



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ



Πειραματική διερεύνηση των χαρακτηριστικών του υλικού και της ανακυκλιζόμενης συμπεριφοράς δοκών από φέρον ελαφροσκυρόδεμα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λιβανός Σ. Δημήτριος Στάμος Σ. Κωνσταντίνος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Ζέρης Α. Χρήστος
Αναπλ. Καθηγητής

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
Αθήνα, Νοέμβριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Πειραματική διερεύνηση των χαρακτηριστικών του υλικού και της ανακυκλιζόμενης συμπεριφοράς δοκών από φέρον ελαφροσκυρόδεμα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στάμος Κωνσταντίνος Λιβανός Σ. Δημήτριος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Ζέρης Α. Χρήστος
Αναπλ. Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9^η Νοεμβρίου 2015

Ζέρης Χρήστος
Αναπλ. Καθηγητής

Βουγιούκας Εμμανουήλ
Λέκτορας

Μπαδογιάννης Ευστράτιος
Λέκτορας

(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 τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στάμος Κωνσταντίνος
Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ
Λιβανός Σ. Δημήτριος
Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Περίληψη

Η χρήση οπλισμένου ελαφροσκυροδέματος σε κατασκευές αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη Ελλάδα, λόγω της έντονης σεισμικής της δραστηριότητας. Πιο συγκεκριμένα, λόγω του μικρότερου ιδίου βάρους του, σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα, προκύπτουν σημαντικά μειωμένα κατακόρυφα και εγκάρσια σεισμικά (αδρανειακά) φορτία. Παρ' όλα αυτά, το ελαφροσκυρόδεμα σαν υλικό παρουσιάζει διαφορές σε σχέση με το σύννηθες σκυρόδεμα, λόγω της μειωμένης αντοχής των αδρανών αλλά και της καλύτερης σύνδεσής τους με το ενυδατωμένο τσιμέντο. Επίσης, το ελαφροσκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από μικρότερο μέτρο ελαστικότητας σε σύγκριση με το σκυρόδεμα συνήθους βάρους, γεγονός που έχει σαν συνέπεια την αύξηση των παραμορφώσεων και συγχρόνως τη μείωση των αδρανειακών δράσεων, με ευμενή επιρροή στη δυναμική απόκριση του κτιρίου.

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας εντάσσεται στο πλαίσιο της διερεύνησης της δυνατότητας αξιοποίησης του ελαφροσκυροδέματος με αδρανές την κίσηρη στον αντισεισμικό σχεδιασμό των συνήθων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν, κατ' αρχάς, δοκιμές για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του υλικού. Σκοπός αυτών των δοκιμών ήταν η διερεύνηση της θλιπτικής και εφελκυστικής του αντοχής, του μέτρου ελαστικότητας καθώς και της δυσθραυστότητάς του.

Επιπροσθέτως, κατασκευάστηκαν 8 δομικά στοιχεία από κίσηροδεμα με σκοπό να αποτιμηθεί η συμπεριφορά τους υπό ανακυκλιζόμενη ένταση. Στόχος των πειραμάτων ήταν η διερεύνηση της αντοχής και της απομείωσής της, της πλαστιμότητας, της παραμορφωσιμότητας, της δυσκαμψίας και της ενεργειακής απορρόφησης των δοκών και των υποστυλωμάτων, καθώς και η σύγκρισή τους με τις παραμέτρους αντισεισμικού σχεδιασμού κατά τον Ευρωκώδικα 8.

Abstract

The utilization of lightweight structural concrete in constructions has a significant interest in Greece due to her intense seismic activity. More precisely, on account of its lower self-weight in comparison with normal weight concrete, resulting to lower gravity and inertial loads under earthquake response. Nevertheless, the lightweight concrete differentiates when compared to normal weight concrete because of its lower aggregate strength and its improved binding with hydrated cement paste. Moreover, the

lightweight concrete exhibits a lower modulus of elasticity resulting to higher deflections and lower inertial forces. Therefore, it provides a favorable impact on dynamic response of buildings.

The scope of this dissertation was to investigate the possibility of utilizing lightweight concrete with pumice aggregate in the seismic design of ordinary reinforced concrete structures. For this purpose, tests of specimens were conducted in order to determine its physical and mechanical properties. The main objectives of this part were to experimentally determine its compressive and tensile strength, its modulus of elasticity and its fracture toughness.

In addition, eight structure elements were constructed with reinforced lightweight concrete, using pumice as aggregate, in order to evaluate their structural performance in flexure by subjecting them to cyclic static loading. The main objectives of this part of the study were the investigation of the ultimate strength along with its decrease, stiffness, deflection, ductility and energy absorption of the beams and columns and their comparison with the seismic provisions according to Eurocode 8.

Λέξεις Κλειδιά

Ελαφροσκυρόδεμα, κίσηρης, θλιπτική αντοχή, εφελκυστική αντοχή, μέτρο ελαστικότητας, ανακυκλιζόμενη φόρτιση δοκών, παραμορφώσεις, ρηγμάτωση, πλαστιμότητα.

Keywords

Lightweight concrete, pumice, compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity, cyclic loading, deflections, cracking, ductility.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Προπτυχιακού προγράμματος της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου το ακαδημαϊκό έτος 2014-2015. Η εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «διερεύνηση των χαρακτηριστικών του υλικού και της απόκρισης δομικών στοιχείων από ελαφροσκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας με κίσηρη».

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά κ. Χρήστο Ζέρη για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό, την συνεχή υποστήριξη του και την εξαιρετική συνεργασία μας. Επιπλέον, η συνεχή καθοδήγηση, οι επισημάνσεις του και το υψηλό επίπεδο γνώσεων του αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό ΕΜΠ Γεώργιο Μάνο για την συνεργασία, τις συμβουλές και την υποστήριξή του καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την ανιδιοτελή υποστήριξή τους. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Νεφέλη για την συνεχή ενθάρρυνση και την στήριξή της κατά την συγγραφή της εργασίας.

Δημήτριος Σ. Λιβανός

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία δεν θα είχε επιτευχθεί χωρίς την σημαντική καθοδήγηση και πολύτιμη βοήθεια του Επιβλέποντα Καθηγητή, κου Ζέρη Χρήστου, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος για την συνεργασία μας. Η εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «διερεύνηση των χαρακτηριστικών του υλικού και της απόκρισης δομικών στοιχείων από ελαφροσκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας με κίσηρη».

Θα ήθελα να του εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες για την αμέριστη συμπαράσταση, τη διαρκή καθοδήγηση και στήριξη στα επιμέρους στάδια της εργασίας, ώστε να παρουσιαστεί άρτια, ολοκληρωμένη και γεμάτη χρήσιμα συμπεράσματα.

Ακόμη, οφείλω να ευχαριστήσω τον Διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό ΕΜΠ Μάνο Γεώργιο για την πολύτιμη βοήθειά του που προσέφερε μέσω των γνώσεων και των συμβουλών του σε

διάφορα θέματα, δίνοντας μου τη δυνατότητα κατανόησης και αφομοίωσής τους αλλά και για την υπομονή, τη διάθεση που επέδειξε καθώς και το χρόνο που αφιέρωσε .

Κλείνοντας, θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Στέργιο και Ευγενία ,τον αδελφό μου Τάσο και τον άνθρωπο μου την Κωνσταντίνα για την ηθική συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας καθώς και για την απεριόριστη στήριξη και υπομονή που έδειξαν ο καθένας με τον δικό του τρόπο όλο αυτόν τον καιρό στον δεύτερο κύκλο σπουδών μου , που κλείνει αισίως με την παρουσίαση της παρούσας εργασίας.

Στάμος Σ. Κωνσταντίνος

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract	5
Λέξεις Κλειδιά.....	6
Keywords.....	6
Ευχαριστίες.....	7
Κατάλογος πινάκων.....	12
Κατάλογος εικόνων	14
Κατάλογος σχημάτων.....	17
1 Εισαγωγή	21
1.1 Το κισσηρόδεμα	21
1.2 Ιστορικά στοιχεία	23
1.3 Κίσσηρης: το κυριότερο ελαφροβαρές αδρανές στον ελλαδικό χώρο	27
1.4 Συστατικά ελαφροσκυροδέματος	30
1.4.1 Τσιμέντο	30
1.4.2 Χάλυβας	35
1.4.3 Αδρανή	38
1.5 Το Ελαφροσκυρόδεμα.....	49
1.5.1 Κατηγορίες Ελαφροσκυροδέματος	49
2 Πειραματική διερεύνηση χαρακτηριστικών του υλικού.....	52
2.1 Εισαγωγή.....	52
2.2 Βιβλιογραφική και θεωρητική αναθεώρηση	52
2.2.1 Δομή ελαφροσκυροδέματος	52
2.2.2 Θλιπτική αντοχή.....	56
2.2.3 Μέτρο Ελαστικότητας.....	59
2.2.4 Εφελκυστική Αντοχή.....	63
2.2.5 Υπάρχουσες πειραματικές εργασίες.....	66
2.3 Πειραματικές δοκιμές.....	73
2.3.1 Περιγραφή των δοκιμών.....	73

2.3.2	Δοκιμές Θλιπτικής Αντοχής.....	76
2.3.3	Δοκιμές Μέτρου Ελαστικότητας.....	78
2.3.4	Δοκιμές Εφελκυστικής και Καμπτικής Αντοχής.....	85
2.3.5	Κάμψη Ινοπλισμένων Πλακών.....	91
2.4	Συνολικά αποτελέσματα μελέτης μηχανικών χαρακτηριστικών ΚΔ	96
2.4.1	Θλιπτική Αντοχή	96
2.4.2	Μέτρο Ελαστικότητας.....	97
2.4.3	Εφελκυστική Αντοχή.....	99
2.4.4	Καμπτική Συμπεριφορά Ινοπλισμένων Πλακών	102
2.5	Σχόλια – Προβλήματα - Παρατηρήσεις	103
3	Πειραματική διερεύνηση της ανακυκλιζόμενης συμπεριφοράς δοκών.....	106
3.1	Εισαγωγή.....	106
3.2	Βιβλιογραφική και θεωρητική αναθεώρηση	107
3.2.1	Υπάρχουσες Σχετικές Πειραματικές Εργασίες.....	109
3.3	Περιγραφή των Πειραμάτων που Διεξήχθησαν	122
3.3.1	Περιγραφή Δοκιμίων.....	123
3.3.2	Προετοιμασία Οργάνων	124
3.3.3	Δοκιμές Αμφιέρειστων Δοκών.....	125
3.3.4	Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση Δοκού Δύο Ανοιγμάτων	127
3.3.5	Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση Υποστυλωμάτων.....	129
3.4	Συνολικά Αποτελέσματα.....	131
3.4.1	Αποτελέσματα Δοκιμών Κάμψης Τεσσάρων Σημείων	131
3.4.2	Αποτελέσματα Δοκιμής Δοκού Δύο Ανοιγμάτων (Δ5).....	153
3.4.3	Αποτελέσματα Δοκιμών Υποστυλωμάτων.....	159
3.4.4	Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα.....	171
3.5	Σχόλια – Προβλήματα - Παρατηρήσεις	177
4	Βιβλιογραφικές αναφορές	180
A	Παράρτημα: Θεωρητικοί Υπολογισμοί	183
B	Παράρτημα: Θεωρητικοί υπολογισμοί.....	187

B.1	Υπολογισμός Θεωρητικού Διαγράμματος Ροπών - Καμπυλοτήτων.....	187
B.2	Υπολογισμός Διατμητικής Αντοχής.....	187
B.3	Πειραματική Εκτίμηση Διαγράμματος Ροπών - Καμπυλοτήτων.....	188
B.4	Πειραματικά Μεγέθη Πλαστιμοτήτων.....	189
B.5	Υπολογισμός Μέσης Γωνίας Στροφής Χορδής κατά ΚΑΝΕΠΕ.....	189
C	Παράρτημα: Υπολογισμός Ροπής Αντοχής Στοιχείου από ΕΣ από Μεγέθη Ορθής Έντασης.....	191
	Παραδοχές και Διαδικασία Υπολογισμού.....	191
	Σχόλια.....	193

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1: Χημική σύσταση κίσηρης.....	29
Πίνακας 1.2: Απαιτήσεις μηχανικές και φυσικές οριζόμενες ως χαρακτηριστικές τιμές	34
Πίνακας 1.3: Σύγκριση μηχανικών χαρακτηριστικών συνήθων αδρανών με ελαφροαδρανή	48
Πίνακας 1.4: Κατηγορίες Ελαφροσκυροδέματος με βάση το ελαφροαδρανές	50
Πίνακας 2.1: Κατηγορίες θλιπτικής αντοχής ελαφροσκυροδεμάτων σύμφωνα με το πρότυπο EN 206.....	59
Πίνακας 2.2: Τυπικές ιδιότητες σκυροδεμάτων με ελαφρά αδρανή	62
Πίνακας 2.3: Ζεύγη πυκνότητας – αντοχής των συνθέσεων κίσηροδέματος [Τασούλα, 2013]	67
Πίνακας 2.4: Μελέτες σύνθεσης κίσηροδέματος [Τασούλα, 2013].....	68
Πίνακας 2.5: Συνθέσεις σκυροδέματος κατά προσέγγιση.....	69
Πίνακας 2.6: Βασικές ιδιότητες σκυροδέματος μετά από 28 ημέρες.....	69
Πίνακας 2.7: Θλιπτική αντοχή δοκιμών από ΕΣ στις 7 και 28 ημέρες για διάφορες ποσότητες και τύπους τσιμέντου.....	70
Πίνακας 2.8: Φυσικές ιδιότητες των ελαφρών αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν.....	71
Πίνακας 2.9: Αποτελέσματα δοκιμών θλιπτικής αντοχής κυβικών δοκιμών 100x100x100 mm	96
Πίνακας 2.10: Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής κυλίνδρων d100x200 mm	96
Πίνακας 2.11: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών μέτρου ελαστικότητας	97
Πίνακας 2.12: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κάμψης τριών και τεσσάρων σημείων.....	100
Πίνακας 2.13: Χαρακτηριστικά αντοχής και ενεργειακής απορρόφησης ινοπλισμένων πλακών	101
Πίνακας 2.14: Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών σε διάρρηξη	102
Πίνακας 2.15: Χαρακτηριστικά αντοχής και απορρόφησης ενέργειας ινοπλισμένων πλακών	103
Πίνακας 3.1: Ζεύγη αντοχών και πυκνοτήτων για τις έξι συνθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε δοκό [Κωτσοβός και Μπαδογιάννης, 2013]	109
Πίνακας 3.2: Η πειραματική διάταξη και η όπλιση κάθε δοκού [Κωτσοβός και Μπαδογιάννης, 2013].....	110
Πίνακας 3.3: Συνθέσεις ΑΣΚ και ΚΠΑΣΣ (Καφφετζάκης και Παπανικολάου, 2011).....	111
Πίνακας 3.4: Θλιπτικές αντοχές συνθέσεων (Καφφετζάκης και Παπανικολάου, 2011)	112
Πίνακας 3.5: Λεπτομέρειες των δοκών και των παραμέτρων που μελετήθηκαν	119
Πίνακας 3.6: Παραμορφώσεις και πλαστιμότητα των δοκών	120
Πίνακας 3.7: Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά δοκιμών.....	122
Πίνακας 3.8: Θεωρητικές τιμές κατά EC2 για την δοκό Δ1	136

Πίνακας 3.9: Θεωρητικές τιμές κατά EC2 για την δοκό Δ2	140
Πίνακας 3.10: Θεωρητικές τιμές κατά EC2 για την δοκό Δ3	144
Πίνακας 3.11: Θεωρητικές τιμές κατά EC2 για την δοκό Δ4	148
Πίνακας 3.12: Θεωρητικές τιμές κατά EC2 για την δοκό Δ6	152
Πίνακας 3.13: Θεωρητικές τιμές κατά EC2 για την δοκό 2 ανοιγμάτων Δ5	157
Πίνακας 3.14: Θεωρητικές τιμές κατά EC2 για το υποστύλωμα Υ1	163
Πίνακας 3.15: Θεωρητικές τιμές κατά EC2 για το υποστύλωμα Υ2	168
Πίνακας 3.16: Συγκεντρωτικός πίνακας με τα μετελαστικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων	176
Πίνακας Β.1: Ενδιάμεσα μεγέθη για τον υπολογισμό του $\theta_{u,KANEIIE}$	190

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1.1: Κολοσσαίο (αριστερά, 80 μ.Χ.) και Πάνθεον (δεξιά, 1ος αιώνας π.Χ.).....	23
Εικόνα 1.2: Γέφυρα San Francisco-Oakland bay, τόσο στο πλοίο όσο και στη γέφυρα έχει γίνει εκτενής χρήση ΕΣ κατά την κατασκευή τους.....	24
Εικόνα 1.3: Το πλοίο Selma 1920	24
Εικόνα 1.4: Southwestern Bell Telephone, Kansas, Missouri (αριστερά) και Park Plaza Hotel, St. Louis, Missouri (δεξιά)	25
Εικόνα 1.5: Γέφυρα San Francisco-Oakland Bay, California 1936	26
Εικόνα 1.6: Γέφυρα Raftsundet στην Νορβηγία, με μεσαίο άνοιγμα 298μ	26
Εικόνα 1.7: Κίσηρης	28
Εικόνα 1.8: Ορυχείο εξόρυξης της κίσηρης στο νησί Γυαλί.....	29
Εικόνα 1.9: Δείγμα κίσηρης ποικίλης κοκκομετρικής διαβάθμισης με προέλευση από τη Ν. Γυαλί της Ν. Νισύρου	30
Εικόνα 1.10: Εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου	33
Εικόνα 1.11: Λατομείο εξόρυξης αδρανών	38
Εικόνα 1.12: Διάφορες μορφές σχήματα αδρανών	46
Εικόνα 1.13: Επιφανειακή υφή αδρανών	46
Εικόνα 2.1: Ρηγμάτωση σκυροδέματος με ελαφρά αδρανή: η ρωγμή διαπερνά τα αδρανή..	62
Εικόνα 2.2: Σκυροδέτηση δοκιμίων στο χώρο του εργαστηρίου ΟΣ.....	74
Εικόνα 2.3: Δοκιμή κάθισης.....	74
Εικόνα 2.4: Δοκίμια μετά την αφαίρεση από τους μεταλλότυπους	75
Εικόνα 2.5: Σκυροδέτηση δοκιμίων στις εγκαταστάσεις της LaFarge.....	76
Εικόνα 2.6: Φωτογραφίες μετά την θραύση των κυλινδρικών δοκιμίων	77
Εικόνα 2.7: Φωτογραφίες μετά την θραύση των κυβικών δοκιμίων.....	78
Εικόνα 2.8: Η πειραματική διάταξη	79
Εικόνα 2.9: Φωτογραφίες δοκιμίου 15428_4 μετά τη θραύση	82
Εικόνα 2.10: Φωτογραφίες του δοκιμίου μετά τη θραύση.....	83
Εικόνα 2.11: Φωτογραφίες δοκιμίου μετά τη θραύση	85
Εικόνα 2.12: Φωτογραφίες διάταξης και δοκιμίου 15454_1	86
Εικόνα 2.13: Φωτογραφίες δοκιμίων 15428_3, 15454_2, 15454_3 και ΣΚ1_35	87
Εικόνα 2.14: Τυπική διάταξη δοκιμών εκτίμησης της καμπτικής εφελκυστικής αντοχής τεσσάρων σημείων	89
Εικόνα 2.15: Δοκιμή στη μηχανή Topic του δοκιμίου 15454_4 σε διάρρηξη	91
Εικόνα 2.16: Δοκιμή στη μηχανή Avery του δοκιμίου ΣΚ1_30 σε διάρρηξη	91
Εικόνα 3.1: Διάταξη φόρτισης υποστυλωμάτων (Καφφετζάκης και Παπανικολάου, 2011)	112
Εικόνα 3.2: Οι μετάλλοτυποι των δοκών πριν την σκυροδέτηση	124

Εικόνα 3.3: Τοποθέτηση παραμορφωσιομέτρων στους διαμήκεις οπλισμούς.....	125
Εικόνα 3.4: Ο μεταλλότυπος της δοκού πριν την σκυροδέτηση	127
Εικόνα 3.5: Οι μεταλλότυποι των υποστυλωμάτων πριν την σκυροδέτηση	129
Εικόνα 3.6: Η δοκός Δ1 πριν την έναρξη του πειράματος	132
Εικόνα 3.7: Μικρορηγματώσεις στο άνω τμήμα της δοκού λόγω υπέρβασης της ροπής ρηγμάτωσης.....	133
Εικόνα 3.8: Η ρηγμάτωση στους κύκλους μετακίνησης διαρροής	133
Εικόνα 3.9: Ρηγμάτωση στη μετακίνηση $2 \cdot \delta_y$	134
Εικόνα 3.10: Η δοκός στην μετακίνηση $\delta = + 3 \cdot \delta_y$, στην τρίτη ανακύκλιση.....	134
Εικόνα 3.11: Ρηγματώσεις στην μετακίνηση $-4 \cdot \delta_y$ (αριστερά) και $-5 \cdot \delta_y$ μετά την τρίτη ανακύκλιση (δεξιά).....	134
Εικόνα 3.12: Η δοκός Δ2 πριν την έναρξη της δοκιμής.....	137
Εικόνα 3.13: Η δοκός Δ2 τη στιγμή της μέγιστης (αρνητικής) επιβαλλόμενης μετατόπισης 40 mm.....	139
Εικόνα 3.14: Τελική αστοχία δοκού.....	139
Εικόνα 3.15: Δοκός Δ3 και πειραματική διάταξη πριν την έναρξη του πειράματος.....	142
Εικόνα 3.16: Αστοχία δοκού Δ3	143
Εικόνα 3.17: Η δοκός Δ4, η πειραματική διάταξη και ο ενόργανος εξοπλισμός πριν την έναρξη του πειράματος	144
Εικόνα 3.18: Η δοκός Δ4 στη μετατόπιση $+3 \cdot \delta_y$, 1 ^{ος} κύκλος.....	146
Εικόνα 3.19: Η δοκός στην μετατόπιση $-3\delta_y$, 1 ^{ος} κύκλος.....	146
Εικόνα 3.20: Αστοχία της δοκού Δ4	146
Εικόνα 3.21: Η δοκός Δ6, η πειραματική διάταξη και η ενόργανη παρακολούθηση πριν την έναρξη της δοκιμής	149
Εικόνα 3.22: Ρηγμάτωση στην μετατόπιση $+\delta_y$, πρώτος κύκλος (αριστερά) και $-\delta_y$ τρίτος κύκλος (δεξιά)	150
Εικόνα 3.23: Ρηγμάτωση της δοκού Δ6 στη μετακίνηση $2\delta_y - 1^{\text{ος}}$ κύκλος (αριστερά) και $-2 \cdot \delta_y - 3^{\text{ος}}$ κύκλος (δεξιά).....	151
Εικόνα 3.24: Η δοκός Δ6 στην μετατόπιση $-4 \cdot \delta_y$, 1 ^{ος} κύκλος.....	151
Εικόνα 3.25: Η δοκός Δ5, η πειραματική διάταξη και ο ενόργανος εξοπλισμός πριν τη δοκιμή	154
Εικόνα 3.26: Η πρώτη ρηγμάτωση στο χώρο του μέσου του μεγάλου ανοίγματος της δοκού Δ5 στο φορτίο 50 kN	155
Εικόνα 3.27: Η ρηγμάτωση της δοκού Δ5 στο χώρο του μέσου του μεγάλου ανοίγματος της δοκού Δ5 στο φορτίο -110 kN, στην 1 ^η ανακύκλιση της $2 \cdot \delta_y$	155
Εικόνα 3.28: Οι ρηγματώσεις στην 2 ^η ανακύκλιση της $\delta = 4 \cdot \delta_y$ στο μέσο του μεγάλου ανοίγματος της Δ5	156

Εικόνα 3.29: Η δοκός Δ5 στη $\delta = +6 \cdot \delta_y$	156
Εικόνα 3.30: Το υποστύλωμα Y1, η πειραματική διάταξη και ο ενόργανος εξοπλισμός πριν την έναρξη του πειράματος.....	160
Εικόνα 3.31: Ρηγμάτωση του Y1 στην μετατόπιση $2 \cdot \delta_y$, 1 ^{ος} κύκλος (πάνω) και στην $-2 \cdot \delta_y$, 2 ^{ος} κύκλος (κάτω)	162
Εικόνα 3.32: Το υποστύλωμα Y1 στην αστοχία	162
Εικόνα 3.33: Παραμόρφωση διαμήκων ράβδων οπλισμού μετά την τελική αστοχία.....	162
Εικόνα 3.34: Διάγραμμα ροπών – καμπυλοτήτων μέχρι και τον πρώτο κύκλο της μετακίνησης $3 \cdot \delta_y$	163
Εικόνα 3.35: Το υποστύλωμα Y2, η πειραματική διάταξη και ο ενόργανος εξοπλισμός πριν τη δοκιμή.....	165
Εικόνα 3.36: Ρηγμάτωση και αποφλοίωση στον 1 ^ο κύκλο της μετατόπισης $+3 \cdot \delta_y$ (αριστερά) και στον 3 ^ο κύκλο της $-3 \cdot \delta_y$	166
Εικόνα 3.37: Το υποστύλωμα Y2 στη μετατόπιση $+5 \cdot \delta_y$ μετά από τρεις ανακυκλίσεις.....	166
Εικόνα 3.38: Παραμόρφωση διαμήκων οπλισμών μετά την τελική αστοχία του Y2	167
Εικόνα 3.39: Διάγραμμα ροπών – καμπυλοτήτων του Y2 μέχρι και τον πρώτο κύκλο της μετακίνησης $2 \cdot \delta_y$	168

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1: Αναλυτικό διάγραμμα ροής διεργασιών παραγωγής τσιμέντου	32
Σχήμα 1.2: Επεξήγηση ονομασίας χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος	36
Σχήμα 1.3: Παραδείγματα σήμανσης χάλυβα με διαφορετικές διατάξεις νευρώσεων.	36
Σχήμα 1.4: Τυπικό διάγραμμα εφελκυστικών τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού ..	37
Σχήμα 1.5: Αλληλουχία φάσεων εξόρυξης και παραγωγής αδρανών υλικών	39
Σχήμα 1.6: Καταστάσεις αδρανών σε σχέση με την υγρασία τους	42
Σχήμα 1.7: Επιφανειακή δομή και πορώδες αδρανών.....	42
Σχήμα 1.8: Τεμάχια αδρανών μερικώς (3) και πλήρως (4) κορεσμένα με νερό αλλά επιφανειακά ξηρά.....	42
Σχήμα 1.9: Τεμάχιο αδρανών πλήρως κορεσμένο με νερό και καλυμμένο με επιφανειακό στρώμα νερού.....	43
Σχήμα 1.10: Σχέση υγρασίας-απορροφητικότητας αδρανών	43
Σχήμα 1.11: Σχηματική απεικόνιση ρόλου κοκκομετρίας αδρανών	44
Σχήμα 1.12: Μείγματα αδρανών για την παρασκευή σκυροδέματος.....	45
Σχήμα 1.13: Ταξινόμηση ΕΣ με βάση το ειδικό τους βάρος και το ΕΑ.....	48
Σχήμα 1.14: Σχέση χρήσης-πυκνότητας ΕΣ	49
Σχήμα 1.15: Κατηγοριοποίηση ελαφροσκυροδεμάτων.....	51
Σχήμα 2.1: Μηχανισμός θραύσης σε θλίψη συνήθους σκυροδέματος, αναπτυσσόμενες τάσεις στην περιφέρεια αδρανούς περιβαλλόμενου από σκληρυμένο τσιμεντοπολτό και προκαλούμενες ρηγματώσεις	53
Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση διαφορών στη δομή του ΕΣ και του ΣΠΣ σε μεσοσκοπική κλίμακα (NDC = Normal density concrete, LWAC = Lighthweight aggregate concrete).....	54
Σχήμα 2.3: Μηχανισμός θραύσης σε θλίψη ελαφροσκυροδέματος, αναπτυσσόμενες τάσεις στην περιφέρεια αδρανούς περιβαλλόμενου από σκληρυμένο τσιμεντοπολτό και προκαλούμενες ρηγματώσεις	56
Σχήμα 2.4: Διαδοχικές φάσεις ρηγμάτωσης σε προσομοίωμα ελαφροσκυροδέματος έως την αστοχία	56
Σχήμα 2.5: Σχέση μεταξύ μετρούμενης αντοχής των σωματιδίων του ΕΑ και υπολογιζόμενη τάση στην αστοχία ενός ΕΣ με ΕΑ διογκωμένη άργιλο (expanded clay) (EuroLightCon, 1998 και Smeplass, 1977)	57
Σχήμα 2.6: Ορισμός μέτρων ελαστικότητας για το σκυρόδεμα.....	60
Σχήμα 2.7: Διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος	60
Σχήμα 2.8: Πειραματικές διατάξεις άμεσων πειραματικών ελέγχων εφελκυστικής αντοχής. 63	

Σχήμα 2.9: Έμμεσες δοκιμές εφελκυσμού (α) από διάρρηξη (όπου δίνεται και η κατανομή των τάσεων στην επιφάνεια αστοχίας), και (β) από κάμψη	64
Σχήμα 2.10: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων κισηροδέματος [Μπάκα, 1981].....	67
Σχήμα 2.11: Σχέση θλιπτικής αντοχής κύβου-πυκνότητας ΕΣ σύμφωνα με διάφορες μελέτες από την βιβλιογραφία.....	71
Σχήμα 2.12: Καμπτική εφελκυστική αντοχή διαφόρων τύπων ΕΣ	72
Σχήμα 2.13 Μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής σε σχέση με την θλιπτική αντοχή κύβου	72
Σχήμα 2.14: Σύγκριση μέτρου ελαστικότητας από διαφορετικά είδη ελαφροσκυροδέματος.	73
Σχήμα 2.15: Κύκλοι φόρτισης δοκιμίου 15428_4.....	81
Σχήμα 2.16: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων δοκιμίου 15428_4.....	81
Σχήμα 2.17: Κύκλοι φόρτισης.....	82
Σχήμα 2.18: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων	83
Σχήμα 2.19: Κύκλοι φόρτισης.....	84
Σχήμα 2.20: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων	84
Σχήμα 2.21: Πειραματική διάταξη δοκιμών κάμψης τεσσάρων σημείων.....	88
Σχήμα 2.22: Διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης και ενέργειας – μετατόπισης για το δοκίμιο R15488_1	90
Σχήμα 2.23: Η πειραματική διάταξη των δοκιμών κάμψης εκτός επιπέδου ινοπλισμένων πλακών	92
Σχήμα 2.24: Θέση μηκυνσιομέτρου	92
Σχήμα 2.25: Δοκίμια R15488_2, R15488_3, R15517_1 και R15517_2 μετά την αστοχία	93
Σχήμα 2.26: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 15488_1.....	94
Σχήμα 2.27: Διάγραμμα ενέργειας – μετατόπισης δοκιμίου 15488_1	94
Σχήμα 2.28: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 15488_2.....	95
Σχήμα 2.29: Διάγραμμα ενέργειας – μετατόπισης δοκιμίου 15488_2	95
Σχήμα 2.30: Σύγκριση πειραματικής τιμής του μέτρου ελαστικότητας με τις υπολογιζόμενες σύμφωνα με διάφορους κανονισμούς.....	98
Σχήμα 2.31: Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής τιμής ϵ_{ic1} κατά EC2.....	98
Σχήμα 2.32: Πειραματική σχέση θλιπτικής αντοχής με μέτρο ελαστικότητας	99
Σχήμα 3.1: Αστοχία δοκού από ΣΠΣ [NCB-S-C] (αριστερά) και από ΚΔ [LWAC-S-C1] (δεξιά) [Κωτσοβός και Μπαδογιάννης, 2013].....	110
Σχήμα 3.2: Ανηγμένα διαγράμματα φορτίου – παραμόρφωσης δοκού από ΣΠΣ [NCB-S-C] (αριστερά) και από ΚΔ [LWAC-S-C1] (δεξιά) [Κωτσοβός και Μπαδογιάννης, 2013].....	111
Σχήμα 3.3: Χρονοϊστορία φόρτισης (Καφφετζάκης και Παπανικολάου, 2011)	112
Σχήμα 3.4: Διαγράμματα φορτίσεων Υποστυλωμάτων	113
Σχήμα 3.5: Περιβάλλουσες φορτίσεων και απορρόφηση ενέργειας υποστυλωμάτων.....	113

Σχήμα 3.6: Διάταξη φόρτισης (a) και όπλιση δοκών (b).....	114
Σχήμα 3.7: Πειραματικά αποτελέσματα δοκών σε μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση	115
Σχήμα 3.8: Περιβάλλουσες φορτίσεων και απορρόφηση ενέργειας δοκών.....	115
Σχήμα 3.9: Καμπύλες δύναμης - μετατόπισης για ΕΣ και ΣΠΣ (1ο και 2ο διάγραμμα) και οι αντίστοιχες περιβάλλουσες (3ο διάγραμμα).....	117
Σχήμα 3.10: Πειραματική διάταξη και όπλιση δοκών [Sin et al, 2011].....	118
Σχήμα 3.11: Τυπική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης στο μέσο για ΕΣ και ΣΠΣ [Sin et al, 2011]	121
Σχήμα 3.12: Χρονοϊστορία παραμορφώσεων στο μέσο της δοκού για ανακυκλιζόμενη φόρτιση	123
Σχήμα 3.13: Η πειραματική διάταξη κάμψης τεσσάρων σημείων	126
Σχήμα 3.14: Η πειραματική διάταξη της κάμψης τεσσάρων σημείων και τα μετρητικά όργανα	127
Σχήμα 3.15: Η πειραματική διάταξη της δοκού δύο ανοιγμάτων	128
Σχήμα 3.16: Η πειραματική διάταξη και τα μετρητικά όργανα	129
Σχήμα 3.17: Η πειραματική διάταξη κάμψης τριών σημείων σε συνδυασμό με την επιβολή αξονικού φορτίου	130
Σχήμα 3.18: Η πειραματική διάταξη και τα μετρητικά όργανα	131
Σχήμα 3.19: Λεπτομέρειες όπλισης δοκού Δ1 και θέσεις strain gauges	131
Σχήμα 3.20: Διάγραμμα P-δ της δοκού Δ1	132
Σχήμα 3.21: Διάγραμμα ροπών – καμπυλοτήτων M-1/r.....	135
Σχήμα 3.22: Η μεταβολή της δυσκαμψία προς τη δυσκαμψία διαρροής K/K_y κατά τους κύκλους φόρτισης.....	135
Σχήμα 3.23: Ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης σε j (αριστερά) και σε λόγους ενεργειών προς ενέργεια διαρροής.....	136
Σχήμα 3.24: Πειραματική καμπύλη P-δ της δοκού Δ2	138
Σχήμα 3.25: Έμμεσος προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας μέσω του διαγράμματος M-φ πριν και μετά την πρώτη ρηγμάτωση της Δ2	140
Σχήμα 3.26: Λεπτομέρειες όπλισης δοκού Δ3 και θέση strain gauges.	141
Σχήμα 3.27: Διάγραμμα P-δ της δοκού Δ3	143
Σχήμα 3.28: Διάγραμμα P - δ δοκού Δ4.....	145
Σχήμα 3.29: Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων της δοκού Δ4.....	147
Σχήμα 3.30: Μεταβολή της δυσκαμψίας της Δ4 με τις ανακυκλίσεις	147
Σχήμα 3.31: Ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης σε j (αριστερά) και σε λόγους ενεργειών προς ενέργεια διαρροής.....	148
Σχήμα 3.32: Διάγραμμα P-δ της δοκού Δ6	150

Σχήμα 3.33: Μεταβολή της δυσκαμψίας προς τη δυσκαμψία διαρροής.....	152
Σχήμα 3.34: Απορρόφηση ενέργειας δοκού Δ6 ανά κύκλο φόρτισης σε joule (αριστερά) και σε λόγους ενεργειών προς ενέργεια διαρροής (δεξιά).....	153
Σχήμα 3.35: Λεπτομέρειες όπλισης δοκού Δ5 και θέση strain gauges	153
Σχήμα 3.36: Διάγραμμα φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο του μεγάλου ανοίγματος της Δ5	157
Σχήμα 3.37: Λόγοι δυσκαμψίας κάθε κύκλου προς τη δυσκαμψία διαρροής της δοκού Δ5 ..	158
Σχήμα 3.38: Ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης σε joule (αριστερά) και σε λόγους ενεργειών προς ενέργεια διαρροής (δεξιά) της δοκού Δ5.....	159
Σχήμα 3.39: Λεπτομέρειες όπλισης υποστυλώματος Υ1 και θέσεις strain gauges	159
Σχήμα 3.40: Διάγραμμα φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο του υποστυλώματος Υ1	161
Σχήμα 3.41: Λόγοι δυσκαμψίας κάθε κύκλου προς τη δυσκαμψία διαρροής του υποστυλώματος Υ1	164
Σχήμα 3.42: Ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης σε j (αριστερά) και σε λόγους ενεργειών προς ενέργεια διαρροής (δεξιά)	165
Σχήμα 3.43: Διάγραμμα φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο του υποστυλώματος Υ2	167
Σχήμα 3.44: Λόγοι δυσκαμψίας κάθε κύκλου προς τη δυσκαμψία διαρροής του υποστυλώματος Υ2	169
Σχήμα 3.45: Ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης σε joule (αριστερά) και σε λόγους ενεργειών προς ενέργεια διαρροής (δεξιά) του Υ2.....	170
Σχήμα 3.46: Σύγκριση διαγραμμάτων P-δ των δοκών Δ1 και Δ2.....	171
Σχήμα 3.47: Σύγκριση διαγραμμάτων P-δ των δοκών Δ3 και Δ4.....	172
Σχήμα 3.48: Περιβάλλουσες των διαγραμμάτων P-δ των υποστυλωμάτων Υ1 και Υ2 με $\nu_d = 0.2$ και 0.3 αντίστοιχα.....	173
Σχήμα 3.49: Σύγκριση ενεργειών ανακυκλίσεων των υποστυλωμάτων Υ1 και Υ2	174
Σχήμα 3.50: α. Πλαστιμότητα καμπυλοτήτων $\mu_{1/r}$ β. πλαστιμότητα μετατοπίσεων μ_δ γ. Βασική τιμή του δείκτη συμπεριφοράς q_0 που αντιστοιχεί στη $\mu_{1/r}$ του δοκιμίου δ. σχέση $\mu_{1/r}$ και μ_δ	175
Σχήμα 3.51: Σύγκριση πειραματικής μέσης γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία θ_u με την αντίστοιχη υπολογιζόμενη κατά ΚΑΝΕΠΕ $\theta_{u,KANEPE}$	176
Σχήμα A.1: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για το ελαφροσκυρόδεμα, σύμφωνα με τον EC2	184
Σχήμα C.1: Επεξήγηση υπολογιζόμενων μεγεθών.....	192
Σχήμα C.2: Διάγραμμα παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής στην ΟΚΑ από μεγέθη ορθής έντασης	193

1 Εισαγωγή

Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι το πλέον διαδεδομένο δομικό υλικό παγκοσμίως. Λόγω της ευρύτατης εφαρμογής του σε κάθε μορφή δόμησης, η κατανάλωση σε τσιμέντο μίας χώρας (σε ton ανά κάτοικο) αποτελεί δείκτη ανάπτυξης της χώρας αυτής. Το μεγαλύτερο, όμως, μειονέκτημά του είναι το μεγάλο του ίδιο βάρος με αποτέλεσμα των περιορισμό των δυνατοτήτων στο σχεδιασμό των κατασκευών ή την απαίτηση υψηλών ποσοστών οπλισμού των δομικών τους στοιχείων.

Πολλές φορές, η ανάγκη για μείωση του βάρους ενός φέροντος στοιχείου μιας κατασκευής μπορεί να είναι τόσο σημαντική όσο και η αύξηση της αντοχής του, κυρίως σε ογκώδεις κατασκευές, όπως κτίρια μεγάλου ύψους και γέφυρες. Στις συγκεκριμένες κατασκευές ο σχεδιασμός τους σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με το ίδιο βάρος τους, ενώ η ανάλυση σε δυναμικά φορτία όπως μία σεισμική διέγερση είναι αλληλένδετη με τη μάζα της κατασκευής. Η απάντηση στο συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να είναι η αντικατάσταση των συνήθων αδρανών από αδρανή μικρότερου βάρους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή σκυροδεμάτων τα οποία αναφέρονται ως **ελαφροσκυροδέματα – ΕΣ (lightweight concrete - LC)**.

Οι ορισμοί που δίνονται για το ελαφροσκυρόδεμα στους περισσότερους κανονισμούς σκυροδέματος έχουν ως κοινά στοιχεία την πυκνότητα του αδρανούς, τον τύπο του αδρανούς και την πυκνότητα του ελαφροσκυροδέματος. Ο **prEN (CEN/TC 154)** ορίζει ως ελαφροσκυρόδεμα το σκυρόδεμα που περιέχει αδρανή με πυκνότητα σωματιδίου αδρανούς όχι μεγαλύτερη από 2000 kg/m^3 ή πυκνότητα αδρανούς (loose bulk density) όχι μεγαλύτερη από 1200 kg/m^3 , ενώ τα αδρανή μπορεί να είναι φυσικής προέλευσης με ή χωρίς επεξεργασία, βιομηχανικά παραπροϊόντα με ή χωρίς επεξεργασία και αδρανή προερχόμενα από ανακύκλωση. Αντίστοιχα, ο **ACI 318-95**, Κεφάλαιο 2.1 (ΗΠΑ) ορίζει ως άνω όριο πυκνότητας αδρανούς τα 1120 kg/m^3 , με τους περισσότερους κανονισμούς να υιοθετούν τιμές άνω ορίου μεταξύ 1000 και 1200 kg/m^3 , ενώ για το άνω όριο της πυκνότητας του ΕΣ να κυμαίνεται μεταξύ 1800 και 2000 kg/m^3 .

1.1 Το κισσηρόδεμα

Το κισσηρόδεμα (ΚΔ) είναι το σκυρόδεμα του οποίου τα αδρανή έχουν αντικατασταθεί ολικά ή τμηματικά από κίσηρη, είναι ένα υλικό το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις κατασκευές λόγω του σημαντικά μειωμένου του ίδιου βάρους. Η μείωση του ίδιου βάρους συνεπάγεται για τις κατασκευές μειωμένες διατομές σε δοκούς, πλάκες, κολώνες, καταστρώματα γεφυρών κτλ αλλά και μειωμένες απαιτήσεις στη θεμελίωσή τους. Επίσης,

οδηγεί σε μειωμένες απαιτήσεις χάλυβα για την όπλιση των δομικών στοιχείων επιτυγχάνοντας οικονομικότερες κατασκευές. Επιπλέον, το υλικό προσφέρεται για εφαρμογές στην προκατασκευή, επιταχύνοντας την αποπεράτωση και μειώνοντας το κόστος της κατασκευής. Στα πλεονεκτήματα του υλικού προστίθεται η μεγάλη θερμομονωτική του ικανότητα, με συνέπεια να είναι δυνατός ο συνδυασμός δομικής και μονωτικής χρήσης του ΚΔ, και η μικρή θερμική του αγωγιμότητα με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη αντοχή σε πυρκαγιά.

Από την άλλη μεριά όμως, το μέτρο ελαστικότητας του ΚΔ είναι σημαντικά μειωμένο, με συνέπεια αισθητά μεγαλύτερες παραμορφώσεις που ενδέχεται να αποτελέσουν κρίσιμους ελέγχους κατά το σχεδιασμό ενός φορέα, τόσο στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (ΟΚΛ), όπως σε κατακόρυφες παραμορφώσεις δοκών και πλακών, όσο στην οριακή κατάσταση αστοχίας (ΟΚΑ) και συγκεκριμένα στις σχετικές μετακινήσεις ορόφων που μπορεί να επιφέρουν βλάβες σε μη φέροντα στοιχεία ή να προκαλέσουν / επιδεινώσουν φαινόμενα δευτέρας τάξης (P-Δ). Επιπρόσθετα, δεν πρέπει να αμεληθεί κατά το σχεδιασμό η μεγαλύτερη ψαθυρότητα του ΚΔ και η μειωμένη του διατμητική αντοχή.

Το ΚΔ ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των ελαφροσκυροδεμάτων (ΕΣ), στα οποία συγκαταλέγονται σκυροδέματα με αδρανή υλικά πέραν της κίσηρης, όπως διογκωμένος αργιλικός σχιστόλιθος (expanded shale), διογκωμένη άργιλος (expanded clay), κ.α. Οι σύγχρονοι κανονισμοί παρέχουν ειδικές διατάξεις για σκυροδέματα με τμηματική ή ολική αντικατάσταση των αδρανών τους με ελαφρά αδρανή (ΕΑ), χωρίς ωστόσο να διαχωρίζουν την προέλευση και τη φύση του εκάστοτε ΕΑ. Δεν εμφανίζουν όμως όλα τα διαφορετικά ΕΑ πάντα τα ίδια χαρακτηριστικά. Επομένως χρειάζεται να επαληθευτεί η ακρίβεια των σχέσεων αυτών και για το ΚΔ.

Παρ' όλα τα συγκριτικά του πλεονεκτήματα, το ΚΔ δεν έχει τύχει ευρύτερης εφαρμογής στην Ελλάδα, ούτε έχει μελετηθεί επαρκώς. Κρίνεται συνεπώς εποικοδομητική η έρευνα γύρω από το ΚΔ, με στόχο την βελτίωση της γνώσης των μηχανικών του χαρακτηριστικών και κατ' επέκταση την ευρύτερη του αξιοποίηση στις σύγχρονες κατασκευές. Συγκεκριμένα, στοχεύεται να χαρακτηριστεί πειραματικά το άοπλο και το ινοπλισμένο ΚΔ σχετικά με τα βασικότερά του μηχανικά χαρακτηριστικά, όπως η θλιπτική αντοχή, η εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας και η καμπτική συμπεριφορά ινοπλισμένων πλακών.

Ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι ο πειραματικός χαρακτηρισμός του κισσηροδέματος και του ινοπλισμένου κισσηροδέματος σε καμπτική και αξονική καταπόνηση. Στοχεύεται με αυτόν τον τρόπο να αποτιμηθούν τα κυριότερα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού έτσι ώστε να διερευνηθεί η δυνατότητα χρήσης του στις σύγχρονες κατασκευές.

1.2 Ιστορικά στοιχεία

Η χρήση των ελαφροσκυροδεμάτων δεν αποτελεί μία καινούργια τακτική. Το ελαφροσκυρόδεμα είναι γνωστό ήδη από την Ρωμαϊκή εποχή καθώς τόσο το Κολοσσαίο όσο και το Πάνθεον έχουν κατασκευαστεί από υλικά με πρώτη ύλη την κίσηρη (περίπου 1^{ος} αιώνας μ.Χ.). Επίσης, τον 4^ο αιώνα μ.Χ. κίσηρης χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της Αγίας Σοφίας.



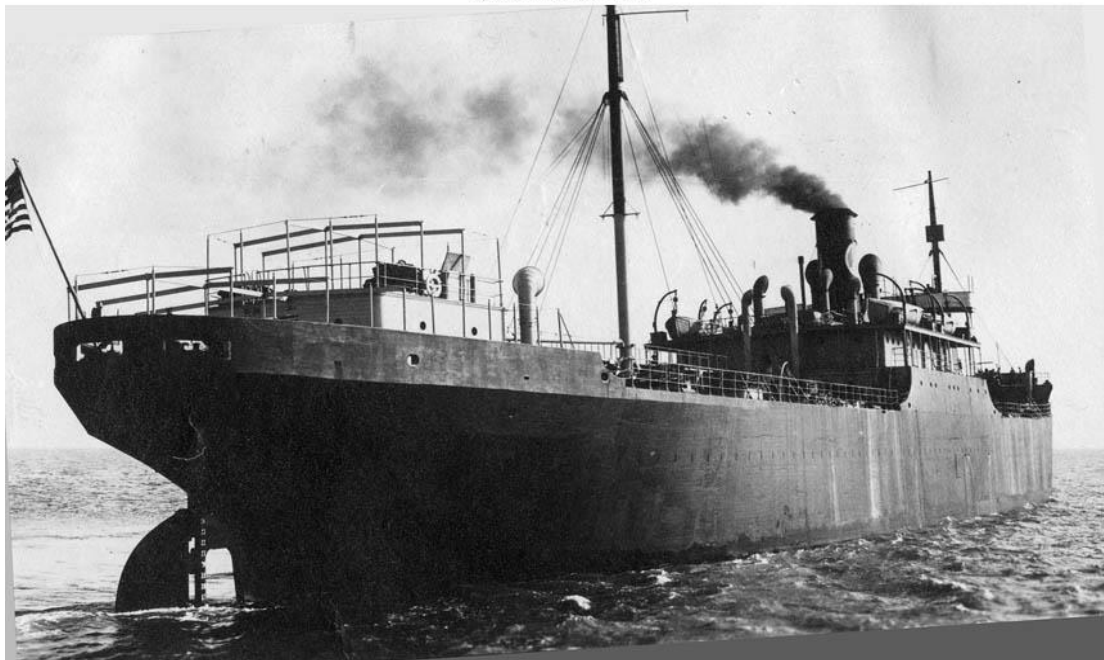
Εικόνα 1.1: Κολοσσαίο (αριστερά, 80 μ.Χ.) και Πάνθεον (δεξιά, 1ος αιώνας π.Χ.)

Κατά τον 20^ο αιώνα η ανάγκη για εξοικονόμηση χάλυβα οδήγησε στην αναζήτηση κατασκευής πλοίων με εναλλακτικά υλικά. Συγκεκριμένα κατά τον 1^ο παγκόσμιο πόλεμο οι ΗΠΑ κατασκεύασαν πειραματικά πλοία από ελαφροσκυρόδεμα το μεγαλύτερο των οποίων ήταν το SS Selma, η κατασκευή του οποίου ολοκληρώθηκε το 1919, με την καθοριστική συμβολή του πρωτοπόρου μηχανικού Stephen Hayde. Ήταν ένα τάνκερ 7500 τόνων, μήκους 132 μέτρων και πλάτους 13 μέτρων. Κατά τον 2^ο παγκόσμιο πόλεμο οι ΗΠΑ κατασκεύασαν περισσότερα από 100 πλοία από ελαφροσκυρόδεμα από 3000 έως 140000 τόνους. Ο πειραματισμός αυτός είχε ιδιαίτερη επιτυχία, γεγονός που συνέβαλλε στην περαιτέρω ανάπτυξη του υλικού με αποτέλεσμα την εκτεταμένη χρήση του στην κατασκευή κτιρίων και γεφυρών.



Εικόνα 1.2: Γέφυρα San Francisco-Oakland bay, τόσο στο πλοίο όσο και στη γέφυρα έχει γίνει εκτενής χρήση ΕΣ κατά την κατασκευή τους

S.S. Selma circa 1920



Εικόνα 1.3: Το πλοίο Selma 1920

Το πρώτο σύγχρονο κτίριο από ΕΣ στην σύγχρονη ιστορία αποτελεί η προσθήκη ενός γυμναστηρίου στο Westport High School στο Kansas. Η χρήση του αποτέλεσε την λύση στο πρόβλημα θεμελίωσης του κτιρίου έναντι της χρήσης συμβατικού σκυροδέματος. Την δεκαετία του 1930 το δομικό ελαφροσκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των πρώτων μεγάλων κτιρίων όπως ήταν το Park Plaza Hotel στο St. Louis στο οποίο το πλαίσιο καθώς και οι πλάκες ήταν εξολοκλήρου από ΕΣ. Επίσης το 1928, στο 14όροφο κτίριο Southwestern Bell Telephone, επετεύχθη η προσθήκη 14 ορόφων από ΕΣ έναντι 8 από συμβατικό αφού η χρησιμοποίησή του εξοικονόμησε 2700 τόνους ιδίου βάρους.



Εικόνα 1.4: Southwestern Bell Telephone, Kansas, Missouri (αριστερά) και Park Plaza Hotel, St. Louis, Missouri (δεξιά)

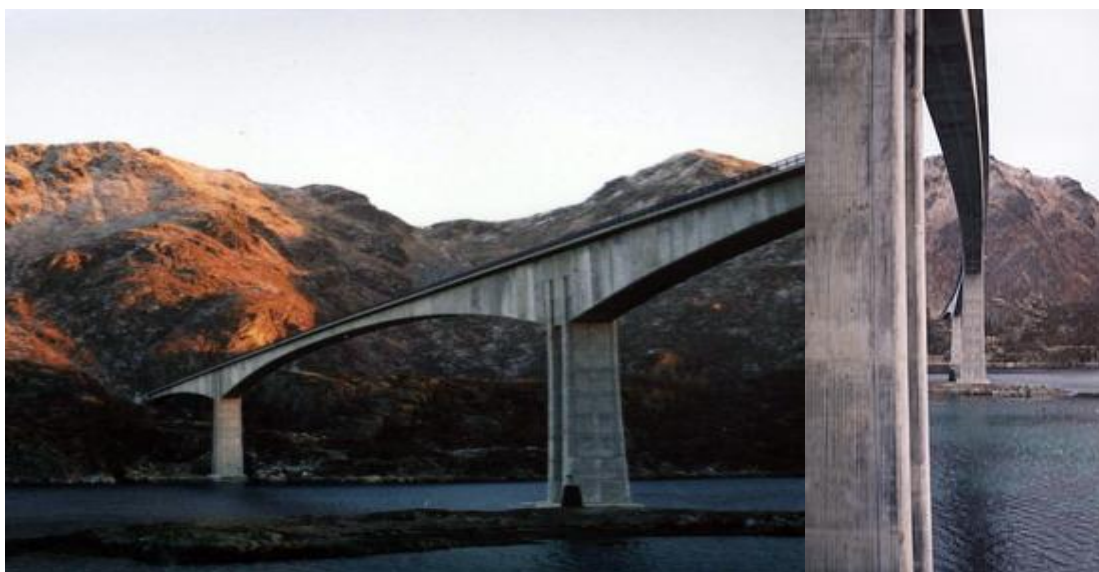
Ανάμεσα στα πιο θεαματικά και σημαντικά ορόσημα στην ανάπτυξη των εφαρμογών του δομικού ελαφροσκυροδέματος αποτελούν η κατασκευή πληθώρας μεγάλων γεφυρών καθώς και πειραματικών σπιτιών που χρησιμοποιήθηκαν σε δοκιμές ατομικών βομβών στη Nevada το 1955. Κατά την κατασκευή της γέφυρας San Francisco-Oakland Bay, για παράδειγμα, η χρήση ΕΣ στην κατασκευή του καταστρώματος είχε ως αποτέλεσμα την μείωση του ίδιου βάρους κατά 120 κιλά το τετραγωνικό μέτρο ή συνολικά 14.000 τόνων για όλη την κατασκευή. Επιτράπη η μείωση των διαστάσεων των μελών της κατασκευής, η μείωση του φορτίου της θεμελίωσης καθώς και της σεισμικής της έντασης. Συνολικά, επετεύχθη μείωση του κόστους κατά περίπου 3 εκατομμύρια δολάρια. Επιπλέον την δεκαετία του 1950 η υποθαλάσσια εξόρυξη πετρελαίου δημιούργησε ευκαιρίες στην κατασκευή πλατφορμών από ελαφροσκυρόδεμα. Ένας μεγάλος αριθμός από μικρές και απλές πλατφόρμες κατασκευάστηκαν μερικώς από ΕΣ στον κόλπο του Μεξικό.



Εικόνα 1.5: Γέφυρα San Francisco-Oakland Bay, California 1936

Τέλος όσον αφορά τις ΗΠΑ, η Αμερικανική Ένωση Σκυροδέματος (ACI) έχει αποφανθεί ότι οι σημαντικότεροι λόγοι χρησιμοποίησης ελαφροσκυροδέματος στις κατασκευές είναι: α) η μείωση του ιδίου βάρους τους, β) η ευελιξία στο σχεδιασμό, γ) η εξοικονόμηση του κόστους των κατασκευών και δ) η υπεροχή σε ανθεκτικότητα μακροχρόνια.

Επίσης στην Ευρώπη αυτοί οι λόγοι ήταν πολύ σημαντικοί στην επιλογή του ελαφροσκυροδέματος στην κατασκευή γεφυρών. Τόσο στην Γερμανία, όσο και στην Ολλανδία και την Νορβηγία υπάρχουν πολλές περιπτώσεις επιτυχούς εφαρμογής του ΕΣ σε γέφυρες μεγάλων ανοιγμάτων. Στην Νορβηγία συγκεκριμένα, πρόσφατα 2 πλωτές γέφυρες και η υπερκατασκευή 6 συμβατικών γεφυρών επετεύχθη με την χρήση ολικώς ή μερικώς ελαφροσκυροδέματος. Κατά μέσο όρο η Νορβηγία κατασκευάζει 2 γέφυρες ετησίως χρησιμοποιώντας ελαφροσκυρόδεμα.



Εικόνα 1.6: Γέφυρα Raftsundet στην Νορβηγία, με μεσαίο άνοιγμα 298μ

Κατά την περίοδο 1960-1973 περίπου 15 γέφυρες μεγάλων ανοιγμάτων κατασκευάστηκαν στους μεγάλους ποταμούς της Ολλανδίας. Οι υπολογισμοί, περιλαμβανομένου και του μειωμένου κόστους θεμελίωσης εξαιτίας του μικρότερου ιδίου βάρους, έδειξαν ότι σε αυτές τις γέφυρες επετεύχθη ένα οικονομικό πλεονέκτημα της τάξης του 5-10% του συνολικού κόστους κατασκευής.

Εκτεταμένη έρευνα και ανάπτυξη ελαφρών αδρανών και σκυροδεμάτων έχει γίνει τόσο στην Ευρώπη, όσο και στην βόρειο Αμερική και Ιαπωνία. Συγκεκριμένα στις ΗΠΑ η έρευνα ελαφροσκυροδέματος για θαλάσσιες κατασκευές σε αρκτικές περιοχές έχει συνεισφέρει τα μέγιστα στην τεχνολογική εξέλιξή τους. Με την “σφραγίδα” του ACI αξιοσημείωτα αποτελέσματα και προτάσεις έχουν δημοσιευθεί σχετικά με την χρήση ελαφροσκυροδεμάτων και για άλλες χρήσεις, όπως η διερεύνηση της συμπεριφοράς και της απόδοσης πρόσφατων κατασκευών από ΕΣ σε ακραίες κλιματολογικές συνθήκες. Στην Νορβηγία πολλές μεγάλες ερευνητικές μελέτες αναφέρονται στο ΕΣ σημειώνοντας τις υψηλές αντοχές του και την επίτευξη ελαφρών κατασκευών. Επίσης, στην Αγγλία πρόσφατα ο οργανισμός για το σκυρόδεμα αναφέρθηκε στα οικονομικά πλεονεκτήματα της χρήσης του και έγινε εκτενής ενημέρωση των στοιχείων για το δομικό ελαφροσκυρόδεμα.

Τα βασικά συστατικά για την παραγωγή του δομικού ελαφροσκυροδέματος είναι το τσιμέντο, το νερό, τα αδρανή, τα οποία στους περισσότερους τύπους ΕΣ είναι ελαφροαδρανή, ο χαλύβδινος οπλισμός καθώς και ορισμένα χημικά πρόσμικτα ή πρόσθετα για την καλύτερη λειτουργία του. Παρακάτω αναλύονται τα χαρακτηριστικά των κύριων συστατικών του ελαφροσκυροδέματος.

1.3 Κίσηρης: το κυριότερο ελαφροβαρές αδρανές στον ελληνικό χώρο

Η Κίσηρης ή ελαφρόπετρα, είναι ηφαιστειογενές πέτρωμα το οποίο χαρακτηρίζεται από τη σπογγώδη υφή του. Σε μερικές περιπτώσεις ο όγκος των πόρων μπορεί να φτάσει το 50% του συνολικού. Η παρουσία των πόρων αυτών οφείλεται στην ταυτόχρονη ταχεία ψύξη του μάγματος και τη ταχεία αποσυμπίεση που προκάλεσε την ταχεία επίσης αποβολή των πτητικών ουσιών, στη θέση των οποίων απέμειναν τα κενά των φυσαλίδων.



