



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΠΜΣ Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των κατασκευών

Η δράση της περίσφιγξης στο οπλισμένο κισηρόδεμα

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μάνος Κ. Γεώργιος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Βουγιούκας Εμμανουήλ
Λέκτορας

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η δράση της περίσφιξης στο οπλισμένο κισηρόδεμα

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μάνος Κ. Γεώργιος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Βουγιούκας Εμμανουήλ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24^η Οκτωβρίου 2017

Βουγιούκας Εμμανουήλ
Λέκτορας

Τρέζος Κωνσταντίνος
Αναπλ. Καθηγητής

Μπαδογιάννης Ευστράτιος
Επίκουρος Καθηγητής

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)



Το περιεχόμενο της παρούσας εργασίας υπάγεται σε Άδεια Χρήσης Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Μάνος Κ. Γεώργιος
Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Περίληψη

Το κισηρόδεμα, δηλαδή το σκυρόδεμα με αδρανή τη κίσηρη, παρουσιάζει ενδιαφέροντα πλεονεκτήματα ως δομικό υλικό, όπως το μειωμένο του βάρος και τη μεγάλη του θερμομονωτική ικανότητα. Μικρότερο βάρος σε μια κατασκευή σημαίνει μείωση των απαραίτητων διατομών και οπλισμών τόσο λόγω μειωμένων ιδίων βαρών όσο και μικρότερων αδρανειακών φορτίων, ενώ η έμφυτή του θερμομονωτική του ικανότητα επιφέρει ενεργειακά οφέλη. Από την άλλη μεριά, τα μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά της κίσηρης έναντι των συνήθων αδρανών αποτελεί έναυσμα προς περαιτέρω έρευνα.

Το βασικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας είναι η απόκριση του κισηροδέματος σε κεντρική θλίψη και η αποδοτικότητα της περίσφιγξης των εγκάρσιων οπλισμών, σε διάφορες διατάξεις και ογκομετρικά ποσοστά. Τα παραπάνω εκτιμώνται μέσω ενός εκτενούς πειραματικού προγράμματος σε 28 πρισματικά δοκίμια τετραγωνικής κάτοψης, πλάτους 15, 20 ή 25 cm και τριπλάσιου ύψους. Επίσης, πραγματοποιείται βιβλιογραφική διερεύνηση σχετικά με αντίστοιχες πειραματικές και θεωρητικές μελέτες στο κισηρόδεμα αλλά και σε άλλου είδους ελαφροσκυροδέματα, όπως επίσης και σε μελέτες στην περίσφιγξη σε σύνηθες σκυρόδεμα για συγκριτικούς σκοπούς.

Επιπλέον, στην εργασία αναλύεται ένα τυπικό πεντάωροφο πλαίσιακό κτίριο με χρήση κισηροδέματος για τα οριζόντια και σκυρόδεμα κανονικού βάρους για τα κατακόρυφα στοιχεία, το οποίο συγκρίνεται με δύο ίδια γεωμετρικά κτίρια εξολοκλήρου από κισηρόδεμα και από σκυρόδεμα κανονικού βάρους αντίστοιχα. Το πιο σημαντικά χαρακτηριστικά που συγκρίνονται είναι η κρισιμότητα των διαφόρων ελέγχων σε οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας, η εξοικονόμηση χάλυβα και σκυροδέματος, η στοχευόμενη μετατόπιση από ανάλυση pushover και η μετελαστική συμπεριφορά σε όρους διαθέσιμης πλαστικής στροφής και σταθμών επιτελεστικότητας.

Abstract

Pumice concrete exhibits significant advantages as a structural material, such as its reduced self-weight and its thermal insulation properties. Lower self-weight is translated to smaller required cross sections and rebar reinforcements due to lower self-weight and inertial loads, while its inherent thermal insulation properties have energy saving related benefits.

The main objective of this study is the response of pumice concrete against uniaxial compression, including the efficiency of the confinement of the lateral reinforcing steel hoops, in various configurations and volumetric ratios. The above are being evaluated through an extensive experimental series of 28 prismatic specimens of rectangular plan view, with 15,

20 or 25 cm side length and triple size height. Also, a literature research is contained, regarding similar experimental and theoretical research on pumice and other lightweight concretes, including normal density concrete's confinement research data for comparison purposes.

Additionally, a typical 5 story building was analyzed, implementing pumice concrete for the horizontal structural elements and normal density concrete for the vertical ones. The building was compared with two geometrically similar buildings made of solely normal density concrete and solely lightweight concrete respectively, simulated with the same assumptions. The most significant characteristics that were compared are the criticalness of various design criteria related to both failure and serviceability limit states, the savings in steel and concrete volume, the target displacement value of a pushover analysis and the post-elastic behavior regarding the plastic rotation capacity and the limit states.

Λέξεις Κλειδιά

Ελαφροσκυρόδεμα, περίσφιγξη, κισηρόδεμα, κίσηρη

Keywords

Lightweight concrete, confinement, pumice concrete, pumice

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ πρώτα και κύρια τον κ. Χρήστο Ζέρη, για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστούμε όχι μόνο στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία και προηγουμένως στη διπλωματική μου εργασία, αλλά και στο ερευνητικό πρόγραμμα 716-BET-2013. Όλο αυτό το διάστημα κέρδισα σημαντικές εμπειρίες που ήδη έδρασαν καταλυτικά για τα επόμενα επαγγελματικά μου βήματα. Ο τρόπος χειρισμού από τον κ. Ζέρη των συνεχών ερευνητικών προκλήσεων, η έμφαση στη λεπτομέρεια και η εφαρμογή της θεωρητικής γνώσης στα πρακτικά άμεσα προβλήματα, αποτέλεσαν ανεκτίμητο μάθημα για μένα.

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει μέρος των αποτελεσμάτων του ερευνητικού έργου 716-BET-2013 «Δομικό ελαφροσκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας με κίσηρη». Το έργο υλοποιήθηκε υπό την χρηματοδότηση και εποπτεία της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) στο πλαίσιο του ΠΑΒΕΤ 2013, ΕΣΠΑ 2007-2013, τους οποίους και ευχαριστούμε. Ευχαριστούμε επίσης τους Σ. Κουρκουλή, Καθηγητή ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ και Α.

Πικράκη, ΕΤΕΠ, που μας παρείχαν πρόσβαση και κάθε υποστήριξη στη χρήση της μηχανής θλίψης 600 τόνων του Εργαστηρίου Αντοχής Υλικών.

Ευχαριστώ τους συναδέλφους Δημήτρη Λιβανό και τον Κώστα Στάμο, χωρίς τη συμβολή των οποίων δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση του ερευνητικού προγράμματος και κατ' επέκταση της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ τους συναδέλφους από το μεταπτυχιακό πρόγραμμα, που ιδιαίτερα το διάστημα κατά το οποίο παράλληλα εργαζόμουν, με βοήθησαν ενεργά.

Ευχαριστώ τον κ. Γιώργο Μιχαλάτο, Τεχνικό Διευθυντή της Elval Colour, για την κατανόηση κατά το διάστημα εκπόνησης της εργασίας αυτής, καθώς και τον κ. Γιάννη Αγγελή, Γενικό Διευθυντή της Elval Colour, για όλες τις άδειες και διευκολύνσεις που μου δόθηκαν σχετικά με το μεταπτυχιακό πρόγραμμα, παρά τον αυξανόμενο φόρτο εργασίας.

Ευχαριστώ, τέλος, τους γονείς μου, Ευτυχία και Κώστα, την αδερφή μου Αλεξάνδρα και τη Μαρία, που με στηρίζαν και με στηρίζουν, και που χωρίς αυτούς δεν θα μπορούσα να ολοκληρώσω την εργασία αυτή. Σας ευχαριστώ.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	5
Abstract	5
Λέξεις Κλειδιά.....	6
Keywords.....	6
Ευχαριστίες.....	6
Πίνακας Περιεχομένων	9
1 Στόχοι της Παρούσας Εργασίας και Μεθοδολογία	11
2 Βιβλιογραφική και Θεωρητική Διερεύνηση.....	13
2.1 Δομή Κισηροδέματος.....	13
2.2 Η Περίσφιγξη στο Κισηρόδεμα.....	14
2.2.1 Ο Μηχανισμός της Περίσφιγξης	14
2.2.2 Περιγραφή Προηγούμενων εργασιών σχετικά με τη Περίσφιγξη.....	15
2.2.3 Κανονιστικό πλαίσιο	25
2.3 Συμπεράσματα Βιβλιογραφικής Διερεύνησης	26
3 Πειραματική Διερεύνηση	29
3.1.1 Εισαγωγή.....	29
3.1.2 Περίληψη Εργασιών.....	30
3.2 Προετοιμασία Δοκιμών.....	32
3.2.1 Κατασκευή των Δοκιμών	32
3.2.2 Υλικά Κατασκευής.....	33
3.3 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας	34
3.4 Ενοργάνωση των δοκιμών.....	39
3.5 Υπολογισμός του διαγράμματος $\sigma_0 - \epsilon_0$ του ΚΔ.....	41
3.5.1 Μέτρηση και υπολογισμός της αξονικής τάσης σ_0	41
3.5.2 Μέτρηση και υπολογισμός της αξονικής παραμόρφωσης ϵ_0	41
3.5.3 Μέτρηση της εγκάρσιας παραμόρφωσης	42

3.5.4	Υπολογισμός του διαγράμματος $\sigma - \epsilon$ των οπλισμών υπό θλίψη.....	42
3.5.5	Προσομοίωση της διατομής σε περίσφιγξη.....	43
3.5.6	Συγκριτικοί υπολογισμοί με τις σχέσεις σχεδιασμού για το ΣΚΒ.....	44
3.6	Διάταξη και διαδικασία των δοκιμών.....	47
3.7	Αποτελέσματα πειραματικών ελέγχων.....	48
3.7.1	Γενικές παρατηρήσεις σχετικά με τα δοκίμια	48
3.7.2	Άοπλα πρισματικά δοκίμια.....	50
3.7.3	Οπλισμένα πρισματικά υποστυλώματα.....	52
3.7.4	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	84
3.7.5	Συμπεράσματα.....	89
4	Συγκριτική ανάλυση τριών προσομοιωμάτων πενταώροφης πλαίσιακής κατασκευής..	90
4.1	Εισαγωγή.....	90
4.2	Παραδοχές.....	91
4.3	Έλεγχος μέγιστου ανηγμένου αξονικού φορτίου v_d	92
4.4	Περιορισμός Σχετικής Παραμόρφωσης Ορόφων.....	93
4.5	Έλεγχος Φαινομένων Δευτέρας Τάξεως (P-Δ).....	94
4.6	Ικανοτικός έλεγχος κόμβου.....	95
4.7	Αποτελέσματα σχεδιασμού κατά EC2 & EC8	96
4.8	Ανελαστική Στατική Σεισμική Ανάλυση (Pushover Analysis).....	97
4.8.1	Παραδοχές.....	97
4.8.2	Αποτελέσματα Pushover analysis	100
5	Συμπεράσματα.....	105
	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	106
	Βιβλιογραφικές Αναφορές	107
	Κατάλογος Σχημάτων.....	109
	Κατάλογος Πινάκων.....	114

1 Στόχοι της Παρούσας Εργασίας και Μεθοδολογία

Το κισηρόδεμα (ΚΔ), το σκυρόδεμα δηλαδή που τα αδρανή του έχουν αντικατασταθεί μερικώς ή ολικώς από κίσηρη, παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σύγκριση με το σκυρόδεμα κανονικού βάρους (ΣΚΒ) καθώς χαρακτηρίζεται από μειωμένο ειδικό βάρος, με άμεση συνέπεια τη μείωση των εντατικών μεγεθών ενός δομήματος τόσο λόγω μείωσης των κατακόρυφων φορτίων όσο και λόγω της μείωσης των οριζόντιων αδρανειακών δυνάμεων, απευθείας λόγω μείωσης του βάρους αλλά και εμμέσως, σε πολλές περιπτώσεις, λόγω της αύξησης της ιδιοπεριόδου του κτιρίου μέσω της μείωσης της δυσκαμψίας και του μέτρου ελαστικότητας. Ειδικά, αυτή η μείωση αδρανειακών μεγεθών, όταν αναφέρεται σε δομήματα σε σεισμογενείς περιοχές (όπως η Ελλάδα) μπορεί να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα αύξησης της οικονομικότητας των κατασκευών τόσο σε κατασκευές από έγχυτο ΚΔ όσο και στην προκατασκευή.

Σύμφωνα και με τα υπάρχοντα ερευνητικά δεδομένα, υπάρχει μια έλλειψη τεχνικής εμπειρίας και γνώσης στην καταστατική συμπεριφορά μέσης τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης μελών από περισφιγμένο ΚΔ (και γενικότερα ελαφροσκυρόδεμα - ΕΣ), σε μονοτονικά αύξουσα καταπόνηση έως τη συμβατική αστοχία, ειδικά στην περιοχή των ΕΣ με χαμηλό ειδικό βάρος, χωρίς την προσθήκη άμμου, αλλά αποκλειστικά με κίσηρη. Αυτό το κενό στοχεύει να καλύψει η παρούσα εργασία, μέσω πειραματικής διερεύνησης πρισματικών δοκιμών υποστυλωμάτων με διαφορετικές διατάξεις περίσφιγξης, που απαντώνται στην πράξη, υπό κεντρική θλίψη.

Βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική και αναλυτική διερεύνηση της συμπεριφοράς κοντών υποστυλωμάτων από οπλισμένο φέρον ΚΔ όταν αυτά υποβάλλονται σε κεντρική θλίψη έως την αστοχία. Σε κάθε περίπτωση, πλην τεσσάρων δοκιμών που, για λόγους ελέγχου, είναι άοπλα, όλα τα δοκίμια που ελέγχονται πειραματικά στην παρούσα είναι οπλισμένα με διαφορετικής μορφής (διάταξη, διάμετρος και μεταξύ τους απόσταση) και ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού συνδετήρων περίσφιγξης, ώστε να αποτιμηθεί η συμπεριφορά τους και να εκτιμηθεί πειραματικά το μέσο διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων περισφιγμένου ΚΔ.

Αποτέλεσμα των πειραματικών δοκιμών είναι να συγκριθεί η αποδοτικότητα περίσφιγξης για το ΚΔ με τα ισχύοντα για σκυρόδεμα κανονικού βάρους (ΣΚΒ) στους Κανονισμούς αντισεισμικού (ανα)σχεδιασμού, Ευρωκώδικας 2 και 8 (EC2, 2004 και EC8, 2004), ΕΚΩΣ (2000) και Ευρωκώδικας 8 Μέρος 3 (EC8-3, 2005) και Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝΕΠΕ, 2010).

Επιπλέον, μελετήθηκε ένα τυπικό πενταώροφο πλαίσιακό κτίριο που συνδυάζει ΕΣ για τα οριζόντια και ΣΚΒ για τα κατακόρυφα δομικά στοιχεία, κατά EC2 και EC8, με χρήση κατοικίας, περιλαμβάνοντας τέσσερα πλαίσια ανοίγματος 6 μέτρων ανά διεύθυνση. Πραγματοποιείται σεισμικός σχεδιασμός και αποτίμηση μετελαστικών χαρακτηριστικών με τη μέθοδο pushover. Το κτίριο αυτό συγκρίνεται με δύο παρόμοια γεωμετρικά κτίρια, το ένα με χρήση αποκλειστικά ΣΚΒ και το δεύτερο με χρήση αποκλειστικά ΕΣ, που είχαν αναλυθεί σε προηγούμενη εργασία (διπλωματική εργασία, Μάνος, 2014). Συγκεκριμένα, τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά που συγκρίνονται είναι η κρισιμότητα των διαφόρων ελέγχων σε οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας, όπως οι έλεγχοι αντοχής και οι έλεγχοι περιορισμού παραμορφώσεων, η εξοικονόμηση χάλυβα και σκυροδέματος, η στοχευόμενη μετατόπιση από ανάλυση Pushover και η μετελαστική συμπεριφορά σε όρους διαθέσιμης πλαστικής στροφής και σταθμών επιτελεστικότητας.¹

¹ Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει μέρος των αποτελεσμάτων του ερευνητικού έργου 716-BET-2013 «Δομικό ελαφροσκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας με κίσηρη». Το έργο υλοποιήθηκε υπό την χρηματοδότηση και εποπτεία της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) στο πλαίσιο του ΠΑΒΕΤ 2013, ΕΣΠΑ 2007-2013, τους οποίους και ευχαριστούμε. Το ερευνητικό πρόγραμμα πραγματοποιήθηκε ως μια συνεργασία της Lafarge – Holcim με το ΕΜΠ. Υπεύθυνος του τμήματος της εργασίας του έργου που αναλήφθηκε από το ΕΜΠ ήταν ο Αναπλ. Καθηγητής Χρήστος Ζέρης και υπεύθυνος για τις εξής τεχνικές εκθέσεις που συμπεριλαμβάνονται στο πρόγραμμα:

- ΕΕ05: Πειραματική αποτίμηση του δείκτη δυσθραυστότητας σε κάμψη και της πλαστιμότητας που αναπτύσσεται από το ινοπλισμένο κισηρόδεμα σε κάμψη και θλίψη
- ΕΕ06: Πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς οπλισμένων διεπιφανειών από κισηρόδεμα
- ΕΕ07: Πειραματική αποτίμηση των χαρακτηριστικών μέσης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης θλιβόμενων οπλισμένων υποστυλωμάτων περισφιγμένου κισηροδέματος σε μονοτονική κεντρική θλίψη και νόμος περίσφιγξης για το κισηρόδεμα
- ΕΕ08: Πειραματική αποτίμηση των ανελαστικών χαρακτηριστικών σε ανακύκλιση δομικών στοιχείων από κισηρόδεμα, μελετημένων κατά ΕΚ8
- ΕΕ09: Πειραματική αποτίμηση των ερπυστικών χαρακτηριστικών του κισηροδέματος μέσω μακροχρόνιας επιβολής εγκάρσιας φόρτισης σε προεντεταμένη δοκό από κισηρόδεμα στο πεδίο
- ΕΕ10: Σχεδιασμός κτιρίου από κισηρόδεμα και σύγκριση με παρόμοιο κτίριο από σκυρόδεμα Κανονικού βάρους

Ο κ. Ζέρης ήταν και ο επιβλέπων της παρούσας εργασίας ενώ αντικαταστάθηκε στο τελευταίο στάδιο λόγω αδείας από τον κ. Βουγιούκα.

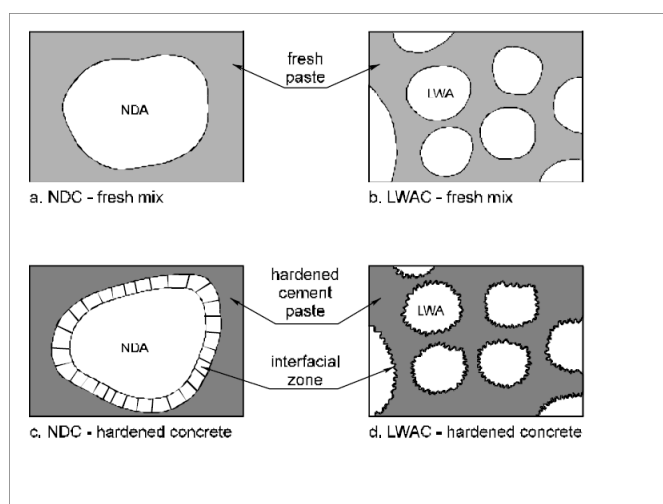
2 Βιβλιογραφική και Θεωρητική Διερεύνηση

Στην παρούσα ενότητα ανακεφαλαιώνονται οι σημαντικότερες βιβλιογραφικές συμβολές σχετικά με το δομικό ΕΣ, εστιάζοντας στο ΚΔ.

2.1 Δομή Κισηροδέματος

Οι μηχανικές ιδιότητες του ΚΔ διαφοροποιούνται σημαντικά από αυτές του ΣΚΒ. Η αιτία βρίσκεται στη δομή του όπως αυτή εξετάζεται σε μεσοσκοπική κλίμακα (δηλαδή σε μεγέθη χιλιοστού μέχρι μερικών εκατοστών).

Θεωρώντας στην κλίμακα αυτή απλοποιητικά το σκυρόδεμα ως υλικό δύο φάσεων, την τσιμεντόπαστα και τα αδρανή (Smeplass, 1992), στο ΣΚΒ συνήθων αντοχών τα αδρανή έχουν συγκριτικά πολύ μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας και αντοχή από τον τσιμεντοπολτό, με συνέπεια να αναλαμβάνουν μεγαλύτερες τάσεις. Η κατάσταση αυτή παρουσιάζει μια ανομοιογένεια με συνέπεια την ανομοιόμορφη κατανομή των τάσεων καθώς αυτές αυξάνονται. Παράλληλα παρατηρούνται μικρορηγματώσεις στην διεπιφανειακή ζώνη μεταξύ τσιμεντόπαστας και αδρανών, γεγονός που μπορεί να δικαιολογήσει την απόκλιση από τη γραμμικότητα του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων του ΣΚΒ (χαμηλής και μέσης αντοχής) με την αύξηση των επιβαλλόμενων τάσεων.



Στο εν λόγω ερευνητικό πρόγραμμα συμμετείχαν και οι: Β. Καλοϊδής, Διευθυντής Τεχνικής Υποστήριξης Πωλήσεων, ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ, Χ. Κουρής, Διευθυντής Τεχνικής Υποστήριξης Πωλήσεων, ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ, Β. Παλιεράκη, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., Χ. Αδάμη, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Δ. Λιβανός, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, Κ. Στάμος, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ.

Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση διαφορών στη δομή του ΕΣ και του ΣΚΒ σε μεσοσκοπική κλίμακα (Eurolightcon, 1998) (NDC = Normal density concrete, LWAC = Lighthweight aggregate concrete)

Σε αντιδιαστολή, στο ΚΔ, η κίσηρη έχει αντοχές και μέτρο ελαστικότητας μικρότερες σε σχέση με τη τσιμεντόπαστα, με συνέπεια την αντίθεση κατανομή των τάσεων μεταξύ των δύο αυτών φάσεων. Επιπλέον, η διαφορά μεταξύ των δύο φάσεων δεν είναι τόσο μεγάλη όσο στο ΣΚΒ, η κατανομή των τάσεων παρουσιάζει μια μεγαλύτερη ομοιομορφία. Κατ' επέκταση, η μικρορηγματώση στην επιφανειακή ζώνη είναι μικρότερη με συνέπεια να μην αποκλίνει η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων του υλικού από την ευθυγραμμία, αλλά να αστοχεί απότομα και με μεγαλύτερη ψαθυρότητα. Επιπλέον, οι ρωγμές δεν διέρχονται μόνο στη διεπιφανειακή ζώνη όπως στο ΣΚΒ αλλά έχουν την τάση να διαπερνούν το ΕΑ. Το γεγονός αυτό σημαίνει λιγότερες σε αριθμό και μεγαλύτερες ρωγμές, δημιουργώντας επίπεδες επιφάνειες, σε αντίθεση με τις συνήθεις ρωγμές στο ΣΚΒ, που είναι ακανόνιστες καθώς παρακάμπτουν τα σωματίδια των αδρανών που έχουν μεγαλύτερες αντοχές από την περιβάλλουσα τσιμεντόπαστα.

2.2 Η Περίσφιγξη στο Κισηρόδεμα

2.2.1 Ο Μηχανισμός της Περίσφιγξης

Γενικά, η λειτουργία της πέρισφιγξης στο σκυρόδεμα επιτυγχάνεται μέσω της εγκάρσιας διόγκωσης του πυρήνα του σκυροδέματος όταν αυτό θλίβεται αξονικά. Η διόγκωση αυτή σχετίζεται τόσο με τη δυσκαμψία και αντοχή των αδρανών όσο και με τις ρηγματώσεις που συμβαίνουν στο σκληρυμένο τσιμεντοπολτό.

Όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο 0, στο ΣΚΒ τα αδρανή έχουν μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας και αντοχή από τη τσιμεντόπαστα, με συνέπεια οι εσωτερικές ρηγματώσεις να προκαλούν τράχυνση της επιφάνειας αστοχίας (βλ. Σχήμα 2.2b)). Αντίθετα στο ΕΣ, η μικρότερη αντοχή του ΕΑ σε σύγκριση με αυτήν της τσιμεντόπαστας οδηγεί σε ρηγματώση δια μέσου του ΕΑ, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας πιο ομαλής επιφάνειας αστοχίας (βλ. Σχήμα 2.2).



(a) Lightweight Aggregate Concrete

(b) Conventional Weight Concrete

Σχήμα 2.2: Επιφάνεια αστοχίας και ανάπτυξη ρηγμάτωσης (FIP 1983)

Με την αύξηση του θλιπτικού αξονικού φορτίου, στο ΣΚΒ οι τραχείες επιφάνειες της ρηγμάτωσης τείνουν να προκαλέσουν εγκάρσιες παραμορφώσεις - διόγκωση (αλληλεμπλοκή αδρανών), ενώ στο ΕΣ η εγκάρσια αυτή διόγκωση μάλλον είναι περιορισμένη λόγω της ομαλότερης επιφάνειας αστοχίας. Για το λόγο αυτό, η περίσφιγξη φαίνεται να έχει μικρότερη ευμενή επιρροή στο ΕΣ από ότι στο ΣΚΒ. (Allington 2003, FIP 1983).

2.2.2 Περιγραφή Προηγούμενων εργασιών σχετικά με τη Περίσφιγξη

Για τη διερεύνηση της περίσφιγξης στο ΕΣ έχουν αναφερθεί βιβλιογραφικά εργασίες που αφορούν την πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς υποστυλωμάτων από ΕΣ (ή ΚΔ ειδικότερα), καθώς το υλικό αυτό έχει ευρεία χρήση στο εξωτερικό και σε χώρες με υψηλή σεισμικότητα. Οι πειραματικές αυτές εργασίες ταξινομούνται κυρίως σε δύο κατηγορίες:

Κατηγορία I. Πειραματικές εργασίες οι οποίες επικεντρώνονται κυρίως στην πειραματική διερεύνηση κοντών υποστυλωμάτων σε κεντρική θλίψη, οι οποίες αποσκοπούν στην αποτίμηση του διαγράμματος μέσης τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης (σ₀-ε₀) περισφιγμένων πυρήνων υποστυλωμάτων, και συνήθως καταλήγουν και σε μια προτεινόμενη αναλυτική σχέση για χρήση στους αντισεισμικούς υπολογισμούς και

Κατηγορία II. Πειραματικές εργασίες οι οποίες επικεντρώνονται κυρίως στην πειραματική διερεύνηση καμπτόμενων υποστυλωμάτων από ΕΣ υπό ανακυκλιζόμενη ένταση, είτε αμιγώς είτε σε διάταξη κόμβου δοκών - υποστυλωμάτων, στις οποίες η περίσφιγξη απετέλεσε παράμετρο υπό διερεύνηση

Έτσι, αν και εξ αντικειμένου η παρούσα εργασία αφορά κυρίως την πρώτη κατηγορία εργασιών, παραπάνω (με έλεγχο των αποτελεσμάτων προς τις υφιστάμενες διατάξεις περίσφιγξης για το ΣΚΒ), η βιβλιογραφική έρευνα περιλαμβάνει και σχετικές προς το ΕΣ πειραματικές διερευνήσεις περισφιγμένων υποστυλωμάτων σε ανακύκλιση της δεύτερης κατηγορίας), καθώς από αυτές εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν τη χρήση του

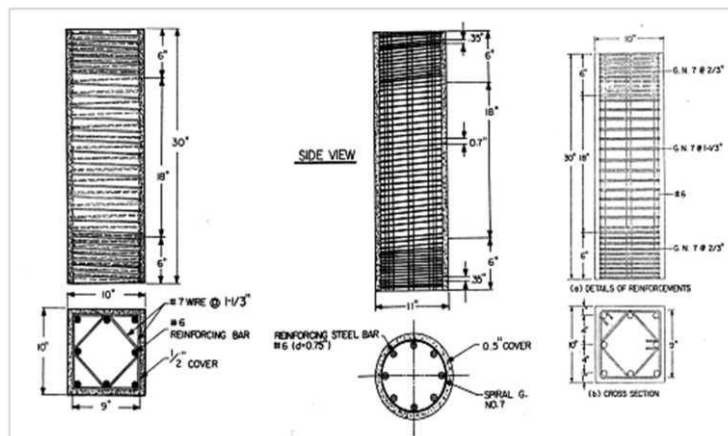
υλικού σε ανακυκλιζόμενη ένταση μεγάλων παραμορφώσεων, την ευμενή (ή μη) επίδραση της περισφιγξης σε αυτής της μορφής την απόκριση και κατά πόσον αυτή συγκρίνεται με αυτήν παρόμοιων δοκιμίων από ΣΚΒ. Σε κάθε περίπτωση, σε όποιες πειραματικές έρευνες ανήκουν στην κατηγορία πειραματικών εργασιών κοντών υποστυλωμάτων υπό κεντρική θλίψη, παρατίθεται και η προταθείσα ημιεμπειρική καταστατική σχέση μέσης τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης ($\sigma - \varepsilon$) για το περισφιγμένο ΕΣ που προτάθηκε από τον ερευνητή.

2.2.2.1 Allington (2003)

Ο Allington (2003) διερεύνησε εκτενώς πειραματικά τη συμπεριφορά περισφιγμένων υποστυλωμάτων. Για αυτό το σκοπό κατασκεύασε δεκαεννέα άοπλα και είκοσι οκτώ οπλισμένα υποστυλώματα, φυσικής κλίμακας από τέσσερα διαφορετικά είδη ΕΣ, τα δύο χρησιμοποιώντας αδρανή από διογκωμένο αργιλικό σχιστόλιθο (expanded shale) και τα υπόλοιπα δύο από διογκωμένη άργιλο (expanded clay). Οι πυκνότητες και των τεσσάρων συνθέσεων ήταν περίπου 1600 kg/m^3 και οι αντοχές μεταξύ 25 και 55 MPa. Για τις δοκιμές του, χρησιμοποίησε τρεις διατάξεις οπλισμού περισφιγξης. Τα οκτώ εκ των υποστυλωμάτων είχαν κυκλική διατομή με σπειροειδή οπλισμό ενώ τα υπόλοιπα ήταν όλα τετραγωνικής διατομής. Σχεδόν σε όλα τα οπλισμένα υποστυλώματα παρατήρησε λυγισμό των διαμήκων οπλισμών, ενώ στις τετραγωνικές διατομές και όταν η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των οπλισμών αυξανόταν, το φαινόμενο ήταν εντονότερο.

2.2.2.2 Manrique et al. (1979)

Στα πλαίσια ενός εκτενούς πειραματικού προγράμματος οι Manrique et al. (1979) κατασκεύασαν τριάντα δοκίμια υποστυλωμάτων τετραγωνικής ή κυκλικής διατομής. Η ιδιαιτερότητα στα δοκίμια ήταν ότι ορισμένα είχαν σκυροδετηθεί χωρίς καθόλου επικάλυψη από απερίσφιγκτο σκυρόδεμα, ενώ τα υπόλοιπα με επικάλυψη. Τα δοκίμια τετραγωνικής διατομής ήταν ύψους 76.2 cm και διάστασης πλευράς 25.4 cm (με προσθήκη σκυροδέματος επικάλυψης) και 22.9 cm (χωρίς επικάλυψη), ενώ τα δοκίμια κυκλικής διατομής είχαν το ίδιο ύψος και διάμετρο 27.9 cm (με επικάλυψη) και 25.4 cm (χωρίς επικάλυψη) (βλ. και Σχήμα 2.3).

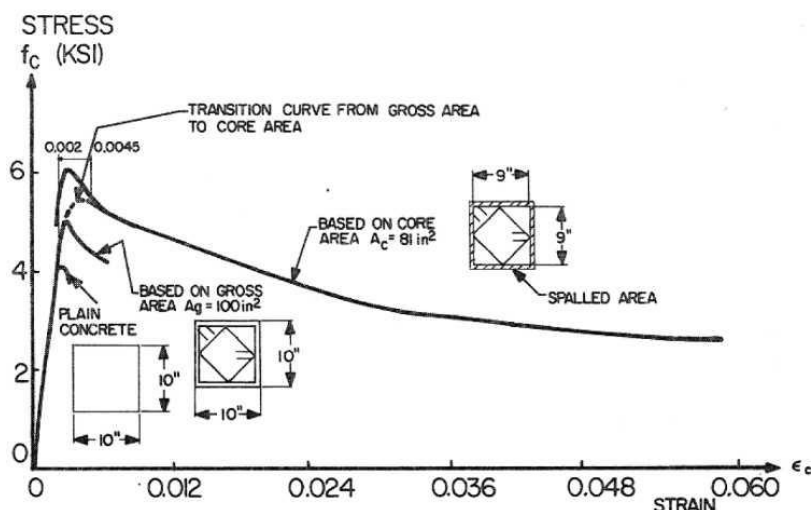


Σχήμα 2.3: Γεωμετρία και διατάξεις συνδετήρων των δοκιμών των Manrique et al (1979)

Οι μεταβλητές ελέγχου των πειραμάτων ήταν το πάχος του σκυροδέματος επικάλυψης, το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού και η μορφή και το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού: ελέγχθηκαν δύο διατάξεις συνδετήρων, τρίμητος συνδετήρας σε τετράγωνη διάταξη με ρόμβο και κυκλική διάταξη συνδετήρα.

Το υλικό ΕΑ που χρησιμοποιήθηκε ήταν διογκωμένος σχιστόλιθος (expanded shale) και το ΕΣ απέκτησε αντοχές περίπου μεταξύ 35 και 37 ΜΡα, με παραμόρφωση στη μέγιστη τάση μεταξύ 0.00285 και 0.00305. Το ειδικό βάρος του ΕΣ την ημέρα των πειραμάτων ήταν 1830 kg/m³ ενώ το ξηραμένο στον αέρα ειδικό βάρος του ΕΣ ήταν 1750 kg/m³.

Ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα περισφιγμένου ΕΣ για τη διάταξη τρίμητου συνδετήρα με ρόμβο (με ή χωρίς επικάλυψη) δίνεται στο Σχήμα 2.3. Συγκρίνοντας τα δοκίμια με και χωρίς προσθήκη επικάλυψης, οι ερευνητές παρατήρησαν πως οι εγκάρσιες παραμορφώσεις στον ανοδικό κλάδο του διαγράμματος τάσεων -παραμορφώσεων ήταν σχεδόν οι μισές από όταν δεν υπήρχε επικάλυψη, συμπεραίνοντας πως η ύπαρξη επικάλυψης οδηγεί σε γρηγορότερη ενεργοποίηση του μηχανισμού περισφιγξης και σε αύξηση των αντοχών, καθώς όσο ο μηχανισμός περισφιγξης δεν ενεργοποιείται, το ΕΣ συμπεριφέρεται ως απερίσφιγκτο και τα μηχανικά του χαρακτηριστικά υποβαθμίζονται, με την περισφιγξη στην περίπτωση αυτή να επηρεάζει κυρίως τον καθοδικό κλάδο του διαγράμματος σ-ε.

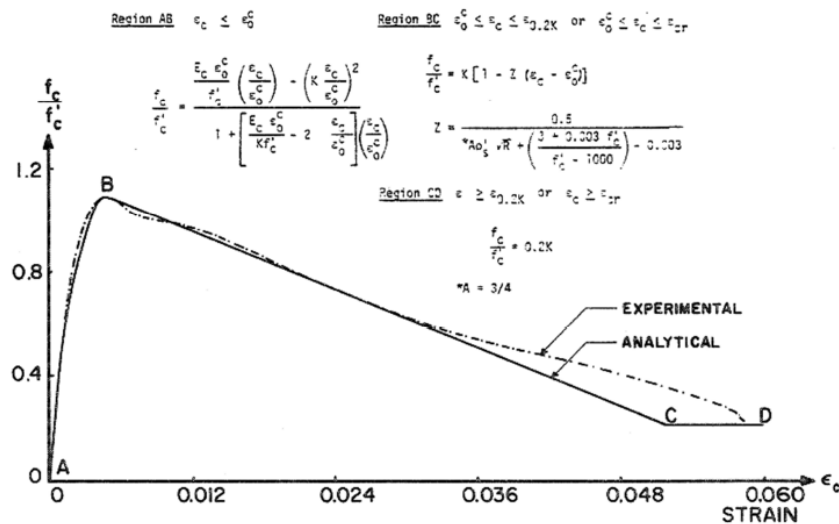


Σχήμα 2.4: Πειραματικό διάγραμμα με διάταξη τρίμητων συνδετήρων - ρόμβου: υποστύλωμα από ΕΣ άοπλο, οπλισμένο χωρίς διαμήκη οπλισμό και με διαμήκη οπλισμό (Manrique et al., 1979)

Αναφορικά με τους διαμήκεις και εγκάρσιους οπλισμούς, παρατηρήθηκαν τα εξής: η διαρροή τους μετρήθηκε να επιτυγχάνεται σε φορτίο περίπου 85% με 95% του μέγιστου φορτίου, ενώ παρατηρήθηκε και λυγισμός των οπλισμών, ο οποίος έλαβε χώρα σε μέση ανηγμένη αξονική παραμόρφωση κατά μέσο όρο ίση με 0.0045. Η αύξηση του μέγιστου φορτίου λόγω περισφιγξης ήταν περίπου 6% με 10% για τρίμητη με ρόμβο και κυκλική διάταξη συνδετήρων, αντίστοιχα, ανεξάρτητα από το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού, γεγονός που αποδίδεται στην τοπική θραύση των κόκκων του ΕΑ σε αυτό το επίπεδο επιβαλλόμενων τάσεων. Αντίστοιχα, για ΣΚΒ, η αύξηση του ποσοστού του διαμήκους οπλισμού οδηγεί στην αύξηση του μέγιστου φορτίου, γεγονός που οφείλεται στην μεγαλύτερη αντοχή του αδρανούς. Επιπλέον, ο διαμήκης οπλισμός βελτιώνει τον καθοδικό κλάδο του διαγράμματος $\sigma_c^* - \epsilon_c$.

Συγκρίνοντας τον κυκλικό με τον τρίμητο τετραγωνικό τύπο διάταξης του οπλισμού περισφιγξης, μετρήθηκε ότι ο η τετραγωνική διάταξη προσφέρει το 70% της απόδοσης περισφιγξης έναντι της κυκλικής ιδεατής διατομής, ενώ εμφανίζεται σημαντική διαφορά και στον καθοδικό κλάδο του διαγράμματος $\sigma_c^* - \epsilon_c$, με την κυκλική διάταξη να είναι σαφώς υπερισχύουσα. Επί πλέον, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της ανηγμένης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο (ϵ_{ic0}) συγκριτικά με αυτή που αποδόθηκε σε θλιπτικές δοκιμές σε προτύπους κυλίνδρους, ήταν της τάξης του 200-280%, για το ΣΚΒ, και μόλις 23-58% για το ΕΣ.

