθμη με δείκτη 1). Αναλυτικά :

Υιοθετούνται παραμορφώσεις χάλυβα-σκυροδέματος:

$$\varepsilon_{c2} = 1,131243\text{‰} , \varepsilon_{s1} = 3,02095\text{‰}.$$

Δεδομένες θεωρούνται οι αντοχές σκυροδέματος και χάλυβα:

$$f_{cm} = 31,12\text{MPa}$$

$$f_y (\Phi 10) = 60,419\text{MPa}$$

$$f_y (\Phi 8) = 58,834 \text{MPa}$$

$$f_u (\Phi 8) = 68,091\text{MPa}$$

$$f_u (\Phi 10) = 70,476\text{MPa}$$

$$f_{ywd} = 58,834 \text{MPa}$$

Υιοθετούνται διαγράμματα χάλυβα με κράτυνση και παραβολικό-ακριβές διάγραμμα σκυροδέματος με τις παραπάνω αντοχές βλ. §2.2.1, §2.2.3.

Δεδομένα θεωρούνται και οι διαστάσεις- στατικά ύψη:

$$b = 0,125\text{m}, \quad d = 0,7225\text{m}, \quad d_2 = 0,0275\text{m}, \quad d_3 = 0,1075\text{m}, \quad d_4 = 0,1875\text{m}, \\ d_5 = 0,2625\text{m}, \quad d_6 = 0,3375\text{m}, \quad d_7 = 0,4125\text{m}, \quad d_8 = 0,4875\text{m}, \quad d_9 = 0,5625\text{m}, \\ d_{10} = 0,6425\text{m}, \quad h = 0,75\text{m}.$$

Ύψος θλιβόμενης ζώνης:

$$x = \varepsilon_{c2} \cdot d / (\varepsilon_{s1} + \varepsilon_{c2}) = 1,131243 \cdot 0,7225 / (1,131243 + 3,02095) = 0,1968\text{m}$$

Εμβαδά οπλισμών:

$$A_{s1} = A_{s2} = A_{s3} = A_{s4} = A_{s9} = A_{s10} = 2 \cdot \pi \cdot 10^2 / 400 = 1,5708 \text{ cm}^2$$

$$A_{s5} = A_{s6} = A_{s7} = A_{s8} = 2 \cdot \pi \cdot 8^2 / 400 = 1,0053 \text{ cm}^2$$

Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα- σκυροδέματος:

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 22 \cdot (f_{cm,c} / 10)^{0,3} = 22 \cdot (44,421 / 10)^{0,3} = 34,411 \text{ MPa}$$

όπου $f_{cm,c}$ η περισφιγμένη αντοχή σκυροδέματος και προσδιορίζεται ως εξής:

$$f_{cm,c} = f_{cm}(1,125 + 1,25\alpha\omega_{wd}) \quad \text{για } \alpha\omega_{wd} > 0,10 \quad \text{άρα}$$

$$f_{cm,c} = 44,421 \cdot (1,125 + 1,250 \cdot 0,3448 \cdot 0,7016) = 44,421 \text{ MPa} \quad \text{όπου:}$$

$$\alpha = [1 - s_h / (2b_c)] [1 - s_h / (2h_c)] \left[1 - \sum b_i^2 / (6b_c h_c) \right] = \\ = [1 - 5 / (2 \cdot 8,7)] [1 - 5 / (2 \cdot 17)] [1 - 384 / (6 \cdot 8,7 \cdot 17)] = 0,3448$$

$$\omega_{wd} = \frac{\text{όγκος των βρόγχων περίσφιξης}}{\text{όγκος του σκυροδέματος του πυρήνα}} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} = \\ = \frac{\pi \cdot 8^2 / 400 \cdot [2 \cdot (17 + 0,8) + 2 \cdot (8,7 + 0,8)]}{(5 \cdot 8,7 \cdot 17)} \cdot \frac{588,34}{31,12} = 0,7016$$

$$\alpha\omega_{wd} = 0,3448 \cdot 0,7016 = 0,2419 > 0,10$$

$$\varepsilon_{c2,c} = 0,002 (f_{cm,c} / f_{ck})^2 = 0,002 \cdot (44,421 / 31,12)^2 = 4,075\text{‰}$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = 0,0035 + 0,1\alpha\omega_{wd} = 0,0035 + 0,1 \cdot 0,2419 = 27,693\text{‰}$$

Παραμορφώσεις χάλυβα οπλισμών (καθ' ύψος):

$$\varepsilon_{s1} = 3,0210\text{‰}, \quad \varepsilon_{s2} = 0,9732\text{‰}, \quad \varepsilon_{s3} = 0,5134\text{‰}, \quad \varepsilon_{s4} = 0,0537\text{‰},$$

$$\varepsilon_{s5} = 0,3773\text{‰}, \quad \varepsilon_{s6} = 0,8084\text{‰}, \quad \varepsilon_{s7} = 1,2394\text{‰}, \quad \varepsilon_{s8} = 1,6704\text{‰},$$

$$\varepsilon_{s9} = 2,1014\text{‰}, \quad \varepsilon_{s10} = 2,5612\text{‰},$$

Τάσεις χάλυβα (διγραμμικό διάγραμμα χάλυβα με αύξοντα κλάδο-κράτυνηση)

$$\begin{aligned}\sigma_{s1} &= 60,4190 \text{ kN/cm}^2, \sigma_{s2} = 19,4640 \text{ kN/cm}^2, \sigma_{s3} = 10,2688 \text{ kN/cm}^2, \\ \sigma_{s4} &= 1,0737 \text{ kN/cm}^2, \sigma_{s5} = 7,5468 \text{ kN/cm}^2, \sigma_{s6} = 16,1673 \text{ kN/cm}^2, \\ \sigma_{s7} &= 24,7877 \text{ kN/cm}^2, \sigma_{s8} = 33,4082 \text{ kN/cm}^2, \sigma_{s9} = 42,0287 \text{ kN/cm}^2, \\ \sigma_{s10} &= 51,2238 \text{ kN/cm}^2\end{aligned}$$

Δυνάμεις χάλυβα:

$$\begin{aligned}F_{s1} &= \sigma_{s1} \cdot A_{s1} = 60,4190 \cdot 1,5708 = 94,9059 \text{ kN} \\ F_{s2} &= \sigma_{s2} \cdot A_{s2} = 19,4640 \cdot 1,5708 = 30,5740 \text{ kN} \\ F_{s3} &= \sigma_{s3} \cdot A_{s3} = 10,2688 \cdot 1,5708 = 16,1303 \text{ kN} \\ F_{s4} &= \sigma_{s4} \cdot A_{s4} = 1,0737 \cdot 1,5708 = 1,6865 \text{ kN} \\ F_{s5} &= \sigma_{s5} \cdot A_{s5} = 7,5468 \cdot 1,0053 = 7,5869 \text{ kN} \\ F_{s6} &= \sigma_{s6} \cdot A_{s6} = 16,1673 \cdot 1,0053 = 16,2531 \text{ kN} \\ F_{s7} &= \sigma_{s7} \cdot A_{s7} = 24,7877 \cdot 1,0053 = 24,9193 \text{ kN} \\ F_{s8} &= \sigma_{s8} \cdot A_{s8} = 33,4082 \cdot 1,0053 = 33,5856 \text{ kN} \\ F_{s9} &= \sigma_{s9} \cdot A_{s9} = 42,0287 \cdot 1,5708 = 66,0185 \text{ kN} \\ F_{s10} &= \sigma_{s10} \cdot A_{s10} = 51,2238 \cdot 1,5708 = 80,4622 \text{ kN}\end{aligned}$$

Δύναμη σκυροδέματος:

$$\begin{aligned}F_c &= b \cdot f_{cm,c} \cdot [x^2/x_{c2} - x^3/(3x_{c2}^2)] = \\ &= 0,125 \cdot 44421,27 \cdot [0,1968^2/0,7091 - 0,1968^3/(3 \cdot 0,7091^2)] = 275,34 \text{ kN}\end{aligned}$$

όπου:

$$x_{c2} = x \cdot \varepsilon_{c2,c} / \varepsilon_{c2} = 0,1968 \cdot 4,075 / 1,131243 = 0,7091 \text{ m}$$

Επαλήθευση Εξισώσεως Ισοδυναμίας Αξονικών Δυνάμεων:

$$\begin{aligned}N_{\varepsilon\xi} = N_{\varepsilon\sigma} &\Rightarrow F_c + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} - F_{s5} - F_{s6} - F_{s7} - F_{s8} - F_{s9} - F_{s10} = \\ &275,34 + 30,5740 + 16,1303 + 1,6865 - 7,5869 - 16,2531 - 24,9193 \\ &- 33,5856 - 66,0185 - 80,4622 \cong 0\end{aligned}$$

Ροπή Διαρροής:

$$\begin{aligned}M_y &= F_c \cdot (d - a') + F_{s2} \cdot (d - d_2) + F_{s3} \cdot (d - d_3) + F_{s4} \cdot (d - d_4) \\ &- F_{s5} \cdot (d - d_5) - F_{s6} \cdot (d - d_6) - F_{s7} \cdot (d - d_7) - F_{s8} \cdot (d - d_8) \\ &- F_{s9} \cdot (d - d_9) - F_{s10} \cdot (d - d_{10}) = \\ &275,34 \cdot (0,7225 - 0,06943) + 30,5740 \cdot (0,7225 - 0,0275)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+16,1303 \cdot (0,7225 - 0,1075) + 1,6865 \cdot (0,7225 - 0,1875) \\
 &-7,5869 \cdot (0,7225 - 0,2625) - 16,2531 \cdot (0,7225 - 0,3375) \\
 &-24,9193 \cdot (0,7225 - 0,4125) - 33,5856 \cdot (0,7225 - 0,4875) \\
 &-66,0185 \cdot (0,7225 - 0,5625) - 80,4622 \cdot (0,7225 - 0,6425) = 169,52 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Οπου:

$$a' = \zeta' \cdot x = 0,3527 \cdot 0,1968 = 0,06943 \text{ με } \zeta' = 8 - \varepsilon_{c2} / [4 \cdot (6 - \varepsilon_{c2})] = 0,3527$$

$$M_y = 169,52 \text{ KNm}$$

$$P_y = 113,02 \text{ KN}$$

Τοιχίο T_g

$$\varepsilon_{c2} = 1,12201\text{‰} , \varepsilon_{s1} = 3,02095\text{‰}.$$

Δεδομένες θεωρούνται οι αντοχές σκυροδέματος και χάλυβα:

$$f_{cm} = 31,12 \text{ MPa}$$

$$f_y (\Phi 10) = 60,419 \text{ MPa}$$

$$f_y (\Phi 8) = 58,834 \text{ MPa}$$

$$f_u (\Phi 8) = 68,091 \text{ MPa}$$

$$f_u (\Phi 10) = 70,476 \text{ MPa}$$

$$f_{ywd,1} = 58,834 \text{ MPa}$$

$$f_{ywd,2} = 52,717 \text{ MPa}$$

Υιοθετούνται διαγράμματα χάλυβα με κράτυνση και παραβολικό-ακριβές διάγραμμα σκυροδέματος με τις παραπάνω αντοχές βλ. §2.2.1, §2.2.3.