Εικόνα 1.7: Κίσσηρης

Η ελαφρόπετρα, είναι άκαυστη, ηχοαπορροφητική, φιλική προς το περιβάλλον με χαμηλό ειδικό βάρος, μεγάλη μηχανική αντοχή και άριστες θερμομονωτικές ιδιότητες.

Η πυκνότητά της κυμαίνεται γύρω στα 400-800 kg/m³, ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων. Αποτελείται (προσεγγιστικά) από 70% SiO₂, 12% Al₂O₃, 2.5% CaO, 4% K₂O, 3.5% Na₂O και άλλα οξείδια σε μικρότερη περιεκτικότητα (LAVA). Συναντάται στα νησιά της Δωδεκανήσου Γυαλί (από το οποίο εξορύσσεται σε μεγάλες ποσότητες), Νίσηρο, Θήρα και Μήλο, ενώ εξάγεται σε μεγάλες ποσότητες στο εξωτερικό. Τα αποθέματα σε κίσσηρη κυμαίνονται στο Γυαλί περί τα 100 εκατομμύρια κυβικά μέτρα, στη θήρα και τη Νίσυρο είναι πρακτικά ανεξάντλητα. Η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων γίνεται από το 1952 από την εταιρεία ΛΑΒΑ, ανώνυμο εταιρεία, η οποία από τότε έχει και το προνόμιο της αποκλειστικής εκμετάλλευσης.



Εικόνα 1.8: Ορυχείο εξόρυξης της κίσσηρης στο νησί Γυαλί

Πίνακας 1.1: Χημική σύσταση κίσσηρης

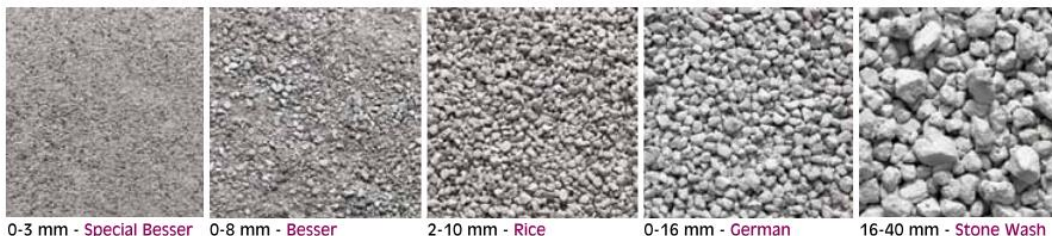
Οξείδιο του Πυριτίου SiO_2	71,91%
Οξείδιο του Αργιλίου Al_2O_3	12,66%
Τριοξείδιο του Σιδήρου Fe_2O_3	1,13%
Οξείδιο του Ασβεστίου CaO	1,46%
Οξείδιο του Μαγνησίου MgO	0,32%
Τριοξείδιο του Θείου SO_3	0,03%
Οξείδιο του Καλίου K_2O	4,30%
Οξείδιο του Νατρίου Na_2O	3,45%
Απώλεια Πυρώσεως	4,53%
Απροσδιόριστα	0,21%
	100,00%

Η κίσσηρης είναι κατάλληλη για την παραγωγή ελαφροβαρών δομικών στοιχείων (κίσσηρολίθων), ελαφροσκυροδέματος (δομικού και πληρώσεως) ελαφροβαρών προκατασκευασμένων στοιχείων και ελαφροβαρών μονωτικών επιχρισμάτων. Καθώς είναι ισχυρά απορροφητικό υλικό προσφέρεται για την εξυγίανση χαλαρών εδαφών και υπογείων υδάτων σε έργα οδοποιίας, κατασκευή λιμένων, γηπέδων κλπ..

Η κίσηρης ανήκει στην οικογένεια των πυριγενών πετρωμάτων. Πυριγενή είναι εκείνα τα πετρώματα τα οποία δημιουργούνται μετά τη στερεοποίηση του μάγματος. Το μάγμα είναι φυσικό τήγμα το οποίο υπάρχει μέσα στη γη σε διάφορα βάθη και όταν εκχυθεί στην επιφάνεια γίνεται λάβα. Τα κυριότερα πυριγενή πετρώματα είναι ο γρανίτης, ο ρυόλιθος, ο πηγματίτης ή απλίτης, ο συηνίτης, ο τραχείτης, ο γρανοδιορίτης, ο δακίτης, ο διορίτης, ο ανδεσίτης, ο γάββρος, ο βασάλτης και οι περιδοτίτες. Συγκεκριμένα, ο ρυόλιθος είναι το αντίστοιχο έκχυτο του γρανίτη. Έχει πορφυριτικό ιστό και αποτελείται από φαινοκρυστάλλους χαλαζία και σανιδίνου. Από τα φεμικά επικρατεί ο βιοτίτης και σπάνια εμφανίζεται η κεροστίλβη. Ρυολιθική λάβα με νερό 3-10% και με σφαιρική μορφή, λέγεται περλίτης, ενώ με κισσηρώδη υφή, λόγω διαφυγής πολλών αερίων λέγεται κίσηρης.

Τα γενικά φυσικά χαρακτηριστικά της είναι:

- Χαμηλό ειδικό βάρος
- Σταθερό ομοιόμορφο χρώμα
- Θερμομονωτικές και ηχοαπορροφητικές ιδιότητες
- Μεγάλη μηχανική αντοχή



Εικόνα 1.9: Δείγμα κίσηρης ποικίλης κοκκομετρικής διαβάθμισης με προέλευση από τη Ν. Γυαλί της Ν. Νισύρου

1.4 Συστατικά ελαφροσκυροδέματος

1.4.1 Τσιμέντο

Το τσιμέντο αποτελεί βασικό συστατικό για την παραγωγή του ελαφροσκυροδέματος. Γενικά όλα τα τσιμέντα που συμμορφώνονται με το πρότυπο ΕΛΟΤ/ΕΝ 197-1 έχουν αποδειχθεί κατάλληλα για την παραγωγή του ελαφροσκυροδέματος. Στην Ελλάδα χρησιμοποιείται κυρίως τσιμέντο τύπου Portland, που παράγεται από το άλεσμα κλίνκερ, προϊόν του σύγχρονου ψησίματος ασβεστόλιθου και αργίλου (που αποτελούν τις απαραίτητες πρώτες ύλες για την

παρασκευή των κυρίων συστατικών του τσιμέντου). Ανακαλύφθηκε το 1824 από τον Άγγλο L. Aspdin, που το ονόμασε Portland γιατί είχε το χρώμα των εδαφών της περιοχής Portland της Αγγλίας.

Η παρασκευή του τσιμέντου τύπου Portland αποτελείται από μια σειρά εργασιών που περιλαμβάνουν :

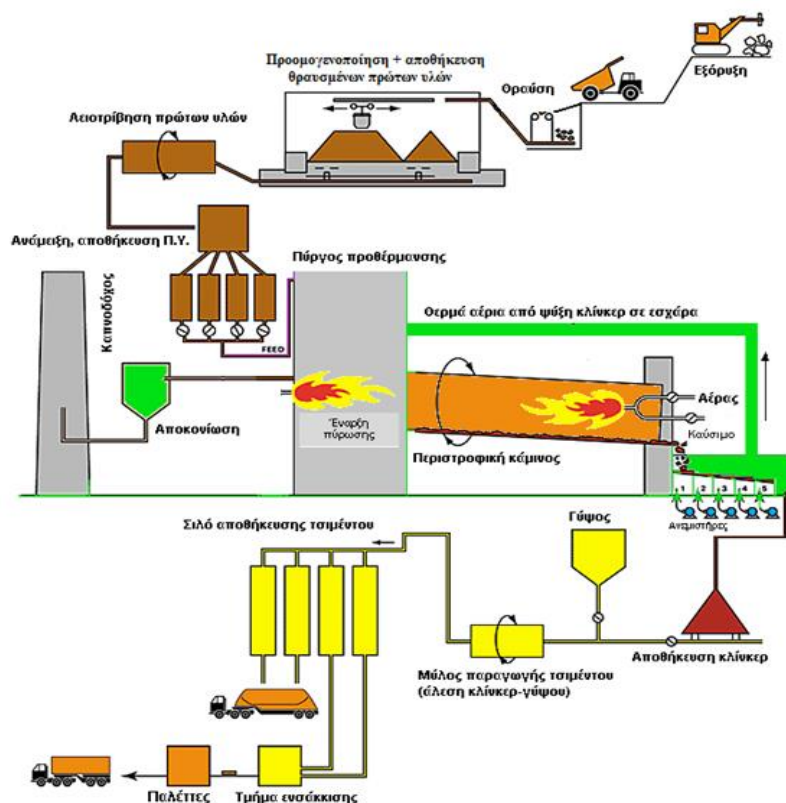
Εξόρυξη ασβεστολιθικών πετρωμάτων και αργλικών εδαφών ή πετρωμάτων, τα οποία τεμαχίζονται (σε σπαστήρες) σε κόκκους διαμέτρου μερικών εκατοστών.

Ανάμιξη των τεμαχισμένων κόκκων, που ονομάζεται και προομοιογενοποίηση.

Άλεσμα σε τριβεία ώστε να προκύψει λεπτόκοκκο μίγμα (φαρίνα) κόκκων διαμέτρου μερικών χιλιοστών, το οποίο αποθηκεύεται σε σιλό.

Εισαγωγή του μίγματος στο πάνω μέρος ελαφρά κεκλιμένης κυλινδρικής καμίνου που περιστρέφεται αργά γύρω από τον άξονά της. Η θερμοκρασία στην κάμινο είναι 600 πετρελαίου στο κάτω άκρο, όπου η θερμοκρασία φθάνει τους 1500 °C περίπου, και από όπου εξέρχεται το προϊόν του ψησίματος σε μορφή μαυροπράσινων κόκκων διαμέτρου 5-25 mm (κλίνκερ).

Άλεσμα του κλίνκερ, το οποίο μετά την ψύξη του αναμιγνύεται με γύψο, σε ποσοστό 2-3% περίπου, με σκοπό τη ρύθμιση του χρόνου πήξης, δίνοντας τελικά το καθαρό τσιμέντο Portland, του οποίου οι κόκκοι έχουν διάμετρο της τάξης των 75μm.



Σχήμα 1.1: Αναλυτικό διάγραμμα ροής διεργασιών παραγωγής τσιμέντου

Σύμφωνα με το ΕΛΟΤ/EN 197, το τσιμέντο είναι μία υδραυλική συνδετική ύλη, δηλαδή ένα λεπτότατα αλεσμένο ανόργανο υλικό, που όταν αναμιχθεί με νερό σε κατάλληλη αναλογία σχηματίζει πολτό που πήζει, σκληρύνεται και κατόπιν διατηρεί το σχήμα και την αντοχή του ακόμα και μέσα στο νερό. Επίσης, σύμφωνα με το συγκεκριμένο πρότυπο τα κύρια δευτερεύοντα συστατικά που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σύνθετων τσιμέντων δίνονται παρακάτω με το χαρακτηριστικό κεφαλαίο λατινικό γράμμα που αναφέρεται σε κάθε ένα από αυτά:

- **S** – blastfurnace slag (σκωρία υψικαμίνων)
- **D** – silica fume (ατμοί πυριτίας)
- **P** – natural pozzolana (φυσική ποζολάνη)
- **Q** – natural calcined pozzolana (φυσική ποζολάνη μετά από πύρωση)
- **V** – siliceous fly ash (πυριτική ιπτάμενη τέφρα)
- **W** – calcareous fly ash (ασβεστιτική ιπτάμενη τέφρα)
- **L, LL** – limestone (ασβεστόλιθος)
- **T** – burnt shale (τέφρα καύσης βιτουμενιούχων σχιστόλιθων)
- **M** – two or more of the above (μείγμα των παραπάνω).

1.4.1.1 Τύποι τσιμέντου

Τα τσιμέντα Portland ή CEM κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε κλίνκερ σε 5 κύριους τύπους, οι οποίοι είναι οι εξής:

- **CEM I** Τσιμέντο Πόρτλαντ ($K > 95\%$)
- **CEM II** Τσιμέντο Πόρτλαντ-σύνθετο (K,P,Q,V,W,T,L,S,D)
A: $80\% < K < 94\%$, B: $65\% < K < 79\%$
- **CEM III** Σκωριοτσιμέντο (K,S)
A: $35\% < K < 65\%$, B: $20\% < K < 34\%$, C: $5\% < K < 19\%$
- **CEM IV** Ποζολανικό (K,P,Q,V,W,D)
A: $65\% < K < 89\%$, B: $45\% < K < 64\%$
- **CEM V** Σύνθετο τσιμέντο (K,S,P,Q,V)
A: $40\% < K < 64\%$, B: $20\% < K < 39\%$



Εικόνα 1.10: Εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου

1.4.1.2 Κατηγορίες τσιμέντου

Σύμφωνα με το Πρότυπο EN 197.1, τα τσιμέντα κατατάσσονται με βάση τη χαρακτηριστική τους αντοχή σε θλίψη στις κατηγορίες 32.5, 42.5 και 52.5, με υποκατηγορία **N** (κανονικής πρώιμης αντοχής) ή **R** (υψηλής πρώιμης αντοχής). Η αντοχή μετράται σε κυβικά δοκίμια τσιμεντοκονιάματος πλευράς 40 mm, με λόγους (κ.β.) τσιμέντο:άμμο:νερό 1:3:0.5, αντίστοιχα. Τα δοκίμια συντηρούνται μία ημέρα σε χώρο με σχετική υγρασία 100% και τις υπόλοιπες σε

νερό θερμοκρασίας 20-22 °C. Η αντοχή των τσιμεντών σε θλίψη καθώς και φυσικές ιδιότητες πρέπει να συμφωνούν με τις απαιτήσεις του Πίνακα (βλ. Πίνακας 1.2). Οι απαιτήσεις ως προς τις χημικές ιδιότητες καθορίζονται στο Πρότυπο ΕΛΟΤ-196.1. Το τελευταίο δίνει και μία σειρά από κριτήρια συμμόρφωσης για τις μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες του τσιμέντου.

Πίνακας 1.2: Απαιτήσεις μηχανικές και φυσικές οριζόμενες ως χαρακτηριστικές τιμές

Κατηγορία αντοχής	Αντοχή σε θλίψη, MPa (N/mm ²)			Αρχικός χρόνος πήξης min	Διόγκωση (Διαστολή) mm
	Αρχική αντοχή		Τυπική αντοχή (όρια)		
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες		
32.5 N	-	≥ 16.0	≥ 32.5	≤ 52.5	≤ 10
32.5 R	≥ 10.0	-			
42.5 N	≥ 10.0	-	≥ 42.5	≤ 62.5	
42.5 R	≥ 20.0	-			
52.5 N	≥ 20.0	-	≥ 52.5	-	
52.5 R	≥ 30.0	-			

Η συμμόρφωση των τσιμεντών ως προς τα όρια αντοχών είναι στατιστική και περιγράφεται στο πρότυπο. Ο συμβολισμός των διαφόρων τσιμεντών, σύμφωνα με το πρότυπο EN 197-1, άρα και με το ΕΛΟΤ EN 197-1, καθορίζεται από:

- τον κύριο τύπο τσιμέντου,
- το ποσοστό clinker που περιέχεται στο τσιμέντο,
- τον τύπο του δεύτερου κύριου συστατικού,
- την κατηγορία αντοχής,
- το επίπεδο της πρώιμης αντοχής.

Από το μεγάλο αριθμό κύριων συστατικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκύπτει μεγάλος αριθμός και συγκεκριμένα είκοσι επτά (27), τύπων τσιμέντου τα οποία μπορεί να πραγματοποιηθούν σύμφωνα με το Πρότυπο EN 197 και τα οποία χαρακτηρίζονται ως «προϊόντα τσιμέντου». Αυτό γίνεται διότι το πρότυπο ενθαρρύνει τη χρησιμοποίηση εκείνων των κύριων συστατικών πέραν του κλίνκερ που κάθε χώρα διαθέτει και έχει εμπειρία από τη χρήση τους. Με τον τρόπο αυτό επιδιώκεται η καλύτερη εκμετάλλευση των πρώτων υλών που έχει κάθε χώρα σε όφελος της οικονομίας αλλά και του περιβάλλοντος διότι εξοικονομείται κλίνκερ η παραγωγή του οποίου είναι ενεργειακόβροχος. Μειώνονται έτσι οι επιβαρύνσεις του περιβάλλοντος λόγω της μείωσης των εκπομπών CO₂, ενώ ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα αξιοποίησης παραπροϊόντων.

Επειδή οι συνδυασμοί αντοχών και συνθέσεων δεν είναι όλοι εφικτοί, οι συνηθέστεροι τύποι τσιμέντων που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα είναι:

- CEM I 42,5 52,5
- CEM II / A – M 42,5
- CEM II / B – M 32,5 42,5
- CEM II / A – L 42,5
- CEM IV / B 32,5

1.4.2 Χάλυβας

Ο χάλυβας είναι κράμα σιδήρου με περιεκτικότητα σε άνθρακα που δεν ξεπερνάει το 2%. Λαμβάνεται από τον κοινό χυτοσίδηρο με αφαίρεση σημαντικού ποσοστού άνθρακα και άλλων προσμίξεων. Τα είδη χαλύβων που παράγονται και διατίθενται στην αγορά είναι πολλά και διαφορετικά, με διαφορετικές ιδιότητες και εφαρμογές. Ένα από αυτά τα είδη είναι και ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος. Το σκυροδέμα είναι υλικό με μικρή εφελκυστική αντοχή, γι' αυτό και η ανάληψη των εφελκυστικών δυνάμεων στις κατασκευές σκυροδέματος γίνεται από τον χάλυβα οπλισμού, που είναι σε μορφή ράβδων κυκλικής διατομής.

1.4.2.1 Τύποι Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος

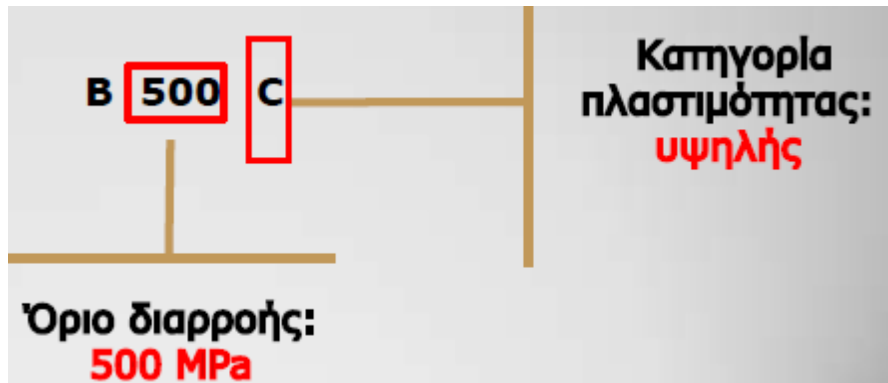
Σύμφωνα με την **πλαστιμότητα** (στον Κ.Τ.Χ. χρησιμοποιείται ο όρος "ολκιμότητα", αντί του όρου "πλαστιμότητα", ο οποίος υπονοεί τον "δείκτη πλαστιμότητας υλικού, $\mu\epsilon$ ", που ισούται με το λόγο της παραμόρφωσης στη μέγιστη τάση προς την παραμόρφωση διαρροής), σε χάλυβες

- υψηλής πλαστιμότητας,
- μέσης πλαστιμότητας και
- χαμηλής

Κατά τα Πρότυπα ΕΛΟΤ και του Νέου Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος ΚΤΧ 2008 στην Ελλάδα σήμερα χρησιμοποιούνται οι χάλυβες B500A και B500C.

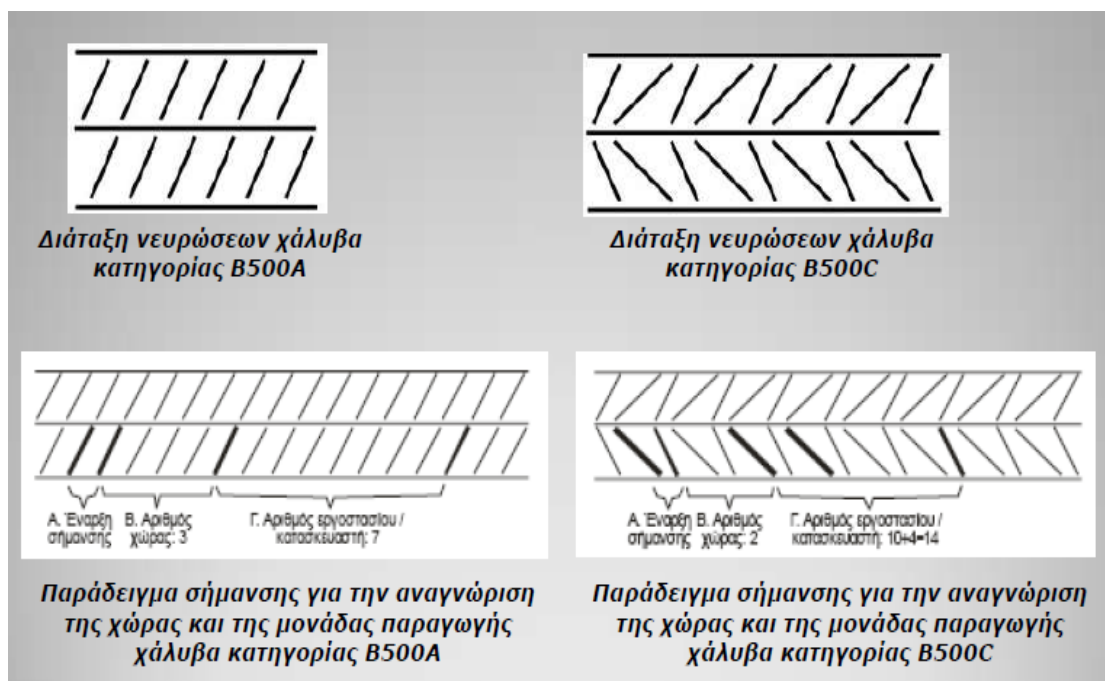
Τα διακριτικά C, B και A υποδηλώνουν την ολκιμότητα του χάλυβα, με το C να υποδηλώνει την υψηλή ολκιμότητα, το B τη μέση και το A τη χαμηλή. Το Ελληνικό Πρότυπο ορίζει και δέχεται δύο μόνο κατηγορίες εξ αυτών, την C και την A. Η ολκιμότητα είναι όρος που μετράει την παραμόρφωση που μπορεί να υποστεί ένα υλικό χωρίς να σπάσει. Ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος πρέπει να έχει υψηλή ολκιμότητα, αφού ο όλκιμος χάλυβας οδηγεί σε φέρον οργανισμό υψηλής πλαστιμότητας, υψηλής δηλαδή ικανότητας των μελών του σκελετού να παραμορφώνονται, χωρίς σημαντική μείωση της αντοχής τους. Όλα αυτά συντελούν σε μεγαλύτερη απορρόφηση σεισμικής ενέργειας, μειώνοντας τον κίνδυνο κατάρρευσης του

κτιρίου. Έτσι, σε μια κατασκευή σχεδόν στο σύνολό του ο χάλυβας που χρησιμοποιείται είναι ολκιμότητας C, ενώ χάλυβας ολκιμότητας A μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε δομικά στοιχεία που δεν έχουν μεγάλες απαιτήσεις για σιδηρό οπλισμό, όπως οι πλάκες που ακουμπούν στο έδαφος.



Σχήμα 1.2: Επεξήγηση ονομασίας χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος

Για την εύκολη αναγνώριση του Χάλυβα Οπλισμού Σκυροδέματος έχει θεσπιστεί και ισχύει ένα υποχρεωτικό σύστημα σημάσεως. Έτσι, ο χάλυβας αναγνωρίζεται βάσει της διάταξης των νευρώσεων στην επιφάνεια της κάθε ράβδου. Ο τρόπος διάταξης φανερώνει τη χώρα και το εργοστάσιο παραγωγής, καθώς και την κατηγορία του χάλυβα, όπως καθορίζονται από τα Ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα.



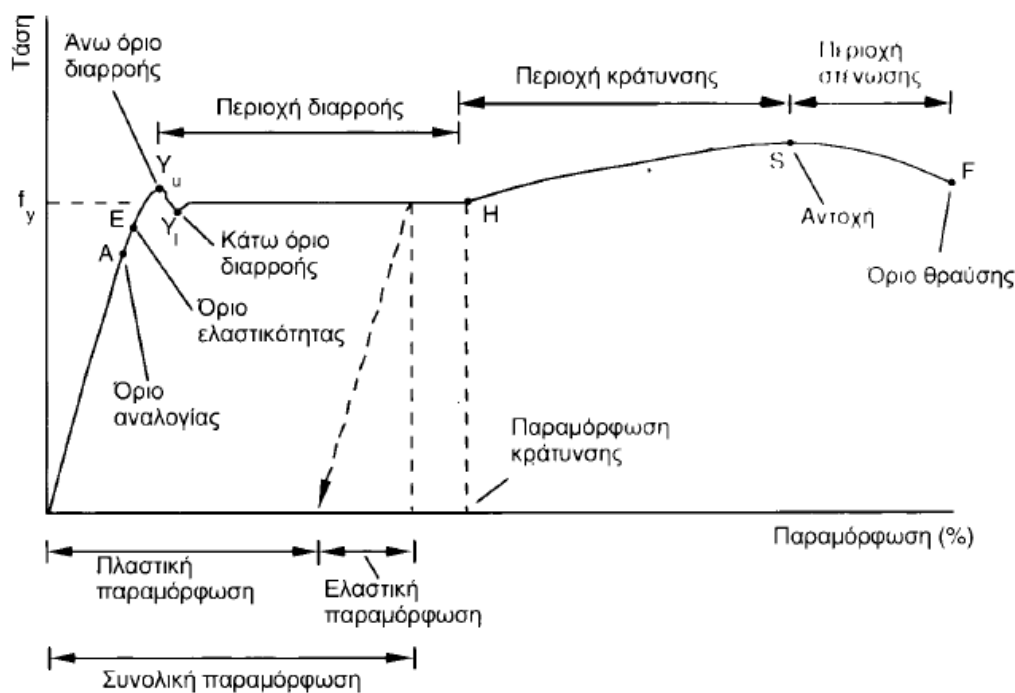
Σχήμα 1.3: Παραδείγματα σήμανσης χάλυβα με διαφορετικές διατάξεις νευρώσεων.

Στην Ελλάδα παράγεται και κυκλοφορεί χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος σε μορφή ευθύγραμμων ράβδων, ρόλλων, ηλεκτροσυγκολλητών πλεγμάτων, προκατασκευασμένων

κλωβών συνδετήρων και (σπανιότερα) προκατασκευασμένων ηλεκτροσυγκολλητών δικτυωμάτων. Η συνηθέστερη μορφή με την οποία διατίθενται οι χάλυβες οπλισμού είναι η ευθύγραμμη ράβδος, η οποία αποκαλείται και μετετόβεργα ή σιδερόβεργα. Οι ράβδοι του οπλισμού παράγονται σε διαμέτρους που εκφράζονται με τον αριθμό των χιλιοστών, με κατώτατο όριο τα 6 mm και ανώτατο τα 40 mm. Σχετικά με τα μήκη που παράγονται, έχουν επικρατήσει δύο διαστάσεις, των 12 m και των 14 m.

1.4.2.2 Μηχανικές ιδιότητες χάλυβων

Οι ράβδοι οπλισμού σκυροδέματος είναι στοιχεία που φορτίζονται μονοαξονικά, γι' αυτό και η συμπεριφορά τους σε εφελκυσμό είναι άμεσου ενδιαφέροντος. Τυπικά διαγράμματα εφελκυστικών τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού B500C δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.4: Τυπικό διάγραμμα εφελκυστικών τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα οπλισμού

Τα μεταλλικά υλικά, κατά τον εφελκυσμό τους παρουσιάζουν διακριτό γραμμικό και ελαστικό κλάδο στην καμπύλη δύναμης – επιμήκυνσης ($F - \Delta L$) ή τάσης παραμόρφωσης ($\sigma - \epsilon$), όπου διακρίνονται χαρακτηριστικά σημεία και περιοχές. Ενδεικτικά αναφέρεται η τάση στο όριο διαρροής (f_y), δηλαδή η μέγιστη τάση πέρα από την οποία υπάρχει μόνιμη παραμόρφωση. Το αρχικό τμήμα του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων είναι ευθύγραμμο και ακολουθείται από την περιοχή ή πλατώ διαρροής, όπου έχουμε ανάπτυξη παραμορφώσεων υπό σταθερή τάση. Η τάση αυτή ονομάζεται τάση ή όριο διαρροής, f_y . Ακολουθεί η περιοχή κράτυνσης, όπου παρατηρείται μικρή αύξηση των τάσεων μέχρι τη μέγιστη τιμή (εφελκυστική αντοχή),

πέρα από την οποία αρχίζει η στένωση της διατομής του μετάλλου (δημιουργία τοπικού "λαιμού") μέχρι τη θραύση. Η εφαπτομένη του διαγράμματος στην αρχή της κράτνωσης ονομάζεται μέτρο κράτνωσης και η αντίστοιχη παραμόρφωση είναι η παραμόρφωση κράτνωσης. Η συνολική παραμόρφωση που αντιστοιχεί σε κάθε σημείο της καμπύλης σ-ε δίνεται προσθέτοντας στην ελαστική παραμόρφωση (αυτή που ανακτάται κατά την αποφόρτιση) την πλαστική παραμόρφωση (παραμένουσα ή μόνιμη). Η πλαστική παραμόρφωση των μετάλλων οφείλεται στην κίνηση των γραμμικών ατελειών (καταναγκασμοί) λόγω της δράσης εξωτερικών δυνάμεων.

1.4.3 Αδρανή

Τα αδρανή είναι μικρά θραύσματα πετρωμάτων (0,08 έως 80 mm), κυρίως ορυκτής προέλευσης. Τα αδρανή διατίθενται σε διάφορους τύπους: θαλάσσιας, ποτάμιας και χερσαίας προέλευσης. Ο ρόλος των αδρανών είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, του οποίου καταλαμβάνουν το 60-80% του όγκου.

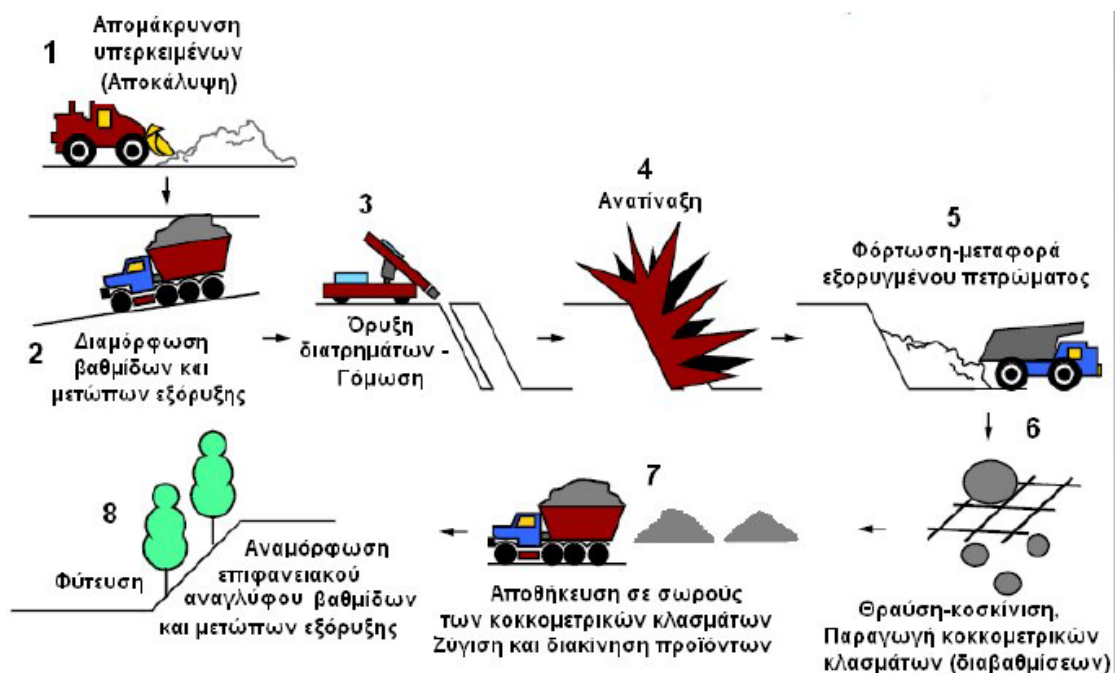


Εικόνα 1.11: Λατομείο εξόρυξης αδρανών

Τα αδρανή διακρίνονται:

- Με βάση το **μέγεθος**, τα αδρανή χωρίζονται σε χονδρά και λεπτά, ανάλογα με το αν η μέγιστη διάσταση του κόκκου τους ξεπερνά ή όχι τα 5 mm περίπου.

- Με βάση το **βάρος**, χωρίζονται σε αδρανή κανονικού βάρους, με πυκνότητα κόκκων μεταξύ 2000-3000 kg/m³, σε ελαφρά αδρανή, με πυκνότητα κόκκων που δεν ξεπερνά τα 2000 kg/m³ ή με φαινόμενη πυκνότητα σωρού ≤1200 kg/m³, και σε βαριά αδρανή, με πυκνότητα κόκκων πάνω από 3000 kg/m³ (ο προσδιορισμός γίνεται μετά από ξήρανση σε κλίβανο).
- Με βάση την **προέλευση**, χωρίζονται σε φυσικά, που προέρχονται από τη φύση, και τεχνητά, που παρασκευάζονται με ειδική επεξεργασία ορισμένων υλικών (π.χ. διογκωμένη άργιλος), από βιομηχανικά παραπροϊόντα (π.χ. σκωρία υψικαμίνου, ιπτάμενη τέφρα), ή από ανακύκλωση (π.χ. σκυροδέματος). Τα φυσικά αδρανή μπορεί να είναι συλλεκτά (που στη χώρα μας λέγονται και απλώς "φυσικά"), όταν προέρχονται απευθείας από τη φύση, ή θραυστά, όταν προέρχονται από τη θραύση πετρωμάτων (τα τελευταία περιγράφονται λεπτομερώς και από το Πρότυπο ΕΛΟΤ-408).
- Τέλος, με βάση το **σχήμα** τους, τα αδρανή χωρίζονται σε στρογγυλά, κυβοειδή, γωνιώδη, πλακοειδή και επιμήκη (π.χ. Mehta and Monteiro 1993, Οικονόμου 1993).



Σχήμα 1.5: Αλληλουχία φάσεων εξόρυξης και παραγωγής αδρανών υλικών

Η καταλληλότητα των αδρανών για χρήση τους στην παραγωγή σκυροδέματος καθορίζεται στα Ευρωπαϊκά Πρότυπα EN 12620 (για τα κανονικού βάρους και τα βαριά αδρανή) και EN 13055-1 (για τα ελαφρά αδρανή). Κύριο χαρακτηριστικό της δομής του ελαφροσκυροδέματος είναι τα κενά αέρα στα αδρανή του, που είναι και ο λόγος για το μειωμένο βάρος του, συγκριτικά με το συμβατικό σκυρόδεμα.

Το χαμηλό βάρος των ελαφροβαρών αδρανών (πυκνότητα κόκκων $\leq 2000 \text{ kg/m}^3$ ή φαινόμενη πυκνότητα σφουρά $\leq 1200 \text{ kg/m}^3$) οφείλεται στο μεγάλο πορώδες, ενώ η αντοχή τους σε θλίψη συνήθως αυξάνεται, με την πυκνότητα υψωμένη σε δύναμη της τάξης του 1.5. Από τα γνωστότερα φυσικά ελαφροβαρή αδρανή είναι η κίσηρης η οποία προέρχεται από τη θραύση ανοικτόχρωμου ηφαιστειακού πετρώματος που δημιουργήθηκε από την απότομη ψύξη λάβας με σύγχρονη αποβολή αερίων, και αποτελεί το κυριότερο και φθηνότερο ελαφρό αδρανές στη χώρα μας.

Το ΕΣ, με βάση το υλικό που αποτελεί το ελαφροαδρανές, χωρίζεται στις εξής κατηγορίες:

1.4.3.1 Τεχνητά ελαφροαδρανή

Τα κυριότερα τεχνητά ελαφροαδρανή προέρχονται είτε μέσω διόγκωσης (expansion) είτε μέσω συρρίκνωσης (agglomeration). Στην περίπτωση της διόγκωσης, το υλικό θερμαίνεται στο σημείο τήξης, στο οποίο το σημείο πυροπλαστικότητας συμβαίνει ταυτόχρονα με το σχηματισμό αερίων. Στην περίπτωση της συρρίκνωσης, τμήμα του υλικού λιώνει και τα διάφορα στοιχεία ενώνονται μεταξύ τους.

Τα τεχνητά ελαφροαδρανή μπορεί να προέρχονται είτε από φυσικά υλικά που έχουν υποστεί επεξεργασία, είτε από βιομηχανικά παραπροϊόντα που έχουν υποστεί επεξεργασία. Παραδείγματα της πρώτης κατηγορίας ελαφροαδρανών είναι η διογκωμένη άργιλος, (expanded clay), ο διογκωμένος σχιστόλιθος (expanded shale), ο διογκωμένος περλίτης (expanded perlite) και ο αποφυλλισμένος βερμικουλίτης (exfoliated vermiculite), ενώ παραδείγματα της δεύτερης είναι ελαφροαδρανή προερχόμενα από την επεξεργασία της ιπτάμενης τέφρας (fly ash) (πχ. sintered pulverized – fuel ash και cold bonded pulverized – fuel ash), παραπροϊόντων θερμοηλεκτρικών εργοστασίων παραγωγής ενέργειας.

1.4.3.2 Φυσικά ελαφροαδρανή

Ως φυσικά ελαφροαδρανή θεωρούνται όλα τα ελαφροαδρανή που δεν έχουν προκύψει από ειδική επεξεργασία. Έτσι, τέτοια είναι τα ορυκτά που υπάρχουν στη φύση, τα βιομηχανικά παραπροϊόντα που δεν υποβάλλονται σε περαιτέρω επεξεργασία και τα οργανικά υλικά.

Τα κυριότερα ορυκτά ελαφροαδρανή είναι η κίσηρη (ή ελαφρόπετρα - pumice), η σκωρία (scoria) και ο διατομίτης (diatomite). Η σκωρία αποτελεί παρόμοιο πέτρωμα με την κίσηρη, με τη μεταξύ τους διαφοροποίηση να έγκειται στη διαφορετική δομή του πορώδους τους, που οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη δημιουργία τους. Ο διατομίτης είναι ιζηματογενές ορυκτό που προέρχεται από τη συσσώρευση των διατόμων, ένα θαλάσσιο φυτικό είδος.

Τα κυριότερα παραπροϊόντα που χρησιμοποιούνται ανεπεξέργαστα ως ελαφροαδρανή είναι το furnace clinker, που προέρχεται από τους παλαιότερης τεχνολογίας θερμοηλεκτρικούς

σταθμούς και η τέφρα πυθμένα (furnace bottom ash), προερχόμενη από τους σύγχρονους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς.

Τέλος, οργανικά υλικά όπως πλαστικά ή προϊόντα ξύλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ελαφροαδρανή για μη δομικές εφαρμογές.

1.4.3.3 Χαρακτηριστικά ελαφροβαρών αδρανών

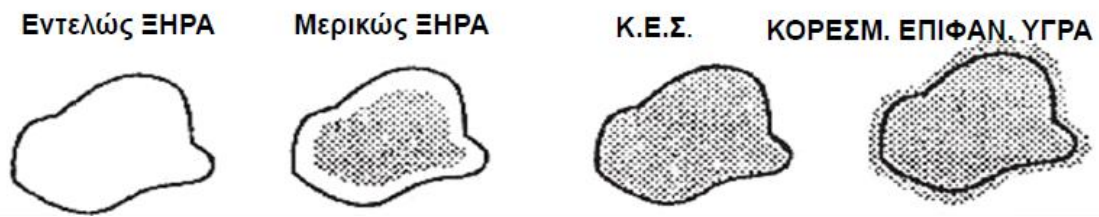
1.4.3.4 Φυσικά χαρακτηριστικά

Οι σημαντικότεροι παράγοντες, που συνιστούν τροποποίηση στον υπολογισμό των αναλογιών του μίγματος και στον καθορισμό των διαδικασιών για την παραγωγή ελαφροσκυροδέματος σε σύγκριση με το σύννηθες σκυρόδεμα, είναι το μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας και ο ρυθμός απορρόφησης των περισσότερων ελαφροβαρών αδρανών.

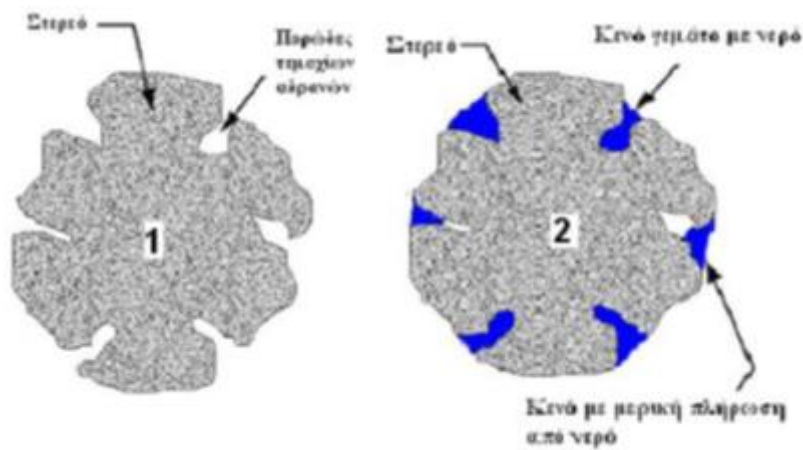
Η χρήση ελαφροβαρών αδρανών πλήρως κορεσμένων και όχι επιφανειακώς στεγνών (με προσροφημένο στην επιφάνεια νερό), είναι προτιμότερη σε σχέση με αυτή των ξηρών, καθώς κατά την ανάμιξη, δεν απορροφούν νερό και επομένως δεν αναμένεται απώλεια κάθισης του σκυροδέματος κατά τη διάρκεια της ανάμιξης, μεταφοράς και τοποθέτησης. Τα κορεσμένα αδρανή έχουν μικρότερη τάση να διαχωρισθούν κατά την αποθήκευση. Το νερό που θα απορροφηθεί, υπολογίζεται κατά τη διαδικασία υπολογισμού των ποσοτήτων των υλικών της ανάμιξης. Στην περίπτωση που κατασκευάζεται σκυρόδεμα με ελαφροβαρή αδρανή τα οποία έχουν χαμηλά ποσοστά αρχικής υγρασίας (συνήθως λιγότερο από 8-10%) και συγκριτικά υψηλά ποσοστά απορροφητικότητας, χρειάζεται αρχικά η ανάμιξη των αδρανών με το μισό (1/2) ή τα δύο τρίτα (2/3) του συνολικού νερού της ανάμιξης για ένα χρονικό διάστημα πριν την εισαγωγή του τσιμέντου, προσθέτων και αέρα, για να αποφευχθεί η απώλεια κάθισης.

Σκυρόδεμα που παράγεται με τη χρήση κορεσμένων - επιφανειακώς στεγνών ελαφροβαρών αδρανών, αποδεικνύεται πιο ευάλωτο σε κύκλους ψύξης - απόψυξης σε σχέση με σκυρόδεμα που προέρχεται από ελαφροβαρή αδρανή τα οποία μπορεί να είναι ξηρά ή πλήρως κορεσμένα - όχι επιφανειακά στεγνά, εκτός αν το σκυρόδεμα έχει χάσει την επιπλέον υγρασία του μετά την ωρίμανση και πριν από την έκθεσή του σε παγετό. Πρακτικά στις περισσότερες περιπτώσεις παρασκευής σκυροδέματος, οι αναλογίες των αδρανών θα πρέπει να υπολογίζονται σε καταστάσεις υγρασίας που μπορούν να επιτευχθούν στο εργαστήριο αλλά και στην πράξη. Στην παρασκευή ελαφροσκυροδέματος για δομικές εφαρμογές, το κυριότερο πρόβλημα είναι ο ορθός υπολογισμός του νερού που θα απορροφηθεί εντός - από την μάζα του αδρανούς - και το νερό που θα προσροφηθεί από την επιφάνεια του ελαφροβαρούς αδρανούς. Οι επιπτώσεις της απορροφητικότητας για κάθε περίπτωση εφαρμογής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

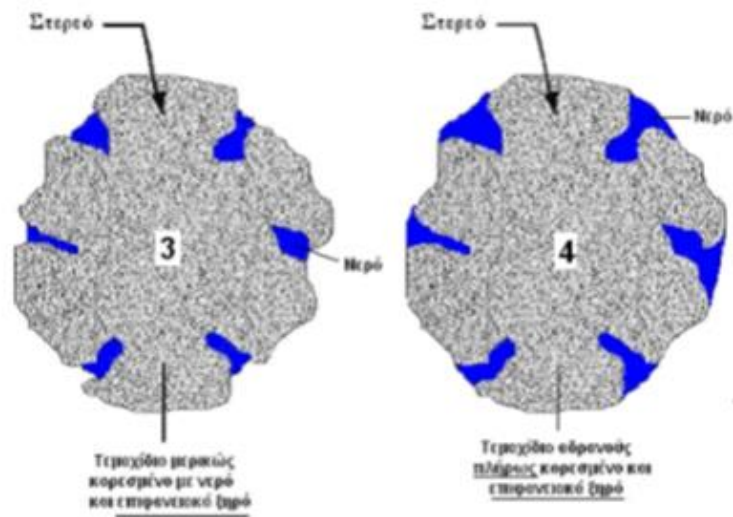
Έχουν καθορισθεί τέσσερις καταστάσεις στις οποίες τα αδρανή δύναται να βρίσκονται, σε σχέση την υγρασία που περιέχουν. Έτσι έχουμε:



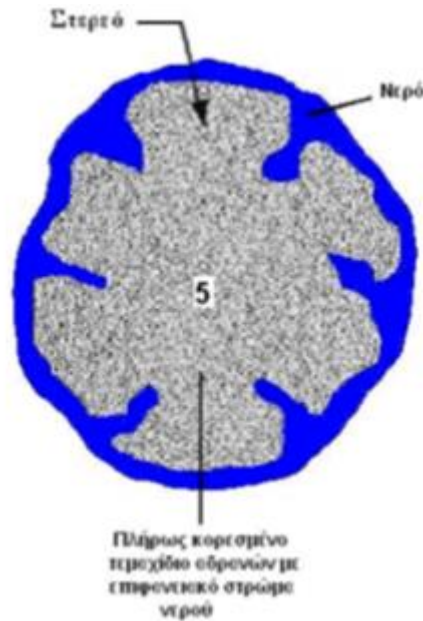
Σχήμα 1.6: Καταστάσεις αδρανών σε σχέση με την υγρασία τους



Σχήμα 1.7: Επιφανειακή δομή και πορώδες αδρανών

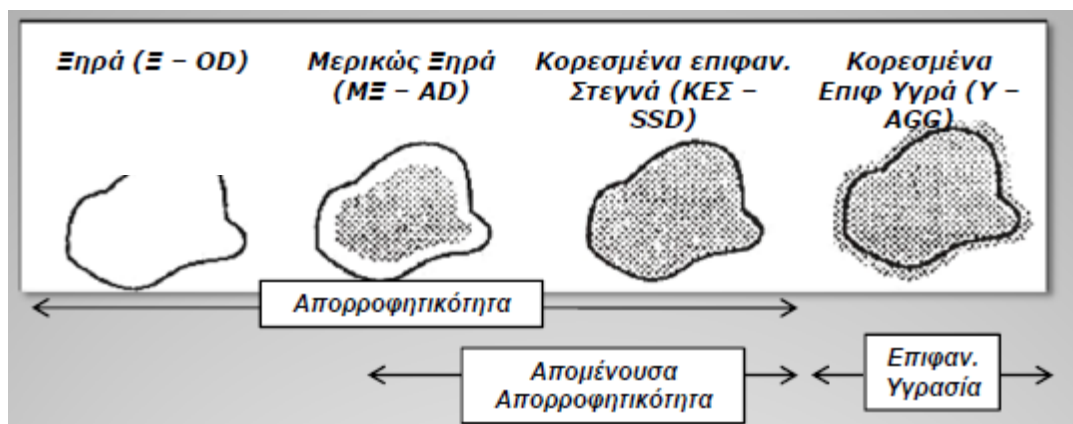


Σχήμα 1.8: Τεμάχια αδρανών μερικώς (3) και πλήρως (4) κορεσμένα με νερό αλλά επιφανειακά ξηρά



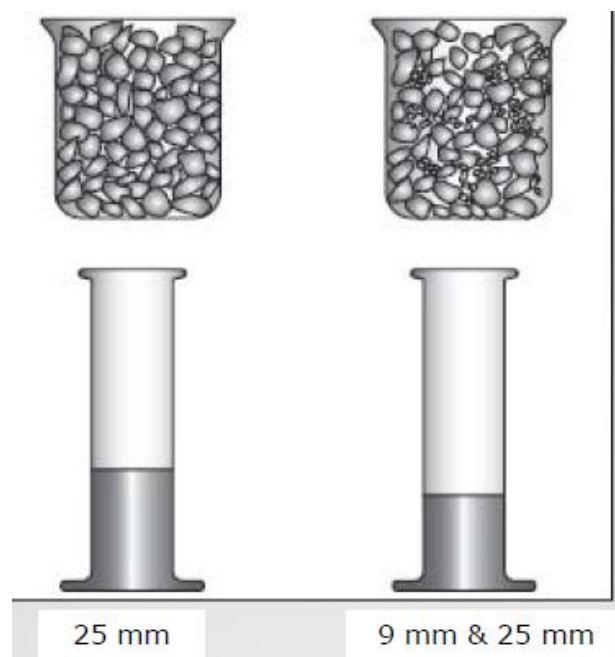
Σχήμα 1.9: Τεμάχιο αδρανών πλήρως κορεσμένο με νερό και καλυμμένο με επιφανειακό στρώμα νερού

Οι περισσότερες περιπτώσεις σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος αφορούν αδρανή κορεσμένα - επιφανειακά στεγνά (SSD) ή ξηρά (OD). Στην πράξη όμως, τα αδρανή είναι συνήθως είτε μερικώς κορεσμένα (AD) είτε κορεσμένα - όχι επιφανειακά στεγνά. Ωστόσο, το ελαφροβαρές αδρανές αντιπροσωπεύει μία μοναδική περίπτωση κάθε φορά. Η πλειοψηφία συνθέσεων για την παραγωγή δομικού ελαφροσκυροδέματος, γίνονται με ξηρά αδρανή. Όμως, στην πράξη τα αδρανή δεν είναι κορεσμένα - επιφανειακά στεγνά (SSD), αλλά κορεσμένα - όχι επιφανειακά στεγνά (Damp or Wet). Η κατάσταση αυτή επιτυγχάνεται μέσω διαβροχής. «μουλιάσματος». Το βασικότερο πρόβλημα των μελετητών είναι η εύρεση ενός εύκολου τρόπου για την μετατροπή των αναλογιών των ξηρών αδρανών των εργαστηρίων σε αναλογίες των «όπως είναι» (as it is) - σε επίπεδο υγρασίας- αδρανών.



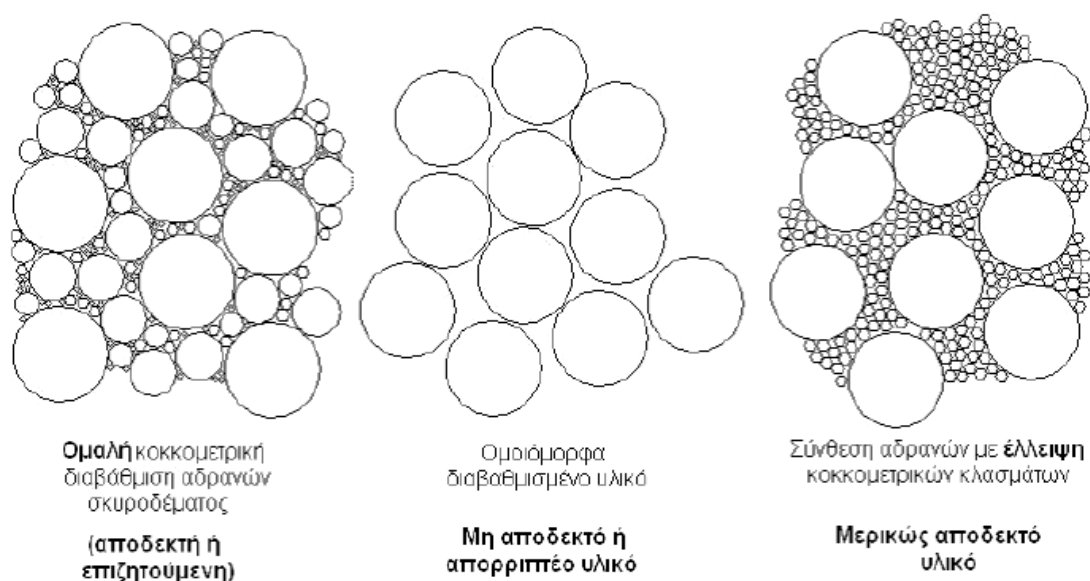
Σχήμα 1.10: Σχέση υγρασίας-απορροφητικότητας αδρανών

Η δυσκολία στη σύνθεση του σκυροδέματος με ελαφρά αδρανή βρίσκεται στον προσδιορισμό της ποσότητας νερού ανάμιξης που απορροφάται από τα αδρανή (που είναι της τάξης του 10-20%, και αν τα αδρανή είναι αρκετά ξηρά προκαλεί σημαντική μείωση της εργασιμότητας), γι' αυτό και η χρήση μεθόδων σύνθεσης που βασίζονται στο λόγο N/T είναι δύσκολα εφαρμόσιμη. Η σύνθεση του σκυροδέματος με ελαφρά αδρανή γίνεται ευκολότερα χρησιμοποιώντας έναν ισοδύναμο λόγο N/T, με βάση τα εξής: (α) Για ξηρά αδρανή, γίνεται ανάμιξη για ένα λεπτό προτού προστεθεί το τσιμέντο με το 40-60% της ποσότητας του νερού ανάμιξης, η οποία ισούται με την ισοδύναμη ποσότητα νερού συν την ποσότητα που απορροφούν τα αδρανή σε 30 λεπτά (που μετράται σε χωριστό δείγμα). Εναλλακτικά, τα αδρανή βυθίζονται σε νερό για 30 λεπτά και κατόπιν στεγνώνουν για 5 λεπτά πριν προστεθεί το τσιμέντο και το νερό η πρόσθετη ποσότητα νερού είναι αυτή που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του ισοδύναμου λόγου N/T. (β) Για υγρά αδρανή, προσδιορίζεται η ποσότητα υγρασίας τους, m , και συγκρίνεται με την ποσότητα που απορροφούν σε 30 λεπτά, N30. Η ισοδύναμη ποσότητα νερού ισούται με τη συνολική μείον τη διαφορά ($N30-m$) για $m < N30$, ή με την ποσότητα του πρόσθετου νερού για $m > N30$. Επίσης, πρόσθετη δυσκολία στη σύνθεση αποτελεί το ότι, σε αντίθεση με το κοινό σκυρόδεμα, η φαινόμενη πυκνότητα των ελαφρών αδρανών εξαρτάται σημαντικά από τη διαβάθμισή τους.



Σχήμα 1.11: Σχηματική απεικόνιση ρόλου κοκκομετρίας αδρανών

Οι ποσότητες αλλά και η κοκκομετρική διαβάθμιση σε λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα υλικά των αδρανών που θα χρησιμοποιηθούν, έχουν σημαντική επίδραση στο παραγόμενο σκυρόδεμα. Ένα καλά διαβαθμισμένο μίγμα αδρανών, έχει συνεχή συνεισφορά σε μεγέθη κόκκων και παράγει το ελάχιστο περιεχόμενο κενών στο σκυρόδεμα. Έτσι απαιτείται κατ'επέκταση ελάχιστη ποσότητα τσιμεντόπαστας. Η επίτευξη οικονομίας στη χρήση του τσιμέντου συνοδεύεται και από αντίστοιχη βελτιστοποίηση των τεχνικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος, καθώς επιτυγχάνεται μέγιστη αντοχή, καλύτερη ανθεκτικότητα και σταθερότητα των γεωμετρικών του χαρακτηριστικών.



Σχήμα 1.12: Μείγματα αδρανών για την παρασκευή σκυροδέματος

Γενικά, μεγιστοποίηση του όγκου των αδρανών στο σκυρόδεμα επιτυγχάνεται όταν:

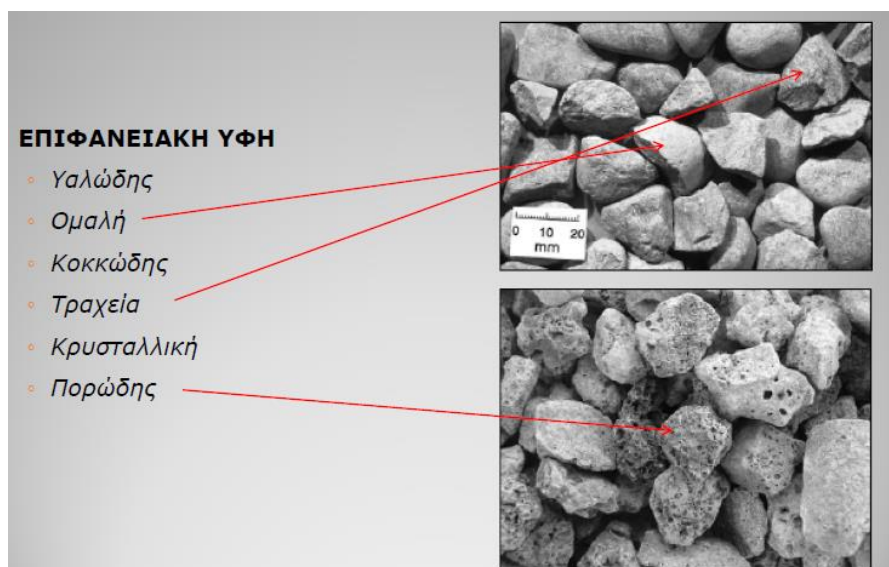
1. το μίγμα των αδρανών είναι καλά διαβαθμισμένο από τα μεγαλύτερα στα μικρότερα μεγέθη κόκκων,
2. οι κόκκοι διαθέτουν σφαιρικό σχήμα
3. η επιφάνεια των αδρανών είναι όσο το δυνατόν λιγότερο πορώδης

Αντίθετα, σκυρόδεμα που περιέχει χονδρόκοκκα αδρανή με γωνιώδες σχήμα, υψηλό πορώδες και ενδεχομένως όχι την κατάλληλη διαβάθμιση του μεγέθους των κόκκων, καταλαμβάνουν μικρότερο όγκο στο σκυρόδεμα.



Εικόνα 1.12: Διάφορες μορφές σχήματα αδρανών

Οι ίδιοι παράγοντες, (κοκκομετρική διαβάθμιση, σχήμα και υφή), επίσης καθορίζουν την ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα λεπτόκοκκου υλικού (άμμου). Έχει επίσης παρατηρηθεί ότι όταν χρησιμοποιείται κανονικού βάρους άμμος, η ποσότητα του απαιτούμενου χονδρόκοκκου υλικού αυξάνεται. Ωστόσο, το ποσοστό του χονδρόκοκκου υλικού θα πρέπει να πλησιάζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή σύμφωνα με την εργασιμότητα και την τελειωσιμότητα του, εκτός εάν δοκιμές υποδεικνύουν ότι λιγότερη ποσότητα παρέχει βέλτιστα χαρακτηριστικά. Εξάλλου σε ορισμένες περιπτώσεις, η αντοχή μπορεί να αυξηθεί μειώνοντας το μέγεθος του ονομαστικού μέγιστου κόκκου χωρίς αύξηση της ποσότητας του τσιμέντου.