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, οι ερευνητές πρότειναν μία καταστατική σχέση μέσης τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης για το περισφιγμένο ΕΣ, $\sigma_c^* - \varepsilon_c$, που υποδιαιρείται σε τρεις υποπεριοχές θλιπτικής έντασης και η οποία, για διάταξη τρίμητων συνδετήρων με ρόμβο έχει τη μορφή που δίνεται στο παρακάτω ² και δίδεται από τις παρακάτω σχέσεις:



Σχήμα 2.5: Σύγκριση Πειραματικής απόκρισης Με την εμπειρική σχέση Για ΕΣ σε διάταξη Τρίμητων συνδετήρων

Περιοχή AB: $\varepsilon_c \leq \varepsilon_{lc0}$ (βλ. και Σχήμα 2.5)

$$\frac{\sigma_c^*}{f_{lc}} = \frac{E_{lc} \varepsilon_{lc0} \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{lc0}}\right) - K \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{lc0}}\right)^2}{1 + \left[\frac{E_{lc} \cdot \varepsilon_{lc0}}{K \cdot f_{lc}} - 2\right] \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{lc0}}\right)} \quad (2.1)$$

Περιοχή BC: $\varepsilon_{lc0} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{0,2K}$ ή $\varepsilon_{lc0} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cr}$ (Σχήμα 2.5)

$$\frac{\sigma_c^*}{f_{lc}} = K \cdot [1 - Z \cdot (\varepsilon_c - \varepsilon_{lc0})] \quad (2.2)$$

όπου:

$$Z = \frac{0.5}{0.75 \cdot \rho_w \sqrt{h_0} + \left(\frac{3 + 0.003 \cdot f_{lc}}{f_{lc} - 1000}\right) - 0.003} \quad (2.3)$$

² Πέραν της παραπάνω σχέσης, οι Manrique et al. (1979) πρότειναν αντίστοιχες σχέσεις και για κυκλική διάταξη συνδετήρων ή/και σπειροειδή σπλισμό.

Περιοχή CD $\varepsilon_c \geq \varepsilon_{0.2K}$ ή $\varepsilon_c \geq \varepsilon_{cr}$ (Σχήμα 2.5)

$$\frac{\sigma_c^*}{f_{lc}} = 0.2K \quad (2.4)$$

όπου:

$$K = \frac{f_{lc}^*}{f_{lc}} = 1 + 0.0073 \cdot \left(1 - 0.245 \cdot \frac{s}{h_0}\right) \cdot \rho_w \cdot \frac{f_y}{f_{lc}} \quad (2.5)$$

ρ_w το ογκομετρικό ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού, το οποίο ορίζεται (όπως και κατά EC8, 2004), ως ο λόγος:

$$\rho_w = \frac{\text{όγκος συνδετήρων}}{\text{όγκος περισφιγμένου πυρήνα}} \quad (2.6)$$

s η απόσταση μεταξύ συνδετήρων

h_0 η διάσταση του περισφιγμένου πυρήνα

f_{lc} η αντοχή σε θλίψη του μη περισφιγμένου ΕΣ (σε psi, όπου 1 psi = 6.894757 KPa)

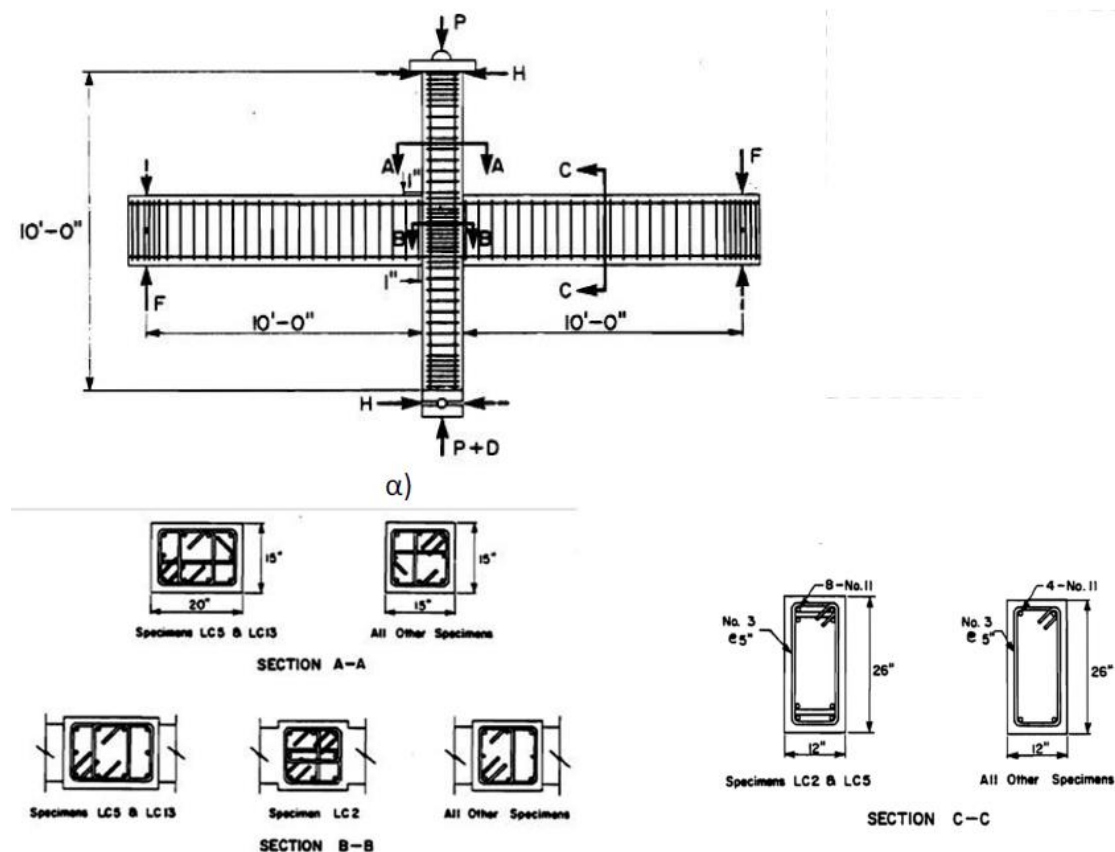
ε_{cr} κρίσιμη παραμόρφωση λυγισμού των διαμήκων οπλισμών. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, για το συγκεκριμένο χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε, καθορίστηκε ίσο προς $\varepsilon_{cr} = 0.045$.

2.2.2.3 Rabbat et al. (1982)

Οι Rabbat et al. (1982) μελέτησαν πειραματικά τη συμπεριφορά εσωτερικών κόμβων δοκού - υποστύλωματος από ΕΣ, υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν δεκαέξι κόμβοι φυσικής κλίμακας από ΕΣ και από ΣΚΒ, με μεταβλητές του πειραματικού προγράμματος:

- Την κατηγορία σκυροδέματος: χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι ΕΑ: διογκωμένη άργιλος (expanded clay) και διογκωμένος σχιστόλιθος (expanded shale), με το ειδικό βάρος νωπού σκυροδέματος που προέκυψε να είναι 1840 και 1910 kg/m³ αντίστοιχα, τη δε θλιπτική αντοχή περίπου 35 MPa
- Διάσταση των υποστύλωματων: δοκιμάστηκαν κόμβοι φυσικής κλίμακας υποστύλωματα διαστάσεων 38x38 cm² και 38x51 cm² (Σχήμα 2.6)

- Τη διαμήκη και την εγκάρσια όπλιση των υποστλωμάτων: δοκιμάσθηκαν κόμβοι με ποσοστά διαμήκους οπλισμού 1.47, 1.56 και 1.84%, και με ογκομετρικό ποσοστό συνδετήρων ρ_w ίσο με 0.75, 1.5 και 3.0 %.
- Το μέγεθος της αξονικής στο υποστώλωμα: εφαρμόσθηκαν ποσοστά της θλιπτικής αντοχής σχεδιασμού N_{ru} , 10, 20, 30 και 60%, όπου η αντοχή σχεδιασμού κατά τον Κανονισμό ACI 318 (1977) είναι ίση με $N_{ru} = 0.7 \cdot [0.85 \cdot f_{ic} \cdot (A_c - A_s) + A_s \cdot f_y]$.



Σχήμα 2.6: α) Γεωμετρία και β) Όπλιση των κόμβων Από ΕΣ των Rabbat et al. (1982) (1 in.= 25.4 mm)

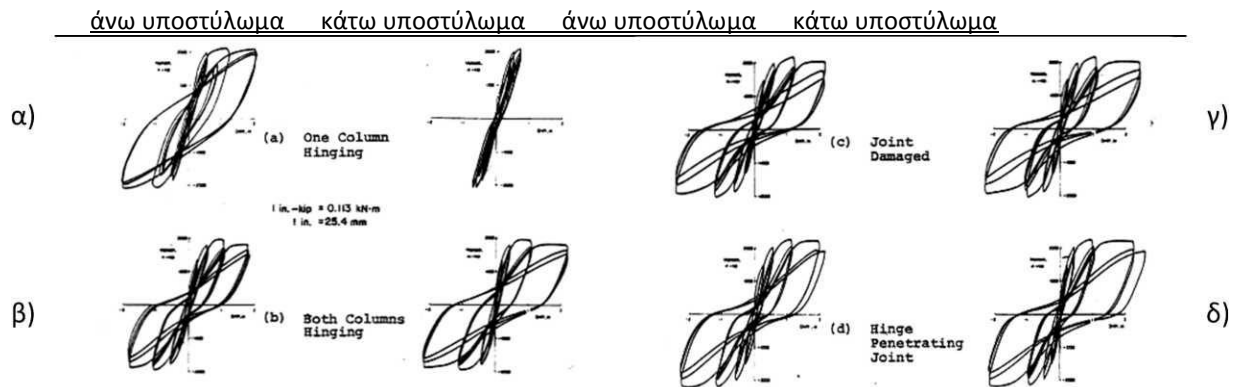
Τα αποτελέσματα του πειραματικού προγράμματος έδειξαν ότι:

Οι κόμβοι περισφιγμένων υποστλωμάτων από ΕΣ συμπεριφέρθηκαν με παρόμοιο τρόπο με αντίστοιχους από ΣΚΒ, με επαρκή πλαστιμότητα και δυνατότητα ενεργειακής απορρόφησης σε ανακύκλιση μεγάλων παραμορφώσεων.

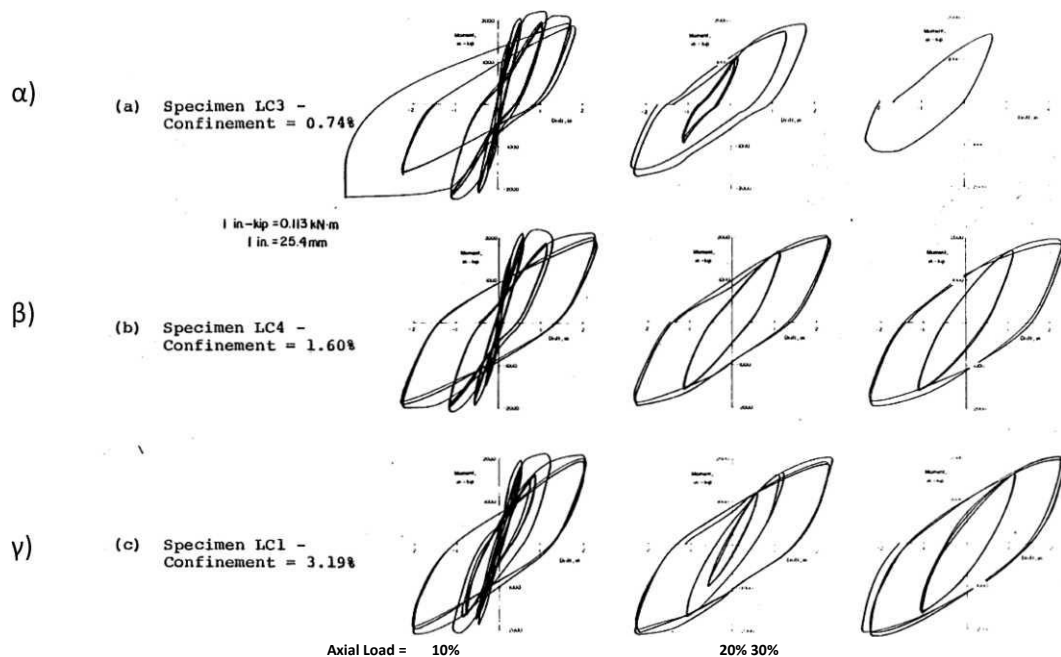
Ο συντηρητισμός των απαιτήσεων στον Κανονισμό σχεδιασμού (ACI 318, έκδοση 1977) που αφορούν την περίσφιγξη των υποστλωμάτων από ΣΚΒ, παραμένει αμετάβλητος και στην περίπτωση των υποστλωμάτων από ΕΣ.

υπολογιζόμενη Κανονιστικά, με βάση τις τότε ισχύουσες διατάξεις του ACI 318 (έκδοση 1977)³.

Συμπεραίνεται ότι τα υποστυλώματα από ΕΣ με συμβατές λεπτομέρειες όπλισης δεν υστερούν σε εφαρμοσιμότητα σε κατασκευές όπου απαιτείται πλάσιμη σεισμική απόκριση.



Σχήμα 2.7: Ενδεικτικά πειραματικά αποτελέσματα από την ανακύκλιση των υποστυλωμάτων: α) Άρθρωση ενός υποστυλώματος, β) Άρθρωση άνω και κάτω υποστυλώματος, γ) Βλάβη στο σώμα του κόμβου, δ) Διείσδυση πλαστικής βλάβης μέσα στο σώμα του κόμβου

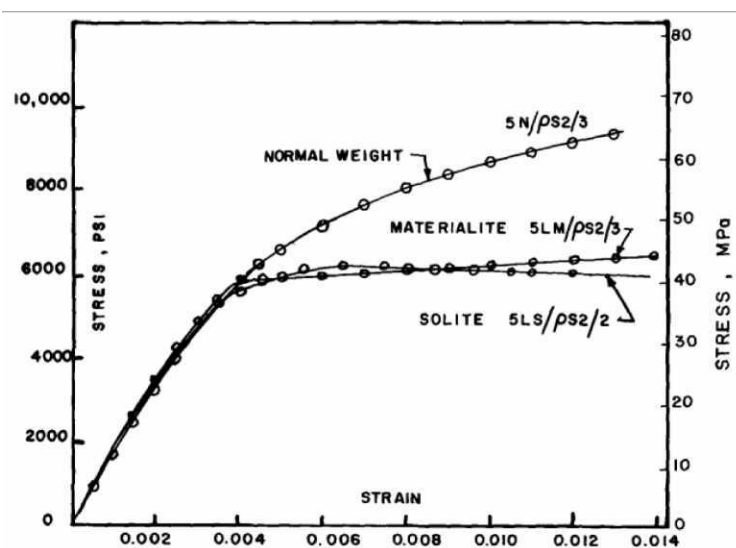


³ Σημειώνεται ότι παρόμοια αύξηση της θεωρητικής αντοχής απέδωσαν και τα υποστυλώματα Υ1 και Υ2 που δοκιμάσθηκαν στην ενότητα εργασίας 8 του προγράμματος 716-BET-2013.

Σχήμα 2.8: Επίδραση της περίσφιγξης σε τρία διαφορετικά αζονικά (10%, 20% και 30% της N_{ru}): α) Δοκίμιο με $\rho_w = 0.74\%$, β) Δοκίμιο με $\rho_w = 1.6\%$ και γ) Δοκίμιο με $\rho_w = 3.19\%$.

2.2.2.4 Shah et al. (1983)

Οι Shah et al. (1983) πραγματοποίησαν πειράματα σε υποστυλώματα από ΕΣ κυκλικής διατομής διαστάσεων 75x150 mm και 150x300 mm. Το ΕΑ που χρησιμοποιήθηκε ήταν διογκωμένος σχιστόλιθος (expanded shale, τύποι Materialite και Solite). Για την κατασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν τρεις συνθέσεις, με το ΕΣ της κάθε μίας να έχει θλιπτική αντοχή 21 MPa, 35 MPa και 48 MPa, αντίστοιχα, ενώ το ειδικό βάρος του ΕΣ ήταν 1900 kg/m³. Οι ερευνητές παρατήρησαν πως η αστοχία της περίσφιγξης συνέβη με κλιμακωτό τρόπο και πως η αύξηση της αντοχής στο ΕΣ λόγω της δράσης της περίσφιγξης ήταν σημαντικά μειωμένη συγκριτικά με αντίστοιχα δοκίμια από ΣΚΒ (Σχήμα). Όμως, τα πειράματα απέδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί μια επιθυμητή συμπεριφορά ελαστοπλαστικής μορφής από το ΕΣ, αυξάνοντας κατάλληλα τα ποσοστά οπλισμού περίσφιγξης.



Σχήμα 2.9: Πειραματικά διαγράμματα μέσης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης περισφιγμένου ΣΚΒ και ΕΣ

Πρέπει να σημειωθεί πάντως ότι η αντοχή σε διαρροή του οπλισμού περίσφιγξης που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική αυτή εργασία ήταν της τάξης των 1400 MPa χωρίς πλατώ διαρροής, γεγονός που μπορεί να οδηγεί σε διαφορετική συμπεριφορά από αυτή που θα παρατηρούταν αν ο οπλισμός είχε συνήθη χαρακτηριστικά.

2.2.2.5 Hussain et al. (1988)

Οι Hussain et al. (1988) εκτέλεσαν ένα πειραματικό πρόγραμμα σε τριάντα ένα οπλισμένα και εννέα άοπλα δοκίμια υποστυλωμάτων από ΕΣ με λόγο ύψους προς πλάτος 1 προς 4, υπό κεντρική θλίψη. Το ΕΑ που χρησιμοποιήσαν ήταν LECA. Οι παράμετροι του προγράμματος ήταν η διάταξη και απόσταση των συνδετήρων, η κατανομή του διαμήκους οπλισμού και ο τύπος του ΕΣ που χρησιμοποιήθηκε, του οποίου η θλιπτική αντοχή κυμαίνονταν μεταξύ 26 MPa και 45 MPa.

Τα σημαντικότερα αποτελέσματα της εργασίας αυτής συνοψίζονται παρακάτω:

Η αύξηση της περίσφιγξης μέσω πύκνωσης των συνδετήρων ή αύξησης της διαμέτρου των είχε ευμενή δράση στην αύξηση της μέγιστης θλιπτικής αντοχής και στη μείωση της αρνητικής κλίσης του φθιτού κλάδου μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής και στο ΕΣ, όπως παρατηρείται και στο ΣΚΒ.

Εν τούτοις, παρατηρήθηκε ότι η ευμενής αυτή δράση της περίσφιγξης εμφανίσθηκε να μειώνεται, όσο αυξανόταν η θλιπτική αντοχή του ΕΣ.

Παρατηρήθηκε επίσης ότι ο εγκάρσιος οπλισμός περίσφιγξης σπάνια έφτανε στη διαρροή πριν το δοκίμιο να φτάσει στη μέγιστη αξονική θλιπτική του τάση, άρα η συνήθης πρακτική να υπολογίζεται η επίδραση της περίσφιγξης με την εγκάρσια τάση που παρέχεται από τον οπλισμό περίσφιγξης να ισούται με την τιμή διαρροής, όπως στο ΣΚΒ, είναι κατά της ασφαλείας και της πειραματικής παρατήρησης.

Συγκρίνοντας αναλυτικά προσομοιώματα περίσφιγξης που έχουν προταθεί για το ΣΚΒ με τα πειραματικά αποτελέσματα, οι συγγραφείς έδειξαν ότι η συσχέτιση μεταξύ αυτών των προβλέψεων και της πειραματικής απόκρισης ήταν μικρή, με εξαίρεση το προσομοίωμα που είχε προταθεί για ΣΚΒ από τους Sheikh et al. (1982), το οποίο απέδωσε καλή συσχέτιση με τα πειραματικά αποτελέσματα, αν και υπερεκτιμούσε την απόκριση σε σχέση με το πείραμα.

Έτσι, με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, πρότειναν μια νέα καταστατική σχέση για το περισφιγμένο ΕΣ, προχωρώντας σε τροποποιήσεις του παραπάνω προσομοιώματος των Sheikh et al. (1982) για εφαρμογή στο ΕΣ, καθώς το παραπάνω υπερεκτιμούσε την επίδραση του εγκάρσιου οπλισμού περίσφιγξης. Οι τροποποιήσεις αφορούσαν:

α) Στον υπολογισμό μίας ισοδύναμης τάσης περίσφιγξης που παρέχεται από τον εγκάρσιο οπλισμό, σε αντίθεση με την αναλυτική σχέση των Sheikh et al. (1982) για ΣΚΒ όπου θεωρείται ότι η τάση αυτή ισούται με τη τάση διαρροής του οπλισμού,

β) Στην τροποποίηση της κλίσης του μεταπλαστικού κλάδου έως την απομένουσα αντοχή του περισφιγμένου ΚΔ

γ) Στη μείωση της απομένουσας αντοχής του περισφιγμένου ΚΔ σε σχέση με τη θεωρούμενη από τους Sheikh et al. (1982) για ΣΚΒ (ίσης προς 20% της μέγιστης αντοχής).

2.2.3 Κανονιστικό πλαίσιο

2.2.3.1 Περίσφιγξη ΕΣ κατά EC [EC2, § 11.3.7]

Η αυξημένη / περισφιγμένη χαρακτηριστική αντοχή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το ΕΣ, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα, είναι η εξής:

$$f_{lck,c} = f_{lck} \left(1 + \frac{k \sigma_2}{f_{lck}} \right) \quad (2.7)$$

Όπου

- k 1.1 για ΕΣ με κοινή άμμο ως λεπτό αδρανές
 1.0 για ΕΣ με ελαφρά τόσο τα λεπτά όσο και τα χονδρά αδρανή

$$\varepsilon_{lc2,c} = \varepsilon_{lc2} \left(\frac{f_{lck,c}}{f_{lck}} \right)^2 \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_{lcu2,c} = \varepsilon_{lcu2} + 0.2 \frac{\sigma_2}{f_{lck}} \quad (2.9)$$

όπου τα ε_{lc2} και ε_{lcu2} ορίζονται στο § 3.5.6.

2.2.3.2 Διατμητική Αντοχή [EC2 § 11.6.1]

Η τιμή σχεδιασμού της αντοχής σε τέμνουσα, χωρίς οπλισμό διάτμησης είναι:

$$V_{IRd,c} = \left[C_{IRd,c} \eta_1 k (100 \rho_l f_{lck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d \geq (v_{l,min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d \quad (2.10)$$

Όπου

$$\eta_1 = 0.40 + 0.6\rho/2200$$

σ_{cp} η μέση θλιπτική τάση στη διατομή λόγω της αξονικής δύναμης και της προέντασης

$$C_{IRd,c} = 0.15/\gamma_c$$

$$v_{l,min} = 0.0030 k^{\frac{3}{2}} f_{lck}^{\frac{1}{2}}$$

$$k_1 = 0.15$$

Οι τιμές $C_{IRd,c}$, $v_{1,min}$, k_1 , ορίζονται στο Εθνικό Προσάρτημα, με το ελληνικό να χρησιμοποιεί τις συνιστώμενες τιμές του EC2.

Ο μειωτικός συντελεστής για την αντοχή σε συντριβή των θλιπτήρων του ΕΣ είναι ο v_1 και ισούται με

$$v_1 = 0.5 \cdot \eta_1 \left(1 - \frac{f_{lck}}{250}\right) \quad (2.11)$$

ενώ για το ΣΚΒ ο v_1 (= v για την αντοχή σε συντριβή θλιπτήρων) ισούται με

$$v = 0.6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250}\right] \quad (2.12)$$

με f_{lck} και f_{ck} σε MPa.

Η διαφοράς με το ΣΚΒ όσον αφορά τη διατμητική αντοχή οι εξής:

1. Ο $C_{IRd,c}$ ισούται με $0.15/\gamma_c$, μικρότερος από τον $C_{Rd,c} = 0.18/\gamma_c$.
2. Ο $v_{1,min}$ ισούται με $0.0030 k^{\frac{3}{2}} f_{lck}^{\frac{1}{2}}$ ενώ ο v_{min} με $0.0035 k^{\frac{3}{2}} f_{ck}^{\frac{1}{2}}$.
3. Ο συντελεστής v_1 είναι μειωμένος για το ΕΣ.
4. Η μείωση του v_1 μειώνει αναλογικά και την διατμητική αντοχή σε συντριβή των λοξών θλιπτήρων, $V_{Rd,max}$ (EC2 Εξ. 6.9):

$$V_{Rd,max} = a_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} / (\cot\theta + \tan\theta) \quad (2.13)$$

2.2.3.3 Διαθέσιμη Ικανότητα Στροφής [EC2 § 11.5.1]

Για το ΕΣ, η τιμή του θ_{pl} πρέπει να μειωθεί κατά το συντελεστή $\epsilon_{icu2}/\epsilon_{cu2}$.

2.3 Συμπεράσματα Βιβλιογραφικής Διερεύνησης

Σύμφωνα με τα την υπάρχουσα βιβλιογραφία, φαίνεται ότι το ΕΣ, λόγω της μορφής της ρηγματώσής του και του γεγονότος ότι δεν χαρακτηρίζεται από εκτεταμένη εγκάρσια διόγκωση όπως το ΣΚΒ, δεν επιφέρει κατά την αλληλεπίδρασή του με τον περισφιγγοντα οπλισμό εντάσεις διαρροής του οπλισμού και σημαντικές εγκάρσιες δυνάμεις, με αποτέλεσμα να μην είναι εξ ίσου αποδοτικό σε περισφιγξη όσο το ΣΚΒ. Λόγω της εκτενούς χρήσης του, έχουν γίνει πολλές πειραματικές μελέτες για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του σε κεντρική θλίψη, ενώ έχουν προταθεί και καταστατικές σχέσεις τάσεων - παραμορφώσεων, ειδικά για ΕΣ. Εν τούτοις, η πλειονότητα των πειραμάτων έχει διερευνήσει ΕΣ με άλλα ΕΑ ή και με υψηλότερο ειδικό βάρος, σε σχέση με το ΚΔ της παρούσης. Για τον λόγο αυτό, λόγω και της σημασίας της περισφιγξης στον αντισεισμικό σχεδιασμό, διερευνάται στην παρούσα εργασία πειραματικά η συμπεριφορά του περισφιγμένου κισηροδέματος υπό κεντρική θλίψη.

3 Πειραματική Διερεύνηση

3.1.1 Εισαγωγή

Κατασκευάστηκαν εικοσιτέσσερα οπλισμένα και τέσσερα άοπλα πρισματικά δοκίμια υποστλωμάτων από ΚΔ, με παραμέτρους κατασκευής όπως περιγράφονται παρακάτω, τα οποία και ελέγχθηκαν σε μονοτονικά αύξουσα καταπόνηση υπό κεντρική θλίψη. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αφορούν τη συμπεριφορά των δοκιμίων αυτών σε κεντρική θλίψη, με έμφαση στις παραμέτρους απόκρισης:

- Στο συνολικό διάγραμμα μέσης τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης του περισφιγμένου πυρήνα, $\sigma_c^* - \varepsilon_c^*$
- Στη μέγιστη θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου πυρήνα f_c^*
- Στην αντίστοιχη μέση παραμόρφωση
- Στην οριακή παραμόρφωση του περισφιγμένου τμήματος έως τη συμβατική (s_{cu}^*) και την τελική αστοχία (ε_{max}^*),
- Στην εγκάρσια διόγκωση και στην ενεργοποίηση της συμμετοχής του οπλισμού περίσφιγξης Στην παραλαβή του φορτίου κατά τη διόγκωση του ΚΔ στον περισφιγμένο πυρήνα, με αύξηση του φορτίου και
- Στη μορφή της αστοχίας.

Όλα τα παραπάνω αποτιμώνται σε συνάρτηση με τις κατασκευαστικές παραμέτρους, που είναι:

- Η θλιπτική αντοχή του άοπλου ΚΔ κατασκευής,
- Η διάσταση των δοκιμίων,
- Η διάταξη, διάμετρος και η μεταξύ τους απόσταση των συνδετήρων περίσφιγξης,
- Το ποσοστό και η διάμετρος του διαμήκους οπλισμού, και,

Έμμεσα, η βασική παράμετρος ελέγχου, δηλαδή ο βαθμός ισοδύναμης περίσφιγξης, όπως αυτός καθορίζεται στους εν ισχύει Κανονισμούς μέσω του γινομένου του συντελεστή αποδοτικότητας και του μηχανικού ποσοστού εγκάρσιου οπλισμού, α_ω . Τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τις προβλεπόμενες σχέσεις σχεδιασμού των Κανονισμών αντισεισμικού σχεδιασμού, που ισχύουν για την αποτίμηση της περίσφιγξης υποστλωμάτων και τοιχωμάτων συναρτήσει της Κατηγορίας Πλαστιμότητας σχεδιασμού (EC8, 2004), για έργα από ΣΚΒ.

3.1.2 Περίληψη Εργασιών

Οι πειραματικές εργασίες που πραγματοποιήθηκαν και περιλαμβάνονται στην παρούσα εργασία είναι οι εξής:

- Κατασκευάστηκαν δύο κατηγορίες αντοχής ΚΔ που καθορίστηκαν από το ΕΚΕΤ στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος 716-BET-2013 (ΕΠ) (βλ. λεπτομέρειες για το ΕΠ στο § 1). Οι κωδικοί αριθμοί των συνθέσεων, όπως αναλύονται στην Ενότητα Εργασίας 05 του ΕΠ, είναι οι 15538 και 15820 και αφορούν και οι δύο ΚΔ, με στοχευόμενη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή περίπου 25 MPa και 35 MPa, και μέση θλιπτική αντοχή 32 MPa και 44 MPa, αντίστοιχα.
- Για τα δοκίμια αυτά, χρησιμοποιήθηκαν:
 - Δύο διάμετροι οπλισμών συνδετήρων: χρησιμοποιήθηκαν συνδετήρες Φ8 και Φ10,
 - Δύο διάμετροι διαμήκων οπλισμών: χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι Φ12 και Φ14,
 - Τρεις διατάξεις συνδετήρων πρακτικού ενδιαφέροντος: δίμητος, τρίμητος με ρόμβο και τετράμητος,
 - Διαφορετικές αποστάσεις εγκάρσιου οπλισμού που απαντώνται στην πράξη (5, 7.5, 10, 12,5 cm), κατά περίπτωση, ανάλογα με το βαθμό αποδοτικότητας περίσφιγξης.

Αποτέλεσμα αυτής της ευρείας παραμετρικής ανάλυσης είναι να διερευνηθεί η θλιπτική συμπεριφορά κοντών υποστυλωμάτων από ΚΔ με ένα εύρος μηχανικού ποσοστού εγκάρσιου οπλισμού ω μεταξύ 0.20 έως 1.20, με αποδοτικότητα περίσφιγξης $\alpha \cdot \omega$ μεταξύ 0.05 έως 0.56.

Με βάση την παραπάνω ταξινόμηση κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ (ΕΟΣ ΕΜΠ) εικοσιτέσσερα υποστυλώματα από οπλισμένο και τέσσερα από άοπλο ΚΔ, και σκυροδετήθηκαν με έτοιμο ΚΔ που παρείχε η Lafarge Beton από τη μονάδα της Ραφίνας, στο χώρο του ΕΟΣ ΕΜΠ. Τα υποστυλώματα ήταν πρισματικά, διατομής 15x15, 20x20 ή 25x25 cm, με λόγο πλάτους προς ύψος σε όλες τις περιπτώσεις ίσος με 3, και οπλίστηκαν με τρεις διαφορετικές διατάξεις εγκάρσιου οπλισμού περίσφιγξης σε διαφορετικές αποστάσεις, ώστε να επιτευχθεί διαφορετικός βαθμός αποδοτικότητας περίσφιγξης. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά του κάθε δοκιμίου επιλέχθηκαν με σκοπό να προσεγγιστεί όλο το φάσμα τιμών της ισοδύναμης περίσφιγξης $\alpha \cdot \omega_w$, από 0.10 έως και 1.0, όπου α ο συντελεστής αποδοτικότητας περίσφιγξης και ω_w το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό των οπλισμών περίσφιγξης, όπως προκύπτουν από τις διατάξεις του EC8 (2004).

Κατασκευαστικά, η όπλιση των ακραίων τρίτων των δοκιμίων (καθ' ύψος) μορφώθηκε με πρόσθετο εσωτερικό (χαλύβδινο) διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό, έτσι ώστε το δοκίμιο να είναι πλέον ενισχυμένο στα άκρα και η αστοχία να περιορισθεί στο μεσαίο τρίτο - το ελεγχόμενο τμήμα τους, όπου ήταν και ο χώρος της συμβατικής δοκιμής και μέτρησης των παραμορφώσεων. Οι διαμήκεις οπλισμοί ήταν από νευροχάλυβα Φ12 και Φ14 ανάλογα με τη διάσταση, κατηγορίας B500C, όπως και οι συνδετήρες, οι οποίοι ήταν Φ8 και Φ10, κατά περίπτωση. Για την κατασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν δύο συνθέσεις ΚΔ: η πρώτη αντιστοιχεί σε κατηγορία LC22 (κωδικός 15538) με στοχευόμενη θλιπτική αντοχή μεγαλύτερη από 25 MPa περίπου και η δεύτερη σε αντοχή LC30 (κωδικός 15820) με στοχευόμενη θλιπτική αντοχή μεγαλύτερη από 35 MPa. Τα είκοσι δοκίμια σκυροδετήθηκαν με την πρώτη σύνθεση και τα υπόλοιπα τέσσερα με τη δεύτερη, με ισάριθμα άοπλα δοκίμια αντίστοιχων διαστάσεων κατά περίπτωση, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Μετά τη σκυροδέτηση έγινε η κατάλληλη συντήρηση με υγρές λινάτσες και συνεχή διαβροχή για μεγάλο χρονικό διάστημα και κατόπιν, σε διάστημα μεταξύ δύο έως τριών περίπου μηνών από τη χύτευση όλα τα υποστυλώματα δοκιμάσθηκαν έως την αστοχία. Πριν τη δοκιμή, τα υποστυλώματα ενισχύθηκαν εξωτερικά με πρόσθετη περιτύλιξη από φύλλα από σύνθετα Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΝΟΠ) με ίνες άνθρακα (ανθρακόνημα), στα ακραία τρίτα του ύψους τους, για ενίσχυση των άκρων εν επαφή με τις πλάκες της μηχανής θλίψης και αποφυγή φαινομένων τοπικής αστοχίας, όποτε αυτό ήταν εφικτό⁴. Επί πλέον, έγινε πριν το πείραμα και πρόσθετη μικρής κλίμακας σκυροδέτηση επιπέδωσης στο άνω σκυροδετημένο τμήμα τους, για καλύτερη επαφή της πλάκας μηχανής θλίψης με την άνω επιφάνεια του δοκιμίου και αποφυγή παρασιτικών τάσεων στην επαφή (η κάτω επιφάνεια λόγω του ότι ήταν καλουπωμένη ήταν πολύ καλύτερης ποιότητας στο τελειώμά της).

Όλα τα δοκίμια δοκιμάσθηκαν σε μονοτονικά αύξουσα καταπόνηση υπό κεντρική θλίψη έως την αστοχία στη μηχανή θλίψης ικανότητας 600 τόνων του Εργαστηρίου Αντοχής Υλικών ΕΜΠ (ΕΑΥ ΕΜΠ), με άμεση μέτρηση της αντοχής προς αξονική παραμόρφωση. Για την εκτίμηση των παραμορφώσεων των δοκιμίων διαμήκως και εγκάρσιως χρησιμοποιήθηκαν εξωτερικά βελόμετρα (LVDTs) τα οποία προσαρτήθηκαν στο δοκίμιο πριν το πείραμα όσο και εσωτερικά ηλεκτρονικά μηχανοστάσια (Strain Gauges, SG), τα οποία επικολλήθηκαν επάνω στους διαμήκεις και εγκάρσιους οπλισμούς πριν τη σκυροδέτηση, και παρέμειναν μέσα στο δοκίμιο. Επί πλέον με τις πειραματικές μετρήσεις μέσης τάσης πυρήνα και

⁴ Σε κάποια δοκίμια, ιδιαίτερα σε αυτά με μεγάλο ποσοστό περίσφιξης, όπου η υπεραντοχή τους στο ελεγχόμενο μέσο τρίτο ήταν μεγαλύτερη από αυτήν λόγω της πρόσθετης υπερόπλισης με εξωτερική ενίσχυση του άνω άκρου, η αστοχία έγινε πρώτα στο άνω άκρο και κατόπιν στο μέσον.

ανηγμένης παραμόρφωσης του μεσαίου (ελεγχόμενου) τρίτου, υπολογίσθηκαν επί πλέον για λόγους σύγκρισης οι θεωρητικά αναμενόμενες τιμές της αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος και της μέγιστης αξονικής παραμόρφωσης κατά EC2 και EC8 (2004), τόσο για ΣΚΒ όσο και για ΚΔ, οι οποίες συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες που προκύπτουν πειραματικά.

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων και των αναλύσεων, συμπεραίνεται ότι:

Το περισφιγμένο ΚΔ συμπεριφέρεται σύμφωνα με τις Κανονιστικές προβλέψεις για το ΕΣ και εμφανίζει δυνατότητα αυξημένων αξονικών παραμορφώσεων σε ικανοποιητικό επίπεδο,

Η δράση της περισφιγξης στο ΚΔ είναι ευμενής, καθώς αυξάνει τη μέγιστη θλιπτική αντοχή, την αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση και την ανηγμένη παραμόρφωση του ΚΔ έως τη συμβατική αστοχία.

3.2 Προετοιμασία Δοκιμίων

3.2.1 Κατασκευή των Δοκιμίων

Για την πειραματική αποτίμηση της απόκρισης του περισφιγμένου ΚΔ, κατασκευάσθηκαν είκοσι τέσσερα οπλισμένα υποστυλώματα από ΚΔ και τέσσερα άοπλα. Τα δοκίμια αυτά υποβάλλονται σε αξονική θλιπτική καταπόνηση μέχρι την αστοχία. Όλα τα δοκίμια έχουν λόγο ύψος προς πλάτος 1 προς 3. Επειδή οι περιοχές των άκρων καθ' ύψους των δοκιμίων κατά τη φόρτιση αποκτούν σύνθετη καταπόνηση λόγω της αλληλεπίδρασης με τη μηχανή θραύσης, η αστοχία που μελετάται και ελέγχεται είναι αυτή που λαμβάνει χώρα στη περιοχή του μέσου τρίτου του δοκιμίου.

Οι διαστάσεις των διατομών αυτών των δοκιμίων είναι 15x15, 20x20 ή 25x25 cm και η σύνθεση του ΚΔ είτε LC22 ή LC30. Η διάμετρος του διαμήκους οπλισμού για όλα τα δοκίμια διατομής 15x15 και 20x20 cm είναι Φ12 ενώ για διατομή 25x25 cm χρησιμοποιούνται οπλισμοί Φ14. Η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι 2 cm. Για να διασφαλιστεί ότι στο χώρο του μέσου καθ' ύψος των υποστυλωμάτων θα αναπτυχθεί ομοιόμορφη τάση, επιλέγεται λόγος ύψους προς πλάτος ίσος με τρία (όπως οι πρότυπες δοκιμές σε θλίψη, αλλά και αντίστοιχα πειράματα των Manrique et al. 1979, Allington, 2003).