Δεδομένα θεωρούνται και οι διαστάσεις- στατικά ύψη:

$$\begin{aligned}
 b &= 0,125\text{m}, \quad d = 0,7225\text{m}, \quad d_2 = 0,0275\text{m}, \quad d_3 = 0,1075\text{m}, \quad d_4 = 0,1875\text{m}, \\
 d_5 &= 0,2625\text{m}, \quad d_6 = 0,3375\text{m}, \quad d_7 = 0,4125\text{m}, \quad d_8 = 0,4875\text{m}, \quad d_9 = 0,5625\text{m}, \\
 d_{10} &= 0,6425\text{m}, \quad h = 0,75\text{m}.
 \end{aligned}$$

Ύψος θλιβόμενης ζώνης:

$$x = 0,19567\text{m}$$

Εμβαδά οπλισμών:

$$A_{s1} = A_{s2} = A_{s3} = A_{s4} = A_{s9} = A_{s10} = 2 \cdot \pi \cdot 10^2 / 400 = 1,5708 \text{ cm}^2$$

$$A_{s5} = A_{s6} = A_{s7} = A_{s8} = 2 \cdot \pi \cdot 8^2 / 400 = 1,0053 \text{ cm}^2$$

Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα- σκυροδέματος:

$$E_s = 200000\text{MPa}$$

$$E_{cm} = 34,182\text{MPa}$$

όπου $f_{cm,c}$ η περισιφιγμένη αντοχή σκυροδέματος και προσδιορίζεται ως εξής:

$$f_{cm,c} = f_{cm}(1,125 + 1,25\alpha\omega_{wd}) \quad \text{για } \alpha\omega_{wd} > 0,10 \quad \text{άρα}$$

$$f_{cm,c} = 43,442\text{MPa} \quad \text{όπου:}$$

$$\alpha = 0,34481$$

$$\omega_{wd} = 0,6287$$

$$\alpha\omega_{wd} = 0,2168 > 0,10$$

$$\varepsilon_{c2,c} = 0,002(f_{cm,c}/f_{ck})^2 = 3,897\text{‰}$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = 0,0035 + 0,1\alpha\omega_{wd} = 25,178\text{‰}$$

Παραμορφώσεις χάλυβα οπλισμών (καθ' ύψος):

$$\varepsilon_{s1} = 3,0210\text{‰}, \quad \varepsilon_{s2} = 0,9643\text{‰}, \quad \varepsilon_{s3} = 0,5056\text{‰}, \quad \varepsilon_{s4} = 0,0468\text{‰},$$

$$\varepsilon_{s5} = 0,3832\text{‰}, \quad \varepsilon_{s6} = 0,8133\text{‰}, \quad \varepsilon_{s7} = 1,2433\text{‰}, \quad \varepsilon_{s8} = 1,6734\text{‰},$$

$$\varepsilon_{s9} = 2,1035\text{‰}, \quad \varepsilon_{s10} = 2,5622\text{‰},$$

Τάσεις χάλυβα (διγραμμικό διάγραμμα χάλυβα με αύξοντα κλάδο-κράτυνη)

$$\sigma_{s1} = 60,4190 \text{ kN/cm}^2, \quad \sigma_{s2} = 19,2864 \text{ kN/cm}^2, \quad \sigma_{s3} = 10,1117 \text{ kN/cm}^2,$$

$$\sigma_{s4} = 0,9369 \text{ kN/cm}^2, \quad \sigma_{s5} = 7,6644 \text{ kN/cm}^2, \quad \sigma_{s6} = 16,2657 \text{ kN/cm}^2,$$

$$\sigma_{s7} = 24,8670 \text{ kN/cm}^2, \quad \sigma_{s8} = 33,4683 \text{ kN/cm}^2, \quad \sigma_{s9} = 42,0696 \text{ kN/cm}^2,$$

$$\sigma_{s10} = 51,2443 \text{ kN/cm}^2$$

Δυνάμεις χάλυβα:

$$F_{s1} = \sigma_{s1} \cdot A_{s1} = 94,91 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = \sigma_{s2} \cdot A_{s2} = 30,29 \text{ kN}$$

$$F_{s3} = \sigma_{s3} \cdot A_{s3} = 15,88 \text{ kN}$$

$$F_{s4} = \sigma_{s4} \cdot A_{s4} = 1,47 \text{ kN}$$

$$F_{s5} = \sigma_{s5} \cdot A_{s5} = 7,71 \text{ kN}$$

$$F_{s6} = \sigma_{s6} \cdot A_{s6} = 16,35 \text{ kN}$$

$$F_{s7} = \sigma_{s7} \cdot A_{s7} = 25,00 \text{ kN}$$

$$F_{s8} = \sigma_{s8} \cdot A_{s8} = 33,65 \text{ kN}$$

$$F_{s9} = \sigma_{s9} \cdot A_{s9} = 66,08 \text{ kN}$$

$$F_{s10} = \sigma_{s10} \cdot A_{s10} = 80,49 \text{ kN}$$

Δύναμη σκυροδέματος:

$$F_c = b \cdot f_{cm,c} \cdot [x^2/x_{c2} - x^3/(3x_{c2}^2)] = 276,54 \text{ kN}$$

όπου:

$$x_{c2} = x \cdot \varepsilon_{c2,c} / \varepsilon_{c2} = 0,6797 \text{ m}$$

Επαλήθευση Εξισώσεως Ισοδυναμίας Αξονικών Δυνάμεων:

$$N_{\varepsilon\xi} = N_{\varepsilon\sigma} \Rightarrow F_c + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} - F_{s5} - F_{s6} - F_{s7} - F_{s8} - F_{s9} - F_{s10} \cong 0$$

Ροπή Διαρροής:

$$\begin{aligned} M_y = & F_c \cdot (d - a') + F_{s2} \cdot (d - d_2) + F_{s3} \cdot (d - d_3) + F_{s4} \cdot (d - d_4) \\ & - F_{s5} \cdot (d - d_5) - F_{s6} \cdot (d - d_6) - F_{s7} \cdot (d - d_7) - F_{s8} \cdot (d - d_8) \\ & - F_{s9} \cdot (d - d_9) - F_{s10} \cdot (d - d_{10}) = 169,82 \text{ kNm} \end{aligned}$$

όπου:

$$a' = \zeta' \cdot x = 0,06897 \text{ με } \zeta' = 8 - \varepsilon_{c2} / [4 \cdot (6 - \varepsilon_{c2})] = 0,3525$$

$$\boxed{M_y = 169,82 \text{ KNm}}$$

$$\boxed{P_y = 113,22 \text{ KN}}$$

Στα τοιχία T9 έως T12 δεν δημιουργούνται συνθήκες περίσφιξης και οι διαφοροποιήσεις στη μεθοδολογία προσδιορισμού της ροπής διαρροής M_y είναι οι εξής:

Δύναμη σκυροδέματος:

$$F_c = b \cdot x \cdot f_{cm} \cdot a \quad \text{όπου} \quad a = 1/12 \cdot \varepsilon_{c2} \cdot (6 - \varepsilon_{c2})$$

Ροπή διαρροής:

$$\begin{aligned} M_y = & F_c \cdot (d - a') + F_{s2} \cdot (d - d_2) - F_{s3} \cdot (d - d_3) - F_{s4} \cdot (d - d_4) \\ & - F_{s5} \cdot (d - d_5) \end{aligned}$$

	T9	T10	T11	T12
$\epsilon_{c2}(\text{‰})$	0,88163	0,88163	0,88163	0,88163
$\epsilon_{s1}(\text{‰})$	2,90225	2,90225	2,90225	2,90225
$f_{cm}(\text{MPa})$	31,120	31,120	31,120	31,120
$f_y(\Phi 12)(\text{MPa})$	58,045	58,045	58,045	58,045
$f_u(\Phi 12)(\text{MPa})$	67,001	67,001	67,001	67,001
$E_{cm}(\text{MPa})$	30,927	30,927	30,927	30,927
$E_s(\text{MPa})$	200000	200000	200000	200000
$b(\text{m})$	0,125	0,125	0,125	0,125
$d(\text{m})$	0,721	0,721	0,721	0,721
$d_2(\text{m})$	0,029	0,029	0,029	0,029
$d_3(\text{m})$	0,202	0,202	0,202	0,202
$d_4(\text{m})$	0,375	0,375	0,375	0,375
$d_5(\text{m})$	0,548	0,548	0,548	0,548
$x(\text{m})$	0,1680	0,1680	0,1680	0,1680
ζ'	0,3477	0,3477	0,3477	0,3477
a'	0,0584	0,0584	0,0584	0,0584
$\epsilon_{s1}(\text{‰})$	2,9023	2,9023	2,9023	2,9023
$\epsilon_{s2}(\text{‰})$	0,7294	0,7294	0,7294	0,7294
$\epsilon_{s3}(\text{‰})$	0,1785	0,1785	0,1785	0,1785
$\epsilon_{s4}(\text{‰})$	1,0864	1,0864	1,0864	1,0864
$\epsilon_{s5}(\text{‰})$	1,9943	1,9943	1,9943	1,9943
$\sigma_{s1}(\text{kN/cm}^2)$	58,0450	58,0450	58,0450	58,0450
$\sigma_{s2}(\text{kN/cm}^2)$	14,5888	14,5888	14,5888	14,5888
$\sigma_{s3}(\text{kN/cm}^2)$	3,5697	3,5697	3,5697	3,5697
$\sigma_{s4}(\text{kN/cm}^2)$	21,7281	21,7281	21,7281	21,7281
$\sigma_{s5}(\text{kN/cm}^2)$	39,8866	39,8866	39,8866	39,8866
$F_{s1}(\text{kN})$	131,29	131,29	131,29	131,29
$F_{s2}(\text{kN})$	33,00	33,00	33,00	33,00
$F_{s3}(\text{kN})$	8,07	8,07	8,07	8,07
$F_{s4}(\text{kN})$	49,15	49,15	49,15	49,15
$F_{s5}(\text{kN})$	90,22	90,22	90,22	90,22
$F_c(\text{kN})$	245,74	245,74	245,74	245,74
$\Sigma F(\text{kN})$	0	0	0	0
$M_y(\text{kNm})$	148,86	148,86	148,86	148,86