Εικόνα 1.13: Επιφανειακή υφή αδρανών

Για κανονικού βάρους αδρανή, το φαινόμενο ειδικό βάρος των κλασμάτων που συγκρατούνται κάθε φορά στα διαφορετικά μεγέθη κοσκίων είναι σχεδόν ίδιο. Έτσι τα ποσοστά κατά βάρος των συγκρατούμενων υλικών, αντιστοιχούν σε ποσοστά κατ' όγκο. Ωστόσο, το φαινόμενο ειδικό βάρος των διαφόρων μεγεθών των κλασμάτων των ελαφροβαρών αδρανών συνήθως αυξάνεται όσο το μέγεθος του κόκκου μειώνεται. Μερικοί κόκκοι ελαφροβαρών χονδρόκοκκων αδρανών μπορεί να επιπλέουν στο νερό, ενώ το υλικό που περνά το κόσκινο Νο 100 (0,15 mm) μπορεί να έχει φαινόμενο ειδικό βάρος που να πλησιάζει αρκετά αυτό της κανονικού βάρους άμμο. Η επισήμανση αυτή έχει ιδιαίτερη αξία, καθώς το ποσοστό των κενών και της τιμεντόπαστας επηρεάζει μεταξύ άλλων και την εργασιμότητα του σκυροδέματος και συναρτάται από τον όγκο που καταλαμβάνει το κάθε κλάσμα υλικού και όχι από το βάρος του. Έτσι για παράδειγμα μίγμα αδρανών με μέτρο λεπτότητας άμμου 3,23 κατ' όγκο, αντιστοιχεί σε τιμή 3,03 κατά βάρος. Παρόλο που η τιμή 3,23 (κ.ο.) υποδηλώνει αρκετά «χονδρόκοκκη» διαβάθμιση υλικού, στην πραγματικότητα στο μίγμα των αδρανών περιέχεται μεγαλύτερο ποσοστό άμμου κατά βάρος.

Συμπερασματικά, συγκρίνοντας δυο κοκκομετρικές κατανομές, μία αδρανών κανονικού βάρους και μία ελαφροβαρών αδρανών, που έχουν το ίδιο μέτρο λεπτότητας, στη κατανομή των ελαφροβαρών αδρανών, θα περιέχεται μεγαλύτερο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού, κατά βάρος.

Όπως αναφέρθηκε, σκυρόδεμα που εμπεριέχει κανονικού βάρους αδρανή, όπως για παράδειγμα, άμμο, μπορεί να χαρακτηριστεί ως ελαφροσκυρόδεμα μόνο όταν η αντοχή επιτυγχάνεται με χαμηλό μοναδιαίο βάρος. Η χρήση κανονικής άμμου συνήθως ευνοεί την αύξηση της τιμής της αντοχής σε θλίψη του σκυροδέματος και του μέτρου ελαστικότητας. Όμως ταυτόχρονα αυξάνεται το μοναδιαίο βάρος, σε τέτοιο βαθμό που το παραγόμενο σκυρόδεμα να μην χαρακτηρίζεται πλέον ως ελαφροσκυρόδεμα.

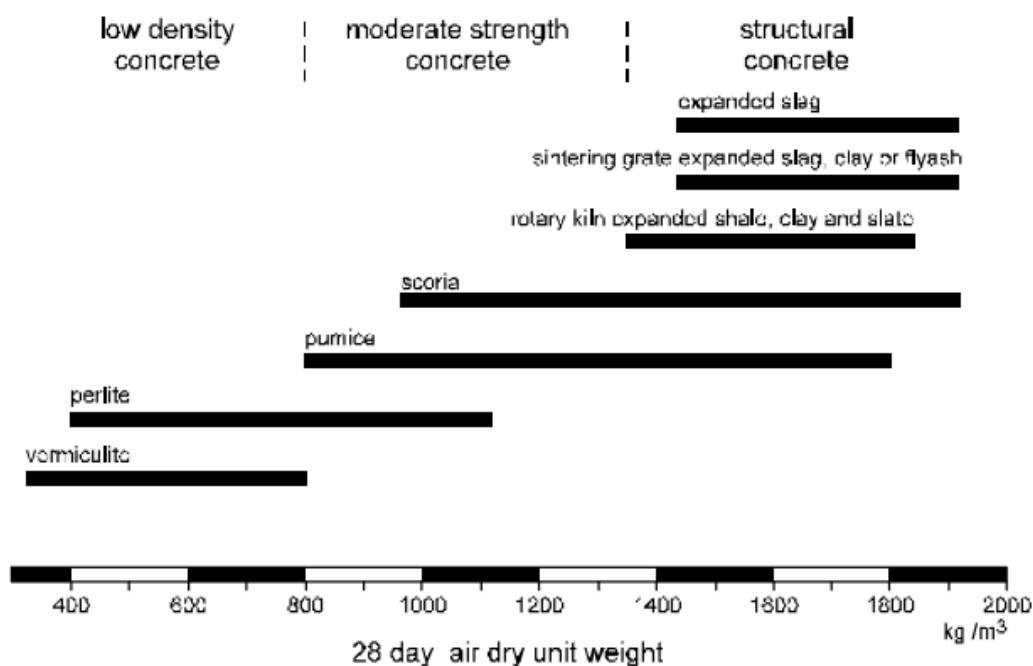
1.4.3.5 Μηχανικά χαρακτηριστικά

Τα ελαφροβαρή αδρανή παρουσιάζουν διαφοροποιημένες μηχανικές ιδιότητες συγκριτικά με τα κανονικά αδρανή. Σημαντικές διαφοροποιήσεις παρατηρούνται στο μέτρο ελαστικότητας (E), στην αντοχή σε θλίψη αλλά και στην αντοχή σε εφελκυσμό και συγκεκριμένα τα ελαφροβαρή αδρανή παρουσιάζουν μικρότερες τιμές σε όλα τα παραπάνω μεγέθη, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.3.

Πίνακας 1.3: Σύγκριση μηχανικών χαρακτηριστικών συνήθων αδρανών με ελαφροαδρανή

ΙΔΙΟΤΗΤΑ (MPa)	Συνήθη Αδρανή	Ελαφροαδρανή
Μέτρο Ελαστικότητας E	34000 - 70000	3000 – 10000
Αντοχή σε θλίψη	70 - 150	4 - 5
Αντοχή σε κάμψη	1.3 - 1.5	0.3 - 0.7

Στο παρακάτω σχήμα, δίνεται η κατηγοριοποίηση των ελαφροαδρανών σε σχέση με το ειδικό τους βάρος.



Σχήμα 1.13: Ταξινόμηση ΕΣ με βάση το ειδικό τους βάρος και το ΕΑ

Παρατηρείται ότι κατάλληλα ΕΑ για παραγωγή δομικού ΕΣ είναι η κίσηρη (pumice), η σκωρία (scoria), ο διογκωμένος σχιστόλιθος (expanded shale), η διογκωμένη άργιλος (expanded clay). Αδρανή από περλίτη ή βερμικουλίτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θερμομονωτικούς και ηχομονωτικούς σκοπούς.

1.5 Το Ελαφροσκυρόδεμα

Το ελαφροσκυρόδεμα χρησιμοποιείται κυρίως για:

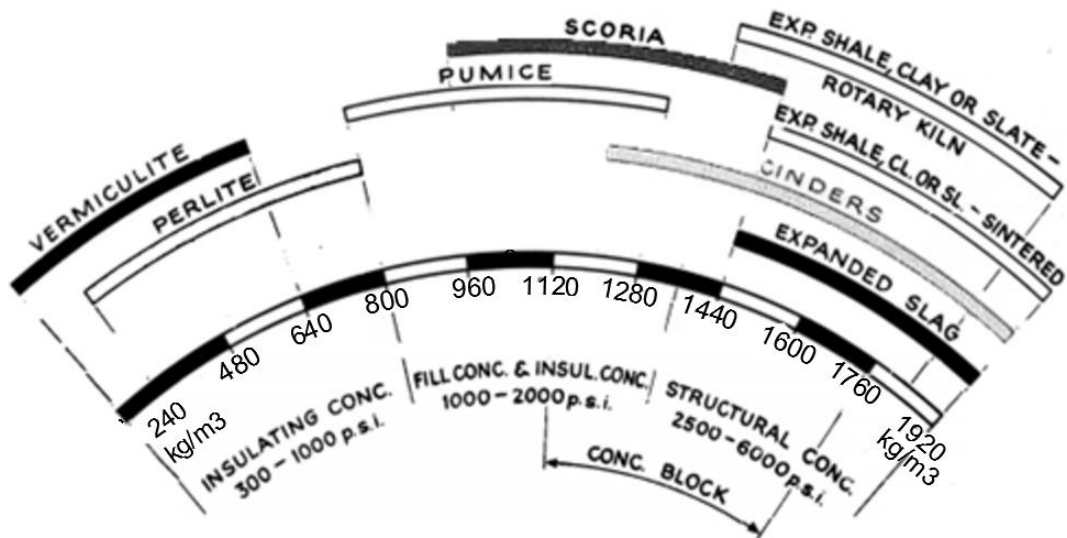
- Θερμομονώσεις
- Κατασκευές μικρού βάρους (ταβάνια, τοίχοι, καταστρώματα γεφυρών, πλάκες)
- Προκατασκευασμένα προϊόντα
- Σκυρόδεμα εξομάλυνσης
- Σκυρόδεμα πλήρωσης

1.5.1 Κατηγορίες Ελαφροσκυροδέματος

Το ελαφροσκυρόδεμα, με κριτήριο τον τρόπο λειτουργίας του διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες:

1. Δομικό ΕΣ ικανοποιητικής αντοχής, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό φερόντων δομικών στοιχείων.
2. Μονωτικό ΕΣ, το οποίο χρησιμοποιείται ως ηχομονωτικό – θερμομονωτικό υλικό, χωρίς να έχει τη δυνατότητα να φέρει φορτία λόγω της αμελητέας αντοχής του.
3. Δομικό – Μονωτικό ΕΣ με μειωμένη αντοχή, το οποίο είναι μονωτικό και μπορεί να φέρει μικρά μόνο φορτία (ίδιο βάρος).

Η πυκνότητα των διαφόρων ΕΣ εκκινεί από 250 kg/m^3 και εξαρτάται κυρίως από το είδος του ΕΑ. Μια σχηματική ενδεικτική παρουσίαση του ειδικού βάρους σε σχέση με τη χρήση του ΕΣ αλλά και τον τύπο του ΕΑ δίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 1.14: Σχέση χρήσης-πυκνότητας ΕΣ

Βασιζόμενοι στο μίγμα και τα συστατικά που χρησιμοποιούνται, λαμβάνουμε τις ακόλουθες κατηγορίες πυκνότητας και ιδιοτήτων:

Πίνακας 1.4: Κατηγορίες Ελαφροσκυροδέματος με βάση το ελαφροαδρανές

Αδρανή	Πυκνότητα πάνω από 1800kg/m ³	Υψηλές μηχανικές ιδιότητες
Διογκούμενα αργιλικά πετρώματα	Πυκνότητα πάνω από 1500kg/m ³	Περιορισμένες μηχανικές ιδιότητες
Προϊόντα παραγωγής κενών	Πυκνότητα πάνω από 1200kg/m ³	Χωρίς μηχανικές ιδιότητες (εύκολη παραγωγή ελαφροσκυροδέματος)
	Πυκνότητα πάνω από 1500kg/m ³	Πορώδες ελαφροσκυρόδεμα με χαμηλές μηχανικές ιδιότητες
Αφρογόνα	Πυκνότητα πάνω από 800kg/m ³	Χωρίς μηχανικές ιδιότητες όπως το κονίαμα πλήρωσης
Διογκούμενο πολυστυρένιο	Πυκνότητα πάνω από 800kg/m ³	Χαμηλές μηχανικές ιδιότητες

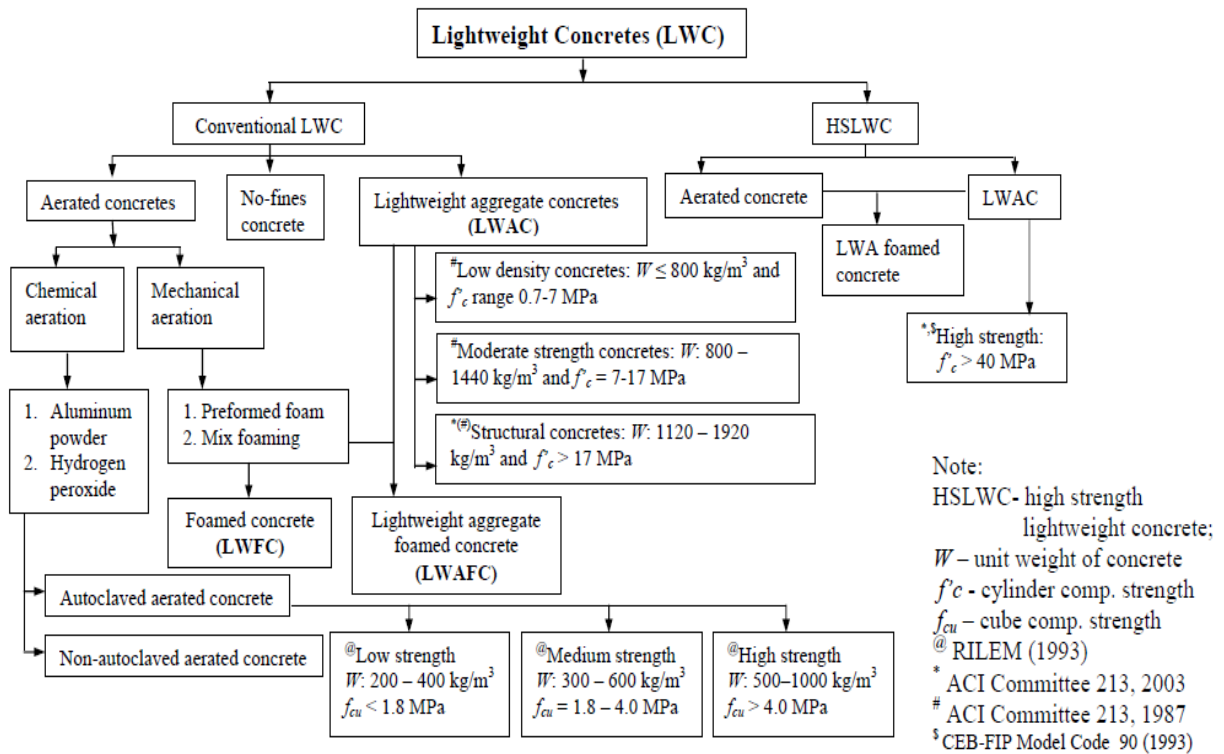
1.5.1.1 Κατηγορίες Ελαφροσκυροδέματος με βάση τα είδη των κενών του ελαφροαδρανούς

Τα κενά που παρατηρούνται στα ελαφροαδρανή διακρίνονται σε 4 είδη:

1. Κενά σωρού, τα οποία βρίσκονται μόνο μεταξύ των ελαφροαδρανών
2. Κενά αδρανών, που υπάρχουν μόνο μέσα στη δομή του ελαφροαδρανούς
3. Κενά σωρού και αδρανών, είδος που αποτελεί συνδυασμό των 1 και 2
4. Κενά ομοιόμορφης δομής, όπου οι πόροι κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλο το υλικό.

Έχοντας υπόψη τα παραπάνω είδη, το ΕΣ ανάλογα με το είδος των κενών που υπάρχουν στο ελαφροαδρανές του, διακρίνεται στις παρακάτω κατηγορίες:

1. ΕΣ με κανονικά (μη ελαφρά) αδρανή και κατάλληλη κοκκομετρική διαβάθμιση, το οποίο σπάνια χρησιμοποιείται
2. ΕΣ με κενά σωρού και αδρανών (βλ. παραπάνω, 3^η κατηγορία κενών). Τέτοια ΕΣ είναι τα κισσηρόδεμα και περλιτόδεμα.
3. ΕΣ με κενά ομοιόμορφης δομής (βλ. παραπάνω, 4^η κατηγορία κενών). Τέτοια ΕΣ είναι το κυψελωτό σκυρόδεμα ή αερομεπτόν ή αφρώδες μεπτόν.



Σχήμα 1.15: Κατηγοριοποίηση ελαφροσκυροδεμάτων

2 Πειραματική διερεύνηση χαρακτηριστικών του υλικού

2.1 Εισαγωγή

Για τον προσδιορισμό της δυνατότητας χρήσης του δομικού κισσηροδέματος στην κατασκευή δομικών στοιχείων όπως δοκούς, πλάκες και υποστρώματα, είναι απαραίτητη η διερεύνηση των βασικών ιδιοτήτων του υλικού. Οι βασικές ιδιότητες που διερευνήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι το μέτρο ελαστικότητας E , η θλιπτική του αντοχή f_c , η εφελκυστική του αντοχή f_t και ο λόγος Poisson ν . Γνωρίζοντας τις βασικές μηχανικές ιδιότητες του κισσηροδέματος είναι εφικτός ο προσδιορισμός της απόκρισης των δομικών στοιχείων υπό τα φορτία λειτουργίας και αστοχίας.

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική και θεωρητική διερεύνηση, μέσω της οποίας μελετήθηκαν οι ήδη υπάρχουσες πειραματικές μελέτες που αφορούν το κισσηρόδεμα και δευτερευόντως το ελαφροσκυρόδεμα με διαφορετικά ελαφρά αδρανή. Επιπλέον, μελετήθηκε το κανονιστικό πλαίσιο του Ευρωκώδικα 2 γύρω από το ΕΣ και υπολογίστηκαν οι τιμές που συνδέουν τα εξεταζόμενα μεγέθη, οι οποίες συγκρίθηκαν με τις θεωρητικές. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές για διάφορες συνθέσεις που αναπτύχθηκαν από την εταιρεία LaFarge. Πιο αναλυτικά το πειραματικό σκέλος αποτελείται από:

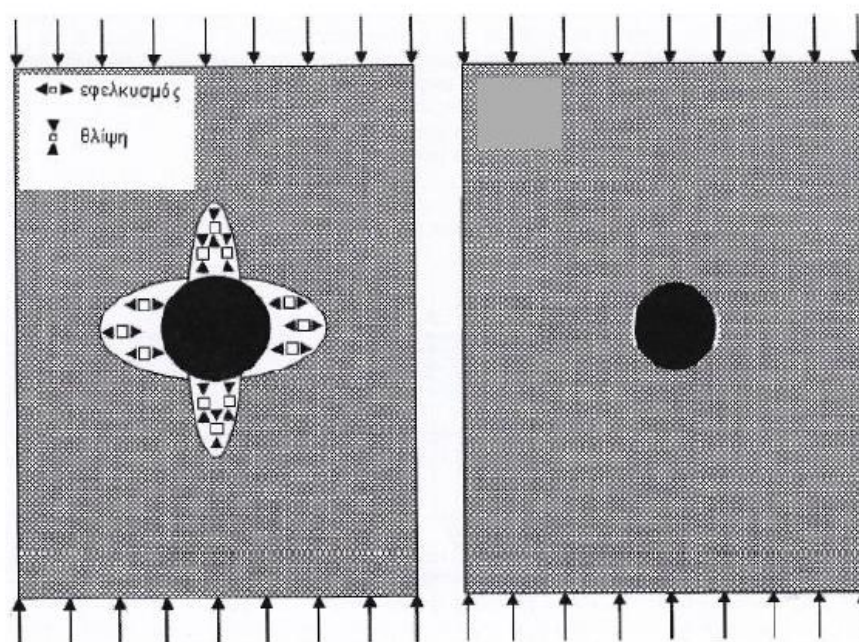
- Θραύσεις κυβικών και κυλινδρικών δοκιμίων σε θλίψη για την εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής του ΚΔ
- Δοκιμή διάρρηξης σε κυλίνδρους για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής του ΚΔ
- Εκτίμηση μέτρου ελαστικότητας σε κυλινδρικά δοκίμια
- Δοκιμές κάμψης τριών και τεσσάρων σημείων σε ορθογωνικές άοπλες και ινοπλισμένες δοκούς με σκοπό την αποτίμηση της καμπτικής αντοχής τους
- Δοκιμές κάμψης πλακών από ινοπλισμένο ΚΔ

2.2 Βιβλιογραφική και θεωρητική αναθεώρηση

2.2.1 Δομή ελαφροσκυροδέματος

Για την κατανόηση της συμπεριφοράς του ΚΔ και για να τη σύγκριση του με αυτήν του συνήθους πυκνότητας σκυροδέματος (ΣΠΣ), είναι απαραίτητο πρώτα να γίνει κατανοητή η δομή τους και οι μεταξύ τους διαφορές. Πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση σκυροδέματος με

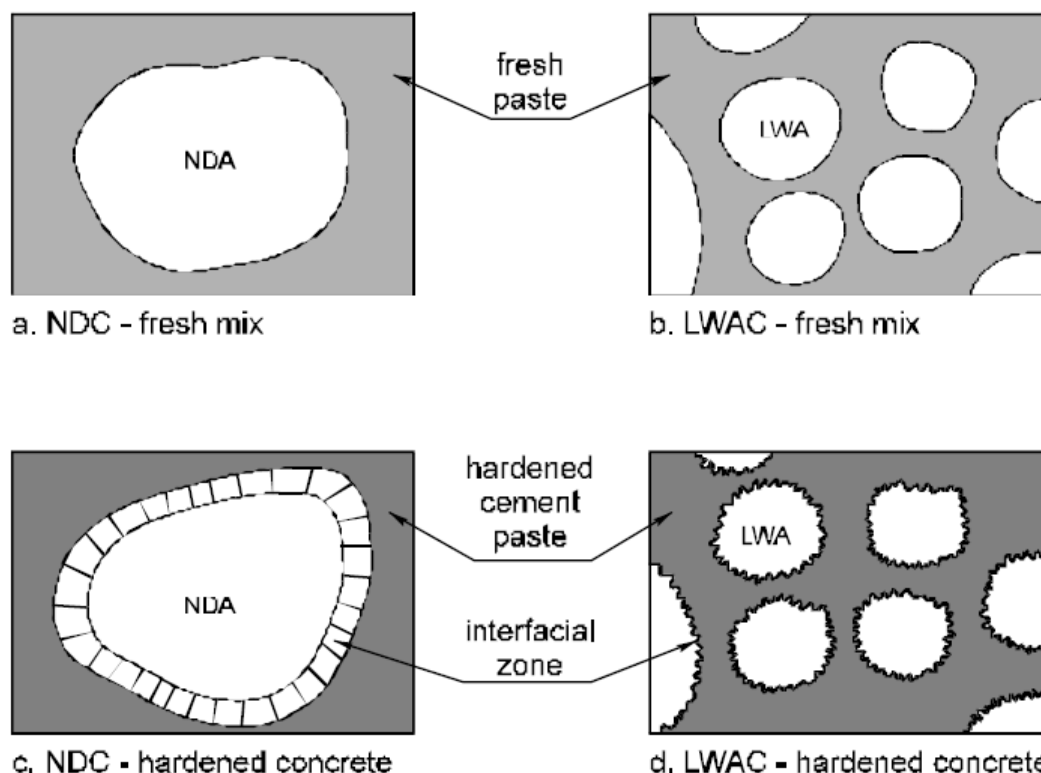
συμβατικά αδρανή, δηλαδή στην περίπτωση που τα αδρανή έχουν μεγαλύτερο Μέτρο Ελαστικότητας (E) σε σχέση με τον τσιμεντοπολτό, οι αναπτυσσόμενες τάσεις υπό την επιβολή κατακόρυφου θλιπτικού φορτίου έχουν τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Με την αύξηση των εξωτερικά επιβαλλόμενων θλιπτικών τάσεων και έπειτα από κάποια τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου και πάνω, το σκυρόδεμα θα αρχίσει να ρηγματώνεται στις θέσεις των μεγαλύτερων εφελκυστικών τάσεων όταν αυτές θα υπερβούν τις αντίστοιχες αντοχές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ρωγμή θα δημιουργηθεί στη διεπιφάνεια με αποκόλληση του τσιμεντοπολτού από τη επιφάνεια του αδρανούς με αστοχία σε συνάφεια.



Σχήμα 2.1: Μηχανισμός θραύσης σε θλίψη συνήθους σκυροδέματος, αναπτυσσόμενες τάσεις στην περιφέρεια αδρανούς περιβαλλόμενου από σκληρυμένο τσιμεντοπολτό και προκαλούμενες ρηγματώσεις

Μια απλοποιητική θεώρηση για το σκυρόδεμα, στη μεσοσκοπική κλίμακα, δηλαδή σε μεγέθη χιλιοστού μέχρι μερικών εκατοστών, είναι η προσομοίωσή του ως αποτέλεσμα δύο φάσεων – υλικών, τα σωματίδια του ελαφροαδρανούς και τον τσιμεντοπολτό. Το ΣΠΣ περιέχει αδρανή τα οποία συνήθως έχουν μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή και μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από το τσιμεντοπολτό με συνέπεια αυτό να επηρεάζει την κατανομή των τάσεων, τις θέσεις των αρχικών ρηγματώσεων και στη συνέχεια τη μορφή της θραύσης του σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, τα σωματίδια του αδρανούς αναλαμβάνουν μεγαλύτερη τάση λόγω του μεγαλύτερου μέτρου ελαστικότητάς τους και επιπρόσθετα η διαφορά δυσκαμψίας δημιουργεί εγκάρσιες εφελκυστικές τάσεις οι οποίες ασκούνται στην επιφανειακή ζώνη των σωματιδίων του αδρανούς με τον τσιμεντοπολτό. Επιπρόσθετα, η διαφορά του λόγου Poisson μπορεί να αυξήσει τις εγκάρσιες εφελκυστικές τάσεις ενώ η γωνιακότητα των σωματιδίων του αδρανούς δημιουργεί τοπικές συγκεντρώσεις εφελκυστικών τάσεων. Για ΣΠΣ χαμηλής αντοχής, η

επιφανειακή ζώνη αδρανούς – τσιμέντου έχει μικρότερη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας από την τσιμεντόπαστα. Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα τρίτο υλικό της προσομοίωσης του σκυροδέματος σε μεσοσκοπική κλίμακα, με την επιφανειακή αυτή ζώνη να ρηγματώνεται σε σχετικά μικρή εξωτερική τάση. Καθώς η τάση αυτή αυξάνεται, η ζώνη αυτή θα εμφανίζει κατανεμημένη μικρορηγμάτωση και σταδιακά το πλάτος της θα αυξάνεται.



Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση διαφορών στη δομή του ΕΣ και του ΣΠΣ σε μεσοσκοπική κλίμακα (NDC = Normal density concrete, LWAC = Lightweight aggregate concrete)

Παράλληλα, καθώς η καθολική τάση αυξάνεται, ένα αυξανόμενο μέρος της επιβαλλόμενης ελαστικής ενέργειας θα καταναλώνεται στον σχηματισμό των ρηγματώσεων, με συνέπεια το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων να αποκλίνει από την γραμμικότητα. Όταν προσεγγιστεί η οριακή τάση, η μικρορηγμάτωση θα επιτρέψει μια εσωτερική ανακατανομή της τάσης, διαδικασία η οποία έχει ως συνέπεια την πιο ψαθυρή αστοχία. Το τελευταίο φαινόμενο εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά του αδρανούς σχετικά με την ικανότητα ρηγμάτωσης του, όπως για παράδειγμα την σκληρότητά του.

Οι μεγάλες διαφορές στην αντοχή και στην ακαμψία των τριών υλικών που αποτελούν το σύνηθες σκυρόδεμα, σε μεσοσκοπική κλίμακα, έχουν ως αποτέλεσμα το τελευταίο (στην κλίμακα αυτή) να θεωρείται ετερογενές υλικό. Οι μηχανικές ιδιότητές του και ο τρόπος αστοχίας του εξαρτώνται κυρίως από αυτήν την ετερογένεια. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, στο

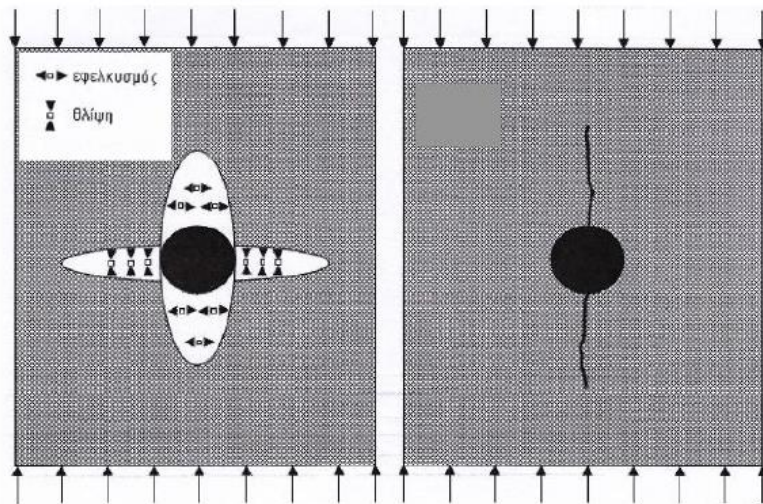
ΣΠΣ, ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας των σωματιδίων των αδρανών προς τον περιβάλλον τσιμεντοπολτό είναι της τάξεως του 5.

Η ετερογένεια όμως αυτή εξαφανίζεται όσο οι διαφορές στην αντοχή και στην ακαμψία των υλικών που αποτελούν το σκυρόδεμα ελαχιστοποιούνται. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση του ΕΣ. Η αντοχή των ελαφροαδρανών είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την αντοχή του τσιμεντοπολτού. Επίσης, η επιφανειακή ζώνη στην περίπτωση του ΕΣ είναι καλύτερης ποιότητας από την αντίστοιχη στο ΣΠΣ, με συνέπεια σε πολλές περιπτώσεις, στο ΕΣ, η επιφανειακή ζώνη αυτή να μην έχει πλέον την μικρότερη αντοχή. Αυτή η διαφοροποίηση έχει εξέχουσα σημασία καθώς καθορίζει κυρίως τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του ΕΣ, όπως τα μηχανικά χαρακτηριστικά, τη διαδικασία θραύσης, την ευθραυστότητα, τη διαπερατότητα και την αντοχή του. Έτσι, στο ΕΣ, που το μέτρο ελαστικότητας των ελαφροαδρανών είναι της ίδιας τάξης με το μέτρο του σκληρυμένου τσιμέντου, η τάση κατανέμεται πολύ πιο ομοιόμορφα απ' ό,τι στο ΣΠΣ. Συχνά ο τσιμεντοπολτός έχει μεγαλύτερο μέτρο από τα ελαφροαδρανά και σ' αυτήν την περίπτωση παραλαμβάνει και μεγαλύτερη τάση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τοπική εγκάρσια εφελκυστική τάση να δρα στον τσιμεντοπολτό και όχι στην επιφανειακή ζώνη τσιμέντου – σωματιδίων ΕΑ. Επιπλέον, στην περίπτωση αυτή, η επιφανειακή ζώνη αυτή θα είναι μερικώς περισφιγμένη λόγω εγκάρσιας θλιπτικής τάσης.

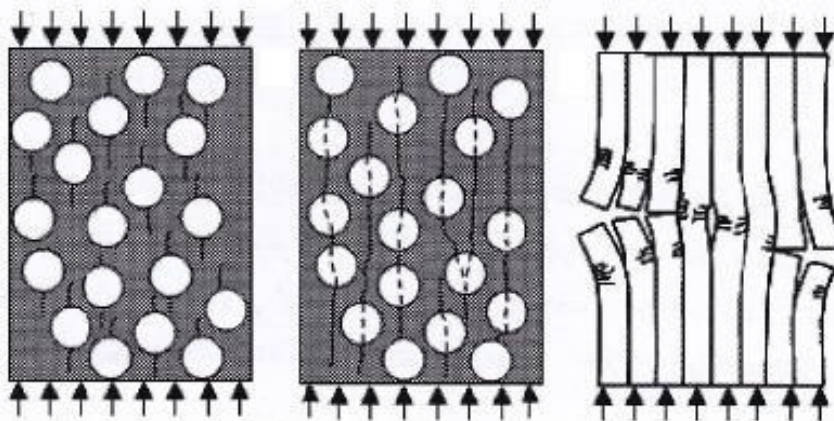
Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η επιφανειακή ζώνη εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά του ΕΑ όσο και από τη δομή του πορώδους του και την αρχική περιεκτικότητα του αδρανούς σε νερό. Κατά συνέπεια, τα διάφορα ελαφροαδρανά, ακόμα και αυτά που μοιάζουν ίδια στην εμφάνιση, μπορεί να δίνουν ΕΣ με πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η αντοχή και η ανθεκτικότητα σε θραύση των ΕΑ είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη των συνήθων αδρανών με αποτέλεσμα η ικανότητα παραλαβής ρηγματώσεων να είναι μικρότερη. Επιπλέον, οι αρχικές ρηγματώσεις συμβαίνουν σε σχετικά υψηλό ποσοστό έντασης λόγω της ελαστικής συμβατότητας μεταξύ των υλικών. Επομένως, όταν σχηματιστεί μια ρωγμή στον τσιμεντοπολτό ή στο ΕΑ, αυτή θα έχει την τάση να διέλθει μέσα από τα σωματίδια του ελαφροαδρανούς κι όχι μέσα από την επιφανειακή ζώνη, σε αντίθεση δηλαδή με το ΣΠΣ. Κατά συνέπεια, η ρηγμάτωση που συμβαίνει στο ΕΣ χαρακτηρίζεται από λίγες και κυρίαρχες ρωγμές, αφού δεν αναπτύσσονται πολλές και αμελητέες μικρορηγματώσεις στην επιφανειακή ζώνη. Αυτή είναι και η εξήγηση για το σχεδόν γραμμικό διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης του ΕΣ και την ξαφνική αστοχία.

Συμπερασματικά, ο μηχανισμός αστοχίας του ΕΣ ελέγχεται από την ομοιόμορφη κατανομή της τάσης λόγω των μικρών σχετικά διαφορών των ακαμψιών των τριών υλικών του ΕΣ, την βελτιωμένη επιφανειακή ζώνη και την μικρή αντοχή και ανθεκτικότητα σε θραύση του. Στην περίπτωση του ελαφροσκυροδέματος, όπου τα ελαφροβαρή αδρανά έχουν μέτρο

ελαστικότητας (E) μικρότερο από αυτό του τσιμεντοπολτού, η ανάπτυξη τάσεων στο υλικό με την επιβολή εξωτερικής θλιπτικής τάσης είναι διαφορετική. Ειδικότερα, οι εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται στην πάνω και στην κάτω περιοχή του αδρανούς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, με αποτέλεσμα το σκυρόδεμα να ρηγματώνεται σε εκείνες τις θέσεις και οι αναπτυσσόμενες ρωγμές να διαπερνούν τελικά το ίδιο το αδρανές.



Σχήμα 2.3: Μηχανισμός θραύσης σε θλίψη ελαφροσκυροδέματος, αναπτυσσόμενες τάσεις στην περιφέρεια αδρανούς περιβαλλόμενου από σκληρυμένο τσιμεντοπολτό και προκαλούμενες ρηγματώσεις



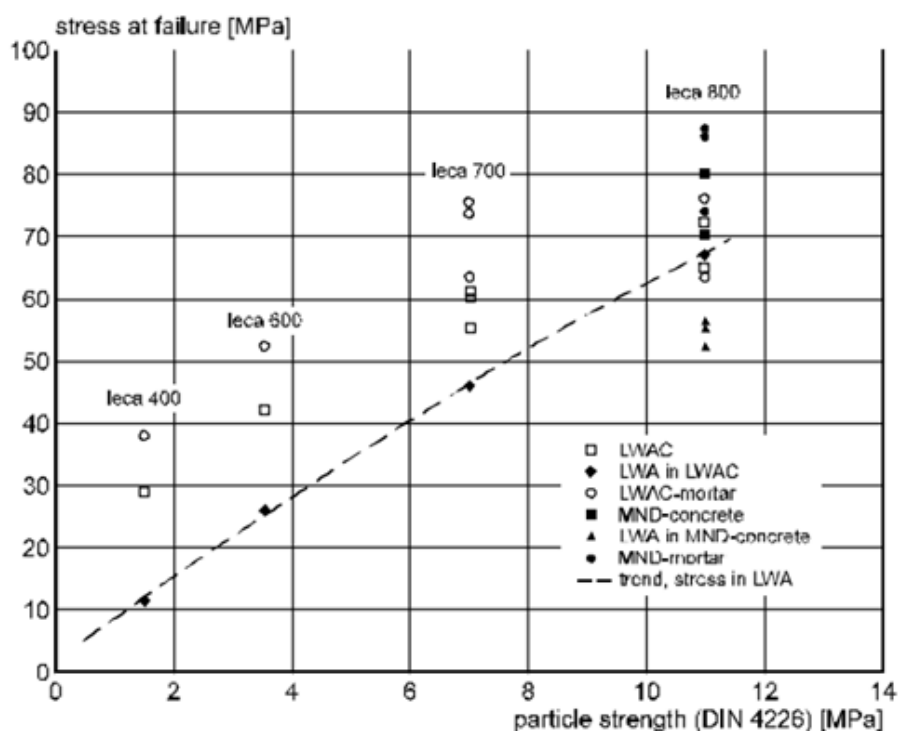
Σχήμα 2.4: Διαδοχικές φάσεις ρηγμάτωσης σε προσομοίωμα ελαφροσκυροδέματος έως την αστοχία

2.2.2 Θλιπτική αντοχή

Με δεδομένο ότι η κίσηρη έχει γενικά μικρές αντοχές, συγκριτικά με τα συνήθη αδρανή, η αντοχή του σκυροδέματος ελέγχεται κυρίως από τον τσιμεντοπολτό και από τα όρια της δράσης

της ως συνδετικό υλικό (Bardhan – Roy, 1995). Παράλληλα έχει επιβεβαιωθεί μεταξύ άλλων και από τους Zhang et al. (1995) και Newman (1993) ότι το άνω όριο της αντοχής του ΕΣ ελέγχεται πρωτίστως από την αντοχή του ΕΑ.

Η διαφορά μεταξύ της δυνατότητας παραλαβής τάσης του ΕΑ και της αποκτούμενης αντοχής του ΕΣ αυξάνεται όσο μειώνεται η αντοχή του ΕΑ. Η επιρροή της χρήσης χαμηλής αντοχής ΕΑ, όπως η κίσηρη, σε ΕΣ μέσης αντοχής συνεπώς εξαρτάται από την ικανότητα του τσιμεντοπολτού να προσελκύει μεγαλύτερη τάση λόγω του μεγαλύτερου μέτρου ελαστικότητάς του και να μπορεί να την αναλάβει χωρίς να αστοχήσει. Σε ΕΑ υψηλής αντοχής οι αντοχές και τα μέτρα ελαστικότητας των ΕΑ και τσιμεντοπολτού είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, άρα η συμπεριφορά του υλικού προσεγγίζει την ομοιογενή σε σχέση με το ΕΣ χαμηλής αντοχής.



Σχήμα 2.5: Σχέση μεταξύ μετρούμενης αντοχής των σωματιδίων του ΕΑ και υπολογιζόμενη τάση στην αστοχία ενός ΕΣ με ΕΑ διογκωμένη άργιλο (expanded clay) (EuroLightCon, 1998 και Smeplass, 1977)

Στην περίπτωση, όμως, ΕΣ με αυξημένες θλιπτικές αντοχές άνω των 40 Μpa και αδρανή με μικρές αντοχές, όσον αφορά τη σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης του ΕΣ, έχει παρατηρηθεί απότομη πτώση του φορτίου μετά το μέγιστο φορτίο. Σε ΕΣ με μικρότερες αντοχές αυτή η συμπεριφορά είναι λιγότερο εμφανής. Οι Slate et al. (1986) επιχείρησαν να εξηγήσουν αυτό το φαινόμενο. Οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι λόγω της διαφοράς αντοχών του τσιμεντοπολτού σε σχέση με το αδρανές, υπάρχει υψηλή συγκέντρωση τάσεων στο άνω και κάτω μέρος αυτού, με αποτέλεσμα την δημιουργία κατακόρυφων ρωγμών. Καθώς το

φορτίο αυξάνεται οι ρωγμές διαδίδονται σε μήκος και σχηματίζουν επίπεδα αστοχίας που οδηγούν στην απότομη κατάρρευση υπό το εξωτερικό φορτίο. Η αστοχία δεν είναι τόσο στιγμιαία καθώς υπάρχει μια σχετική ανακατανομή των τάσεων μεταξύ του τσιμεντοπολτού και των αδρανών.

Οι Zhang και Gjorv (1991) εξήγησαν αυτήν την απότομη πτώση του φορτίου λόγω της διαφοράς απορρόφησης ενέργειας μεταξύ ΕΣ και ΣΠΣ. Στο ΣΠΣ η υψηλότερη αντοχή των αδρανών σε σύγκριση με τον τσιμεντοπολτό η εξέλιξη των ρωγμών, καθώς διαδίδεται όταν συναντάει το αδρανές ανακόπτεται και σχηματίζει μαιάνδρους για την αποφυγή του. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας απ' ό τι στα ΕΣ όπου η διάδοση των ρωγμών διαπερνάει το αδρανές με αποτέλεσμα την πιο απότομη κατάρρευση των δοκιμίων.

Το ΕΣ χαρακτηρίζεται από ταχύτερη ανάπτυξη αντοχής στο αρχικό στάδιο σκλήρυνσης, φτάνοντας συνήθως στο 80% του f_{28} την 7^η ημέρα. Από την 28^η μέρα μέχρι την 90^η, η αύξηση της αντοχής είναι γενικά μικρή και μειώνεται όσο η χαρακτηριστική αντοχή (f_{ck}) αυξάνεται. Αυτό φαίνεται να είναι συνέπεια του περιορισμού του άνω ορίου της αντοχής λόγω του ΕΑ (Smeplass, 1977)

Η έλλειψη της μακροχρόνιας αύξησης της αντοχής του ΕΣ συνεπάγεται την μειωμένη ανάπτυξη επικουρικής αντοχής συγκριτικά με το ΣΠΣ σχεδιασμένο για την ίδια καταπόνηση. Έτσι, όταν ο σχεδιασμός γίνεται με πλήρη εκμετάλλευση της αντοχής του ΕΣ, με στόχο τη βέλτιστη αναλογία αντοχής/πυκνότητας, υπάρχουν πιθανές αρνητικές επιπτώσεις που σπάνια λαμβάνονται υπόψη (EuroLightCon, 1988)

Στους περισσότερους κανονισμούς όπως και στον EC2 δεν ορίζεται συσχέτιση μεταξύ πυκνότητας και θλιπτικής αντοχής (f_{ck}). Σε μερικούς κανονισμούς όμως ορίζονται όρια της θλιπτικής αντοχής, είτε ως συνάρτηση της πυκνότητας είτε ως άνω όρια γενικά για χρήση ΕΑ. Για παράδειγμα, ο EC2 περιορίζει τη f_{ck} στα 80 MPa ενώ ο νορβηγικός κανονισμός στα 85 MPa με επιπλέον τον εξής περιορισμό (Thorenfeldt, 1995)

$$f_{ck} \leq 94 * \left(\frac{\rho}{2200}\right)^{1,5} \quad (2.1)$$

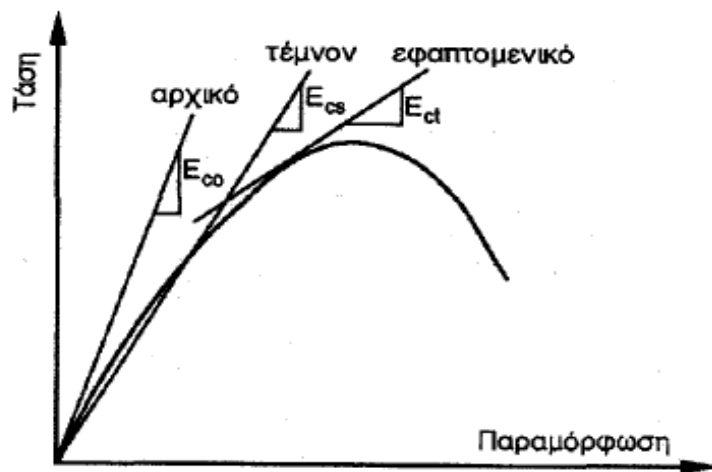
Σημειώνεται ότι για το ΕΣ δεν ισχύουν οι συνήθεις κατηγορίες θλιπτικής αντοχής αλλά οι τροποποιημένες, σύμφωνα με το EN 206.

Πίνακας 2.1: Κατηγορίες θλιπτικής αντοχής ελαφροσκυροδεμάτων σύμφωνα με το πρότυπο EN 206

Strength class	$f_{ck,cyl}$ N/mm ²	$f_{ck,cube}$ N/mm ²
LC8/9	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC40/44	40	44
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC55/60	55	60
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

2.2.3 Μέτρο Ελαστικότητας

Το σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από ελαστική και ανελαστική συμπεριφορά λόγω εξωτερικών φορτίων, καθώς επίσης και από παραμορφώσεις που οφείλονται στα φαινόμενα της συστολής λόγω ξήρανσης, των συστολο-διαστολών λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών και του ερπυσμού (και κατ' επέκταση της χαλάρωσης). Η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων για το σκυρόδεμα εξηγεί τους λόγους που οδηγούν σε ρηγμάτωση, αποτέλεσμα της οποίας είναι η μη γραμμικότητα της σχέσης σ - ϵ και κατ' επέκταση η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας με τη φόρτιση. Στην τυπική καμπύλη του Σχ.2.6 δίνονται τρεις τρόποι ορισμού του μέτρου ελαστικότητας. Το αρχικό μέτρο ελαστικότητας, E_{co} , δίνεται από την κλίση της καμπύλης στην αρχή των αξόνων, το εφαπτομενικό (ή στιγμιαίο) μέτρο ελαστικότητας, E_{ct} , δίνεται από την κλίση της εφαπτομένης της καμπύλης στο σημείο που αναφερόμαστε, και το επιβατικό (ή τέμνον) μέτρο ελαστικότητας, E_{cs} , δίνεται από την κλίση του ευθύγραμμου τμήματος που ενώνει την αρχή των αξόνων με το σημείο αναφοράς, που για το σκυρόδεμα είναι το σημείο όπου η τάση είναι ίση με 40% της μέγιστης. Εκτός από τα προαναφερθέντα, που υπολογίζονται βάσει στατικής φόρτισης δοκιμίων, υπάρχει και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, E_{cd} , που είναι περίπου ίσο με το αρχικό μέτρο ελαστικότητας και μετράται μέσω δοκιμής με υπέρηχους.

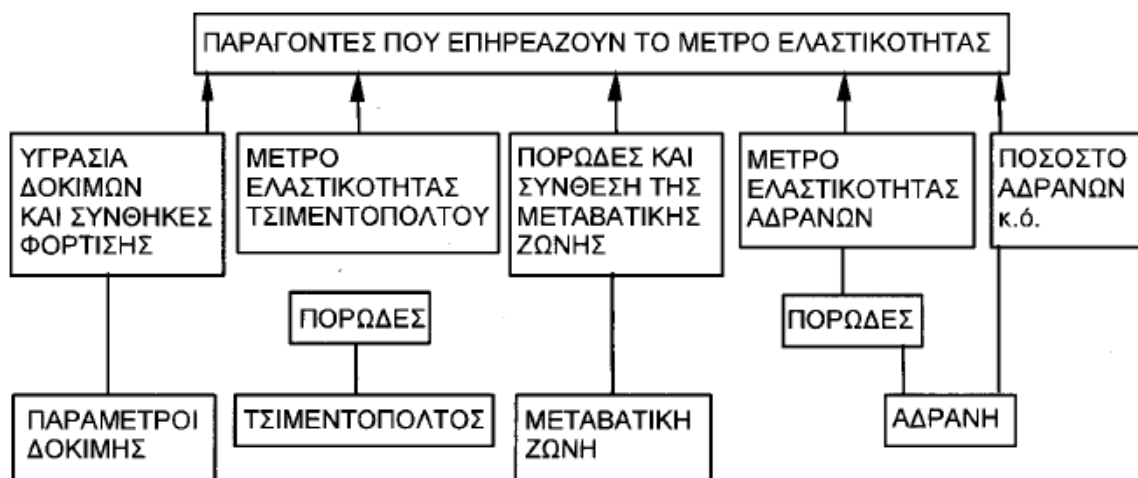


Σχήμα 2.6: Ορισμός μέτρων ελαστικότητας για το σκυροδέμα

Πέραν του ότι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος μπορεί να μετρηθεί πειραματικά βάσει τυποποιημένων δοκιμών (π.χ. ASTM C469-83), στην πράξη ενδιαφέρει περισσότερο η συσχέτιση του με τη θλιπτική αντοχή (και, σύμφωνα με τον Αμερικάνικο Κανονισμό, με την πυκνότητά του).

2.2.3.1 Παράγοντες που Επηρεάζουν το Μέτρο Ελαστικότητας

Ενώ στα ομοιογενή υλικά υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ μέτρου ελαστικότητας και πυκνότητας, στο σκυροδέμα, που είναι ανομοιογενές και πολυφασικό, το μέτρο ελαστικότητας καθορίζεται από το ποσοστό κατ' όγκο, την πυκνότητα και το μέτρο ελαστικότητας των κυρίων συστατικών του (αδρανή, τσιμεντοπολτός), καθώς και από τα χαρακτηριστικά της μεταβατικής ζώνης. Τέλος σχετίζεται με τον τρόπο πειραματικού ελέγχου. Οι διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν το μέτρο ελαστικότητας δίνονται στο Σχ.2.7 και εξηγούνται παρακάτω.



Σχήμα 2.7: Διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος

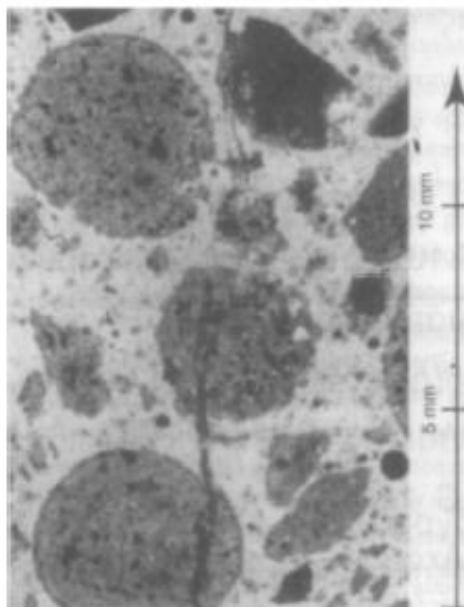
Αδρανή. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό των αδρανών, ιδιαίτερα των χονδρών, που επηρεάζει άμεσα το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος είναι το πορώδες, αφού αυτό καθορίζει το μέτρο ελαστικότητάς τους και κατ' επέκταση την ικανότητά τους να περιορίζουν τις παραμορφώσεις του τσιμεντοπολλτού. Για τα κοινά σκυροδέματα με ασβεστολιθικά αδρανή, το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών (που κυμαίνεται γύρω στα 25-85 GPa) ξεπερνά κατά πολύ αυτό του τσιμεντοπολλτού (περίπου 5-10 GPa), οπότε και οι τάσεις στα αδρανή είναι μεγαλύτερες, δηλαδή η "ροή" του φορτίου γίνεται κυρίως μέσα από αυτά. Το αντίθετο συμβαίνει στα σκυροδέματα με ελαφρά αδρανή, των οποίων το μέτρο ελαστικότητας είναι συνήθως μικρότερο από αυτό του τσιμεντοπολλτού. Άλλα χαρακτηριστικά επίσης, όπως το μέγεθος του μέγιστου κόκκου, το σχήμα, η επιφανειακή υφή, η κοκκομετρική διαβάθμιση και η ορυκτολογική σύσταση επηρεάζουν τη μικρορηγμάτωση στη μεταβατική ζώνη, και επομένως καθορίζουν και τη μορφή της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων.

Τσιμεντοπολλτός. Το μέτρο ελαστικότητας του ενυδατωμένου τσιμεντοπολλτού καθορίζεται από το πορώδες του, και επομένως οι παράγοντες που σχετίζονται με αυτό, όπως ο λόγος N/T, η περιεκτικότητα σε αέρα, η ύπαρξη ορυκτών πρόσθετων και ο βαθμός ενυδάτωσης επηρεάζουν άμεσα το μέτρο ελαστικότητας.

Μεταβατική ζώνη. Σημαντικό ρόλο στη μορφή της καμπύλης σ-ε παίζουν τα διάφορα κενά, οι μικρορωγμές και η ύπαρξη προσανατολισμένων κρυστάλλων υδροξειδίου του ασβεστίου, που απαντώνται συχνά στη μεταβατική ζώνη.

Παράμετροι πειραματικού ελέγχου. Είναι ενδιαφέρον ότι δοκίμια σκυροδέματος σε υγρή κατάσταση εμφανίζουν αύξηση του μέτρου ελαστικότητας έναντι όμοιων δοκιμίων σε ξηρή κατάσταση που είναι της τάξης του 15%, ενώ ακριβώς το αντίθετο συμβαίνει με την αντοχή. Αυτό μάλλον οφείλεται στο ότι το προσροφώμενο από τους κρυστάλλους C-S-H νερό έχει την ικανότητα μεταφοράς φορτίων και επομένως συνεισφέρει στην αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, ενώ παράλληλα προκαλεί πιέσεις διαχωρισμού των C-S-H που μειώνουν τις ελκτικές δυνάμεις van der Waals, άρα και την αντοχή. Ακόμα, η κλίση σε κάθε σημείο της καμπύλης σ-ε, που είναι αντιστρόφως ανάλογη του βαθμού ρηγμάτωσης, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα φόρτισης. Εξαιρετικά μεγάλες ταχύτητες φόρτισης προκαλούν την ανάπτυξη πολύ μικρών παραμορφώσεων κατά την αστοχία, δίνοντας έτσι μεγάλο μέτρο ελαστικότητας. Αντίθετα, στις μικρές ταχύτητες φόρτισης οι παραμορφώσεις αυξάνονται λόγω ερπυσμού, μειώνοντας έτσι το μέτρο ελαστικότητας. Σε σύγκριση με το κοινό σκυροδέμα ίδιας αντοχής, το σκυροδέμα με ελαφρά αδρανή έχει 25-50% περίπου μικρότερο μέτρο ελαστικότητας, 15-25% περίπου μικρότερη διατμητική αντοχή, κατά 20-50% περίπου μειωμένη συνάφεια με ράβδους οπλισμού και 50% περίπου μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή. Ακόμα, γενικό χαρακτηριστικό της αστοχίας του σκυροδέματος με ελαφρά αδρανή είναι ο

σχηματισμός επιφανειών θραύσης που διαπερνούν συνήθως τα αδρανή, τα οποία είναι μικρότερης αντοχής από τα συνηθισμένα (Εικ.2.1). Γι' αυτό και γενικά το ελαφροσκυρόδεμα είναι πιο ψαθυρό υλικό από το κοινό (η σχέση θλιπτικής τάσης-παραμόρφωσης είναι περισσότερο γραμμική πριν τη μέγιστη τιμή της τάσης)



Εικόνα 2.1: Ρηγάτωση σκυροδέματος με ελαφρά αδρανή: η ρωγή διαπερνά τα αδρανή.

Πίνακας 2.2: Τυπικές ιδιότητες σκυροδεμάτων με ελαφρά αδρανή

Αδρανή (Σκυρόδεμα)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Αντοχή σε θλίψη (MPa)	Συντ. θερμ. αγωγιμότη. (W/mK)	Συντ. θερμ. διαστολής (x 10 ⁻⁶ /°C)	Συστολή ξήρανσης (x 10 ⁻³)	Μέτρο ελαστικ. (GPa)
Κίσηρη (Κίσηροδέμα)	600-1500	5-25	0.1-0.7	9-13	0.5-2	2-15
Περλίτης (Περλιτομπετόν)	300-1400	1-12	0.05-0.3	7-11	0.5-2	0.5-5
Διογκ. σκωρία (Σκωριοκίσηρο-μπετόν)	900-1800	8-20	0.2-1	7-11	0.4-1.5	4-15
Διογκ. άργιλος (Σπογγοκεραμομπετόν)	500-1900	5-25	0.1-1	7-10	0.3-1	2-20
Διογκωμένος σχιστόλιθος	800-1900	7-60	0.2-1	6-9	0.2-1	5-25
Ξύλο (Ξυλομπετόν)	600-1200	1-12	0.15-0.5	6-13	2-5	1-10

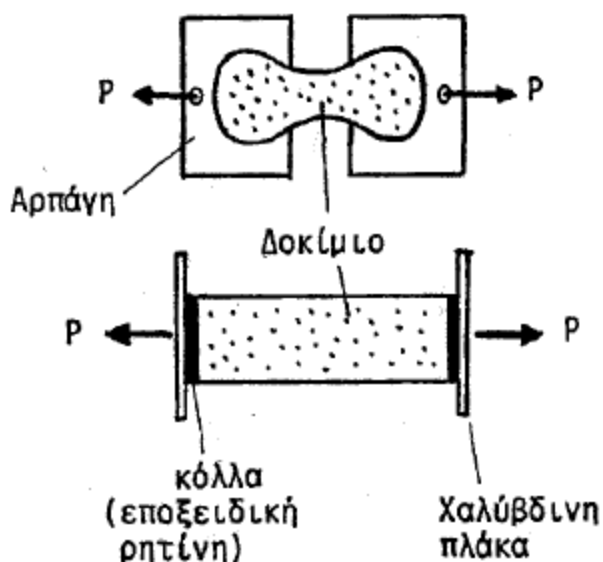
Όσον αφορά το κίσηροδέμα, επειδή το μέτρο ελαστικότητας της κίσηρης είναι σημαντικά μειωμένο συγκριτικά με το μέτρο των συνηθών αδρανών, το μέτρο ελαστικότητας του κίσηροδέματος θα είναι μικρότερο. Δηλαδή, σε ΚΔ με μεγαλύτερες αντοχές, καθώς θα έχει χρησιμοποιηθεί περισσότερο τσιμέντο, η επιρροή του μέτρου της κίσηρης στο μέτρο του ΚΔ θα είναι μειωμένη συγκριτικά με ένα ΚΔ πιο χαμηλής αντοχής. Η σχέση τάσης – παραμόρφωσης στο ΚΔ γενικά χαρακτηρίζεται από ένα πιο γραμμικό ανοδικό τμήμα με απότομο καθοδικό κλάδο, σε σχέση με το ΣΠΣ. Η γραμμικότητα του ανοδικού κλάδου εξηγείται ως εξής: Στο ΣΠΣ στο το εύρος των μικρορηγματώσεων αυτών είναι μεγάλο λόγω της μεγαλύτερης ασυμβατότητας των επιμέρους μέτρων ελαστικότητας των αδρανών και του τσιμεντοπολτού, με συνέπεια να καταναλώνεται ελαστική ενέργεια και το διάγραμμα να αποκλίνει από τη γραμμικότητα. Αντίθετα, στο ΚΔ που δεν υπάρχει η τόσο μεγάλη

ασυμβατότητα μεταξύ του τσιμεντοπολλτού και της κίσηρης, δεν αναπτύσσεται στον ίδιο βαθμό η μικρορηγμάτωση (που προϋπάρχει, όπως και στο ΣΠΣ, λόγω της συστολής του νωπού σκυροδέματος) (Newman, 1993 και EuroLightCon, 1998).