Από τα είκοσι οκτώ συνολικά υποστυλώματα, τα είκοσι τρία κατασκευάσθηκαν στο χώρο του ΕΟΣ ΕΜΠ από ΚΔ LC22 και τα υπόλοιπα πέντε από LC30. Και στις δύο σκυροδετήσεις το ΚΔ παρασκευάσθηκε στην μονάδα παραγωγής της Lafarge στη Ραφήνα. Για την κατασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν ξυλότυποι που κατασκευάσθηκαν στο εργαστήριο από εξωτερικό υπεργολάβο του ΕΟΣ ΕΜΠ (Εικόνα 3.1.1).



α



β

Σχήμα 3.1: Κατασκευή των ξυλοτύπων εκτός του ΕΟΣ ΕΜΠ για α) Τα δεκαεννέα δοκίμια LC22 και β) τα πέντε δοκίμια LC30

Κατά τη διάρκεια της κάθε σκυροδέτησης, έγινε δονητική συμπύκνωση του σκυροδέματος. Δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα απόμιξης ενώ και στις δύο συνθέσεις ΚΔ η εργασιμότητα ήταν ικανοποιητική. Τα υποστυλώματα συντηρήθηκαν εκτός του κτιρίου, σε ανοικτό μη στεγασμένο χώρο, με υγρή λινάτσα συντήρησης η οποία διατηρούνταν κορεσμένη με νερό για επτά ημέρες με καθημερινή διαβροχή. Στις δεκατέσσερις ημέρες αφαιρέθηκαν οι ξυλότυποι και τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στον εσωτερικό ισόγειο χώρο του ΕΟΣ ΕΜΠ μέχρι την ημέρα θραύσης τους.

3.2.2 Υλικά Κατασκευής

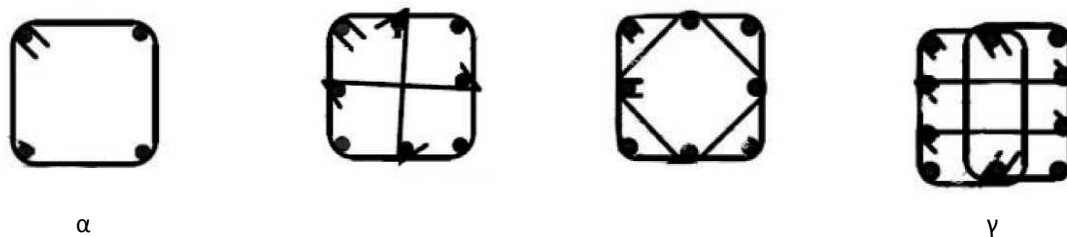
Η παραγωγή του ΚΔ LC22 και LC30 πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις της Lafarge στη Ραφήνα. Η σκυροδέτηση έγινε στο χώρο του ΕΟΣ ΕΜΠ, όπου λήφθηκαν κυβικά δοκίμια 100x100x100 mm, κυλινδρικά μήκους 200 και διαμέτρου 100 mm και κυλινδρικά μήκους 300 και διαμέτρου 150 mm σε μεταλλικές μήτρες. Οι μήτρες αφαιρέθηκαν στις δύο ημέρες ενώ η συντήρηση έγινε όπως στα υποστυλώματα, ώστε να είναι συγκρίσιμες οι αντοχές τους. Οι παραπάνω εργαστηριακές δοκιμές παρουσιάζονται αναλυτικά στην Ενότητα Εργασίας 05 του , όπου δίδονται και τα πειραματικά αποτελέσματα

Ο χάλυβας οπλισμού ήταν κατηγορίας B500C. Από δοκιμές εφελκυσμού που διενεργήθηκαν σε τεμάχια Φ8, Φ12 και Φ14 αποτιμήθηκε μέση αντοχή διαρροής ίση προς 530 MPa, 650 MPa⁵ και 530 MPa, αντίστοιχα, με αντοχή διάρρηξης περίπου στα 670 MPa.

⁵ Πιθανόν τα τεμάχια να προήλθαν από κουλούρα μετά από κατεργασία. Δεν θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικά.

3.3 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

Στο πειραματικό πρόγραμμα της παρούσης εργασίας χρησιμοποιούνται τρεις τύποι εγκάρσιας όπλισης περίσφιγξης με διαφορετική αποδοτικότητα: α) ο πρώτος αποτελείται από απλό τετραγωνικό δίτητο συνδετήρα, β) ο δεύτερος από τρίτητο συνδετήρα που περιλαμβάνει εξωτερικό τετραγωνικό δίτητο με εσωτερικό συνδετήρα σχήματος ρόμβου, είτε (στις μικρές διαστάσεις) εξωτερικό δίτητο με δύο κάθετους σιγμοειδείς και γ) ο τρίτος από τετραγωνικό τετράτητο συνδετήρα που περιλαμβάνει εξωτερικό τετραγωνικό και δύο εσωτερικούς ορθογωνικούς, όπως δείχνεται στο επόμενο σχήμα. Οι εγκάρσιοι οπλισμοί έχουν διάμετρο είτε Φ8 είτε Φ10, κατά περίπτωση.



Σχήμα 3.2: Τυπικές διατάξεις συνδετήρων των δοκιμίων που δοκιμάστηκαν: α) δίτητος, β) τρίτητος και γ) τετράτητος συνδετήρας

Ο συνδυασμός των διαστάσεων των διατομών των υποστυλωμάτων, της διάταξης των συνδετήρων και των κατακορύφων ράβδων, της διαμέτρου των συνδετήρων και της απόστασης s μεταξύ των εγκάρσιων οπλισμών περίσφιγξης επιλέγεται με σκοπό την προσέγγιση ενός ευρύτατου εύρους τιμών της ισοδύναμης περίσφιγξης $\alpha \cdot \omega_w$ όπως χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό, όπου α ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης, ίσος με το γινόμενο των συντελεστών αποδοτικότητας σε κάτοψη και τομή όψης, $\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s$ και ω_w το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό των οπλισμών περίσφιγξης, ίσο προς το γινόμενο των λόγων όγκου συνδετήρων προς όγκο περισφιγμένου πυρήνα και αντοχή διαρροής οπλισμού συνδετήρων προς θλιπτική αντοχή του ΚΔ πριν να περισφιχθεί. Ένα δεύτερο κριτήριο επιλογής των παραπάνω μεγεθών ήταν η απαίτηση του αναμενόμενου άνω ορίου στο μέγιστο αξονικό θλιπτικό φορτίο, λόγω περιορισμών του πειραματικού εξοπλισμού.



α)



β)

Σχήμα 3.3: Ενίσχυση των δοκιμίων στα άκρα. α) Διαδικασία επικόλλησης των ρητινών και β) Τυπικό ενισχυμένο δοκίμιο

Όπως ήδη προαναφέρθηκε, οι περιοχές των άκρων παρουσιάζουν σύνθετη καταπόνηση. Για το λόγο αυτό, για να αποφευχθεί μη επιθυμητή αστοχία, το άνω και κάτω τρίτο του ύψους του κάθε κοντού υποστυλώματος ενισχύθηκε ως ακολούθως (Σχήμα 3.2.2): ο εγκάρσιος οπλισμός περισφιγξης επιλέγεται ενισχυμένος και σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο στο μεσαίο τμήμα των δοκιμίων. Συγκεκριμένα, στα άκρα χρησιμοποιείται ο «Τύπος 3» του οπλισμού περισφιγξης που παρουσιάζει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα περισφιγξης από τους τρεις τύπους που έχουν επιλεγεί και ταυτόχρονα μειώνεται η κατακόρυφη απόσταση s μεταξύ των συνδετήρων. Επιπλέον, επειδή μετά τη θραύση του πρώτου δοκιμίου 15x15 cm, το άνω άκρο αστόχησε πρόωρα, όλα τα υπόλοιπα δοκίμια διαστάσεων 15x15 cm και 20x20 cm ενισχύθηκαν με περιμετρική περιτύλιξη από ανθρακόνημα SikaWrap το οποίο επικολλήθηκε στο κάθε δοκίμιο με ρητίνη SikaDur 330 (Σχήμα 3.2.4).



α) β)

Σχήμα 3.4: Διαδικασία χύτευσης αυτοεπιπεδούμενης τσιμεντοκονίας υψηλής αντοχής στην άνω στάθμη σκυροδέτησης των υποστυλωμάτων

Η άνω επιφάνεια των δοκιμίων, λόγω του ότι είναι η ελεύθερη επιφάνεια σκυροδέτησης, έχει τραχύτητα η οποία μπορεί να επηρεάσει δυσμενώς την ομαλή κατανομή των επιβαλλομένων τάσεων. Για το λόγο αυτό, στα δοκίμια με διαστάσεις διατομής 15x15 και 20x20 cm, τα οποία, λόγω μικρότερου μεγέθους, επηρεάζονται περισσότερο από την τραχύτητα αυτή, η άνω επιφάνεια τους επικαλύφθηκε, μετά την ενίσχυση, με αυτοεπιπεδούμενο τσιμεντοκονίαμα υψηλής αντοχής που παρήχθη στο ΕΟΣ ΕΜΠ (Σχήμα 3.2.3), με σύνθεση και υλικά τα οποία παρασχέθηκαν από τη Lafarge Beton.

Τα είκοσι τρία εκ των είκοσι οκτώ υποστυλωμάτων κατασκευάστηκαν από ΚΔ αντοχής LC22 και τα υπόλοιπα από LC30⁶. Η αντοχή του κισηροδέματος είναι γνωστή μέσω πειραμάτων σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 10 cm (αναλυτικά στην ΕΕ05 του ΕΠ).



Σχήμα 3.5: Τα ολοκληρωμένα δοκίμια στο δάπεδο του ΕΟΣ ΕΜΠ πριν τις δοκιμές

Επειδή οι τιμές αυτές όμως είναι πιθανόν να παρουσιάζουν απόκλιση λόγω φαινομένων κλίμακας (size effect), κατασκευάστηκαν και τέσσερα άοπλα υποστυλώματα, ένα διαστάσεων 15x15 cm, ένα 25x25 cm και δύο 20x20 cm με το ένα να είναι κατασκευασμένο από ΚΔ αντοχής LC22 και το άλλο LC30. Ενδεικτικά, ο Allington (2003) κατασκεύασε δεκαεννέα άοπλα υποστυλώματα φυσικής κλίμακας από τέσσερα διαφορετικά είδη ΕΣ, τα δύο χρησιμοποιώντας αδρανή από διογκωμένο αργιλικό σχιστόλιθο (expanded shale) και τα υπόλοιπα δύο από διογκωμένη άργιλο (expanded clay). Από τις θλιπτικές δοκιμές σε αυτά μέτρησε μια μείωση στην θλιπτική αντοχή της τάξης του 15% στις αντοχές των

⁶ Λόγω του ότι τα πρότυπα δοκίμια που παρελήφθησαν κατά τις σκυροδετήσεις απέδωσαν μέσες θλιπτικές αντοχές 32 MPa και 44MPa, αντίστοιχα, τα ΚΔ αυτά νοούνται και σαν LC22 και LC30, αντίστοιχα.

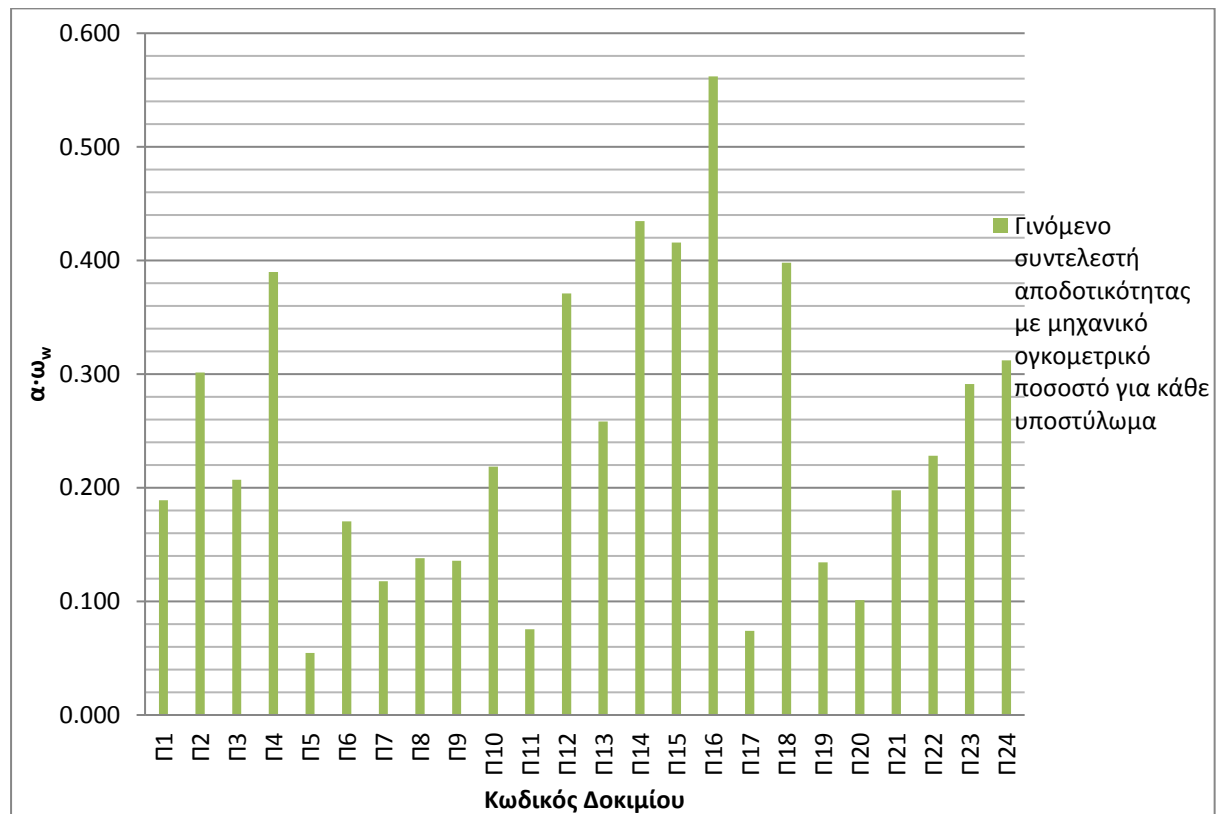
υποστυλωμάτων πραγματικής κλίμακας, σε σύγκριση με αντίστοιχα κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 10 cm και μήκους 20 cm⁷. Η μείωση αυτή ενδέχεται να οφείλεται και στην πρισματική τομή των δοκιμίων, η οποία επηρεάζει τη μέση θλιπτική αντοχή σε σχέση με την κυλινδρική.

Κωδικός b_s_Φ_τυπος	b = h [cm]	h [cm]	Υψος [cm]	c [cm]	Τύπος Κισηροδέματος	s [cm]	Φ διαμήκων [mm]	Φ συνδετήρων [mm]	b ₀ [cm]	h ₀ [cm]	Όγκος πυρήνα [m ³]	Α συνδετήρων [m ²]	Όγκος συνδετήρων [m ³]	ω	ρ _s [%]	a _n	a _s
15 75 8 2	15	15	45	2	C22	7,5	12	8	10,2	10,2	7,80E-04	5,03E-05	3,08E-05	0,65	3,94	0,667	0,434
15 75 10 2	15	15	45	2	C22	7,5	12	10	10	10	7,5E-04	7,9E-05	4,7E-05	1,04	6,28	0,667	0,434
15 5 10 1	15	15	45	2	C22	5,0	12	10	10	10	5,0E-04	7,9E-05	3,1E-05	1,04	6,28	0,333	0,597
15_5_8_2	15	15	45	2	C22	5,0	12	8	10,2	10,2	5,2E-04	5,0E-05	3,1E-05	0,98	5,91	0,667	0,597
20_10_10_1	20	20	60	2	C22	10,0	14	10	15	15	2,25E-03	7,9E-05	4,7E-05	0,35	2,09	0,333	0,473
20 67 8 2	20	20	60	2	C30	6,7	14	8	15,2	15,2	1,5E-03	5,0E-05	5,2E-05	0,41	3,39	0,667	0,627
20_10_8_2	20	20	60	2	C22	10,0	14	8	15,2	15,2	2,3E-03	5,0E-05	5,2E-05	0,37	2,26	0,667	0,473
20 10 8 3	20	20	60	2	C22	10,0	14	8	15,2	15,2	2,3E-03	5,0E-05	6,1E-05	0,44	2,65	0,667	0,473
20 10 10 2	20	20	60	2	C30	10,0	14	10	15	15	2,3E-03	7,9E-05	8,0E-05	0,43	3,58	0,667	0,473
20 10 10 3	20	20	60	2	C22	10,0	14	10	15	15	2,3E-03	7,9E-05	9,4E-05	0,69	4,19	0,667	0,473
20 5 8 1	20	20	60	2	C30	5,0	14	8	15,2	15,2	1,2E-03	5,0E-05	3,1E-05	0,32	2,65	0,333	0,712
20 67 10 2	20	20	60	2	C22	6,7	14	10	15	15	1,5E-03	7,9E-05	8,0E-05	0,89	5,36	0,667	0,627
20 5 8 2	20	20	60	2	C30	5,0	14	8	15,2	15,2	1,2E-03	5,0E-05	5,2E-05	0,54	4,52	0,667	0,712
20 67 10 3	20	20	60	2	C22	6,7	14	10	15	15	1,5E-03	7,9E-05	9,4E-05	1,04	6,28	0,667	0,627
20 5 8 3	20	20	60	2	C22	5,0	14	8	15,2	15,2	1,2E-03	5,0E-05	6,1E-05	0,88	5,29	0,667	0,712
20 5 10 2	20	20	60	2	C22	5,0	14	10	15	15	1,1E-03	7,9E-05	8,0E-05	1,18	7,15	0,667	0,712
25 125 8 2	25	25	75	2	C22	12,5	14	8	20,2	20,2	5,1E-03	5,0E-05	6,9E-05	0,23	1,36	0,667	0,493
25 5 8 3	25	25	75	2	C22	5,0	14	8	20,2	20,2	2,0E-03	5,0E-05	8,1E-05	0,66	3,98	0,778	0,776

⁷ Αντίστοιχες μειώσεις παρατηρήθηκαν και στην παρούσα πειραματική διερεύνηση.

25 5 10 1	25	25	75	2	C22	5,0	14	10	20	20	2,0E-03	7,9E-05	6,3E-05	0,52	3,14	0,333	0,776
25 125 8 3	25	25	75	2	C22	12,5	14	8	20,2	20,2	5,1E-03	5,0E-05	8,1E-05	0,26	1,59	0,778	0,493
25 83 8 3	25	25	75	2	C22	8,3	14	8	20,2	20,2	3,4E-03	5,0E-05	8,1E-05	0,40	2,39	0,778	0,643
25 83 10 2	25	25	75	2	C22	8,3	14	10	20	20	3,3E-03	7,9E-05	1,1E-04	0,53	3,22	0,667	0,643
25 5 8 2	25	25	75	2	C22	5,0	14	8	20,2	20,2	2,0E-03	5,0E-05	6,9E-05	0,56	3,40	0,667	0,776
25 83 10 3	25	25	75	2	C22	8,3	14	10	20	20	3,3E-03	7,9E-05	1,3E-04	0,62	3,77	0,778	0,643

Πίνακας 3.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και όπλιση των δοκιμίων υποστυλωμάτων



Πίνακας 3.2: Κατανομή του γινομένου του συντελεστή αποδοτικότητας α με το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό $\alpha\omega_{wd}$ για κάθε υποστύλωμα

Ο Πίνακας 3.1 συνοψίζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τον τύπο όπλισης για τα υποστυλώματα. Η κατανομή τιμών του $\alpha\omega_{wd}$ παρουσιάζονται παραπάνω (Πίνακας 3.2) (οι υπολογισμοί και τα ενδιάμεσα μεγέθη για τον υπολογισμό του $\alpha\omega_{wd}$, αναλύονται στο § 3.5).

3.4 Ενοργάνωση των δοκιμών

Όλα τα δοκίμια ενοργανώθηκαν με μετρητικά όργανα του ΕΟΣ ΕΜΠ, τόσο στο εσωτερικό τους πριν τη σκυροδέτηση όσο και εξωτερικά, κατά τη διάρκεια της διενέργειας του πειράματος, ως εξής:

α) Εσωτερικά. Για τη μέτρηση της ανηγμένης παραμόρφωσης των διαμήκων και εγκάρσιων οπλισμών χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα ηλεκτρομηκυσιόμετρα (Strain Gauges - SG) ανά δοκίμιο, τα οποία στερεώθηκαν επάνω στο διαμήκη οπλισμό πριν τη σκυροδέτηση (βλ. Σχήμα 3.6 α, β): τρία τοποθετήθηκαν σε τρεις διαμήκεις ράβδους οπλισμού στο μέσον τους και ένα σε ένα συνδετήρα στο μέσον του, που βρίσκονταν στο μέσο τρίτο του δοκιμίου, στην περιοχή μέτρησης. Για τη στερέωση επάνω στον οπλισμό, λειαίνεται αρχικά η επιφάνεια του οπλισμού μήκους περίπου 20 mm και πλάτους 5-10 mm. Στη συνέχεια, προσκολλάται το SG και επικαλύπτεται με ειδική μεμβράνη η οποία το στεγανοποιεί, για να μην εισέλθουν υγρά κατά τη σκυροδέτηση, και το προστατεύει από μικρές μηχανικές καταπονήσεις που ενδέχεται να συμβούν κατά τη διαδικασία μεταφοράς και τοποθέτησής του οπλισμού στον κλωβό. Το κάθε SG συνοδεύεται με καλώδιο το οποίο εξέρχεται προστατευόμενο του δοκιμίου, κατά τη σκυροδέτηση και συνδέεται πριν από την έναρξη του πειράματος στο καταγραφικό. Και το καλώδιο επίσης δένεται επάνω στον οπλισμό για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας να τραυματιστεί.



α)



β)

Σχήμα 3.6: Εσωτερική ενοργάνωση των υποστυλωμάτων: α) Στερέωση των ηλεκτρονικών μηχανομετρών επάνω στους διαμήκεις οπλισμούς και β) Τοποθέτηση εγκάρσιου μηχανομέτρου μέτρησης της διάγκωσης στον κλωβό.

β) Εξωτερικά. Για την καταγραφή των σχετικών παραμορφώσεων (βέλος) των εξεταζόμενων δοκιμών, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα ηλεκτρονικά βελόμετρα υψηλής ακρίβειας, τύπου μέτρησης μέσω εσωτερικού strain gauge (DT - linear variable differential transducer), με μέγιστη μετρούμενη μήκυνση είτε 25 είτε 50 mm, κατά περίπτωση, κατασκευής της Tokyo Sokki Kenkyujo. Επί πλέον, ένα πέμπτο βελόμετρο τοποθετείτο εξωτερικά, για να καταγράφει τη θλιπτική παραμόρφωση της μηχανής θλίψης.

Τα SG συνδέονται με κατάλληλα τερματικά σε δύο καταγραφικά τύπου HBM QuantumX MX840 του ΕΟΣ ΕΜΠ μέσω των οποίων οι μετρήσεις λαμβάνονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Κάθε καταγραφικό QuantumX διαθέτει οκτώ κανάλια εισόδου, η δε συχνότητα καταγραφής επιλέχθηκε ίση με 1.0 - 2.0 Hz (μία με δύο δειγματοληψίες ανά δευτερόλεπτο) κατά περίπτωση. Τα δύο καταγραφικά διασυνδέονται μεταξύ τους και με Η/Υ μέσω δικτυακής σύνδεσης Ethernet.



Σχήμα 3.7: Τυπική διάταξη της δοκιμής πρισματικού δοκιμίου σε κεντρική θλίψη, στη μηχανή 600 τόνων του ΕΑΥ ΕΜΠ. Διακρίνεται και το εξωτερικό βελόμετρο για μέτρηση της βύθισης.

3.5 Υπολογισμός του διαγράμματος $\sigma_0 - \epsilon_0$ του ΚΔ

3.5.1 Μέτρηση και υπολογισμός της αξονικής τάσης σ_0

Για την αποτίμηση της συμπεριφοράς των υποστυλωμάτων σε περίσφιξη είναι αναγκαία η εκτίμηση της αξονικής θλιπτικής τάσης που αναλαμβάνεται από τον πυρήνα σκυροδέματος των διατομών στο χώρο του μέσου καθ' ύψος των δοκιμίων, από το συνολικό φορτίο και τη μέση παραμόρφωση. Αυτό επιτυγχάνεται αφαιρώντας από την συνολική τάση τη συνεισφορά του σκυροδέματος επικάλυψης, μέχρι αυτό να αποφλοιωθεί, οπότε και παύει να συνεισφέρει, θεωρώντας καταστατική σχέση για το εν λόγω υλικό από τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών του άοπλου ΚΔ υπό θλίψη. Παράλληλα, αφαιρείται και η συνεισφορά των θλιβόμενων διαμήκων οπλισμών. Για τον υπολογισμό των μεγεθών αυτών, θεωρείται ότι οι παραμορφώσεις σε όλη την έκταση της διατομής είναι κοινές καθώς και στην θεώρηση πλήρους συνάφειας μεταξύ ΚΔ και χάλυβα. Η τάση στην επικάλυψη υπολογίζεται με τη θεώρηση ότι το ΚΔ εκεί είναι απερίσφιγκτο.

Ο πυρήνας της διατομής, εντός του οποίου θεωρείται ότι το ΚΔ είναι περισφιγμένο, μετράται από το μέσο των εγκάρσιων οπλισμών περίσφιξης (όπως καθορίζεται στον EC8, 2004).

3.5.2 Μέτρηση και υπολογισμός της αξονικής παραμόρφωσης ϵ_0

Μέσω του εξωτερικού βελομέτρου E (βλ. Σχήμα 3.2.6), το οποίο καταγράφει τη μεταβολή της απόστασης μεταξύ των δύο επιφανειών φόρτισης της μηχανής θραύσης, λαμβάνεται η συνολική παραμόρφωση του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του πειράματος. Το μέγεθος αυτό είναι ενδεικτικό και δεν αξιοποιείται άμεσα καθώς περιλαμβάνει και την παραμόρφωση των περιοχών των ακραίων τρίτων καθ' ύψος των δοκιμίων. Επίσης, σε περιπτώσεις κατασκευαστικών ατελειών και της συνεπαγόμενης μικρής στροφής της πάνω επιφάνειας φόρτισης, επειδή το βελόμετρο έχει τοποθετηθεί σε απόσταση από το δοκίμιο, οι μετρούμενες αποστάσεις (μέτρηση μηχανής και εξωτερική μέτρηση στο άκρο της επιφάνειας φόρτισης) αποκλίνουν.

Μέσω των τεσσάρων βελομέτρων (σήμανση Α, Β, Γ, Δ), τα οποία έχουν τοποθετηθεί περιμετρικά του δοκιμίου, μετράται η αξονική παραμόρφωση του μέσου τρίτου καθ' ύψος του δοκιμίου στις τέσσερις πλευρές του δοκιμίου. Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται τυχούσα εκκεντρότητα στην εφαρμογή του φορτίου και στροφή της άνω επιφάνειας φόρτισης, ενώ λαμβάνεται η μέση αξονική παραμόρφωση με αυξημένη αξιοπιστία. Επιπλέον, με τη λήψη τεσσάρων μετρήσεων, επειδή σε μεγάλες παραμορφώσεις υπάρχει σημαντική ρηγμάτωση του

ΚΔ, διασφαλίζεται η περίπτωση που η προσάρτηση στο δοκίμιο κάποιου από αυτά βελόμετρα χαθεί.

Τα ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα (strain gauges) SG1, SG2 και SG3 τοποθετούνται στο μέσο τριών εκ των διαμήκων οπλισμών του δοκιμίου, σε τρεις γωνιακούς οπλισμούς. Από αυτά λαμβάνεται η παραμόρφωση στο μέσο του δοκιμίου, με την παραδοχή της ύπαρξης πλήρους συνάφειας μεταξύ ΚΔ και χάλυβα. Επίσης, επαληθεύεται η επιπεδότητα της μεσαίας διατομής και ανιχνεύονται στροφές αυτής, αν υπάρχουν.

Από προηγούμενες μελέτες έχει αποδειχθεί (Allington, 2003, Mander, 1984) ότι μέχρι το δοκίμιο να αναλάβει την μέγιστη αξονική του δύναμη, οι παραμορφώσεις είναι σχεδόν ομοιόμορφες στο μήκος του. Μετά από αυτό το σημείο, παρατηρούνται μεγαλύτερες αξονικές παραμορφώσεις σε μικρές ζώνες συγκέντρωσης. Επομένως, πριν την ανάληψη του μέγιστου φορτίου από το δοκίμιο, οι μετρούμενες παραμορφώσεις από τα strain gauges και οι μετρούμενες μετακινήσεις από τα μηκυνσιόμετρα (διαιρεμένες με το μήκος μέτρησης) αναμένονται να είναι ίδιες. Μετά όμως, είναι πιθανόν να υπάρχουν αποκλίσεις.

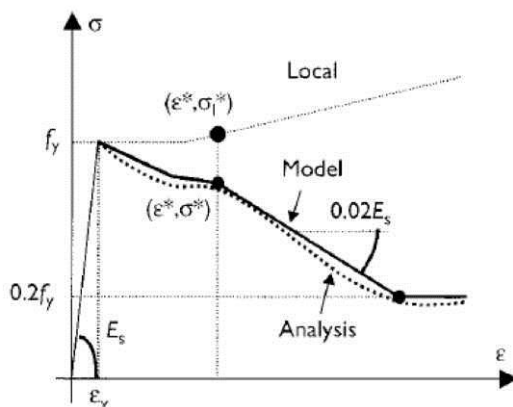
3.5.3 Μέτρηση της εγκάρσιας παραμόρφωσης

Η παραμόρφωση κατά την εγκάρσια διεύθυνση, λαμβάνεται από το SG4, το οποίο τοποθετείται στο μέσο μιας εξωτερικής πλευράς του πλησιέστερου οπλισμού περίσφιγξης στο μέσο του δοκιμίου. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται και η τάση στον οπλισμό περίσφιγξης, ελέγχοντας και το αν έχει διαρρεύσει και τότε, αλλά και η τάση του οπλισμού τη στιγμή της μέγιστης αξονικής θλιπτικής τάσης. Τα τελευταία είναι ιδιαίτερα σημαντικά για το ΚΔ, καθώς, όπως αναλύθηκε παραπάνω, σε προηγούμενες μελέτες έχει παρατηρηθεί ότι η ενεργοποίηση αυτή και καθυστερεί χρονικά (μετά τη μέγιστη αξονική θλιπτική ένταση) και είναι μειωμένη ποσοτικά. Ενδεικτικά, ο Allington (2003), σε παρόμοια πειράματα, παρατήρησε ότι η παραμόρφωση διαρροής εμφανιζόταν πριν ή αμέσως μετά του μέγιστου αξονικού φορτίου του υποστυλώματος, με την θεώρηση ότι η τάση είναι ίση με την τάση διαρροής να αποτελεί λογική (και συντηρητική) υπόθεση.

3.5.4 Υπολογισμός του διαγράμματος $\sigma - \epsilon$ των οπλισμών υπό θλίψη

Για τον υπολογισμό της συνεισφοράς των οπλισμών υπό θλιπτική ένταση και πλαστικοποίηση (διαρροή και κράτυνση) υπό ταυτόχρονο ανελαστικό λυγισμό που εξαρτάται από την απόσταση των συνδετήρων και τη διάμετρο της ράβδου, υιοθετήθηκε το καταστατικό προσομοίωμα των Maekawa et al. (2003). Σύμφωνα με το εν λόγω προσομοίωμα θεωρείται ένα αρχικό τριγραμμικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων $\sigma_s - \epsilon_s$, με πλατώ διαρροής που ορίζεται από το λόγο $\epsilon_h / \epsilon_y = 5$ και οριακή αστοχία στην $\epsilon_{uk} = 9$

%, με βάση πειραματικά αποτελέσματα από δοκιμές εφελκυσμού σε ράβδους Φ8, Φ12 και Φ14.

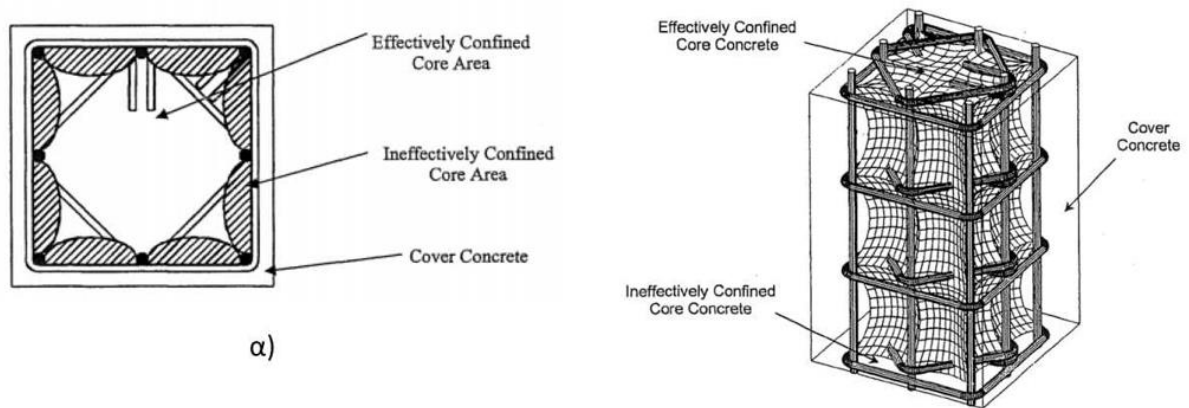


Σχήμα 3.8: Διάγραμμα $\sigma_s - \epsilon_s$ των οπλισμών υπό θλίψη παρουσία λυγισμού (Maekawa et al. 2003).

Το προσομοίωμα ακολουθεί την αρχική ελαστική απόκριση έως τη διαρροή και ακολούθως απομειώνει τη μονοτονική τριγωνική συμπεριφορά του αρχικού διαγράμματος σε τρεις ζώνες στις ϵ_1 , ϵ_2 και ϵ_3 , με διαφορετικό ρυθμό απομείωσης σε κάθε ζώνη (Σχήμα 3.8). Τα σημεία προσαρμογής να είναι συνάρτηση της αντοχής σε διαρροή του οπλισμού (ειδικότερα της f_y) και του λόγου L_s/Φ , όπου L_s το μήκος λυγισμού της ράβδου (λαμβάνεται ίσο προς την απόσταση μεταξύ συνδετήρων) και Φ η διάμετρος της ράβδου.

3.5.5 Προσομοίωση της διατομής σε περίσφιξη

Για την προσομοίωση της δράσης της περίσφιξης σε επίπεδο διατομής χρησιμοποιείται η παραδοχή τριών γεωμετρικών περιοχών - ζωνών σκυροδέματος: το σκυρόδεμα επικάλυψης (cover concrete), η επιφάνεια πυρήνα μη ενεργούς περίσφιξης (ineffectively confined core area) και η επιφάνεια πυρήνα ενεργούς περίσφιξης (effectively confined core area), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.9: Προσομοίωση αποδοτικότητας περίσφιγξης του σκυροδέματος από τους συνδετήρες, α) κατά πλάτος της διατομής και β) καθ' ύψος υποστύλωσης (Allington,2003)

Οι αντίστοιχες με τις παραπάνω καμπύλες που διαχωρίζουν τις περιοχές ενεργούς και μη ενεργούς περίσφιγξης καθ' ύψος του δοκιμίου είναι, με χρήση αντίστοιχων γεωμετρικών καταμερισμών του δομικού μέλους καθ' ύψος, όπως δείχνονται στο Σχήμα 3.9 β). Η αποδοτικότητα της περίσφιγξης (και οι αντίστοιχοι συντελεστές αποδοτικότητας α_n και α_s υπολογίζονται ίσοι με το λόγο των αντίστοιχων σκιασμένων εμβαδών προς το συνολικό εμβαδό του πυρήνα του μέλους.

3.5.6 Συγκριτικοί υπολογισμοί με τις σχέσεις σχεδιασμού για το ΣΚΒ

Το θεωρητικό φορτίο αστοχίας υπολογίζεται με τις σχέσεις των EC2 και EC8 (2004). Η τιμή R_c (Πίνακας 3.3) αντιστοιχεί στο θεωρητικό φορτίο αστοχίας για ΣΚΒ, η δε τιμή R_{lc} (Πίνακας 3.3) στο αντίστοιχο φορτίο για ΕΣ με τα χαρακτηριστικά του ΚΔ που είναι κατασκευασμένα τα δοκίμια.

Η χαρακτηριστική αντοχή του περισφιγμένου ΕΣ $f_{lck,c}$, η παραμόρφωση $\varepsilon_{lc2,c}$ που αντιστοιχεί στη μέγιστη αντοχή και η παραμόρφωση αστοχίας $\varepsilon_{lcu2,c}$ ισούνται με:

$$f_{lck,c} = f_{lck} \left(1 + \frac{k \sigma_2}{f_{lck}} \right) \quad (3.1)$$

όπου

- k 1.1 για ΕΣ με κοινή άμμο ως λεπτό αδρανές
- 1.0 για ΕΣ με ελαφρά τόσο τα λεπτά όσο και τα χονδρά αδρανή

$$\varepsilon_{lc2,c} = \varepsilon_{lc2} \left(\frac{f_{lck,c}}{f_{lck}} \right)^2 \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_{lcu2,c} = \varepsilon_{lcu2} + 0.2 \frac{\sigma_2}{f_{lck}} \quad (3.3)$$

όπου

ε_{lc2} η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη αντοχή και για $f_{lck} < 50$ MPa ισούται με 2 ‰

ε_{cu2} η παραμόρφωση αστοχίας ίση με $3.5 \cdot \eta_1$, με $\eta_1 = 0.4 + 0.6 \cdot \rho / 2200$ και ρ το άνω όριο της πυκνότητας για την αντίστοιχη κατηγορία πυκνότητας ΕΣ σύμφωνα με το Πρότυπο EN206-1 [Πίνακας 11.1 EC2].