Τοιχίο T₉

$$M_y = 148,86 \text{ KNm}$$

$$P_y = 99,24 \text{ KN}$$

Τοιχίο T₁₀

$$M_y = 148,86 \text{ KNm}$$

$$P_y = 99,24 \text{ KN}$$

Τοιχίο T₁₁

$$M_y = 148,86 \text{ KNm}$$

$$P_y = 99,24 \text{ KN}$$

Τοιχίο T₁₂

$$M_y = 148,86 \text{ KNm}$$

$$P_y = 99,24 \text{ KN}$$

B2) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑ EC2

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον προσδιορισμό της ροπής αντοχής M_{Rd} είναι πανομοιότυπη με τη μεθοδολογία για τον υπολογισμό της ροπής διαρροής M_y .

Τοιχίο T₇

$$\epsilon_{c2} = 18,03565\% , \epsilon_{s1} = 100,2\%.$$

Δεδομένες θεωρούνται οι αντοχές σκυροδέματος και χάλυβα:

$$f_{cm} = 31,12 \text{ MPa}$$

$$f_y (\Phi 10) = 60,419 \text{ MPa}$$

$$f_y (\Phi 8) = 58,834 \text{ MPa}$$

$$f_u (\Phi 8) = 68,091 \text{ MPa}$$

$$f_u (\Phi 10) = 70,476 \text{ MPa}$$

Υιοθετούνται διαγράμματα χάλυβα με κράτυνση και παραβολικό-ακριβές διάγραμμα σκυροδέματος με τις παραπάνω αντοχές βλ. §2.2.1, §2.2.3.

Δεδομένα θεωρούνται και οι διαστάσεις- στατικά ύψη:

$$b = 0,125\text{m}, \quad d = 0,7225\text{m}, \quad d_2 = 0,0275\text{m}, \quad d_3 = 0,1075\text{m}, \quad d_4 = 0,1875\text{m}, \\ d_5 = 0,2625\text{m}, \quad d_6 = 0,3375\text{m}, \quad d_7 = 0,4125\text{m}, \quad d_8 = 0,4875\text{m}, \quad d_9 = 0,5625\text{m}, \\ d_{10} = 0,6425\text{m}, \quad h = 0,75\text{m}.$$

Ύψος θλιβόμενης ζώνης:

$$x = 0,1102\text{m}$$

Εμβαδά οπλισμών:

$$A_{s1} = A_{s2} = A_{s3} = A_{s4} = A_{s9} = A_{s10} = 2 \cdot \pi \cdot 10^2 / 400 = 1,5708 \text{ cm}^2$$

$$A_{s5} = A_{s6} = A_{s7} = A_{s8} = 2 \cdot \pi \cdot 8^2 / 400 = 1,0053 \text{ cm}^2$$

Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα- σκυροδέματος:

$$E_s = 200000\text{MPa}$$

$$E_{cm} = 34,411\text{MPa}$$

όπου $f_{cm,c}$ η περισιγμένη αντοχή σκυροδέματος και προσδιορίζεται ως εξής:

$$f_{cm,c} = f_{cm}(1,125 + 1,25\alpha\omega_{wd}) \quad \text{για } \alpha\omega_{wd} > 0,10 \quad \text{άρα}$$

$$f_{cm,c} = 44,421\text{MPa} \quad \text{όπου:}$$

$$\alpha = 0,34481$$

$$\omega_{wd} = 0,7016$$

$$\alpha\omega_{wd} = 0,2419 > 0,10$$

$$\varepsilon_{c2,c} = 0,002(f_{cm,c}/f_{ck})^2 = 4,0750\text{‰}$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = 0,0035 + 0,1\alpha\omega_{wd} = 27,3965\text{‰}$$

Παραμορφώσεις χάλυβα οπλισμών (καθ' ύψος):

$$\varepsilon_{s1} = 100,2000\text{‰}, \quad \varepsilon_{s2} = 13,5353\text{‰}, \quad \varepsilon_{s3} = 0,4435\text{‰}, \quad \varepsilon_{s4} = 12,6483\text{‰},$$

$$\varepsilon_{s5} = 24,9219\text{‰}, \quad \varepsilon_{s6} = 37,1955\text{‰}, \quad \varepsilon_{s7} = 49,4691\text{‰}, \quad \varepsilon_{s8} = 61,7427\text{‰},$$

$$\varepsilon_{s9} = 74,0163\text{‰}, \quad \varepsilon_{s10} = 87,1082\text{‰},$$

Τάσεις χάλυβα (διγραμμικό διάγραμμα χάλυβα με αύξοντα κλάδο-κράτυση)

$$\sigma_{s1} = 70,4760 \text{ kN/cm}^2, \quad \sigma_{s2} = 61,5071 \text{ kN/cm}^2, \quad \sigma_{s3} = 8,8699 \text{ kN/cm}^2,$$

$$\sigma_{s4} = 61,4153 \text{ kN/cm}^2, \quad \sigma_{s5} = 61,2205 \text{ kN/cm}^2, \quad \sigma_{s6} = 62,5531 \text{ kN/cm}^2,$$

$$\sigma_{s7} = 63,8858 \text{ kN/cm}^2, \quad \sigma_{s8} = 65,2184 \text{ kN/cm}^2, \quad \sigma_{s9} = 67,7663 \text{ kN/cm}^2,$$

$$\sigma_{s10} = 69,1211 \text{ kN/cm}^2$$

Δυνάμεις χάλυβα:

$$F_{s1} = \sigma_{s1} \cdot A_{s1} = 110,70 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = \sigma_{s2} \cdot A_{s2} = 96,62 \text{ kN}$$

$$F_{s3} = \sigma_{s3} \cdot A_{s3} = 13,93 \text{ kN}$$

$$F_{s4} = \sigma_{s4} \cdot A_{s4} = 96,47 \text{ kN}$$

$$F_{s5} = \sigma_{s5} \cdot A_{s5} = 61,55 \text{ kN}$$

$$F_{s6} = \sigma_{s6} \cdot A_{s6} = 62,89 \text{ kN}$$

$$F_{s7} = \sigma_{s7} \cdot A_{s7} = 64,22 \text{ kN}$$

$$F_{s8} = \sigma_{s8} \cdot A_{s8} = 65,56 \text{ kN}$$

$$F_{s9} = \sigma_{s9} \cdot A_{s9} = 106,45 \text{ kN}$$

$$F_{s10} = \sigma_{s10} \cdot A_{s10} = 108,58 \text{ kN}$$

Δύναμη σκυροδέματος:

$$F_c = b \cdot f_{cm,c} \cdot x \left[1 - \varepsilon_{c2,c} / (\varepsilon_{c2}) \right] = 565,87 \text{ kN}$$

Επαλήθευση Εξισώσεως Ισοδυναμίας Αξονικών Δυνάμεων:

$$N_{εξ} = N_{εσ} \Rightarrow F_c + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} - F_{s5} - F_{s6} - F_{s7} - F_{s8} - F_{s9} - F_{s10} \cong 0$$

Ροπή Αντοχής:

$$\begin{aligned} M_{Rd} = & F_c \cdot (d - a') + F_{s2} \cdot (d - d_2) - F_{s3} \cdot (d - d_3) - F_{s4} \cdot (d - d_4) \\ & - F_{s5} \cdot (d - d_5) - F_{s6} \cdot (d - d_6) - F_{s7} \cdot (d - d_7) - F_{s8} \cdot (d - d_8) \\ & - F_{s9} \cdot (d - d_9) - F_{s10} \cdot (d - d_{10}) = 289,34 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Οπου:

$$a' = \zeta' \cdot x = 0,05311 \text{ με } \zeta' = 8 - \varepsilon_{c2} / [4 \cdot (6 - \varepsilon_{c2})] = 0,4819$$

$$\boxed{M_{Rd} = 289,34 \text{ KNm}}$$

$$\boxed{P_{Rd} = 192,89 \text{ KN}}$$

Τοιχίο T₈

$$\varepsilon_{c2} = 18,2241\text{‰} , \varepsilon_{s1} = 100,2\text{‰}.$$

Δεδομένες θεωρούνται οι αντοχές σκυροδέματος και χάλυβα:

$$f_{cm} = 31,12 \text{ MPa}$$

$$f_y (\Phi 10) = 60,419 \text{MPa}$$

$$f_y (\Phi 8) = 58,834 \text{MPa}$$

$$f_u (\Phi 8) = 68,091 \text{MPa}$$

$$f_u (\Phi 10) = 70,476 \text{MPa}$$

Υιοθετούνται διαγράμματα χάλυβα με κράτυνση και παραβολικό-ακριβές διάγραμμα σκυροδέματος με τις παραπάνω αντοχές βλ. §2.2.1, §2.2.3.