2.2.4 Εφελκυστική Αντοχή

Η αστοχία δοκιμίων σκυροδέματος σε μονοαξονικό εφελκυσμό οφείλεται στην επέκταση ρωγμών κάθετα στη διεύθυνση της φόρτισης. Τέτοιες ρωγμές μειώνουν τη διατομή των δοκιμίων και επιφέρουν συγκεντρώσεις τάσεων. Τελικά η αστοχία του υλικού προκαλείται λόγω της απότομης επέκτασης λίγων σχετικά ρωγμών, έτσι ώστε να είναι αρκετά δύσκολο να καταγραφεί πειραματικά το τμήμα της καμπύλης τάσης- παραμόρφωσης μετά τη μέγιστη τάση. Ο λόγος εφελκυστικής προς θλιπτική αντοχή για το σκυρόδεμα είναι μόλις 0.07-0.13, κάτι που οδηγεί στο να θεωρείται συνήθως η εφελκυστική αντοχή πρακτικά ίση με μηδέν. Μερικές φορές όμως μία εκτίμηση του μεγέθους της είναι απαραίτητη, όπως π.χ. για τον υπολογισμό των φορτίων που προκαλούν ρηγμάτωση.

Η άμεση μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος είναι αρκετά περίπλοκη, γιατί απαιτεί ή τη χρήση ειδικών δοκιμίων με αρπάγες εφελκυσμού ή την επικόλληση πρισματικών δοκιμίων σε μεταλλικές πλάκες εφαρμογής του φορτίου (Σχ.2.8), αλλά και συχνά μη ακριβής, λόγω της ανάπτυξης δευτερευουσών τάσεων.



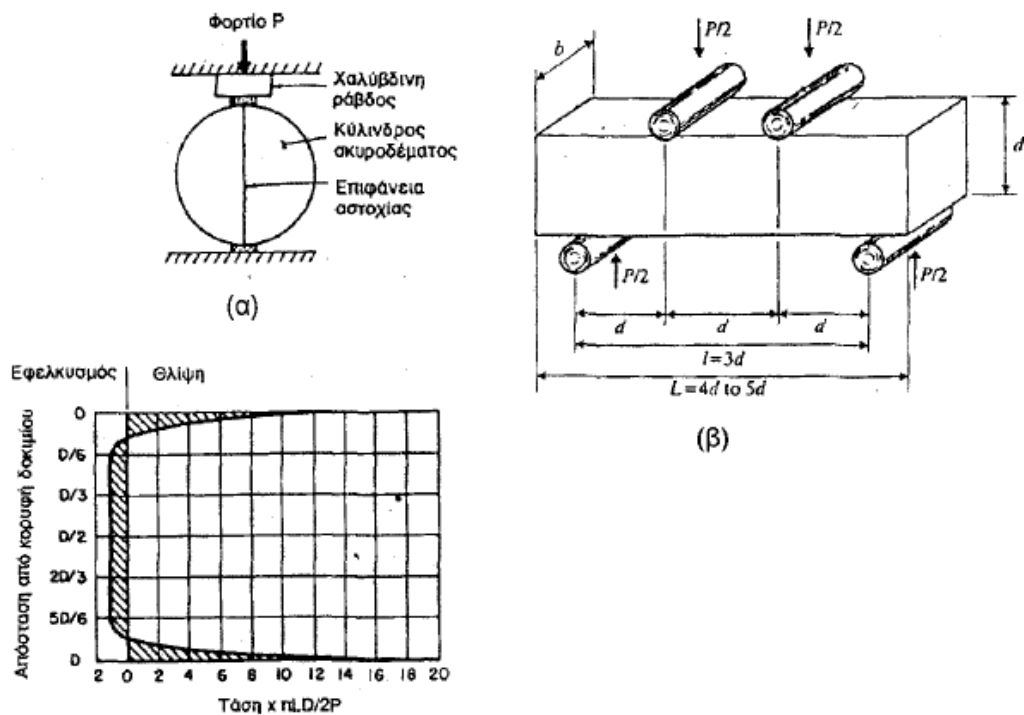
Σχήμα 2.8: Πειραματικές διατάξεις άμεσων πειραματικών ελέγχων εφελκυστικής αντοχής

Η πλέον συνηθισμένη δοκιμή της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό (η διεξαγωγή της οποίας γίνεται κατά EN 12390-6) είναι αυτή του έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη (λέγεται

και "Βραζιλιάνικη δοκιμή"), κατά την οποία κυλινδρικό δοκίμιο υποβάλλεται σε θλίψη υπό ομοιόμορφα καταναμημένες δυνάμεις P κατά μήκος δύο αντιδιαμετρικών γενέτειρων της παράπλευρης επιφάνειας (Σχ.2.9α). Αποτέλεσμα των δυνάμεων αυτών είναι η ανάπτυξη ομοιόμορφα καταναμημένων εφελκυστικών τάσεων κάθετα στο επίπεδο που ορίζεται από τις δύο γενέτειρες, μεγέθους:

$$\sigma_h = \frac{2P}{\pi LD}$$

Η τιμή της τάσης σ_h στη μέγιστη δύναμη P, δηλαδή κατά την αστοχία του δοκιμίου (με κύριο χαρακτηριστικό τη διάρρηξη του κυλίνδρου σε δύο τμήματα, (Σχ. 2.9α), ονομάζεται αντοχή σε εφελκυσμό από διάρρηξη, f_{ctsp} . Συγκριτικά με τη δοκιμή άμεσου εφελκυσμού, η δοκιμή διάρρηξης υπερεκτιμά την εφελκυστική αντοχή κατά 10-15%.



Σχήμα 2.9: Έμμεσες δοκιμές εφελκυσμού (α) από διάρρηξη (όπου δίνεται και η κατανομή των τάσεων στην επιφάνεια αστοχίας), και (β) από κάμψη.

Μία άλλη εύκολη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού είναι η δοκιμή πρισμάτων 150x150x600 ή 750 mm, που υποβάλλονται σε κάμψη ως αμφιέριστες δοκοί ανοίγματος 450 mm με φορτίο στη μέση ή δύο φορτία στα τρίτα του ανοίγματος (Σχ.2.9β). Η δοκιμή αυτή περιγράφεται λεπτομερώς στο Πρότυπο ΕΛΟΤ-739. Η μέγιστη εφελκυστική τάση σ_{max} κατά τη θραύση του δοκιμίου ("μέτρο θραύσης" ή "αντοχή σε εφελκυσμό από κάμψη") δίνεται ως:

$$\sigma_{max} = \frac{6 M_{max}}{b h^2}$$

όπου M_{max} είναι η ροπή θραύσης του δοκιμίου, ενώ b και h είναι το πλάτος και ύψος του δοκιμίου, αντίστοιχα. Η παραπάνω εξίσωση υποθέτει γραμμική κατανομή των τάσεων καθ' ύψος της διατομής, κάτι που δεν είναι απόλυτα σωστό λόγω της μη-γραμμικότητας της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων του σκυροδέματος και επειδή οι διαστάσεις του δοκιμίου δεν δικαιολογούν την εφαρμογή της τεχνικής θεωρίας κάμψης (στην οποία στηρίζεται η παραπάνω εξίσωση). Επιπλέον, η μέγιστη εφελκυστική τάση αναπτύσσεται μόνο στην ακραία ίνα του δοκιμίου και όχι σε όλα τα σημεία της διατομής (όπως στην περίπτωση άμεσου εφελκυσμού, οπότε και η πιθανότητα ύπαρξης περιοχών αδυναμίας είναι μεγαλύτερη), γι' αυτό και η έμμεση εφελκυστική αντοχή από κάμψη είναι μεγαλύτερη αυτής από άμεσο εφελκυσμό κατά 50-100%. Τέλος σημειώνεται ότι η διασπορά των εφελκυστικών αντοχών ως προς τη μέση τιμή είναι σχετικά μεγάλη, ενώ το 90% των τιμών της εφελκυστικής αντοχής κυμαίνεται μεταξύ 0.7 f_{ctm} και 1.3 f_{ctm}

2.2.4.1 Δοκιμές Εφελκυστικής και Καμπτικής Αντοχής

Για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής και την καμπτικής αντοχής χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις διατάξεις που αναφέρθηκαν και προηγούμενος:

- Κάμψη τριών σημείων (καμπτική εφελκυστική αντοχή)
- Κάμψη τεσσάρων σημείων (καμπτική εφελκυστική αντοχή)
- Δοκιμή σε διάρρηξη

Η εφελκυστική αντοχή του ΚΔ είναι σημαντική όταν μελετάμε την ρηγμάτωση. Οι κύριες διαφορές μεταξύ ΚΔ και ΣΠΣ είναι οι εξής:

1. Τροχιά ρωγμών: αυτές διέρχονται μέσα από τα σωματίδια της κίσσης και όχι περιμετρικά της, όπως στο ΣΠΣ.
2. Συνολικό περιεχόμενο νερό: Αυτό είναι συνήθως περισσότερο στο ΚΔ, επομένως η διαφορά υγρασίας μεταξύ του εσωτερικού του ΚΔ και της επιφάνειάς του κατά την περίοδο της συντήρησης θα προκαλέσει σημαντική μείωση της εφελκυστικής αντοχής.
3. Η καμπτική εφελκυστική αντοχή επηρεάζεται περισσότερο από την αντοχή σε διάρρηξη (Newman, 1993).

Σημειώνεται όμως ότι για υψηλής αντοχής (τάξεως 80 MPa) ΤΣΠΣ¹ η αντοχή σε διάρρηξη εμφανίζεται αυξημένη κατά 11% σε σύγκριση με το ΣΠΣ. Αυτό αποδίδεται στην βελτιωμένη επιφανειακή ζώνη αδρανών – τσιμεντοπολτού. Η αύξηση είναι ακόμα μεγαλύτερη στην άμεση εφελκυστική αντοχή (36%) σε αντίθεση με το τι είναι σύνηθες στους περισσότερους κανονισμούς για το ΕΣ (Hoff, 1995). Σε ΕΣ γενικότερα έχει παρατηρηθεί ότι η καμπτική εφελκυστική αντοχή και αντοχή σε διάρρηξη εμφανίζονται μικρότερες από το ΣΠΣ της ίδιας θλιπτικής αντοχής. Η ίδια τάση, που έχει υιοθετηθεί και από τον EC2, αναμένεται και στο ΚΔ.

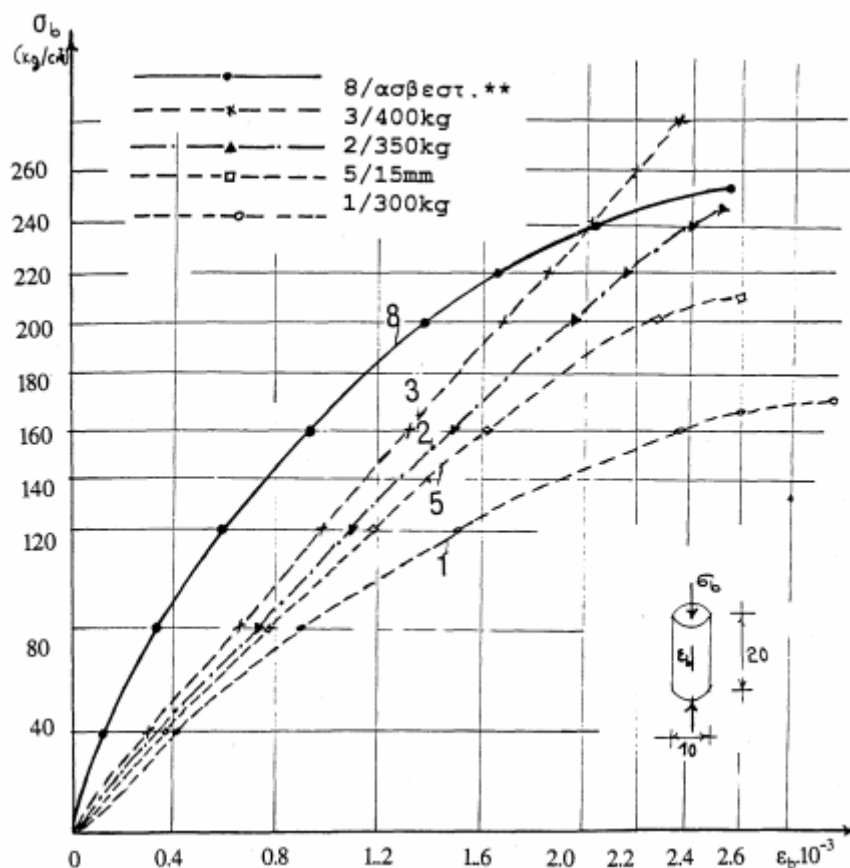
2.2.5 Υπάρχουσες πειραματικές εργασίες

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται πειραματικές εργασίες στις οποίες αναπτύχθηκαν και δοκιμάστηκαν ΕΣ με αδρανές την κίσηρη ή συνδυασμός αυτής με άλλα ελαφρά αδρανή, παραθέτοντας και τα σημαντικότερα αποτελέσματα σχετικά με τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά. Η Μπάκα (1981) ανέπτυξε κίσηροδεμα το οποίο είχε μέγιστο κόκκο αδρανούς 7 mm, με κίσηρη προερχόμενη από το Γυαλί. Σε αυτό πραγματοποίησε μια σειρά ελέγχων και πειραμάτων, μέσω των αποτελεσμάτων των οποίων κατέληξε στα εξής:

Το ΚΔ ανέπτυξε αντοχές μέχρι περίπου 35 MPa με πυκνότητα 1500 kg/m³ και κατανάλωση τσιμέντου περίπου 400 kg/m³. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας προέκυψε 0.50 kcal/mhc^o ενώ του ΣΠΣ με ασβεστολιθικά αδρανή βρίσκεται περίπου στην τιμή 1.40 kcal/mhc^o. Το μέτρο ελαστικότητας εκτιμήθηκε ίσο με 11 GPa με μέγιστη παραμόρφωση της τάξης του 2.2 %. Σε ελέγχους συνάφειας, φάνηκε ότι η συνάφεια χάλυβα και ΚΔ είναι εξίσου καλή με την αντίστοιχη στο ΣΠΣ.

Συγκριτικά με ΣΠΣ και ίδια κατανάλωση τσιμέντου, ίση με 350 kg/m³, η θλιπτική αντοχή του ΚΔ ήταν κατά 10% μειωμένη, με τη διαφορά αυτή να αναμένεται αυξημένη σε περίπτωση αύξησης της κατανάλωσης του τσιμέντου. Η εφελκυστική αντοχή εμφανίζεται μειωμένη στο ΚΔ. Το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων προσέγγιζε τη γραμμικότητα όσο αυξανόταν η κατανάλωση τσιμέντου στη σύνθεση.

¹ ΤΣΠΣ: MNDC - τροποποιημένο συνήθους πυκνότητας σκυρόδεμα - Modified Normal Density Concrete, σκυρόδεμα με αδρανή συνήθους πυκνότητας τα οποία έχουν τμηματικά αντικατασταθεί από ΕΑ.



Σχήμα 2.10: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων κισηροδέματος [Μπάκα, 1981]

Στην εργασία της Τασούλα (2013) αναπτύχθηκαν 12 συνθέσεις ΚΔ με τις οποίες επιτεύχθηκαν θλιπτικές αντοχές από 25 ως 36 MPa και με πυκνότητες από 1460 ως 1640 kg/m³ αντίστοιχα. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής πραγματοποιήθηκαν πειραματικοί έλεγχοι για τον χαρακτηρισμό του ΚΔ, από τα οποία εξήχθησαν τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας 2.3: Ζεύγη πυκνότητας – αντοχής των συνθέσεων κισηροδέματος [Τασούλα, 2013]

Σύνθεση	Μοναδιαίο βάρος (kg/m ³)	Μέση θλιπτική αντοχή f _{cm} (MPa)
Δ1-2	1643,125	36.4
Δ2-2	1630,625	32.4
Δ3-2	1556,875	26.5
Δ4-2	1459,125	22.8
Δ5-2	1476,125	25.2
Δ6-2	1460,875	28

Η μέση εφελκυστική αντοχή διάρρηξης εκτιμήθηκε ίση με 2.4 MPa, χωρίς σημαντικές διαφοροποιήσεις των τιμών των 28 και 90 ημερών. Ακόμα, το μέτρο ελαστικότητας εκτιμήθηκε ίσο με 14844 MPa, ενώ τα ζεύγη θλιπτικής αντοχής και πυκνότητας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Η θλιπτική αντοχή του ΚΔ αυξήθηκε κατά μέσο όρο κατά 14% από τις 28 στις 90 ημέρες και κατά 28% στις 180 ημέρες.

Πίνακας 2.4: Μελέτες σύνθεσης κισσηροδέματος [Τασούλα, 2013]

Δοκός	Σύνθεση	Ποσότητες Συστατικών Σύνθεσης (kg/m ³)				
		Τσιμέντο	Νερό		Κίσηρης (0-7 mm)	Ρευστοποιητής (Chemium 174)
			Ενεργός Λόγος N/T _w	Συνολικό Νερό		
Δ1	Δ1 - 1	350.00	0.42	131.84	1252.50	6.00
	Δ1 - 2	350.00	0.42	131.84	1252.50	8.00
Δ2	Δ2 - 1	350.00	0.42	141.26	1252.50	5.00
	Δ2 - 2	350.00	0.42	131.84	1252.50	7.00
Δ3	Δ3 - 1	350.00	0.42	258.50	1058.34	4.00
	Δ3 - 2	350.00	0.42	258.50	1058.34	4.00
Δ4	Δ4 - 1	350.00	0.42	258.50	1058.34	4.00
	Δ4 - 2	350.00	0.42	258.50	1058.34	4.00
Δ5	Δ5 - 1	350.00	0.42	266.66	738.00	4.00
	Δ5 - 2	350.00	0.42	243.80	738.00	3.00
Δ6	Δ6 - 1	350.00	0.42	243.80	1161.90	3.00
	Δ6 - 2	350.00	0.42	243.80	1161.90	3.00

Οι Α. Κιλίς, C. D. Atis, A. Teymen, O. Karahan και ο Kamuran Arı (2009) μελέτησαν την θλιπτική και καμπτική εφελκυστική αντοχή 5 διαφορετικών συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος χρησιμοποιώντας ως αδρανές κίσηρη (PLWC), σκωρία (SLWC) καθώς και σύνθετες συνθέσεις των δύο αυτών αδρανών (SPLWC). Επίσης, πραγματοποίησαν μία σύνθεση σκυροδέματος χρησιμοποιώντας ασβεστολιθικό αδρανές (NWC). Συγκεκριμένα, πραγματοποίησαν πειράματα σε κυλινδρικά δοκίμια με διάμετρο 15cm και ύψος 30 cm για τον προσδιορισμό της θλιπτικής τους αντοχής. Επίσης, για τον προσδιορισμό της καμπτικής εφελκυστικής αντοχής κατασκευάστηκαν πρισματικά δοκίμια με διαστάσεις 10 X 10 X 50 cm. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν μετά από 28 ημέρες συντήρησης των δοκιμίων σε εργαστηριακές συνθήκες.

Από το πειραματικό αυτό πρόγραμμα εξάχθηκαν τα εξής συμπεράσματα: Χρησιμοποιώντας 2 διαφορετικά αδρανή παράχθηκαν 5 διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος (Πίν.2.4) με ικανοποιητική αντοχή. Το αποτέλεσμα της έρευνας έδειξε ότι ο τύπος του αδρανούς επηρέασε

το βάρος, την θλιπτική και την καμπτική εφελκυστική αντοχή των ελαφροσκυροδεμάτων. Επιπλέον, απέδειξε ότι είναι πιθανόν να παραχθεί ελαφροσκυρόδεμα ικανοποιητικής αντοχής χρησιμοποιώντας κίσηρη και σκωρία ως ελαφρά αδρανή (Πίν.2.5). Επίσης, αποδείχθηκε ότι επιτυγχάνεται μείωση του βάρους του σκυροδέματος αλλά μειώνεται η αντοχή του.

Πίνακας 2.5: Συνθέσεις σκυροδέματος κατά προσέγγιση

Sieve size(mm)	SLWC	SPLWC-I	SPLWC-II	SPLWC-III	PLWC	NWC	Vol. (%)
8-16	285 (S)	260 (S)	260 (S)	241 (S)	141 (P)	382	24
4-8	240 (S)	238 (S)	235 (S)	96 (P)	103 (P)	330	20
2-4	175 (S)	160 (S)	95 (P)	76 (P)	79 (P)	238	14
0-2	590 (S)	305 (P)	305 (P)	310 (P)	292 (P)	791	42
Cement	450	450	450	450	450	450	-
Sil. Fume	50	50	50	50	50	50	-
Water	200	221	231	241	241	150	-
Sup. Plast.	20	20	20	20	20	20	-
W/B	0.40	0.44	0.46	0.48	0.48	0.30	-
Fresh unit weight	2010 ± 6	1704 ± 7	1646 ± 7	1484 ± 6	1376 ± 5	2411 ± 13	100

Πίνακας 2.6: Βασικές ιδιότητες σκυροδέματος μετά από 28 ημέρες

Concrete type	SLWC	SPLWC-I	SPLWC-II	SPLWC-III	PLWC	NWC
Dry unit weight (kg/m ³)	1997 ± 6	1696 ± 7	1638 ± 8	1477 ± 6	1368 ± 5	2388 ± 12
Compressive str. (MPa)	44.1 ± 4	30.5 ± 2	27.6 ± 2	23.3 ± 2	15.8 ± 1.5	58 ± 3
Flexural strength (MPa)	7.8 ± 2	7.2 ± 1	6.2 ± 1.5	5.8 ± 1	3.5 ± 1	8.4 ± 2

Οι Durmaz et al (2012) μελέτησαν την θλιπτική αντοχή διαφορετικών συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος χρησιμοποιώντας ως αδρανές 60% κίσηρη και 40% περλίτη. Χρησιμοποίησαν 2 διαφορετικούς τύπους τσιμέντου: τσιμέντο τύπου Portland (PC 32.5) και σύνθετο τσιμέντο τύπου Portland (PKC 32.5) σε διάφορες ποσότητες από 200-500Kg/m³ σκυροδέματος. Επίσης, σε κάθε σύνθεση χρησιμοποιήθηκε και πυριτική σκόνη σε αναλογία 10% της ποσότητας του τσιμέντου του μείγματος. Παράχθηκαν 84 κυβικά δοκίμια με διαστάσεις 15 X 15 X 15cm. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν μετά από 7 και 28 ημέρες παραμονής των δοκιμίων σε υγρή συντήρηση.

Από το πειραματικό αυτό πρόγραμμα εξάχθηκαν τα εξής συμπεράσματα: Είναι δυνατή η παρασκευή ΕΣ χρησιμοποιώντας ως αδρανή κίσηρη και περλίτη με ικανοποιητική αντοχή. Από την συγκεκριμένη έρευνα, επίσης, προέκυψε το συμπέρασμα ότι ο τύπος του αδρανούς επηρέασε το βάρος, την θλιπτική και την καμπτική εφελκυστική αντοχή των ΕΣ.

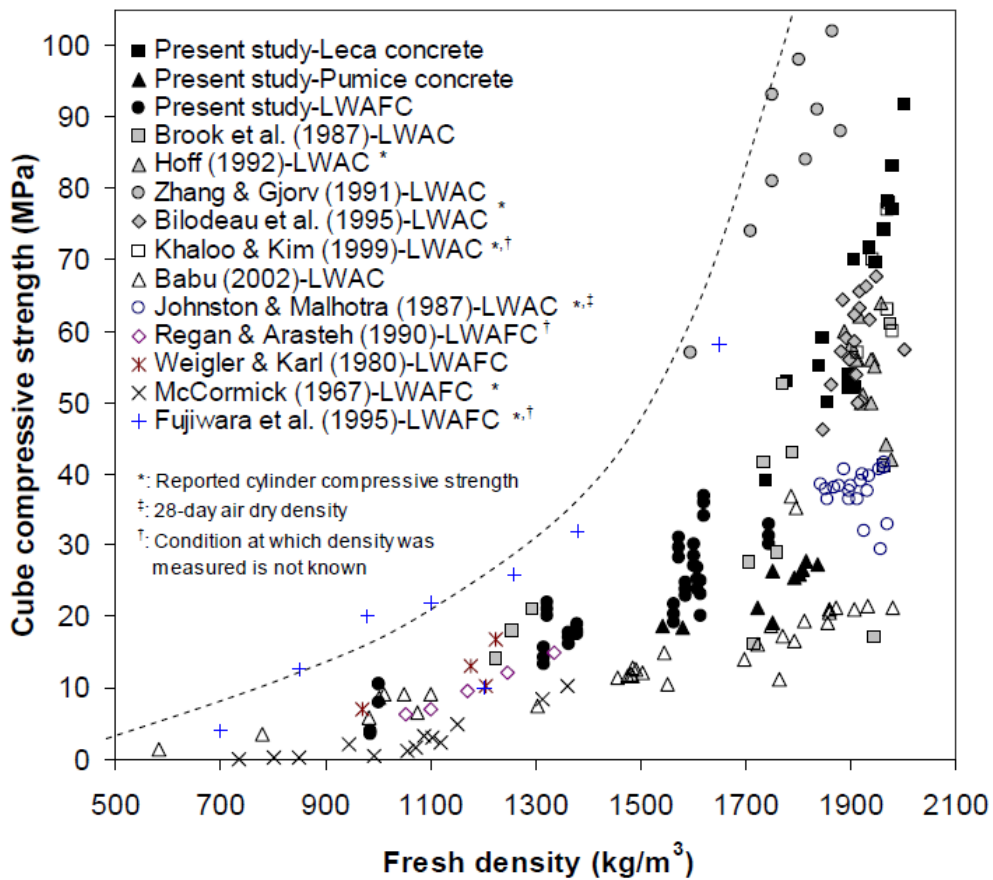
Πίνακας 2.7: Θλιπτική αντοχή δοκιμών από ΕΣ στις 7 και 28 ημέρες για διάφορες ποσότητες και τύπους τσιμέντου

Cement dosages	7 days compressives strength values (kgf/cm ²)		Cement dosages	28 days compressives strength values (kgf/cm ²)	
	Pk _ç 32.5	P _ç 32.5		Pk _ç 32.5	P _ç 32.5
200	11	10,35	200	15,45	17,6
200	12	13,15	200	16,2	18,25
200	14	11,25	200	16,5	18,95
250	14,15	12,35	250	16	23,75
250	13,6	12,65	250	15,25	23,8
250	13,25	13	250	15,65	24,1
300	22,6	12,6	300	29,65	33,35
300	22,95	13	300	30,85	35,65
300	23,5	13,5	300	32,65	36,25
350	26,84	14,2	350	33,2	45,96
350	26,3	15,35	350	35,2	45,35
350	28	15,9	350	32,5	43,25
400	37,73	16,18	400	63,38	76,15
400	40	17,2	400	65,35	76,5
400	41,25	17,5	400	66,4	77,8
450	47,85	22,05	450	73,56	103,4
450	49,6	24,85	450	74,55	105,3
450	50,25	25,2	450	71,35	107,2
500	59,3	30,31	500	89,7	130,85
500	60,1	31,25	500	88,6	134,3
500	61,25	33,65	500	87,5	132,5

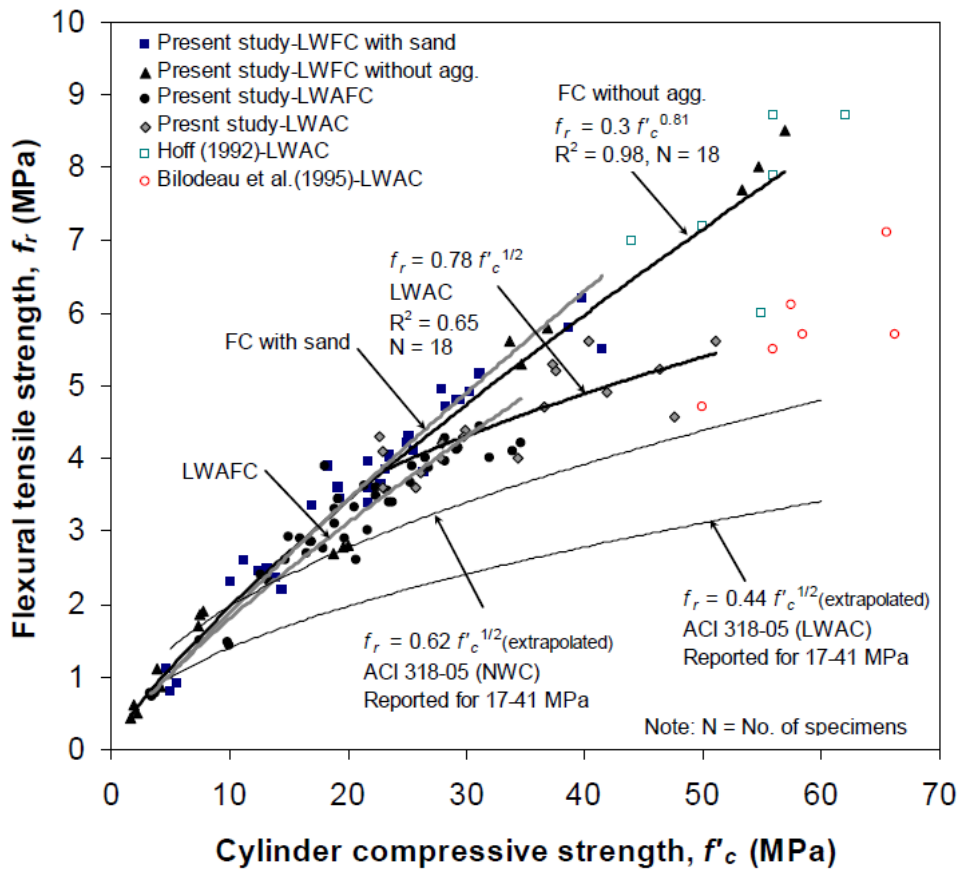
Ο SIN et al (2007) μελέτησε τα μηχανικά χαρακτηριστικά ΕΣ, όπου χρησιμοποίησε ως αδρανές Ieca και σε μερικές περιπτώσεις κίσηρης. Παράχθηκε ΕΣ με θλιπτική αντοχή που κυμαίνεται από 20-90 Μpa. Χρησιμοποιήθηκαν α) 53 συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος β) 19 συνθέσεις από αφροσκυρόδεμα και γ) 12 συνθέσεις από αφροσκυρόδεμα με ελαφρά αδρανή. Οι πυκνότητες των αδρανών κυμαίνονται μεταξύ 500 και 900 kg/m³. Χρησιμοποιήθηκε επίσης σύνηθες τσιμέντο τύπου Portland καθώς και άμμος ως αδρανές με πυκνότητα 2650 kg/m³. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τον προσδιορισμό Από αυτό το πειραματικό μέρος εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα: Παράχθηκε ΕΣ με μέγιστη θλιπτική αντοχή 90 Μpa και πυκνότητα 2000 kg/m³. Για αφροσκυρόδεμα με ή χωρίς αδρανή οι μέγιστες αντοχές ήταν περίπου 40 και 60 Μpa με πυκνότητες 1650 και 1600 kg/m³ αντίστοιχα. Οι μηχανικές ιδιότητες και η συσχέτιση αυτών με την υπάρχουσα βιβλιογραφία παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 2.8: Φυσικές ιδιότητες των ελαφρών αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν

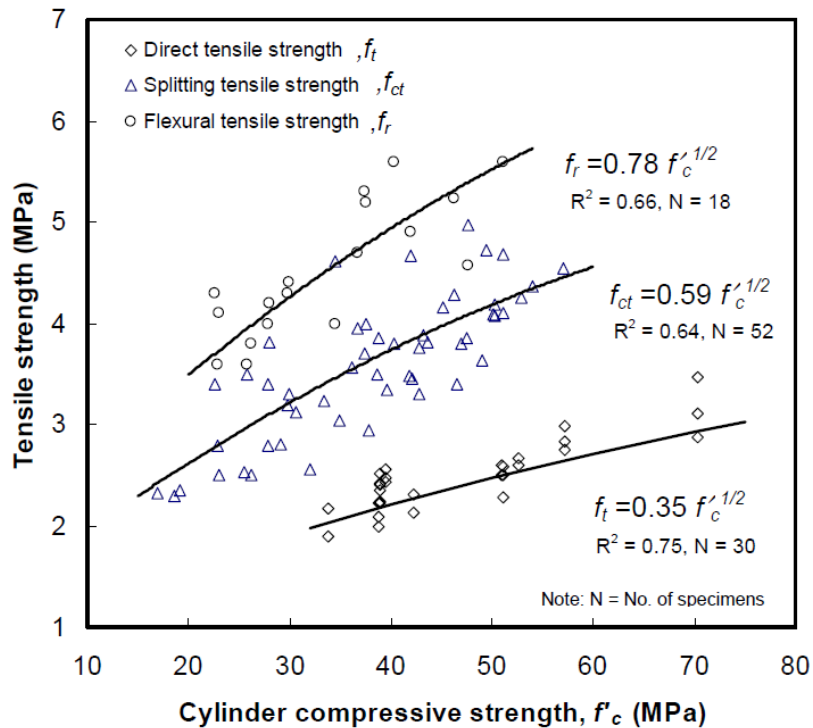
Lightweight aggregate	Bulk density (kg/m ³)	Particle density (kg/m ³)	Aggregate crushing value (%)	Porosity (%)
Leca 500	521	889	75.6	63.6
Leca 600	600	968	49.1	60.7
Leca 700	743	1147	38.6	53.1
Leca 800	806	1270	35.2	47.1
Leca 900	880	1396	32.2	44.4
Pumice	358	657	76.2	73.9
Liapor	853	1341	25.2	45.8



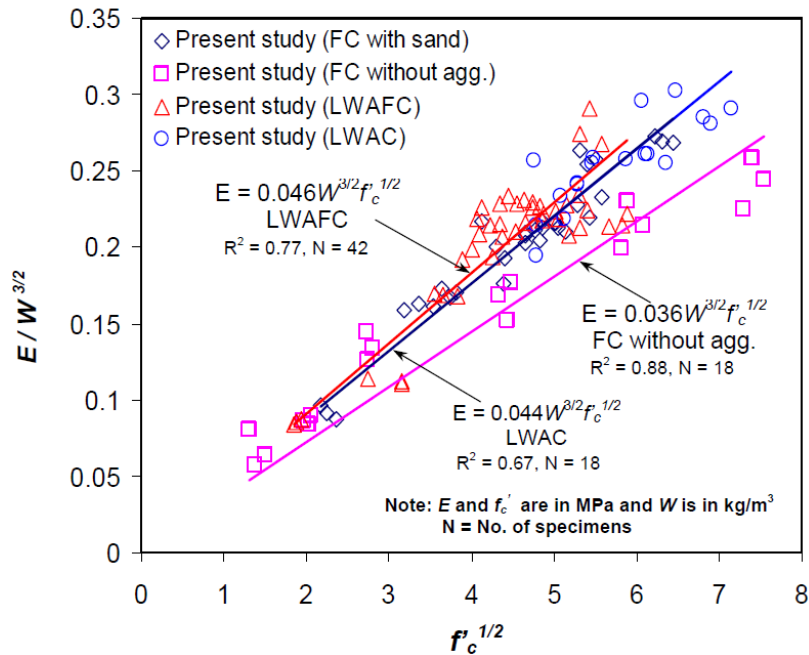
Σχήμα 2.11: Σχέση θλιπτικής αντοχής κύβου-πυκνότητας ΕΣ σύμφωνα με διάφορες μελέτες από την βιβλιογραφία



Σχήμα 2.12: Καμπτική εφελκυστική αντοχή διαφόρων τύπων ΕΣ



Σχήμα 2.13 Μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής σε σχέση με την θλιπτική αντοχή κύβου



Σχήμα 2.14: Σύγκριση μέτρου ελαστικότητας από διαφορετικά είδη ελαφροσκυροδέματος

2.3 Πειραματικές δοκιμές

2.3.1 Περιγραφή των δοκιμών

Τα δοκίμια τα οποία ελέγχθηκαν προέρχονται από ένα πλήθος μελετών σύνθεσης. Η κάθε μια αντιστοιχεί σε έναν εξαψήφιο αριθμό για λόγους συντομίας, ενώ όσες περιέχουν ένα συνοδεύονται από το γράμμα R πριν τον αριθμό τους. Στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος (ΕΟΣ) πραγματοποιήθηκαν πέντε σκυροδετήσεις, κάθε μια από τις οποίες έχει τη συντομογραφία ΣΚ1,2,3,4 ή 5.

- Η πρώτη σκυροδέτηση (ΣΚ1) πραγματοποιήθηκε στις 6/4/2015 και αντιστοιχεί στη μελέτη σύνθεσης 15538. Η παραγωγή του ΚΔ έγινε στις εγκαταστάσεις της LaFarge στη Ραφήνα και μεταφέρθηκε στο ΕΟΣ με ένα όχημα, όπου έγινε και η σκυροδέτηση. Στην ΣΚ1 σκυροδετήθηκαν 9 κύβοι διαστάσεων ακμής 100 mm, 9 κύλινδροι διαμέτρου 100 mm και μήκους 200 mm και 6 κύλινδροι διαμέτρου 150 mm και μήκους 300 mm.
- Η ΣΚ2 πραγματοποιήθηκε στις 21/4/2015 και αντιστοιχεί στη μελέτη σύνθεσης 15613. Η παραγωγή και μεταφορά συνέβησαν όπως και στη ΣΚ1. Από την συγκεκριμένη σκυροδέτηση ελήφθησαν 3 κυλινδρικά δοκίμια d100 x 200 mm και 6 κύβοι ακμής 100 mm.



Εικόνα 2.2: Σκυροδέτηση δοκιμίων στο χώρο του εργαστηρίου ΟΣ

- Ακολούθησαν άλλες δύο σκυροδετήσεις, οι ΣΚ3 και ΣΚ4, οι οποίες παράχθηκαν στο εργαστήριο ΟΣ στις ημερομηνίες 6/5/2015 και 11/5/2015. Από τις ΣΚ3 και ΣΚ4 λήφθηκαν 6 και 4 κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm αντίστοιχα.



Εικόνα 2.3: Δοκιμή κάθισης

- Επίσης, η ΣΚ5 πραγματοποιήθηκε στις 18/5/2015 στο εργαστήριο ΟΣ. Η παραγωγή και μεταφορά έγιναν όπως στις ΣΚ1 και ΣΚ2. Σκυροδετήθηκαν τα εξής στοιχεία: 6 κυβικά δοκίμια 100 mm και 3 κυλινδρικά δοκίμια d100 x 200 mm.

Όλα τα δοκίμια σκυροδετήθηκαν με τη χρήση μεταλλότυπων του εργαστηρίου ΟΣ, ο οποίος αφαιρούνταν δύο μέρες μετά τη σκυροδέτηση. Η συντήρηση μέχρι τις 28 ημέρες έγινε εντός δεξαμενής νερού και στη συνέχεια τα δοκίμια αποθηκεύτηκαν εντός του υπογείου του εργαστηρίου ΟΣ.



Εικόνα 2.4: Δοκίμια μετά την αφαίρεση από τους μεταλλότυπους

Τα δοκίμια τα οποία δεν έχουν χαρακτηριστεί με τη συντομογραφία ΣΚi, σκυροδετήθηκαν στις εγκαταστάσεις της LaFarge και μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ (ΕΟΣ/ΕΜΠ). Συγκεκριμένα, μεταφέρθηκαν 7 ινοπλισμένες πλάκες, 6 άοπλες δοκοί και 6 ινοπλισμένες δοκοί και 22 κυλινδρικά δοκίμια.

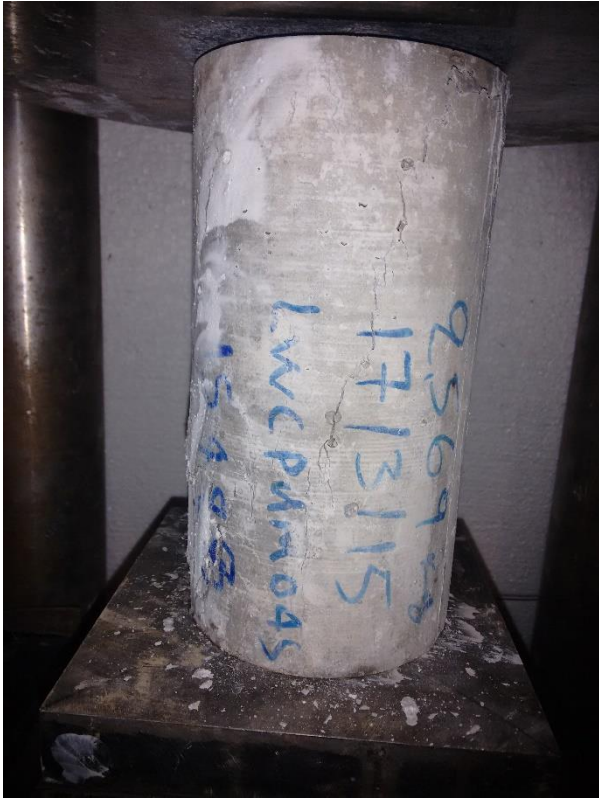


Εικόνα 2.5: Σκυροδέτηση δοκιμίων στις εγκαταστάσεις της LaFarge

Για τις συνθέσεις 15428, 15538 και R15488 η κατηγορία πυκνότητας είναι 1.6 ενώ για τις συνθέσεις 15454, 15613, R15613, R15517 η κατηγορία είναι 1.8, κατά τον Πίνακα 11.1 του EC2. Σημειώνεται ότι για το ΕΣ δεν ισχύουν οι συνήθεις κατηγορίες θλιπτικής αντοχής αλλά οι τροποποιημένες, σύμφωνα με το EN 206. Οι συνθέσεις ΚΔ που περιέχουν ίνες κωδικοποιούνται με το γράμμα R πριν τον κωδικό αριθμό της σύνθεσης.

2.3.2 Δοκιμές Θλιπτικής Αντοχής

Οι δοκιμές θλιπτικής αντοχής πραγματοποιήθηκαν στην μηχανή θραύσης Topiract Toni-Technik μέγιστου φορτίου 600 kN. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε κυβικά δοκίμια με ακμή 100mm και κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 100 mm και μήκους 200 mm. Συνολικά δοκιμάστηκαν 24 κύβοι και 7 κύλινδροι. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε έγινε σύμφωνα με το Πρότυπο ASTM C39. Οι κύβοι τοποθετούνται με τέτοιο προσανατολισμό ώστε να μην φορτίζεται η ελεύθερη πλευρά της σκυροδέτησης με σκοπό την ομοιόμορφη κατανομή της τάσης στις δυο επιφάνειες φόρτισης. Στα κυλινδρικά δοκίμια, η επιφάνεια η οποία κατά την σκυροδέτηση είναι εκτεθειμένη, λειάνθηκε με χρήση ειδικής μηχανής του ΕΟΣ, με σκοπό την αποφυγή τοπικής συγκέντρωσης τάσεων και εκκεντροτήτων φόρτισης. Η διαδικασία αυτή επιφέρει μικρή μείωση στο μήκος των δοκιμίων κατά περίπου 8-10 mm. Ο λόγος μήκους προς διάμετρο προκύπτει κατ' ελάχιστο 1.9 και δεν χρειάζεται διόρθωση με μειωτικό συντελεστή σύμφωνα με το Πρότυπο ASTM C39.



Εικόνα 2.6: Φωτογραφίες μετά την θραύση των κυλινδρικών δοκιμίων



Εικόνα 2.7: Φωτογραφίες μετά την θραύση των κυβικών δοκιμίων

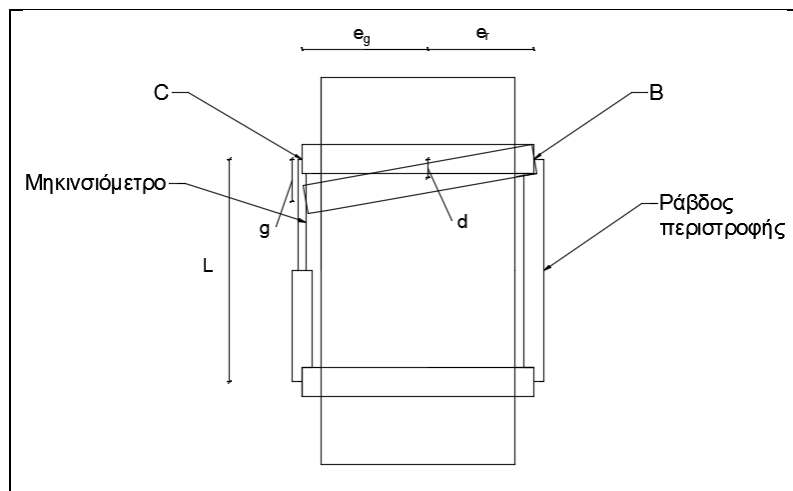
Οι συγκεντρωτικοί πίνακες που περιέχουν πληροφορίες για την εκάστοτε σύνθεση του δοκιμίου, τις ημερομηνίες σκυροδέτησης και θραύσης, το βάρος του ΚΔ και την αντοχή του περιλαμβάνονται στο 2.4.

2.3.3 Δοκιμές Μέτρου Ελαστικότητας

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας του ΚΔ έγινε σύμφωνα με το πρότυπο C 469-02 του ASTM.

2.3.3.1 Πειραματική διάταξη

Όλα τα δοκίμια είναι κυλινδρικά με διάμετρο 10 cm και μήκος 20 cm. Η ενεργός απόσταση μέτρησης L είναι 11.5 cm και οι αποστάσεις e_r και e_g είναι 9.5 και 8 cm αντίστοιχα, άρα $d = 1.842 \cdot g$. Ο ρυθμός μεταβολής του φορτίου είναι 2 kN/s (254.6 kPa/s). Το σημείο B είναι το σημείο περιστροφής του άνω δακτυλίου και το σημείο C βρίσκεται στο αντιδιαμετρικά του B και η μεταβολή της θέσης του είναι η παραμόρφωση του δοκιμίου.





Εικόνα 2.8: Η πειραματική διάταξη

Η μηχανή θραύσης που χρησιμοποιήθηκε είναι η Tonipact Toni-Technik μέγιστου φορτίου 600 kN. Για την μέτρηση της κατακόρυφης παραμόρφωσης του κάθε δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε μηχανοσίμετρο (LVDT - linear variable differential transformer) με ονομαστική ακρίβεια 2 μm . Το φορτίο και η παραμόρφωση λήφθηκαν σε Η/Υ με σύστημα καταγραφής HBM QuantumX MX840, με συχνότητα λήψης 50 Hz. Στην επιφάνεια του δοκιμίου που κατά τη σκυροδέτηση είναι εκτεθειμένη πραγματοποιείται λείανση, έτσι ώστε η επαφή της πλάκας εφαρμογής του φορτίου με το δοκίμιο να είναι ομοιόμορφη και να αποφεύγονται τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων και εκκεντρότητες.

Πραγματοποιούνται 4 κύκλοι φόρτισης, με το μέγιστο φορτίο σε κάθε κύκλο να αντιστοιχεί στο 40% της θλιπτικής αντοχής του δοκιμίου. Με χρήση καταγραφικού HMB, καταγράφονται ζεύγη φορτίου – μετατόπισης ανά 0.02 s. Οι τιμές του πρώτου κύκλου, αν και καταγράφονται, δεν χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας. Μετά τον 4^ο κύκλο φόρτισης, το φορτίο αυξάνεται μέχρι τη θραύση. Το μέτρο ελαστικότητας που εκτιμάται με τη διαδικασία του προτύπου αναμένεται να είναι μικρότερο από το μέτρο υπό συνθήκες ταχείας εφαρμογής φορτίου (πχ σεισμός ή δυναμικές φορτίσεις), καθώς και συνήθως μεγαλύτερο από το μέτρο όταν η ταχύτητα εφαρμογής του φορτίου είναι μικρή ή η διάρκεια της φόρτισης είναι εκτεταμένη (ASTM C469-02).

Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας που αντιστοιχεί σε κάθε κύκλο, χρησιμοποιείται η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων για μεγαλύτερη ακρίβεια. Για τα δοκίμια με κωδική ονομασία 15428_4, 15428_5, 15428_6 το μέτρο κάθε κύκλου υπολογίζεται και με τη προτεινόμενη μέθοδο του Προτύπου για συγκριτικούς σκοπούς, σύμφωνα με την οποία:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{(\varepsilon_2 - 0.00005)}$$

Όπου

- E = τέμνον μέτρο ελαστικότητας, kPa
- S_2 = η τάση που αντιστοιχεί στο 40% του μέγιστου φορτίου, kN
- S_1 = η τάση που αντιστοιχεί στη διαμήκη παραμόρφωση ε_1 ίση με $50 \cdot 10^{-6}$, kN
- ε_2 = διαμήκης παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην τάση S_2

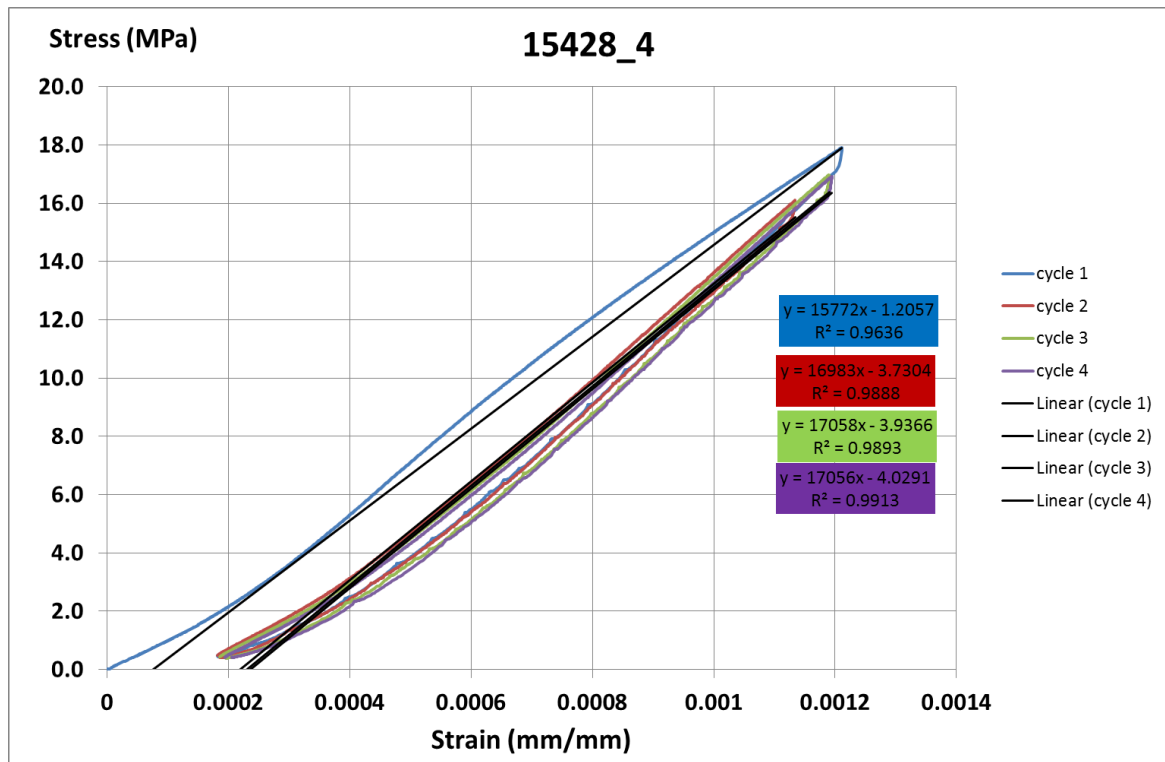
Επειδή η μηχανή θλιπτικής τάσης, κατά την αποφόρτιση, δεν μπορούσε να αποφορτίσει πλήρως το δοκίμιο (παραμένουσα δύναμη ~ 3 kN), η παραμόρφωση 0.00005 δεν ήταν πάντα εφικτή. Στις περιπτώσεις αυτές, χρησιμοποιήθηκε το ζεύγος S_1 και ε_1 που αντιστοιχούσε στην ελάχιστη μετρούμενη ε_1 του κύκλου φόρτισης. Οι τιμές του E_{cm} που προκύπτουν με αυτή τη μεθοδολογία είναι μικρότερες κατά 7% περίπου, για τα τρία εξεταζόμενα δοκίμια, γεγονός που οφείλεται στην πιο ήπια κλίση της καμπύλης σ - ε στην περιοχή των μικρών παραμορφώσεων.

Για κάθε δοκίμιο παρουσιάζονται τα εξής:

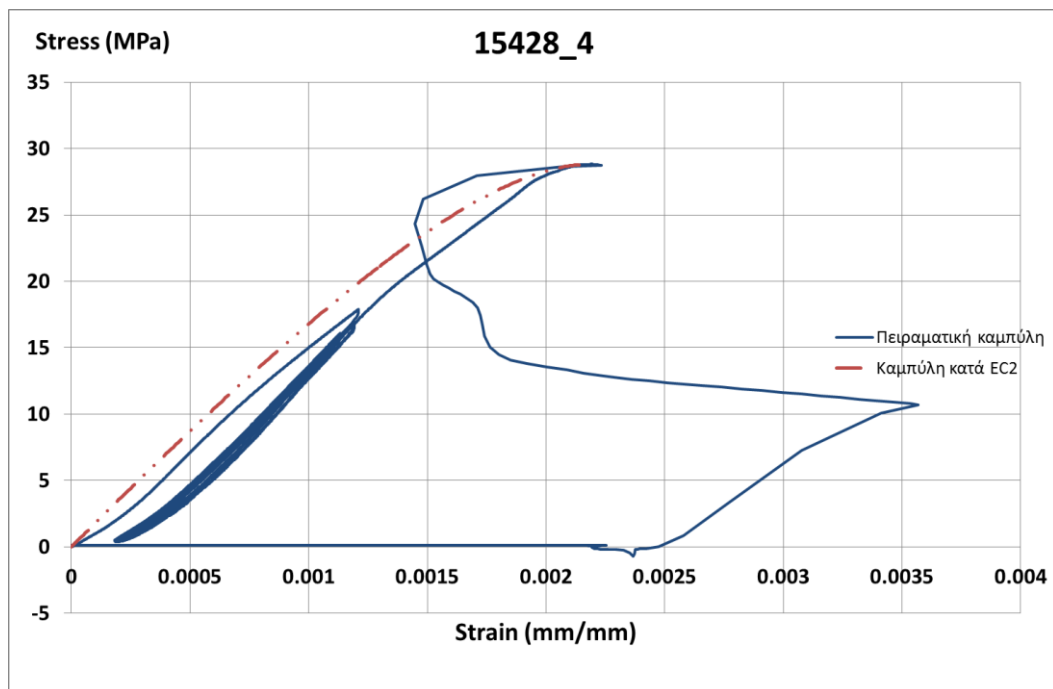
- το διάγραμμα των κύκλων φόρτισης (από 0 ως $0.4f_c$), με την αντίστοιχη για κάθε κύκλο γραμμική προσαρμογή, η κλίση της οποίας ταυτίζεται με το πειραματικό μέτρο ελαστικότητας
- το πειραματικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σ - ε
- το θεωρητικό διάγραμμα σ - ε το οποίο προκύπτει από τον EC2, με τις τιμές της θλιπτικής αντοχής f_{cm} , της μέγιστης παραμόρφωσης ε_{lc1} και του μέτρου ελαστικότητας E_{lcm} τις αντίστοιχες πειραματικά εκτιμώμενες τιμές (βλ. αναλυτικά Παράρτημα Α) και ονομάζεται για συντομία **καμπύλη Α**
- το θεωρητικό διάγραμμα σ - ε υπολογιζόμενο κατά EC2, αυτή τη φορά όμως μόνο η f_{cm} λαμβάνεται πειραματικά και οι υπόλοιπες (ε_{lc1} , E_{lcm}) να υπολογίζονται από τις εξισώσεις του EC2 (βλ. αναλυτικά Παράρτημα Α) και ονομάζεται για συντομία **καμπύλη Β**.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά τα διαγράμματα φορτίσεων για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας 3 δοκιμίων.