σ_2 η δρώσα ακτινική θλιπτική τάση στην οριακή κατάσταση αστοχίας εξαιτίας της περίσφιγξης η οποία εκτιμάται από τη σχέση

$$\sigma_2 = 0.5 \cdot \alpha \cdot \omega_{wd} \cdot f_c \quad (3.4)$$

Ο υπολογισμός της μέγιστης αξονικής θλιπτικής δύναμης των υποστλωμάτων και των ενδιάμεσων μεγεθών έγιναν με βάση την § 5.4.3.2.2 του EC8:

$$\alpha_n = 1 - \Sigma \left(\frac{b_i^2}{6b_0 h_0} \right) \quad (3.5)$$

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s}{2b_0} \right) \left(1 - \frac{s}{2h_0} \right) \quad (3.6)$$

με

n το συνολικό πλήθος διαμήκων ράβδων που συγκρατούνται από κλειστούς ή μονοσκελείς συνδετήρες

b_i η απόσταση μεταξύ διαδοχικών ράβδων που συγκρατούνται με συνδετήρες

b_0, h_0 οι διαστάσεις του περισφιγμένου πυρήνα της διατομής

s η απόσταση των συνδετήρων μεταξύ τους (καθ' ύψος της διατομής)

Ο συντελεστής αποτελεσματικότητας της περίσφιγξης α ισούται με $\alpha_n \cdot \alpha_s$ και το μηχανικό ογκομετρικό των εγκάρσιων οπλισμών περίσφιγξης ισούται με ω_{wd} :

$$\omega_{wd} = \left[\frac{\text{όγκος των συνδετήρων περίσφιγξης}}{\text{όγκος του σκυροδέματος του πυρήνα}} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \right] = \rho_s \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \quad (3.7)$$

Για το περισφιγμένο ΣΚΒ, χρησιμοποιούνται οι σχέσεις του EC2 § 3.1.9:

$$f_{ck,c} = f_{ck} \left(1 + 5 \cdot \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right) \text{ για } \sigma_2 < 0.05 f_{ck} \quad (3.8)$$

$$f_{ck,c} = f_{ck} \left(1.125 + 2.5 \cdot \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right) \text{ για } \sigma_2 > 0.05 f_{ck} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2} \cdot \left(\frac{f_{ck,c}}{f_{ck}} \right)^2 \quad (3.10)$$

και

$$\varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0.2 \cdot \frac{\sigma_2}{f_{ck}} \quad (3.11)$$

με το σ_2 να προκύπτει από τη σχέση (3.4).

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα.

	ω	ρ_s [%]	α_n	α_s	Τύπος περίσφιγξης	$f_{ck,c}$ [kPa]	$\varepsilon_{cu2,c,calc}$	$\varepsilon_{c2,c,calc}$	R_c [kN]	R_{SL} [kN]	R ΣΚΒ (πυρήνα) [ton]	α_{ow}	σ_2 [kN]	$f_{ck,c}$ [kN]	$\varepsilon_{cu2,c,calc}$	$\varepsilon_{c2,c,calc}$	R_{lc} [kN]	R_{LC} (πυρήνα) [ton]
1	0,65	3,94	0,667	0,434	2*	43563,9	2,2E-02	3,7E-03	453,2	479,5	93,3	0,189	3025,6	35025,6	2,18E-02	2,40E-03	364,4	84,4
2	1,04	6,28	0,667	0,434	2*	48054,9	3,4E-02	4,5E-03	480,5	479,5	96,0	0,301	4822,0	36822,0	3,31E-02	2,65E-03	368,2	84,8
3	1,04	6,28	0,333	0,597	1	44276,8	2,4E-02	3,8E-03	442,8	239,8	68,3	0,207	3310,7	35310,7	2,36E-02	2,44E-03	353,1	59,3
4	0,98	5,91	0,667	0,597	2*	51595,4	4,2E-02	5,2E-03	536,8	479,5	101,6	0,390	6238,2	38238,2	4,19E-02	2,86E-03	397,8	87,7
5	0,35	2,09	0,333	0,473	1	36367,8	9,0E-03	2,6E-03	818,3	326,3	114,5	0,055	873,6	32873,6	8,39E-03	2,11E-03	739,7	106,6
6	0,41	3,39	0,667	0,627	2	58875,9	2,1E-02	3,6E-03	1360,3	652,7	201,3	0,170	3750,3	47750,3	2,02E-02	2,36E-03	1103,2	175,6
7	0,37	2,26	0,667	0,473	2	40713,9	1,5E-02	3,2E-03	940,7	652,7	159,3	0,118	1885,6	33885,6	1,47E-02	2,24E-03	782,9	143,6
8	0,44	2,65	0,667	0,473	3*	41522,8	1,7E-02	3,4E-03	959,3	652,7	161,2	0,138	2209,1	34209,1	1,67E-02	2,29E-03	790,4	144,3
9	0,43	3,58	0,667	0,473	2	56963,7	1,7E-02	3,4E-03	1281,7	652,7	193,4	0,136	2985,5	46985,5	1,67E-02	2,28E-03	1057,2	171,0
10	0,69	4,19	0,667	0,473	3*	44744,4	2,5E-02	3,9E-03	1006,7	652,7	165,9	0,219	3497,7	35497,7	2,48E-02	2,46E-03	798,7	145,1
11	0,32	2,65	0,333	0,712	1	52310	1,1E-02	2,8E-03	1208,6	326,3	153,5	0,076	1662,0	45662,0	1,07E-02	2,15E-03	1055,0	138,1

12	0,89	5,36	0,667	0,627	2	50845,1	4,1E-02	5,0E-03	1144,0	652,7	179,7	0,371	5938,1	37938,1	4,00E-02	2,81E-03	853,6	150,6
13	0,54	4,52	0,667	0,712	2	63700,2	2,9E-02	4,2E-03	1471,7	652,7	212,4	0,258	5680,1	49680,1	2,89E-02	2,55E-03	1147,8	180,1
14	1,04	6,28	0,667	0,627	3*	53392,4	4,7E-02	5,6E-03	1201,3	652,7	185,4	0,435	6956,9	38956,9	4,64E-02	2,96E-03	876,5	152,9
15	0,88	5,29	0,667	0,712	3*	52636,7	4,5E-02	5,4E-03	1216,1	652,7	186,9	0,416	6654,7	38654,7	4,45E-02	2,92E-03	893,1	154,6
16	1,18	7,15	0,667	0,712	2	58483,6	6,0E-02	6,7E-03	1315,9	652,7	196,9	0,562	8993,4	40993,4	5,91E-02	3,28E-03	922,4	157,5
17	0,23	1,36	0,667	0,493	2	37923,7	1,1E-02	2,8E-03	1547,4	652,7	220,0	0,074	1184,7	33184,7	1,03E-02	2,15E-03	1354,1	200,7
18	0,66	3,98	0,778	0,776	3	51921,6	4,3E-02	5,3E-03	2118,6	979,0	309,8	0,398	6368,6	38368,6	4,27E-02	2,88E-03	1565,6	254,5
19	0,52	3,14	0,333	0,776	1	41378,8	1,7E-02	3,3E-03	1655,2	326,3	198,1	0,134	2151,5	34151,5	1,64E-02	2,28E-03	1366,1	169,2
20	0,26	1,59	0,778	0,493	3	40048,4	1,4E-02	3,1E-03	1634,1	979,0	261,3	0,101	1619,4	33619,4	1,30E-02	2,21E-03	1371,8	235,1
21	0,40	2,39	0,778	0,643	3	43909,2	2,3E-02	3,8E-03	1791,7	979,0	277,1	0,198	3163,7	35163,7	2,27E-02	2,42E-03	1434,8	241,4
22	0,53	3,22	0,667	0,643	2	45131,7	2,6E-02	4,0E-03	1805,3	652,7	245,8	0,228	3652,7	35652,7	2,58E-02	2,48E-03	1426,1	207,9
23	0,56	3,40	0,667	0,776	2	47648,3	3,3E-02	4,4E-03	1944,2	652,7	259,7	0,291	4659,3	36659,3	3,20E-02	2,62E-03	1495,8	214,9
24	0,62	3,77	0,778	0,643	3	48481,7	3,5E-02	4,6E-03	1939,3	979,0	291,8	0,312	4992,7	36992,7	3,41E-02	2,67E-03	1479,7	245,9

Πίνακας 3.3: Θεωρητικές τιμές θλιπτικής αντοχής και μέγιστου φορτίου και ανηγμένης παραμόρφωσης των δοκιμών υποστυλωμάτων κατά EC2 και EC8 (2004)

3.6 Διάταξη και διαδικασία των δοκιμών

Η τυπική πειραματική διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 3.2.6. Το υποστύλωμα τοποθετείται κατακόρυφα μεταξύ των επιφανειών φόρτισης, εδραζόμενο στην κάτω πλάκα. Στην άνω επιφάνεια, παρεμβάλλεται μεταλλική πλάκα πάχους 20 mm για καλύτερη κατανομή της επιβαλλόμενης τάσης στην κάτωψη. Ακολουθεί η σύνδεση των εξωτερικών και εξωτερικών μετρητικών οργάνων με τη συσκευή καταγραφής QuantumX και εφαρμόζεται το φορτίο έως την αστοχία.

Η μηχανή θραύσης του EAY EMΠ που χρησιμοποιήθηκε έχει δυνατότητα επιβολής μέγιστου φορτίου 600 τόνων μέσω υδραυλικής αντλίας με ελεγχόμενη ροή και μέτρηση της επιβαλλόμενης πίεσης από το σύστημα. Ως εκ τούτου, επειδή το ελεγχόμενο μέγεθος των δοκιμών της παρούσης είναι η επιβαλλόμενη δύναμη και όχι η επιβαλλόμενη παραμόρφωση, η φόρτιση γίνεται αυξάνοντας σταδιακά την παροχή λαδιού (το φορτίο) και, στην οριακή

αντοχή (ή κατά την ψαθυρή αποφλοιώση του απερίσφιγκτου φλοιού της διατομής), αποφορτίζοντας και επαναφορτίζοντας ανάλογα με την μετρούμενη παραμόρφωση και το ρυθμό απομείωσης της αντοχής σε αυτό το σημείο. Αυτή η αποφόρτιση / επαναφόρτιση είναι εμφανής και στα πειραματικά αποτελέσματα.

3.7 Αποτελέσματα πειραματικών ελέγχων

3.7.1 Γενικές παρατηρήσεις σχετικά με τα δοκίμια

Ακολουθούν μερικές γενικές παρατηρήσεις σχετικά με τη συμπεριφορά των δοκιμών υπό κεντρική θλίψη. ακολούθως, στο επόμενο Κεφάλαιο, δίδονται αναλυτικά τα επί μέρους αποτελέσματα της κάθε δοκιμής, με φωτογραφίες της μορφής αστοχίας και τις παραγόμενες γραφικές παραστάσεις των καταγραφών. Από την παρατήρηση και ανάλυση των αποτελεσμάτων συμπεραίνεται ότι:

- Ο σχεδιασμός των δοκιμών ήταν επιτυχής, καθώς η συμπεριφορά των υποστρωμάτων δεν επηρεάστηκε από τη διάταξη (τα δοκίμια είχαν αντίστοιχη συμπεριφορά με αυτήν που καταγράφηκε σε αντίστοιχες δοκιμές της βιβλιογραφίας).
- Σε λίγες περιπτώσεις δεν αποφεύχθηκαν πρόωρες - παρασιτικές αστοχίες σε περιοχές εκτός του ελεγχόμενου μέσου τρίτου του δοκιμίου, ακόμη και όπου είχε γίνει (πέραν της εσωτερικής αυξημένης όπλισης στην περιοχή) και εξωτερική ενίσχυση με ανθρακονήματα (ΙΝΟΠ).
- Εν τούτοις, οι αστοχίες αυτές δεν επηρέασαν τη συμπεριφορά του δοκιμίου στο μέσον, λόγω του ότι μετά την συμπίεση του άνω θλιβόμενου τμήματος, και μόλις οι οπλισμοί έρχονταν σε επαφή με την πλάκα φόρτισης, τα φορτία παραλαμβάνονταν άμεσα από το μέσο τμήμα και αυτό κατόπιν απέδιδε την αντοχή του σε περίσφιγξη και τη μέση παραμόρφωση στο μέσο χώρο μέτρησης των παραμορφώσεων. Οι αναγκαίες διορθώσεις στο συνολικό διάγραμμα φορτίου μετατόπισης δίνονται κατά περίπτωση.
- Σε ελάχιστες περιπτώσεις (βλ. και αναλυτικά αποτελέσματα) προέκυψε έντονη σταδιακή έκκεντρη παραμόρφωση λόγω ασύμμετρης αστοχίας της επικάλυψης, που επιδεινώθηκε και πιθανόν επηρέασε το διάγραμμα δυσμενώς.
- Οι τυπικές μορφές αστοχίας των δοκιμών δείχνονται στις φωτογραφίες παρακάτω. Γενικά, σε όλα τα δοκίμια αστόχησε το μεσαίο ελεγχόμενο τμήμα, αφού πρώτα αποφλοιώθηκε η επικάλυψη του πυρήνα (ενδεχόμενα και μετά από μερική αστοχία του ΙΝΟΠ στο άνω τρίτο, **Σχήμα 3.9 α**) μέχρι το λυγισμό των ράβδων.

- Η τελική αστοχία θεωρήθηκε όταν το φορτίο έπεφτε κάτω από το 70% του μεγίστου στη φάση συμπίεσης του μέσου τμήματος, και σηματοδοτείτο από έντονο λυγισμό των διαμήκων ράβδων και, σε αρκετές περιπτώσεις, εκρηκτική αστοχία συνδετήρα, είτε σε μορφή ανοίγματος συνδετήρα - λόγω αποφλοίωσης του πυρήνα όπου αγκυρωνόταν είτε σε μορφή διάρρηξης.
- Από την παρατήρηση της αστοχίας σε μερικές περιπτώσεις προέκυψαν μορφές σχήματος λυγισμού των οπλισμών με λυγισμό εντός των συνδετήρων εγκαρσίως μέσα στο θρυμματισμένο πυρήνα και, άρα, με μήκος λυγισμού μεγαλύτερο της απόστασης μεταξύ συνδετήρων.
- Από τα πειραματικά αποτελέσματα γενικά φαίνεται ότι το ΚΔ με μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή, στις αποδοτικότητες που δοκιμάστηκε, έχει χαμηλότερη απόδοση (K) περισφιγξης σε σύγκριση με τα δοκίμια από ΚΔ χωρίς προσθήκη άμμου.



α) Π11



β) Π23



γ) Π24

Σχήμα 3.10: Χαρακτηριστικές μορφές αστοχίας: α) αστοχία στο πάνω τρίτο, αρχικά με διάρρηξη των ΙΝΟΠ και κατόπιν στο μέσο, μέχρι λυγισμό των ράβδων, β) αστοχία μόνο στο μέσον, μέχρι λυγισμό των ράβδων, γ) Αστοχία μόνο στο άνω τμήμα (διάρρηξη των ΙΝΟΠ), δ) Αστοχία υπό έκκεντρη φόρτιση λόγω αστοχίας των ΙΝΟΠ έκκεντρα.



δ) Π20

Ακολούθως περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία για το κάθε υποστύλωμα: δίδονται οι λεπτομέρειες όπλισης, οι χαρακτηριστικές εικόνες του τρόπου αστοχίας και το τελικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων $\sigma_c - \epsilon_c$ του περισφιγμένου πυρήνα από ΚΔ, όπως προέκυψε από τις μετρήσεις και τους παραπάνω υπολογισμούς.

3.7.2 Άοπλα πρισματικά δοκίμια

Για την αποτίμηση των διαγραμμάτων τάσεων παραμορφώσεων του ΚΔ κατά τη φάση διεξαγωγής των πειραμάτων, σκυροδετήθηκαν επί πλέον τέσσερα άοπλα πρίσματα σε κλίμακα παρόμοια με αυτή των οπλισμένων πρισμάτων του πειραματικού προγράμματος και από τα ίδια σκυροδέματα κατασκευής, και με διαστάσεις ως ακολούθως:

- Δοκίμιο ΑΠ1: διαστάσεις 15x15 cm², ΚΔ κατηγορίας LC22 (μέση αντοχή 32 MPa)
- Δοκίμιο ΑΠ2: διαστάσεις 20x20 cm², ΚΔ κατηγορίας LC22 (μέση αντοχή 32 MPa)
- Δοκίμιο ΑΠ3: διαστάσεις 25x25 cm², ΚΔ κατηγορίας LC22 (μέση αντοχή 32 MPa)
- Δοκίμιο ΑΠ4: διαστάσεις 20x20 cm², ΚΔ κατηγορίας LC30 (μέση αντοχή 44 MPa)

Όπως και στα οπλισμένα δοκίμια, οι παραμορφώσεις μετρήθηκαν με τον ίδιο τρόπο, αριθμό και διάταξη εξωτερικών μετρητικών οργάνων (βελόμετρα) όπως και τα οπλισμένα δοκίμια, στο μέσον τρίτο του ύψους τους. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών δίδονται υπό μορφή διαγραμμάτων τάσεων - παραμορφώσεων στο Σχήμα 3.6.2 α-δ. Παρατηρείται ότι τα πρισματικά δοκίμια μεγάλης σχετικά κλίμακας, απέδωσαν μέγιστη θλιπτική αντοχή κατά τι μικρότερη από τη μέση αντοχή των πρότυπων κυλινδρικών δοκιμίων.



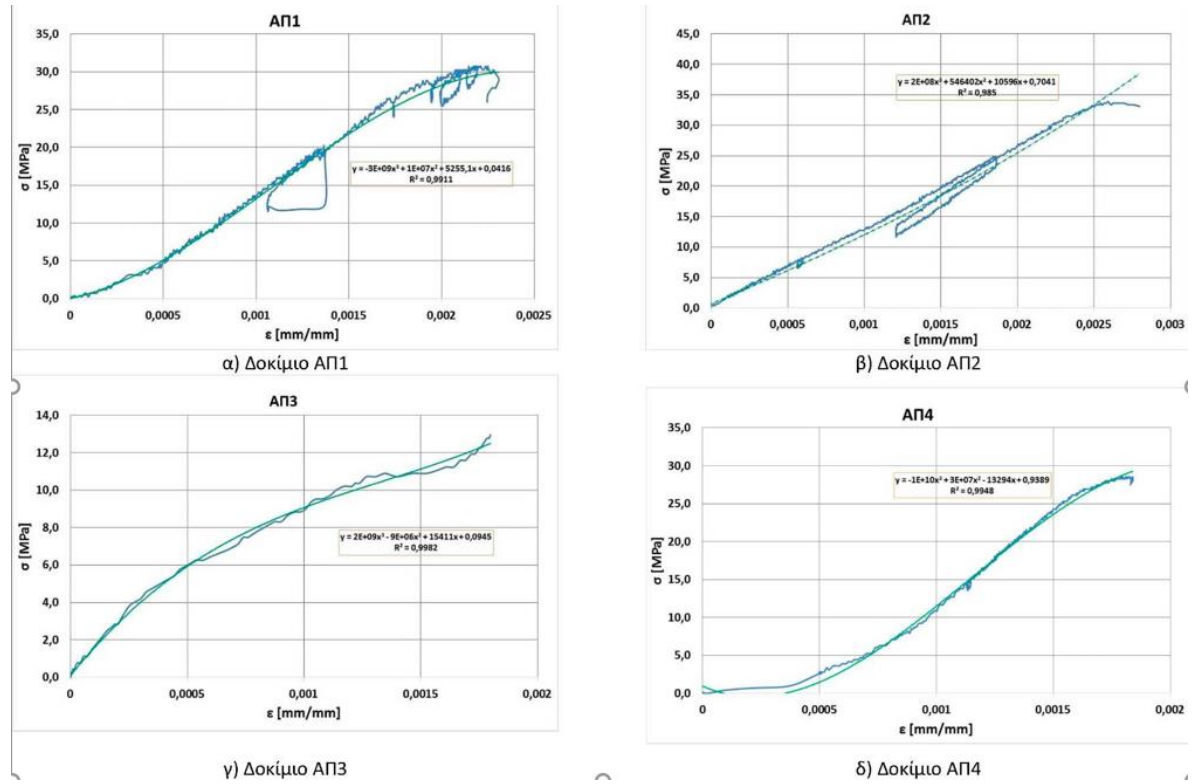
α)



β)

Σχήμα 3.11: Τοποθέτηση στη διάταξη φόρτισης του δοκιμίου και αστοχία υπό μορφή διαμήκους διάρρηξης: α) Δοκίμιο ΑΠ1 15x15cm² και β) Δοκίμιο ΑΠ3 25x25cm²

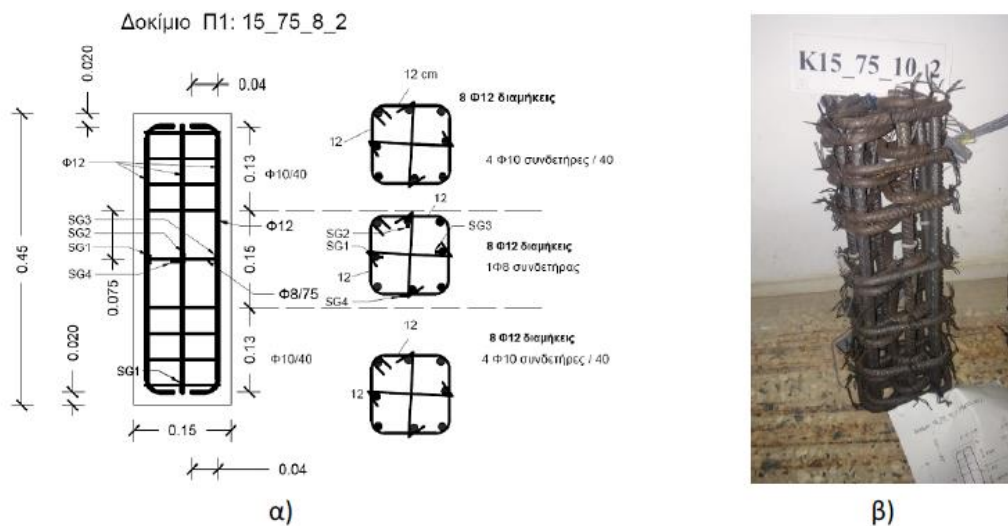
Ειδικότερα το δοκίμιο ΑΠ3, απέδωσε πολύ μικρές αντοχές, καθώς εμφάνισε κατά τη δοκιμή πρώιμη αστοχία μορφής κατακόρυφης διάρρηξης στο μέσον του, η οποία αποδίδεται στην αδρότητα της ελεύθερης επιφάνειας σκυροδέτησης, όπου εφαρμόστηκε το φορτίο και στο μη πλήρως επιπεδωμένο σχήμα της. Για το λόγο αυτό, οι τιμές της εν λόγω δοκιμής αγνοήθηκαν στους περαιτέρω υπολογισμούς.



Σχήμα 3.12: Διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων των άοπλων υποστυλωμάτων

3.7.3 Οπλισμένα πρισματικά υποστυλώματα

3.7.3.1 Υποστύλωμα Π1



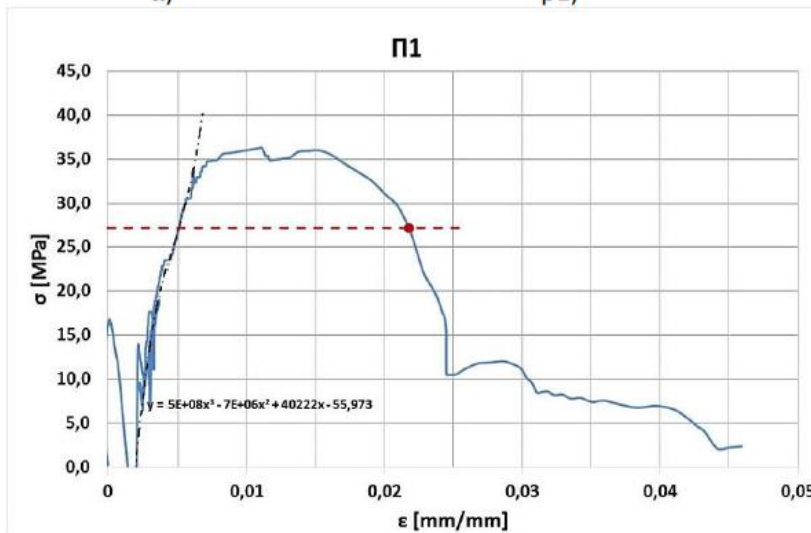
Σχήμα 3.13: Δοκίμιο Π1. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου



α)



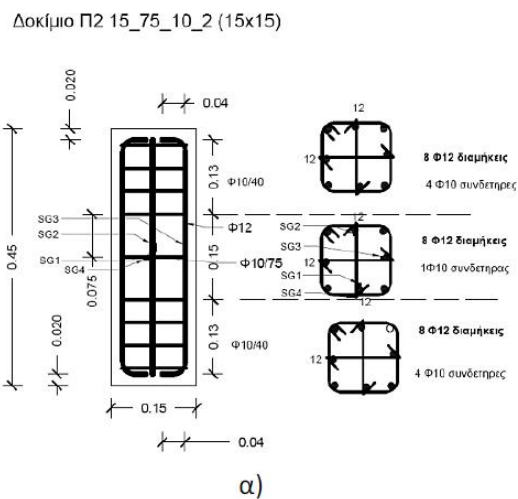
β2)



γ)

Σχήμα 3.14: Δοκίμιο Π1. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα

3.7.3.2 Υποστύλωμα Π2



α)



β)

Σχήμα 3.15: Δοκίμιο Π2. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου



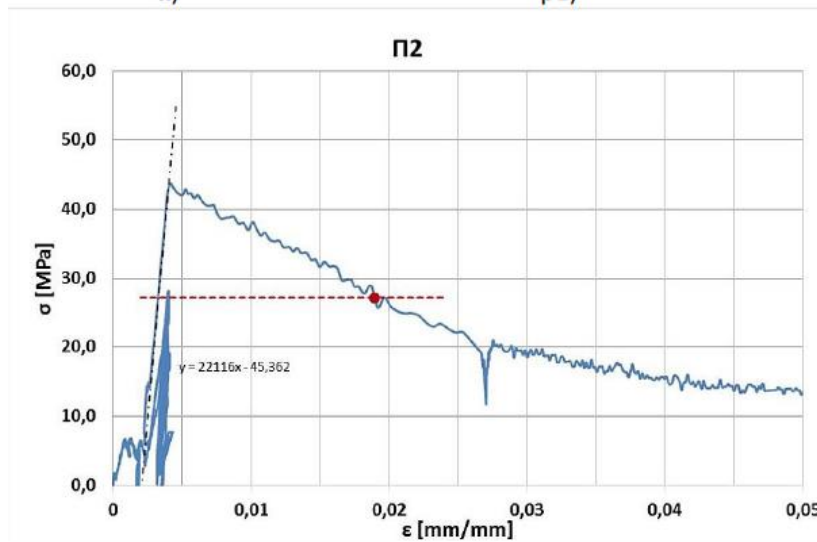
α)



β1)



β2)

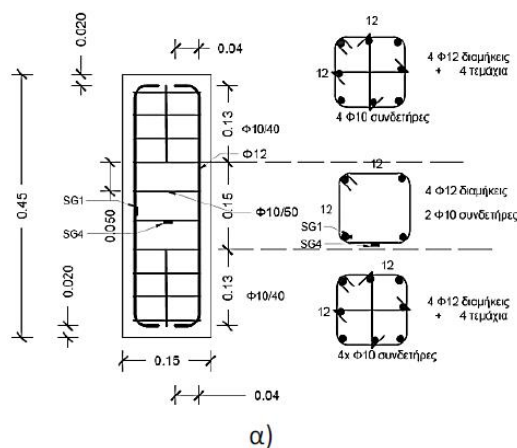


γ)

Σχήμα 3.16: Δοκίμιο Π2. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.

3.7.3.3 Υποστύλωμα Π3

Δοκίμιο Π3 15_5_10_1 (15x15)

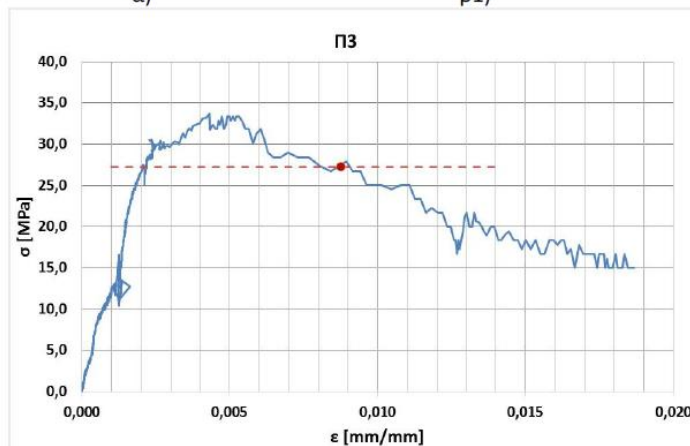


α)



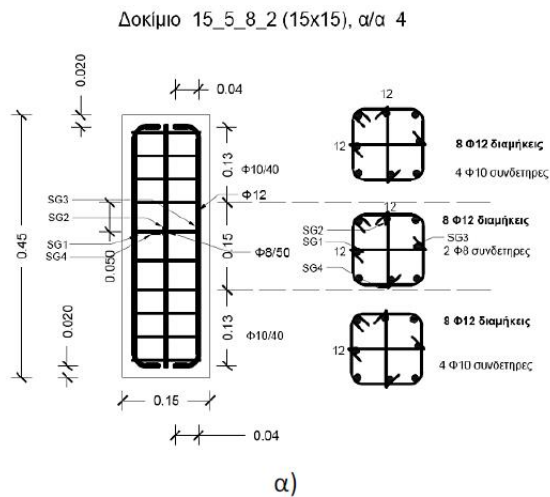
β)

Σχήμα 3.17: Δοκίμιο Π3. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.



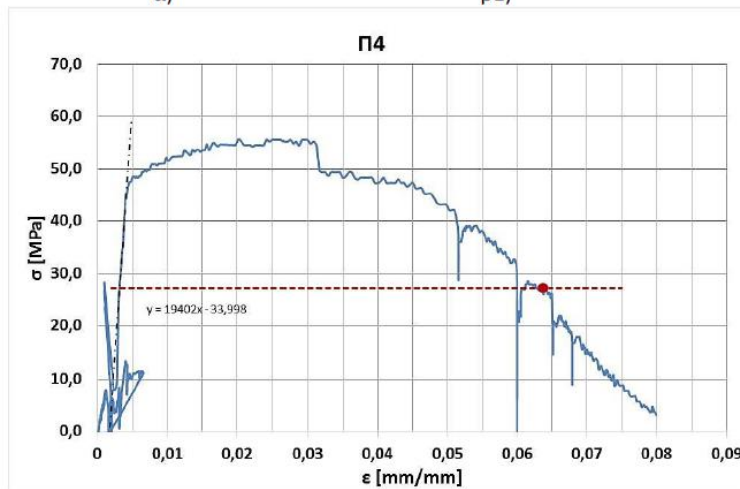
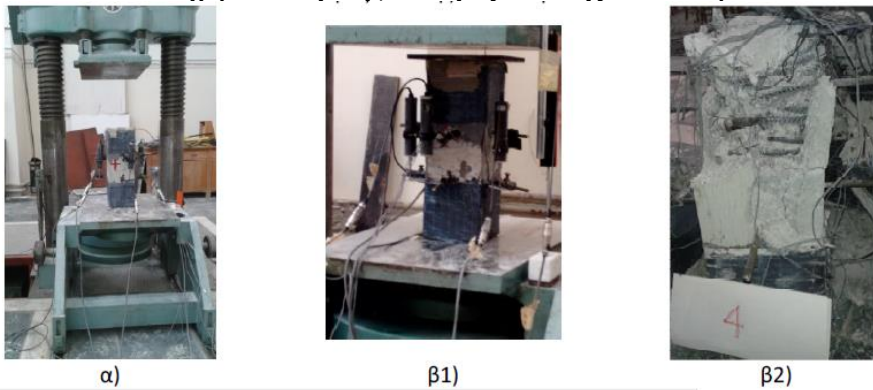
Σχήμα 3.18: Δοκίμιο Π3. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.

3.7.3.4 Υποστύλωμα Π4



β)

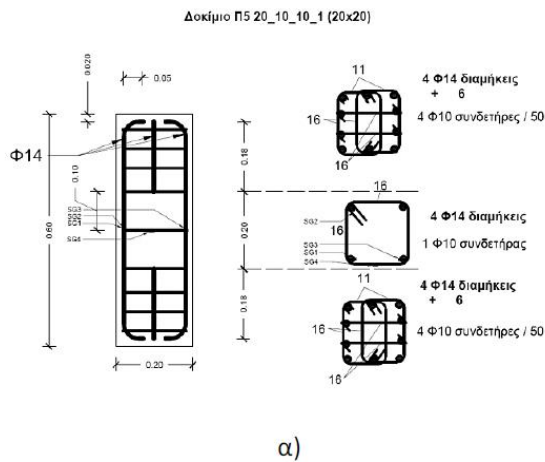
Σχήμα 3.19: Δοκίμιο Π4. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου



γ)

Σχήμα 3.20: Δοκίμιο Π4. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιοίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.

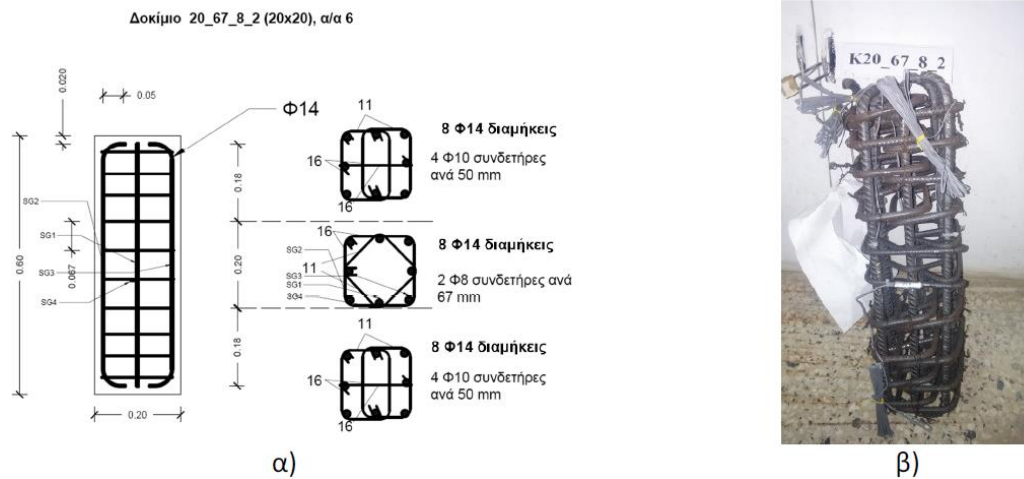
3.7.3.5 Υποστύλωμα Π5



Σχήμα 3.21: Δοκίμιο Π5. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου

3.7.3.6 Υποστύλωμα Π6

Στο υποστύλωμα Π6 κατά τη διάρκεια του πειράματος εμφανίσθηκε εκκεντρότητα φόρτισης με αποτέλεσμα το άνω τμήμα του δοκιμίου να αποκτήσει μικρή στροφή και να αστοχήσει πρόωρα. Για το λόγο αυτό η χρονοϊστορία φόρτισης παρουσιάζει δύο μέγιστα: το πρώτο, όταν το άνω τμήμα αστοχεί και το δεύτερο όταν το ελεγχόμενο μεσαίο τμήμα αστοχεί.



Σχήμα 3.22: Δοκίμιο Π6. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.



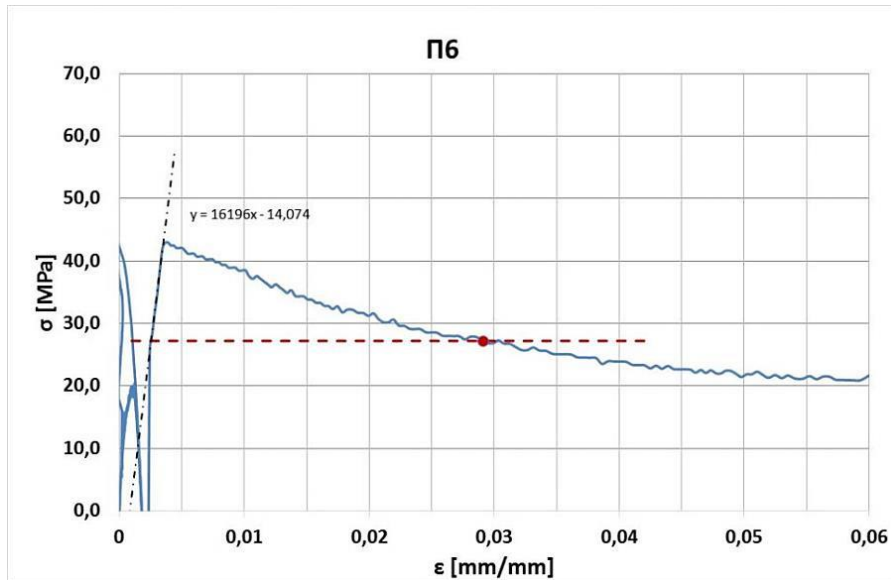
α)



β1)

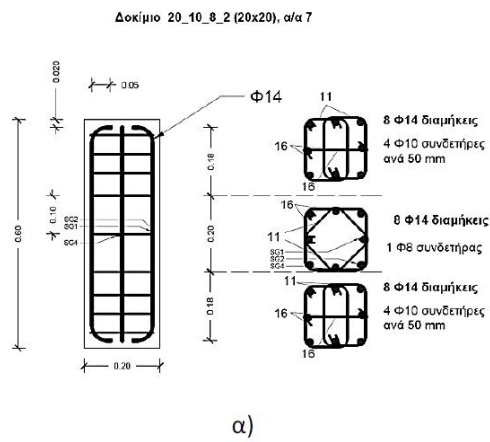


β2)



Σχήμα 3.23: Δοκίμιο Π6. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.

3.7.3.7 Υποστύλωμα Π7



β)

Σχήμα 3.24: Δοκίμιο Π7. Α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου



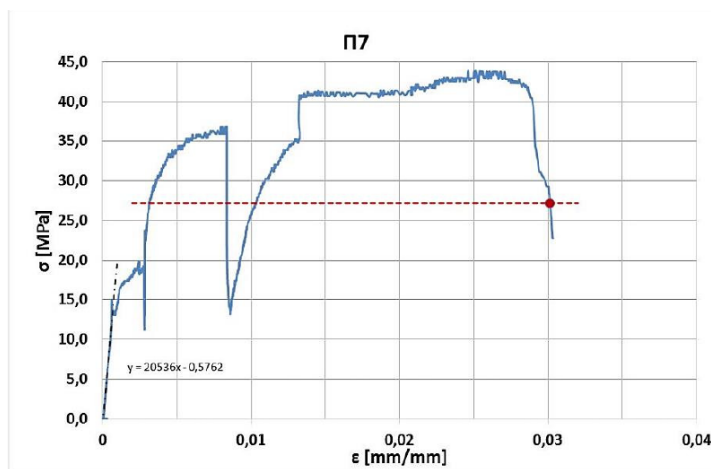
α)



β1)



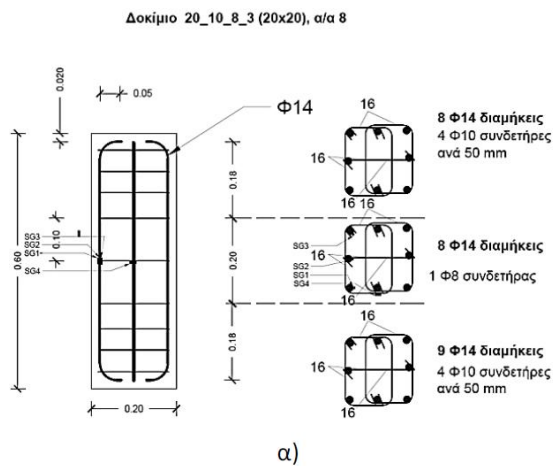
β2)



γ)

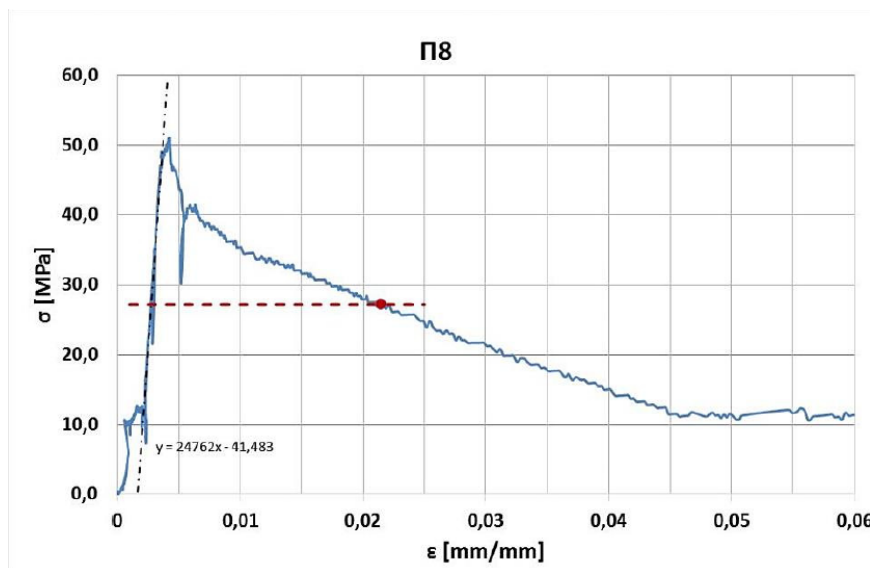
Σχήμα 3.25: Δοκίμιο Π7. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.