Δεδομένα θεωρούνται και οι διαστάσεις- στατικά ύψη:

$$b = 0,125\text{m}, \quad d = 0,7225\text{m}, \quad d_2 = 0,0275\text{m}, \quad d_3 = 0,1075\text{m}, \quad d_4 = 0,1875\text{m}, \\ d_5 = 0,2625\text{m}, \quad d_6 = 0,3375\text{m}, \quad d_7 = 0,4125\text{m}, \quad d_8 = 0,4875\text{m}, \quad d_9 = 0,5625\text{m}, \\ d_{10} = 0,6425\text{m}, \quad h = 0,75\text{m}.$$

Ύψος θλιβόμενης ζώνης:

$$x = 0,1112\text{m}$$

Εμβαδά οπλισμών:

$$A_{s1} = A_{s2} = A_{s3} = A_{s4} = A_{s9} = A_{s10} = 2 \cdot \pi \cdot 10^2 / 400 = 1,5708 \text{cm}^2$$

$$A_{s5} = A_{s6} = A_{s7} = A_{s8} = 2 \cdot \pi \cdot 8^2 / 400 = 1,0053 \text{cm}^2$$

Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα- σκυροδέματος:

$$E_s = 200000 \text{MPa}$$

$$E_{cm} = 34,182 \text{MPa}$$

όπου $f_{cm,c}$ η περισιγμένη αντοχή σκυροδέματος και προσδιορίζεται ως εξής:

$$f_{cm,c} = f_{cm}(1,125 + 1,25\alpha\omega_{wd}) \quad \text{για } \alpha\omega_{wd} > 0,10 \quad \text{άρα}$$

$$f_{cm,c} = 43,442 \text{MPa} \quad \text{όπου:}$$

$$\alpha = 0,34481$$

$$\omega_{wd} = 0,6286$$

$$\alpha\omega_{wd} = 0,2168 > 0,10$$

$$\varepsilon_{c2,c} = 0,002(f_{cm,c}/f_{ck})^2 = 3,8975\text{‰}$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = 0,0035 + 0,1\alpha\omega_{wd} = 25,1781\text{‰}$$

Παραμορφώσεις χάλυβα οπλισμών (καθ' ύψος):

$$\varepsilon_{s1} = 100,2000\text{‰}, \quad \varepsilon_{s2} = 13,7166\text{‰}, \quad \varepsilon_{s3} = 0,6039\text{‰}, \quad \varepsilon_{s4} = 12,5088\text{‰},$$

$$\varepsilon_{s5} = 24,8020\text{‰}, \quad \varepsilon_{s6} = 37,0951\text{‰}, \quad \varepsilon_{s7} = 49,3883\text{‰}, \quad \varepsilon_{s8} = 61,6814\text{‰},$$

$$\varepsilon_{s9} = 73,9746\text{‰}, \quad \varepsilon_{s10} = 87,0873\text{‰},$$

Τάσεις χάλυβα (διγραμμικό διάγραμμα χάλυβα με αύξοντα κλάδο-κράτυνση)
 $\sigma_{s1} = 70,4760 \text{ kN/cm}^2$, $\sigma_{s2} = 61,5259 \text{ kN/cm}^2$, $\sigma_{s3} = 12,0780 \text{ kN/cm}^2$,
 $\sigma_{s4} = 61,4009 \text{ kN/cm}^2$, $\sigma_{s5} = 61,2075 \text{ kN/cm}^2$, $\sigma_{s6} = 62,5422 \text{ kN/cm}^2$,
 $\sigma_{s7} = 63,8770 \text{ kN/cm}^2$, $\sigma_{s8} = 65,2117 \text{ kN/cm}^2$, $\sigma_{s9} = 67,7619 \text{ kN/cm}^2$,
 $\sigma_{s10} = 69,1190 \text{ kN/cm}^2$

Δυνάμεις χάλυβα:

$$F_{s1} = \sigma_{s1} \cdot A_{s1} = 110,70 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = \sigma_{s2} \cdot A_{s2} = 96,64 \text{ kN}$$

$$F_{s3} = \sigma_{s3} \cdot A_{s3} = 18,97 \text{ kN}$$

$$F_{s4} = \sigma_{s4} \cdot A_{s4} = 96,45 \text{ kN}$$

$$F_{s5} = \sigma_{s5} \cdot A_{s5} = 61,53 \text{ kN}$$

$$F_{s6} = \sigma_{s6} \cdot A_{s6} = 62,87 \text{ kN}$$

$$F_{s7} = \sigma_{s7} \cdot A_{s7} = 64,22 \text{ kN}$$

$$F_{s8} = \sigma_{s8} \cdot A_{s8} = 65,56 \text{ kN}$$

$$F_{s9} = \sigma_{s9} \cdot A_{s9} = 106,44 \text{ kN}$$

$$F_{s10} = \sigma_{s10} \cdot A_{s10} = 108,57 \text{ kN}$$

Δύναμη σκυροδέματος:

$$F_c = b \cdot f_{cm,c} \cdot x [1 - \varepsilon_{c2,c} / (\varepsilon_{c2})] = 560,73 \text{ kN}$$

Επαλήθευση Εξισώσεως Ισοδυναμίας Αξονικών Δυνάμεων:

$$N_{\varepsilon\xi} = N_{\varepsilon\sigma} \Rightarrow F_c + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} - F_{s5} - F_{s6} - F_{s7} - F_{s8} - F_{s9} - F_{s10} \cong 0$$

Ροπή Αντοχής:

$$M_{Rd} = F_c \cdot (d - a') + F_{s2} \cdot (d - d_2) - F_{s3} \cdot (d - d_3) - F_{s4} \cdot (d - d_4)$$

$$- F_{s5} \cdot (d - d_5) - F_{s6} \cdot (d - d_6) - F_{s7} \cdot (d - d_7) - F_{s8} \cdot (d - d_8)$$

$$- F_{s9} \cdot (d - d_9) - F_{s10} \cdot (d - d_{10}) = 288,77 \text{ kNm}$$

Οπου:

$$a' = \zeta' \cdot x = 0,05360 \text{ με } \zeta' = 8 - \varepsilon_{c2} / [4 \cdot (6 - \varepsilon_{c2})] = 0,4821$$

$$\boxed{M_{Rd} = 288,77 \text{ kNm}}$$

$$\boxed{P_{Rd} = 192,51 \text{ kN}}$$

	T9	T10	T11	T12
$\epsilon_{c2}(\text{‰})$	3,5000	3,5000	3,5000	3,5000
$\epsilon_{s1}(\text{‰})$	17,23615	17,23615	17,23615	17,23615
$f_{cm}(\text{MPa})$	31,120	31,120	31,120	31,120
$f_y(\Phi 12)(\text{MPa})$	58,045	58,045	58,045	58,045
$f_u(\Phi 12)(\text{MPa})$	67,001	67,001	67,001	67,001
$E_{cm}(\text{MPa})$	30,927	30,927	30,927	30,927
$E_s(\text{MPa})$	200000	200000	200000	200000
$b(\text{m})$	0,125	0,125	0,125	0,125
$d(\text{m})$	0,721	0,721	0,721	0,721
$d_2(\text{m})$	0,029	0,029	0,029	0,029
$d_3(\text{m})$	0,202	0,202	0,202	0,202
$d_4(\text{m})$	0,375	0,375	0,375	0,375
$d_5(\text{m})$	0,548	0,548	0,548	0,548
$x(\text{m})$	0,1217	0,1217	0,1217	0,1217
ζ'	0,4160	0,4160	0,4160	0,4160
a'	0,0506	0,0506	0,0506	0,0506
$\epsilon_{s1}(\text{‰})$	17,2362	17,2362	17,2362	17,2362
$\epsilon_{s2}(\text{‰})$	2,6660	2,6660	2,6660	2,6660
$\epsilon_{s3}(\text{‰})$	2,3096	2,3096	2,3096	2,3096
$\epsilon_{s4}(\text{‰})$	7,2851	7,2851	7,2851	7,2851
$\epsilon_{s5}(\text{‰})$	12,2606	12,2606	12,2606	12,2606
$\sigma_{s1}(\text{kN/cm}^2)$	59,2782	59,2782	59,2782	59,2782
$\sigma_{s2}(\text{kN/cm}^2)$	53,3190	53,3190	53,3190	53,3190
$\sigma_{s3}(\text{kN/cm}^2)$	46,1915	46,1915	46,1915	46,1915
$\sigma_{s4}(\text{kN/cm}^2)$	58,4221	58,4221	58,4221	58,4221
$\sigma_{s5}(\text{kN/cm}^2)$	58,8501	58,8501	58,8501	58,8501
$F_{s1}(\text{kN})$	134,08	134,08	134,08	134,08
$F_{s2}(\text{kN})$	120,60	120,60	120,60	120,60
$F_{s3}(\text{kN})$	104,48	104,48	104,48	104,48
$F_{s4}(\text{kN})$	132,15	132,15	132,15	132,15
$F_{s5}(\text{kN})$	133,12	133,12	133,12	133,12
$F_c(\text{kN})$	383,23	383,23	383,23	383,23
$\Sigma F(\text{kN})$	0	0	0	0
$M_y(\text{kNm})$	217,39	217,39	217,39	217,39

Τοιχίο T₉

$$M_{Rd} = 217,39 \text{ KNm}$$

$$P_{Rd} = 144,92 \text{ KN}$$

Τοιχίο T₁₀

$$M_{Rd} = 217,39 \text{ KNm}$$

$$P_{Rd} = 144,92 \text{ KN}$$

Τοιχίο T₁₁

$$M_{Rd} = 217,39 \text{ KNm}$$

$$P_{Rd} = 144,92 \text{ KN}$$

Τοιχίο T₁₂

$$M_{Rd} = 217,39 \text{ KNm}$$

$$P_{Rd} = 144,92 \text{ KN}$$

B3) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑ EC2-EC8

Υπολογισμός $V_{Rd,c}$ (§ 2.2.4)

Τοιχίο T₇

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d$$

όπου:

$$f_{cm} = 31,12 \text{ MPa}$$

$$d = 0,7225 \text{ m}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{722,5}} = 1,526 \leq 2$$

$$A_{sl} = 1188 \text{ mm}^2$$

$$\rho_l = 0,013$$

$$b_w = 0,125 \text{ m}$$

$$l_w = 0,75 \text{ m}$$

$$\sigma_{cp} = 0$$

$$k_1 = 0,15$$

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} = \frac{0,18}{1} = 0,18$$

$$V_{Rd,c} = [0,18 \cdot 1,526 \cdot (100 \cdot 0,013 \cdot 31,12)^{1/3} + 0,15 \cdot 0] \cdot 125 \cdot 722,5$$

$$= 85,48 \text{ KN}$$

Η παραπάνω τιμή δεν πρέπει να είναι μικρότερη από την ελάχιστη που ορίζεται ως:

$$V_{Rd,min} = (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d = 0,368 \cdot 125 \cdot 722,5 = 33,24 \text{ KN}$$

$$\mu\epsilon \quad v_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_c^{1/2} = 0,035 \cdot 1,526^{3/2} \cdot 31,12^{1/2} = 0,368$$

επομένως $V_{Rd,c} = 85,48 \text{ KN}$.