2.3.3.2 Δοκίμο 15428_4



Σχήμα 2.15: Κύκλοι φόρτισης δοκιμίου 15428_4

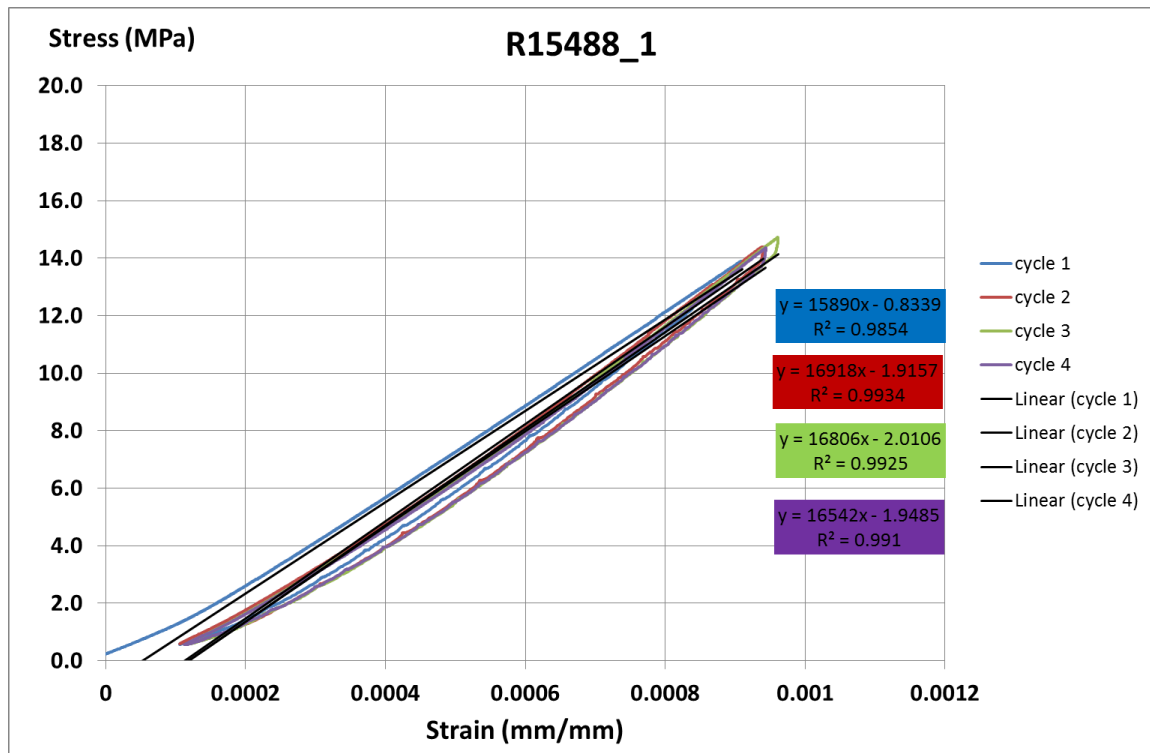


Σχήμα 2.16: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων δοκιμίου 15428_4

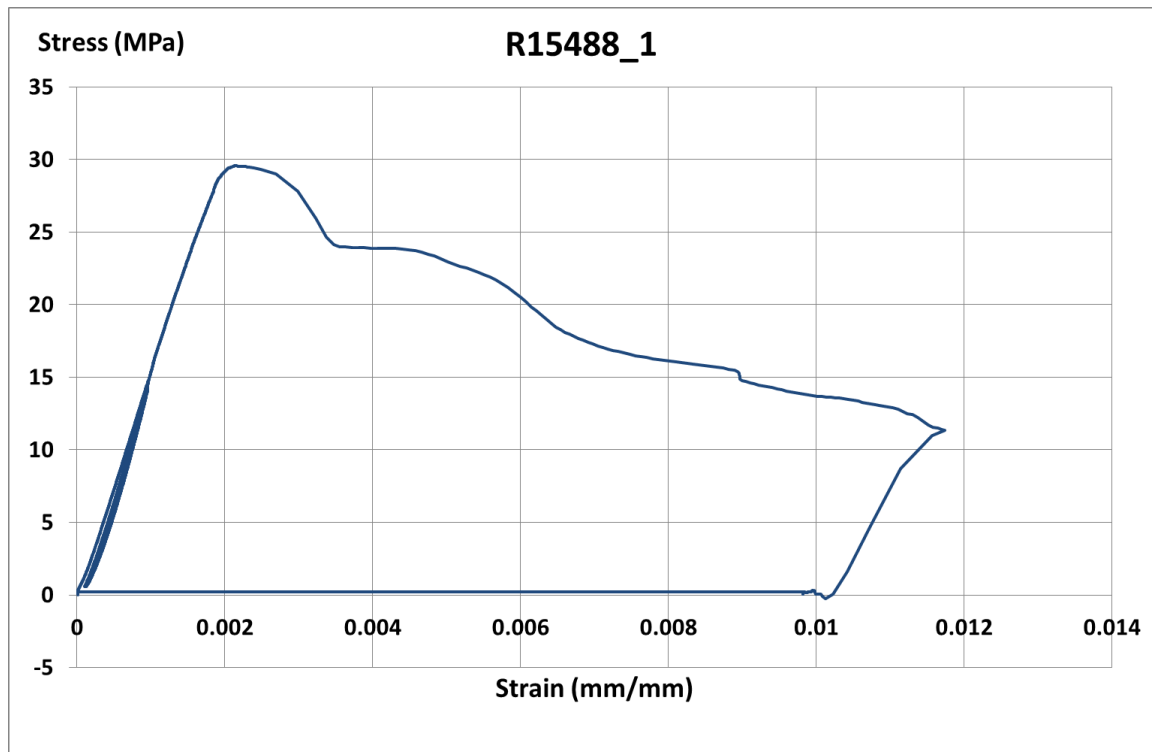


Εικόνα 2.9: Φωτογραφίες δοκιμίου 15428_4 μετά τη θραύση

2.3.3.3 Δοκίμιο R15488_1



Σχήμα 2.17: Κύκλοι φόρτισης

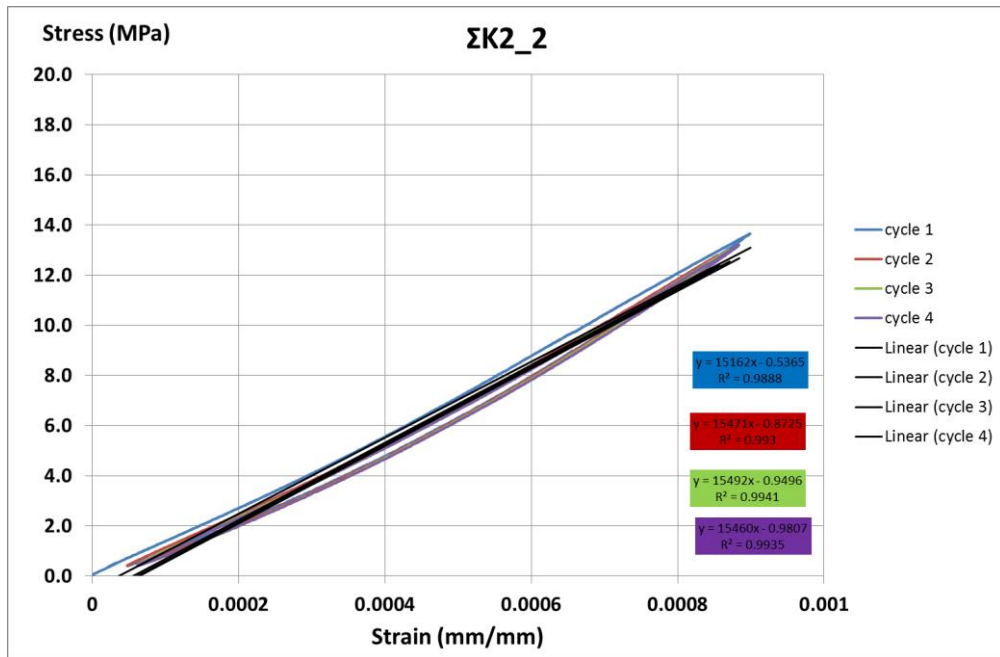


Σχήμα 2.18: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων

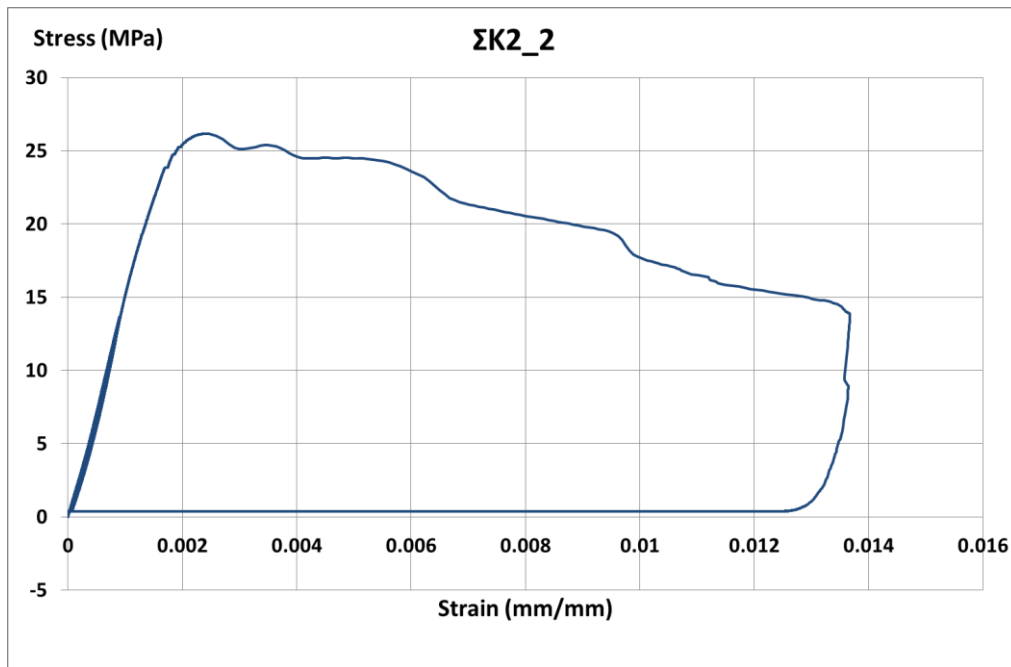


Εικόνα 2.10: Φωτογραφίες του δοκιμίου μετά τη θραύση

2.3.3.4 Δοκίμο ΣΚ2_2



Σχήμα 2.19: Κύκλοι φόρτισης



Σχήμα 2.20: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων



Εικόνα 2.11: Φωτογραφίες δοκιμίου μετά τη θραύση

2.3.4 Δοκιμές Εφελκυστικής και Καμπτικής Αντοχής

Για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής και την καμπτικής αντοχής χρησιμοποιήθηκαν τρεις διατάξεις:

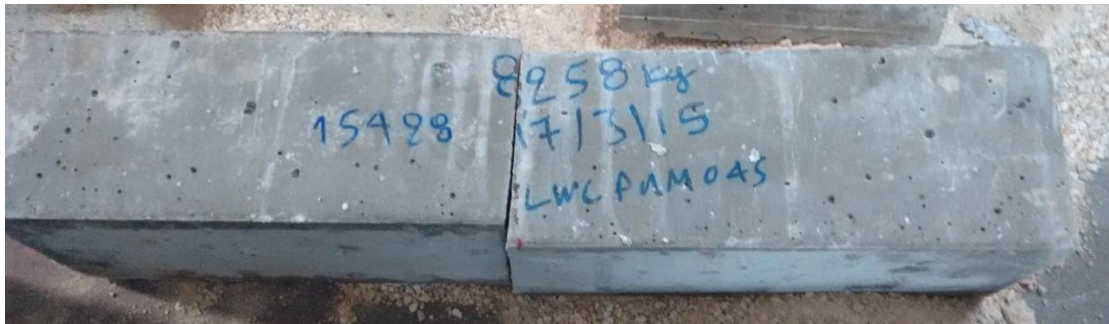
- Κάμψη τριών σημείων (καμπτική εφελκυστική αντοχή)
- Κάμψη τεσσάρων σημείων (καμπτική εφελκυστική αντοχή)
- Δοκιμή σε διάρρηξη

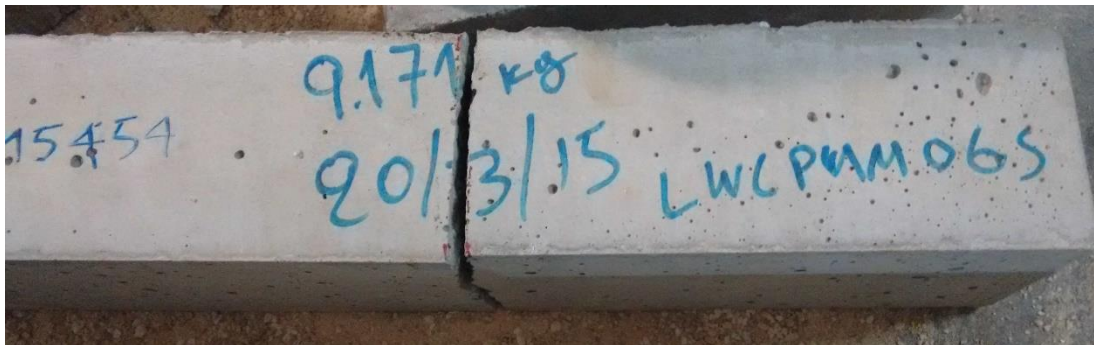
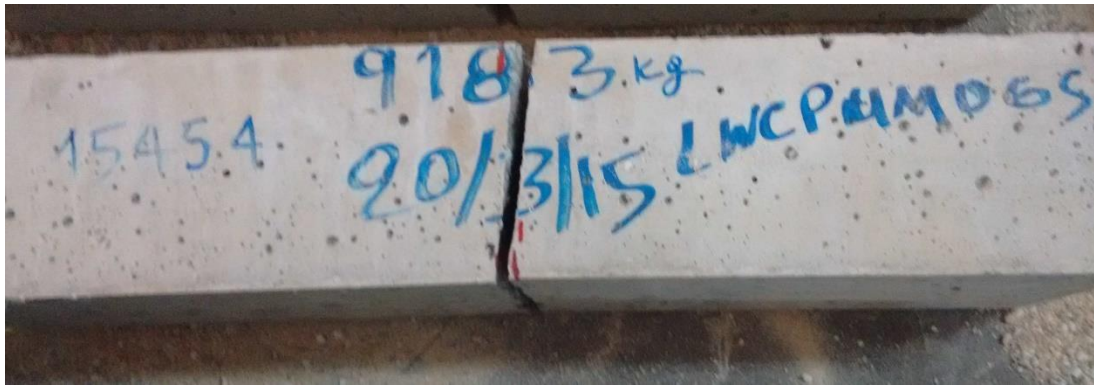
2.3.4.1 Κάμψη Τριών Σημείων

Τα δοκίμια που δοκιμάστηκαν ήταν διατομής 100x100 mm και μήκους 500 mm. Το καθαρό μήκος ανοίγματος (από στήριξη σε στήριξη) ήταν 350 mm και η κάμψη τριών σημείων σύμφωνα με το ASTM C293-02. Στη συνέχεια ακολουθούν φωτογραφίες της πειραματικής διάταξης, καθώς και φωτογραφίες όπου φαίνεται η μορφή αστοχίας των δοκιμίων.



Εικόνα 2.12: Φωτογραφίες διάταξης και δοκιμίου 15454_1





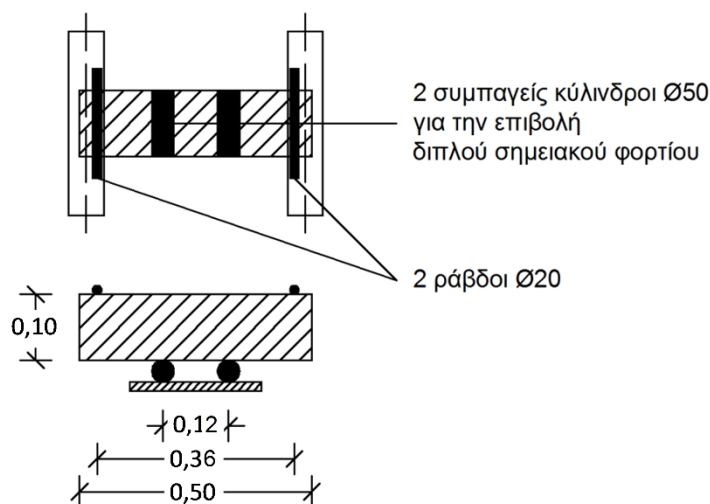
Εικόνα 2.13: Φωτογραφίες δοκιμίων 15428_3, 15454_2, 15454_3 και ΣΚ1_35

Συνολικά δοκιμάστηκαν 7 άοπλες δοκοί. Οι ημερομηνίες σκυροδέτησης και δοκιμής, τα βάρη των δοκιμίων και τα αποτελέσματα των δοκιμών συνοψίζονται στον συγκεντρωτικό πίνακα στο 2.4.

2.3.4.2 Κάμψη Τεσσάρων Σημείων

Στην κάμψη τεσσάρων σημείων πρισματικών δοκιμίων, στα δοκίμια επιβάλλονται διπλά σημειακά φορτία με ελεγχόμενα επιβαλλόμενες μετακινήσεις. Πραγματοποιήθηκαν εννέα δοκιμές σε δοκίμια διατομής 100x100 και μήκους 500mm, τα έξι εκ των οποίων ήταν ινοπλισμένα και τα τρία άοπλα. Όσον αφορά τα ινοπλισμένα, τα τρία δοκίμια ήταν της σύνθεσης 15488 με περιεκτικότητα ινών 40 kg/m³ ενώ τα υπόλοιπα τρία της σύνθεσης 15517 με 65 kg/m³.

Για τα άοπλα δοκίμια ακολουθήθηκαν οι συστάσεις του προτύπου ASTM C78-02 ενώ για τα ινοπλισμένα οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM 1018. Στις δοκιμές η επιβολή του φορτίου πραγματοποιήθηκε μέσω εμβόλου ελεγχόμενης παραμόρφωσης. Στην πειραματική διάταξη του παρακάτω σχήματος το μήκος διάτμησης ήταν 120 mm και απόσταση μεταξύ των σημείων φόρτισης επίσης 120 mm.



Σχήμα 2.21: Πειραματική διάταξη δοκιμών κάμψης τεσσάρων σημείων

Η ενόργανη παρακολούθηση της δοκιμής πραγματοποιήθηκε με την χρήση ηλεκτρονικών μηχανοσυστημάτων (electronic full bridge displacement transducers τύπου strain gauge, με εύρος μέτρησης 25mm). Τα μηχανοσυστήματα τοποθετήθηκαν με κατάλληλο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ο ακριβής προσδιορισμός της «καθαρής» μετακίνησης (βέλος) στο μέσον του δοκιμίου, απαλλαγμένης από οποιαδήποτε επιρροή λόγω πιθανής υποχώρησης ή στροφής του δοκιμίου στις στηρίξεις του.

Για την δοκιμή των πρισματικών δοκιμίων, τοποθετήθηκαν συνολικά δύο (2) μηχανοσυστήματα στο μέσον του δοκιμίου, στερεωμένα μέσω ακλόνητου οδηγού στη διάταξη στήριξης, ώστε να μετρούν την μέση παραμόρφωση του δοκιμίου. Όλα τα μηχανοσυστήματα τοποθετήθηκαν στην εφελκυστική πλευρά των δοκιμίων. Ο λόγος που χρησιμοποιούνται δύο μηχανοσυστήματα είναι ότι, λόγω του ότι δεν είναι εφικτό να τοποθετεί ένα μηχανοσυστήμα στο μέσον του δοκιμίου, καθώς το εμποδίζει η διάταξη επιβολής του φορτίου, τοποθετήθηκαν δύο (2) μηχανοσυστήματα εκτός του πλάτους του δοκιμίου, κατά την εγκάρσια διεύθυνση και συμμετρικά ως προς το μέσον του, ώστε το ημι-άθροισμά τους να δίνει την πραγματική μετακίνηση (βέλος) στον διαμήκη άξονα του δοκιμίου καθώς και τυχόν διορθώσεις λόγω στρεπτικών μικροπαραμορφώσεων που ενδεχομένως προκύπτουν από ασύμμετρη καμπτική ρηγμάτωση.



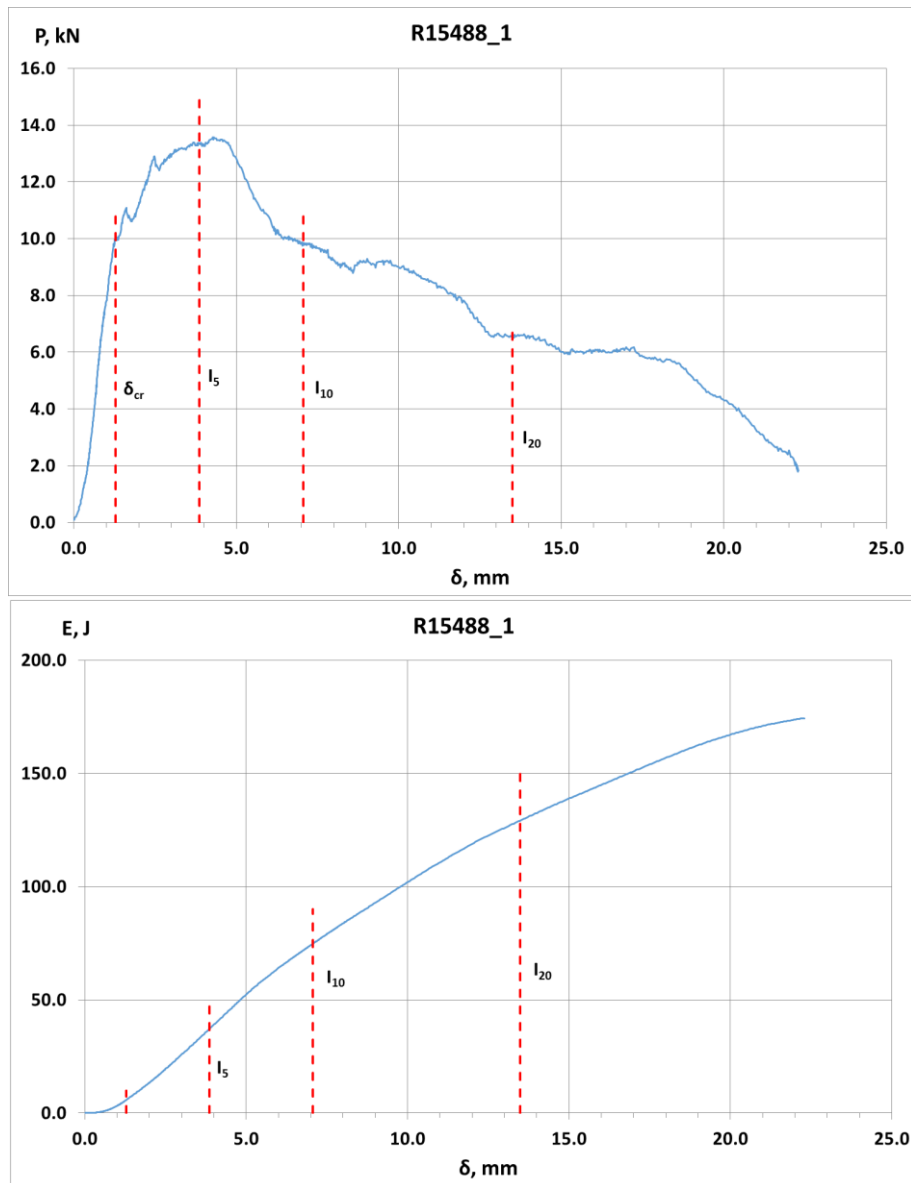
Εικόνα 2.14: Τυπική διάταξη δοκιμών εκτίμησης της καμπτικής εφελκυστικής αντοχής τεσσάρων σημείων

Χρησιμοποιήθηκε το καταγραφικό τύπου HBM QuantumX MX840 του ΕΟΣ και επιλέχθηκε συχνότητα λήψης των μετρήσεων 2 Hz. Με την ίδια συχνότητα έγινε και η καταγραφή των τιμών του φορτίου του εμβόλου.

Για τις ινοπλισμένες δοκούς οι αντοχές και οι δείκτες αντοχών που μετρήθηκαν και υπολογίστηκαν είναι οι εξής:

- εφελκυστική αντοχή σε κάμψη πριν την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής FCS (first crack strength) ή MOR (modulus of rupture), κατά την Προδιαγραφή ASTM C78
- δείκτες αντοχής σε παραμόρφωση (toughness factor) I5, I10, I20, κατά την Προδιαγραφή ASTM C1018
- δείκτες αντοχής σε παραμόρφωση (toughness ratio) R5, 10 και R10, 20 κατά την Προδιαγραφή ASTM C1018.

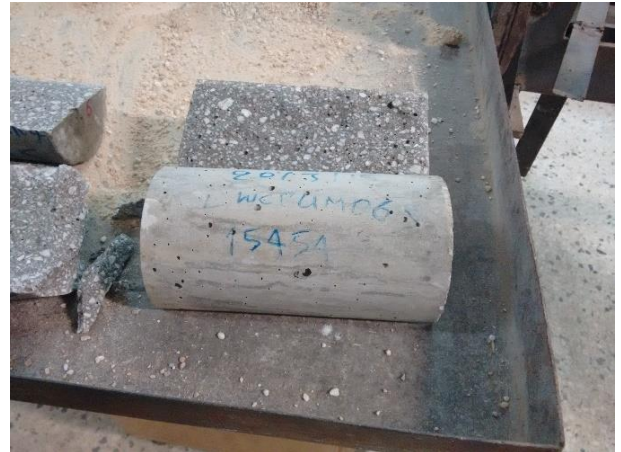
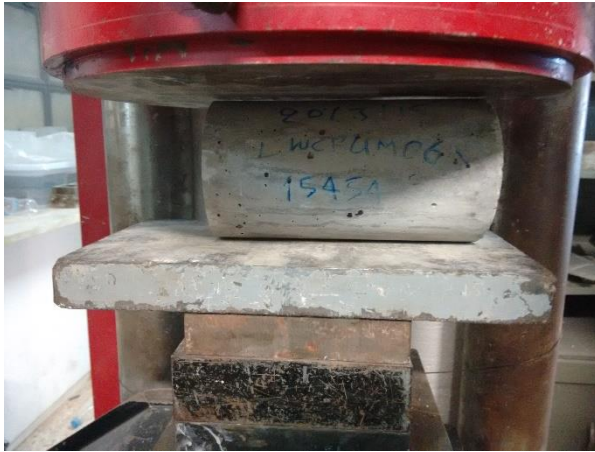
Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα σε πινακοποιημένη μορφή δίνονται στο 2.4. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης και ενέργειας – μετατόπισης για ένα ενδεικτικό ινοπλισμένο δοκίμιο.



Σχήμα 2.22: Διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης και ενέργειας – μετατόπισης για το δοκίμιο R15488_1

2.3.4.3 Εφελκυστική Αντοχή σε Διάρρηξη

Οι δοκιμές σε διάρρηξη έγιναν με βάση το πρότυπο ASTM C496 σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 100 mm και μήκους 200 mm και 150 mm και 300 mm αντίστοιχα. Χρησιμοποιήθηκε η μηχανή θραύσης τονί του ΕΟΣ για τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm ενώ για τα δοκίμια διαμέτρου 150 mm η μηχανή Avery. Η τονί είναι προγραμματισμένη να σταματάει την πίεση αυτόματα όταν συμβεί απότομη αύξηση της μετατόπισης (δηλαδή το δοκίμιο πρακτικά αστοχήσει).



Εικόνα 2.15: Δοκιμή στη μηχανή Tonic του δοκιμίου 15454_4 σε διάρρηξη



Εικόνα 2.16: Δοκιμή στη μηχανή Avery του δοκιμίου ΣΚ1_30 σε διάρρηξη

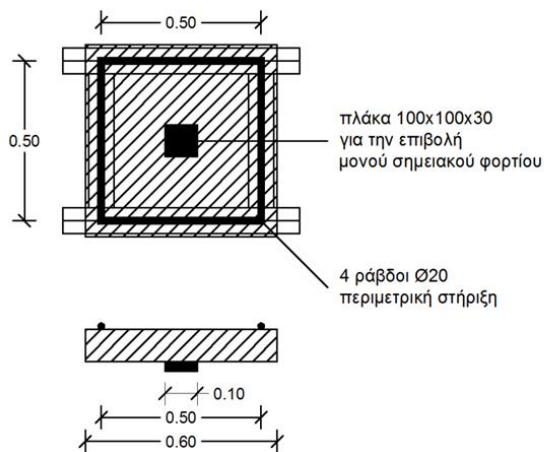
2.3.5 Κάμψη Ινοπλισμένων Πλακών

2.3.5.1 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας

Συνολικά 6 ινοπλισμένες πλάκες δοκιμάστηκαν σε εκτός επιπέδου κάμψη με σκοπό την εκτίμηση των αντοχών τους και του δείκτη απορροφώμενης ενέργειας. Οι πλάκες σκυροδετήθηκαν και συντηρήθηκαν στις εγκαταστάσεις της LaFarge πριν μεταφερθούν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ (ΕΟΣ/ΕΜΠ). Οι τρεις πρώτες με κωδικούς 15488_1, 15488_2, και 15488_3 κατασκευάστηκαν από ΚΔ της μελέτης σύνθεσης 15488 με περιεκτικότητα σε ίνα 40 kg/m³. Οι υπόλοιπες τρεις, με κωδικούς 15517_1, 15517_2 και 15517_3 περιείχαν ΚΔ της σύνθεσης 15517 με περιεκτικότητα σε ίνα 65 kg/m³.

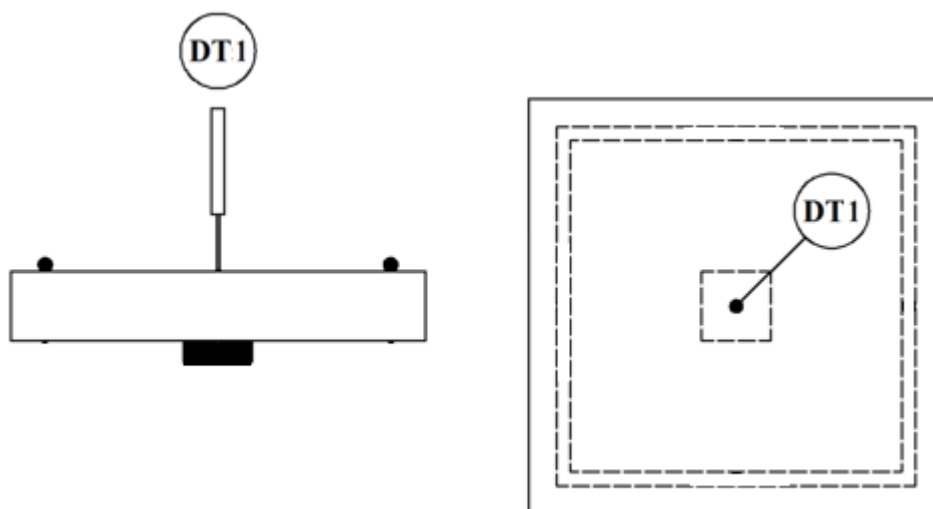
2.3.5.2 Η Πειραματική Διάταξη

Τα δοκίμια είχαν τετραγωνική κάτοψη 600 x 600 mm² και πάχος 100 mm. Για τις δοκιμές κάμψης εκτός επιπέδου των ινοπλισμένων πλακών, το φορτίο ασκήθηκε σημειακά στο μέσο των απλά εδραζόμενων περιμετρικά πλακών μέσω ελεύθερα στρεπτής άκαμπτης μεταλλικής πλάκας 100/100/30, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.23.



Σχήμα 2.23: Η πειραματική διάταξη των δοκιμών κάμψης εκτός επιπέδου ινοπλισμένων πλακών

Κατά τη διάρκεια της κάθε δοκιμής έγινε ταυτόχρονη ηλεκτρονική εγγραφή της κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο της πλάκας, μέσω μηκυνσιομέτρου, και της αναπτυσσόμενης δύναμης στο έμβολο επιβολής μετατόπισης. Για την καταγραφή χρησιμοποιήθηκε καταγραφικό τύπου HBM QuantumX MX840 του ΕΟΣ. Η συχνότητα καταγραφής επιλέχθηκε στα 2 Hz. Το χρησιμοποιούμενο ηλεκτρονικό μηκυνσιόμετρο (electronic full bridge displacement transducer) τοποθετήθηκε με κατάλληλο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ο ακριβής προσδιορισμός της «καθαρής» μετακίνησης (βέλος) στο μέσον του δοκιμίου, απαλλαγμένης από οποιαδήποτε επιρροή λόγω πιθανής υποχώρησης ή στροφής του δοκιμίου στις στηρίξεις του και συγκεκριμένα στο κέντρο της πλάκας, στερεωμένου επί άκαμπτης σιδηροδοκού, η οποία στερεώθηκε στις στηρίξεις. Το μηκυνσιόμετρο τοποθετήθηκε στην πάνω πλευρά του δοκιμίου (Σχήμα 2.24).



Σχήμα 2.24: Θέση μηκυνσιομέτρου

Οι αντοχές και οι δείκτες αντοχών που μετρήθηκαν και υπολογίστηκαν είναι οι εξής:

- Μέγιστη αντοχή σε κάμψη
- Δείκτης απορροφώμενης ενέργειας του διαγράμματος φορτίου – παραμόρφωσης, σε παραμόρφωση δοκιμίου 25mm, κατά EN 14488-5.

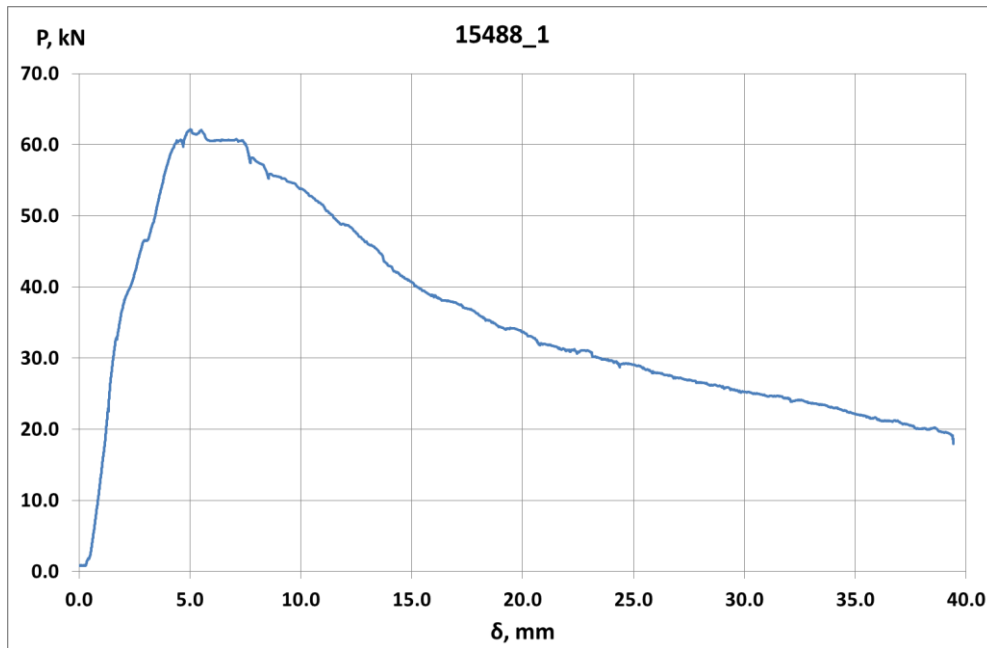
2.3.5.3 Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένα διαγράμματα φορτίου μετακίνησης P-δ και απορροφώμενης ενέργειας E-δ. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα σε πινακοποιημένη παραθέτονται στο § 2.4. Επίσης, στο παρακάτω σχήμα δείχνονται τυπικές μορφές αστοχίας πλακών.

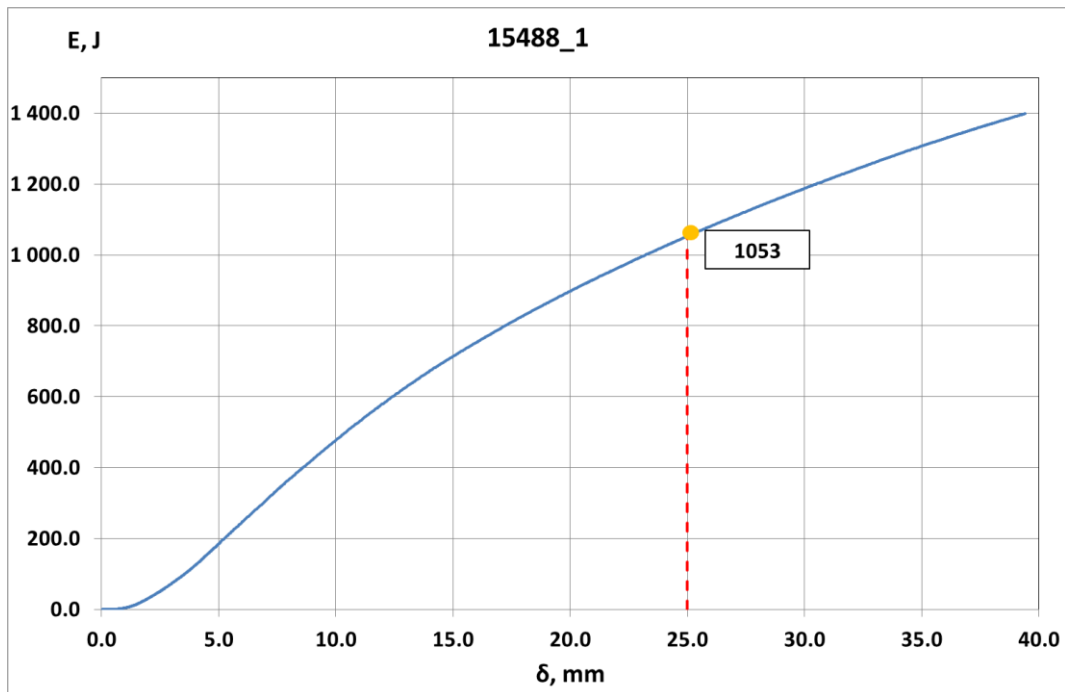


Σχήμα 2.25: Δοκίμια R15488_2, R15488_3, R15517_1 και R15517_2 μετά την αστοχία

Δοκίμιο 15488_1

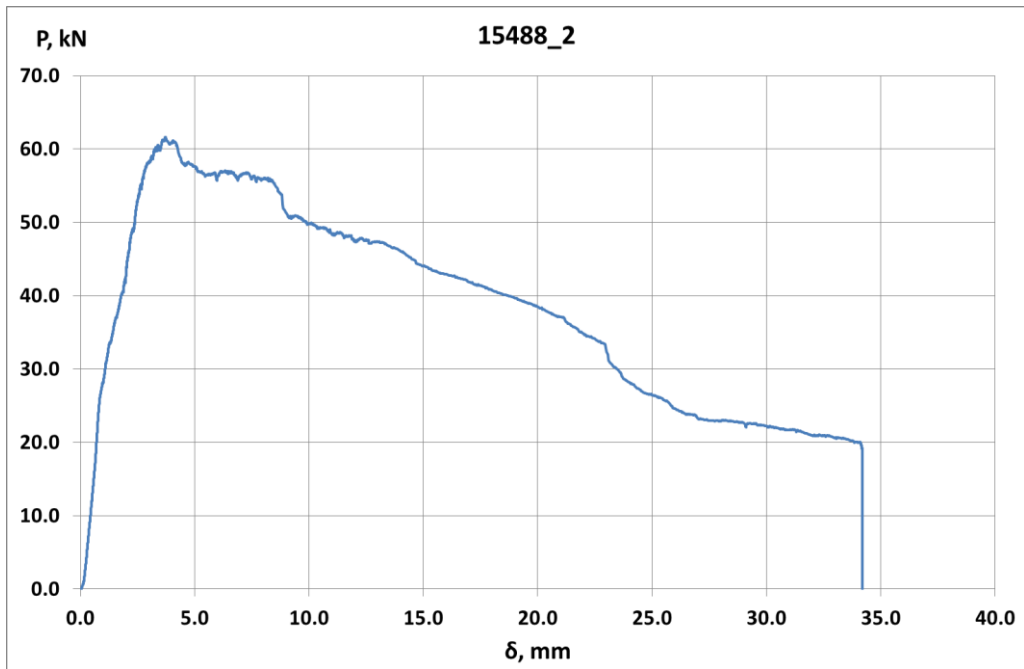


Σχήμα 2.26: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 15488_1

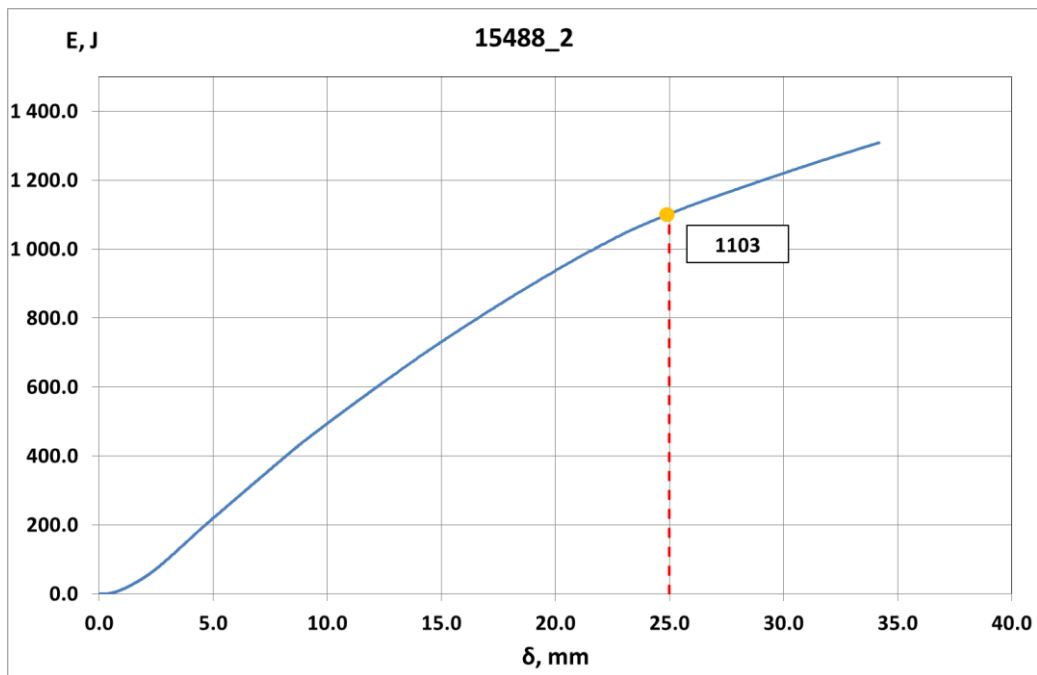


Σχήμα 2.27: Διάγραμμα ενέργειας – μετατόπισης δοκιμίου 15488_1

Δοκίμιο 15488_2



Σχήμα 2.28: Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης δοκιμίου 15488_2



Σχήμα 2.29: Διάγραμμα ενέργειας – μετατόπισης δοκιμίου 15488_2

2.4 Συνολικά αποτελέσματα μελέτης μηχανικών χαρακτηριστικών ΚΔ

2.4.1 Θλιπτική Αντοχή

Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε θλίψη συγκεντρώνονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 2.9: Αποτελέσματα δοκιμών θλιπτικής αντοχής κυβικών δοκιμίων 100x100x100 mm

Πειραματική εκτίμηση θλιπτικής αντοχής κύβων 10x10x10 cm											
Σύνθεση ΚΔ	Κωδικός	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία θραύσης	Ηλικία (ημέρες)	Παρατηρήσεις	F (kN)	Βάρος (kg)	γ (kN/m ³)	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	σ / f_{cm} *
15538	ΣΚ1_1	6/4/2015	4/5/2015	28	-	385	1.626	16.26	38.5	38.8	0.03
	ΣΚ1_2				-	400.3	1.59	15.90	40.0		
	ΣΚ1_3				-	379.5	1.614	16.14	38.0		
	ΣΚ1_12	6/4/2015	25/5/2015	49	-	386.1	1.5564	15.56	38.6	38.0	0.07
	ΣΚ1_9				-	350	1.5734	15.73	35.0		
	ΣΚ1_7				-	405.1	1.5759	15.76	40.5		
	ΣΚ1_4	6/4/2015	4/6/2015	59	Μικρή ατέλεια	324	1.619	16.19	32.4	36.7	0.11
	ΣΚ1_10				-	400.8	1.5857	15.86	40.1		
	ΣΚ1_13				-	377.3	1.5651	15.65	37.7		
	ΣΚ1_5	6/4/2015	7/9/2015	154	-	385.7	1.5768	15.77	38.6	38.1	0.02
ΣΚ1_6	-				372.1	1.544	15.44	37.2			
ΣΚ1_8	-				384.2	1.5553	15.55	38.4			
15613	ΣΚ2_1	21/4/2015	20/5/2015	29	-	332	1.8215	18.22	33.2	32.9	0.02
	ΣΚ2_2				-	334.5	1.7657	17.66	33.5		
	ΣΚ2_3				-	320.9	1.7568	17.57	32.1		
	ΣΚ2_4	21/4/2015	22/6/2015	62	-	370	1.652	16.52	37.0	37.8	0.04
	ΣΚ2_5				-	367.1	1.687	16.87	36.7		
	ΣΚ2_6				-	396	1.626	16.26	39.6		
15820	ΣΚ5_3	18/5/2015	25/5/2015	7	-	358.5	1.8533	18.53	35.9	35.4	0.01
	ΣΚ5_4				-	353.6	1.7858	17.86	35.4		
	ΣΚ5_5				-	349.6	1.8678	18.68	35.0		
	ΣΚ5_1	18/5/2015	15/6/2015	28	-	421.8	1.796	17.96	42.2	44.9	0.06
	ΣΚ5_2				-	472.5	1.799	17.99	47.3		
	ΣΚ5_6				-	451.9	1.731	17.31	45.2		

Πίνακας 2.10: Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής κυλίνδρων d100x200 mm

Πειραματική εκτίμηση θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμών διαστάσεων d10 x 20 cm													
Σύνθεση	Κωδικός	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία θραύσης	Ηλικία	Παρατηρήσεις	F (kN)	Μήκος αρχικό (cm)	Μήκος τελικό (cm)	Βάρος 1* (kg)	Βάρος 2** (kg)	$\gamma 1^*$ (kN/m ³)	$\gamma 2^{**}$ (kN/m ³)	f_c (MPa)
LC25/28, 15428	15428_2	17/3/2015	17/4/2015	31	-	250.9	20	18.9	2.569	-	16.35	-	31.9
LC30/33, 15454	15454_1	20/3/2015	21/4/2015	32	-	307.5	20	18.9	2.861	-	18.21	-	39.2
FLC25/28, R15488 (40kg/m ³)	R15488_4	27/3/2015	27/4/2015	31	-	253.6	20	19	2.708	2.454	17.24	16.44	32.3
FLC30/33, R15517 (65kg/m ³)	R15517_6	31/3/2015	28/4/2015	28	-	306.5	20	19	2.745	2.464	17.48	16.51	39.0
LC25/28, 15538	ΣΚ1_20	6/4/2015	4/5/2015	28	-	279.4	20	18.9	2.57	2.494	16.36	15.88	35.6
	ΣΚ1_21	6/4/2015	4/5/2015	28	κακή συμπίκνωση	153.1	20	19	2.566	2.484	16.34	15.81	19.5
	ΣΚ1_23	6/4/2015	4/5/2015	28	-	277	20	19	2.696	2.488	17.16	15.84	35.3

*: Μετρήθηκαν την 20/4/2015. **:Μετρήθηκαν την 27/4/2015 (για τα R15488_4 και R15517_6) και την 4/5/2015 (για τα υπόλοιπα)

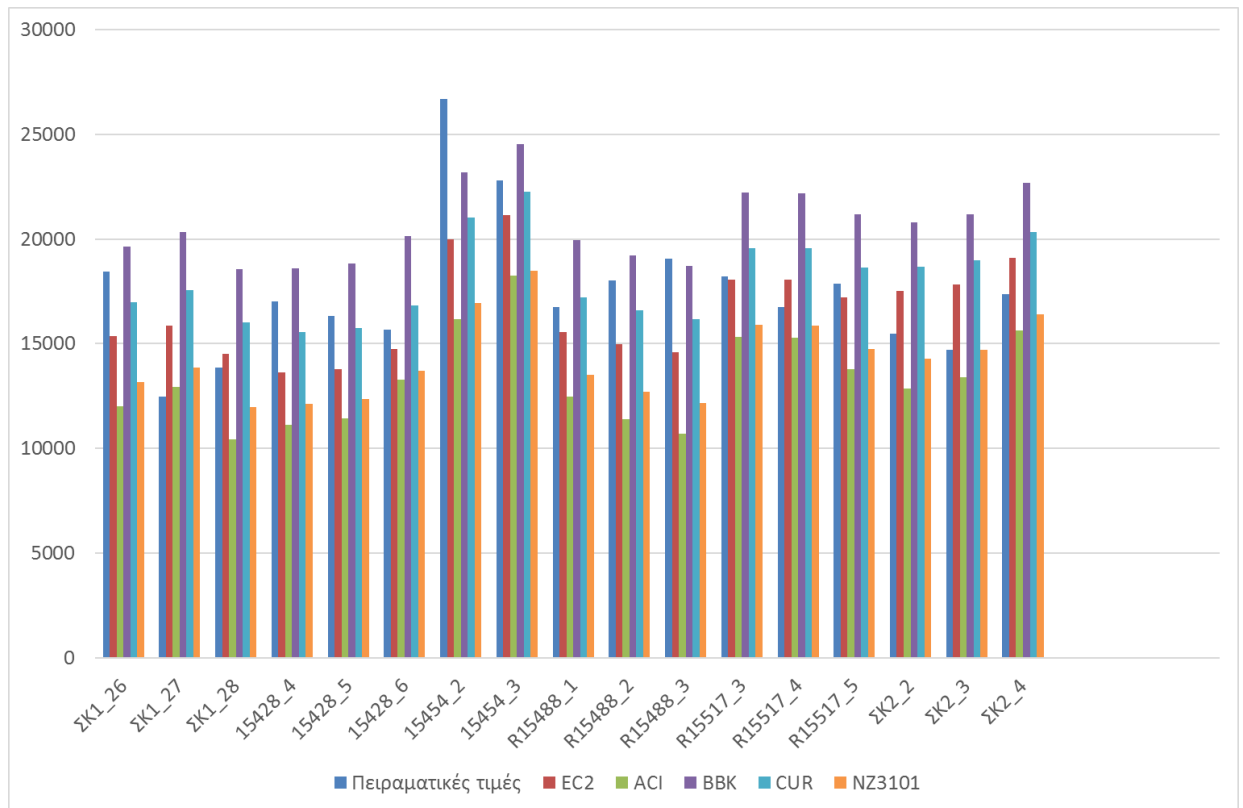
2.4.2 Μέτρο Ελαστικότητας

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών εκτίμησης του μέτρου ελαστικότητας των διαφόρων συνθέσεων κισσηροδέματος που αναπτύχθηκαν από τη LaFarge.

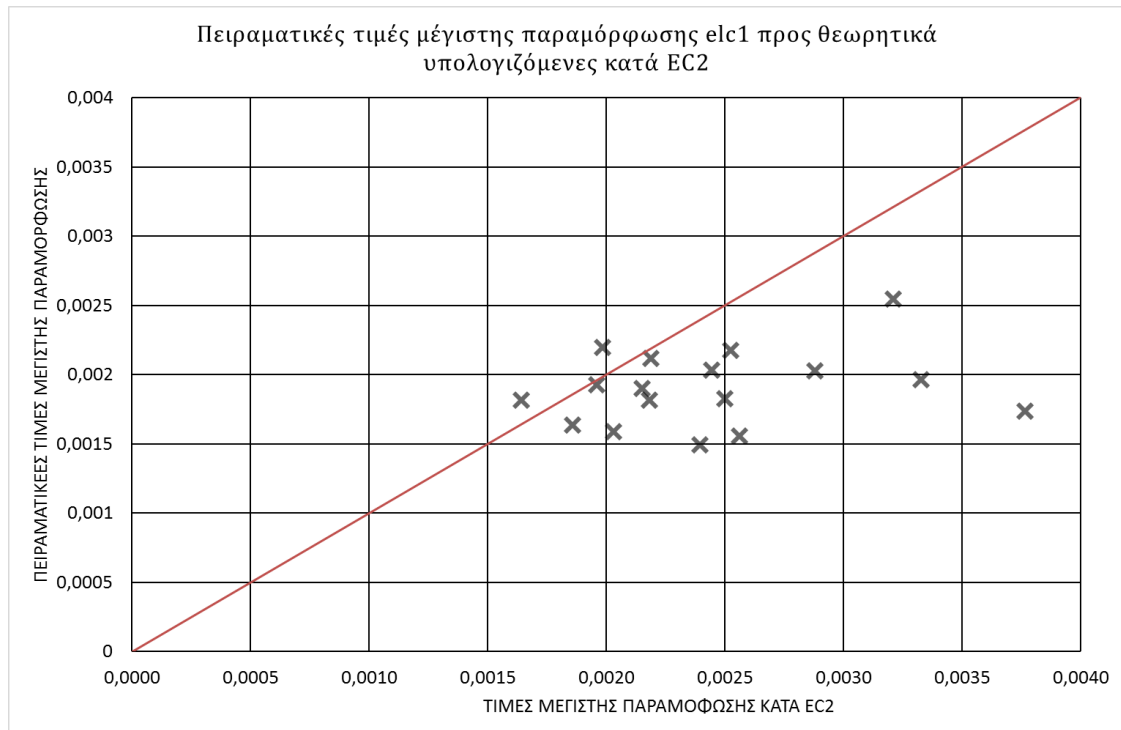
Πειραματική εκτίμηση μέτρου ελαστικότητας κυλίνδρων διαστάσεων d10 x 20 cm										
Σύνθεση	Κωδικός Δοκιμίου	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία θραύσης	Ηλικία (ημέρες)	$\gamma 1^*$ (kN/m ³)	$\gamma 2^{**}$ (kN/m ³)	f_{ic} (MPa)	ϵ_{ic1}	E_{ic} (MPa)	E_{icm} (MPa)
15538	ΣΚ1_26	6/4/2015	8/5/2015	32	16,07	15,64	27,87	0,0016	18454	14930
	ΣΚ1_27	6/4/2015	11/5/2015	35	16,58	16,01	31,13	0,0033	12477	
	ΣΚ1_28	6/4/2015	11/5/2015	35	16,25	15,68	23,03	0,0020	13860	
15428	15428_4	17/3/2015	8/5/2015	52	17,17	16,40	28,82	0,0022	17033	16347
	15428_5	17/3/2015	8/5/2015	52	16,38	16,10	29,99	0,0025	16322	
	15428_6	17/3/2015	8/5/2015	52	17,27	16,82	37,54	0,0032	15687	
15454	15454_2	20/3/2015	8/5/2015	49	18,38	17,92	34,98	0,0020	26679	24742
	15454_3	20/3/2015	8/5/2015	49	18,67	18,05	42,25	0,0020	22806	
R15488 (40kg/m ³)	R15488_1	27/3/2015	8/5/2015	42	17,97	16,71	29,57	0,0022	16756	17935
	R15488_2	27/3/2015	8/5/2015	42	17,23	16,40	26,07	0,0038	18000	
	R15488_3	27/3/2015	8/5/2015	42	17,14	16,20	23,88	0,0019	19049	
R15517 (65kg/m ³)	R15517_3	31/3/2015	11/5/2015	41	17,47	16,55	36,72	0,0024	18230	17607
	R15517_4	31/3/2015	11/5/2015	41	17,30	16,46	36,61	0,0029	16741	
	R15517_5	31/3/2015	11/5/2015	41	17,29	16,61	31,27	0,0022	17850	
R15613 (40kg/m ³)	ΣΚ2_2	21/4/2015	1/7/2015	71	16,54	-	26,17	0,0024	15474	15848
	ΣΚ2_3	21/4/2015	1/7/2015	71	16,69	-	27,75	0,0026	14700	
	ΣΚ2_4	21/4/2015	1/7/2015	71	17,21	-	34,91	0,0025	17369	

Πίνακας 2.11: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών μέτρου ελαστικότητας

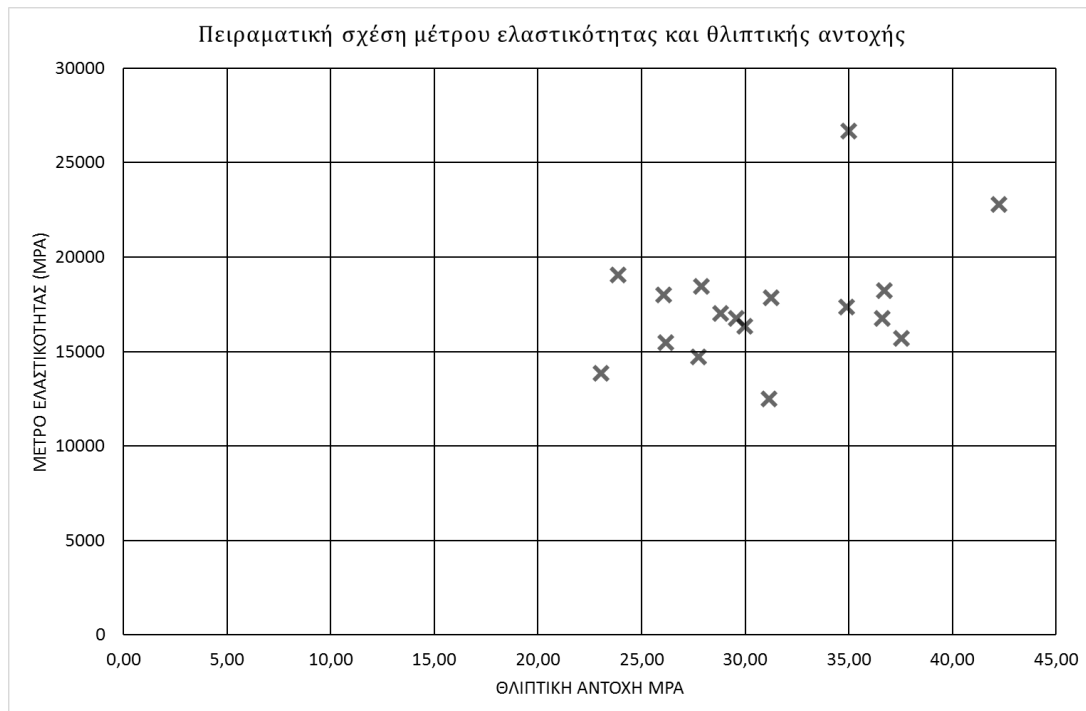
Στο παρακάτω διάγραμμα συγκρίνονται οι πειραματικές τιμές με τις θεωρητικά προβλεπόμενες από διάφορους κανονισμούς (οι αντίστοιχες εξισώσεις περιγράφονται στο Παράρτημα Α)



Σχήμα 2.30: Σύγκριση πειραματικής τιμής του μέτρου ελαστικότητας με τις υπολογιζόμενες σύμφωνα με διάφορους κανονισμούς



Σχήμα 2.31: Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής τιμής ϵ_{lc1} κατά EC2



Σχήμα 2.32: Πειραματική σχέση θλιπτικής αντοχής με μέτρο ελαστικότητας

Αν και η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε επενεργητή με ελεγχόμενες δυνάμεις, στα ινοπλισμένα δοκίμια R15488_2, R15488_3, ΣΚ2_2 και ΣΚ2_3 παρατηρήθηκε ένα σχεδόν οριζόντιο τμήμα μετά την επίτευξη της ϵ_{ic1} με αποτέλεσμα την αύξηση της παραμόρφωσης αστοχίας κατά 12, 13, 130 και 25% αντίστοιχα.

2.4.3 Εφελκυστική Αντοχή

2.4.3.1 Καμπτική Εφελκυστική Αντοχή

Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών αποτίμησης της καμπτικής εφελκυστικής συμπεριφοράς τριών και τεσσάρων σημείων των άοπλων και ινοπλισμένων δοκών συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.12: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κάμψης τριών και τεσσάρων σημείων

Πειραματική εκτίμηση καμπτικής εφελκυστικής αντοχής σε δοκούς διατομής 10x10 cm και μήκους 50 cm														
Σύνθεση	Κωδικός Δοκιμίου	Περιγραφή	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία θραύσης	Ηλικία	Παρατηρήσεις	maxP (kN)	Βάρος (kg)	γ (kN/m ³)	M (kNm)	f _{ct,fl} (MPa)	f _{ct,fl} (ASTM C293) (MPa)	f _{ctm,fl} (MPa)	Τυπική απόκλιση σ / f _{ctm,fl}
15488	15428_1	Κάμψη 3 σημείων	17/3/2015	27/4/2015	41	-	8.5	8.22	16.4	0.74	4.5	4.5	3.5	0.26
	-					6.2	8.165	16.3	0.54	3.3	3.3			
	-					5.2	8.258	16.5	0.46	2.7	2.7			
15454	15454_1	Κάμψη 3 σημείων	20/3/2015	27/4/2015	38	-	9.1	9.172	18.3	0.80	4.8	4.8	3.2	0.43
	-					5.1	9.183	18.4	0.45	2.7	2.7			
	-					4.2	9.171	18.3	0.37	2.2	2.2			
15538	ΣΚ1_35	Κάμψη 3 σημείων	6/4/2015	5/6/2015	60	Δεν αστόχησε στο μέσο (βλ. φώτο)	3.9	7.892	15.8	0.35	2.1	2.1	4.2	0.38
	ΣΚ1_36	Κάμψη 4 σημείων	6/4/2015	5/5/2015	29	-	12.78	-	-	0.64	3.8	3.8		
	ΣΚ1_37					-	18.97	-	-	0.95	5.7	5.7		
	ΣΚ1_38					-	17.63	-	-	0.88	5.3	5.3		
15488 (40 kg/m ³)	15488_1	Κάμψη 4 σημείων	27/3/2015	4/5/2015	38	-	13.58	-	-	0.86	5.2	5.2	4.4	0.19
	15488_2					-	11.83	-	-	0.75	4.5	4.5		
	15488_3					-	9.2	-	-	0.58	3.5	3.5		
15517 (65kg/m ³)	15517_1	Κάμψη 4 σημείων	31/3/2015	5/5/2015	35	-	12.7	-	-	0.80	4.8	4.8	6.3	0.20
	15517_2		31/3/2015	5/5/2015	35	-	18.97	-	-	1.20	7.2	7.2		
	15517_3		31/3/2015	5/5/2015	35	-	17.71	-	-	1.12	6.7	6.7		

Όπου

γ το ειδικό βάρος του ΚΔ

maxP το μέγιστο φορτίο που ασκήθηκε

M η ροπή στο χώρο της καθαρής κάμψης (για κάμψη τεσσάρων σημείων) ή στο μέσο της δοκού (για κάμψη τριών σημείων)

f_{ct,fl} η καμπτική εφελκυστική αντοχή και

f_{ctm,fl} η μέση καμπτική εφελκυστική αντοχή.

Για τις ινοπλισμένες δοκούς τα χαρακτηριστικά αντοχής και ενεργειακής απορρόφησης παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα. Σημειώνεται ότι η σύνθεση 15488 περιέχει ίνα 40kg/m³ ενώ η 15517 65 kg/m³.