3.7.3.8 Υποστύλωμα Π8



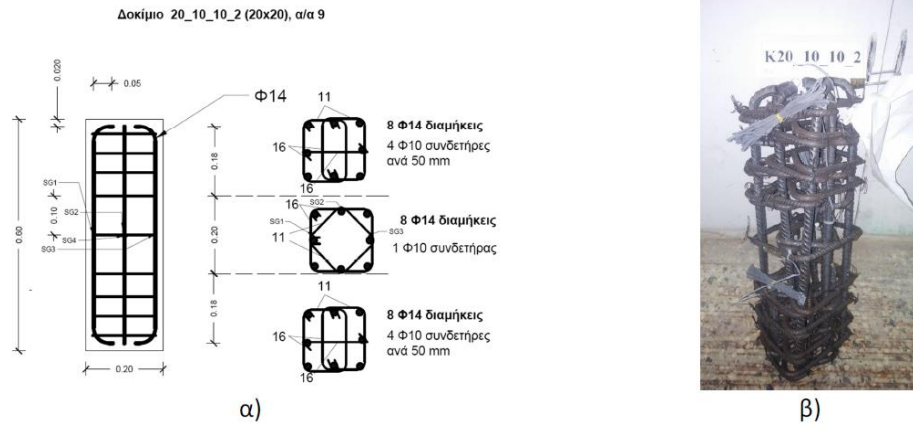
β)

Σχήμα 3.26: Δοκίμιο Π8. Α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου

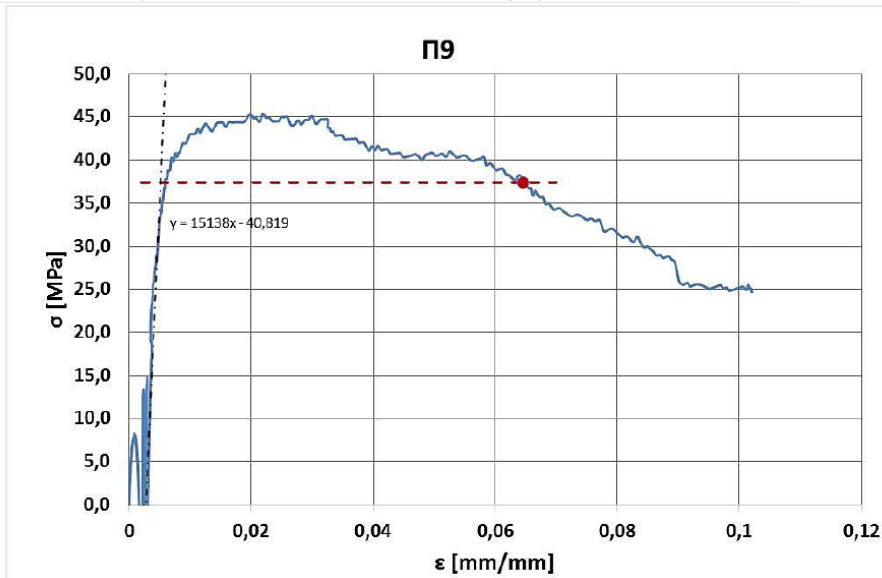


Σχήμα 3.27: Δοκίμιο Π8. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοΐωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.

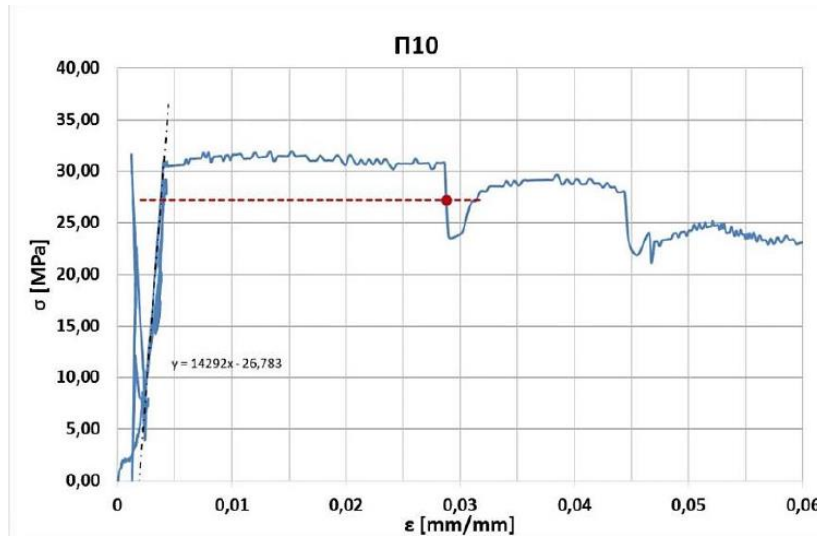
3.7.3.9 Υποστύλωμα Π9



Σχήμα 3.28: Δοκίμιο Π9. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.



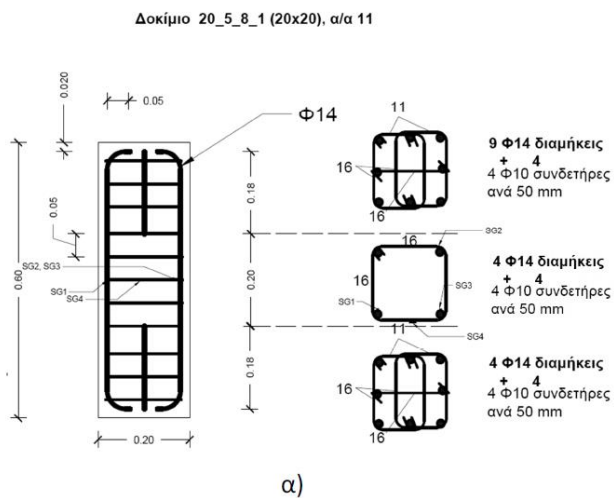
γ)



γ)

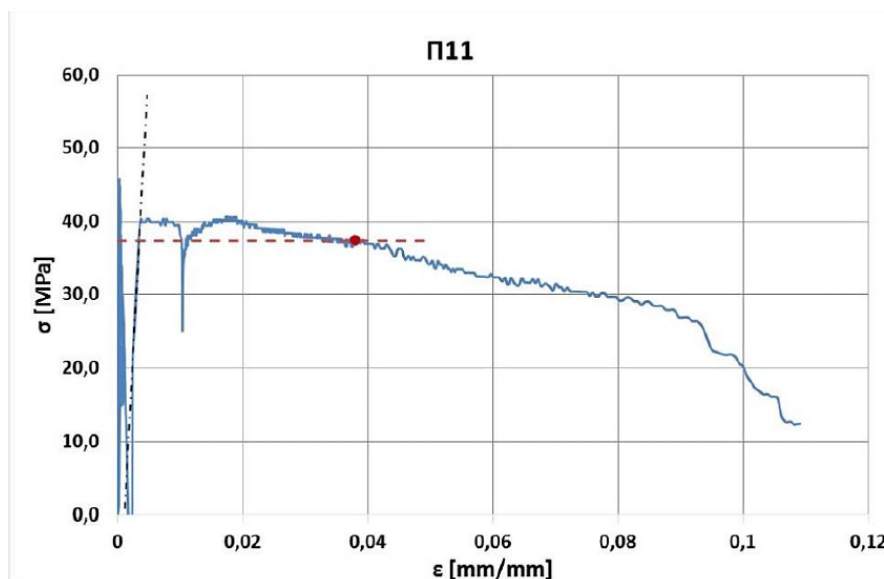
Σχήμα 3.31: Δοκίμιο Π10. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.

3.7.3.11 Υποστόλωμα Π11



β)

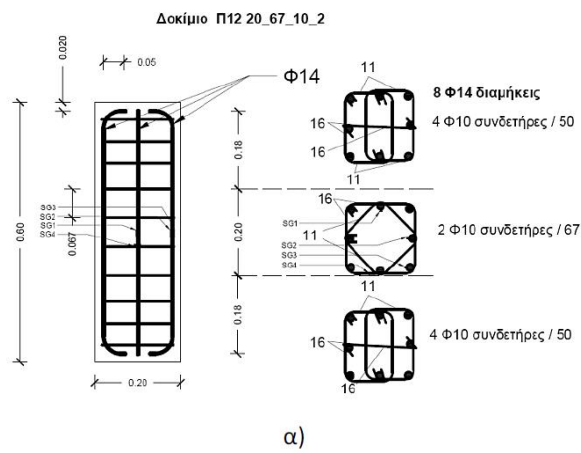
Σχήμα 3.32: Δοκίμιο Π11. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.



γ)

Σχήμα 3.33: Δοκίμιο Π11. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.

3.7.3.12 Υποστύλωμα Π12

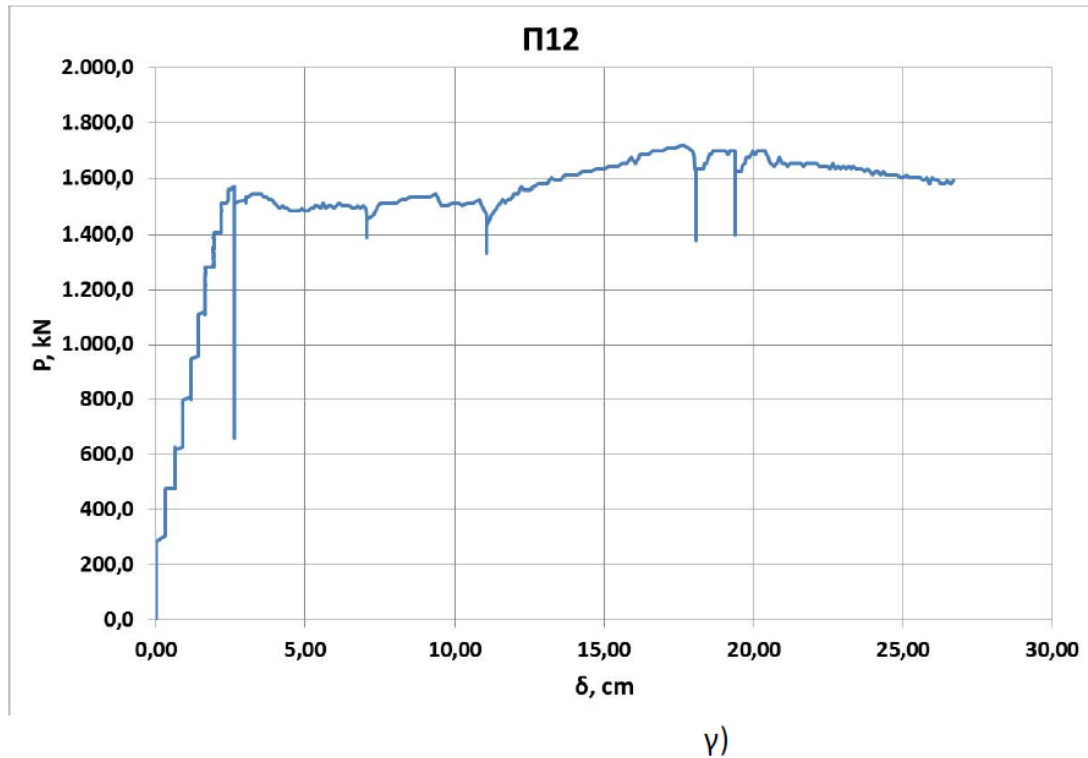


Σχήμα 3.34: Δοκίμιο Π12. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.



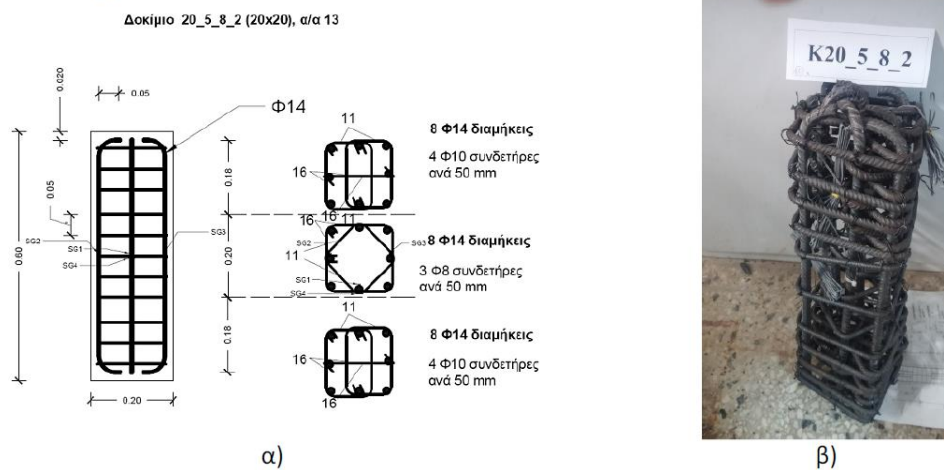
πρωτογενής διατομή του δοκιμίου.



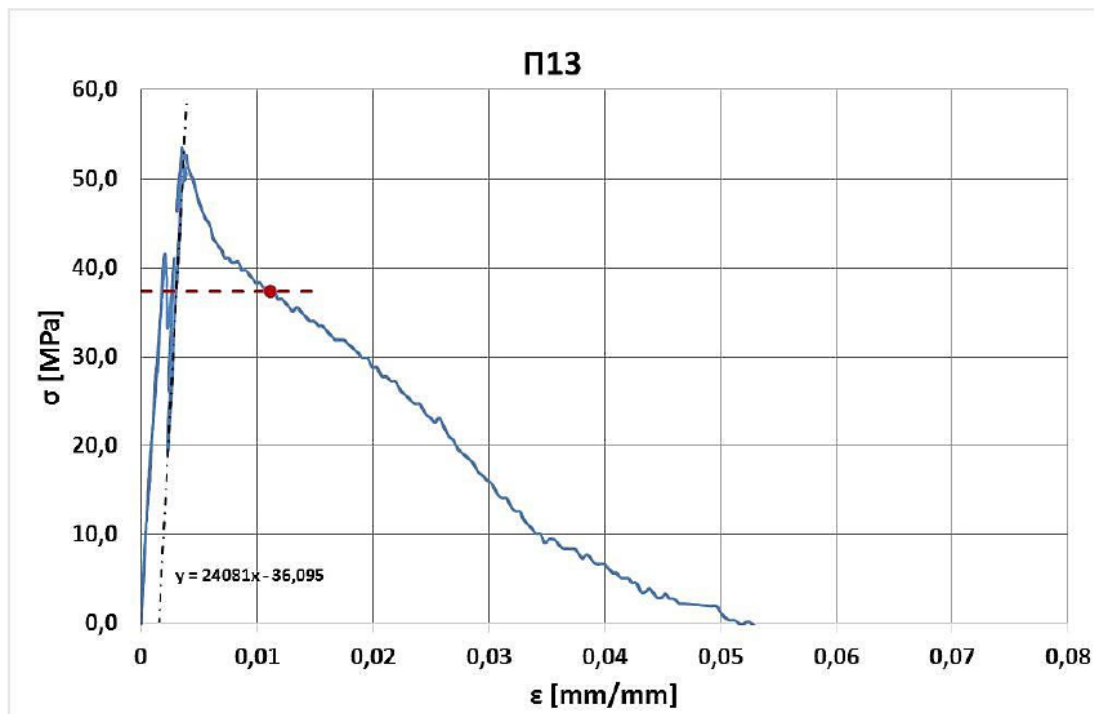
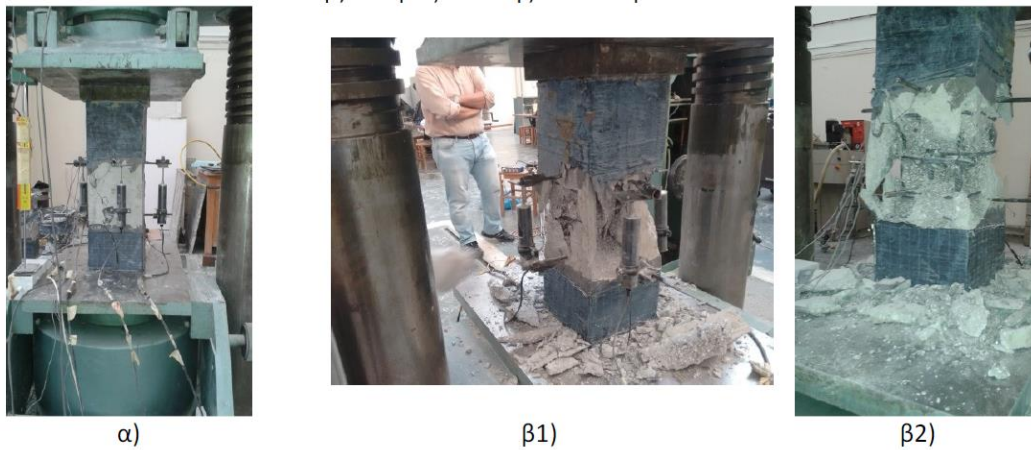


Σχήμα 3.35: Δοκίμιο Π12. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Διάγραμμα φορτίου – βύθισης (μέγιστο φορτίο 1720 kN)

3.7.3.13 Υποστύλωμα Π13

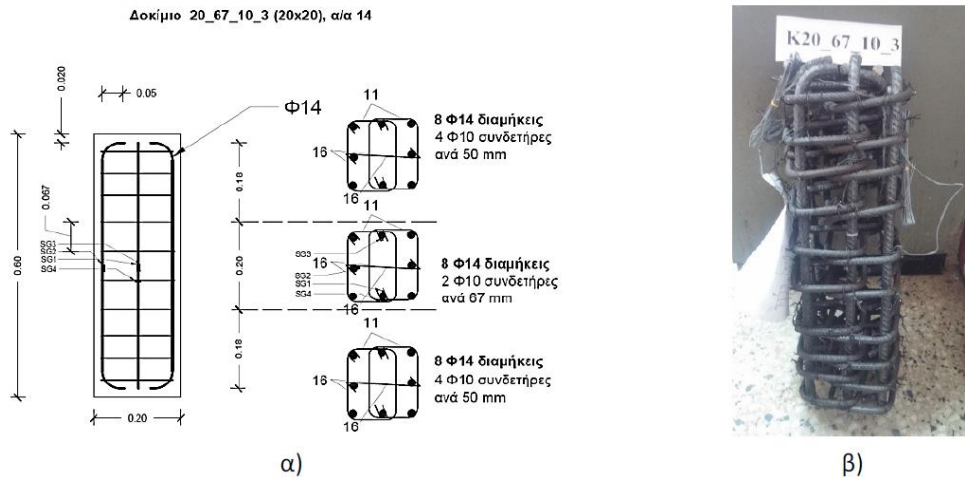


Σχήμα 3.36: Δοκίμιο Π13. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.



Σχήμα 3.37: Δοκίμιο Π13. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.

3.7.3.14 Υποστύλωμα Π14



Σχήμα 3.38: Δοκίμιο Π14. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.



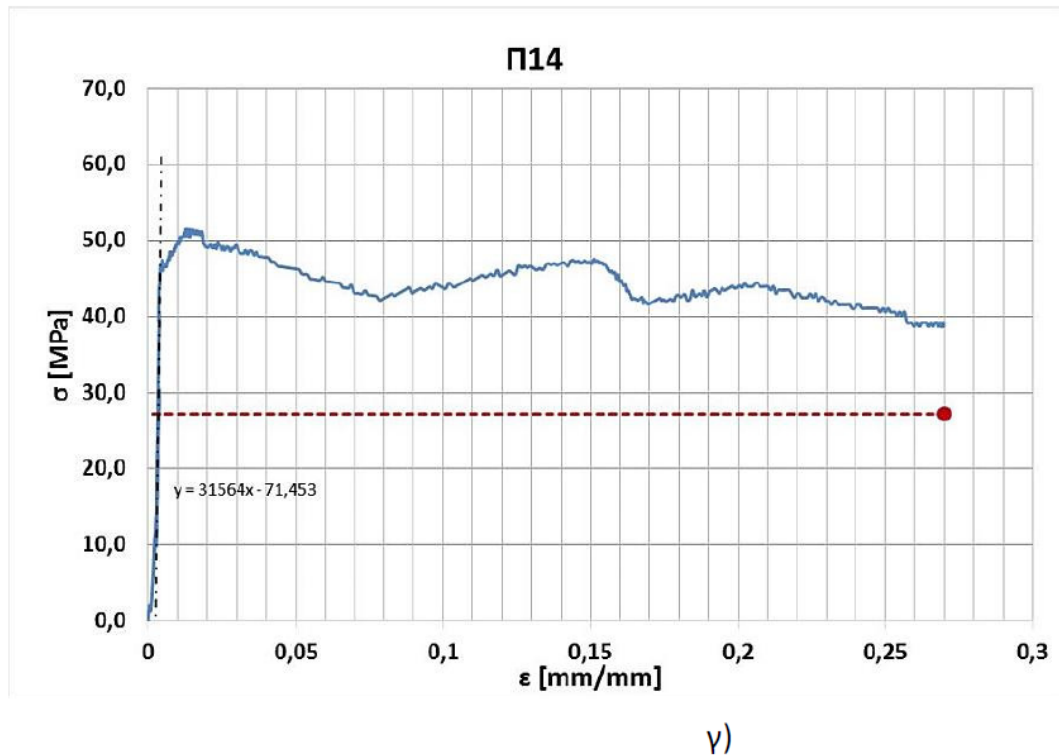
α)



β1)

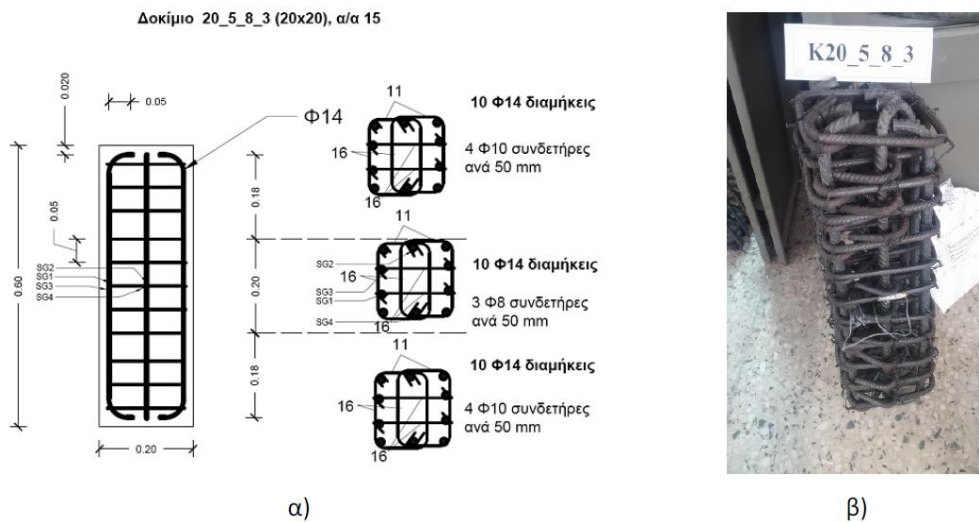


β2)



Σχήμα 3.39: Δοκίμιο Π14. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.

3.7.3.15 Υποστύλωμα Π15

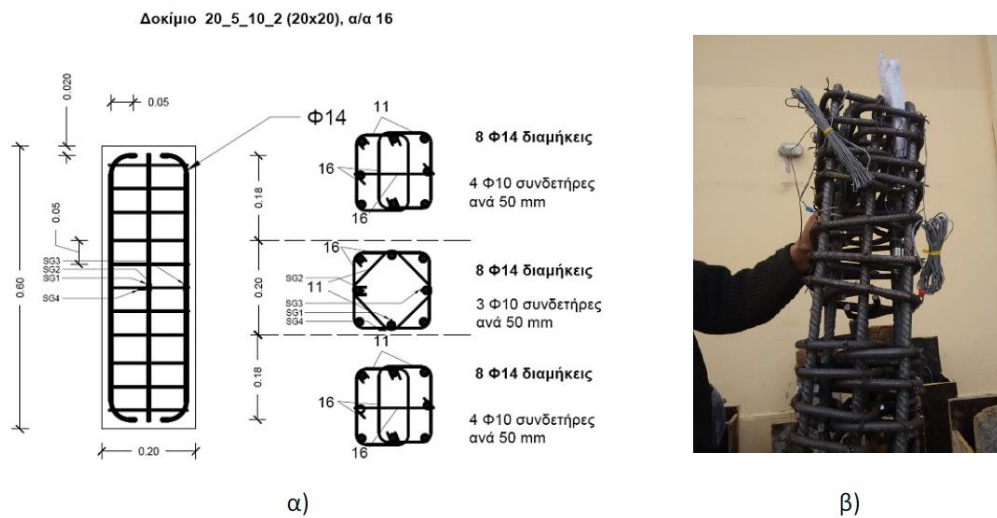


Σχήμα 3.40: Δοκίμιο Π15. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.



Σχήμα 3.41: Δοκίμιο Π15. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος.

3.7.3.16 Υποσύλωμα Π16



Σχήμα 3.42: Δοκίμιο Π16. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.



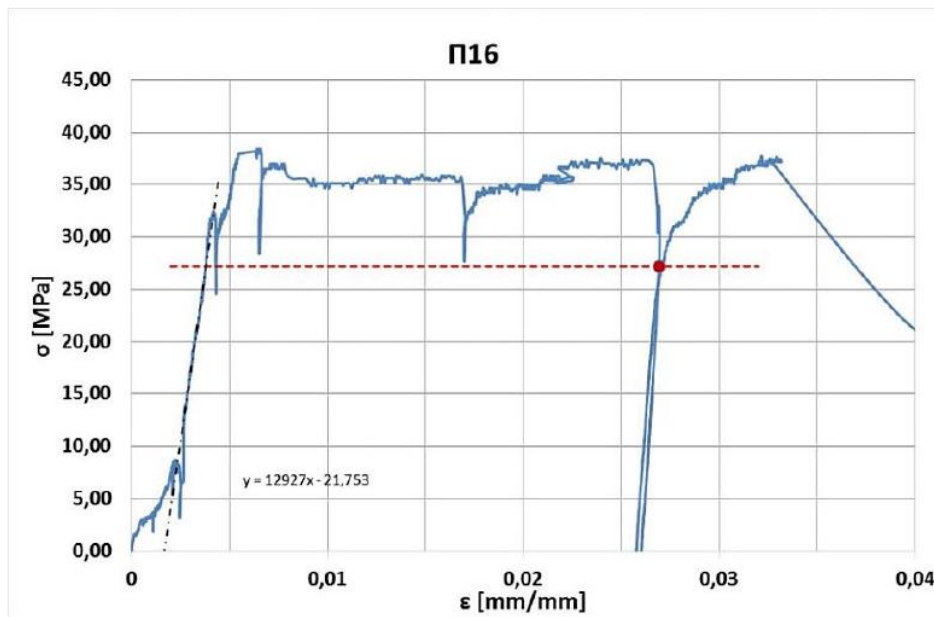
α)



β1)

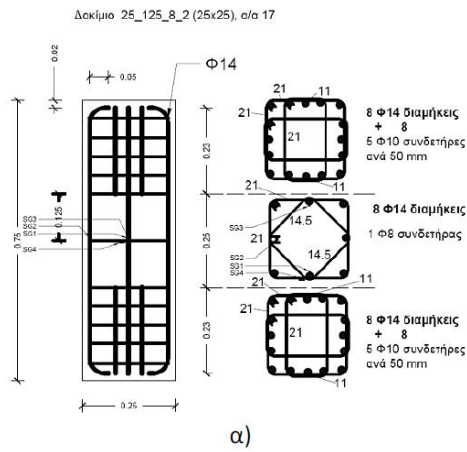


β2)



Σχήμα 3.43: Δοκίμιο Π16. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.

3.7.3.17 Υποστύλωμα Π17



Σχήμα 3.44: Δοκίμιο Π17. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.



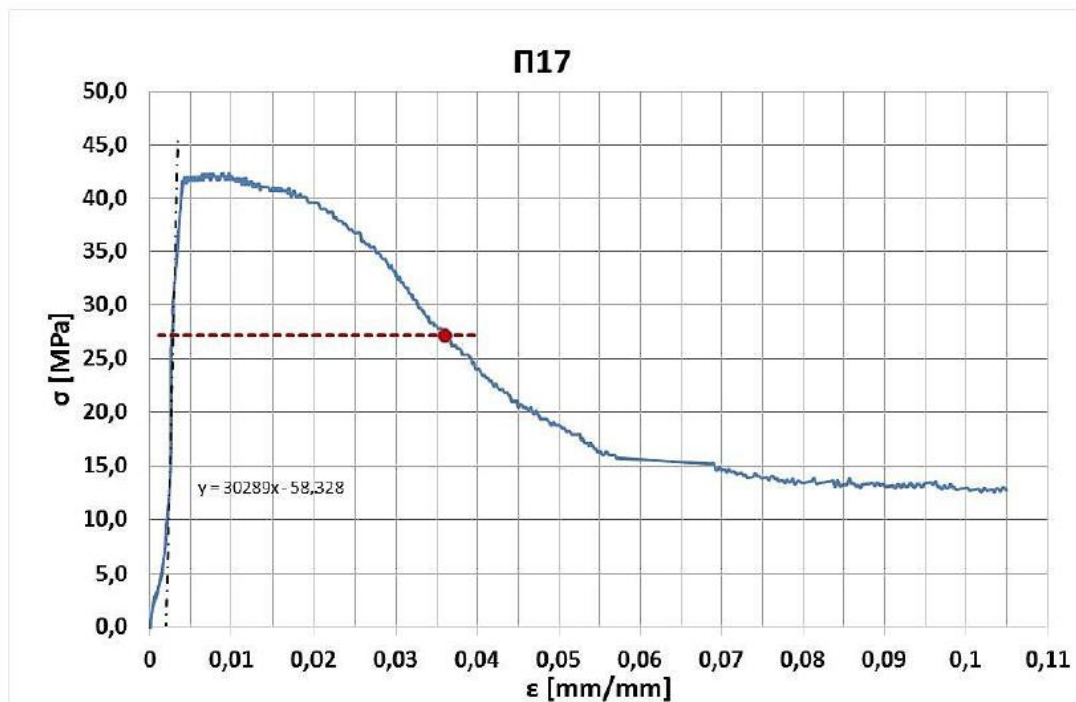
α)



β1)



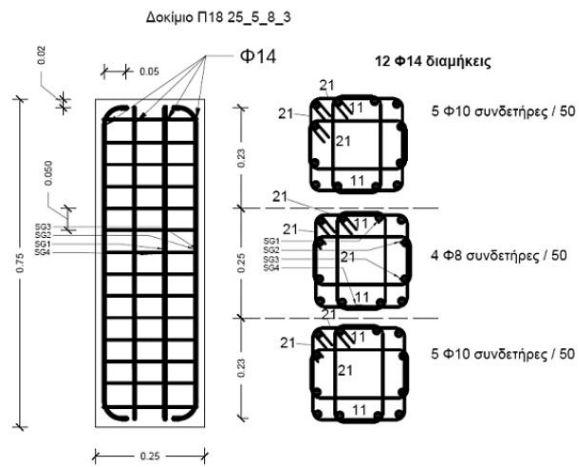
β2)



Σχήμα 3.45: Δοκίμιο Π17. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.

Στο υποστύλωμα Π17 οι πρώτες ρωγμές αναπτύχθηκαν σε φορτίο 2105 kN, που αντιστοιχεί σε τάση του περισφιγμένου πυρήνα 36.54 MPa και σε παραμόρφωση 0.0025. Η αποφλοίωση στο χώρο του μέσου του δοκιμίου συμβαίνει όταν η τάση πυρήνα έχει μειωθεί στα 20 MPa. Ο εγκάρσιος σπλισμός διαρρέει ακριβώς στην επίτευξη του μέγιστου φορτίου.

3.7.3.18 Υποστύλωμα Π18



α)

β)

Σχήμα 3.46: Δοκίμιο Π18 α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.



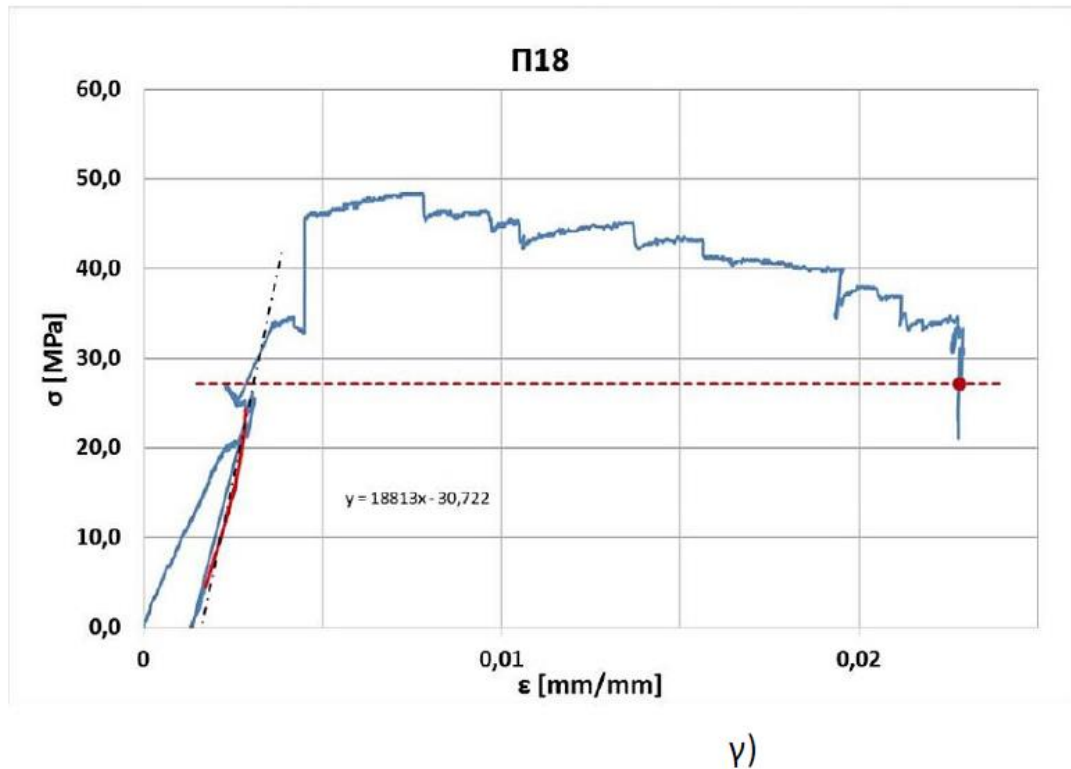
α)



β1)

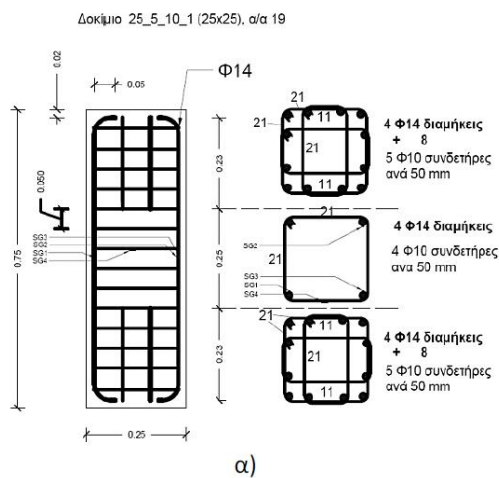


β2)

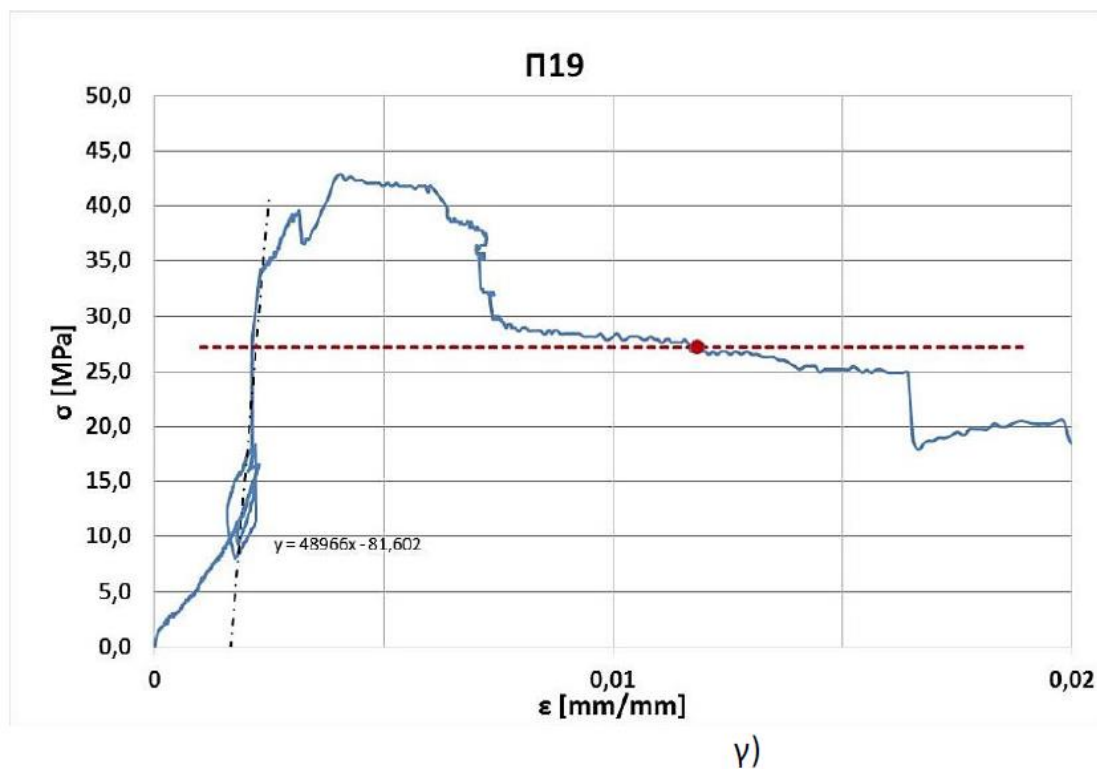
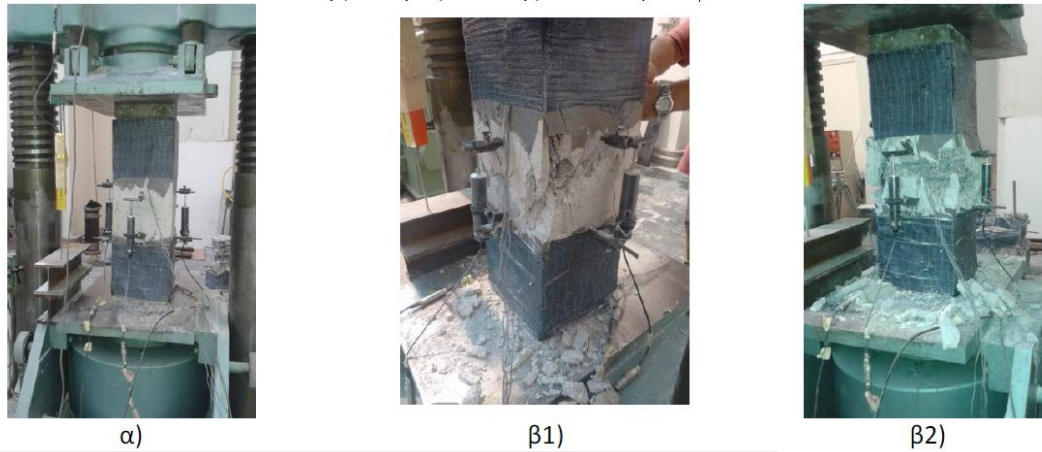


Σχήμα 3.47: Δοκίμιο Π18. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.