Ομοίως για τα υπόλοιπα τοιχία προκύπτουν:

	T8	T9	T10	T11	T12
f_{cm}(MPa)	31,12	31,12	31,12	31,12	31,12
d(m)	0,7225	0,721	0,721	0,721	0,721
k	1,526	1,527	1,527	1,527	1,527
A_{sl}(cm²)	11,8752	9,0480	9,0480	9,0480	9,0480
ρ_l	0,01315	0,01004	0,01004	0,01004	0,01004
b_w(m)	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125
l_w(m)	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
σ_{cp}	0	0	0	0	0
k₁	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
C_{Rd,c}	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
v_{min}	0,368	0,368	0,368	0,368	0,368
V_{Rd,c}(kN)	85,48	77,99	77,99	77,99	77,99

Τοιχίο T₈

$$V_{Rd,c} = 85,48 \text{ KN}$$

Τοιχίο T₉

$$V_{Rd,c} = 78,00 \text{ KN}$$

Τοιχίο T₁₀

$$V_{Rd,c} = 78,00 \text{ KN}$$

Τοιχίο T₁₁

$$\boxed{V_{Rd,c} = 78,00 \text{ KN}}$$

Τοιχίο T₁₂

$$\boxed{V_{Rd,c} = 78,00 \text{ KN}}$$

Υπολογισμός τέμνουσας αντοχής σχεδιασμού λόγω θλίψης κορμού $V_{Rd,max}$ (§ 2.2.4)

Τοιχίο T₇

α) Για $\theta = 21,8^\circ$: $\cot \theta = 2,5$

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

$$z = 0,8l_w = 0,8 \cdot 0,75 = 0,6 \text{ m}$$

όμως λαμβάνουμε $z = 0,428\text{m}$ καθώς έχει προηγηθεί ακριβέστερος υπολογισμός.

$$v_1 = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) = 0,6 \left(1 - \frac{31,12}{250}\right) = 0,5253$$

$$\sigma_{cp} = 0 \rightarrow \alpha_{cw} = 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} = 1$$

$$b_w = 0,125 \text{ m}$$

επομένως προκύπτει

$$V_{Rd,max} = 1 \cdot 0,125 \cdot 0,428 \cdot 0,5253 \cdot \frac{31120}{(2,5 + 0,4)} = 301,39 \text{ KN}$$

$$\boxed{V_{Rd,max} = 301,39 \text{ KN}}$$

β) Για $\theta = 45^\circ$: $\cot \theta = 1$

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

$$z = 0,8l_w = 0,8 \cdot 0,75 = 0,6 \text{ m}$$

όμως λαμβάνουμε $z = 0,428\text{m}$ καθώς έχει προηγηθεί ακριβέστερος υπολογισμός.

$$v_1 = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) = 0,6 \left(1 - \frac{31,12}{250}\right) = 0,5253$$

$$\sigma_{cp} = 0 \rightarrow \alpha_{cw} = 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} = 1$$

$$b_w = 0,125 \text{ m}$$

επομένως προκύπτει:

$$V_{Rd,max} = 1 \cdot 0,125 \cdot 0,428 \cdot 0,5253 \cdot \frac{31120}{(1 + 1)} = 437,04 \text{ KN}$$

$$\boxed{V_{Rd,max} = 437,04 \text{ KN}}$$

$$0,4 \cdot V_{Rd,max} = 174,816 \text{ KN (απομείωση εντός κρίσιμης περιοχής)}$$

Ομοίως για τα υπόλοιπα τοιχία προκύπτουν:

Τοιχίο T₈

α) Για $\theta = 21,8^\circ$: $\boxed{V_{Rd,max} = 300,83 \text{ KN}}$

β) Για $\theta = 45^\circ$: $\boxed{V_{Rd,max} = 436,23 \text{ KN}}$

Τοιχίο T₉

α) Για $\theta = 21,8^\circ$: $\boxed{V_{Rd,max} = 304,01 \text{ KN}}$

β) Για $\theta = 45^\circ$: $\boxed{V_{Rd,max} = 440,84 \text{ KN}}$

Τοιχίο T₁₀

α) Για $\theta = 21,8^\circ$: $\boxed{V_{Rd,max} = 304,01 \text{ KN}}$

β) Για $\theta = 45^\circ$: $\boxed{V_{Rd,max} = 440,84 \text{ KN}}$

Τοιχίο T₁₁

α) Για $\theta = 21,8^\circ$: $\boxed{V_{Rd,max} = 304,01 \text{ KN}}$

β) Για $\theta = 45^\circ$: $\boxed{V_{Rd,max} = 440,84 \text{ KN}}$

Τοιχίο T₁₂

α) Για $\theta = 21,8^\circ$: $\boxed{V_{Rd,max} = 304,01 \text{ KN}}$

β) Για $\theta = 45^\circ$: $\boxed{V_{Rd,max} = 440,84 \text{ KN}}$

Υπολογισμός αντοχής σε τέμνουσα $V_{Rd,s}$ (§ 2.2.4)

Τοιχίο T₇

α) Για $\theta = 21,8^\circ$: $\cot \theta = 2,5$

$$V_{Rd,s} = (A_{sw}/s) z f_{ywd} \cot \theta = 8,3776 \cdot 10^{-4} \cdot 0,428 \cdot 588,34 \cdot 10^3 \cdot 2,5$$

$$= 527,12 \text{ KN}$$

$V_{Rd,s} = 527,12 \text{ KN}$

β) Για $\theta = 45^\circ$: $\cot \theta = 1$

$$V_{Rd,s} = (A_{sw}/s) z f_{ywd} \cot \theta = 8,3776 \cdot 10^{-4} \cdot 0,428 \cdot 588,34 \cdot 10^3 \cdot 1$$

$$= 210,83 \text{ KN}$$

$V_{Rd,s} = 210,83 \text{ KN}$

Ομοίως για τα υπόλοιπα τοιχία προκύπτουν:

	T8	T9	T10	T11	T12
A_{sw}/s (cm^2/m)	8,3776	2,5133	2,5133	1,4137	1,4137
z(m)	0,42695	0,43147	0,43147	0,43147	0,43147
f_{ywd} (kN/cm^2)	58,834	58,834	58,834	56,744	56,744
$V_{Rd,s}(\text{kN})$ ($\theta=21,8^\circ$)	526,14	159,51	159,51	86,54	86,54
$V_{Rd,s}(\text{kN})$ ($\theta=45^\circ$)	210,44	63,80	63,80	34,61	34,61

Τοιχίο T₈

α) Για $\theta = 21,8^\circ$: $V_{Rd,s} = 526,14 \text{ KN}$

β) Για $\theta = 45^\circ$: $V_{Rd,s} = 210,44 \text{ KN}$

Τοιχίο T₉

α) Για $\theta = 21,8^\circ$: $V_{Rd,s} = 159,51 \text{ KN}$

β) Για $\theta = 45^\circ$: $V_{Rd,s} = 63,80 \text{ KN}$

Τοιγίο T₁₀

α) Για $\theta = 21,8^\circ$: $V_{Rd,s} = 159,51 \text{ KN}$

β) Για $\theta = 45^\circ$: $V_{Rd,s} = 63,80 \text{ KN}$

Τοιγίο T₁₁

α) Για $\theta = 21,8^\circ$: $V_{Rd,s} = 86,54 \text{ KN}$

β) Για $\theta = 45^\circ$: $V_{Rd,s} = 34,61 \text{ KN}$

Τοιγίο T₁₂

α) Για $\theta = 21,8^\circ$: $V_{Rd,s} = 86,54 \text{ KN}$

β) Για $\theta = 45^\circ$: $V_{Rd,s} = 34,61 \text{ KN}$

Έλεγχος σε διατμητική ολίσθηση (EC8 §5.5.3.4.4)

Τοιγίο T₇

$$V_{Rd,s} = V_{dd} + V_{id} + V_{fd}$$

$V_{id} = 0$ (δεν υπάρχει δισδιαγώνιος οπλισμός)

$$\Sigma A_{sj1} = 8\Phi 8 = 8 \cdot 3,14 \cdot \frac{0,8^2}{4} = 4,02 \text{ cm}^2$$

$$\Sigma A_{sj2} = 12\Phi 10 = 12 \cdot 3,14 \cdot \frac{1,0^2}{4} = 9,42 \text{ cm}^2$$

$$V_{dd} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,3 \cdot \Sigma A_{sj} \cdot \sqrt{f_{cd} \cdot f_{yd}} \\ 0,25 \cdot f_{yd} \cdot \Sigma A_{sj} \end{array} \right\} =$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} 1,3 \cdot 4,02 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{31,12 \cdot 680,91 \cdot 10^6} + 1,3 \cdot 9,42 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{31,12 \cdot 704,76 \cdot 10^6} \\ 0,25 \cdot 680,91 \cdot 10^3 \cdot 4,02 \cdot 10^{-4} + 0,25 \cdot 704,76 \cdot 10^3 \cdot 9,42 \cdot 10^{-4} \end{array} \right\}$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} 76,074 + 181,357 \\ 68,431 + 165,97 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 257,431 \\ 234,401 \end{array} \right\} = 234,401 \text{ KN}$$

$$V_{fd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \mu_f \cdot (\Sigma A_{sj} \cdot f_{yd} + N_{Ed}) \cdot \xi + M_{Ed}/z \\ 0,5 \cdot n \cdot f_{cd} \cdot \xi \cdot l_w \cdot b_{wo} \end{array} \right\} =$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} 0,7 \cdot (4,02 \cdot 10^{-4} \cdot 680,91 \cdot 10^3 + 9,42 \cdot 10^{-4} \cdot 704,76 \cdot 10^3) \cdot 0,1469 + 289,336/0,428 \\ 0,5 \cdot 0,5253 \cdot 31,12 \cdot 10^3 \cdot 0,1469 \cdot 0,75 \cdot 0,125 \end{array} \right\}$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} 772,433 \\ 112,567 \end{array} \right\} = 112,567 \text{ KN}$$