Πίνακας 2.13: Χαρακτηριστικά αντοχής και ενεργειακής απορρόφησης ινοπλισμένων πλακών

Σύνθεση ΚΛ	A/A δοκιμίου	Αριθμός ρωγμών	δ_{cr} (mm)	P_{cr} (kN)	P_u (kN)	E_{25} (J)
FLC 25/28, 15488	15488_1	6	1.5	29	61.7	1053
	15488_2	6	0.9	27	61.3	1103
	15488_3	4	1.4	45	67.5	1144
Μέση τιμή μ	Μέση τιμή μ		1.3	33.7	63.5	1100.0
Τυπική απόκλιση σ	Τυπική απόκλιση σ		0.3	9.9	3.5	45.6
σ/μ	σ/μ		3.9	3.4	18.3	24.1
FLC 30/33, 15517	15517_1	5	2.1	40	72.33	1245
	15517_2	4	2.3	50	75.2	1250
	15517_3	5	1.9	40	72	1269
Μέση τιμή μ	Μέση τιμή μ		2.1	43.3	73.2	1254.7
Τυπική απόκλιση σ	Τυπική απόκλιση σ		0.2	5.8	1.8	12.7
σ/μ	σ/μ		10.5	7.5	41.6	99.1

Όπου

P : συνολικό επιβαλλόμενο φορτίο

F_{CS} : εφελκυστική αντοχή σε κάμψη πριν την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής

$$F_{CS} = 3Pa/bd^2$$

α : το μήκος διάτμησης ίσο με 120 mm

b, h : οι διαστάσεις της διατομής του δοκιμίου, ίσες με $b=h=100$ mm

δ_{cr} : «καθαρή» μετακίνηση (βέλος) στο μέσον του δοκιμίου στην πρώτη ρηγμάτωση

I_i : εμβαδόν του διαγράμματος P- δ για βέλος δ ίσο με $(i+1)/2$ φορές το βέλος στην πρώτη ρηγμάτωση δ_{cr} προς το αντίστοιχο εμβαδόν για βέλος δ ίσο με το βέλος στην πρώτη ρηγμάτωση δ_{cr} , σύμφωνα με την Προδιαγραφή ASTM C1018

$R_{5,10}$: πολλαπλάσιο της διαφοράς των δεικτών I_5 και I_{10} , σύμφωνα με την σχετική έκφραση της Προδιαγραφής ASTM C1018:

$$R_{5,10} = 100 \cdot (I_{10} - I_5)_{SFRC} / (I_{10} - I_5)_{EP}$$

και

$$(I_{10} - I_5)_{EP} = 10 - 5 = 5$$

$$\text{οπότε } R_{5,10} = 20(I_{10} - I_5)$$

R_{10,20} : πολλαπλάσιο της διαφοράς των δεικτών I₁₀ και I₂₀, σύμφωνα με την σχετική έκφραση της Προδιαγραφής ASTM C1018:

$$R_{10,20} = 100 \cdot (I_{20} - I_{10})_{SFRC} / (I_{20} - I_{10})_{EP}$$

και $(I_{20} - I_{10})_{EP} = 20 - 10 = 10$
 οπότε $R_{10,20} = 10(I_{20} - I_{10})$

2.4.3.2 Εφελκυστική Αντοχή σε Διάρρηξη

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα δοκιμών σε εφελκυστική δοκιμή διάρρηξης καθώς και οι αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τις διατάξεις του EC2.

Πίνακας 2.14: Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών σε διάρρηξη

Πειραματική εκτίμηση εφελκυστικής αντοχής κυλίνδρων διαστάσεων d10 x 20 cm και d15 x 30 cm (Brazilian test)																Θεωρητικός υπολογισμός κατά EC2		
Σύνθεση ΚΔ	Κωδικός Δοκιμίου	Περιγραφή	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία θραύσης	Ηλικία (ημέρες)	Παρατηρήσεις	F (kN)	Μήκος δοκιμίου (cm)	Βάρος 1 (kg)	Βάρος 2 (kg)	γ 1 (kN/m ³)	γ 2 (kN/m ³)	f _{ct,sp} (MPa)	f _{ctm,sp} (MPa)	σ/f _{ctm,sp} (στυπική απόκλιση)	Άνω όριο κατηγορίας πυκνότητας (kg/m ³)	η ₁	f _{ctm,sp} (για άσπλο)* (MPa)
LC25/28, 15428	15428_3	LWCPUM045	17/3/2015	17/4/2015	31	-	89.6	19.9	2.615	-	16.73	-	2.87	2.87	-	1600	0.836	2.42
	15454_6	LWCPUM065	20/3/2015	21/4/2015	32	δεν έσπασε ομοιόμορφα	50.13	20.2	2.892	-	18.23	-	1.58	1.59	0.006	1800	0.891	2.87
	15454_4	LWCPUM065	20/3/2015	21/4/2015	32	-	47.06	18.8	3.045	-	19.39	-	1.59	1.59	0.006	1800	0.891	2.87
LC25/28, 15538	ΣΚ1_24	15538	6/4/2015	4/5/2015	28	βάρη: 1: 27/4, 2: 4/5	42.7	20.4	2.722	2.65	16.99	16.54	1.33	1.88	0.220	1600	0.836	2.42
	ΣΚ1_25	15538	6/4/2015	4/5/2015	28	βάρη: 1: 27/4, 2: 4/5	51.5	20.1	2.568	2.496	16.27	15.81	1.63					
	ΣΚ1_22	15538	6/4/2015	4/5/2015	28	βάρη: 1: 27/4, 2: 4/5	54.6	20	2.556	2.49	16.27	15.85	1.74					
	ΣΚ1_34	15538	6/4/2015	8/5/2015	32	Χάθηκε λόγω λανθασμένης ρύθμισης μηχανής θραύσης. Βάρη: 1: 20/4, 2: 8/5	-	30	8.724	8.544	16.46	16.12	-					
	ΣΚ1_29	15538	6/4/2015	8/5/2015	32	C20, Βάρη: 1: 20/4, 2: 8/5	134	29.8	8.606	8.434	16.34	16.02	1.91					
	ΣΚ1_30	15538	6/4/2015	8/5/2015	32	C20, Βάρη: 1: 20/4, 2: 8/5	177.7	30	8.664	8.49	16.34	16.01	2.51					
	ΣΚ1_33	15538	6/4/2015	8/5/2015	32	-	152.5	30.1	8.59	8.4	16.15	15.79	2.15					
FLC25/28, R15488 (40kg/m ³)	R15488_5	Ινοπλισμένο (40 kg/m ³)	27/3/2015	27/4/2015	31	Η πρέσσα σταμάτησε στα 84.1 kN, σε μικρή ρωγμή (βλ. φώτο). Έγινε επανεκκίνηση	117.9	19	2.682	2.424	17.07	16.24	3.95	3.68	0.104	1600	0.836	2.69
	R15488_6	Ινοπλισμένο (40 kg/m ³)	27/3/2015	27/4/2015	31	-	101.2	18.9	2.741	2.43	17.45	16.37	3.41					
FLC30/33, R15517 (65kg/m ³)	R15517_2	Ινοπλισμένο (65 kg/m ³)	31/3/2015	28/4/2015	28	Σταμάτησε στα 73 και έγινε επανεκκίνηση γιατί η ρωγμή ήταν μικρή (φώτο)	79.1	18.8	2.672	2.376	17.01	16.09	2.68	3.05	0.174	1800	0.891	2.57
	R15517_3	Ινοπλισμένο (65 kg/m ³)	31/3/2015	28/4/2015	28	-	102.3	19	2.744	2.47	17.47	16.55	3.43					

2.4.4 Καμπτική Συμπεριφορά Ινοπλισμένων Πλακών

Στον Πίνακα που ακολουθεί, συνοψίζονται οι αντοχές και οι δείκτες απορροφώμενης ενέργειας των δοκιμών.

Πίνακας 2.15: Χαρακτηριστικά αντοχής και απορρόφησης ενέργειας ινοπλισμένων πλακών

Σύνθεση	A/A δοκιμίου	P (kN)	F _{CS} (MPa)	δ _{cr} (mm)	I ₅	I ₁₀	I ₂₀	R _{5,10}	R _{10,20}
R15488 (40 kg/m ³)	15488_1	10.19	3.67	1.29	5.7	11.4	19.7	114	83
	15488_2	11.03	3.97	1.65	4.9	8.1	10	64	19
	15488_3	7.67	2.76	1.06	4.6	8.9	13.5	86	46
Μέση τιμή μ		9.63	3.47	1.33	5.07	9.47	14.40	88.00	49.33
Τυπική Απόκλιση σ		1.75	0.63	0.30	0.57	1.72	4.91	25.06	32.13
σ/μ		0.18	0.18	0.22	0.11	0.18	0.34	0.28	0.65
R15517 (65 kg/m ³)	15517_1	10.23	3.68	1.02	4.6	7.5	11	58	35
	15517_2	18.79	6.76	1.48	3.9	6.6	10.8	54	42
	15517_3	16.16	5.82	1.46	5	8.6	14.1	72	55
Μέση τιμή μ		15.06	5.42	1.32	4.50	7.57	11.97	61.33	44.00
Τυπική Απόκλιση σ		4.38	1.58	0.26	0.56	1.00	1.85	9.45	10.15
σ/μ		0.29	0.29	0.20	0.12	0.13	0.15	0.15	0.23

Όπου

- δ_{cr} Παραμόρφωση αρχικής ρηγμάτωσης (mm)
P_{cr} Φορτίο αρχικής ρηγμάτωσης (kN)
P_u Μέγιστη αντίσταση δοκιμίου (kN)
E₂₅ Απορροφώμενη ενέργεια του διαγράμματος P-δ έως δ = 25 mm (J)

2.5 Σχόλια – Προβλήματα - Παρατηρήσεις

Τα βασικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις πειραματικές εργασίες της παρούσας ενότητας εργασίας είναι οι εξής:

- Το μέτρο ελαστικότητας είναι πράγματι σημαντικά μειωμένο στο ΚΔ συγκριτικά με το ΣΠΣ, σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία και τις ήδη υπάρχουσες μελέτες καθώς και τις κανονιστικές συστάσεις. Επίσης, το μέτρο προκύπτει στις περισσότερες περιπτώσεις λίγο μεγαλύτερο από το θεωρητικά υπολογιζόμενο σύμφωνα με τους κανονισμούς που ελέγχθηκαν (Πίνακας 2.11).
- Οι καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων εμφανίζουν γραμμικότητα, γεγονός αναμενόμενο που έχει εξηγηθεί στην θεωρητική και βιβλιογραφική διερεύνηση. Οι τιμές της μέγιστης παραμόρφωσης σε καθαρή θλίψη δεν διαφέρουν σημαντικά από τις κατά EC2 υπολογιζόμενες (βλ. Σχήμα 2.31: Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής τιμής ε_{lc1} κατά EC2)
- Η επίτευξη μέσων θλιπτικών αντοχών της τάξης των 32 MPa επιτεύχθηκε με πυκνότητα σχεδιασμού του αόπλου ΚΔ τα 1550 kg/m³
- Η εφελκυστική αντοχή του ΚΔ προκύπτει μειωμένη συγκριτικά με το ΣΠΣ, όπως ήταν αναμενόμενο. Επιπλέον, εμφανίζεται συνήθως και μικρότερη από την θεωρητικά προβλεπόμενη κατά EC2 (βλ. παρακάτω Πίνακα)

Πίνακας 2.14: Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών σε διάρρηξη

Πειραματική εκτίμηση εφελκυστικής αντοχής κυλίνδρων διαστάσεων d10 x 20 cm και d15 x 30 cm (Brazilian test)															Θεωρητικός υπολογισμός κατά EC2			
Σύνθεση ΚΔ	Κωδικός Δοκιμίου	Περιγραφή	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία θραύσης	Ηλικία (ημέρες)	Παρατηρήσεις	F (kN)	Μήκος δοκιμίου (cm)	Βάρος 1 (kg)	Βάρος 2 (kg)	γ 1 (kN/m ³)	γ 2 (kN/m ³)	f _{c,sp} (MPa)	f _{ctm,sp} (MPa)	σ/f _{ctm,sp} (σ: τυπική απόκλιση)	Άνω όριο κατηγορίας πυκνότητας (kg/m ³)	η ₁	f _{ctm,sp} (για άσπλο)* (MPa)
LC25/28, 15428	15428_3	LWCPUM045	17/3/2015	17/4/2015	31	-	89.6	19.9	2.615	-	16.73	-	2.87	2.87	-	1600	0.836	2.42
	15454_6	LWCPUM065	20/3/2015	21/4/2015	32	δεν έσπασε ομοιόμορφα	50.13	20.2	2.892	-	18.23	-	1.58	1.59	0.006	1800	0.891	2.87
	15454_4	LWCPUM065	20/3/2015	21/4/2015	32	-	47.06	18.8	3.045	-	19.39	-	1.59					
LC25/28, 15538	ΣΚ1_24	15538	6/4/2015	4/5/2015	28	βάρη: 1: 27/4, 2: 4/5	42.7	20.4	2.722	2.65	16.99	16.54	1.33					
	ΣΚ1_25	15538	6/4/2015	4/5/2015	28	βάρη: 1: 27/4, 2: 4/5	51.5	20.1	2.568	2.496	16.27	15.81	1.63					
	ΣΚ1_22	15538	6/4/2015	4/5/2015	28	βάρη: 1: 27/4, 2: 4/5	54.6	20	2.556	2.49	16.27	15.85	1.74					
	ΣΚ1_34	15538	6/4/2015	8/5/2015	32	Χάθηκε λόγω λανθασμένης ρύθμισης μηχανής θραύσης. Βάρη: 1: 20/4, 2: 8/5	-	30	8.724	8.544	16.46	16.12	-	1.88	0.220	1600	0.836	2.42
	ΣΚ1_29	15538	6/4/2015	8/5/2015	32	C20, Βάρη: 1: 20/4, 2: 8/5	134	29.8	8.606	8.434	16.34	16.02	1.91					
	ΣΚ1_30	15538	6/4/2015	8/5/2015	32	C20, Βάρη: 1: 20/4, 2: 8/5	177.7	30	8.664	8.49	16.34	16.01	2.51					
	ΣΚ1_33	15538	6/4/2015	8/5/2015	32	-	152.5	30.1	8.59	8.4	16.15	15.79	2.15					
	ΣΚ1_31	15538	6/4/2015	4/6/2015	59	C20, Βάρη: 1: 20/4, 2: 4/6	150	30	8.692	8.43	16.40	15.90	2.12	2.11	0.010	1600	0.836	2.42
FLC25/28, R15488 (40kg/m ³)	R15488_5	Ισοπλισμένο (40 kg/m ³)	27/3/2015	27/4/2015	31	Η πρέσσα σταμάτησε στα 84.1 kN, σε μικρή ρωγμή (βλ. φώτο). Έγινε επανεκκίνηση	117.9	19	2.682	2.424	17.07	16.24	3.95	3.68	0.104	1600	0.836	2.69
	R15488_6	Ισοπλισμένο (40 kg/m ³)	27/3/2015	27/4/2015	31	-	101.2	18.9	2.741	2.43	17.45	16.37	3.41					
FLC30/33, R15517 (65kg/m ³)	R15517_2	Ισοπλισμένο (65 kg/m ³)	31/3/2015	28/4/2015	28	Σταμάτησε στα 73 και έγινε επανεκκίνηση γιατί η ρωγμή ήταν μικρή (φώτο)	79.1	18.8	2.672	2.376	17.01	16.09	2.68	3.05	0.174	1800	0.891	2.57
	R15517_3	Ισοπλισμένο (65 kg/m ³)	31/3/2015	28/4/2015	28	-	102.3	19	2.744	2.47	17.47	16.55	3.43					

- Η προσθήκη ιών στο ΚΔ βελτιώνει σημαντικά την καμπτική του συμπεριφορά. Αύξηση παρατηρείται και στην θλιπτική αντοχή αλλά και στο μέτρο ελαστικότητας, πολύ περιορισμένη όμως συγκριτικά με την αύξηση των καμπτικών αντοχών.

Ο αρχικός σκοπός ήταν η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς του ΚΔ από τη σκοπιά του πολιτικού μηχανικού, δηλαδή η διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης του υλικού ως δομικό υλικό σύγχρονων κατασκευών, ο οποίος και επιτεύχθηκε. Κρίνοντας συνολικά από τα πειραματικά δεδομένα των βασικότερων μηχανικών χαρακτηριστικών, όπως η θλιπτική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας και η εφελκυστική αντοχή, συμπεραίνουμε ότι το κισηρόδεμα εμφανίζει υψηλές αντοχές με σχετικά μικρή πυκνότητα, γεγονός που μπορεί να λειτουργήσει ευεργετικά σε πληθώρα κατασκευών.

Ενδεικτικά, μερικές περιπτώσεις στις οποίες η χρήση δομικού ΚΔ μπορεί να γίνει πλεονεκτική είναι οι εξής:

- σε προσθήκες σε υφιστάμενα κτίρια, όπου για την ίδια επιβάρυνση του δομικού συστήματος κατασκευάζονται περισσότεροι όροφοι από ΚΔ συγκριτικά με ΣΠΣ

- σε προσθήκες σε υφιστάμενες κατασκευές όπου η θεμελίωση έχει πραγματοποιηθεί σε μειωμένων μηχανικών χαρακτηριστικών εδάφη ή με σκοπό να υιοθετηθούν οικονομικότερες μέθοδοι θεμελίωσης
- σε κατασκευές όπου μπορεί να συνδυαστούν οι δομικές και μονωτικές ικανότητες του ΚΔ, οδηγώντας σε εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη αλλά και του κόστους της επιπλέον μόνωσης
- σε κατασκευές κατοικιών όπου τα ίδια βάρη αποτελούν σημαντικό ποσοστό των συνολικών φορτίων της κατασκευής
- στη γεφυροποιία, όπου επίσης τα ίδια βάρη είναι σημαντικό ποσοστό των συνολικών φορτίων και η θεμελίωση κρίνεται κυρίως από αυτά
- σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, η μείωση των ιδίων βαρών οδηγεί επίσης στη μείωση της σεισμικής απόκρισης, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά μειωμένα εντατικά μεγέθη και συνεπώς σε μεγάλη μείωση των διατομών των δομικών μελών και του απαραίτητου χάλυβα όπλισης.

Ταυτόχρονα, τα χαρακτηριστικά του ΚΔ φαίνεται να συμβαδίζουν σε γενικές γραμμές με τις υπάρχουσες κανονιστικές διατάξεις του EC2, που σημαίνει ότι οι διατάξεις αυτές μπορούν να καλύψουν τον σχεδιασμό κατασκευών με ΚΔ. Το μειωμένο μέτρο ελαστικότητάς του, όμως, καθώς και η αυξημένη του ψαθυρότητα η οποία μπορεί να εμφανιστεί τόσο στη διατμητική όσο και στη μετελαστική συμπεριφορά του, αποτελούν σημαντικές παραμέτρους που χρήζουν διερεύνησης.

3 Πειραματική διερεύνηση της ανακυκλιζόμενης συμπεριφοράς δοκών

3.1 Εισαγωγή

Ο στόχος της παρούσας διερεύνησης είναι η αποτίμηση πειραματικά των σεισμικών χαρακτηριστικών δομικών στοιχείων όπως δοκών και υποστυλωμάτων από κισσηρόδεμα, όταν αυτά υποβάλλονται σε καμπτική και διατμητική επιπόνηση υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Πιο αναλυτικά, οι κύριοι στόχοι του παρόντος κεφαλαίου είναι:

- Η πραγματοποίηση πειραματικών δοκιμών σε δοκούς από κισσηρόδεμα, καλύπτοντας ένα εύρος παραμέτρων, αποτιμώντας πλήρως την απόκρισή τους. Τα κυριότερα στοιχεία διερεύνησης είναι: η ρηγμάτωση, η δυσκαμψία, η παραμόρφωση, η αντοχή και η πλαστιμότητά τους.
- Η προσπάθεια αναλυτικής καταγραφής της απόκρισής τους υπο καμπτική καταπόνηση
- Η σύγκριση των πειραματικών δεδομένων που εξήχθησαν από την παρούσα μελέτη σε σχέση με τις προδιαγραφές των κανονισμών.

Μέσω αυτής της διερεύνησης της αντισεισμικής συμπεριφοράς του κισσηροδέματος, σκοπεύεται να μελετηθεί η επιρροή των κυρίαρχων διαφοροποιήσεων του με το συμβατικό σκυρόδεμα, όπως η αυξημένη ψαθυρότητά του, όπως εκφράζεται στη μείωση της εφελκυστικής του αντοχής και στη μειωμένη ικανότητα μετελαστικής πλαστικής στροφής και το σημαντικά μειωμένο μέτρο ελαστικότητάς του. Το εύρος των παραπάνω μειώσεων, όπως και τα υπόλοιπα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού που προκύπτουν πειραματικά, συγκρίθηκαν τόσο με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προβλέπουν οι διατάξεις των Ευρωκωδίκων 2 & 8, αλλά και με αποτελέσματα προηγούμενων παρεμφερών πειραμάτων.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, αρχικά πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική και θεωρητική διερεύνηση, μέσω της οποίας μελετήθηκαν οι ήδη υπάρχουσες πειραματικές μελέτες που αφορούν το κισσηρόδεμα και δευτερευόντως άλλα ελαφροσκυροδέματα. Επιπλέον, μελετήθηκε το κανονιστικό πλαίσιο των Ευρωκώδικα 2 και 8 που αφορά το ελαφροσκυρόδεμα το οποίο και εφαρμόστηκε στο σχεδιασμό των δομικών στοιχείων. Όσον αφορά το πειραματικό σκέλος σχεδιάστηκαν, κατασκευάστηκαν και υποβλήθηκαν σε πειραματικό έλεγχο μια σειρά από δοκίμια πραγματικών διαστάσεων από οπλισμένο κισσηρόδεμα. Συγκεκριμένα, δοκιμάστηκαν:

- 5 δοκοί μήκους 2.30 m και διατομής 150 x 300 mm σε μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση τεσσάρων σημείων

- 1 δοκός μήκους 3.30 m και διατομής 150 x 300 mm σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, σε πειραματική διάταξη δοκού δύο ανοιγμάτων
- 2 υποστλώματα μήκους 2.30 m και διατομής 200 x 200 mm σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση τριών σημείων

Ο σχεδιασμός όλων των δοκιμών πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τις συστάσεις των EC2 και EC8, προσομοιώνοντας σε πραγματικές διαστάσεις νέα δομικά στοιχεία αντισεισμικού δομήματος. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε η απαραίτητη βιβλιογραφική και θεωρητική διερεύνηση, μέσω της οποίας μελετήθηκαν οι ήδη υπάρχουσες πειραματικές μελέτες που αφορούν το κισηρόδεμα και δευτερευόντως άλλα ελαφροσκυροδέματα. Ακόμα, υπολογίστηκαν οι τιμές των μεγεθών που προέκυψαν πειραματικά, κατά τις συστάσεις των EC2 και EC8 για συγκριτικούς σκοπούς.

Οι πειραματικές μεταβλητές της παρούσας διερεύνησης είναι οι εξής:

- Χρησιμοποιήθηκαν δύο συνθέσεις ΚΔ, οι οποίες αναπτύχθηκαν από τη LaFarge. Οι κωδικοί αριθμοί των συνθέσεων είναι 15538 και 15820.
- Ο λόγος διάτμησης για τις τέσσερις εκ των έξι δοκών επιλέχθηκε ίσος με 2. Η επιλογή χαμηλής τιμής λόγου διάτμησης πραγματοποιήθηκε για να αναπτυχθούν μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις και κατά συνέπεια να μελετηθεί εκτενέστερα η διατμητική συμπεριφορά τους υπό ανακυκλιζόμενα φορτία. Για τη μια εκ των έξι δοκών επιλέχθηκε λόγος διάτμησης ίσος με 3.
- Στα υποστλώματα εφαρμόστηκαν δυο διαφορετικές τιμές ανηγμένης αξονικής θλιπτικής τάσης, 0.2 και 0.3.
- Ο διαμήκης οπλισμός των δοκών επιλέχθηκε ως εξής: Στο ένα ζεύγος δοκών (Δ1 και Δ2) τοποθετήθηκαν 2Φ14 άνω και 2Φ14 κάτω, ενώ στο άλλο ζεύγος (Δ3 και Δ4) 2Φ16 άνω και 2Φ16 κάτω.
- Τα δοκίμια φορτίστηκαν είτε με ανακυκλιζόμενη είτε με μονοτονική φόρτιση. Οι δοκοί Δ1, Δ4 και Δ5 και τα δύο υποστλώματα υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση ενώ οι Δ2 και Δ3 σε μονοτονική, για συγκριτικούς σκοπούς.

3.2 Βιβλιογραφική και θεωρητική αναθεώρηση

Στοιχεία από την βιβλιογραφία δείχνουν ότι για συγκεκριμένη θλιπτική αντοχή, στα ΕΣ είναι εντονότερα τα φαινόμενα της συστολής ξήρανσης, καθώς και του ερπυσμού. Γενικότερα, παρουσιάζουν μειωμένη δυσκαμψία και αυξημένη ψαθυρότητα σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Η μειωμένη δυσκαμψία, καθώς και το μειωμένο μέτρο ελαστικότητας επηρεάζουν, προφανώς, την σχέση της παραμόρφωσης των δομικών στοιχείων υπό την επιβολή του

φορτίου. Επίσης, η μειωμένη εφελκυστική αντοχή οδηγεί σε πιο γρήγορη ρηγμάτωση, ενώ η ψαθυρότητα του υλικού σε μειωμένη πλαστιμότητα σε σχέση με αυτή του συμβατικού σκυροδέματος. Επί προσθέτως, ένας άλλος παράγοντας που ίσως επηρεάσει την συμπεριφορά των δοκών είναι και η συνάφεια μεταξύ χάλυβα και κισσηροδέματος. Μπορεί να οδηγήσει στην μείωση εμφάνισης δευτερευόντων ρωγμών, μετά την εμφάνιση των κύριων καμπτικών, οδηγώντας στην δημιουργία ρωγμών μεγαλύτερου μεγέθους και αυξημένης απόστασης.

Επιπλέον, η μειωμένη εφελκυστική αντοχή και η συνάφεια χάλυβα-κισσηροδέματος θα οδηγήσει στην μείωση της δυσκαμψίας της δοκού με αποτέλεσμα την αυξημένη παραμόρφωση. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι η μειωμένη εφελκυστική αντοχή, η συνάφεια χάλυβα-κισσηροδέματος, το μειωμένο μέτρο ελαστικότητας και η μειωμένη πλαστιμότητα μπορεί να επηρεάσουν τις βασικές απαιτήσεις σχεδιασμού: το μέγιστο πλάτος ρωγμών και της μέγιστης παραμόρφωσης υπό τα φορτία λειτουργίας, την αντοχή αστοχίας, καθώς και την πλαστιμότητα τα οποία είναι αναγκαίο να προσδιοριστούν στην πράξη.

Όσον αφορά ένα άλλο σημαντικό μέγεθος, την παραμόρφωση θραύσης του ΕΣ, ϵ_{cu} , οι κανονισμοί ACI ($\epsilon_{cu} = 0.003$) και BS ($\epsilon_{cu} = 0.0035$) δεν προβλέπουν την μείωση του σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Στον Ευρωκώδικα, όμως, προβλέπεται μείωση της τιμής της σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\epsilon_{cu} = 0.0035 \eta_1 \quad \text{για} \quad f_{ck} < 50 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{cu} = [0.0026 + 0.035 \{(90 - f_{ck}) / 100\}^4] \quad \text{για} \quad f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$$

Η μείωση της παραμόρφωσης θραύσης του ΕΣ δεν επηρεάζει αισθητά την αντοχή των διατομών αλλά περισσότερο την καμπυλότητα της διατομής και επομένως την πλαστιμότητά της.

Συνοψίζοντας, σύμφωνα με την βιβλιογραφία η συζήτηση για την καμπτική συμπεριφορά μελών από οπλισμένο ΕΣ επικεντρώνεται σε τέσσερα βασικά στοιχεία σχεδιασμού: ρηγμάτωση, παραμόρφωση, αντοχή και πλαστιμότητα. Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού επηρεάζει εμφανώς την ρηγμάτωση και την παραμόρφωση των δοκών. Επίσης, η συνάφεια οπλισμού-ΕΣ καθώς και η δυσκαμψία των μελών από ΕΣ μας προβληματίζει όσον αφορά την πρόβλεψη της συνολικής απόκρισης των μελών υπό καμπτική καταπόνηση.

Επιπλέον, ζητήματα τα οποία αφορούν τον σχεδιασμό των μελών από ΕΣ προβλέπονται από τους κανονισμούς. Παρατηρείται ότι η μειωμένη εφελκυστική αντοχή και η ψαθυρότητα του επηρεάζουν τις σχέσεις αυτών. Η δεδομένα μειωμένη εφελκυστική αντοχή οδηγεί σε μεγαλύτερες απαιτήσεις μάτισης των οπλισμών. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, κάποιοι

κανονισμοί προβλέπουν μειωμένη παραμόρφωση αστοχίας του ΕΣ. Όσον αφορά την ψαθυρότητα, δεν προβλέπουν μειώσεις στην πλαστιμότητα του ΕΣ, το οποίο απαιτεί περαιτέρω επιστημονική έρευνα.

Μια έκφραση της υψηλότερης ψαθυρότητας των ΕΣ είναι η κανονιστική διάταξη του EC2 [EC2 § 11.5.1] σύμφωνα με την οποία η τιμή της διαθέσιμης ικανότητας στροφής θρη1 πρέπει να μειωθεί κατά το συντελεστή $\epsilon_{cu2}/\epsilon_{cu2}$.

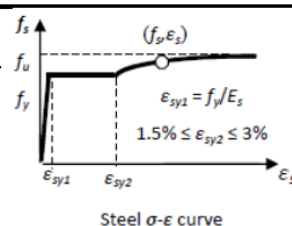
3.2.1 Υπάρχουσες Σχετικές Πειραματικές Εργασίες

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζεται η ήδη υπάρχουσα εμπειρία σε παρόμοια πειράματα δοκών και υποστλωμάτων οπλισμένου κισσηροδέματος.

Οι Κωτσοβός και Μπαδογιάννης (2013) πραγματοποίησαν μια σειρά πειραμάτων έξι συνολικά δοκών με ισάριθμες συνθέσεις κισσηροδέματος. Οι πυκνότητες και οι αντίστοιχες αντοχές που προκύπτουν για τη κάθε σύνθεση, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

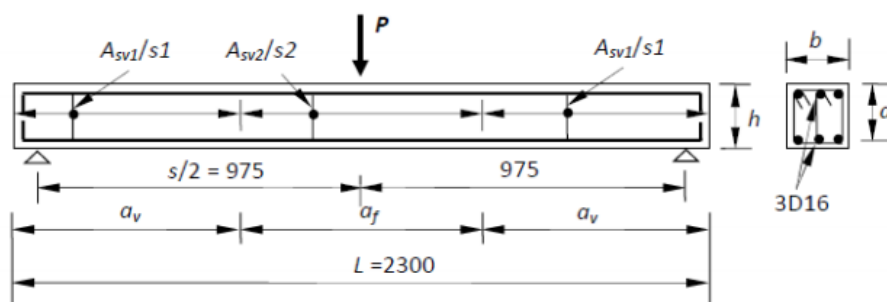
Πίνακας 3.1: Ζεύγη αντοχών και πυκνοτήτων για τις έξι συνθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε δοκό [Κωτσοβός και Μπαδογιάννης, 2013]

Beam	LWAC -R-M	LWAC -S-M	LWAC -R-C1	LWAC -R-C2	LWAC -S-C1	LWAC -S-C2
f_c (Mpa)	36.40	32.40	26.50	22.80	25.20	28.00
$\epsilon_c \times 10^3$	2.3	2.4	2.2	2.2	2.1	2.2
Density (Kg/m ³)	1640	1630	1560	1460	1480	1460



Οι λεπτομέρειες όπλισης των δοκών παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.2: Η πειραματική διάταξη και η όπλιση κάθε δοκού [Κωτσοβός και Μπαδογιάννης, 2013]



Specimens	b	h	d	a_v	a_f	$A_{sv1}/s1$	$A_{sv2}/s2$
NC-S-C	200	200	170	750	800	D8@160	D8@50
NC-R-C	150	300	270	750	800	D8@150	D8@50
NC-R-M	150	300	270	750	800	D8@150	D8@50
LWAC-S-C	200	200	170	850	600	D8@125	D8@50
LWAC-R-C	150	300	270	750	800	D8@150	D8@50

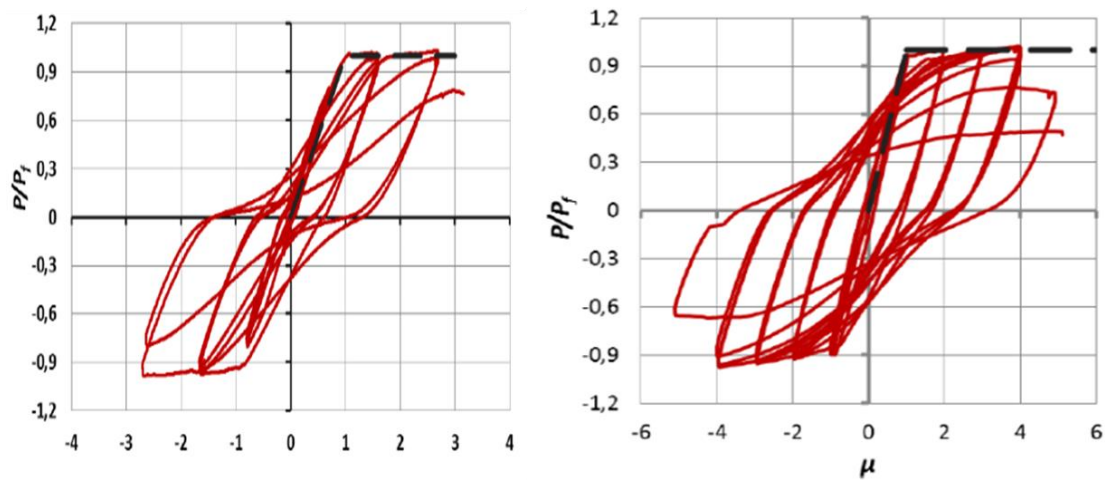
For beams LWAC-R-M, bottom reinforcement also comprises 3D16, whereas the top longitudinal reinforcement comprises 2D14 rather than 3D16 and the transverse reinforcement two-, rather than three-, legged stirrups

All dimensions in mm

Τα συμπεράσματα αυτής της σειράς πειραμάτων συνοψίζονται ως εξής: Το υπολογιζόμενο φορτίο αστοχίας υποεκτιμά την πειραματικά μετρούμενη τιμή του κατά 2-10%. Η δ_y για το ΚΔ βρέθηκε μεγαλύτερη κατά 30% σε σύγκριση με το ΣΠΣ για τη διατομή 15x30 ενώ περίπου ίδια για τετραγωνική διατομή. Στη μονοτονική φόρτιση, ο δείκτης πλαστιμότητας σε όρους μετατοπίσεων ήταν κατά 25% μεγαλύτερος για το ΚΔ, ενώ ο τύπος ρηγμάτωσης και αστοχίας ήταν κοινός για ΚΔ και ΣΠΣ. Στην ανακυκλιζόμενη φόρτιση, παρατηρήθηκε ότι οι δοκοί με τις τετραγωνικές διατομές από ΚΔ παρουσίασαν καλύτερη μετελαστική συμπεριφορά από τις αντίστοιχες από ΣΠΣ, καθώς ο δείκτης πλαστιμότητας στον τελευταίο κύκλο πριν τη θραύση ήταν μεγαλύτερος του 3.5, ενώ ο δείκτης για το ΣΠΣ ήταν 2.7. Επιπλέον, σε όλες τις δοκούς, η πλαστιμότητα ήταν σε συμφωνία με την απαιτούμενη κατά EC8 για κατηγορία DCH. Ενώ όμως ο τύπος ρηγμάτωσης για ΚΔ και ΣΠΣ ήταν παρόμοιος, στο ΚΔ η αστοχία είναι καμπτική επέρχεται στο μέσο των δοκών ενώ το ΣΠΣ αστοχεί σε καμπτοδιατμητικές ρωγμές στο μήκος διάτμησης.



Σχήμα 3.1: Αστοχία δοκού από ΣΠΣ [NCB-S-C] (αριστερά) και από ΚΔ [LWAC-S-C1] (δεξιά) [Κωτσοβός και Μπαδογιάννης, 2013]



Σχήμα 3.2: Ανηγμένα διαγράμματα φορτίου – παραμόρφωσης δοκού από ΣΠΣ [NCB-S-C] (αριστερά) και από ΚΑ [LWAC-S-C1] (δεξιά) [Κωτσοβός και Μπαδογιάννης, 2013]

Οι Καφφετζάκης και Παπανικολάου (2011) πραγματοποίησαν μια σειρά πειραμάτων έξι συνολικά δοκών και 4 υποστρωμάτων. Χρησιμοποίησαν 2 συνθέσεις: α) μία σύνθεση από αυτοσυμπυκνούμενο κισσηρόδεμα (ΑΣΚ) και β) μία σύνθεση αυτοσυμπυκνόμενου σκυροδέματος (ΚΠΑΣΣ) για λόγους σύγκρισης. Οι συνθέσεις παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 3.3: Συνθέσεις ΑΣΚ και ΚΠΑΣΣ (Καφφετζάκης και Παπανικολάου, 2011)

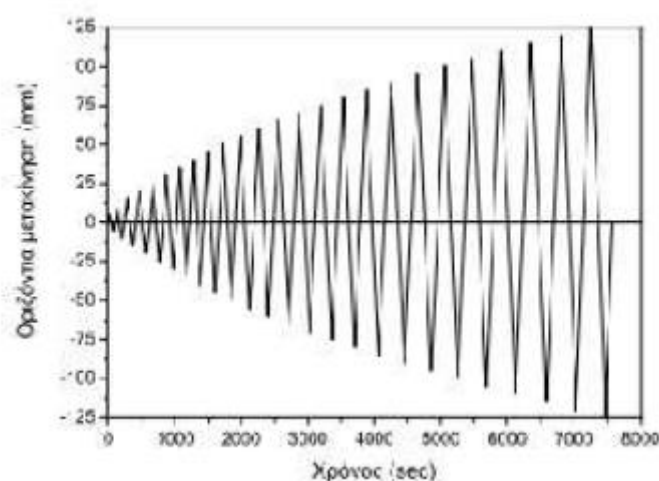
Συστατικά	Αναλογίες συστατικών [kg/m^3]	
	SF _{100,0}	ΚΠΑΣΣ
Τσιμέντο Π42.5N	379.0	-
Τσιμέντο Ι32.5N	-	430.0
LF ₁₀	94.0	-
SF	30.5	-
Άμμος κίσηρης	344.5	-
Ποτάμια άμμος	-	1080.0
Λεπτόκοκκο κλάσμα κίσηρης [4-8 mm]	120.5	-
Χονδρόκοκκο κλάσμα κίσηρης [8-16 mm]	268.0	-
Αδρανή κανονικής πυκνότητας [4-8 mm]	-	-
Αδρανή κανονικής πυκνότητας [8-16 mm]	-	490.0
SP	5.7	5.5
Σταθεροποιητής	1.9	0.9
Επιταχυντής πήξης	1.9	-
Ενεργό νερό	151.0	230.0
Νωπή πυκνότητα	1590.0	2260.0

Από τα πειράματα προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής των παραπάνω συνθέσεων προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πίνακας 3.4: Θλιπτικές αντοχές συνθέσεων (Καφφετζάκης και Παπανικολάου, 2011)

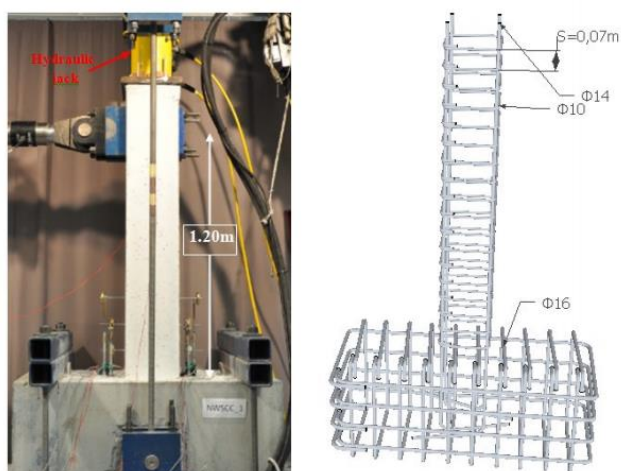
Είδος δοκιμών	Υποστλωμάτα		Δοκοί τύπου Κ		Δοκοί τύπου Δ ¹			
	SF _{100_0}	ΚΠΑΑΣΣ	SF _{100_0}	ΚΠΑΑΣΣ	SF _{100_0} #1	SF _{100_0} #2	ΚΠΑΑΣΣ#1	ΚΠΑΑΣΣ#2
$f_{lcm,cube}$ [MPa]	33.5	43.7	34.0	47.0	33.5	33.9	45.0	46.3
$f_{lcm,sp}$ [MPa]	2.2	3.3	2.2	3.2	2.2	2.2	3.4	3.3

Τα δοκίμια των υποστλωμάτων είχαν ύψος 1.4 m, διατομής 250 x 250 mm και θεμελιώνονται σε πλάκα διαστάσεων 1.10 x 0.5 m και βάθους 0.50 m. Η επιβολή του φορτίου γίνεται σε ύψος 1.20 m. Επιβλήθηκε ανακυκλιζόμενη φόρτιση σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα.

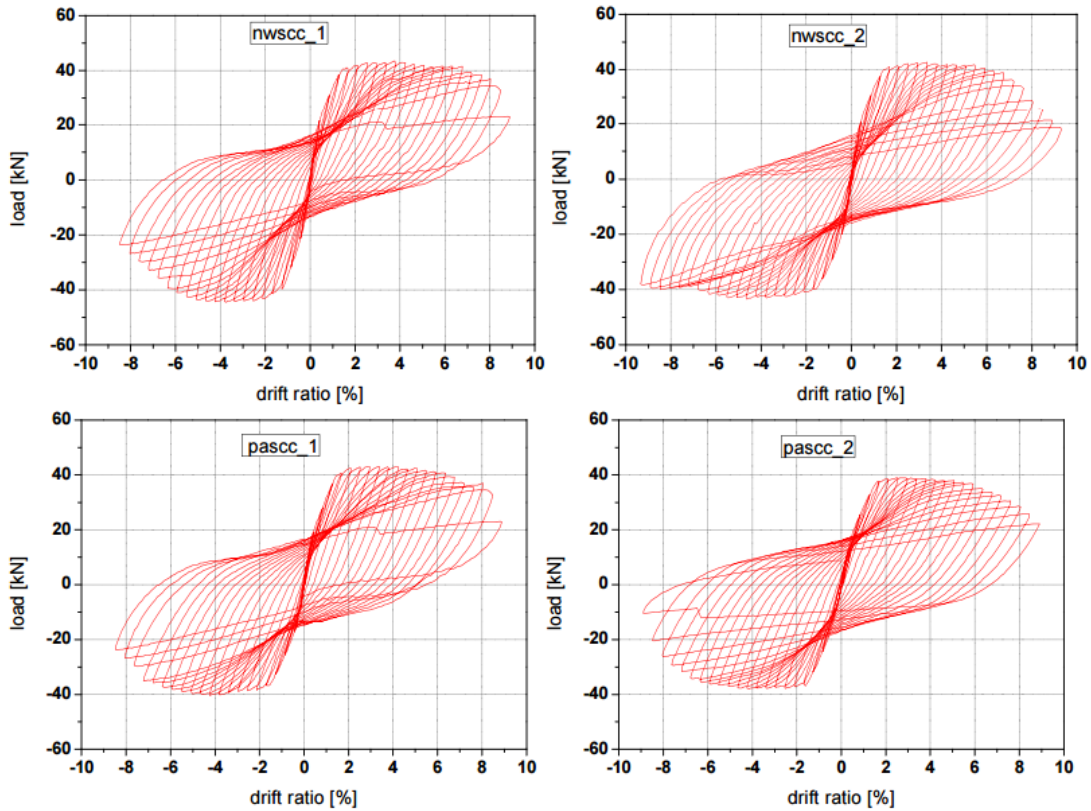


Σχήμα 3.3: Χρονοϊστορία φόρτισης (Καφφετζάκης και Παπανικολάου, 2011)

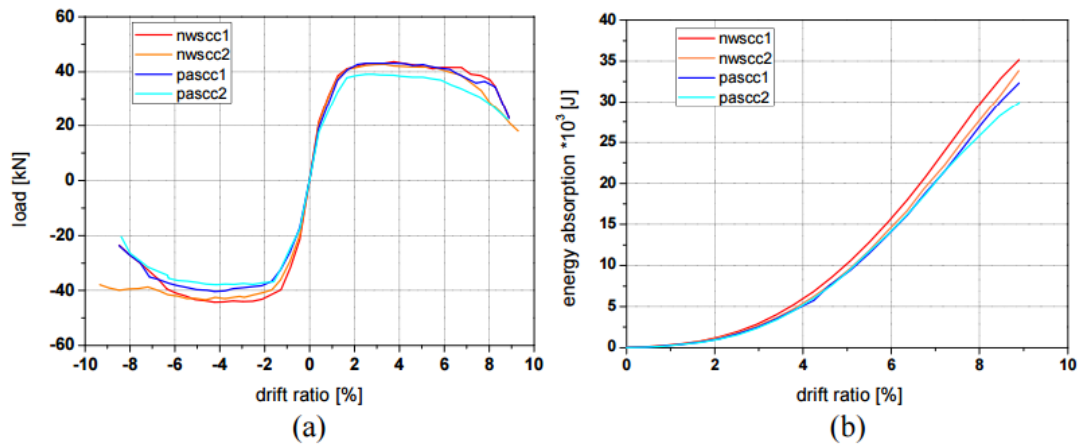
Η διάταξη της φόρτισης των υποστλωμάτων παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 3.1: Διάταξη φόρτισης υποστλωμάτων (Καφφετζάκης και Παπανικολάου, 2011)

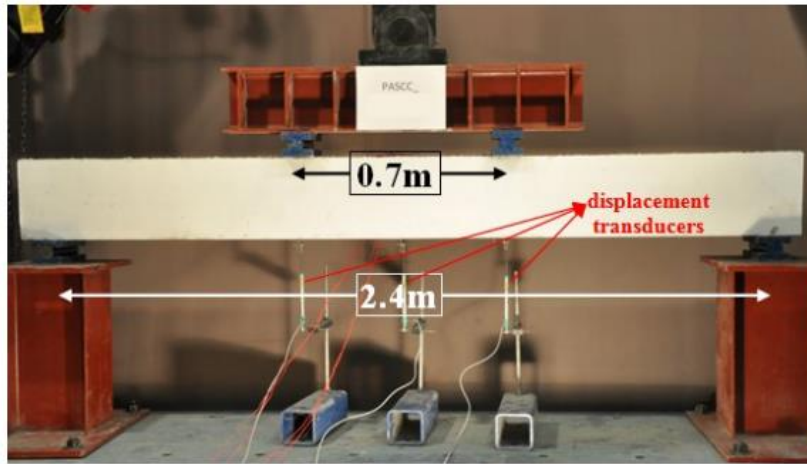


Σχήμα 3.4: Διαγράμματα φορτίσεων Υποστλωμάτων

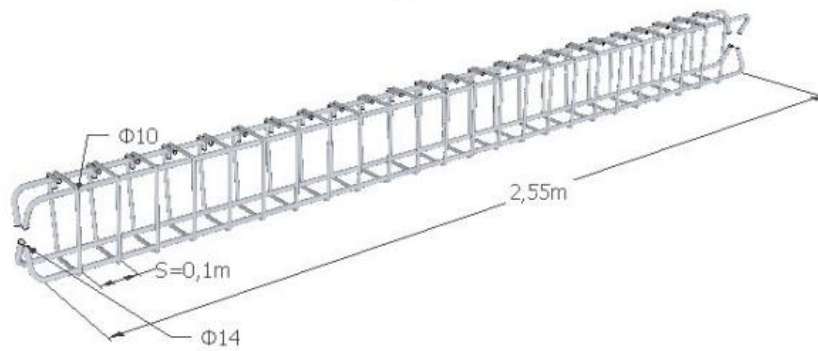


Σχήμα 3.5: Περιβάλλουσες φορτίσεις και απορρόφηση ενέργειας υποστλωμάτων

Όσον αφορά τις δοκούς παράχθηκαν 3 δοκίμια από ΑΣΚ και 3 δοκίμια από ΚΠΑΣΣ. Η φόρτιση ήταν μονοτονική για τις 2 δοκούς και για τις υπόλοιπες ήταν ανακυκλιζόμενη. Οι δοκοί είχαν συνολικό μήκος 2.40 m και διαστάσεις διατομής 250 mm x 150 mm. Ο διαμήκης σπλισμός των δοκών ήταν 2Φ10 στην άνω και κάτω παρειά και σπλισμός διάτμησης Φ10/100. Παρακάτω παρουσιάζονται η διάταξη φόρτισης καθώς και ο σπλισμός των δοκών.



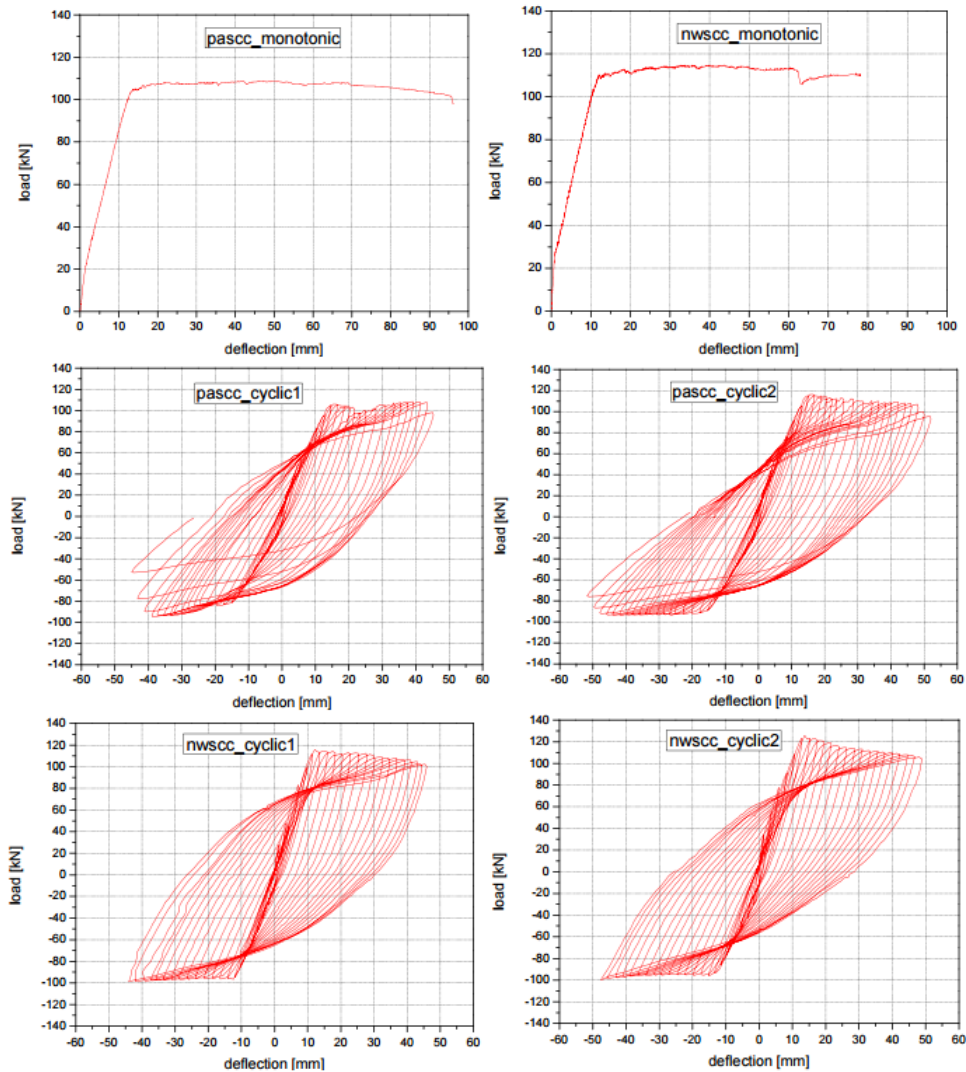
(a)



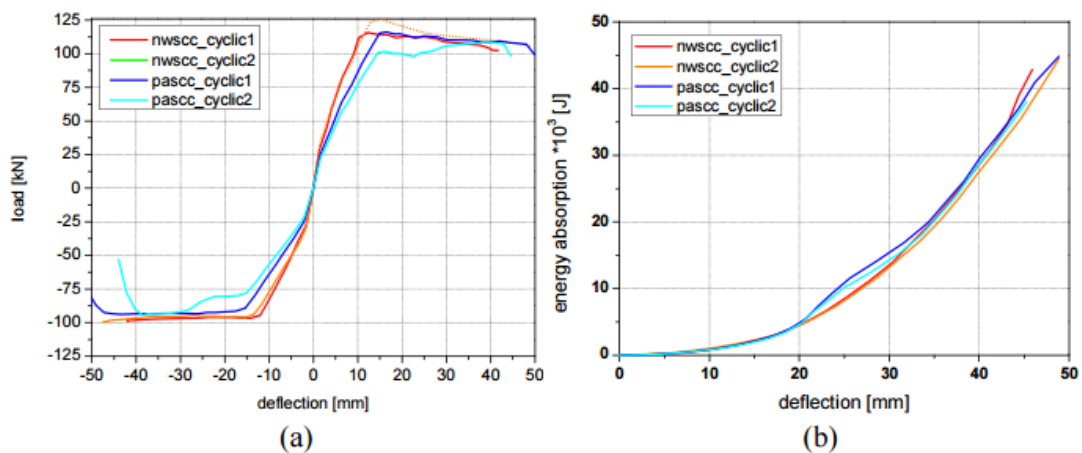
(b)

Σχήμα 3.6: Διάταξη φόρτισης (a) και όπλιση δοκών (b)

Τα συνολικά αποτελέσματα μονοτονικής και ανακυκλιζόμενης φόρτισης των δοκών καθώς και η απορροφούμενη ενέργεια σε σχέση με την επιβαλλόμενη μετατόπιση.



Σχήμα 3.7: Πειραματικά αποτελέσματα δοκών σε μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση



Σχήμα 3.8: Περιβάλλουσες φορτίσεις και απορρόφηση ενέργειας δοκών

Τα συμπεράσματα αυτής της σειράς πειραμάτων συνοψίζονται ως εξής:

- Η συμπεριφορά των ανακυκλιζόμενων υποστρωμάτων και των δοκών ΑΣΚ είναι απόλυτα συγκρίσιμη σε όρους μέγιστου φορτίου, μέγιστης μετατόπισης, πλαστιμότητας, ενέργειας απορρόφησης και αριθμού βρόχων υστέρησης μέχρι την αστοχία.
- Ο αριθμός των αναπτυσσόμενων ρωγμών στα καμπτόμενα μέλη υπήρξε μεγαλύτερος για το ΑΣΚ, ενώ τα μέλη από ΚΠΑΣΣ παρουσίασαν μεγαλύτερες τιμές μέγιστου εύρους ρωγμής και στροφής χορδής στη βάση των υποστρωμάτων.
- Όλα τα καμπτόμενα μέλη ΑΣΚ παρουσίασαν μικρότερη αρχική δυσκαμψία συγκριτικά με τα αντίστοιχα μέλη ΚΠΑΣΣ.
- Δοκοί ΑΣΚ χωρίς οπλισμό διάτμησης, δοκιμαζόμενες έναντι τέμνουσας, παρουσίασαν παραπλήσια ανηγμένη διατμητική αντοχή με αντίστοιχες δοκούς ΚΠΑΣΣ. Ακόμη, οι δοκοί ΑΣΚ παρουσιάζουν μικρότερη ποσοστιαία πτώση φορτίου κατά τις ρηγματώσεις και μικρότερα εύρη ρωγμών. Τα παραπάνω υποδεικνύουν πιο ομαλή εξέλιξη της ρηγμάτωσης και αποτελεσματικότερη μεταβίβαση διατμητικών τάσεων κατά μήκος των παρειών αυτής. Οι γραμμές θραύσης διαπερνούν (όπως και στο συμβατικό ΕΣ) όλες τις φάσεις του ΑΣΚ (τσιμεντοπολτός, μεταβατική ζώνη, ΕΑ), οι οποίες χαρακτηρίζονται από μικρή διασπορά μηχανικών ιδιοτήτων. Οι μηχανισμοί ανάληψης διατμητικών τάσεων από το ΚΠΑΣΣ δεν διαφέρουν από εκείνους του ΣΔΣ.
- Οι υπολογισθείσες τιμές των ροπών αντοχής για τα καμπτόμενα μέλη μέσω ανάλυσης διατομής και της αντοχής σε τέμνουσα συμφωνούν με τις πειραματικά προσδιορισθείσες, έχοντας μέγιστη απόκλιση στο σύνολό τους 14%.

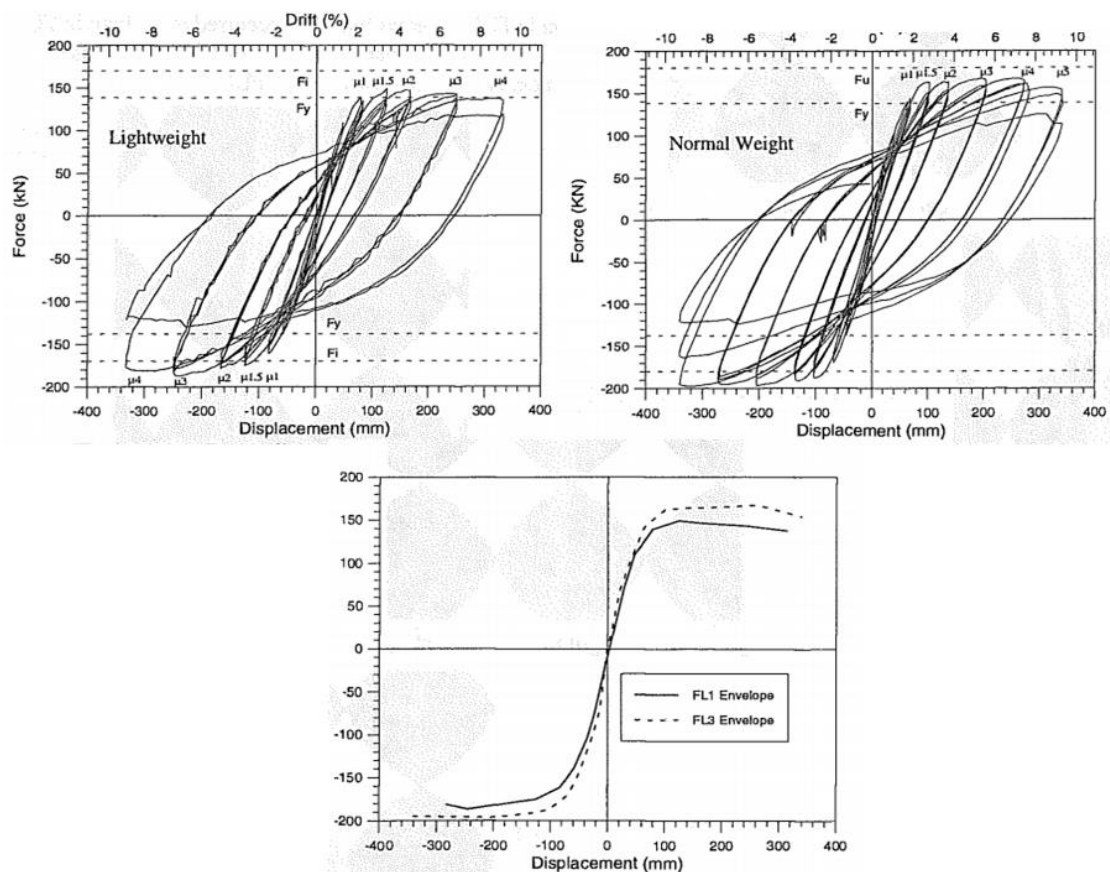
Οι Kowalski, Priestley και Seible (1999) πραγματοποίησε ένα πειραματικό πρόγραμμα με αντικείμενο τη συμπεριφορά του ΕΣ σε διατμητική και καμπτική καταπόνηση. Το ελαφροαδρανές που χρησιμοποιήθηκε ήταν η διογκωμένη άργιλος (LECA - Lightweight Expanded Clay Aggregate).