3.7.3.19 Υποστόλωμα Π19

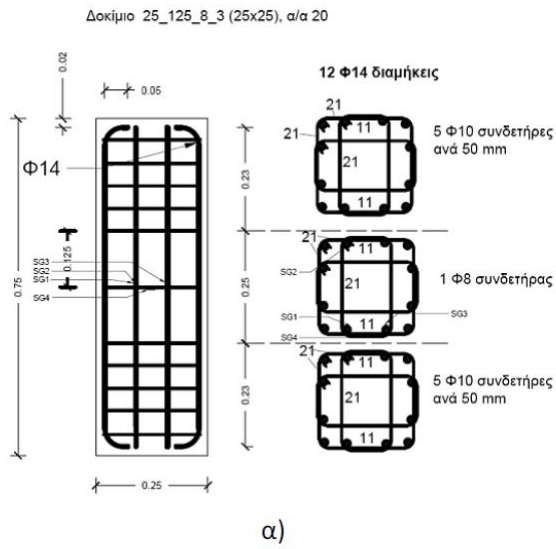


Σχήμα 3.48: Δοκίμιο Π19 α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.



Σχήμα 3.49: Δοκίμιο Π19. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.

3.7.3.20 Υποστύλωμα Π20



β)

Σχήμα 3.50: Δοκίμιο Π20 α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.



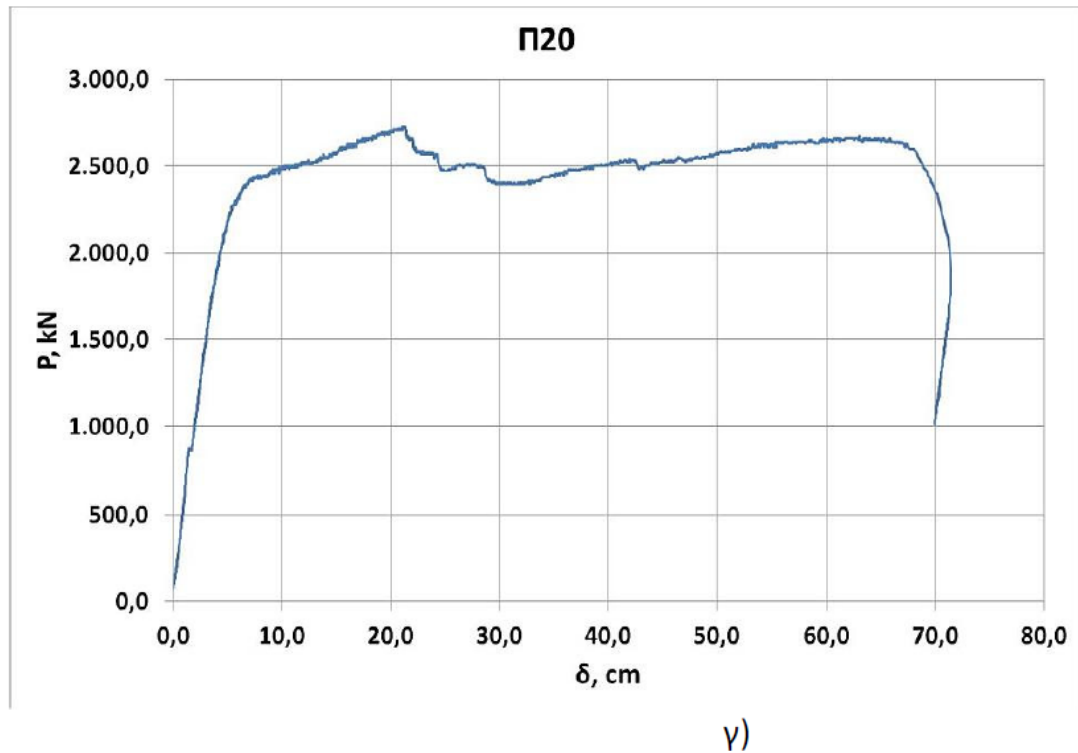
α)



β1)

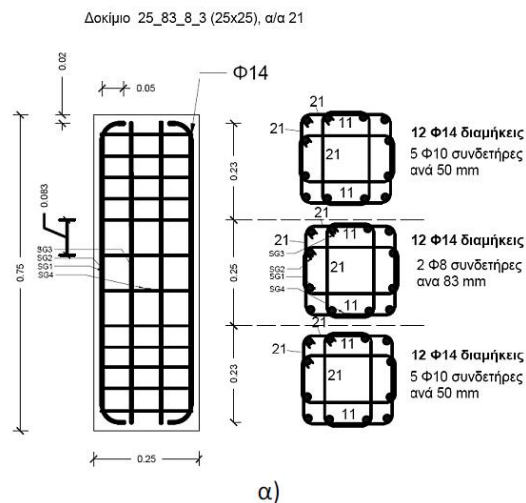


β2)



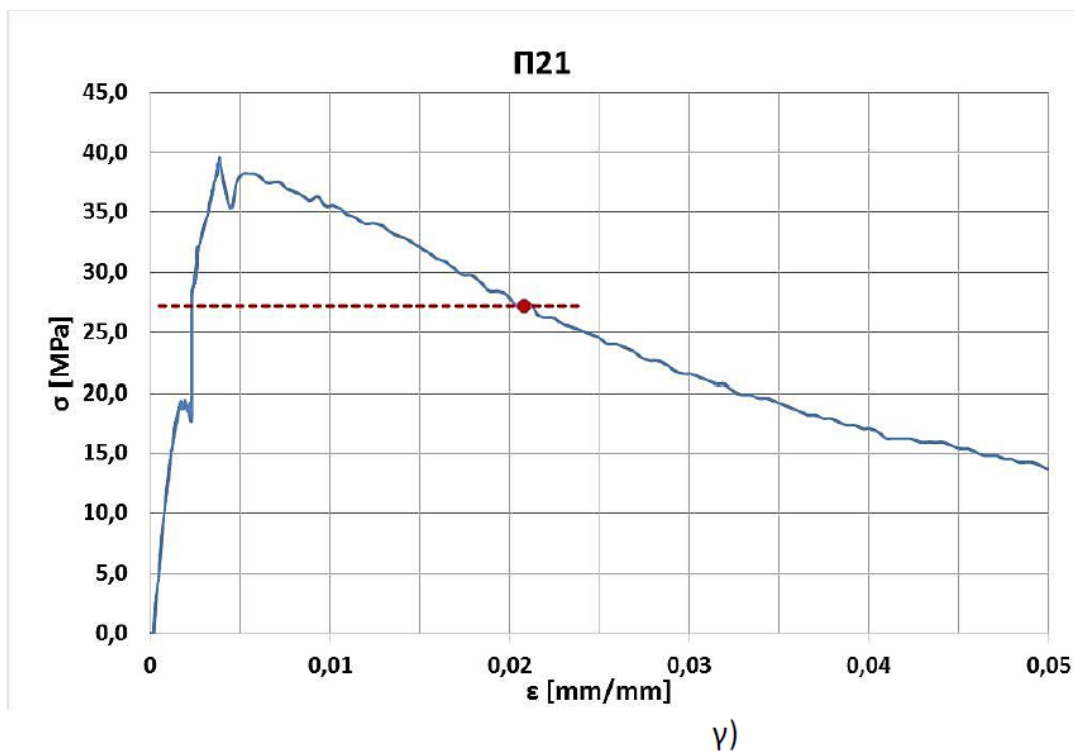
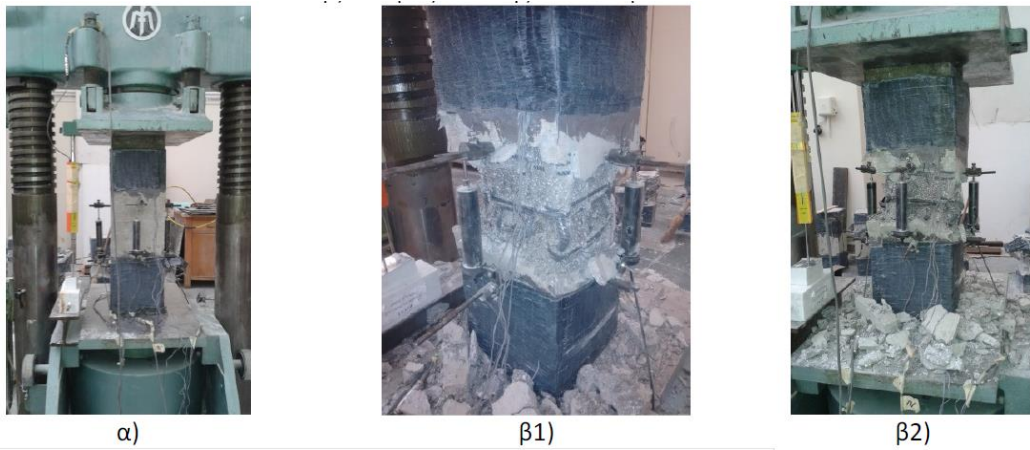
Σχήμα 3.51: Δοκίμιο Π20. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα φορτίου – παραμορφώσεων του δοκιμίου.

3.7.3.21 Υποστόλωμα Π21



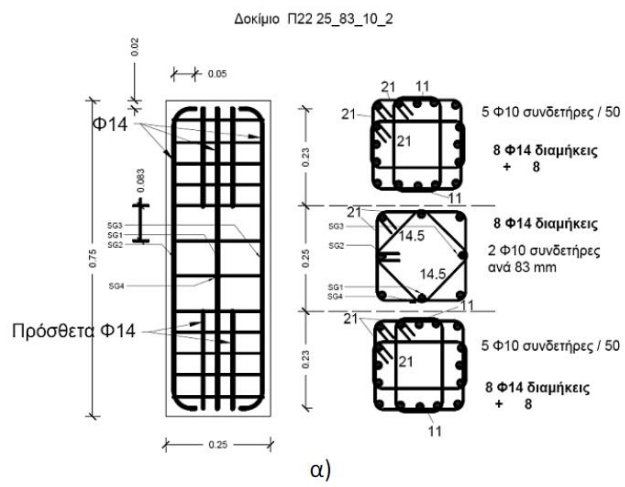
β)

Σχήμα 3.52: Δοκίμιο Π21 α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου



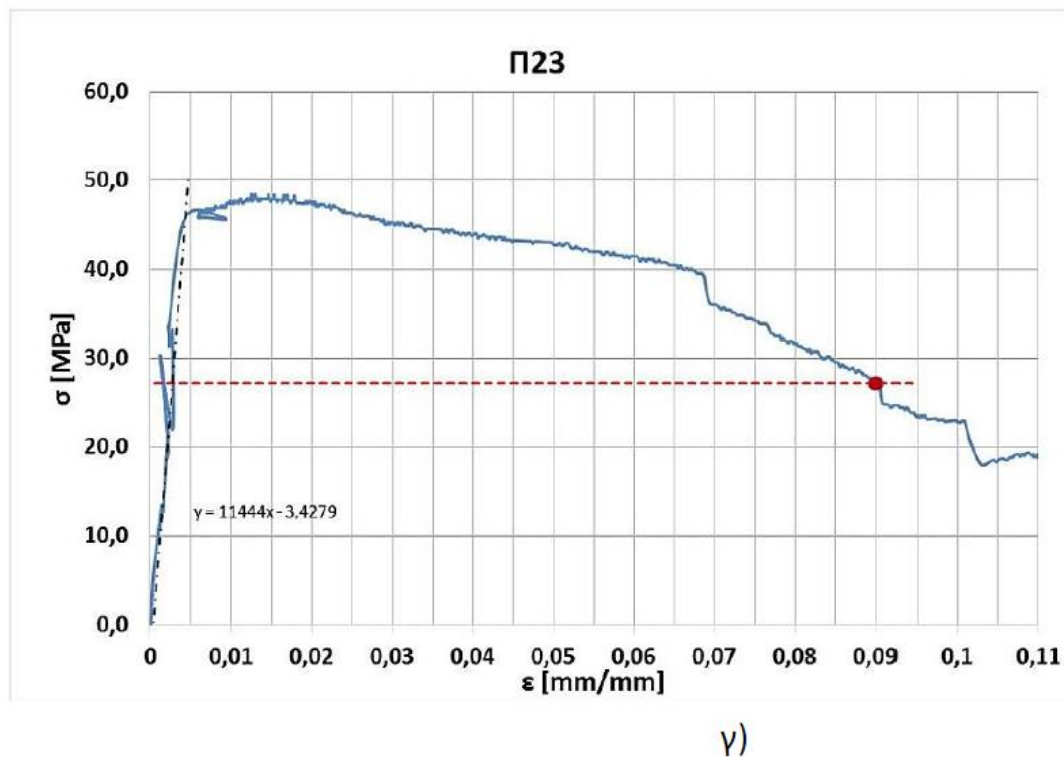
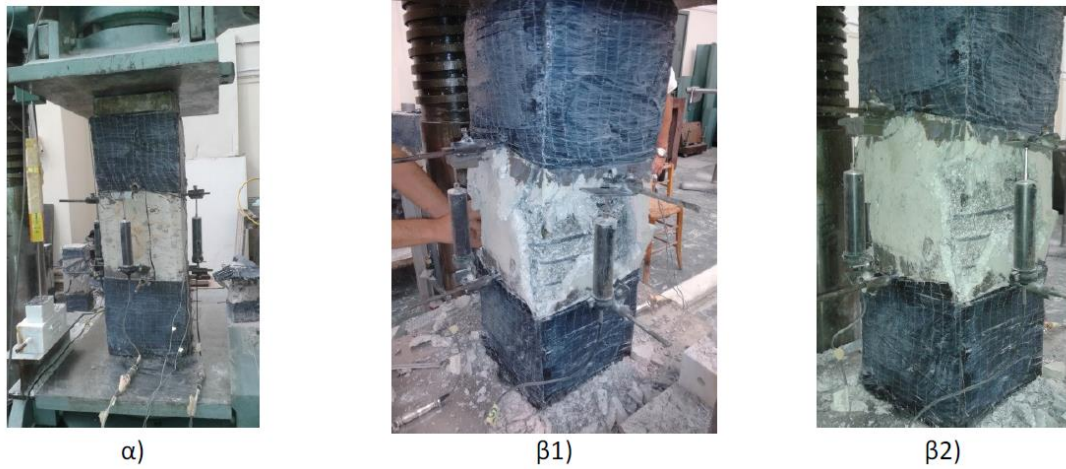
Σχήμα 3.53: Δοκίμιο Π21. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στο λυγισμό του οπλισμού και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.

3.7.3.22 Υποστύλωμα Π22



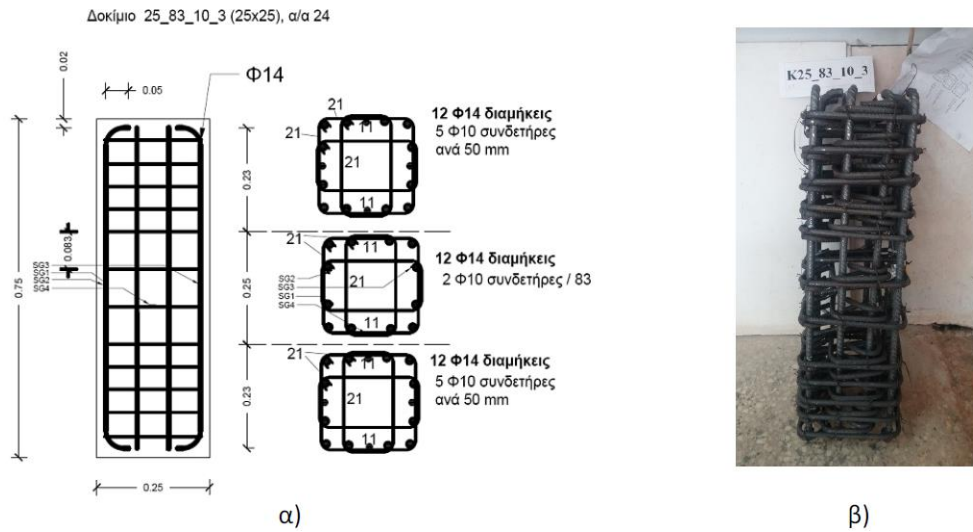
Σχήμα 3.54: Δοκίμιο Π22 α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου



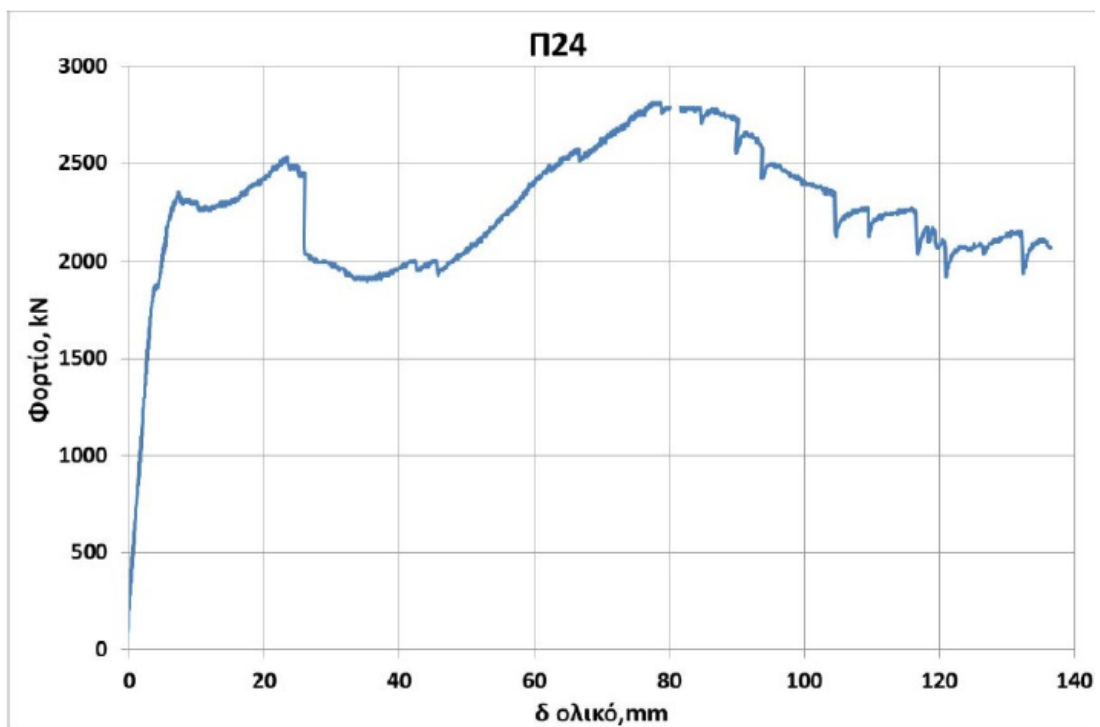


Σχήμα 3.57: Δοκίμιο Π23. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.

3.7.3.24 Υποστύλωμα Π24



Σχήμα 3.58: Δοκίμιο Π24 α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.



γ)

Σχήμα 3.59: Δοκίμιο Π24. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και

β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα φορτίου – παραμορφώσεων του δοκιμίου.

Το δοκίμιο Π24, διαστάσεων 25/25 cm από ΚΔ LC22, με διαμήκη οπλισμό 12Φ14 και περισφιγμένο με Φ10/80mm (από τα πλέον περισφιγμένα δοκίμια της παρούσης) δεν απέδωσε αξιόλογα πειραματικά αποτελέσματα καθώς αστόχησε πριν παραλάβει μεγάλες παραμορφώσεις το μέσο τμήμα του δοκιμίου, αφού έσπασαν τα ανθρακονήματα περίσφιγξης του άνω τρίτου και συνεπακόλουθα συμπιέστηκε εξ ολοκλήρου αυτό το τμήμα. Το φορτίο αστοχίας του N_u ήταν 281 τόνοι, που αντιστοιχεί σε ένα ανηγμένο αξονικό αστοχίας για το οπλισμένο υποστύλωμα (με περιτύλιξη από ΙΝΟΠ από ανθρακόνημα) $\nu = N_u/b_0^2 f_c = 2.19$.

3.7.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

α/α	$\epsilon_{cu2,c,calc}$	$\epsilon_{c2,c,calc}$	$\alpha\omega_w$	$\epsilon_{lcu2,c,calc}$	$\epsilon_{lc2,c,calc}$	$\epsilon_{cu,exp}^*$	$\epsilon_{c0,exp}^*$	ϵ_{c2}^*	$\frac{\epsilon_{cu,exp}^*}{\epsilon_{lcu,calc}^*}$	$\frac{\epsilon_{cu,exp}^*}{\epsilon_{cu2,c,calc}}$	$\frac{f_{c,exp}^*}{f_{c,calc}^*}$	$\frac{f_{c,exp}^*}{f_{lc,calc}^*}$	$\frac{\epsilon_{c0,exp}^*}{\epsilon_{lc2,c,calc}}$	k	$\epsilon_{c2}/\epsilon_{c0,exp}^*$
1	2.2E-02	3.7E-03	0.189	2.18E-02	2.40E-03	0.01966	0.00180	0.00180	0.90	0.88	0.83	1.04	0.75	1.13	1.00
2	3.4E-02	4.5E-03	0.301	3.31E-02	2.65E-03	0.01691	0.00205	0.00205	0.51	0.50	0.91	1.19	0.77	1.37	1.00
3	2.4E-02	3.8E-03	0.207	2.36E-02	2.44E-03	0.00878	0.00390	0.00390	0.37	0.36	0.76	0.95	1.60	1.05	1.00
4	4.2E-02	5.2E-03	0.390	4.19E-02	2.86E-03	0.06195	0.00295	0.02945	1.48	1.46	1.08	1.45	1.03	1.74	9.99
5	9.0E-03	2.6E-03	0.055	8.39E-03	2.11E-03	0.02519	0.00241	0.00611	3.00	2.81	1.28	1.41	1.14	1.45	2.53
6	2.1E-02	3.6E-03	0.170	2.02E-02	2.36E-03	0.02825	0.00303	0.00303	1.40	1.37	0.82	1.01	1.29	1.09	1.00
7	1.5E-02	3.2E-03	0.118	1.47E-02	2.24E-03	0.03014	0.00820	0.00820	2.05	1.97	1.08	1.30	3.66	1.37	1.00
8	1.7E-02	3.4E-03	0.138	1.67E-02	2.29E-03	0.01979	0.00248	0.00248	1.18	1.14	1.23	1.49	1.09	1.59	1.00
9	1.7E-02	3.4E-03	0.136	1.67E-02	2.28E-03	0.06195	0.01610	0.02990	3.71	3.63	0.80	0.97	7.06	1.03	1.86
10	2.5E-02	3.9E-03	0.219	2.48E-02	2.46E-03	0.02694	0.00223	0.00223	1.09	1.06	0.71	0.90	0.90	1.00	1.00
11	1.1E-02	2.8E-03	0.076	1.07E-02	2.15E-03	0.03697	0.00369	0.01598	3.46	3.34	0.78	0.89	1.71	0.92	4.33
12	4.1E-02	5.0E-03	0.371	4.00E-02	2.81E-03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	2.9E-02	4.2E-03	0.258	2.89E-02	2.55E-03	0.00968	0.00240	0.00240	0.33	0.33	0.84	1.08	0.94	1.22	1.00
14	4.7E-02	5.6E-03	0.435	4.64E-02	2.96E-03	0.26774	0.00369	0.00554	5.77	5.70	0.96	1.32	1.24	1.61	1.50
15	4.5E-02	5.4E-03	0.416	4.45E-02	2.92E-03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	6.0E-02	6.7E-03	0.562	5.91E-02	3.28E-03	0.02524	0.00375	0.00495	0.43	0.42	0.66	0.94	1.14	1.20	1.32
17	1.1E-02	2.8E-03	0.074	1.03E-02	2.15E-03	0.03414	0.00207	0.00967	3.30	3.13	1.12	1.28	0.96	1.32	4.66
18	4.3E-02	5.3E-03	0.398	4.27E-02	2.88E-03	0.02130	0.00299	0.00629	0.50	0.49	0.93	1.26	1.04	1.51	2.10
19	1.7E-02	3.3E-03	0.134	1.64E-02	2.28E-03	0.01017	0.00241	0.00419	0.62	0.60	1.04	1.25	1.06	1.34	1.74
20	1.4E-02	3.1E-03	0.101	1.30E-02	2.21E-03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	2.3E-02	3.8E-03	0.198	2.27E-02	2.42E-03	0.02082	0.00376	0.00376	0.92	0.89	0.90	1.13	1.55	1.24	1.00
22	2.6E-02	4.0E-03	0.228	2.58E-02	2.48E-03	0.02570	0.00792	0.00792	1.00	0.98	0.81	1.03	3.19	1.15	1.00
23	3.3E-02	4.4E-03	0.291	3.20E-02	2.62E-03	0.08974	0.00397	0.02060	2.80	2.75	1.02	1.32	1.51	1.52	5.19
24	3.5E-02	4.6E-03	0.312	3.41E-02	2.67E-03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Πίνακας 3.4: Συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα και σύγκρισή με τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές κατά EC2 και EC8 (2004), με χρήση της μέσης πειραματικής αντοχής f_{cm}

όπου

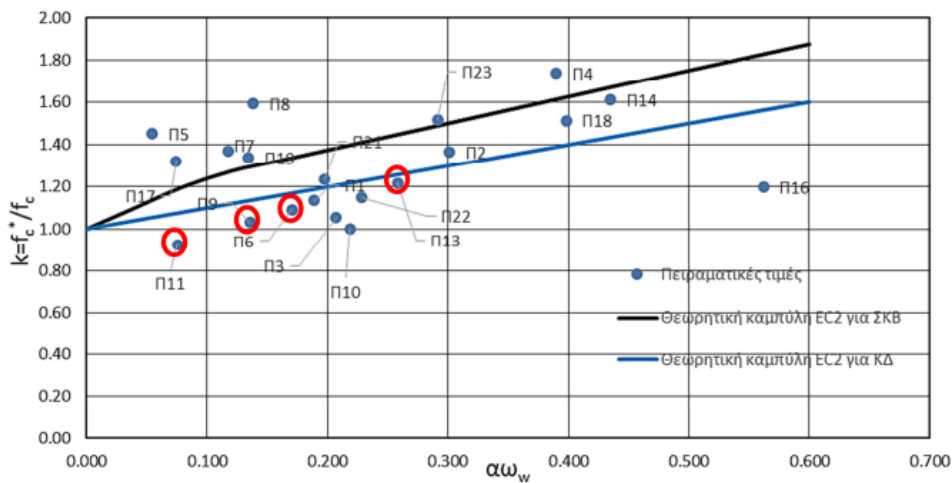
- $\epsilon_{cu2,c,calc}$ και $\epsilon_{lcu2,c,calc}$ η μέγιστη θεωρητικά υπολογιζόμενη ανηγμένη παραμόρφωση κατά EC2 (2004) εξ. 3.27, που αντιστοιχεί σε περισφιγμένο ΣΚΒ και ΚΔ, αντίστοιχα

- $\varepsilon_{lc2,c,calc}$ και $\varepsilon_{lc2,c,calc}$ η θεωρητικά υπολογιζόμενη ανηγμένη παραμόρφωση στη μέγιστη αντοχή $f_{c,exp}^*$, κατά EC2 (2004) εξ. 3.26, για ΣΚΒ και ΚΔ, αντίστοιχα,
- $f_{c,exp}^*$ η μέση θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου πυρήνα από το πείραμα,
- $\varepsilon_{c0,exp}^*$ η μέση πειραματικά αποτιμώμενη παραμόρφωση στη μέγιστη πειραματική αντοχή $f_{c,exp}^*$
- ε_{c2}^* η μέση πειραματικά αποτιμώμενη παραμόρφωση στο τέλος του πλατώ σταθερής μέγιστης αντοχής $f_{c,exp}^*$ (κατά το προσομοίωμα των Sheikh et al., 1992 για ΕΣ και ΣΚΒ), όπου έχει καταγραφεί κατά το πείραμα (αλλιώς είναι $\varepsilon_{c2}^* = \varepsilon_{c0,exp}^*$)
- $\varepsilon_{cu,exp}^*$ η μέση πειραματικά αποτιμώμενη παραμόρφωση του περισφιγμένου πυρήνα σε ονομαστική αστοχία, που ορίζεται στο σημείο που το πειραματικό διάγραμμα συναντά την τετμημένη στο 85% της αντοχής f_{icm} του ΚΔ (ίση με 32 ή 44 MPa κατά περίπτωση)
- $\varepsilon_{cu,exp}^* / \varepsilon_{cu,calc}^*$ κ.ά., οι λόγοι της εκάστοτε πειραματικά αποτιμώμενης προς την υπολογιστική τιμή κατά EC2 (2004), για τις παραπάνω παραμέτρους: f_c^* , ε_{cu}^* , ε_{c0}^* για ΚΔ και ΣΚΒ (όπου $\varepsilon_{cu,calc}^* = \varepsilon_{lcu2,c,calc}$ για ΚΔ και $\varepsilon_{cu,calc}^* = \varepsilon_{cu2,c,calc}$ για ΣΚΒ).
- K ο λόγος της πειραματικά αποτιμώμενης μέγιστης αντοχής πυρήνα προς τη μέση θλιπτική αντοχή του μη περισφιγμένου ΚΔ, (όπου $f_{icm} = 32$ ή 44 MPa κατά περίπτωση)

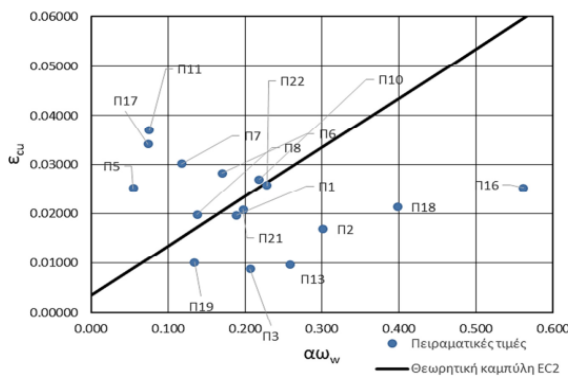
Στο **Σχήμα 3.60** και στο **Σχήμα 3.61** συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα των δεικτών του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεως του περισφιγμένου ΚΔ με τα ισχύοντα για το σχεδιασμό κατά EC2 και EC8 (2004). Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 3.60** συγκρίνεται η αύξηση της θλιπτικής αντοχής $f_c^* = K \cdot f_c$ λόγω της περισφιγξης, προς το δείκτη αποδοτικότητας $\alpha \cdot \omega_w$. Στο διάγραμμα συμπεριλαμβάνονται οι θεωρητικά υπολογιζόμενες καμπύλες κατά EC2 και EC8 για ΣΚΒ και ΚΔ της αντίστοιχης κατηγορίας πυκνότητας, αντίστοιχα. Τα δοκίμια που έχουν προσθήκη ασβεστολιθικής άμμου στη σύνθεση και, κανονιστικά, αποτιμώνται με πρόσθετο συντελεστή, σημειώνονται μέσα σε κύκλο.

Από τη γραφική σύγκριση του **Σχήμα 3.60** συμπεραίνεται ότι οι πειραματικές τιμές του συντελεστή προσαύξησης της αντοχής περισφιγμένου σκυροδέματος K , για το ΚΔ, βρίσκονται κοντά στις αντίστοιχες προβλεπόμενες κατά EC2 (2004) για το ΕΣ, γεγονός που αποδεικνύει ότι η κίσηρη ως ΕΑ, όσον αφορά την αύξηση της αντοχής λόγω της δράσης της περισφιγξης, συμπεριφέρεται με παρόμοιο τρόπο με τα συνήθη ΕΑ που τυγχάνουν ευρύτερης χρήσης ως αδρανή σε δομικά ΕΣ. Παρατηρείται ότι τα περισσότερα δοκίμια απέδωσαν πλέον αυξημένες τιμές K έναντι των θεωρητικά υπολογιζόμενων, και, σε μερικές περιπτώσεις, ακόμα και αυτών που αντιστοιχούν στο ΣΚΒ. Υπάρχουν όμως και μερικά δοκίμια με

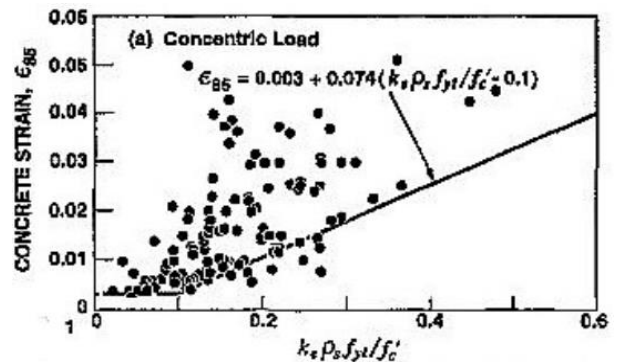
μικρότερες τιμές από τις αναμενόμενες, γεγονός που μπορεί να εξηγηθεί τόσο από τη φύση του προβλήματος όσο και από την πειραματική διαδικασία (έκκεντρη αποφολίσωση και απόκριση, μεγάλα φορτία, συγκεντρώσεις τάσεων, μεγάλες παραμορφώσεις), καθώς δεν ήταν πάντα εφικτό να αποφευχθεί η αστοχία στο άνω άκρο ακόμα και μετά τις πρόσθετες ενισχύσεις. Τα δοκίμια LC35 με προσθήκη ασβεστολιθικής άμμου ανέπτυξαν συντελεστή K μικρότερο από τον θεωρητικά αναμενόμενο. Συνεπώς, διαφαίνεται ότι η δράση της ισοδύναμης περίσφιγξης επιδρά λιγότερο στο ΚΔ με σχετικά υψηλότερη θλιπτική αντοχή.



Σχήμα 3.60: Σύγκριση των πειραματικών τιμών του συντελεστή $K = f_c^*/f_c$ με τις αντίστοιχες θεωρητικά υπολογιζόμενες για ΣΚΒ και ΕΣ, συναρτήσει της αποδοτικότητας της περίσφιγξης $\alpha\omega_w$



Σχήμα 3.61: Μέγιστη παραμόρφωση ϵ_{cu}^* προς $\alpha\omega_w$ για τα δοκίμια ΚΔ και θεωρητική ευθεία κατά EC2 και EC8 (2004)



Σχήμα 3.62: Μέγιστη παραμόρφωση ϵ_{cu}^* προς $\alpha\omega_w$, πειραματικών δοκιμών υποστρωμάτων ΣΚΒ (Pantazopoulou, 1998), και προτεινόμενη ευθεία παλινδρόμησης

Στο **Σχήμα 3.61** απεικονίζονται τα πειραματικά σημεία της ανηγμένης παραμόρφωσης σε ονομαστική αστοχία ε_{cu}^* (παραμόρφωση κατά την οποία η περισφιγμένη θλιπτική αντοχή ισούται με το 85% της αντοχής του απερίσφιγτου ΚΔ) προς το συντελεστή αποδοτικότητας $\alpha \cdot \omega_w$. Στο διάγραμμα συμπεριλαμβάνεται και η θεωρητική ευθεία που αναπαριστά τις θεωρητικά προβλεπόμενες τιμές κατά EC2 και EC8 (2004) για ΣΚΒ. Για λόγους σύγκρισης, στο **Σχήμα 3.62** (υπό ίδια κλίμακα) αποτυπώνονται και αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα της σχέσης $\varepsilon_{0.85}$ (ε_{cu}^*) προς $\alpha \cdot \omega_w$ από δημοσιευμένα πειράματα σε υποστυλώματα ΣΚΒ υπό κεντρική θλίψη, στα πλαίσια μελέτης της Pantazoroulou (1998) για το λυγισμό ράβδων οπλισμού υποστυλωμάτων. Στη σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορά τη μέγιστη παραμόρφωση ε_{cu}^* θα πρέπει να συνεκτιμηθεί και η μεγάλη διασπορά που παρατηρείται τόσο στα δοκίμια ΚΔ όσο και στα δοκίμια ΣΚΒ, λόγω της ανελαστικής φύσης των μετρούμενων μεγεθών, της σημασίας της συνεισφοράς του οπλισμού έως το λυγισμό του σε θλίψη και της ευαισθησίας των πειραματικών διατάξεων (εκκεντρότητα φόρτισης). Η σύγκριση των τιμών δείχνει ότι το ΚΔ που δοκιμάστηκε κυμαίνεται εκατέρωθεν των τιμών του Κανονισμού, με μεγαλύτερες αποκλίσεις από την θεωρητική ευθεία σε αυξημένη αποδοτικότητα $\alpha \cdot \omega_w$ σε τιμές έως και 50% των θεωρητικών. Συγκρινόμενο με δημοσιευμένα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας (**Σχήμα 3.62**), τα αποτελέσματα είναι μέσα στα όρια της διασποράς που εμφανίζουν αντίστοιχα πειράματα ΣΚΒ.