Όπου το n υπολογίσθηκε ως :

$$n = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{31,12}{250} \right) = 0,5253$$

και το ξ ως:

$$\xi = \frac{x}{l_w} = \frac{0,11021}{0,75} = 0,1469$$

$$\text{άρα } V_{Rd,s} = 234,401 + 112,567 = 346,97 \text{ KN}$$

$$\boxed{V_{Rd,s} = 346,97 \text{ KN}}$$

Ομοίως για τα υπόλοιπα τοιχία προκύπτουν:

Τοιχίο T₈

$$\boxed{V_{Rd,s} = 346,97 \text{ KN}}$$

Τοιχίο T₉

$$\boxed{V_{Rd,s} = 271,26 \text{ KN}}$$

Τοιχίο T₁₀

$$\boxed{V_{Rd,s} = 271,26 \text{ KN}}$$

Τοιχίο T₁₁

$$\boxed{V_{Rd,s} = 271,26 \text{ KN}}$$

Τοιχίο T₁₂

$$\boxed{V_{Rd,s} = 271,26 \text{ KN}}$$

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑ ΚΑΝ.ΕΠΕ

Υπολογισμός διατμητικής αντοχής V_R (§2.3.8)

Τοιχίο T₇

$$\begin{aligned} V_R &= [(h - x)/(2L_s)] \min(N; 0,55A_c f_c) + \\ & [1 - 0,05 \min(5, \mu_{\theta}^{pl})] [0,16 \max(0,5; 100\rho_{tot}) (1 - 0,16 \min(5; \alpha_s)) \sqrt{f_c} A_c + \\ & V_w] = \\ & = \{[(0,75 - 0,11021)/(2 \cdot 1,5)] \min(0; 0,55 \cdot 0,0903125 \cdot 31,12) + \\ & [1 - 0,05 \min(5; 4,09)] [0,16 \max(0,5; 100 \cdot 0,0149) (1 - 0,16 \min(5; 2)) \sqrt{31,12} \\ & \cdot 0,0903125 + 0,1479]\} \cdot 1000 = 182,54 \text{ KN} \end{aligned}$$

$$\boxed{V_R = 182,54 \text{ KN}}$$

με:

$$\begin{aligned} V_w &= \rho_w \cdot b_w \cdot z \cdot f_{yw} = 0,00335 \cdot 0,125 \cdot 0,8 \cdot 0,75 \cdot 588,34 = 0,1479 \text{ MN} \\ &= 147,9 \text{ KN} \end{aligned}$$

όπου:

$$\rho_w = 3,14 \cdot \frac{\Phi^2}{(b \cdot s)} = 3,14 \cdot \frac{0,8^2}{(12,5 \cdot 12)} = 0,00335$$

$$z = 0,8 \cdot h = 0,8 \cdot 0,75 = 0,6 \text{ m}$$

$$f_{yw} = 588,34 \text{ KPa}$$

$$b_w = 0,125 \text{ m}$$

$$h = 0,75 \text{ m}$$

$$x = 0,11021 \text{ m (ύψος θλιβόμενης ζώνης)}$$

$$L_s = 1,5 \text{ m}$$

$$N = 0$$

$$A_c = b \cdot d = 0,125 \cdot 0,7225 = 0,0903125 \text{ m}^2$$

$$f_c = 31,12 \text{ MPa}$$

$$\mu_{\theta}^{pl} = 4,09$$

$$\rho_{tot} = 0,0149$$

$$\alpha_s = 2$$

Ομοίως για τα υπόλοιπα τοιχία προκύπτουν:

	T8	T9	T10	T11	T12
ρ_w	0,003351	0,001005	0,001005	0,000565	0,000565
$z(m)$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
f_{ywd} (kN/cm ²)	588,34	588,34	588,34	567,44	567,44
$b_w(m)$	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125
$h(m)$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
$L_s(m)$	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
$N(kN)$	0	0	0	0	0
$A_c(m^2)$	0,09031	0,09013	0,09013	0,09013	0,09013
$f_c(MPa)$	31,12	31,12	31,12	31,12	31,12
$\mu_{0,pl}$	3,641	1,754	1,754	1,754	1,754
ρ_{tot}	0,014888	0,012549	0,012549	0,012549	0,012549
α_s	2	2	2	2	2
$V_R(kN)$	187,70	103,09	103,09	84,58	84,58

Τοιχίο T₈

$$V_R = 185,19 \text{ KN}$$

Τοιχίο T₉

$$V_R = 102,90 \text{ KN}$$

Τοιχίο T₁₀

$$V_R = 102,90 \text{ KN}$$

Τοιχίο T₁₁

$$V_R = 84,42 \text{ KN}$$

Τοιχίο T₁₂

$$V_R = 84,42 \text{ KN}$$

Υπολογισμός διατμητικής αντοχής για αστοχία του κορμού σε λοξή θλίψη $V_{R,max}$ (§2.3.8)

Τοιχίο T₇

$$\begin{aligned}
 V_{R,max} &= 0,85[1 - 0,06 \min(5; \mu_0^{pl})] \left[1 + 1,8 \min\left(0,15; \frac{N}{A_c f_c}\right) \right] \\
 &\quad \cdot [1 + 0,25 \max(1,75; 100\rho_{tot})][1 - 0,2 \min(2; a_s)] \sqrt{f_c} b_w z = \\
 &= 0,85[1 - 0,06 \min(5; 4,09)] \left[1 + 1,8 \min\left(0,15; \frac{0}{0,0903125 \cdot}\right) \right] \\
 &\quad \cdot [1 + 0,25 \max(1,75; 100 \cdot 0,0149)][1 - 0,2 \min(2; 2)] \cdot \sqrt{31,12} \\
 &\quad \cdot 0,125 \cdot 0,6 \cdot 1000 = 231,44 \text{ KN}
 \end{aligned}$$

$$\boxed{V_{R,max} = 231,44 \text{ KN}}$$

Ομοίως για τα υπόλοιπα τοιχία προκύπτουν:

Τοιχίο T₈

$$\boxed{V_{R,max} = 235,70 \text{ KN}}$$

Τοιχίο T₉

$$\boxed{V_{R,max} = 273,81 \text{ KN}}$$

Τοιχίο T₁₀

$$\boxed{V_{R,max} = 273,81 \text{ KN}}$$

Τοιχίο T₁₁

$$\boxed{V_{R,max} = 273,81 \text{ KN}}$$

Τοιχίο T₁₂

$$\boxed{V_{R,max} = 273,81 \text{ KN}}$$

Υπολογισμός ενεργού δυσκαμψίας K_{eff}

$$K_{\text{eff}} = 3EI_{\text{eff}}/L_s^3 = M_y/(\theta_y \cdot L_s^2)$$

όπου:

$$EI_{\text{eff}} = M_y \cdot L_s/(3\theta_y)$$

Τοιχίο T₇

$$K_{\text{eff}} = M_y/(\theta_y \cdot L_s^2) = 184,50/(0,00555 \cdot 1,50^2) = 14766,76 \text{ kN/m}$$

Τοιχίο T₈

$$K_{\text{eff}} = M_y/(\theta_y \cdot L_s^2) = 184,40/(0,00540 \cdot 1,50^2) = 14732,207 \text{ kN/m}$$

Τοιχίο T₉- T₁₀- T₁₁- T₁₂

$$K_{\text{eff}} = M_y/(\theta_y \cdot L_s^2) = 165,15/(0,00561 \cdot 1,50^2) = 12928,48 \text{ kN/m}$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Αναλυτικός υπολογισμός καμπυλοτήτων και γωνιών στροφής χορδής στη διαρροή και στην αστοχία

Γ1) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ **ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑ ΚΑΝ.ΕΠΕ**