Για την αποτίμηση της καμπτικής συμπεριφοράς του ΕΣ, κατασκευάστηκαν τρία υποστρώματα, τα FL1, FL2 από ΕΣ και το FL3 το οποίο είναι αντίγραφο του FL1 αλλά χρησιμοποιώντας ΣΠΣ, όλα μήκους 3.66 m και διαμέτρου 457mm. Ο διαμήκης οπλισμός σε όλες τις περιπτώσεις ήταν 30Φ16 και ο οπλισμός διάτμησης Φ10/76 και Φ6/51 για τα FL1 και FL2, αντίστοιχα. Οι αντοχές του σκυροδέματος για τα FL1 και FL2 ήταν περίπου 36 MPa και 38.5 MPa αντίστοιχα, ενώ το βάρος του σκυροδέματος ήταν περίπου 1800 kg/m³.

Τα υποστυλώματα υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, από την οποία εξάχθηκαν τα εξής συμπεράσματα:

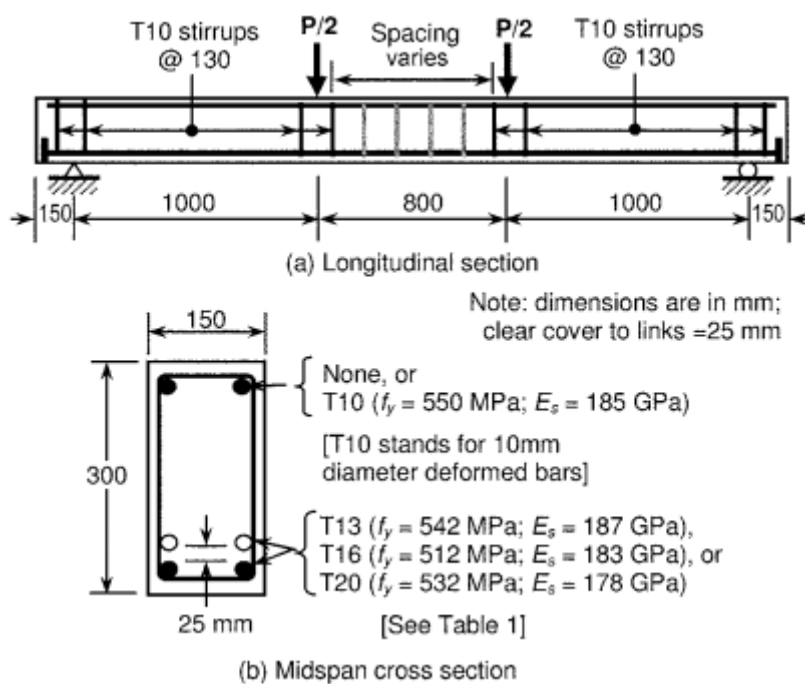
Η αρχική δυσκαμψία του FL1 εμφανίστηκε λίγο ελαττωμένη σε σχέση με το FL3, παρά την ίδια περίπου αντοχή του σκυροδέματος. Μειωμένη είναι επίσης και η μέγιστη δύναμη κάθε κύκλου για το ΕΣ, όπως φαίνεται στη περιβάλλουσα των διαγραμμάτων των ανακυκλίσεων (3ο διάγραμμα στο σχήμα 3.9). Οι μειώσεις αυτές όμως είναι σχετικά μικρές, ενώ παράλληλα η μορφή των βρόχων των ανακυκλίσεων δεν διαφέρει σημαντικά για ΣΠΣ και ΕΣ, συμπεραίνοντας ότι το ΕΣ παρουσιάζει αξιόπιστη ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά.

Συνοψίζοντας, το ΕΣ έχει συγκρίσιμη καμπτική συμπεριφορά με το ΣΠΣ, άρα κρίνεται αξιόπιστο υλικό ώστε να σχεδιαστεί να αναλάβει ανελαστικές παραμορφώσεις. Δεν μπορεί όμως να αγνοηθεί η παρατηρούμενη μικρότερη παραμόρφωση αστοχίας του θλιβόμενου ΕΣ, αλλά και οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις του λόγω του μειωμένου μέτρου ελαστικότητας. Απ' την άλλη μεριά όμως, τόσο η καμπτική αντοχή όσο και η απορρόφηση ενέργειας δεν είναι σημαντικά μειωμένες στο ΕΣ.



Σχήμα 3.9: Καμπύλες δύναμης - μετατόπισης για ΕΣ και ΣΠΣ (1ο και 2ο διάγραμμα) και οι αντίστοιχες περιβάλλουσες (3ο διάγραμμα)

Στην εργασία των L.H. Sin et al (2011) ελέγχθηκαν συνολικά 25 δοκοί από ΕΣ και 3 από ΣΠΣ, για συγκριτικούς σκοπούς. Μελετήθηκαν 3 τύποι ΕΣ: α) σκυροδέματος με ελαφρά αδρανή β) αφροσκυρόδεμα και γ) μία σύνθεση από αφροσκυρόδεμα με ελαφρά αδρανή. Οι παράμετροι που ερευνήθηκαν είναι η επιρροή του τύπου του σκυροδέματος, της θλιπτικής του αντοχής, του ποσοστού οπλισμού, της διανομής του εφελκόμενου οπλισμού στην καμπτικώς θλιβόμενη ζώνη. Όλες οι δοκοί ήταν ορθογωνικής διατομής με πλάτος 150mm και ύψος 300mm. Το μήκος τους ήταν 3100mm και η απόσταση των στηρίξεων 2800mm. Στις δοκούς επιβλήθηκαν δύο συγκεντρωμένα συμμετρικά φορτία όπου η μεταξύ τους απόσταση ήταν 800mm και η απόσταση από την στήριξη ήταν 1000mm. Η φόρτιση ήταν μονοτονική. Το ΕΑ που χρησιμοποιήθηκε ήταν η διογκωμένη άργιλος (LECA) με τις θλιπτικές αντοχές (κύβου 100x100x100 mm) να κυμαίνονται μεταξύ 20 και 80 MPa. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, η πειραματική διάταξη και οι λεπτομέρειες όπλισης των δοκών παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10: Πειραματική διάταξη και όπλιση δοκών [Sin et al, 2011]

Οι λεπτομέρειες των δοκών και οι παράμετροι αυτών που μελετήθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

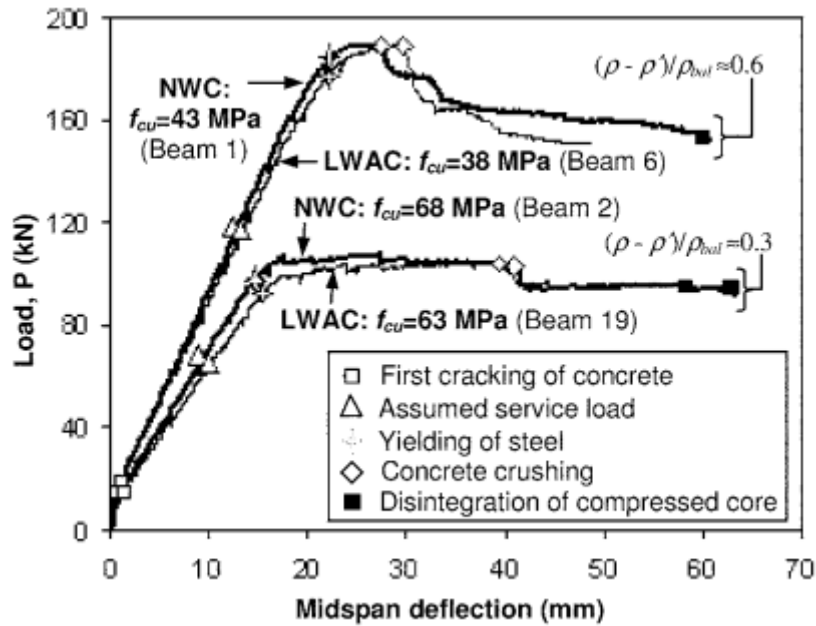
Πίνακας 3.5: Λεπτομέρειες των δοκών και των παραμέτρων που μελετήθηκαν

Beam No.	Type of concrete	Target f_{cu} (MPa)	Tension bars	Comp. bars	Stirrup in flexural zone	ρ (%)	ρ' (%)	$(\rho-\rho')/\rho_{bal}^*$	ρ_s (%)	Parameters & associated groupings							
										TC	f_{cu}	A_{st}	A_{sc}	Σ_o	s		
1	NWC	35	2-T16	2-T10	T10 @ 130	1.02	0.43	0.28	1.60	I							
2		65	4-T16	2-T10	T10 @ 130	2.22	0.43	0.62	1.60	II	V						
3		80	4-T16	2-T10	T10 @ 130	2.22	0.43	0.54	1.60	III	V						
4	LWAC	20	2-T13	2-T10	T10 @ 130	0.67	0.43	0.15	1.60	IV	I						
5		35	2-T13	2-T10	T10 @ 130	0.67	0.43	0.12	1.60	I	III						
6			2-T16	2-T10	T10 @ 130	1.02	0.43	0.28	1.60	I	II	III					
7			2-T20	2-T10	T10 @ 130	1.61	0.43	0.55	1.60		III	III					
8		50	2-T16	2-T10	T10 @ 130	1.02	0.43	0.24	1.60		II	I					
9			2-T20	none	none	1.61	0.00	0.62	0.00				II			II	
10			2-T20	2-T10	T10 @ 180	1.61	0.43	0.47	1.16							II	
11			2-T20	2-T10	T10 @ 130	1.61	0.43	0.47	1.60		III	I	II	I		II	
12			4-T13	2-T10	T10 @ 130	1.45	0.43	0.44	1.60			II		I			
13			4-T16	2-T10	T10 @ 130	2.22	0.43	0.74	1.60		IV	II	I			I	
14			4-T16	2-T10	T10 @ 90	2.22	0.43	0.72	2.31							I	
15			4-T16	2-T10	T10 @ 50	2.22	0.43	0.72	4.16							I	
16			4-T16	2-T13	T10 @ 130	2.22	0.73	0.61	1.60					I			
17			4-T16	2-T16	T10 @ 130	2.22	1.11	0.45	1.60					I			
18			65	2-T16	2-T10	T10 @ 130	1.02	0.43	0.21	1.60		II	IV				
19				4-T16	2-T10	T10 @ 130	2.22	0.43	0.59	1.60	II	IV	IV				
20		2-T16		2-T10	T10 @ 130	1.02	0.43	0.16	1.60			II	V				
21		80	4-T16	2-T10	T10 @ 130	2.22	0.43	0.47	1.60	III	IV	V					
22	2-T13		2-T10	T10 @ 130	0.67	0.43	0.26	1.60	IV		VI						
23	2-T16		2-T10	T10 @ 130	1.02	0.43	0.45	1.60			VI	VI			III		
24	LWFC	20	2-T16	2-T10	T10 @ 50	1.02	0.43	0.45	4.16						III		
25		35	2-T16	2-T10	T10 @ 130	1.02	0.43	0.30	1.60	I	VI						
26	LWAFc	35	2-T16	2-T10	T10 @ 130	1.02	0.43		1.60								
27		35	2-T16	2-T10	T10 @ 130	1.02	0.43	0.31	1.60	I							
28		35	2-T16	2-T10	T10 @ 130	1.02	0.43		1.60								

Πίνακας 3.6: Παραμορφώσεις και πλαστιμότητα των δοκών

Beam No.	Service load* P_s (kN)	Deflection at service load (mm)	Ductility index			
			Curvature		Deflection	
			$\mu_c = \frac{\phi_u}{\phi_y}$	$\mu_{c,f} = \frac{\phi_f}{\phi_y}$	$\mu_d = \frac{\delta_u}{\delta_y}$	$\mu_{d,f} = \frac{\delta_f}{\delta_y}$
1	66.7	9.4	4.47	8.82	2.56	4.11
2	118.0	11.5	1.96	5.12	1.46	2.49
3	117.8	11.6	2.72	2.91	1.90	1.98
4	47.1	9.3	4.07	8.65	2.30	4.63
5	47.3	9.5	4.19	4.19	3.03	3.12
6	65.7	10.3	4.17	6.80	2.64	3.52
7	100.9	12.1	2.24	3.35	1.57	1.83
8	67.0	9.8	4.50	4.49	3.77	3.82
9	104.1	11.3	1.25	1.80	1.29	1.44
10	105.2	11.4	2.59	2.67	1.85	1.93
11	106.3	11.1	2.82	3.81	1.85	2.12
12	83.5	11.3	3.44	7.33	2.26	3.42
13	111.1	12.5	1.97	3.32	1.57	1.90
14	114.1	12.7	2.01	3.25	1.61	1.87
15	112.3	13.1	1.92	6.81	1.64	3.82
16	113.3	12.4	2.29	5.00	1.67	2.48
17	114.1	12.3	1.87	7.16	1.60	3.67
18	67.3	9.5	4.72	5.98	2.98	3.98
19	118.0	12.0	2.40	4.47	1.72	2.26
20	64.9	8.0	5.93	5.94	3.29	4.05
21	116.2	10.5	3.33	6.65	1.82	3.10
22	42.3	16.4	3.38	8.82	1.82	3.47
23	61.3	16.9	2.06	5.30	1.43	2.34
24	57.4	16.4	3.44	10.05	1.77	3.70
25	63.5	17.1	2.88	5.27	1.64	2.33
26	61.2	10.6	3.82	6.00	1.69	2.26
27	62.1	14.1	2.27	7.53	1.48	3.10
28	61.0	12.6	3.17	8.21	1.64	3.30

Η τυπική πειραματική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης στο μέσο του ανοίγματος για ΕΣ και για ΣΠΣ φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.11: Τυπική καμπύλη φορτίου – μετατόπισης στο μέσο για ΕΣ και ΣΠΣ [Sin et al, 2011]

Οι συγγραφείς παρατήρησαν ότι:

- η ρηγμάτωση των δοκών από ΕΣ, όσον αφορά το πλήθος τους και το πλάτος τους, είναι οριακά καλύτερη συγκριτικά με αυτήν των δοκών από ΣΠΣ. Από σύγκριση των κανονισμών ACI 318-05, BS 8110, EC2 και CEB-FIP προέκυψε ότι τις πιο κοντά στις πειραματικές τιμές προέβλεψε ο EC2.
- Στο επίπεδο φορτίων λειτουργίας, οι δοκοί από ΕΣ παρουσίασαν μεγαλύτερες παραμορφώσεις συγκριτικά με το ΣΠΣ, χωρίς όμως οι διαφορές να ξεπερνούν το 10%. Επιπλέον, η πλαστιμότητα που αναπτύσσεται στις δοκούς από ΕΣ είναι γενικά μικρότερη από αυτή στο ΣΠΣ, με τον ACI 318-05 να προσεγγίζει καλύτερα τις πειραματικές τιμές πλαστιμότητας για το ΕΣ.
- Η πλαστιμότητα στο ΕΣ μπορεί να βελτιωθεί όταν η απόσταση μεταξύ των οπλισμών διάτμησης στο χώρο της μέγιστης ροπής μειωθεί κάτω του $d/4$ (με d το στατικό ύψος του εφελκόμενου οπλισμού).
- Για να επιτευχθεί ένας δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων τουλάχιστον 3, είναι αναγκαίο να μειωθεί το άνω όριο του ποσοστού του εφελκόμενου οπλισμού σε σύγκριση με το ΣΠΣ, με προτεινόμενη τιμή την $0.4 \rho_{bal}$, όπου ρ_{bal} το ποσοστό οπλισμού που δίνει εξισορροπημένη κατάσταση παραμορφώσεων στη διατομή.

3.3 Περιγραφή των Πειραμάτων που Διεξήχθησαν

Στην παρούσα Ενότητα Εργασίας συνολικά δοκιμάστηκαν 8 δοκίμια, εκ των οποίων τα 6 ήταν δοκοί και τα 2 υποστυλώματα. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του κάθε δοκιμίου και της αντίστοιχης φόρτισής του παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 3.7: Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά δοκιμίων

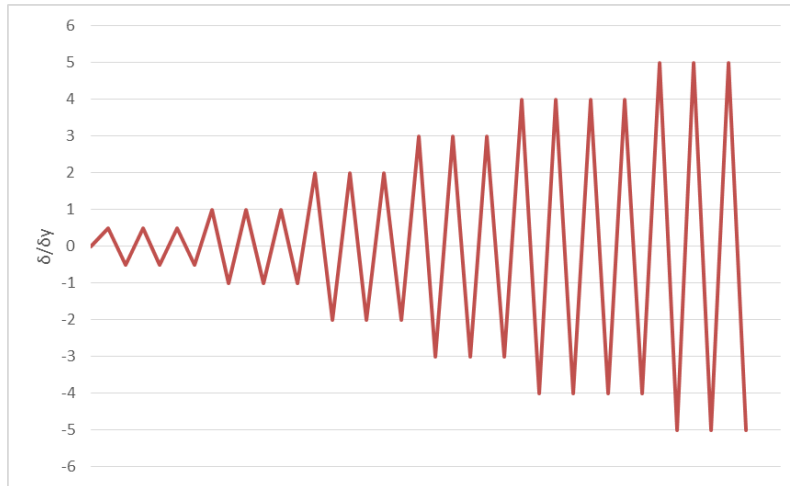
Δοκίμιο	b (mm)	h (mm)	f_{cm} (MPa)	Άνω οπλισμός	Κάτω οπλισμός	a/d	N (kN)	v_d	Οπλισμός διάτμησης	Μήκος δοκού (m)	Τύπος φόρτισης
Δ1	150	300	32	2Φ14	2Φ14	2	0	0.0	Φ8/100	2.30	Ανακυκλιζόμενη
Δ2	150	300	32	2Φ14	2Φ14	2	0	0.0	Φ8/100	2.30	Μονοτονική
Δ3	150	300	32	2Φ16	2Φ16	2	0	0.0	Φ8/100	2.30	Μονοτονική
Δ4	150	300	32	2Φ16	2Φ16	2	0	0.0	Φ8/100	2.30	Ανακυκλιζόμενη
Δ5	150	300	44	2Φ14	2Φ14	4 (δύο ανοιγμάτων)	0	0.0	Φ8/100	3.30	Ανακυκλιζόμενη
Δ6	150	300	32	2Φ14	2Φ14	3	0	0.0	Φ8/100	2.30	Ανακυκλιζόμενη
Υ1	200	200	32	8Φ14 περιμετρικός		5.5	150	0.2	Φ8/100	2.30	Ανακυκλιζόμενη
Υ2	200	200	32	8Φ14 περιμετρικός		5.5	250	0.3	Φ8/100	2.30	Ανακυκλιζόμενη

Όπου

N το αξονικό θλιπτικό φορτίο (θλίψη θετική)

v_d N/bdf_{cd}

Η φόρτιση που επιβλήθηκε ήταν είτε ανακυκλιζόμενη είτε μονοτονική. Στη περίπτωση της μονοτονικής, η ελεγχόμενη παραμόρφωση στο μέσο της δοκού αυξάνονταν με περίπου σταθερό ρυθμό μέχρι την τελική αστοχία, ενώ στην περίπτωση της ανακυκλιζόμενης, οι παραμορφώσεις στο μέσο της δοκού (ή υποστυλώματος) ακολουθήσαν την χρονοϊστορία του παρακάτω σχήματος, δηλαδή ± 0.5 , 1, 2, 3, 4 και 5 δ_y , με δ_y την μετακίνηση στο μέσο της δοκού που αντιστοιχεί στη διαρροή της μεσαίας διατομής. Ειδικά για τη δοκό Δ5, η μετακίνηση δ αναφέρεται στην μετακίνηση στο μέσο του μεγάλου ανοίγματος της δοκού.



Σχήμα 3.12: Χρονοϊστορία παραμορφώσεων στο μέσο της δοκού για ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Το πρόσημο της μετακίνησης δ σε όλες τις δοκιμές της παρούσας ενότητας εργασίας είναι θετικό για την κίνηση του επενεργητή προς τα πάνω και οι θεωρούμενες θετικές ροπές είναι αυτές που εφελκύνουν την άνω ακραία ίνα.

3.3.1 Περιγραφή Δοκιμών

Πραγματοποιήθηκαν δύο σκυροδετήσεις για τα δοκίμια της παρούσας ενότητας εργασίας. Όσον αφορά την πρώτη: Η παραγωγή του ΚΔ πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις της LaFarge στην Ραφήνα την 6/4/2015 και το ΚΔ μεταφέρθηκε στο χώρο του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΟΣ) όπου και σκυροδετήθηκαν οι δοκοί Δ1,2,3,4 και 6 και τα υποστυλώματα Υ1 και Υ2. Οι δοκοί σκυροδετήθηκαν με τη χρήση μεταλλότυπων του ΕΟΣ. Η σκυροδέτηση αυτή έχει κωδικό όνομα «ΣΚ1» και αντιστοιχεί στη σύνθεση 15538. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ΚΔ εκτιμήθηκαν από τις δοκιμές που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και έχουν ως εξής: Θλιπτική αντοχή $f_{cm} = 32$ MPa, καμπτική εφελκυστική αντοχή $f_{ctm,\Pi} = 4.2$ MPa, μέτρο ελαστικότητας $E_{cm} = 15$ GPa.



Εικόνα 3.2: Οι μετάλλοτυποι των δοκών πριν την σκυροδέτηση

Όσον αφορά τη δεύτερη σκυροδέτηση: Η παραγωγή του ΚΔ πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις της LaFarge και η σκυροδέτηση στο εργαστήριο του ΕΟΣ, την 18/5/2015. Η σκυροδέτηση έχει κωδικό όνομα «ΣΚ5» και η μελέτη σύνθεσης 15820. Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ΚΔ προκύπτουν ως εξής: Θλιπτική αντοχή $f_{cm} = 44$ MPa και καμπτική εφελκυστική αντοχή $f_{ctm,fl} = 5.7$ MPa. Σημειώνεται επίσης ότι τιμή του συντελεστή μείωσης της μέγιστης πλαστικής στρωφής ισούται με 0.836 για τη σύνθεση 15538 και 0.891 για τη σύνθεση 15820.

3.3.2 Προετοιμασία Οργάνων

Για την καταγραφή των μετακινήσεων και παραμορφώσεων των εξεταζόμενων δοκιμίων, χρησιμοποιούνται υψηλής ακρίβειας μηκυσιόμετρα (Displacement Transducers - DT), είτε 25 είτε 50 mm μέγιστης μετρούμενης μήκυνσης, κατασκευής της Tokyo Sokki Kenkyujo. Για την μέτρηση της παραμόρφωσης των διαμήκων οπλισμών, χρησιμοποιήθηκαν παραμορφωσιόμετρα (Strain Gauges – SG). Για την σταθερή προσάρτηση πάνω στον χάλυβα, λειαίνεται αρχικά μια 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 στον κλωβό οπλισμού και σκυροδέτησης. Το κάθε SG συνοδεύεται με καλώδιο το οποίο συνδέεται στο καταγραφικό και το οποίο επίσης δένεται πάνω στον οπλισμό για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας να τραυματιστεί.



Εικόνα 3.3: Τοποθέτηση παραμορφωσιμέτρων στους διαμήκεις οπλισμούς

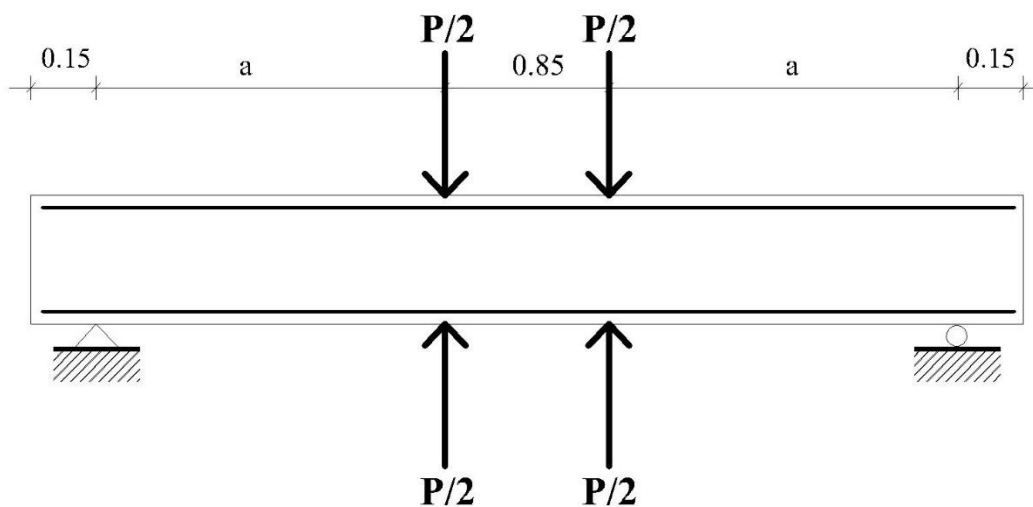
Τα DT και SG συνδέονται σε δύο καταγραφικά τύπου HBM του ΕΟΣ μέσω των οποίων οι μετρήσεις λαμβάνονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Κάθε HBM έχει 8 κανάλια και η συχνότητα καταγραφής επιλέγεται ίση με 0.5 Hz (δύο τιμές ανά δευτερόλεπτο).

3.3.3 Δοκιμές Αμφιέριπτων Δοκών

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν πέντε πειράματα σε ισάριθμες δοκούς από ΚΔ, εκ των οποίων τα τέσσερα αφορούν φόρτιση τεσσάρων σημείων και το ένα φόρτιση τριών σημείων. Όλες οι δοκοί είχαν διατομή 150 x 300 mm και μήκος 2.30 m και οπλισμό διάτμησης δίτμητο $\Phi 8$ ανά 100 mm. Οι τρεις εξ αυτών οπλίστηκαν με 2 $\Phi 14$ άνω και 2 $\Phi 14$ κάτω διαμήκη οπλισμό (συμπεριλαμβανομένης της δοκού σε κάμψη τριών σημείων) και οι υπόλοιπες δυο με 2 $\Phi 16$ άνω και 2 $\Phi 16$ κάτω.

3.3.3.1 Η Πειραματική Διάταξη

Η κάμψη τεσσάρων σημείων περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα.

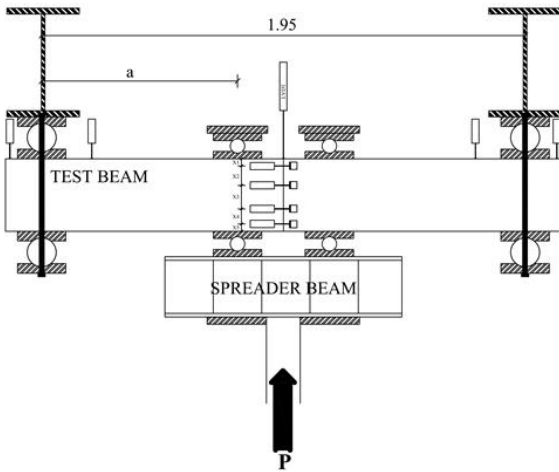


Σχήμα 3.13: Η πειραματική διάταξη κάμψης τεσσάρων σημείων

Η επιβολή του φορτίου P έγινε με τη χρήση επενεργητή MTS μέγιστου φορτίου ± 250 kN και συνολικής δυνατής μετατόπισης 500mm. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με ελεγχόμενο μέγεθος τις μετατοπίσεις. Για την επίτευξη ανακυκλιζόμενου φορτίου, χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικές ράβδοι κοχλιωμένες κατάλληλα στον επενεργητή (βλ. Σχήμα 3.14). Οι στηρίξεις διαμορφώθηκαν ως ελεύθερα στρεπτές με χρήση μεταλλικών πλακών και κυλίνδρων. Ο λόγος μήκους διάτμησης a προς στατικό ύψος d επιλέχθηκε ίσος με 2 για τις τέσσερις δοκούς και 3 για την τελευταία. Οι τρεις εκ των πέντε δοκών δοκιμάστηκαν υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση ενώ οι δύο υπό μονοτονική φόρτιση.

3.3.3.2 Ενόργανη Παρακολούθηση

Για κάθε δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν συνολικά εννέα μηκυσιόμετρα (displacement transducers - DT), είτε 25 είτε 50 mm μέγιστης μετρούμενης μήκυνσης, κατασκευής της Tokyo Sokki Kenkyujo. Τα DT1, DT2, DT4 και DT5 τοποθετούνται κατακόρυφα και χρησιμοποιούνται για να διορθώσουν την θέση της αριστερής και δεξιάς στήριξης, αντίστοιχα, λαμβάνοντας τη πραγματική θέση της στήριξης με γραμμική παρεμβολή, αφού στο τμήμα αυτό μπορεί να γίνει η παραδοχή της γραμμικότητας καθώς οι αποστάσεις είναι πολύ μικρές. Το DT3 είναι επίσης κατακόρυφο και χρησιμοποιείται για την μέτρηση της παραμόρφωσης στο μέσο της δοκού. Οι DT6, DT7, DT8 και DT9 τοποθετούνται οριζόντια με σκοπό την μέτρηση της μεταβολής παραμόρφωσης καθ' ύψος της δοκού και κατ' επέκταση της καμπυλότητας της διατομής και τη γωνία πλαστικής στροφής. Η MTS επίσης εκτός από τη χρονοϊστορία του φορτίου παρέχει και την μεταβολή της μετατόπισής της.



Σχήμα 3.14: Η πειραματική διάταξη της κάμψης τεσσάρων σημείων και τα μετρητικά όργανα

Σε κάθε δοκό που ελέγχεται, χρησιμοποιούνται και δύο παραμορφωσιόμετρα (Strain gauges - SG). Τα παραμορφωσιόμετρα προσαρτώνται στους διαμήκεις οπλισμούς στο χώρο του μέσου της δοκού. Ένα εκ των δυο, το SG1, τοποθετείται σε έναν εκ των άνω οπλισμών και το άλλο, το SG2, σε έναν εκ των κάτω οπλισμών.

3.3.4 Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση Δοκού Δύο Ανοιγμάτων

Κατασκευάστηκε μια δοκός μήκους 3.30 m με σκοπό τη φόρτισή της ως συνεχούς δοκού δύο ανοιγμάτων.

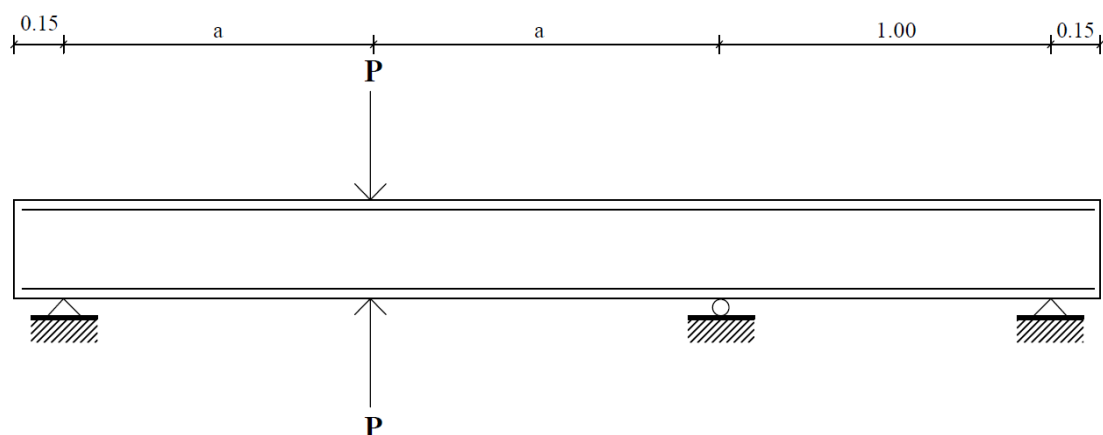


Εικόνα 3.4: Ο μεταλλότυπος της δοκού πριν την σκυροδέτηση

Η δοκός είχε διατομή 150 x 300 mm m και οπλισμό διάτμησης δίτμητο $\Phi 10$ ανά 100 mm. Ο διαμήκης οπλισμός της δοκού ήταν 2 $\Phi 14$ άνω και 2 $\Phi 14$ κάτω.

3.3.4.1 Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διάταξη της δοκού παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

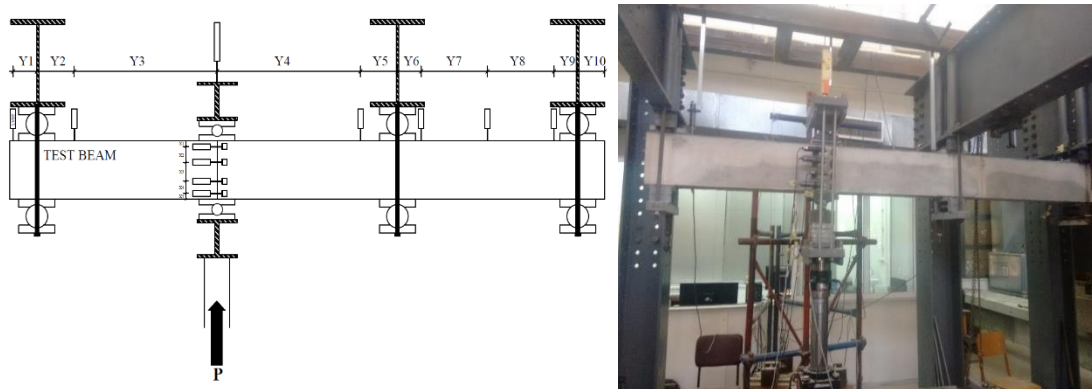


Σχήμα 3.15: Η πειραματική διάταξη της δοκού δύο ανοιγμάτων

Η επιβολή του φορτίου P έγινε με τη χρήση επενεργητή MTS μέγιστου φορτίου ± 250 kN και συνολικής δυνατής μετατόπισης 500mm. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με ελεγχόμενο μέγεθος τις μετατοπίσεις. Για την επίτευξη ανακυκλιζόμενου φορτίου, χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικές ράβδοι κοχλιωμένες κατάλληλα στον επενεργητή. Οι στηρίξεις διαμορφώθηκαν ως ελεύθερα στρεπτές με χρήση μεταλλικών πλακών και κυλίνδρων. Ο λόγος μήκους διάτμησης a προς στατικό ύψος d επιλέχθηκε ίσος με 3,5.

3.3.4.2 Ενόργανη Παρακολούθηση

Για την δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν συνολικά δέκα μηκυσιόμετρα (displacement transducers - DT), είτε 25 είτε 50 mm μέγιστης μετρούμενης μήκυνσης, κατασκευής της Tokyo Sokki Kenkyujo. Τα DT1, DT3, DT4 και DT6 τοποθετούνται κατακόρυφα και χρησιμοποιούνται για να διορθώσουν την θέση της αριστερής, της μεσαίας αλλά και της ακραίας δεξιά στήριξης, αντίστοιχα, λαμβάνοντας τη πραγματική θέση της στήριξης με γραμμική παρεμβολή, αφού στο τμήμα αυτό μπορεί να γίνει η παραδοχή της γραμμικότητας καθώς οι αποστάσεις είναι πολύ μικρές. Τα DT2 και DT5 είναι επίσης κατακόρυφα και χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της παραμόρφωσης στο μέσο του πρώτου και δεύτερου ανοίγματος αντίστοιχα. Οι DT7, DT8, DT9 και DT10 τοποθετούνται οριζόντια με σκοπό την μέτρηση της μεταβολής παραμόρφωσης καθ' ύψος της δοκού και κατ' επέκταση της καμπυλότητας της διατομής και τη γωνία πλαστικής στροφής. Η MTS επίσης εκτός από τη χρονοϊστορία του φορτίου παρέχει και την μεταβολή της μετατόπισής της.



Σχήμα 3.16: Η πειραματική διάταξη και τα μετρητικά όργανα

Στη δοκό χρησιμοποιούνται και δύο παραμορφωσιόμετρα (Strain gauges - SG). Τα παραμορφωσιόμετρα προσαρτώνται στους διαμήκεις οπλισμούς στο χώρο του μέσου της δοκού. Ένα εκ των δυο, το SG1, τοποθετείται σε έναν εκ των άνω οπλισμών και το άλλο, το SG2, σε έναν εκ των κάτω οπλισμών.

3.3.5 Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση Υποστυλωμάτων

Συνολικά κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν 2 υποστυλώματα από οπλισμένο ΚΔ σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση τριών σημείων.

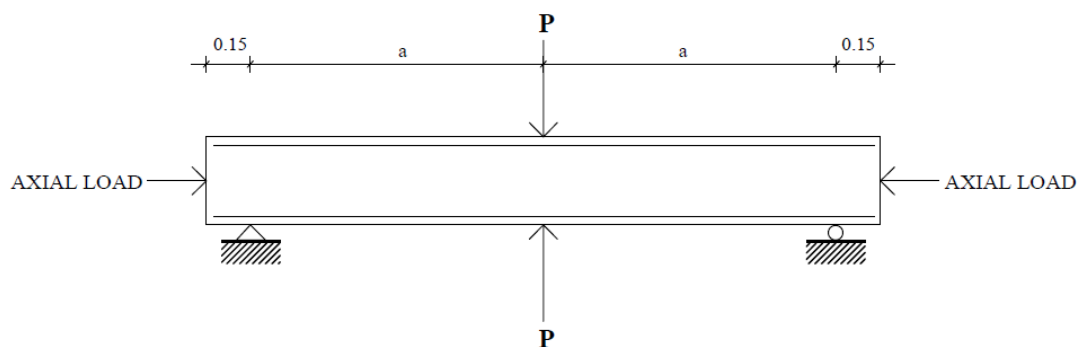


Εικόνα 3.5: Οι μεταλλότυποι των υποστυλωμάτων πριν την σκυροδέτηση

Τα υποστυλώματα είχαν τετραγωνική διατομή 200 x 200 mm, μήκος 2.30 m και οπλισμό διάτμησης τετράτμητο $\Phi 8$ ανά 100 mm. Ο διαμήκης οπλισμός των υποστυλωμάτων ήταν 3 $\Phi 14$ σε κάθε παρειά (συνολικά 8 $\Phi 14$).

3.3.5.1 Πειραματική Διάταξη

Η κάμψη τριών σημείων των υποστυλωμάτων περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα.

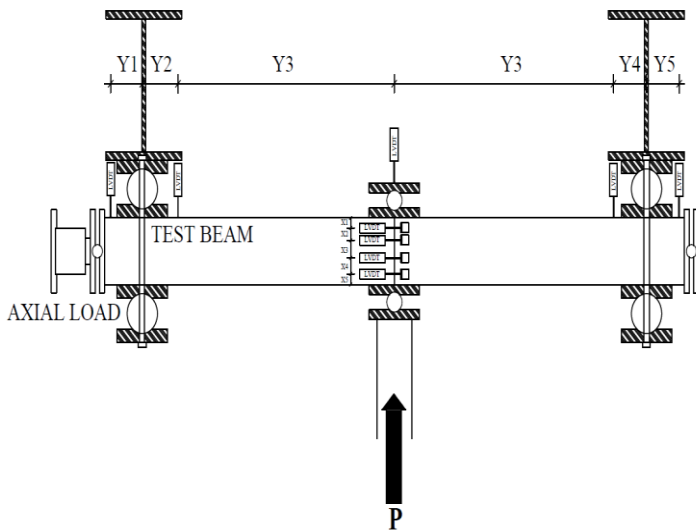


Σχήμα 3.17: Η πειραματική διάταξη κάμψης τριών σημείων σε συνδυασμό με την επιβολή αξονικού φορτίου

Η επιβολή του φορτίου P έγινε με τη χρήση επενεργητή MTS μέγιστου φορτίου ± 250 kN και συνολικής δυνατής μετατόπισης 500mm. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με ελεγχόμενο μέγεθος τις μετατοπίσεις. Για την επίτευξη ανακυκλιζόμενου φορτίου, χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικές ράβδοι κοχλιωμένες κατάλληλα στον επενεργητή (βλ. Σχήμα 3.18). Επιπλέον, η επίτευξη του αξονικού φορτίου έγινε με την επιβολή υδραυλικής πίεσης στα άκρα των υποστυλωμάτων. Οι στηρίξεις διαμορφώθηκαν ως ελεύθερα στρεπτές με χρήση μεταλλικών πλακών και κυλίνδρων. Ο λόγος μήκους διάτμησης a προς στατικό ύψος d επιλέχθηκε ίσος με 3,5.

3.3.5.2 Ενόργανη Παρακολούθηση

Η ενόργανη παρακολούθηση των υποστυλωμάτων είναι ταυτόσημη με αυτή των δοκών σε φόρτιση τεσσάρων σημείων, η οποία περιγράφεται αναλυτικά στην § 3.3.3.2, με τη μόνη διαφοροποίηση να βρίσκεται στην ύπαρξη του γρύλου ο οποίος ασκεί το αξονικό φορτίο.



Σχήμα 3.18: Η πειραματική διάταξη και τα μετρητικά όργανα

3.4 Συνολικά Αποτελέσματα

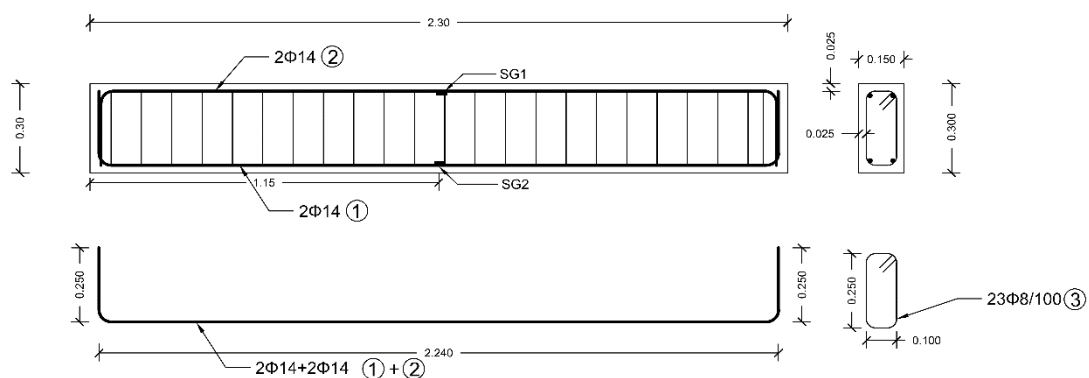
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα για τις

- 5 δοκούς σε κάμψη τεσσάρων σημείων, 3 εκ των οποίων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση και 2 εκ των οποίων υπό μονοτονική φόρτιση
- Μία δοκό δύο ανοιγμάτων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση
- Δύο υποστυλωμάτων σε κάμψη τριών σημείων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

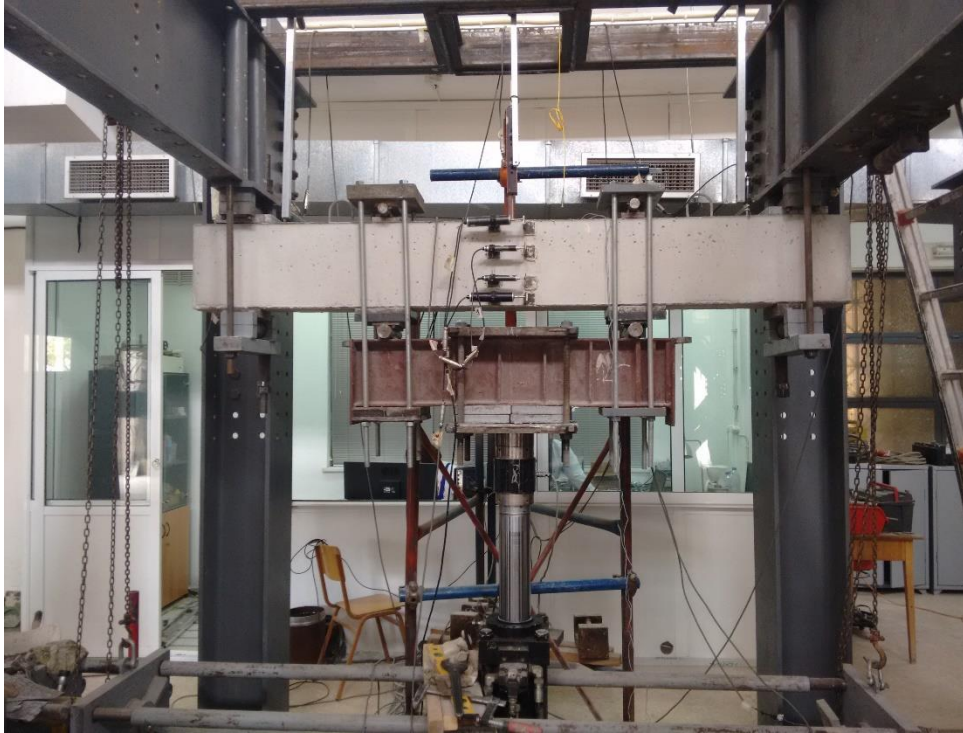
3.4.1 Αποτελέσματα Δοκιμών Κάμψης Τεσσάρων Σημείων

3.4.1.1 Δοκός Δ1

Η δοκός Δ1 έχει άνω και κάτω οπλισμούς 2Φ14 και σταθερό οπλισμό διάτμησης σε όλο της το μήκος δίτητους Φ8/100 mm, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.19. Ο λόγος διάτμησης a/d επιλέγεται ίσος με 2.

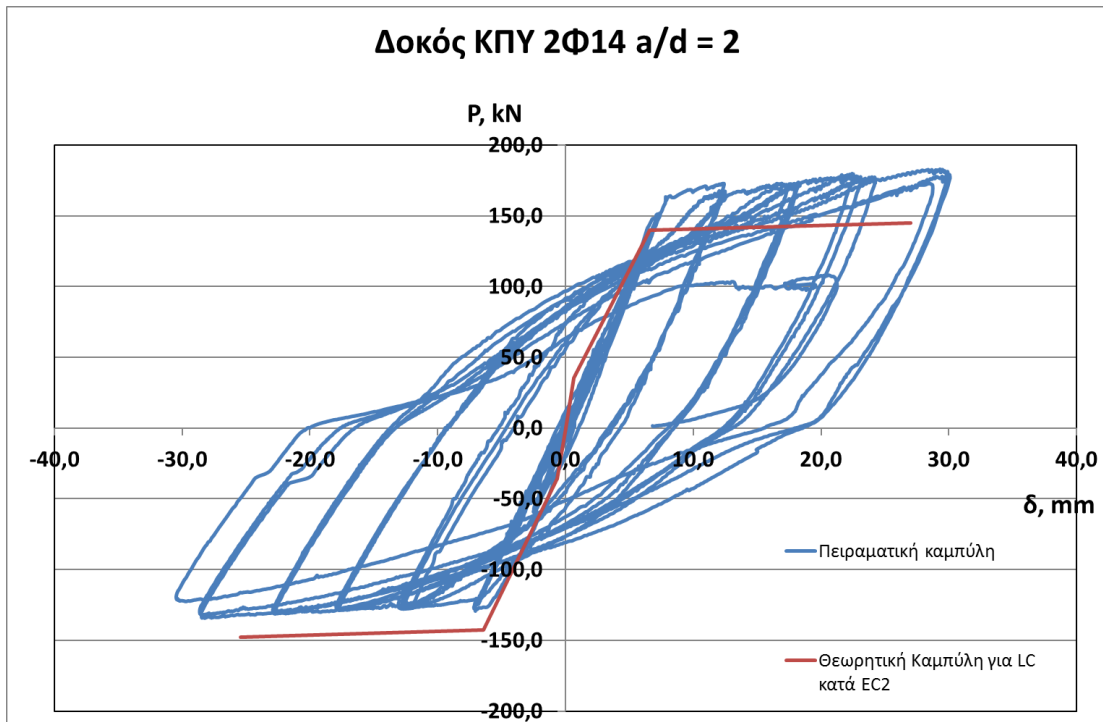


Σχήμα 3.19: Δεπτομέρειες όπλισης δοκού Δ1 και θέσεις strain gauges



Εικόνα 3.6: Η δοκός Δ1 πριν την έναρξη του πειράματος

Η δοκός Δ1 καταπονήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση ελεγχόμενων μετατοπίσεων, για μετατοπίσεις ± 0.5 ως $5 \delta_y$, με τρεις κύκλους για τη κάθε μια. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στις 9/6/2015, ενώ η σκυροδέτηση την 6/4/2015. Το διάγραμμα φορτίου P – μετατόπισης δ στο μέσο της δοκού παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.20: Διάγραμμα P-δ της δοκού Δ1

Οι πρώτες μικρορηγματώσεις εμφανίστηκαν περίπου όταν η κατακόρυφη μετακίνηση του μέσου της δοκού δ ήταν 0.7 mm, τιμή λογική καθώς η θεωρητική τιμή της μετατόπιση τη στιγμή της ρηγματώσης δ_{cr} είναι 0.6 (βλ. Εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7: Μικρορηγματώσεις στο άνω τμήμα της δοκού λόγω υπέρβασης της ροπής ρηγματώσης

Στην ίδια περίπου τιμή (-0.8 mm) παρατηρείται ρηγματώση της κάτω παρειάς της δοκού στην αντίθετη φορά του φορτίου, με την θεωρητική -0.7 mm. Οι ρωγμές σε αυτά τα μεγέθη μετατόπισης ήταν τριχοειδείς – οριακά ορατές και έκλειναν στην αλλαγή της κατεύθυνσης του φορτίου, ενώ οι εφελκόμενοι και θλιβόμενοι οπλισμοί διατηρούνταν ελαστικοί. Το SG2 (το strain gauge του κάτω οπλισμού) πιθανότητα αποκολλήθηκε από τον πρώτο κύκλο και δεν κατέγραφε τιμές. Κατά συνέπεια σε αυτήν την δοκό δεν ήταν δυνατός ο πειραματικός υπολογισμός της καμπυλότητας φ μέσω των SG. Το SG1 όμως (άνω οπλισμός) έδινε τιμές μέχρι και τον πρώτο κύκλο των μετακινήσεων $2 \cdot \delta_y$, μέσω του οποίου εκτιμάται ότι η διαρροή του συνέβη περίπου στην μετακίνηση $\delta = + 7.26$ mm. Η υπολογιστική μετακίνηση διαρροής ισούται με 6.6 mm. Στους κύκλους που αντιστοιχούν στη μετακίνηση $\delta = \delta_y$, η ρηγματώση που συμβαίνει είναι περιορισμένου εύρους και στο χώρο της καθαρής κάμψης, ενώ παρατηρούνται τριχοειδείς ρωγμές και στο διατμητικό μήκος.



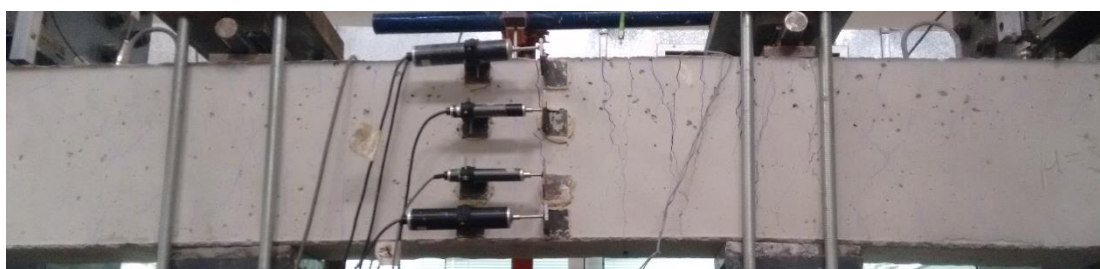
Εικόνα 3.8: Η ρηγματώση στους κύκλους μετακίνησης διαρροής

Στους κύκλους μετακίνησης δ ίσης με $2 \cdot \delta_y$, διαρροής, παρατηρήθηκε ρηγμάτωση καμπτικού τύπου στο χώρο της καθαρής κάμψης. Επίσης, υπήρξαν και διατμητικές ρωγμές στο μήκος διάτμησης, τριχοειδής κυρίως όμως και μικρότερου ανοίγματος από τις αντίστοιχες καμπτικές.



Εικόνα 3.9: Ρηγμάτωση στη μετακίνηση $2 \cdot \delta_y$

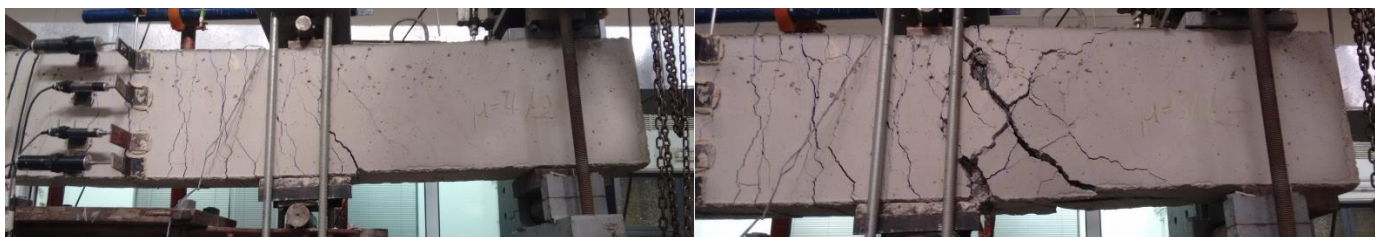
Στην μετακίνηση $\delta = 3 \cdot \delta_y$ οι ρωγμές στο διατμητικό μήκος παραμένουν πολύ μικρές, ενώ το εύρος των καμπτικών ρωγμών συνεχίζει να αυξάνεται.



Εικόνα 3.10: Η δοκός στην μετακίνηση $\delta = + 3 \cdot \delta_y$, στην τρίτη ανακύκλιση

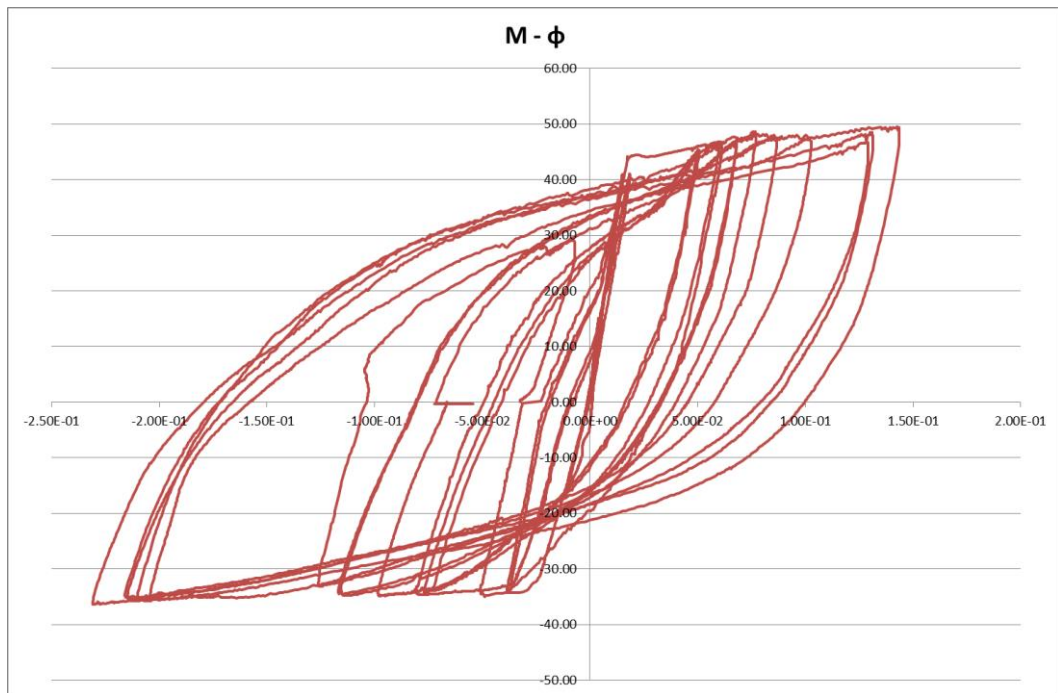
Στην μετακίνηση $\delta = 4 \cdot \delta_y$ εκτός από τις καμπτικές, πλέον αναπτύσσονται σημαντικά και οι διατμητικές ρωγμές, ενώ στην $\delta = 5 \cdot \delta_y$ οι διαγώνιες διατμητικές ρωγμές διασταυρώνονται προκαλώντας την αστοχία της δοκού.

Η δοκός ανέπτυξε θετική ροπή αντοχής 49,53 kNm και καμπυλότητα αστοχίας $0,187 \text{ m}^{-1}$ ενώ οι αντίστοιχες θεωρητικά υπολογιζόμενες τιμές για ΕΣ κατά EC2 (δηλαδή με μειωμένη την τιμή της οριακής θλιπτικής παραμόρφωσης του ΕΣ σε $3.5 \cdot \eta_1 = 2.927$, (αναλυτικά βλ. Παράρτημα Α) είναι 39,6 kNm και $0,061 \text{ m}^{-1}$ αντίστοιχα.



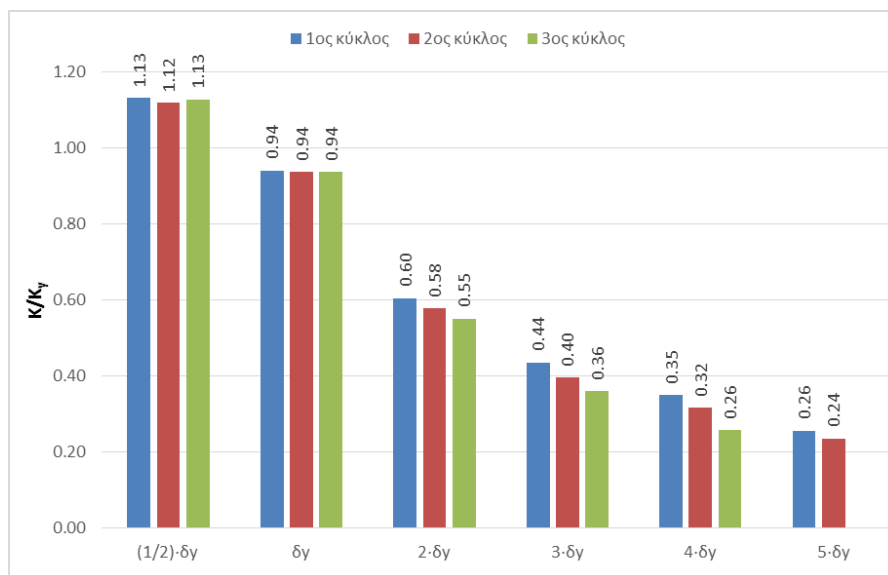
Εικόνα 3.11: Ρηγματώσεις στην μετακίνηση $-4 \cdot \delta_y$ (αριστερά) και $-5 \cdot \delta_y$ μετά την τρίτη ανακύκλιση (δεξιά)

Το διάγραμμα μ -φ εξάγεται μέσω των οριζόντιων μηκυσιομέτρων. Η υπολογιστική διαδικασία περιγράφεται στο παράρτημα Β.