3.7.5 Συμπεράσματα

Παρουσιάστηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα σε εικοσιτέσσερα πρισματικά υποστυλώματα από ΚΔ, οπλισμένα διαμήκως και εγκάρσιως σύμφωνα με τις κείμενες διατάξεις για περίσφιξη και υψηλή πλαστιμότητα για ΣΚΒ. Με την επιλογή των διατάξεων και αποστάσεων των συνδετήρων ελέγχθηκε ένα μεγάλο εύρος πρακτικών τιμών του συντελεστή αποδοτικότητας της περίσφιξης, που απαντάται στην πράξη. Από τη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των θεωρητικών προβλέψεων, καθώς και με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα στο ΣΚΒ, προκύπτει ότι:

- Τα δύο ΚΔ που δοκιμάστηκαν στην παρούσα εργασία ήταν εντός των πειραματικών ορίων των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με την περίσφιξη που αποδίδεται από αντίστοιχα υλικά ΣΚΒ παρόμοιας θλιπτικής αντοχής.
- Με βάση την εξέλιξη των πειραμάτων, συμπεραίνεται ότι ο σχεδιασμός των δοκιμών ήταν επιτυχής, καθώς αποφεύχθηκαν πρόωρες - παρασιτικές αστοχίες πλην τεσσάρων δοκιμών, που αστόχησαν είτε έκκεντρα είτε πρόωρα, στο άνω τμήμα τους. Οι τιμές του συντελεστή αποδοτικότητας καλύφθηκαν όμως, πειραματικά, από άλλα «όμορα» δοκίμια.
- Σε σύγκριση με την πρόβλεψη του EC2 (2004), οι πειραματικές τιμές βρίσκονται σχετικά πλησίον της προτεινόμενης σχέσης, σε ότι αφορά το λόγο K (μέγιστη θλιπτική αντοχή περισφιγμένου πυρήνα προς αντοχή μη περισφιγμένου ΚΔ).
- Σε ότι αφορά τη μέγιστη παραμόρφωση ονομαστικής αστοχίας ε_{cu}^* , το ΚΔ απέδωσε τιμές εκατέρωθεν της θεωρητικής καμπύλης κατά EC2 (2004), με μεγαλύτερες αποκλίσεις σε υψηλές αποδοτικότητες και μείωση έως και 50% των θεωρητικών. Όμως, η διασπορά των αποτελεσμάτων της ε_{cu}^* ήταν μέσα στα πλαίσια αντίστοιχων πειραμάτων ΣΚΒ.
- Σε αρκετά πειράματα, τα περισφιγμένα υποστυλώματα από ΚΔ συμπεριφέρθηκαν καλύτερα και από αντίστοιχων ιδιοτήτων υποστυλώματα από ΣΚΒ, τόσο ως προς την αύξηση της αντοχής λόγω περίσφιξης όσο και στη μέγιστη παραμόρφωση έως τη συμβατική αστοχία.
- Η επίδραση της περίσφιξης φαίνεται να είναι λιγότερο σημαντική στο ΚΔ με τη σχετικά υψηλότερη θλιπτική αντοχή των 44 MPa, που προέκυψε με αντικατάσταση κίσηρης με ασβεστολιθική άμμου, σε σύγκριση με το ΚΔ αντοχής 32 MPa.

4 Συγκριτική ανάλυση τριών προσομοιωμάτων πενταώροφης πλαίσιακής κατασκευής

4.1 Εισαγωγή

Σε προηγούμενη διπλωματική εργασία (Μάνος Γ., 2014) (ΔΕ), είχαν αναλυθεί και συγκριθεί δύο σειρές γεωμετρικά ίδιων κτιρίων, με σκυρόδεμα ίδιας αντοχής ($f_{ck} = 20$ MPa) και χρήση κατοικίας σε σεισμική ζώνη II:

- Με χρήση ΣΚΒ και μεταβλητό πάχος πλακών
- Με χρήση ΕΣ με μεταβλητό ειδικό βάρος (και κατά συνέπεια μεταβλητό μέτρο ελαστικότητας, κατά EC2)

Από αυτές τις σειρές κτιρίων, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις σχεδιασμού και επιλέχθηκαν τα 2 βέλτιστα προσομοιώματα (σε όρους οικονομίας υλικών, εντός του κανονιστικού πλαισίου των ευρωκωδίκων) από κάθε κατηγορία.

Στην παρούσα ανάλυση επιλέγεται μια τρίτη εναλλακτική: ο συνδυασμός ΕΣ και ΣΚΒ, με το ΕΣ να χρησιμοποιείται για τα οριζόντια δομικά στοιχεία ενώ το ΣΚΒ να χρησιμοποιείται για τα κατακόρυφα. Μια τέτοια επιλογή πραγματοποιήθηκε με γνώμονα τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας αλλά και του πειραματικού σκέλους της παρούσας εργασίας: Η μεγάλη συνεισφορά του ΕΣ στη μείωση του ιδίου βάρους της κατασκευής έρχεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό της από τη μείωση του βάρους των πλακών. Επιπλέον, το σημαντικά μειωμένο μέτρο ελαστικότητας του ΕΣ αποτελεί κυρίαρχο παράγοντα της μειωμένης συνολικής οριζόντιας δυσκαμψίας του κτιρίου, γεγονός που είναι τόσο κρίσιμο που προκαλεί την αναγωγή των οριζόντιων παραμορφώσεων σε καθοριστικό παράγοντα σχεδιασμού του κτιρίου (όπως αποδείχθηκε στη διπλωματική εργασία, λόγω των μεγάλων οριζοντίων παραμορφώσεων, χρειάστηκε η αύξηση των διατομών των περιμετρικών υποστυλωμάτων σε 55x35 cm). Αξίζει εδώ να σημειωθεί, ότι καθώς στο κτίριο βρισκόμαστε στο φθίνοντα κλάδο του σεισμικού φάσματος σχεδιασμού, η αύξηση της δυσκαμψίας με χρήση ΣΚΒ σημαίνει μείωση της ιδιοπεριόδου και αύξηση της επιτάχυνσης σχεδιασμού, το οποίο ως μεμονωμένο γεγονός δρα ως επιχείρημα υπέρ του ΕΣ. Παράλληλα όμως, η μειωμένη απόκριση του ΕΣ στην περίσφιγξη και τα μειωμένα μηχανικά του χαρακτηριστικά έχουν σημαντική επιρροή κυρίως στην απόκριση των υποστυλωμάτων και όχι των δοκών ή των πλακών.

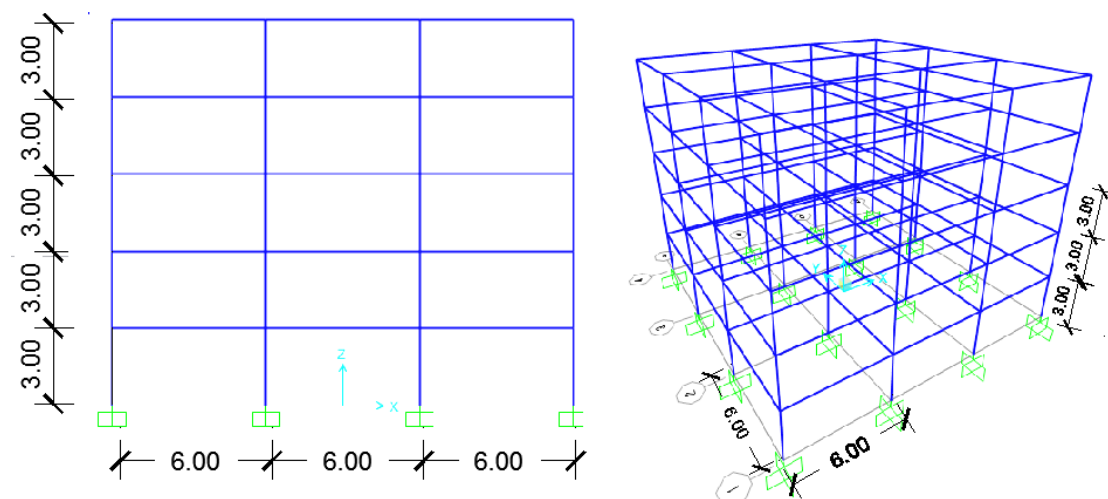
Με βάση τα παραπάνω, παρουσιάζει ενδιαφέρον η μελέτη ενός κτιρίου που συνδυάζει ΕΣ για τα οριζόντια και ΣΚΒ για τα κατακόρυφα δομικά στοιχεία. Στο ίδιο κτίριο της διπλωματικής εργασίας (για συντομία στο εξής ΔΕ) διατηρούνται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και

πραγματοποιείται επανασχεδιασμός με βάση τους Ευρωκώδικες. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών του με τα κτίρια που μελετήθηκαν στη ΔΕ: κτίριο εξολοκλήρου από ΕΣ και κτίριο εξολοκλήρου από ΣΚΒ.

Για λόγους συντομίας, το κτίριο από ΣΚΒ ονομάζεται κτίριο Α, το κτίριο από ΕΣ κτίριο Β και το κτίριο με οριζόντια στοιχεία από ΕΣ και κατακόρυφα από ΣΚΒ, κτίριο Γ.

4.2 Παραδοχές

Η ανάλυση θα πραγματοποιηθεί για μια πενταώροφη κατασκευή με χρήση οικίας. Η κατασκευή θα είναι συμμετρική και ίδια κατά x και y. Το ύψος ορόφου θα είναι 3 μέτρα, θα έχει 3 ανοίγματα 6 μέτρων το καθένα.



Σχήμα 4.1: Γεωμετρικά δεδομένα φορέα

Το ΣΚΒ και το ΕΣ θα έχουν αντοχή 20 MPa. Τα υπόλοιπα μηχανικά χαρακτηριστικά λαμβάνονται σύμφωνα με τον EC2. Λαμβάνεται έδαφος κατηγορίας Β, σεισμική ζώνη Ζ2 και μέση κατηγορία πλαστιμότητας (DCM). Όλες οι επιπλέον παραδοχές περιγράφονται αναλυτικά στο κεφ. 3.2 της ΔΕ.

Για το κτίριο χρησιμοποιούνται δυο ειδών προσομοιώματα. Το πρώτο περιλαμβάνει τις πλάκες ως shell στοιχεία ενώ το δεύτερο μόνο τις δοκούς και τα υποστυλώματα με τα φορτία να μεταφέρονται στις δοκούς μέσω του υπολογισμού των εμβαδών επιρροής τους. Τα προσομοιώματα με τις πλάκες χρησιμοποιούνται μόνο για τον υπολογισμό των ελαστικών παραμορφώσεων και των εντατικών μεγεθών των πλακών. Συνεπώς, οι αναλύσεις αυτές ταυτίζονται με τις αντίστοιχες για το κτίριο Β. Το προσομοίωμα χωρίς τις πλάκες χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό όλων των υπόλοιπων μεγεθών.

Για τις πλάκες, οι οποίες δεν παρουσιάζουν διαφορά σε σχέση με τη αυτές του κτιρίου Α, έχουν πραγματοποιηθεί οι εξής διαδικασίες:

- Έλεγχος παραμορφώσεων στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (ΟΚΛ) λόγω κατακορύφων φορτίων, συμπεριλαμβάνοντας το συνδυασμό των ελαστικών, των ερπυστικών και των παραμορφώσεων λόγω ρηγμάτωσης (κατά EC και ΕΚΩΣ). Είχε αποδειχθεί ότι στο ΕΣ υπό προϋποθέσεις οι παραμορφώσεις της ΟΚΛ μπορεί να είναι κρίσιμο μέγεθος σχεδιασμού, γεγονός μάλλον ασυνήθιστο στο ΣΚΒ
- Έλεγχος εύρους ρωγμής
- Όπλιση λαμβάνοντας υπόψη τη μείωση του ϵ_{cu2} από 3.5 σε $3.5 \cdot \eta_1 = 3.5 \cdot (0.4 + 0.6 \cdot \rho / 2200)$

Οι παραδοχές των οποίων παρουσιάζονται εκτενώς στο ΔΕ και ταυτίζονται με την παρούσα ανάλυση.

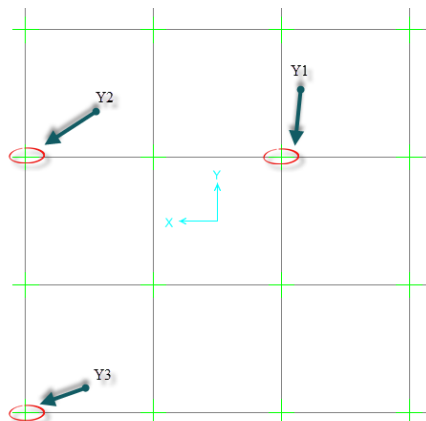
Για τη σεισμική ανάλυση που ακολουθεί, πραγματοποιούνται τα εξής:

- Δυναμική φασματική μέθοδος
- Μέθοδο οριζόντιας φόρτισης
- Μείωση ροπής αντοχής λόγω της μείωσης του ϵ_{cu2}
- Συνδυασμός δράσεων κατά EC
- Συντελεστής συμπεριφοράς ίσος με 3.9
- Φάσμα σχεδιασμού κατά EC

Οι παραδοχές των οποίων παρουσιάζονται εκτενώς στο κεφ. 3 της ΔΕ.

4.3 Έλεγχος μέγιστου ανηγμένου αξονικού φορτίου v_d

Για μέση κατηγορία πλαστιμότητας, η ανηγμένη αξονική δύναμη των υποστλωμάτων του σεισμικού συνδυασμού δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή 0.65 [EC8 5.4.3.2.1 (3)P]. Για τα υποστώματα του ισογείου που είναι τα δυσμενέστερα από άποψη αξονικών δυνάμεων, για τα τελικά προσομοιώματα από ΣΚΒ και από ΕΣ οι ανηγμένες αξονικές δυνάμεις είναι:



Σχήμα 4.2: Ονομασία υποστυλωμάτων κάτοψης ισογείου

Θέση	κτίριο Α			κτίριο Β			κτίριο Γ		
	b (m)	Αξονική (kN)	v _d	b(m)	N (kN)	v _d	b(m)	N (kN)	v _d
Y1	0.50	1566	0.47	0.45	1104	0.41	0.40	1122	0.53
Y2	0.45	1010	0.37	0.40	595	0.28	0.35	729	0.45
Y3	0.40	613	0.29	0.35 x 0.55 (bxh)	312	0.12	0.30	450	0.38

Πίνακας 4.1: Ανηγμένες αξονικές δυνάμεις υποστυλωμάτων

Όπου b, h οι διαστάσεις των υποστυλωμάτων (το h παραλείπεται όταν είναι ίδιο με το b) και v_d η ανηγμένη αξονική δύναμη για το σεισμικό συνδυασμό.

4.4 Περιορισμός Σχετικής Παραμόρφωσης Ορόφων

Σύμφωνα με την § 4.4.3.2 του EC8, για κτίρια με μη-φέροντα ψαθυρά στοιχεία πρέπει να ισχύει

$$d_r \cdot v \leq 0.005 \cdot h \quad (4.1)$$

Ο τρόπος υπολογισμού για το κτίριο Γ είναι παρόμοιος με αυτόν των Α και Β και περιγράφεται αναλυτικά στη ΔΕ σελ. 108-109.

Όροφος	d _{e,άνω} (m)	d _{e,κάτω} (m)	d _{s,άνω} (m)	d _{s,κάτω} (m)	d _r (m)	d _r · v
5 ^{ος}	0.0295	0.0261	0.115	0.102	0.0133	0.0066
4 ^{ος}	0.0261	0.0205	0.102	0.080	0.0218	0.0109

3 ^{ος}	0.0205	0.0132	0.080	0.051	0.0285	0.0142
2 ^{ος}	0.0132	0.0057	0.051	0.022	0.0293	0.0146
1 ^{ος}	0.0057	0	0.022	0.000	0.0222	0.0111

Πίνακας 4.2: Σχετικές παραμορφώσεις ορόφων

Παρατηρείται ότι και στο κτίριο Γ ο έλεγχος σχετικών παραμορφώσεων ορόφων ικανοποιείται οριακά. Υπό διαφορετικές παραδοχές – γεωμετρία κτιρίου, θα μπορούσε να είναι και κρίσιμο μέγεθος σχεδιασμού. Ο λόγος είναι πάλι η μειωμένη δυσκαμψία των κατακορύφων στοιχείων του φορέα, αυτή τη φορά όμως όχι από το μειωμένο μέτρο ελαστικότητας τους (καθώς το σκυρόδεμα είναι πλέον κανονικού βάρους), αλλά από τις μικρότερες διατομές τους, καθώς τα μειωμένα ίδια βάρη οδηγούν σε μικρότερες αναγκαίες διατομές.

4.5 Έλεγχος Φαινομένων Δευτέρας Τάξεως (P-Δ)

Σύμφωνα με την § 4.4.2.2 του EC8, αποτελέσματα δευτέρας τάξεως δεν χρειάζονται να λαμβάνονται υπόψη εάν η ακόλουθη συνθήκη ικανοποιεί όλους τους ορόφους:

$$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h} \leq 0.10 \quad (4.2)$$

Οι παραδοχές και η επεξήγηση συμβόλων περιγράφονται στις σελ. 112-113 της ΔΕ.

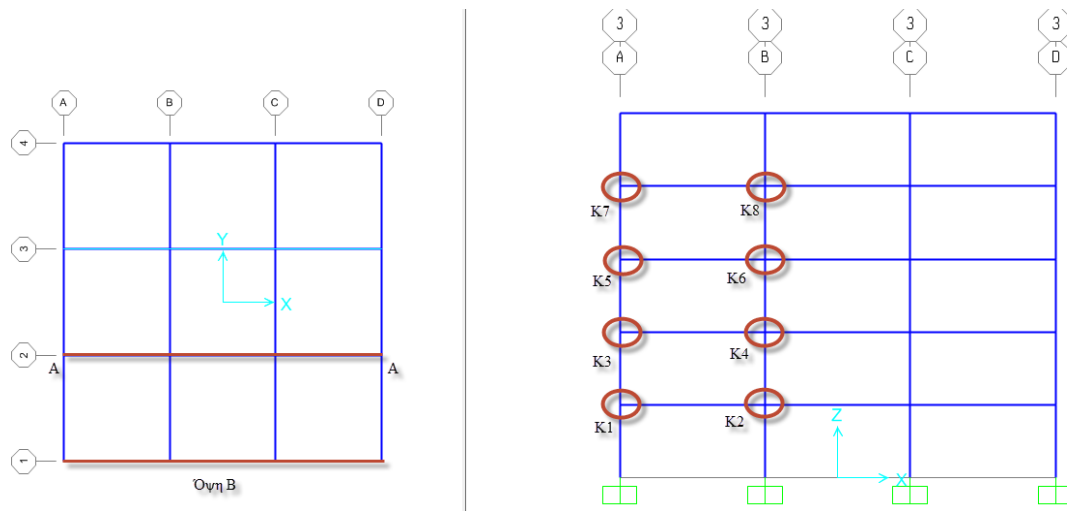
d_r (m)	P_{tot} (kN)	V_{tot} (kN)	θ
0.0133	2016.9	305.75	0.0292
0.0218	4134.02	522.3	0.0576
0.0285	6259.4	682.54	0.0870
0.0293	8044.24	805	0.0974
0.0222	10560.4	878.9	0.0890

Πίνακας 4.3: Υπολογισμός θ

Παρατηρείται ότι στον 2^ο όροφο η τιμή του θ προσεγγίζει το όριο του 0,10, όπως και στο κτίριο από ΕΣ, γεγονός που εξηγείται με παρόμοιο τρόπο όπως στο κεφ. 4.4. Επομένως, και στα κτίρια με μειωμένα ίδια βάρη λόγω πλακών από ΕΣ είναι πιθανό να εμφανιστούν φαινόμενα P-Δ και θα πρέπει να δίνεται αυξημένη σημασία κατά το σχεδιασμό, συγκριτικά με συνήθεις κατασκευές.

4.6 Ικανοτικός έλεγχος κόμβου

Αν και το SAP2000 πραγματοποιεί αυτούς τους ελέγχους, πραγματοποιούνται και αναλυτικά για καλύτερη εποπτεία της κατασκευής. Για τον ικανοτικό έλεγχο των κόμβων χρησιμοποιείται η ελάχιστη ροπή αντοχής των υποστυλωμάτων που προκύπτει από το εύρος αξονικών δυνάμεων του σεισμικού συνδυασμού. Οι ροπές αντοχής υπολογίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη και τους θλιβόμενους σπλισμούς.



Σχήμα 4.3: Ορισμός κόμβων K_i

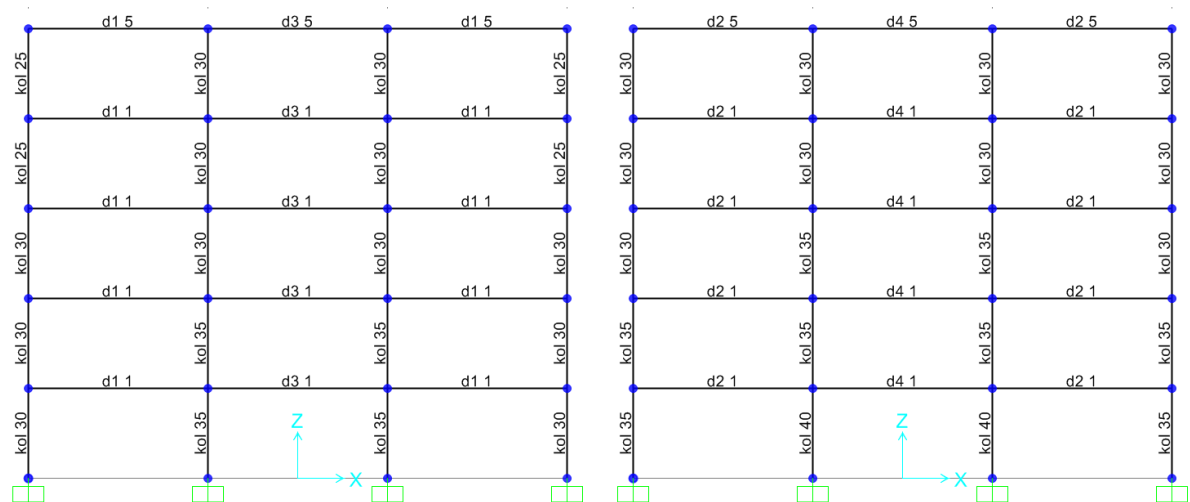
		Φορά σεισμού	M_{rb1}	M_{rb2}	M_{rc1}	M_{rc2}	ΣM_{rb}	ΣM_{rc}	$1.3 \cdot \Sigma M_{rb} / \Sigma M_{rc}$	$\Sigma M_{rc} / \Sigma M_{rb}$	$\Sigma M_{rb} / \Sigma M_{rc}$
Τομή AA	K1	-->	0	70	220	163	91	383	0.24	5.5	0.2
		<--	0	183	220	163	237.9	383	0.62	2.1	0.5
	K2	-->	183	75	340	211	335.4	551	0.61	2.1	0.5
		<--	70	153	340	211	289.9	551	0.53	2.5	0.4
	K3	-->	0	70	163	142	91	305	0.30	4.4	0.2
		<--	0	183	163	142	237.9	305	0.78	1.7	0.6
	K4	-->	183	75	211	221	335.4	432	0.78	1.7	0.6
		<--	70	153	211	221	289.9	432	0.67	1.9	0.5
	K5	-->	0	75	142	100	97.5	242	0.40	3.2	0.3
		<--	0	153	142	100	198.9	242	0.82	1.6	0.6
	K6	-->	153	75	221	166	296.4	387	0.77	1.7	0.6
		<--	75	183	221	166	335.4	387	0.87	1.5	0.7
	K7	-->	0	53	100	158	68.9	258	0.27	4.9	0.2

	K8	<--	0	182	100	158	236.6	258	0.92	1.4	0.7	
		-->	182	52	166	165	304.2	331	0.92	1.4	0.7	
Όψη Β	K1	<--	53	114	166	165	217.1	331	0.66	2.0	0.5	
		-->	0	80	116	114	104	230	0.45	2.9	0.3	
	K2	<--	0	115	116	114	149.5	230	0.65	2.0	0.5	
		-->	115	52	220	163	217.1	383	0.57	2.3	0.4	
	K3	<--	80	114	220	163	252.2	383	0.66	2.0	0.5	
		-->	0	80	114	101	104	215	0.48	2.7	0.4	
	K4	<--	0	115	114	101	149.5	215	0.70	1.9	0.5	
		-->	115	52	163	142	217.1	305	0.71	1.8	0.5	
	K5	<--	80	114	163	142	252.2	305	0.83	1.6	0.6	
		-->	0	58	101	94	75.4	195	0.39	3.4	0.3	
	K6	<--	0	115	101	94	149.5	195	0.77	1.7	0.6	
		-->	115	75	142	140	247	282	0.88	1.5	0.7	
	K7	<--	58	153	142	140	274.3	282	0.97	1.3	0.7	
		-->	0	56	94	65	72.8	159	0.46	2.8	0.4	
	K8	<--	0	93	94	65	120.9	159	0.76	1.7	0.6	
		-->	93	56	140	158	193.7	298	0.65	2.0	0.5	
			<--	56	93	140	158	193.7	298	0.65	2.0	0.5

Πίνακας 4.4: Ικανοτικός έλεγχος κόμβων κτιρίου Γ

4.7 Αποτελέσματα σχεδιασμού κατά EC2 & EC8

Από το σχεδιασμό και την βελτιστοποίηση των παραπάνω κριτηρίων, προκύπτουν οι εξής διατομές για το κτίριο Γ:



Σχήμα 4.4: Διατομές υποστυλωμάτων: ακραίο πλαίσιο (αριστερά) και ενδιάμεσο πλαίσιο (δεξιά)

Γενικά παρατηρείται ότι λόγω των μειωμένων κατακορύφων και οριζοντίων αδρανειακών φορτίων, δεν απαιτούνται μεγάλες διατομές υποστυλωμάτων ως προς τους ελέγχους της οριακής κατάστασης αστοχίας (ΟΚΑ). Συγκριτικά με το κτίριο από ΣΚΒ, τα αδρανειακά φορτία είναι μειωμένα κατά 59% ενώ και τα εντατικά μεγέθη είναι σημαντικά μειωμένα. Ενδεικτικά, στη βάση του κεντρικού υποστυλώματος, η ροπή είναι μειωμένη κατά 46%.

Όμως οι μειωμένες διατομές προκαλούν μια μειωμένη οριζόντια δυσκαμψία με συνέπεια οι έλεγχοι περιορισμού των παραμορφώσεων να είναι κρίσιμα μεγέθη σχεδιασμού. Αυτό έχει αναφορά τόσο στις κατακόρυφες παραμορφώσεις των πλακών (βλ. αναλυτικά ΔΕ) όσο και στις οριζόντιες παραμορφώσεις του πλαισίου: στο εξεταζόμενο στη παρούσα εργασία κτίριο Γ, ο έλεγχος οριζοντίων παραμορφώσεων ήταν οριακός (αλλά τυπικά όχι κρίσιμος, αλλά υπό ελάχιστα διαφορετικές αρχικές παραδοχές θα μπορούσε να είναι κρίσιμος), ενώ στο κτίριο Β (εξολοκλήρου από ΕΣ), είχε κρίνει το σχεδιασμό, οδηγώντας στην αύξηση των διατομών των περιμετρικών υποστυλωμάτων. Συγκριτικά, αναφέρονται οι κυρίαρχες ιδιοπερίοδοι των τριών κτιρίων: Για το Α 0.70 s, για το Β 0.92 s ενώ για το Γ 0.97 s. Υπό αυτό το πρίσμα, το κτίριο Γ παρουσιάζει ομοιότητες με το κτίριο Β, πετυχαίνοντας επιπλέον ακόμα μικρότερες διατομές υποστυλωμάτων.

Επιπρόσθετα, τα σημαντικά μειωμένα εντατικά μεγέθη οδηγούν σε εξοικονόμηση τόσο σκυροδέματος όσο και χάλυβα: 12% για το σκυρόδεμα και 35-40% για το χάλυβα, ποσοστά παρόμοια με το κτίριο Β, με λίγο αυξημένη την εξοικονόμηση σε σκυρόδεμα αφού απαιτούνται μικρότερες διατομές υποστυλωμάτων. Σημειώνεται επιπλέον ότι ο ικανοτικός έλεγχος κόμβου ήταν κρίσιμος σε ορισμένα υποστυλώματα, στα οποία αυξήθηκε η ροπή αντοχής τους μέσω αύξησης του αριθμού των διαμήκων οπλισμών.

4.8 Ανελαστική Στατική Σεισμική Ανάλυση (Pushover Analysis)

4.8.1 Παραδοχές

Για την ανάλυση pushover χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CSI SAP2000. Η ανάλυση βασίστηκε στον Ευρωκώδικα 8 (στάθμες επιτελεστικότητας) αλλά και σε τμήματα του κανονισμού FEMA 356 ((για τον υπολογισμό των οριακών πλαστικών στροφών). Χρησιμοποιείται το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού του EC8.

Οι παραδοχές της προσομοίωσης είναι παρόμοιες με τις pushover αναλύσεις των κτιρίων Α και Β και περιγράφονται αναλυτικά στα εξής κεφάλαια της ΔΕ:

- Για τα δεδομένα φόρτισης, γενικής περιγραφής διαδικασίας και δεδομένα πλαστικών αρθρώσεων υποστυλωμάτων: § 4.1.1.1

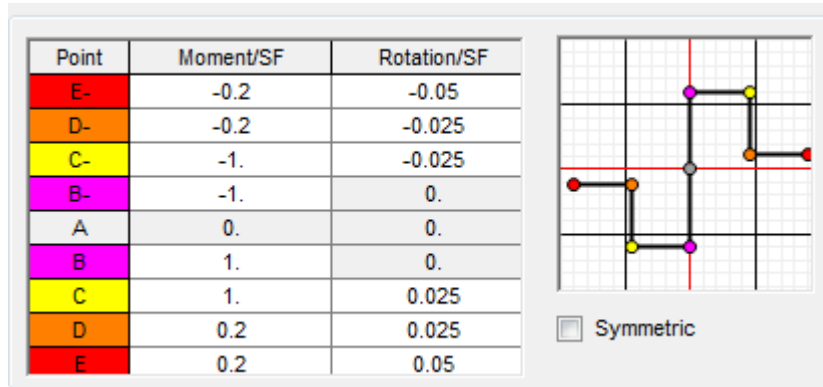
- Για τα δεδομένα πλαστικών αρθρώσεων δοκών: § 4.1.2.1

Στον παρακάτω πίνακα ακολουθεί ο υπολογισμός των λόγου $\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$ και $(\rho - \rho') / \rho_{bal}$ για

τις δοκούς για την εκτίμηση των πλαστικών στροφών:

Δοκός	Όροφος	$(\rho - \rho') / \rho_{bal}$	V (kN)	V (pounds)	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$	Scale Factor λόγω V	Πλαστικές στροφές θ^{pl} (rad)			
							a	b	SD	NC
Δ2	1	0.39	86	19333.6	2.26913	1	0.0165	0.0269	0.0124	0.0165
Δ4	1	0.28	75	16860.7	1.97889	1	0.0174	0.0303	0.0130	0.0174
Δ2	2	0.39	85	19108.8	2.24275	1	0.0165	0.0269	0.0124	0.0165
Δ4	2	0.28	73	16411.1	1.92612	1	0.0174	0.0303	0.0130	0.0174
Δ2	3	0.31	79	17759.9	2.08443	1	0.0171	0.0294	0.0128	0.0171
Δ4	3	0.22	65	14612.6	1.71504	1	0.0178	0.0322	0.0134	0.0178
Δ2	4	0.46	72	16186.2	1.89974	1	0.0160	0.0247	0.0120	0.0160
Δ4	4	0.22	56	12589.3	1.47757	1	0.0178	0.0322	0.0134	0.0178
Δ2	5	0.22	66	14837.4	1.74143	1	0.0178	0.0322	0.0134	0.0178
Δ4	5	0.22	52	11690.1	1.37203	1	0.0178	0.0322	0.0134	0.0178
Δ1	1	0.15	64	14387.8	1.68866	1	0.0184	0.0344	0.0138	0.0184
Δ3	1	0.22	57	12814.1	1.50396	1	0.0178	0.0322	0.0134	0.0178
Δ1	2	0.15	63	14163	1.66227	1	0.0184	0.0344	0.0138	0.0184
Δ3	2	0.22	58	13038.9	1.53034	1	0.0178	0.0322	0.0134	0.0178
Δ1	3	0.22	59	13263.7	1.55673	1	0.0178	0.0322	0.0134	0.0178
Δ3	3	0.15	54	12139.7	1.4248	1	0.0184	0.0344	0.0138	0.0184
Δ1	4	0.15	51	11465.3	1.34565	1	0.0184	0.0344	0.0138	0.0184
Δ3	4	0.15	53	11914.9	1.39842	1	0.0184	0.0344	0.0138	0.0184
Δ1	5	0	32	7193.89	0.84433	1	0.0196	0.0391	0.0147	0.0196
Δ3	5	0	47	10566	1.24011	1	0.0196	0.0391	0.0147	0.0196

Πίνακας 4.5: Υπολογισμός στροφών πλαστικών αρθρώσεων δοκών

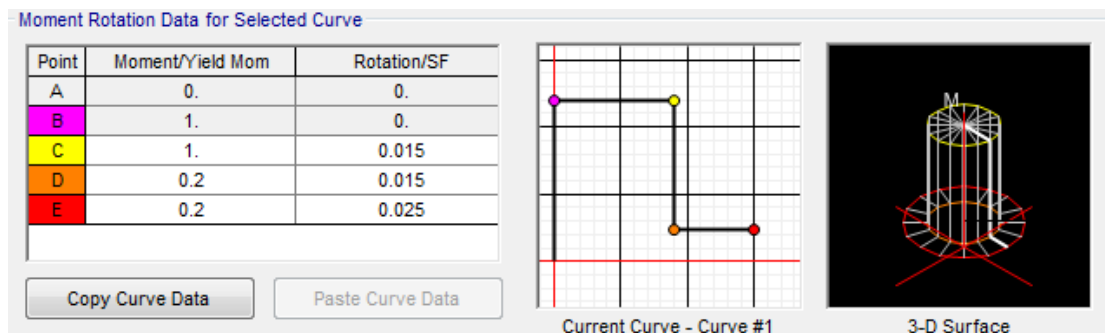


Σχήμα 4.5: Τυπική γενικευμένη καμπύλη ροπής - πλαστικής στροφής M-θ για δοκούς

Ομοίως, ακολουθεί ο υπολογισμός του λόγου $\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$ για τα υποστυλώματα:

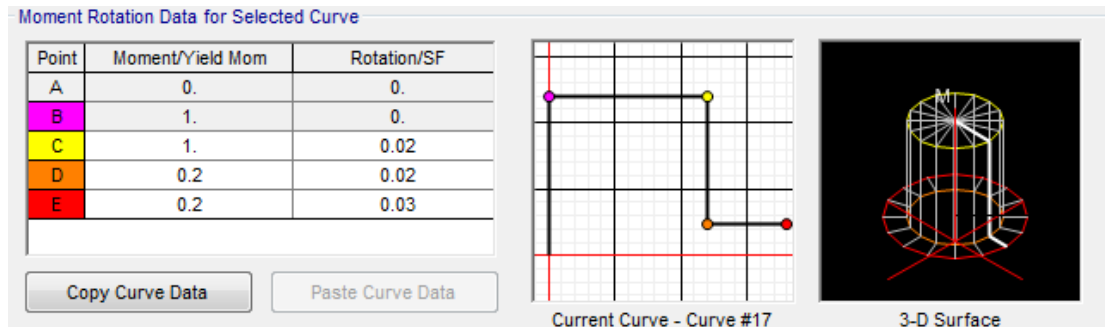
Υποστώλωμα	V (kN)	V (pounds)	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$
40x40	103	23155	2.43
35x35	82	18434	2.58
30x30	36	8093	1.58

Πίνακας 4.6: Υπολογισμός λόγου $V/(b_w \cdot d \cdot f_c^{0.5})$ για υποστυλώματα



Σχήμα 4.6: Γενικευμένη καμπύλη M-θ για υποστυλώματα, με $P/(A_c \cdot f_c) > 0.4$

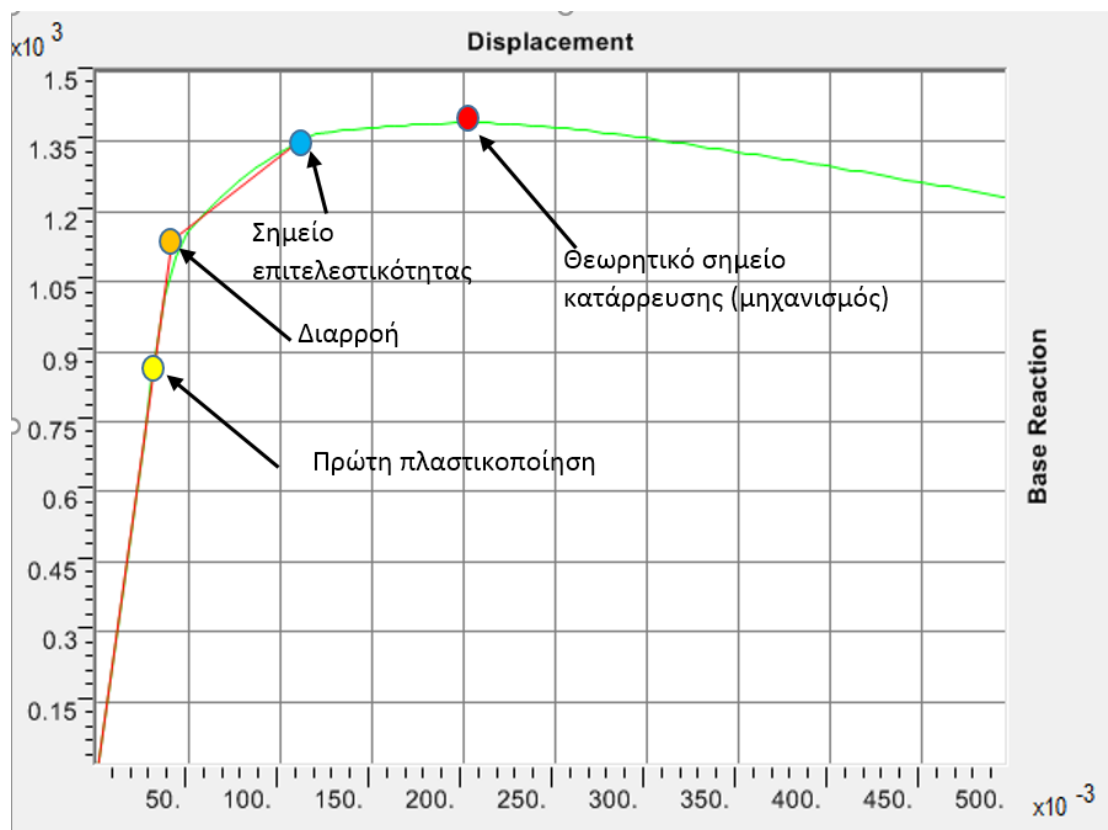
Πίνακας 4.7: Υπολογισμός στροφών πλαστικών αρθρώσεων υποστυλωμάτων για $P/(A_c \cdot f_c) < 0.1$



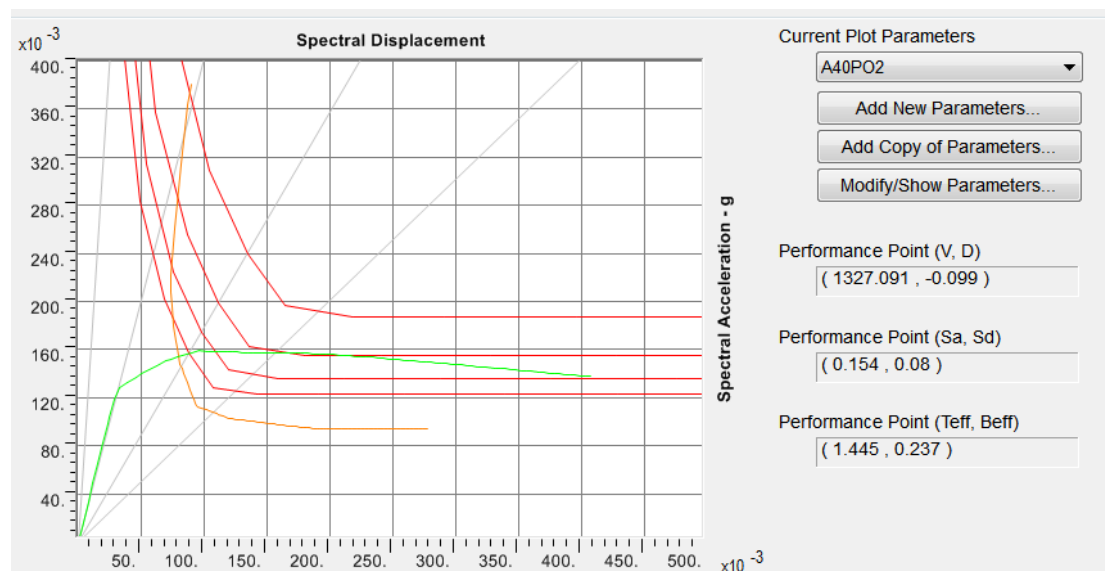
Σχήμα 4.7: Γενικευμένη καμπύλη M-θ για υποστυλώματα, με $P/(A_c \cdot f_c) < 0.1$

4.8.2 Αποτελέσματα Pushover analysis

Η στοχευόμενη μετακίνηση υπολογίζεται κατά ATC-40 και κατά FEMA 356 (Μέθοδος των συντελεστών - Coefficient Method) μέσω του SAP2000. Το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού που χρησιμοποιείται είναι το φάσμα κατά EC8.