Η μεθοδολογία προσδιορισμού της καμπυλότητας στη διαρροή σύμφωνα με τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα Β στο υποπαράρτημα Β1. Εδώ παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές των καμπυλοτήτων στη διαρροή και τα επιμέρους μεγέθη κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Τοιχίο T₇

$$(1/r)_y = 0,005398 \text{ m}^{-1}$$

$$b = 0,125\text{m}$$

$$d = 0,7225\text{m}$$

$$E_c = 34,411 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$\delta' = 0,0381$$

$$\rho = 0,001739$$

$$\rho' = 0,001739$$

$$\rho_v = 0,01141$$

$$\xi_y = 0,22542$$

$$\alpha = 5,812$$

$$A = 0,0149$$

$$B = 0,0077275$$

Τοιχίο T₈

$$(1/r)_y = 0,0054 \text{ m}^{-1}$$

$$f_y = 60,419\text{MPa}$$

$$b = 0,125\text{m}$$

$$d = 0,7225\text{m}$$

$$E_c = 34,182 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$\delta' = 0,0381$$

$$\rho = 0,001739$$

$$\rho' = 0,001739$$

$$\rho_v = 0,01141$$

$$\xi_y = 0,2259$$

$$\alpha = 5,851$$

$$A = 0,0149$$

$$B = 0,007728$$

Γογία T_9 - T_{10} - T_{11} - T_{12}

$$(1/r)_y = 0,00516 \text{ m}^{-1}$$

$$f_y = 58,045\text{MPa}$$

$$b = 0,125\text{m}$$

$$d = 0,721\text{m}$$

$$E_c = 30,927\text{MPa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$\delta' = 0,0402$$

$$\rho = 0,00251$$

$$\rho' = 0,00251$$

$$\rho_v = 0,00753$$

$$\xi_y = 0,2205$$

$$\alpha = 6,4669$$

$$A = 0,01255$$

$$B = 0,006527$$

ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ

Τοιχίο T₇

$$(1/r)_y = \varepsilon_{c2}/x = 1,1312 \cdot 10^{-3}/0,1968 = 0,005747 \text{ m}^{-1}$$

$$\boxed{(1/r)_y = 0,005747 \text{ m}^{-1}}$$

Τοιχίο T₈

$$(1/r)_y = \varepsilon_{c2}/x = 1,1220 \cdot 10^{-3}/0,1957 = 0,005734 \text{ m}^{-1}$$

$$\boxed{(1/r)_y = 0,005734 \text{ m}^{-1}}$$

Τοιχία T₉- T₁₀- T₁₁- T₁₂

$$(1/r)_y = \varepsilon_{c2}/x = 0,8816 \cdot 10^{-3}/0,1680 = 0,005248 \text{ m}^{-1}$$

$$\boxed{(1/r)_y = 0,005248 \text{ m}^{-1}}$$

Γ2) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ

ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ

Τοιχίο T₇

$$(1/r)_u = \varepsilon_{c2}/x = 18,0357 \cdot 10^{-3}/0,1102 = 0,16391 \text{ m}^{-1}$$

$$\boxed{(1/r)_u = 0,16391 \text{ m}^{-1}}$$

Τοιχίο T₈

$$(1/r)_u = \varepsilon_{c2}/x = 18,2241 \cdot 10^{-3}/0,1112 = 0,16391 \text{ m}^{-1}$$

$$\boxed{(1/r)_u = 0,16391 \text{ m}^{-1}}$$

Τοιχία T₉- T₁₀- T₁₁- T₁₂

$$(1/r)_u = \varepsilon_{c2}/x = 3,5 \cdot 10^{-3}/0,1217 = 0,02876 \text{ m}^{-1}$$

$$\boxed{(1/r)_u = 0,02876 \text{ m}^{-1}}$$

Γ3) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΗΣ ΧΟΡΔΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΡΡΟΗ

Ο υπολογισμός της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή, θ_y , πραγματοποιείται με δύο μεθοδολογίες. Στην πρώτη μεθοδολογία, κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ, λαμβάνεται καμπυλότητα διαρροής:

$$(1/r)_y = \frac{f_y}{E_s(1 - \xi_y)d}$$

Στη δεύτερη μεθοδολογία, αναλυτικά, λαμβάνεται καμπυλότητα διαρροής:

$$(1/r)_y = \varepsilon_{c2}/x$$

όπου:

ε_{c2} , η παραμόρφωση της ακραίας ίνας σκυροδέματος κατά τη διαρροή
 x , το ύψος της θλιβόμενης ζώνης κατά τη διαρροή

Και στις δύο μεθοδολογίες λαμβάνεται γωνία στροφής κατά τη διαρροή, θ_y , σύμφωνα με τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ:

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

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑ ΚΑΝ.ΕΠΕ

Τοιχίο T7

$$(1/r)_y = 0,005398 \text{ m}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \theta_y &= \left(\frac{1}{r}\right)_y (L_s + a_v z)/3 + 0,0013 + \left(\frac{1}{r}\right)_y d_b f_y / (8\sqrt{f_c}) = \\ &= 0,005398 (1,50 + 1 \cdot 0,5237)/3 + 0,0013 + 0,005398 \cdot \\ &0,01 \cdot 604,19 / (8\sqrt{44,421}) = 0,005553 \end{aligned}$$

όπου:

$L_s = 1,50\text{m}$ το μήκος διάτμησης

$a_v = 1$, καθώς $V_{rd,c} < P_y$

$$z = \frac{M_y}{\Sigma F_{\theta\lambda\mu\tau}} = \frac{169,525}{275,34 + 30,57 + 16,13 + 1,686} = 0,5237$$

$d_b = 0,01$ η διάμετρος του εφελκυόμενου χάλυβα

$f_y = 604,19\text{MPa}$ η τάση του διαμήκους σπλισμού

$f_c = 44,421\text{MPa}$ η θλιπτική τάση σκυροδέματος

$$\theta_y = 0,005553$$

$$\delta_y = 0,008329$$

Ομοίως για τα υπόλοιπα τοιχία:

Τοιχίο T₈

$$(1/r)_y = 0,005402 \text{ m}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \theta_y &= \left(\frac{1}{r}\right)_y (L_s + a_v z)/3 + 0,0013 + \left(\frac{1}{r}\right)_y d_b f_y / (8\sqrt{f_c}) = \\ &= 0,005402 (1,50 + 1 \cdot 0,52385)/3 + 0,0013 + 0,005402 \cdot \\ &0,01 \cdot 604,19 / (8\sqrt{43,442}) = 0,005563 \end{aligned}$$

$$\theta_y = 0,005563$$

$$\delta_y = 0,008345$$

Τοιχία T₉- T₁₀- T₁₁- T₁₂

$$(1/r)_y = 0,005164 \text{ m}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \theta_y &= \left(\frac{1}{r}\right)_y (L_s + a_v z)/3 + 0,0013 + \left(\frac{1}{r}\right)_y d_b f_y / (8\sqrt{f_c}) = \\ &= 0,005164 (1,50 + 1 \cdot 0,5340)/3 + 0,0013 + 0,005164 \cdot \\ &0,01 \cdot 580,45 / (8\sqrt{31,12}) = 0,005607 \end{aligned}$$

$$\theta_y = 0,005607$$

$$\delta_y = 0,008411$$

ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ

Τοιχίο T₇

$$\theta_y = 0,005607$$

$$\delta_y = 0,008411$$

Τοιχίο T₈

$$\theta_y = 0,005825$$

$$\delta_y = 0,008738$$

Τοιχία T₉- T₁₀- T₁₁- T₁₂

$$\theta_y = 0,005677$$

$$\delta_y = 0,008516$$

Γ4) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΗΣ ΧΟΡΔΗΣ ΣΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ

Γίνεται αναλυτική αναφορά στις δύο μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται στο Κεφάλαιο 4.5 της παρούσης διπλωματικής.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑ ΚΑΝ.ΕΠΕ

Τοιχίο T₇

$$\theta_u = 0,58 \cdot 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} (\alpha_s)^{0,35} 25^{\left(\alpha_{ps} \frac{f_{yw}}{f_c}\right)} (1,25^{100\rho_d}) =$$

$$0,58 \cdot 0,016 \cdot (0,3^0) \left[\frac{\max(0,01; 0,02366)}{\max(0,01; 0,17884)} 44,421 \right]^{0,225} (2)^{0,35} \cdot$$

$$25^{\left(0,34481 \cdot 0,03217 \cdot \frac{588,34}{44,421}\right)} (1,25^{100 \cdot 0}) = 0,028270$$

όπου:

$v = 0$ δεν υπάρχει επίδραση αξονικής δύναμης

$$\omega' = A_{s2} f_y / (b d f_{cm}) = 1,5708 \cdot 10^{-4} \cdot 604,19 / (0,125 \cdot 0,7225 \cdot 44,421) =$$

$$= 0,02366$$

$$\omega = (A_{s1} + A_{s3} + A_{s4} + A_{s5} + A_{s6} + A_{s7} + A_{s8} + A_{s9} + A_{s10}) f_y / (b d f_{cm}) =$$

$$(5 \cdot 1,5708 \cdot 10^{-4} + 4 \cdot 1,0053 \cdot 10^{-4}) 604,19 / ((0,125 \cdot 0,7225 \cdot 44,421)) =$$

$$= 0,17884$$

$$\alpha_s = h / l_w = 1,5 / 0,75 = 2,0$$

$\alpha = 0,34481$ ο συντελεστής απόδοσης περίσφιξης βλ. Παράρτημα Β1 (υπολογισμός ροπής διαρροής κατά EC2)

$$\rho_s = 2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 8^2 / 400 / (12,5 \cdot 5) = 0,03217 \quad \text{το οριζόντιο ποσοστό οπλισμού}$$

περφίσφιξης

$$f_{yw} = 588,34 \text{ MPa}$$

$$f_c = 44,421 \text{ MPa}$$

$\rho_d = 0$ δεν χρησιμοποιείται δισδιαγώνιος οπλισμός

$$\theta_u = 0,028270$$

$$\delta_u = 0,042405$$

Τοιχίο T₈

$$\theta_u = 0,58 \cdot 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} (\alpha_s)^{0,35} 25 \left(\alpha_{ps} \frac{f_{yw}}{f_c} \right) (1,25^{100\rho_d}) =$$

$$0,58 \cdot 0,016 \cdot (0,3^0) \left[\frac{\max(0,01; 0,02419)}{\max(0,01; 0,18287)} 44,421 \right]^{0,225} (2)^{0,35} \cdot$$

$$25^{(0,34481 \cdot 0,03217 \cdot \frac{527,170}{43,442})} (1,25^{100 \cdot 0}) = 0,027036$$

$$\theta_u = 0,027036$$

$$\delta_u = 0,040554$$

Τοιχία T₉- T₁₀

Βλ. Διάγραμμα 4.3 (§4.5)

$$\theta_u = 0,008667$$

$$\delta_u = 0,013000$$

Τοιχία T₁₁- T₁₂

Βλ. Διάγραμμα 4.4 (§4.5)

$$\theta_u = 0,007850$$

$$\delta_u = 0,011775$$

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑ EC8 (Part 3)

Τοιχία T₇-T₈

Ομοίως με μεθοδολογία κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ μόνο που συντελεστής πολλαπλασιασμού είναι πλέον ο 0,625 δηλαδή:

Τοιχίο T₇

$$\theta_u = (\theta_{u(\text{ΚΑΝ.ΕΠΕ})} / 0,58) \cdot 0,625 = 0,030464$$

$$\theta_u = 0,030464$$

$$\delta_u = 0,045696$$

Τοιχίο T₈

$$\theta_u = (\theta_{u(KAN.EΠE)}/0,58) \cdot 0,625 = 0,02913$$

$$\theta_u = 0,029130$$

$$\delta_u = 0,043701$$

Τοιχία T₉- T₁₀-T₁₁- T₁₂

$$\theta_u = 1/1,6 \cdot 0,85 \cdot 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} (\alpha_s)^{0,35} 25 \left(\alpha_{ps} \frac{f_{yw}}{f_c} \right) \cdot (1,25^{100\rho_d}) =$$

$$1/1,6 \cdot 0,85 \cdot 0,016 \cdot (0,3^0) \left[\frac{\max(0,01; 0,04681)}{\max(0,01; 0,18725)} 31,120 \right]^{0,225} (2)^{0,35} \cdot$$

$$25^{(0)}(1,25^{100 \cdot 0}) = 0,017189$$

$$\theta_u = 0,017189$$

$$\delta_u = 0,025783$$

Γ5) ΜΕΘΟΔΟΣ ΦΩΤΟΜΕΤΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Συντεταγμένες σημείων τοιχίου T11 στο Autocad και απόσταση μεταξύ τους d:

Απαραμόρφωτη φωτογραφία (έναρξη πειράματος)

ΑΠΑΡΑΜΟΡΦΩΤΗ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ (IMAGE 2865)						
Autocad				Απόσταση σημείων (d)		
Σημεία	τετμημένες(x)	τεταγμένες(y)		Autocad(μονάδες)		
				(A3A'3)	1,5116	
A1	2,4021	11,8825		(A5A'5)	0,7259	
A2	7,2723	11,8224		(A7A'7)	0,1358	
A3	2,3535	3,678		(A4A'4)	1,5506	
A4	7,2704	3,6866		(A6A'6)	0,7828	
A5	2,3474	2,8966		(A8A'8)	0,1749	
A6	7,2557	2,9202		(A3A5)	0,781423809	
A7	2,3733	2,3004		(A5A7)	0,596762306	
A8	7,2661	2,3135		(A3A7)	1,377742284	
A'3	2,3535	2,1664		(A4A6)	0,766540964	
A'5	2,3474	2,1707		(A6A8)	0,606789131	
A'7	2,3733	2,1646		(A4A8)	1,373106733	
A'4	7,2704	2,136		(A1A4)	9,532739465	
A'6	7,2557	2,1374		(A3A2)	9,514507071	
A'8	7,2661	2,1386		(A3A8)	5,098578136	
				(A4A7)	5,089512634	

Παραμορφωμένη φωτογραφία (1^{ος} κύκλος +10(1))

10(1) IMAGE 2866					
Autocad					Απόσταση σημείων (d)
Σημεία	τετμημένες(x)	τεταγμένες(y)			Autocad(μονάδες)
				(A3A'3)	1,515
A1	2,4746	11,9198		(A5A'5)	0,7269
A2	7,351	11,8127		(A7A'7)	0,1251
A3	2,3576	3,6871		(A4A'4)	1,5467
A4	7,2848	3,6761		(A6A'6)	0,7805
A5	2,3467	2,9026		(A8A'8)	0,1759
A6	7,2611	2,9113		(A3A5)	0,78457572
A7	2,3699	2,3021		(A5A7)	0,600947993
A8	7,2686	2,3035		(A3A7)	1,385054616
A'3	2,3576	2,1721		(A4A6)	0,765167126
A'5	2,3467	2,1757		(A6A8)	0,607846272
A'7	2,3699	2,177		(A4A8)	1,372695596
A'4	7,2848	2,1294		(A1A4)	9,544454606
A'6	7,2611	2,1308		(A3A2)	9,53726475
A'8	7,2686	2,1276		(A3A8)	5,102182862
				(A4A7)	5,103343807

Παραμορφωμένη φωτογραφία (1^{ος} κύκλος +30(1))

30(1) IMAGE 2888					
Autocad					Απόσταση σημείων (d)
Σημεία	τετμημένες(x)	τεταγμένες(y)			Autocad(μονάδες)
				(A3A'3)	1,5403
A1	2,5785	12,0089		(A5A'5)	0,7425
A2				(A7A'7)	0,132
A3	2,3464	3,7189		(A4A'4)	1,4444
A4	7,3056	3,6672		(A6A'6)	0,6768
A5	2,3277	2,9211		(A8A'8)	0,0704
A6	7,2693	2,9014		(A3A5)	0,798019129
A7	2,3465	2,3106		(A5A7)	0,610789399
A8	7,2664	2,295		(A3A7)	1,408300004
A'3	2,3464	2,1786		(A4A6)	0,766659853
A'5	2,3277	2,1786		(A6A8)	0,606406934
A'7	2,3465	2,1786		(A4A8)	1,372759804
A'4	7,3056	2,2228		(A1A4)	9,587983797
A'6	7,2693	2,2246		(A3A2)	4,397250296
A'8	7,2664	2,2246		(A3A8)	5,121903085
				(A4A7)	5,141306874

Τα σημεία A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8 απεικονίζονται στην Εικόνα Γ.1. Τα σημεία A'3, A'4, A'5, A'6, A'7, A'8 είναι οι προβολές των αντίστοιχων μη τονούμενων σημείων στη βάση του τοιχίου

Τα βελόμετρα τα οποία υπολογίζουν ανοιγμένες παραμορφώσεις είναι τα: 9, 10, 11, 12, 13, 14 δηλαδή τα 4 χιαστί στην όψη όπισθεν του τοιχίου και τα δύο στην μπροστά όψη στην άνω διατομή της πλαστικής ζώνης.

Υπολογίζεται λοιπόν η διαφορά των αποστάσεων d_{l1} , d_{l2} των παραμορφωμένων καταστάσεων +10(1) και +30(1) αντίστοιχα, με την απαραμόρφωτη αρχική κατάσταση. Για τον υπολογισμό της ανηγμένης παραμόρφωσης των σημείων της άνω διατομής της πλαστικής ζώνης χρειαζόμαστε τα σημεία 3 και 3' όσον αφορά το βελόμετρο 10 και 4 και 4' όσον αφορά το βελόμετρο 11. Για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων των χιαστί βελομέτρων 9, 12, 13, 14 χρειαζόμαστε τα σημεία 1 και 4, 4 και 7, 3 και 8, 3 και 2 αντίστοιχα. Τα σημεία αυτά είναι ουσιαστικά οι στόχοι που έχουμε τοποθετήσει στα σημεία ενδιαφέροντος επάνω στο τοιχίο T11 (βλ. Εικόνα Γ.1)



Εικόνα Γ.1
Απεικόνιση θέσεως στόχων στο τοιχίο T11

Μεταβολή μήκους και αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση:

-Απαραμόρφωτη κατάσταση έως παραμορφωμένη (+10(1)):

dl1	ε1	
0,0034	0,002249272	βελόμετρο 10
0,001	0,0013776	
-0,0107	-0,078792342	
-0,0039	-0,002515155	βελόμετρο 11
-0,0023	-0,002938171	
0,001	0,005717553	
0,00315191	0,004033548	
0,004185687	0,007013993	
0,007312333	0,005307475	
-0,001373839	-0,001792258	
0,00105714	0,001742187	
-0,000411137	-0,000299421	
0,011715142	0,001228938	βελόμετρο 9
0,02275768	0,002391893	βελόμετρο 14
0,003604726	0,000707006	βελόμετρο 13
0,013831173	0,002717583	βελόμετρο 12

-Απαραμόρφωτη κατάσταση έως παραμορφωμένη (+30(1)):

dl2	ε2	
0,0287	0,018986504	βελόμετρο 10
0,0166	0,022868164	
-0,0038	-0,027982327	
-0,1062	-0,068489617	βελόμετρο 11
-0,106	-0,135411344	
-0,1045	-0,597484277	
0,016595319	0,021237284	
0,014027093	0,023505327	
0,03055772	0,022179562	
0,000118889	0,000155097	
-0,000382197	-0,000629868	
-0,000346929	-0,00025266	
0,055244333	0,005795221	βελόμετρο 9
-5,117256774	-0,537837298	βελόμετρο 14
0,023324949	0,004574795	βελόμετρο 13
0,05179424	0,01017666	βελόμετρο 12

Υπολογισμός ανηγμένων παραμορφώσεων μέσω βελομέτρων:

	τα βελόμετρα 10 και 11 απέχουν από τη βάση 30 cm		(A1A4)
	βελόμετρο 10	βελόμετρο 11	βελόμετρο 9
	(mm)		
0	0,0946	0,0997	0,099
10(1)	0,8453	-0,0107	0,0896
30(1)	4,1417	-0,3377	-0,4743
$\epsilon=dl/l_0$			
ϵ_1	0,002502333	-0,000368	-7,35701E-06
ϵ_2	0,013490333	-0,001458	-0,000448699

	(A2A3)	(A4A7)	(A3A8)
	βελόμετρο 14	βελόμετρο 12	βελόμετρο 13
	(mm)		
0	0,0986	0,0885	0,0954
10(1)	-2,6567	-0,4215	0,1978
30(1)	-7,8853	-6,3299	-0,0724
$\epsilon=dl/l_0$			
ϵ_1	-0,002156464	-0,000749919	0,000150572
ϵ_2	-0,006248683	-0,009437803	-0,000246738

όπου στα πράσινα κελιά αναγράφονται οι τιμές των βελομέτρων στις αντίστοιχες καταστάσεις (0, +10(1), +30(1)) και στα ροζ οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων. Δίδονται και οι απαραμόρφωτες- πραγματικές αποστάσεις των σημείων, l_0 :

	(mm)
(A1A4)	1277,693234
(A2A3)	1277,693234
(A4A7)	680,0735254
(A3A8)	680,0735254