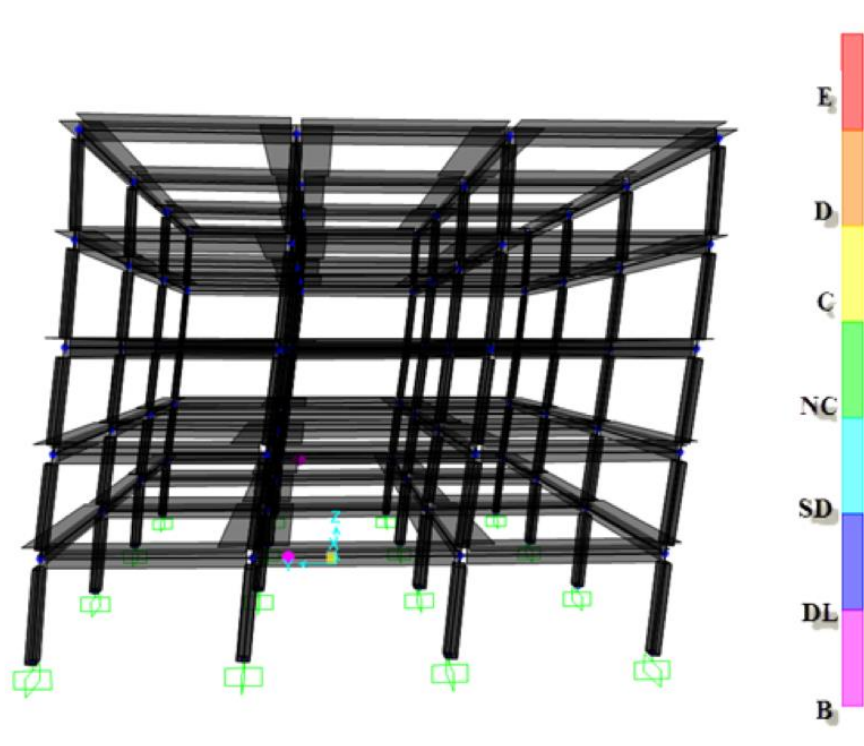
Σχήμα 4.8: Φάσμα ικανότητας προσομοιώματος, σημείο επιτελεστικότητας και διγραμμοποιημένη καμπύλη ικανότητας κατά FEMA 356 (Μέθοδος των συντελεστών - Coefficient Method). Πρώτη πλαστικοποίηση: (890.65 kN, 0.0316m), $(V_y, \Delta_y) = (1138 \text{ kN}, 0.04 \text{ m})$ και σημείο επιτελεστικότητας: (1351.80 kN, 0.11 m)



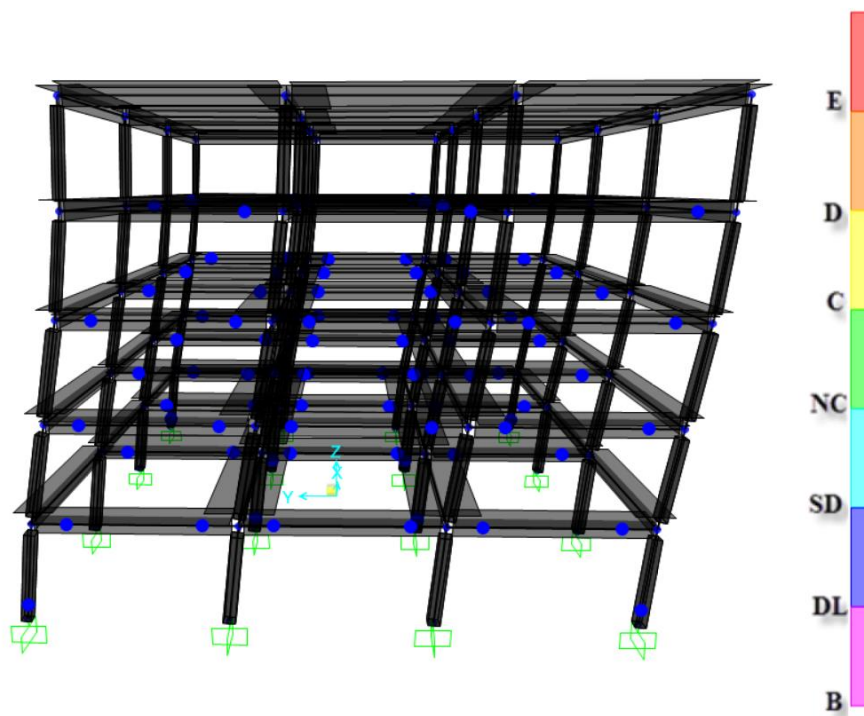
Σχήμα 4.9: Υπολογισμός στοχευόμενης μετακίνησης κατά ATC-40

Η στοχευόμενη μετακίνηση της κατασκευής για την συγκεκριμένη σεισμική καταπόνηση είναι $\Delta = 11 \text{ cm}$ ενώ η μετατόπιση κορυφής στη διαρροή $\Delta_y = 4 \text{ cm}$, άρα η πλαστιμότητα σε όρους μετακινήσεων είναι $\mu = \Delta/\Delta_y = 2.75$.

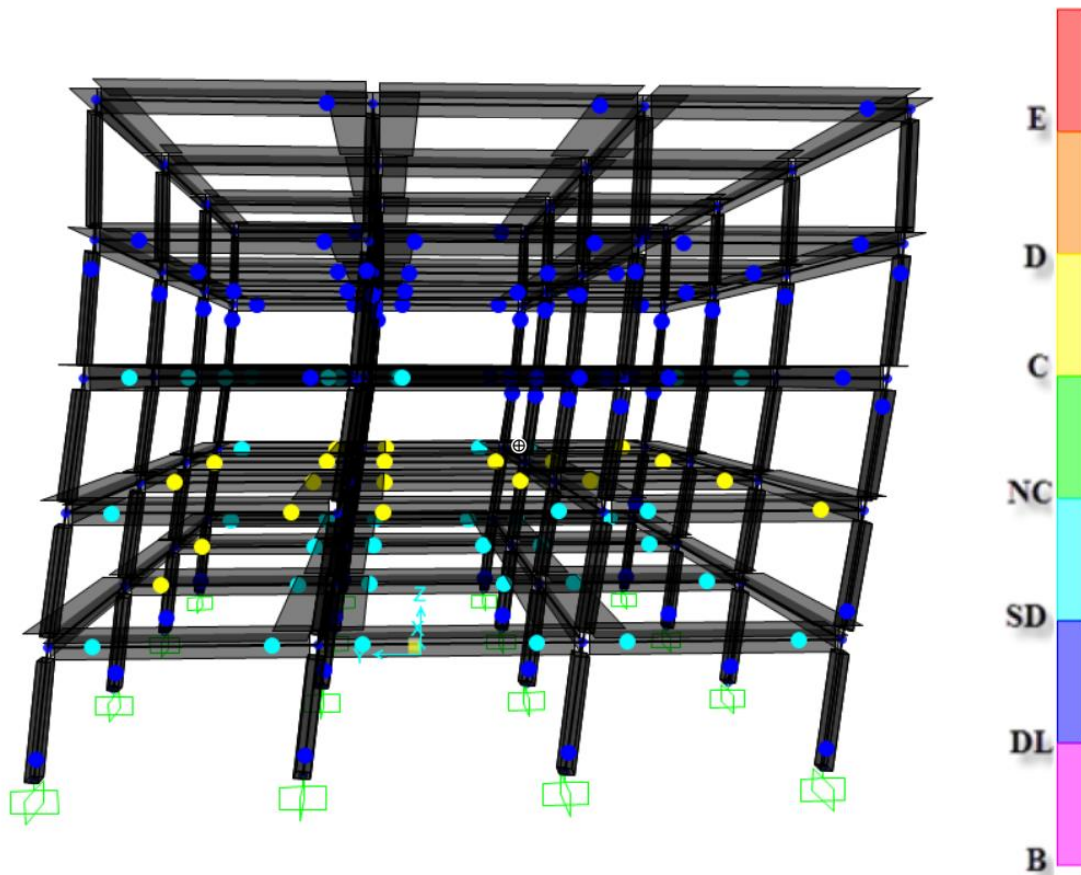
Η πρώτη διαρροή πλαστικής άρθρωσης (βλ. Σχήμα 4.10) συμβαίνει όταν η μετακίνηση του 5^{ου} ορόφου είναι 3.16 cm και η τέμνουσα βάσης 890 kN, επομένως $\alpha_1 = 890 \text{ kN}$. Από το φάσμα ικανότητας προκύπτει ότι $\alpha_u = 1400 \text{ kN}$ και $\Delta_u = 21 \text{ cm}$. Άρα $\alpha_u/\alpha_1 = 1.57 > 1.3$ με το οποίο έγινε ο σχεδιασμός.



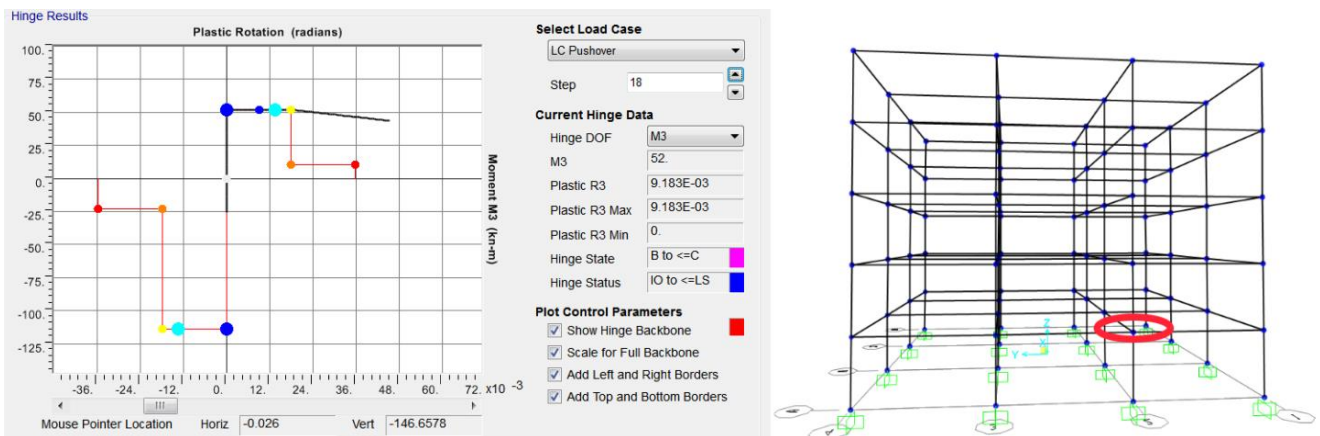
Σχήμα 4.10: Πρώτη διαρροή πλαστικής άρθρωσης



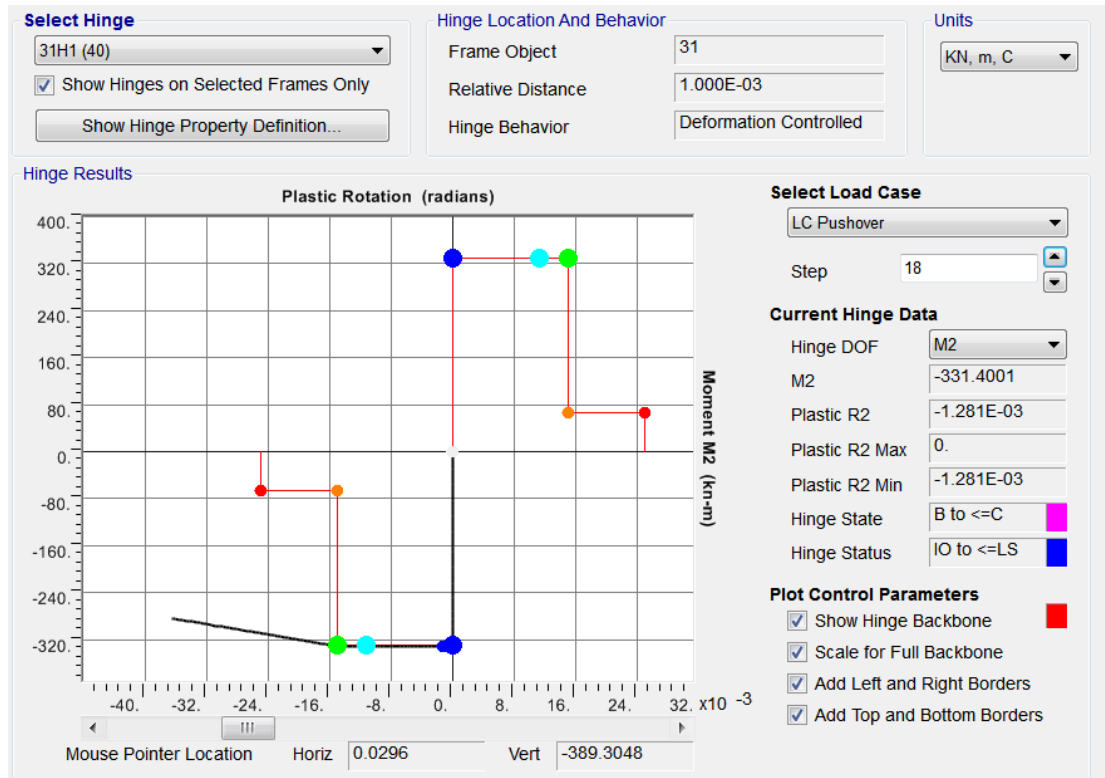
Σχήμα 4.11: Κατανομή και κατάσταση πλαστικών αρθρώσεων για τη στοχευόμενη μετακίνηση 11 cm



Σχήμα 4.12: Κατανομή και κατάσταση πλαστικών αρθρώσεων στην $\Delta_u = 21$ cm



Σχήμα 4.13: Καμπύλη M-θ για την πλαστική άρθρωση της δοκού Δ3 του 2^{ου} ορόφου. Η πλαστική στροφή στην στοχευόμενη μετακίνηση είναι $9.18 \cdot 10^{-3}$ rad με την στροφή στην στάθμη SD ίση με $13.4 \cdot 10^{-3}$ rad



Καμπύλη M- θ για την πλαστική άρθρωση του κεντρικού υποστυλώματος του ισόγειου, για τη ροπή M2 στην κατεύθυνση της pushover. Η πλαστική στρόφι στην στοχευόμενη μετακίνηση είναι $1.3 \cdot 10^{-3}$ rad με την στρόφι στην στάθμη SD ίση με $11.3 \cdot 10^{-3}$ rad

5 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αφιερώθηκε στην πειραματική διερεύνηση εικοσιτεσσάρων οπλισμένων και τεσσάρων άοπλων δοκιμίων κοντών πρισματικών υποστυλωμάτων από φέρον οπλισμένο ΚΔ μικρού ειδικού βάρους, οπλισμένων με διαφορετικές διατάξεις διαμήκους και εγκάρσιου οπλισμού περίσφιγξης της πράξης, υπό κεντρική θλίψη. Μέσω των πειραμάτων αυτών αποκτήθηκαν σημαντικά δεδομένα για τη συμπεριφορά περισφιγμένων υποστυλωμάτων από ΚΔ, ενώ μπορούν σε μελλοντική εργασία τα εν λόγω αποτελέσματα να επεκταθούν και σε πρόβλεψη της καμπτικής συμπεριφορά δοκών και υποστυλωμάτων υπό σεισμικές δράσεις.

Από την πειραματική διερεύνηση και την ανάλυση των αποτελεσμάτων, τη συγκριτική μελέτη με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα σε δοκίμια από ΣΚΒ, και τις συνακόλουθες αναλυτικές συγκρίσεις της απόκρισης με τις ισχύουσες Κανονιστικές προβλέψεις για το σχεδιασμό περισφιγμένων στοιχείων με κατακόρυφα φορτία σε σεισμική καταπόνηση, συμπεραίνονται τα εξής:

- Με βάση την εξέλιξη των πειραμάτων, συμπεραίνεται ότι ο σχεδιασμός των δοκιμίων ήταν επιτυχής, καθώς αποφεύχθηκαν πρόωρες - παρασιτικές αστοχίες πλην τεσσάρων δοκιμίων, που αστόχησαν είτε έκκεντρα είτε πρόωρα, στο άνω τμήμα τους, με τιμές παραμέτρων που καλύφθηκαν όμως, πειραματικά, από άλλα «όμορα» δοκίμια σε όρους ω_{wd} .
- Με βάση τη διερεύνηση της βιβλιογραφίας των πειραματικών αποτελεσμάτων σε ΕΣ και ΚΔ, καθώς και της αναλυτικής πρόβλεψης της περισφιγμένης θλιπτικής αντοχής υποστυλωμάτων κατά EC8 (2004), συμπεραίνεται ότι το ΚΔ που δοκιμάστηκε στην παρούσα εργασία, δεν διαφέρει Κανονιστικά σε σχέση με το ΕΣ, τόσο από πλευράς απόκρισης όσο και από πλευράς σχεδιασμού της συμπεριφοράς του υπό τη δράση εγκάρσιας περίσφιγξης.
- Σε αρκετές περιπτώσεις, τα περισφιγμένα υποστυλώματα από ΚΔ συμπεριφέρθηκαν καλύτερα και από αντίστοιχων ιδιοτήτων υποστυλώματα από ΣΚΒ, ιδίως σε ότι αφορά την αύξηση της αντοχής λόγω περίσφιγξης και τη μέγιστη παραμόρφωση έως τη συμβατική αστοχία.
- Η επίδραση της περίσφιγξης φαίνεται να είναι λιγότερο σημαντική στο ΚΔ με σχετικά υψηλότερη θλιπτική αντοχή (με αντικατάσταση κίσηρης με ασβεστολιθική άμμου).

Όσον αφορά το κτίριο με υποστυλώματα από ΣΚΒ και οριζόντια στοιχεία από ΚΔ, εξάγονται αντίστοιχα συμπεράσματα με το κτίριο εξολοκλήρου από ΕΣ (κτίριο Β)., η σεισμική μάζα μειώνεται κατά 37% - όσο και στο κτίριο Β. Επίσης, η ιδιοπερίοδος του κτιρίου Γ είναι

παρόμοια με του Β, (0.98 s και 0.92s) και τελικά τα σεισμικά φορτία μειωμένα κατά 58%. Η ανάλυση pushover δείχνει ότι ο λόγος α_u / α_1 είναι μεγαλύτερος από τη τιμή σχεδιασμού (1.57 έναντι 1.3). Επίσης, η μέγιστη πλαστική στροφή δοκού στη στοχευόμενη μετακίνηση ίση με $9.18 \cdot 10^{-3}$ rad, παρόμοια με αυτή του κτιρίου Β ($8.85 \cdot 10^{-3}$ rad), τιμή κάτω από το όριο σχεδιασμού, αν και πιο κοντά σε αυτό συγκριτικά με το κτίριο από ΣΚΒ (καθώς τα όρια πλαστικών στροφών στο ΕΣ είναι μειωμένα σύμφωνα με τον EC2).

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Με βάση τα αποτελέσματα της έρευνας και λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμένο αριθμό δοκιμών, θεωρείται ότι πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω τα εξής:

- Η περαιτέρω διερεύνηση σε υλικά από ΕΣ με διαφορετικό ειδικό βάρος και άρα άοπλη (απερίσφιγκτη) θλιπτική αντοχή, σε περαιτέρω συνθέσεις ΕΣ με πρόσθεση και ασβεστολιθικών αδρανών
- Η αναλυτική προσομοίωση της συμπεριφοράς περισφιγμένων υποστυλωμάτων από ΚΔ, με έμφαση στην πρόβλεψη της διαθέσιμης παραμόρφωσης και οριακής στροφής χορδής στην αστοχία
- Η διερεύνηση της επίδρασης της τοπικής πλαστιμότητας λόγω περισφιγξης στη συνολική απόκριση σε σεισμό και στο συντελεστή συμπεριφοράς κτιρίων από ΚΔ.
- Δεδομένου του μειωμένου μέτρου ελαστικότητας του ΚΔ, η πειραματική διερεύνηση της απόκρισης υποστυλωμάτων με μεγαλύτερο ύψος υπό κεντρική και έκκεντρη φόρτιση (λυγισμός) σε συνδυασμό με περισφιγμένες διατομές.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

ACI 318-11, ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 503 σελ., 2011.

Allington, J., Seismic Performance of Moment Resisting Frame Members Produced from Lightweight Aggregate Concrete, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Univ. of Canterbury, New Zealand, 2003.

ATC 40, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Vol.1, Applied Technology Council, Redwood City, 1996.

EC2, European Committee for Standardization, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1: General rules and rules for buildings, Βρυξέλλες, 2004.

EC8, European Committee for Standardization, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, Βρυξέλλες, 2004.

EC8, European Committee for Standardization, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, Βρυξέλλες, 2005.

EuroLightCon, LWAC Material Properties State-of-the-Art, in Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete. 1998.

ΕΛΟΤ EN 206, Σκυρόδεμα: Προδιαγραφή, επιτελεστικότητα, παραγωγή και συμμόρφωση, Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης, Βρυξέλλες, 2013.

EuroLightCon, Definitions and International Consensus Report, in Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete, 721 σελ., 1998.

FIP, Manual of Lightweight Aggregate Concrete Design, Second Edition, Surrey University Press, Halsted Press, New York, 1983.

Hussain S., Sheikh, S. A., Behavior of Lightweight Confined Concrete Columns, Research Rep.

UHCE88, Department of Civil Engineering, Univ. of Houston, 1988.

Maekawa, K., Pinanmas, A., Okamura, H., Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, Taylor and Francis, London, 2003.

Manrique, M. A., Bertero, V. V., Popov, E. P., Mechanical Behavior of Lightweight Concrete Confined by Different Types of Lateral Reinforcement, EERC 79/05, University of California, Berkeley, 1979.

Pantazopoulou, S., Detailing for Reinforcement Stability in RC Members." Journal of Structural Engineering, 124,6, σελ. 623-632, 1998.

Paulay T., M.J.N. Priestley, Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα και Τοιχοποιία. McGraw Hill.

Priestley, M.J.N. , Verma, R., Xiao, Y, Seismic Shear Strength of Reinforced Concrete Columns, Journal of the Structural Division, ASCE, 120, 8, σελ. 2310-2329, 1994.

Rabbat, B., Daniel, J., Weinmann, T., Hanson, N., Seismic Behavior of Lightweight Concrete Columns, Construction Technology Laboratories, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 1982.

Shah, S. P., Naaman, A. E., Moreno, J., Effects of Confinement on the Ductility of Lightweight

Concrete, The international Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 5, 1, σελ. 15- 25, 1983.

Sheikh, S. A., Uzumeri, S. M, Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns, ASCE Journal of the Structural Division, 108, 12, σελ. 2703 – 2722, 1982.

Smeplass, Mechanical Properties -Lightweight Concrete. 1992, High Strength Concrete. SP4 -Materials Design, SINTEF.

ΕΚΩΣ, Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΚΩΣ 2000). ΥΠΕΧΩΔΕ, ΦΕΚ 1329 Β/6-11- 2000.

KAN. ΕΠΕ. Οργανισμός Αντισεισμικής Προστασίας, www.oasp.gr, Κανονισμός Επεμβάσεων

(KAN.ΕΠΕ.), 2010.

Πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς κοντών υποστυλωμάτων από περισφιγμένο κισηρόδεμα, Έκθεση ΕΕ07, ερευνητικό έργο 716-BET-2013 «Δομικό ελαφροσκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας με κίσηρη»

Μανος Γ. επιβλέπων Ζέρης Χ., «Μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς πλαισίου από ελαφροσκυρόδεμα», ΕΜΠ, 2014

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1:	Σχηματική απεικόνιση διαφορών στη δομή του ΕΣ και του ΣΚΒ σε μεσοσκοπική κλίμακα (Eurolightcon, 1998) (NDC = Normal density concrete, LWAC = Lighthweight aggregate concrete)	14
Σχήμα 2.2:	Επιφάνεια αστοχίας και ανάπτυξη ρηγμάτωσης (FIP 1983)	15
Σχήμα 2.3:	Γεωμετρία και διατάξεις συνδετήρων των δοκιμών των Manrique et al (1979) 17	
Σχήμα 2.4:	Πειραματικό διάγραμμα με διάταξη τρίμητων συνδετήρων - ρόμβου: υποστύλωμα από ΕΣ άοπλο, οπλισμένο χωρίς διαμήκη οπλισμό και με διαμήκη οπλισμό (Manrique et al., 1979)	18
Σχήμα 2.5:	Σύγκριση Πειραματικής απόκρισης Με την εμπειρική σχέση Για ΕΣ σε διάταξη Τρίμητων συνδετήρων	19
Σχήμα 2.6:	α) Γεωμετρία και β) Όπλιση των κόμβων Από ΕΣ των Rabbat et al. (1982) (1 in.= 25.4 mm) 21	
Σχήμα 2.7:	Ενδεικτικά πειραματικά αποτελέσματα από την ανακύκλιση των υποστυλωμάτων: α) Άρθρωση ενός υποστυλώματος, β) Άρθρωση άνω και κάτω υποστυλώματος, γ) Βλάβη στο σώμα του κόμβου, δ) Διείσδυση πλαστικής βλάβης μέσα στο σώμα του κόμβου	22
Σχήμα 2.8:	Επίδραση της περισφιγξης σε τρία διαφορετικά αξονικά (10%, 20% και 30% της N_{rd}): α) Δοκίμιο με $\rho_w = 0.74\%$, β) Δοκίμιο με $\rho_w = 1.6\%$ και γ) Δοκίμιο με $\rho_w = 3.19\%$. 23	
Σχήμα 2.9:	Πειραματικά διαγράμματα μέσης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης περισφιγμένου ΣΚΒ και ΕΣ.....	23
Σχήμα 3.1:	Κατασκευή των ξυλοτύπων εκτός του ΕΟΣ ΕΜΠ για α) Τα δεκαεννέα δοκίμια LC22 και β) τα πέντε δοκίμια LC30.....	33
Σχήμα 3.2:	Τυπικές διατάξεις συνδετήρων των δοκιμών που δοκιμάστηκαν: α) δίμητος, β) τρίμητος και γ) τετράμητος συνδετήρας.....	34
Σχήμα 3.3:	Ενίσχυση των δοκιμών στα άκρα. α) Διαδικασία επικόλλησης των ρητινών και β) Τυπικό ενισχυμένο δοκίμιο.....	35
Σχήμα 3.4:	Διαδικασία χύτευσης αυτοεπιπεδούμενης τσιμεντοκονίας υψηλής αντοχής στην άνω στάθμη σκυροδέτησης των υποστυλωμάτων	35
Σχήμα 3.5:	Τα ολοκληρωμένα δοκίμια στο δάπεδο του ΕΟΣ ΕΜΠ πριν τις δοκιμές	36

Σχήμα 3.6:	Εσωτερική ενοργάνωση των υποστυλωμάτων: α) Στερέωση των ηλεκτρονικών μηχανομετρών επάνω στους διαμήκεις οπλισμούς και β) Τοποθέτηση εγκάρσιου μηχανομέτρου μέτρησης της διόγκωσης στον κλωβό.....	40
Σχήμα 3.7:	Τυπική διάταξη της δοκιμής πρισματικού δοκιμίου σε κεντρική θλίψη, στη μηχανή 600 τόνων του ΕΑΥ ΕΜΠ. Διακρίνεται και το εξωτερικό βελόμετρο για μέτρηση της βύθισης.	40
Σχήμα 3.8:	Διάγραμμα $\sigma_s - \varepsilon_s$ των οπλισμών υπό θλίψη παρουσία λυγισμού (Maekawa et al. 2003).	43
Σχήμα 3.9:	Προσομοίωση αποδοτικότητας περίσφιξης του σκυροδέματος από τους συνδετήρες, α) κατά πλάτος της διατομής και β) καθ' ύψος υποστυλώματος (Allington,2003)	44
Σχήμα 3.10:	Χαρακτηριστικές μορφές αστοχίας: α) αστοχία στο πάνω τρίτο, αρχικά με διάρρηξη των ΙΝΟΠ και κατόπιν στο μέσο, μέχρι λυγισμό των ράβδων, β) αστοχία μόνο στο μέσον, μέχρι λυγισμό των ράβδων, γ) Αστοχία μόνο στο άνω τμήμα (διάρρηξη των ΙΝΟΠ), δ) Αστοχία υπό έκκεντρη φόρτιση λόγω αστοχίας των ΙΝΟΠ έκκεντρα.....	49
Σχήμα 3.11:	Τοποθέτηση στη διάταξη φόρτισης του δοκιμίου και αστοχία υπό μορφή διαμήκους διάρρηξης: α) Δοκίμιο ΑΠ1 15x15cm ² και β) Δοκίμιο ΑΠ3 25x25cm ²	51
Σχήμα 3.12:	Διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων των άοπλων υποστυλωμάτων.....	52
Σχήμα 3.13:	Δοκίμιο Π1. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	52
Σχήμα 3.14:	Δοκίμιο Π1. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.....	53
Σχήμα 3.15:	Δοκίμιο Π2. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	53
Σχήμα 3.16:	Δοκίμιο Π2. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.....	54
Σχήμα 3.17:	Δοκίμιο Π3. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	55
Σχήμα 3.18:	Δοκίμιο Π3. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.....	55
Σχήμα 3.19:	Δοκίμιο Π4. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	56

Σχήμα 3.20:	Δοκίμιο Π4. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.	56
Σχήμα 3.21:	Δοκίμιο Π5. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	56
Σχήμα 3.22:	Δοκίμιο Π6. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	57
Σχήμα 3.23:	Δοκίμιο Π6. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.	58
Σχήμα 3.24:	Δοκίμιο Π7. Α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	58
Σχήμα 3.25:	Δοκίμιο Π7. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.	59
Σχήμα 3.26:	Δοκίμιο Π8. Α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	60
Σχήμα 3.27:	Δοκίμιο Π8. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.	60
Σχήμα 3.28:	Δοκίμιο Π9. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	61
Σχήμα 3.29:	Δοκίμιο Π9. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.....	62
Σχήμα 3.30:	Δοκίμιο Π10. Α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	62
Σχήμα 3.31:	Δοκίμιο Π10. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.	63
Σχήμα 3.32:	Δοκίμιο Π11. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	63
Σχήμα 3.33:	Δοκίμιο Π11. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.	64

Σχήμα 3.34:	Δοκίμιο Π12. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	65
Σχήμα 3.35:	Δοκίμιο Π12. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Διάγραμμα φορτίου – βύθισης (μέγιστο φορτίο 1720 kN)	66
Σχήμα 3.36:	Δοκίμιο Π13. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	66
Σχήμα 3.37:	Δοκίμιο Π13. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.	67
Σχήμα 3.38:	Δοκίμιο Π14. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	68
Σχήμα 3.39:	Δοκίμιο Π14. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.	69
Σχήμα 3.40:	Δοκίμιο Π15. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	69
Σχήμα 3.41:	Δοκίμιο Π15. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. 70	
Σχήμα 3.42:	Δοκίμιο Π16. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	70
Σχήμα 3.43:	Δοκίμιο Π16. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.	71
Σχήμα 3.44:	Δοκίμιο Π17. α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	72
Σχήμα 3.45:	Δοκίμιο Π17. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.	73
Σχήμα 3.46:	Δοκίμιο Π18 α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	74
Σχήμα 3.47:	Δοκίμιο Π18. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοίωση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.	75

Σχήμα 3.48:	Δοκίμιο Π19 α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	76
Σχήμα 3.49:	Δοκίμιο Π19. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.	76
Σχήμα 3.50:	Δοκίμιο Π20 α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	77
Σχήμα 3.51:	Δοκίμιο Π20. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα φορτίου – παραμορφώσεων του δοκιμίου.	78
Σχήμα 3.52:	Δοκίμιο Π21 α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	78
Σχήμα 3.53:	Δοκίμιο Π21. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στο λυγισμό του οπλισμού και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.	79
Σχήμα 3.54:	Δοκίμιο Π22 α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	80
Σχήμα 3.55:	Δοκίμιο Π22. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.	81
Σχήμα 3.56:	Δοκίμιο Π23 α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	81
Σχήμα 3.57:	Δοκίμιο Π23. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του πυρήνα.	82
Σχήμα 3.58:	Δοκίμιο Π24 α) Διάταξη όπλισης στο μεσαίο τμήμα ελέγχου και στα ενισχυμένα άκρα, β) Κλωβός όπλισης του δοκιμίου.....	83
Σχήμα 3.59:	Δοκίμιο Π24. α) Το δοκίμιο στη μηχανή θλίψης πριν την έναρξη δοκιμής, β1) Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια του πειράματος στην αποφλοιώση και β2) μετά το πέρας του πειράματος. γ) Το διάγραμμα φορτίου – παραμορφώσεων του δοκιμίου.	83
Σχήμα 3.60:	Σύγκριση των πειραματικών τιμών του συντελεστή $K = f^*/f_c$ με τις αντίστοιχες θεωρητικά υπολογιζόμενες για ΣΚΒ και ΕΣ, συναρτήσει της αποδοτικότητας της περίσφιγξης $\alpha \cdot \omega_w$	86
Σχήμα 3.61:	Μέγιστη παραμόρφωση ε_{cu}^* προς $\alpha \cdot \omega_w$ για τα δοκίμια ΚΔ και θεωρητική ευθεία κατά EC2 και EC8 (2004).....	86

Σχήμα 3.62: Μέγιστη παραμόρφωση ε_{cu}^* προς $\alpha \cdot \omega_w$, πειραματικών δοκιμών υποστλωμάτων ΣΚΒ (Pantazopoulou, 1998), και προτεινόμενη ευθεία παλινδρόμησης.....	86
Σχήμα 4.1: Γεωμετρικά δεδομένα φορέα.....	91
Σχήμα 4.2: Ονομασία υποστλωμάτων κάτοψης ισογείου.....	93
Σχήμα 4.3: Ορισμός κόμβων K_i	95
Σχήμα 4.4: Διατομές υποστλωμάτων: ακραίο πλαίσιο (αριστερά) και ενδιάμεσο πλαίσιο (δεξιά).....	96
Σχήμα 4.5: Τυπική γενικευμένη καμπύλη ροπής - πλαστικής στροφής $M-\theta$ για δοκούς..	99
Σχήμα 4.6: Γενικευμένη καμπύλη $M-\theta$ για υποστλώματα, με $P/(A_c \cdot f_c) > 0.4$	99
Σχήμα 4.7: Γενικευμένη καμπύλη $M-\theta$ για υποστλώματα, με $P/(A_c \cdot f_c) < 0.1$	100
Σχήμα 4.8: Φάσμα ικανότητας προσομοιώματος, σημείο επιτελεστικότητας και διγραμμοποιημένη καμπύλη ικανότητας κατά FEMA 356 (Μέθοδος των συντελεστών - Coefficient Method). Πρώτη πλαστικοποίηση: (890.65 kN, 0.0316m), $(V_y, \Delta_y) = (1138 \text{ kN}, 0.04 \text{ m})$ και σημείο επιτελεστικότητας: (1351.80 kN, 0.11 m).....	101
Σχήμα 4.9: Υπολογισμός στοχευόμενης μετακίνησης κατά ATC-40.....	101
Σχήμα 4.10: Πρώτη διαρροή πλαστικής άρθρωσης.....	102
Σχήμα 4.11: Κατανομή και κατάσταση πλαστικών αρθρώσεων για τη στοχευόμενη μετακίνηση 11 cm.....	102
Σχήμα 4.12: Κατανομή και κατάσταση πλαστικών αρθρώσεων στην $\Delta_u = 21 \text{ cm}$	103
Σχήμα 4.13: Καμπύλη $M-\theta$ για την πλαστική άρθρωση της δοκού $\Delta 3$ του 2 ^{ου} ορόφου. Η πλαστική στροφή στην στοχευόμενη μετακίνηση είναι $9.18 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$ με την στροφή στην στάθμη SD ίση με $13.4 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$	103

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και όπλιση των δοκιμών υποστλωμάτων...	38
Πίνακας 3.2: Κατανομή του γινομένου του συντελεστή αποδοτικότητας α με το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό α_{wd} για κάθε υποστύλωμα.....	38
Πίνακας 3.3: Θεωρητικές τιμές θλιπτικής αντοχής και μέγιστου φορτίου και ανηγμένης παραμόρφωσης των δοκιμών υποστλωμάτων κατά EC2 και EC8 (2004).....	47
Πίνακας 3.4: Συγκεντρωτικά πειραματικά αποτελέσματα και σύγκρισή με τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές κατά EC2 και EC8 (2004), με χρήση της μέσης πειραματικής αντοχής f_{cm}	
84	
Πίνακας 4.1: Ανηγμένες αξονικές δυνάμεις υποστλωμάτων.....	93
Πίνακας 4.2: Σχετικές παραμορφώσεις ορόφων.....	94

Πίνακας 4.3:	Υπολογισμός θ	94
Πίνακας 4.4:	Ικανοτικός έλεγχος κόμβων κτιρίου Γ	96
Πίνακας 4.5:	Υπολογισμός στροφών πλαστικών αρθρώσεων δοκών	98
Πίνακας 4.6:	Υπολογισμός λόγου $V/(b_w \cdot d \cdot f_c^{0.5})$ για υποστυλώματα	99
Πίνακας 4.7:	Υπολογισμός στροφών πλαστικών αρθρώσεων υποστυλωμάτων για $P/(A_c f_c)$ < 0.1	100