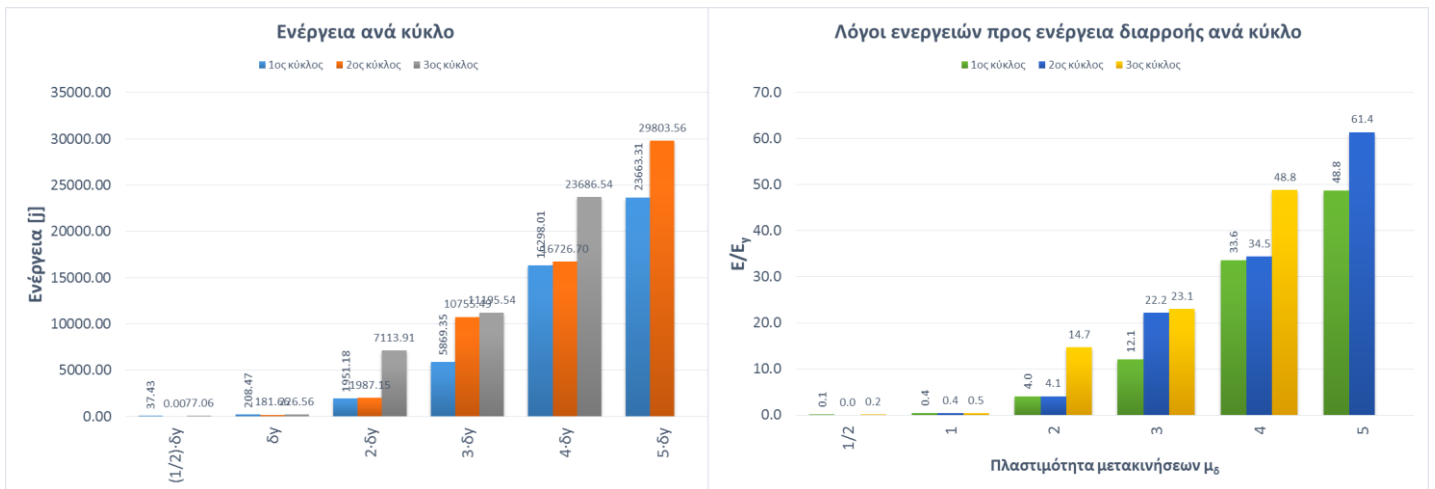
Σχήμα 3.21: Διάγραμμα ροπών – καμπυλοτήτων M-1/γ

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της δυσκαμψίας της δοκού EI προς τη δυσκαμψία διαρροής για τον κάθε κύκλο φόρτισης. Η τελευταία ισούται με $K_y = P_y / \delta_y = 20788.36 \text{ kN/m}$.



Σχήμα 3.22: Η μεταβολή της δυσκαμψία προς τη δυσκαμψία διαρροής K/Ky κατά τους κύκλους φόρτισης

Η ενέργεια που καταναλώθηκε κατά τις ανακυκλίσεις παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα, τόσο σε τιμές σε J όσο και διαιρεμένα με την αντίστοιχη ενέργεια τη στιγμή της διαρροής.



Σχήμα 3.23: Ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης σε j (αριστερά) και σε λόγους ενεργειών προς ενέργεια διαρροής

Ακόμα, από το διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων είναι δυνατόν να εξαχθεί το μέτρο ελαστικότητας το οποίο προκύπτει ίσο με 16.43 GPa, με λόγο ροπών αδρανείας ρηγματωμένης προς αρηγάτωτη διατομή $I_{cr}/I_g = 0.45$. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι θεωρητικές τιμές κατά τον EC2 για ελαφροσκυρόδεμα.

Πίνακας 3.8: Θεωρητικές τιμές κατά EC2 για την δοκό Δ1

Κατάσταση	M [kNm]	P [kN]	φ [1/m]	x [cm]	ϵ_{1c2} [‰]	ϵ_{s1} [‰]	Κατακόρυφη μετατόπιση δ [mm]
Αστοχία	-40,03	-147,85	-0,0593	4,75	2,927	12,350	-25,4
Διαρροή	-38,58	-142,49	-0,0150	7,4	1,112	2,750	-6,4
Ρηγμάτωση	-9,69	-35,79	-0,00152	15	0,228	0,227	-0,7
0	0	0,00	0,00000	0	0,000	0,000	0,0
Ρηγμάτωση	9,64	35,60	0,00151	15	0,226	0,227	0,6
Διαρροή	37,87	139,87	0,01530	7,2	1,108	2,750	6,6
Αστοχία	39,17	144,67	0,06300	4,5	2,927	12,930	27,0

Από τη μορφή των διαγραμμάτων M-φ και P-δ είναι φανερό ότι με την ανακύκλιση δεν υφίσταται πτώση της αντοχής αλλά αντίθετα παρατηρείται μικρή αύξηση, μέχρι την τελική αστοχία λόγω διαγώνιων διατμητικών ρωγμών στο μήκος διάτμησης. Η αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα σε όρους καμπυλοτήτων $\mu_{1/T}$ προκύπτει 8.53 και σε όρους μετακινήσεων $\mu_\delta = 4.11$. Επομένως ο αντίστοιχος συντελεστής συμπεριφοράς q προκύπτει ίσος με 4.8 ($q=(\mu_{1/T}+1)/2$) που αντιστοιχεί σε υψηλή κατηγορία πλαστιμότητας (ΚΠΥ) κατά EC8 Πίνακας 5.1. Η γωνία στροφής χορδής θ_u κατά την αστοχία εκτιμήθηκε πειραματικά ίση με 0.2310 ενώ η θεωρητικά υπολογιζόμενη κατά ΚΑΝΕΠΕ 0.0467. Η $\theta_{u,exp}$ προκύπτει δηλαδή μειωμένη κατά 36% από τον αντίστοιχο πειραματικό «μέσο όρο» δοκών από ΣΠΣ.

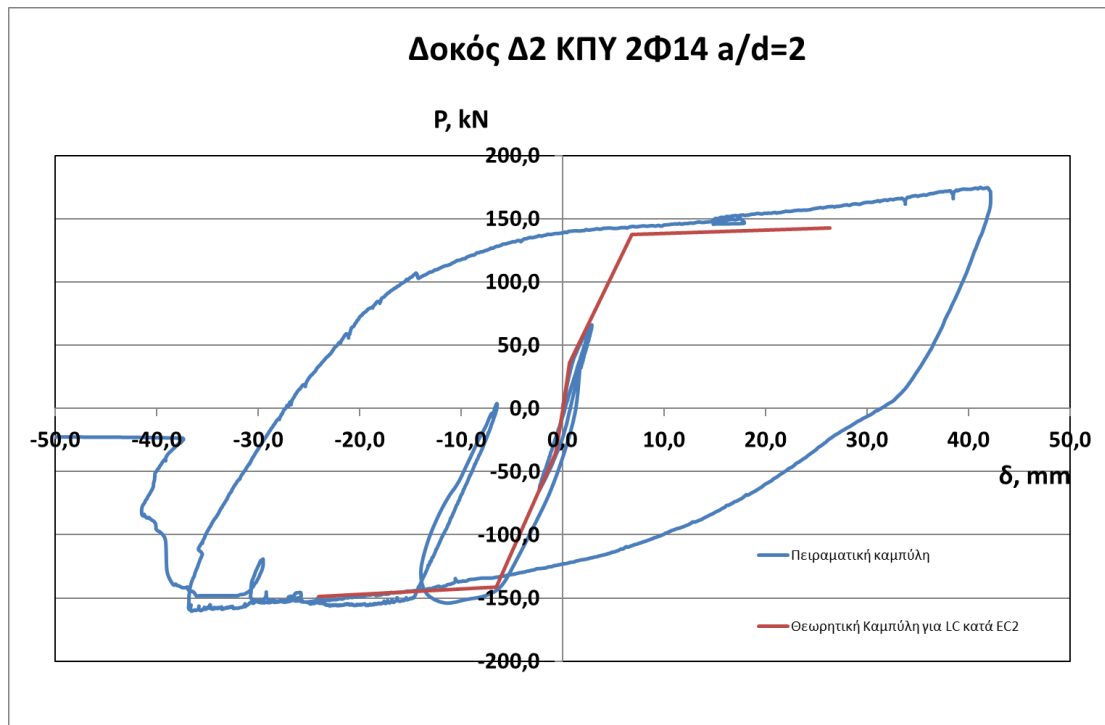
3.4.1.2 Δοκός Δ2

Η δοκός Δ2 έχει άνω και κάτω οπλισμούς 2Φ14 και σταθερό οπλισμό διάτμησης σε όλο της το μήκος δίτμητους Φ8/100 mm, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.13, αφού η Δ2 έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με τη Δ1. Ο λόγος διάτμησης a/d επιλέγεται ομοίως ίσος με 2. Η διεξαγωγή του πειράματος πραγματοποιήθηκε την 11/6/2015 ενώ η σκυροδέτηση την 6/4/2015. Η περιγραφή της πειραματικής διάταξης και της ενόργανης παρακολούθησης παρουσιάζεται αναλυτικά στο § 3.3.3.



Εικόνα 3.12: Η δοκός Δ2 πριν την έναρξη της δοκιμής

Η δοκιμή της Δ2 ξεκίνησε με έναν κύκλο στη μετατόπιση $\pm 0.5 \cdot \delta_y$. Στη συνέχεια επιβλήθηκε μετατόπιση -40 mm (δηλαδή «προς τα κάτω»). Ακολούθησε θετική επιβολή μετατοπίσεων μέχρι την τιμή +40 mm, ενώ αμέσως μετά επιβλήθηκαν αρνητικές μετατοπίσεις έως την τελική αστοχία. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης στο μέσο της δοκού.



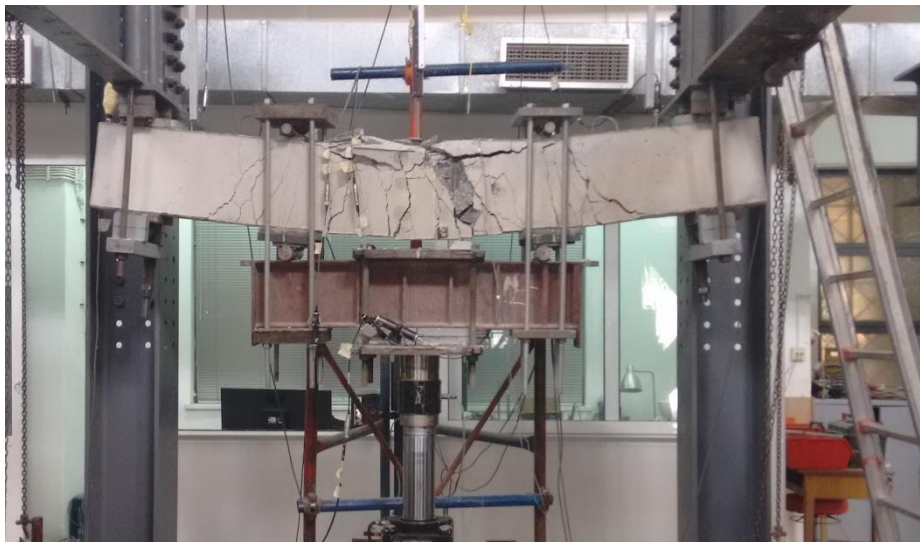
Σχήμα 3.24: Πειραματική καμπύλη P-δ της δοκού Δ2

Στην μετακίνηση ίση με 0.9 mm περίπου η κλίση του διαγράμματος P-δ μεταβάλλεται, δηλαδή εμφανίζεται η πρώτη ρηγμάτωση, με τη θεωρητικά υπολογιζόμενη τιμή της πρώτης ρηγμάτωσης να ισούται με 0.7 mm. Η πειραματική μετακίνηση διαρροής προέκυψε ίση με -7.6 mm, μέσω της διαρροής του κάτω οπλισμού που λήφθηκε από το SG2, ενώ η θεωρητικά υπολογιζόμενη ίση με 6.6 mm. Κατά την αύξηση των αρνητικών μετατοπίσεων, παρατηρείται σταδιακά η αύξηση του μήκους και του πάχους των καμπτικών ρωγμών. Αντίθετα, μόνο τριχοειδείς και ελάχιστα ορατές ρωγμές φαίνονται στο διατμητικό μήκος και ακόμα και υπό το μέγιστο φορτίο του πειράματος οι διατμητικές ρωγμές είναι πολύ μικρές.



Εικόνα 3.13: Η δοκός Δ2 τη στιγμή της μέγιστης (αρνητικής) επιβαλλόμενης μετατόπισης 40 mm

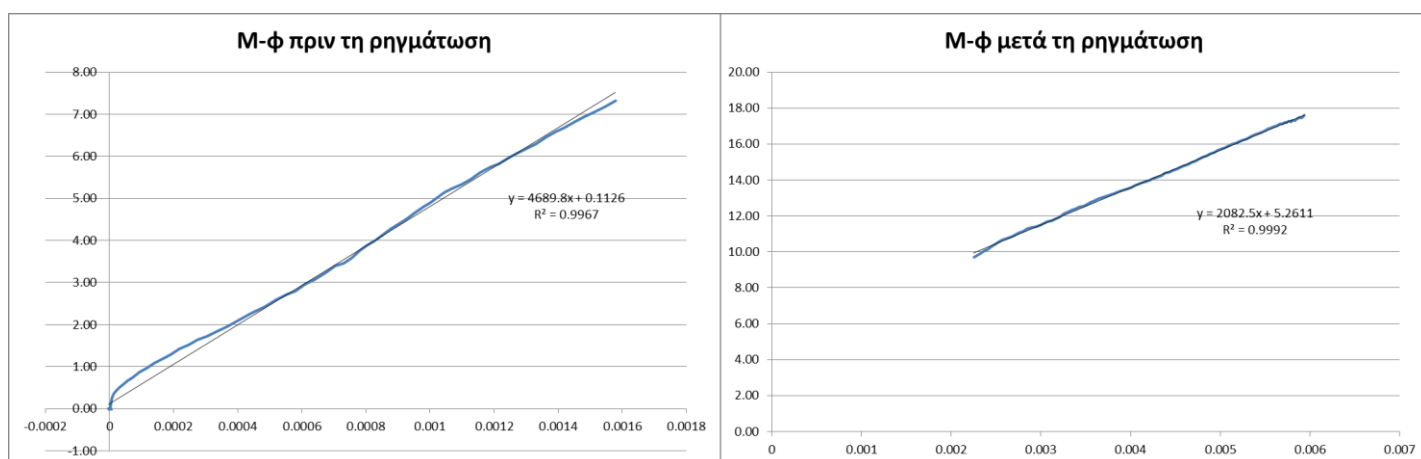
Στην θετική φορά φόρτισης παρατηρήθηκε παρόμοια κατάσταση, με ελάχιστες διατμητικές ρωγμές και καμπτικού τύπου αστοχία. Τέλος, όταν η δοκός υποβάλλεται σε αρνητική παραμόρφωση μεγαλύτερη των 40mm, ενώ έχει ήδη αστοχήσει καμπτικά, η αποδιοργάνωση του σκυροδέματος επεκτείνεται και διατμητικές ρωγμές.



Εικόνα 3.14: Τελική αστοχία δοκού

Η δοκός ανέπτυξε θετική ροπή αντοχής 46.77 kNm και καμπλότητα αστοχίας 0.098 m^{-1} ενώ οι θεωρητικά υπολογιζόμενες τιμές για ΕΣ κατά EC2 (βλ. Παράρτημα Β) είναι 38.15 kNm και 0.06125 m^{-1} . Αντίστοιχα, στην αρνητική κατεύθυνση της φόρτισης, η αναπτυσσόμενη ροπή αντοχής ισούται με 42.95 kNm και η καμπλότητα με 0.086 m^{-1} με τις θεωρητικά

υπολογιζόμενες να είναι 39.8 kNm και 0.056 m⁻¹. Επίσης, πραγματοποιείται έμμεσος υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας E από την κλίση του διαγράμματος M-φ. Συγκεκριμένα, μέχρι την πρώτη ρηγμάτωση υπολογίζεται με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων η κλίση του M-φ (που ισούται με το γινόμενο E·I, όπου I η ροπή αδρανείας της διατομής) και προκύπτει ίση με 4689.79 kNm². Επειδή η αρηγμάτωση ροπή αδρανείας ισούται με 4.21·10⁻⁴ m⁴, E = 11.15 GPa. Αντίστοιχα, από την κλίση του διαγράμματος μετά τη ρηγμάτωση προκύπτει, με την ρηγματωμένη I = 1.8·10⁻⁴ m⁴, E = 11.40 GPa.



Σχήμα 3.25: Έμμεσος προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας μέσω του διαγράμματος M-φ πριν και μετά την πρώτη ρηγμάτωση της Δ2

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι θεωρητικές τιμές κατά τον EC2 για ελαφροσκυρόδεμα.

Πίνακας 3.9: Θεωρητικές τιμές κατά EC2 για την δοκό Δ2

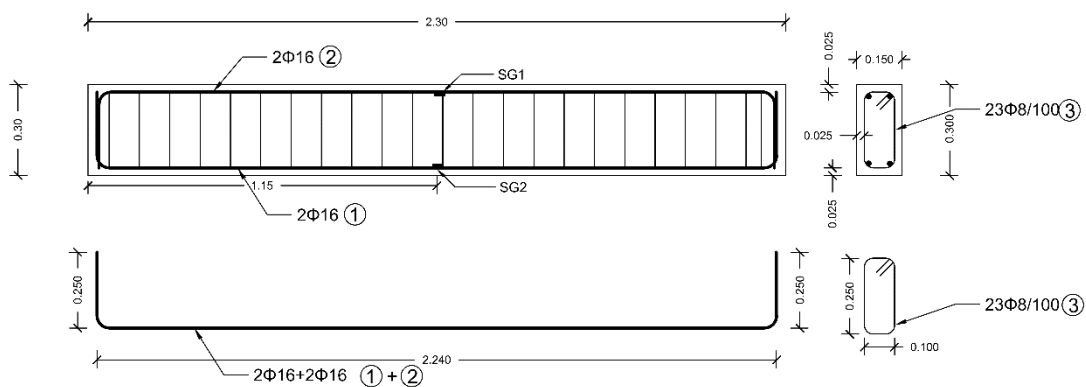
Κατάσταση	M [kNm]	P [kN]	φ [1/m]	x [cm]	ε _{ic2} [‰]	ε _{s1} [‰]	Κατακόρυφη μετατόπιση δ [mm]
Αστοχία	-39,8	-148,6461	-0,05600	5,06	2,927	11,340	-24,1
Διαρροή	-37,87	-141,4379	-0,01530	7,43	1,108	2,750	-6,6
Ρηγμάτωση	-9,47	-35,36881	-0,00150	14,90	0,225	0,227	-0,6
0	0	0	0,00000	0,00	0,000	0,000	0,0
Ρηγμάτωση	9,56	35,704949	0,00152	15,10	0,229	0,227	0,7
Διαρροή	36,85	137,62838	0,01580	7,14	1,134	2,750	6,8
Αστοχία	38,15	142,48366	0,06125	4,59	2,927	12,190	26,3

Η πλαστιμότητα σε όρους μετακινήσεων προκύπτει ίση με 5.18. Τη στιγμή της μέγιστης καμπυλότητας, τα οριζόντια μηκυνσιόμετρα έχουν αποκολληθεί από το δοκίμιο, εξαιτίας των μεγάλων παραμορφώσεων και των αναπτυσσόμενων ρωγμών στο ΚΔ κάτω ακριβώς από τα σημεία προσάρτησής τους. Για το λόγο αυτό, δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός της πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων $\mu_{1/ε}$ τη στιγμή της αστοχίας. Αντί αυτού, η τελευταία

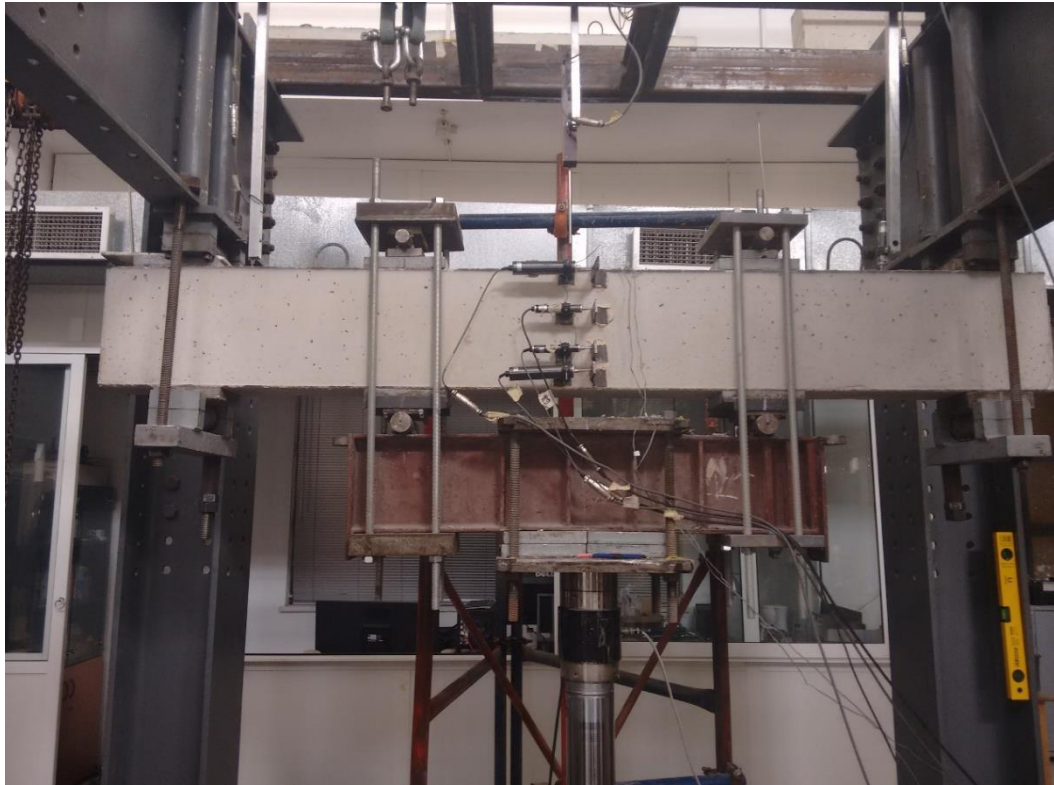
καταγεγραμμένη μέτρηση πλαστικής στροφής από τα οριζόντια μηκυνσιόμετρα συνέβη σε φορτίο -155 kN και μετατόπιση -23.5 mm, στη φόρτιση προς τις αρνητικές μετατοπίσεις πριν τη μέγιστη μετατόπιση, η οποία ισούται με -0.124 και ο αντίστοιχος $\mu_{1/r}$ ίσος με 8.71. Η αντίστοιχη βασική τιμή του δείκτη πλαστιμότητας για τη δοκό Δ2 θα είναι μεγαλύτερη από την $(\mu_{1/r} + 1)/2 = 4.9$, τιμές που αντιστοιχεί σε υψηλή κατηγορία πλαστιμότητας. Παράλληλα, η μέγιστη γωνία στροφής $\theta_{u,exp}$ στην αστοχία της δοκού προκύπτει 0,0609 με την θεωρητικά υπολογιζόμενη κατά ΚΑΝΕΠΕ 0.0466, εμφανίζεται κατά συνέπεια αυξημένη κατά 30%.

3.4.1.3 Δοκός Δ3

Η δοκός Δ3 έχει άνω και κάτω οπλισμούς 2Φ16 και σταθερό οπλισμό διάτμησης σε όλο της το μήκος δίτμητους Φ8/100 mm, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.26. Ο λόγος διάτμησης a/d επιλέγεται ίσος με 2. Η περιγραφή της πειραματικής διάταξης και της ενόργανης παρακολούθησης παρουσιάζεται αναλυτικά στο § 3.3.3.



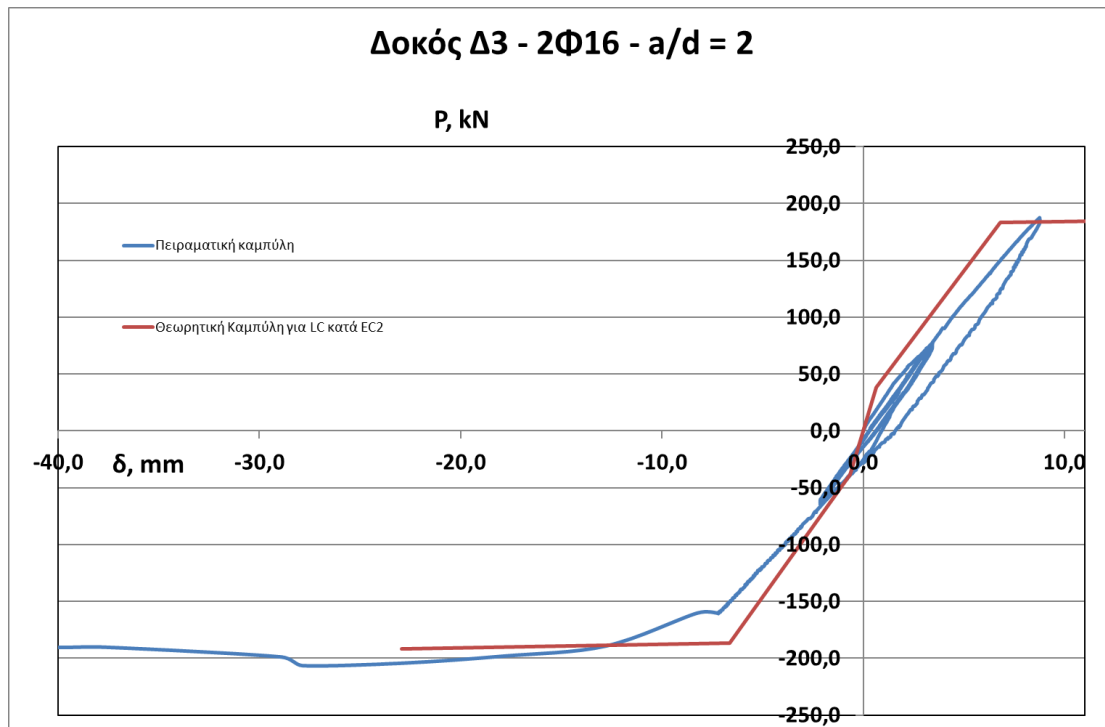
Σχήμα 3.26: Λεπτομέρειες όπλισης δοκού Δ3 και θέση strain gauges.



Εικόνα 3.15: Δοκός Δ3 και πειραματική διάταξη πριν την έναρξη του πειράματος

Η δοκός Δ3 καταπονήθηκε σε φόρτιση ελεγχόμενων μετατοπίσεων με την εξής ιστορία: Αρχικά πραγματοποιήθηκαν τρεις κύκλοι για μετατοπίσεις $\pm 0.5 \delta_y$ και στη συνέχεια επιβλήθηκε μετατόπιση έως την αστοχία του δοκιμίου. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στις 29/5/2015, ενώ η σκυροδέτηση την 6/4/2015.

Το διάγραμμα φορτίου P – μετατόπισης δ στο μέσο της δοκού παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.27.



Σχήμα 3.27: Διάγραμμα P-δ της δοκού Δ3

Όπως και στις προηγούμενες δοκούς, η ροπή ρηγμάτωσης είναι πολύ κοντά στην υπολογιστική της τιμή (13 kNm πειραματική και 10.50 υπολογιστική), όπως επίσης και το φορτίο διαρροής (182 kN το πειραματικό και 183 kN η υπολογιστική). Η δοκός αστόχησε καμπτικά στο φορτίο 206 kN με την αντίστοιχη ανάπτυξη ροπής αντοχής 55.6 kNm σε μετατόπιση 27.9 mm, ενώ με βάση τις σχέσεις του EC2 το φορτίο αστοχίας ισούται με 191.0 kN και η μετατόπιση αστοχίας 22.9 mm. Επισημαίνεται ότι λόγω δυσλειτουργίας του επενεργητή η δοκός παραμορφώθηκε πέραν του επιθυμητού (βλ. παρακάτω εικόνα).



Εικόνα 3.16: Αστοχία δοκού Δ3

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι θεωρητικές τιμές κατά τον EC2 για ελαφροσκυρόδεμα.

Πίνακας 3.10: Θεωρητικές τιμές κατά EC2 για την δοκό Δ3

Κατάσταση	M [kNm]	P [kN]	ϕ [1/m]	ϵ_{k2} [‰]	ϵ_{s1} [‰]	Κατακόρυφη μετατόπιση δ [mm]
Αστοχία	-51,72	-191,91	-0,05320	-2,927	10,960	-22,9
Διαρροή	-50,32	-186,72	-0,01540	1,262	2,750	-6,6
Ρηγμάτωση	-10,45	-38,78	-0,00152	-0,228	0,227	-0,7
0	0	0,00	0,00000	0,000	0,000	0,0
Ρηγμάτωση	10,38	38,52	0,00151	-0,225	0,227	0,7
Διαρροή	49,34	183,08	0,01580	1,254	2,750	6,8
Αστοχία	50,65	187,94	0,05725	-2,927	11,670	24,7

Η δοκός ανέπτυξε πλαστιμότητα σε όρους μετατοπίσεων ίση με 4.35 και σε όρους καμπυλοτήτων 7.69, με την αντίστοιχη βασική τιμή του δείκτη συμπεριφοράς να προκύπτει 4.3, δηλαδή σε υψηλή κατηγορία πλαστιμότητας σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1 του EC2. Η μέση γωνία στροφής χορδής θ_n που αναπτύχθηκε στο δοκίμιο κατά την αστοχία ισούται με 0.0246 ενώ η θεωρητικά υπολογιζόμενη κατά ΚΑΝΕΠΕ είναι 0.0466.

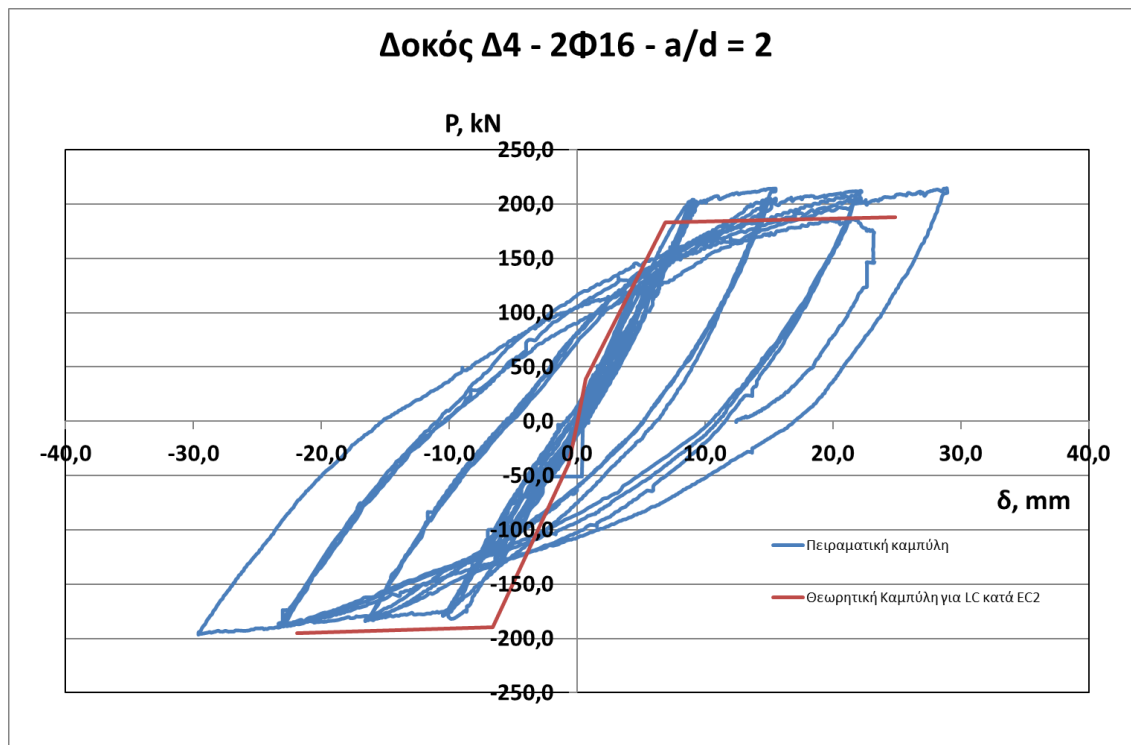
3.4.1.4 Δοκός Δ4

Η δοκός Δ4 οπλίζεται με 2Φ16 άνω και 2Φ16 κάτω, με ενιαίο οπλισμό διάτμησης Φ8/100, ακριβώς όπως και η Δ3 (Σχήμα 3.26). Ομοίως, ο λόγος a/d επιλέγεται ίσος με 2. Η περιγραφή της πειραματικής διάταξης και της ενόργανης παρακολούθησης παρουσιάζεται αναλυτικά στο § 3.3.3.



Εικόνα 3.17: Η δοκός Δ4, η πειραματική διάταξη και ο ενόργανος εξοπλισμός πριν την έναρξη του πειράματος

Η δοκός Δ4 καταπονήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση ελεγχόμενων μετατοπίσεων, για μετατοπίσεις ± 0.5 ως $5 \delta_y$, με τρεις κύκλους για τη κάθε μια. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στις 4/6/2015, ενώ η σκυροδέτηση την 6/4/2015. Το διάγραμμα φορτίου P – μετατόπισης δ στο μέσο της δοκού παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.28: Διάγραμμα P - δ δοκού Δ4

Η εφελκυστική ρηγματώση του σκυροδέματος λόγω κάμψης συμβαίνει σε μετακίνηση περίπου 0.9 mm, με την θεωρητική 0.7 mm και η πειραματική διαρροή συμβαίνει σε μετακίνηση 6.75 mm (μέτρηση διαρροής του χάλυβα από το αντίστοιχο strain gauge), ενώ η θεωρητικά προβλεπόμενη είναι 6.9 mm. Μέχρι και τους κύκλους διαρροής, οι ρηγματώσεις στο χώρο της καθαρής κάμψης δεν είναι σημαντικές και στο μήκος διάτμησης τριχοειδής οριακά ορατές. Στους κύκλους της μετακίνησης $2\delta_y$, οι καμπτικές ρωγμές αποκτούν μεγαλύτερο εύρος ενώ διατμητικές παραμένουν μικρές. Το ίδιο συμβαίνει και στον πρώτο κύκλο της μετακίνησης $3 \cdot \delta_y$ (βλ. παρακάτω εικόνα), ενώ οι ρωγμές συνεχίζουν να αυξάνουν το εύρος τους στην καμπτική περιοχή χωρίς σημαντική αύξηση στο διατμητικό μήκος μέχρι και τον 1^ο κύκλο της $4 \cdot \delta_y$, στην μετακίνηση $-4\delta_y$ όπου πέραν των καμπτικών επεκτείνεται διατμητική ρωγμή στο σημείο επιβολής φορτίου.



Εικόνα 3.18: Η δοκός Δ4 στη μετατόπιση $+3 \cdot \delta_y$, 1^{ος} κύκλος



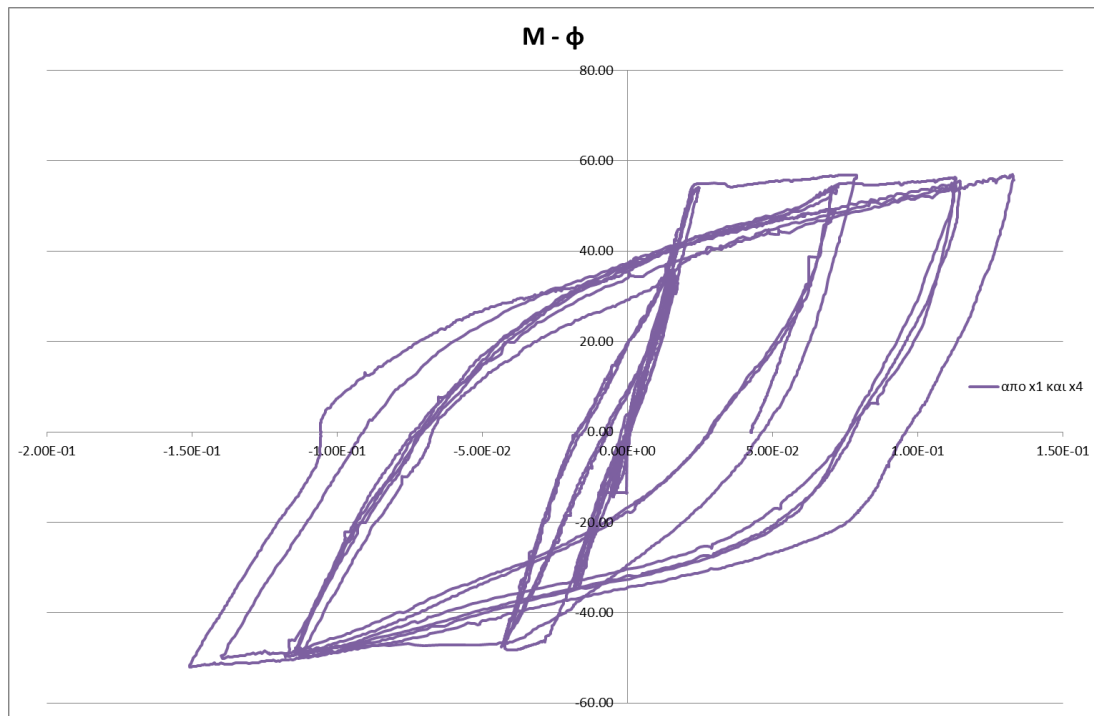
Εικόνα 3.19: Η δοκός στην μετατόπιση $-3\delta_y$, 1^{ος} κύκλος

Η τελική αστοχία επέρχεται λόγω της διαγώνιας ρηγμάτωσης στο χώρο του διατμητικού μήκους, με τη δοκό να μην μπορεί να ξεπεράσει τον 2^ο κύκλο της μετατόπισης $5 \cdot \delta_y$.



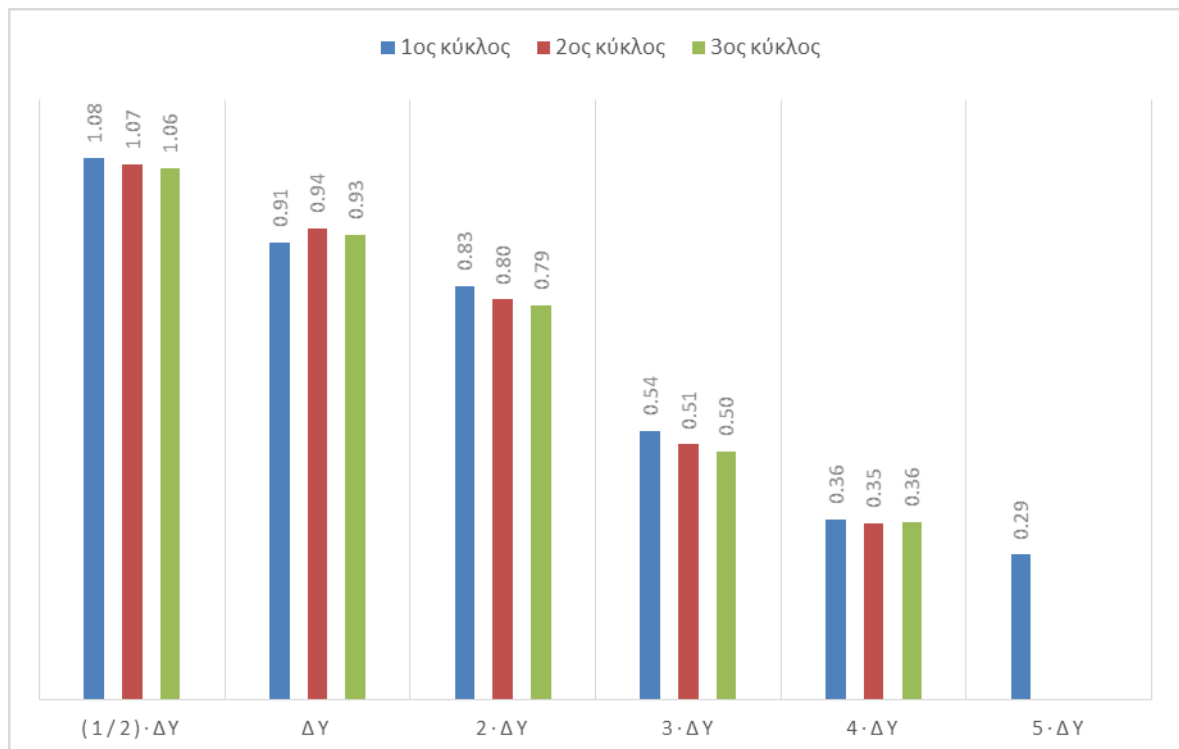
Εικόνα 3.20: Αστοχία της δοκού Δ4

Το διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων προκύπτει από τα οριζόντια μηκυνσιόμετρα και παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



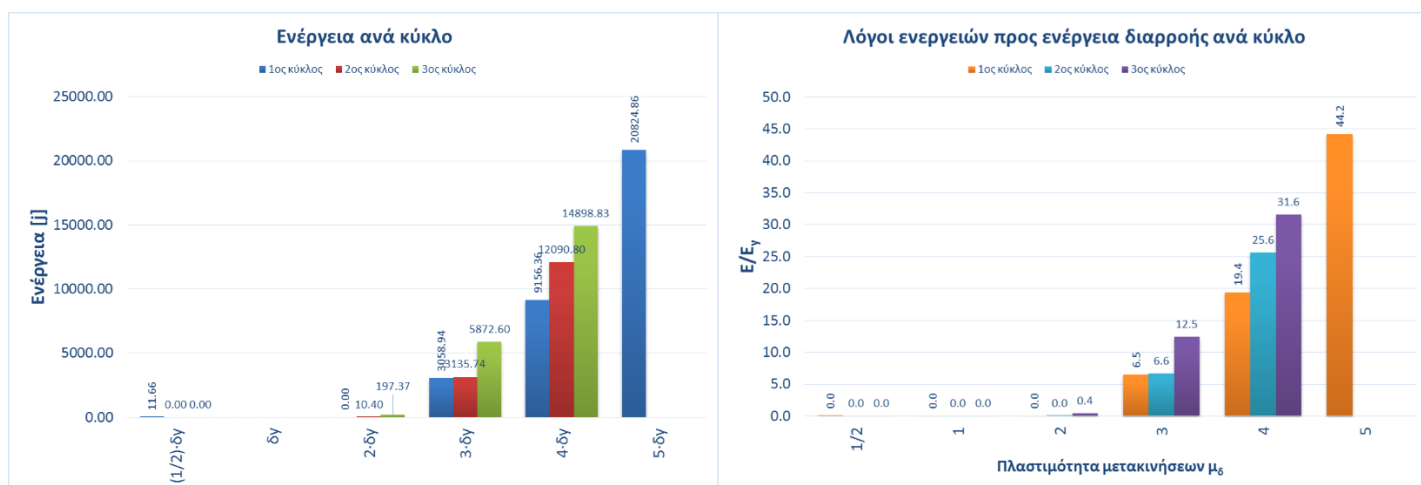
Σχήμα 3.29: Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων της δοκού Δ4

Η μείωση της δυσκαμψίας με τις ανακυκλίσεις φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, όπου $K_y = P_y/\delta_y = 24408.38 \text{ kN/m}$.



Σχήμα 3.30: Μεταβολή της δυσκαμψίας της Δ4 με τις ανακυκλίσεις

Η ενέργεια που καταναλώθηκε κατά τις ανακυκλίσεις παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα, τόσο σε τιμές σε J όσο και διαιρεμένα με την αντίστοιχη ενέργεια τη στιγμή της διαρροής.



Σχήμα 3.31: Ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης σε j (αριστερά) και σε λόγους ενεργειών προς ενέργεια διαρροής

Ο έμμεσος υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας δίνει 13.17 GPa (μέσω της κλίσης του διαγράμματος M-φ και τον υπολογισμό της ρηγματωμένης ροπής αδρανείας, όπως περιγράφεται στο Παράρτημα Β).

Πίνακας 3.11: Θεωρητικές τιμές κατά EC2 για την δοκό Δ4

Κατάσταση	M [kNm]	P [kN]	φ [1/m]	ϵ_{k2} [‰]	ϵ_{s1} [‰]	Κατακόρυφη μετατόπιση δ [mm]
Αστοχία	-51,83	-195,40	-0,05110	2,927	10,430	-21,9
Διαρροή	-50,37	-189,90	-0,01540	1,278	2,750	-6,6
Ρηγμάτωση	-10,41	-39,25	-0,00152	0,230	0,227	-0,7
0	0	0,00	0,00000	0,000	0,000	0,0
Ρηγμάτωση	10,27	38,72	0,00150	0,223	0,227	0,6
Διαρροή	48,54	183,00	0,01610	1,263	2,750	6,9
Αστοχία	49,82	187,82	0,05810	2,927	11,630	24,9

Η Δ4 ανέπτυξε 214.61 kN και 196.50 kN φορτία αστοχίας, για τις δύο κατευθύνσεις του φορτίου αντίστοιχα, με το θεωρητικά προβλεπόμενο να είναι 187.80 kN και 195.40 kN αντίστοιχα. Η πλαστικότητα σε όρους μετατοπίσεων για τη δοκό είναι 4.29 και σε όρους καμπυλοτήτων 6.97, με την αντίστοιχη βασική τιμή του δείκτη συμπεριφοράς q_0 4.0, που αναλογεί σε σχεδιασμό για υψηλή κατηγορία πλαστικότητας. Η δοκός ανέπτυξε γωνία στροφής χορδής στην αστοχία θ_u ίση με 0.0295 ενώ η υπολογιζόμενη κατά ΚΑΝΕΠΕ ισούται με 0.0464, προκύπτει δηλαδή μειωμένη κατά 36% από το «μέσο όρο» δοκών από ΣΠΣ.

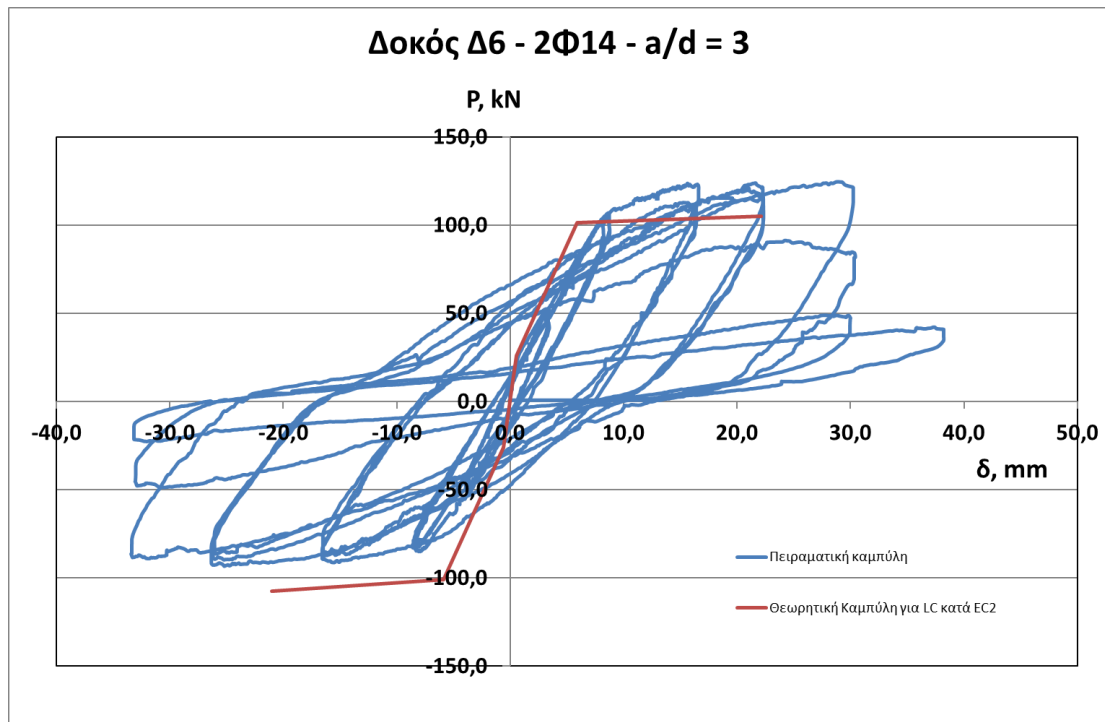
3.4.1.5 Δοκός Δ6

Η δοκός Δ6 είναι ταυτόσημη με τις Δ1 και Δ2, έχει δηλαδή άνω και κάτω σπλισμούς 2Φ14 και σταθερό σπλισμό διάτμησης σε όλο της το μήκος δίτμητους Φ8/100 mm, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.19. Ο λόγος διάτμησης a/d ισούται με 3. Η περιγραφή της πειραματικής διάταξης και της ενόργανης παρακολούθησης παρουσιάζεται αναλυτικά στο § 3.3.3.



Εικόνα 3.21: Η δοκός Δ6, η πειραματική διάταξη και η ενόργανη παρακολούθηση πριν την έναρξη της δοκιμής

Η δοκός Δ6 καταπονήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση ελεγχόμενων μετατοπίσεων, για μετατοπίσεις ± 0.5 ως $5 \delta_y$, με τρεις κύκλους για τη κάθε μια (βλ. και Σχήμα 3.12). Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στις 17/6/2015, ενώ η σκυροδέτηση την 6/4/2015. Το διάγραμμα φορτίου $P - \text{μετατόπισης } \delta$ στο μέσο της δοκού παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.32: Διάγραμμα P-δ της δοκού Δ6

Η ρηγμάτωση του εφελευόμενου σκυροδέματος συνέβη περίπου σε ροπή 10kNm και μετακίνηση 0.9 mm με τις αντίστοιχες υπολογιζόμενες τιμές να είναι 9.5 kNm και 0.6 mm. Επίσης, διαρροή της μεσαίας διατομής συμβαίνει σε μετακίνηση $\delta = 7.22$ mm ενώ η θεωρητικά προβλεπόμενη υπολογίστηκε ίση με 5.9 mm. Στη δοκό Δ6 παρατηρούνται ακόμα και στους κύκλους διαρροής, πέραν των αναμενόμενων καμπτικών, και διατμητικές ρωγμές στο χώρο του μήκους διάτμησης.



Εικόνα 3.22: Ρηγμάτωση στην μετατόπιση $+\delta_y$, πρώτος κύκλος (αριστερά) και $-\delta_y$ τρίτος κύκλος (δεξιά)

Στους κύκλους των μετακινήσεων $2 \cdot \delta_y$ οι καμπτικές ρωγμές απέκτησαν μεγαλύτερο πλάτος και οι διατμητικές παρέμειναν στα στάδια των προηγούμενων κύκλων. Ακριβώς στο σημείο

της επιβολής του φορτίου αναπτύχθηκε μια καμπτική ρωγμή που σταδιακά αύξανε το πλάτος της, δημιουργώντας στους επόμενους κύκλους – 3 και 4 δ_y - μια εκτεταμένη πλαστικοποίηση στην γύρω περιοχή. Ταυτόχρονα, από τους κύκλους της μετακίνησης $3 \cdot \delta_y$ και έπειτα, οι διατμητικές ρωγμές κοντά στο σημείο επιβολής του φορτίου αυξάνουν το εύρος τους και διασταυρώνονται με τις εναλλαγές του φορτίου, αποδιοργανώνοντας το σκυρόδεμα και οδηγώντας τελικά στην αστοχία της δοκού.



Εικόνα 3.23: Ρηγμάτωση της δοκού Δ6 στη μετακίνηση $2\delta_y$ - $1^{ος}$ κύκλος (αριστερά) και $2 \cdot \delta_y$ - $3^{ος}$ κύκλος (δεξιά)



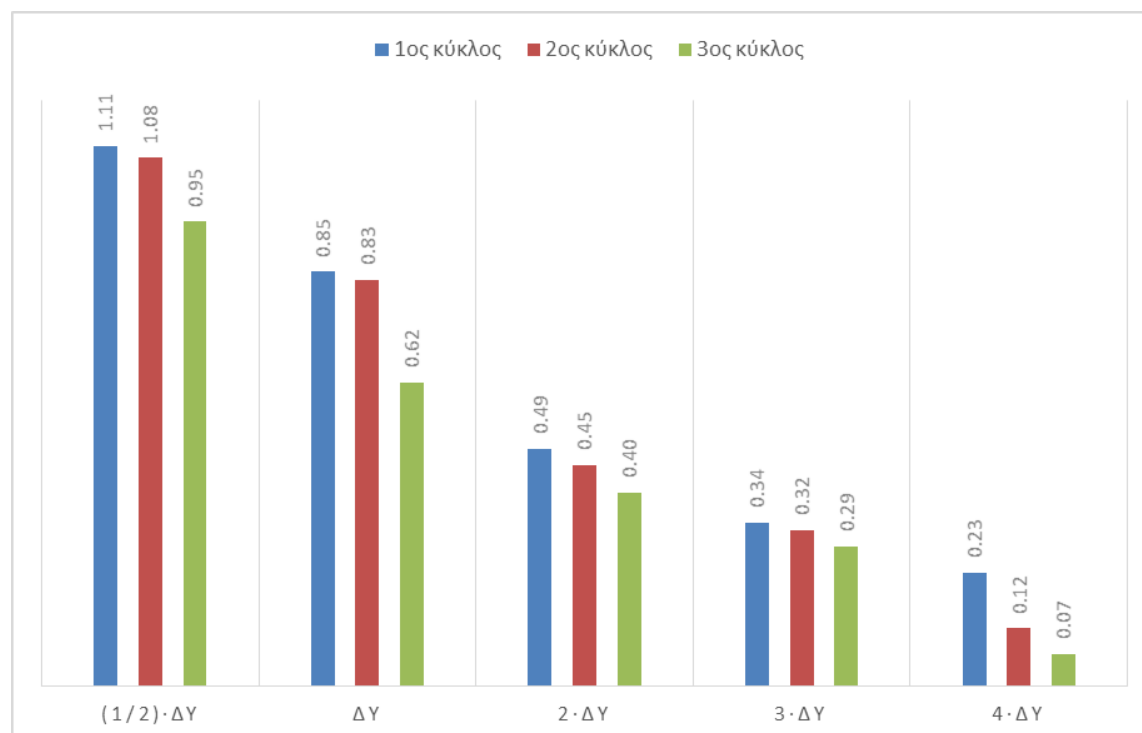
Εικόνα 3.24: Η δοκός Δ6 στην μετατόπιση $-4 \cdot \delta_y$, $1^{ος}$ κύκλος

Στη δοκό αυτή οι καμπτικές ρωγμές δεν διέρχονται από το μέσο της δοκού, όπου έχουν προσαρτηθεί τα μηχανοστάσια, αλλά λίγο δεξιότερα, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η εκτίμηση των πλαστικών στρωμάτων της πλαστικής άρθρωσης. Αν όμως λάβουμε υπόψη τις πειραματικές τιμές των υπολοίπων δοκιμών, ο λόγος του $(\mu_{1/f} - 1)$ προς $(\mu_\delta - 1)$ προκύπτει σε όλα μεγαλύτερος του 1.4 ενώ και από τη βιβλιογραφία γνωρίζουμε ότι οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 2 και 3.7 συνήθως (για ΣΠΣ). Με την συντηρητική παραδοχή επομένως ότι η τιμή του λόγου ισούται με 1.4, η $\mu_{1/f}$ προκύπτει 5.76 και ο αντίστοιχος q_0 3.4, η οποία είναι τιμή που αντιστοιχεί σε μέση κατηγορία πλαστιμότητας. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι θεωρητικές τιμές κατά τον EC2 για ελαφροσκυρόδεμα.

Πίνακας 3.12: Θεωρητικές τιμές κατά EC2 για την δοκό Δ6

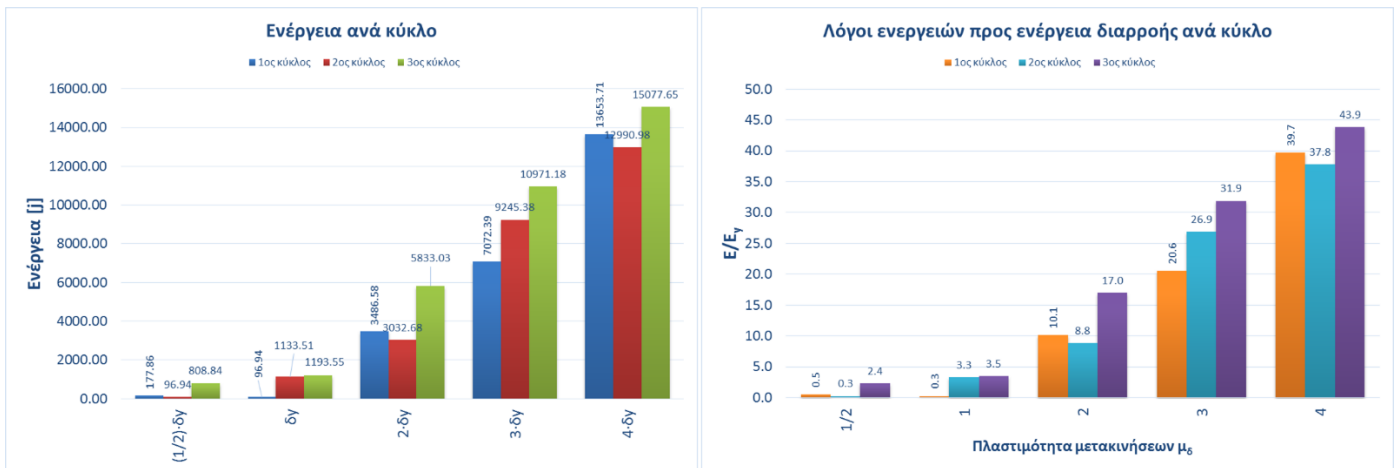
Κατάσταση	M [kNm]	P [kN]	φ [1/m]	ε _{κ2} [‰]	ε _{s1} [‰]	Κατακόρυφη μετατόπιση δ [mm]
Αστοχία	-39,27	-107,52	-0,05625	2,927	11,310	-21,0
Διαρροή	-36,96	-101,19	-0,01580	1,143	2,750	-5,9
Ρηγμάτωση	-9,5	-26,01	-0,00152	0,228	0,227	-0,6
0	0	0,00	0,00000	0,000	0,000	0,0
Ρηγμάτωση	9,45	25,87	0,00151	0,226	0,227	0,6
Διαρροή	36,96	101,19	0,01580	1,143	2,750	5,9
Αστοχία	38,34	104,97	0,05925	2,927	11,760	22,1

Το φορτίο αστοχίας της δοκού προέκυψε πειραματικά ίσο με 121.90 kN και 90 kN, για θετική και αρνητική φορά της φόρτισης αντίστοιχα, ενώ θεωρητικά οι τιμές υπολογίζονται 104.97 kN και 107.52 kN, αντίστοιχα. Η αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα της δοκού σε όρους μετακινήσεων ισούται με 4.35. Η μέση γωνία στροφής χορδής στην αστοχία προκύπτει πειραματικά ίση με 0.0343 με την υπολογιζόμενη κατά ΚΑΝΕΠΕ 0.0519, δηλαδή είναι μειωμένη κατά 36%. Η μεταβολή της δυσκαμψίας της δοκού με τις ανακυκλίσεις φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, διαιρεμένη με τη δυσκαμψία διαρροής ίση με $P_y/\delta_y = 13178.89$ kN/m.



Σχήμα 3.33: Μεταβολή της δυσκαμψίας προς τη δυσκαμψία διαρροής

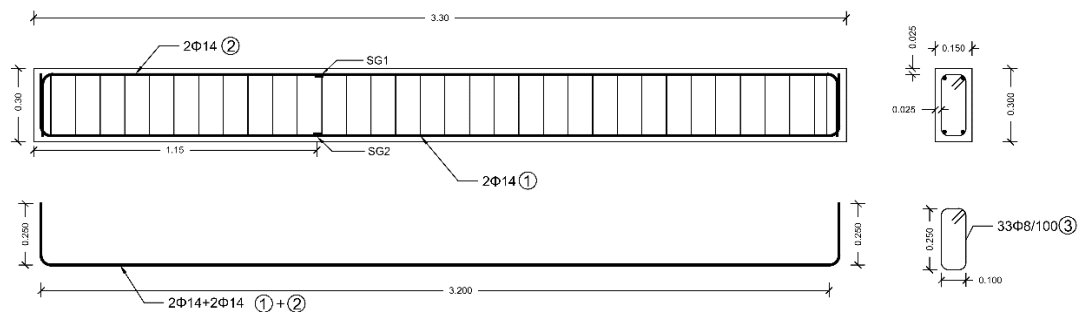
Στο Σχήμα 3.34 καταγράφεται η ενεργειακή απορρόφηση με τις ανακυκλίσεις, τόσο σε απόλυτες τιμές όσο και σε ανηγμένες με την ενέργεια διαρροής.



Σχήμα 3.34: Απορρόφηση ενέργειας δοκού Δ6 ανά κύκλο φόρτισης σε joule (αριστερά) και σε λόγους ενεργειών προς ενέργεια διαρροής (δεξιά)

3.4.2 Αποτελέσματα Δοκιμής Δοκού Δύο Ανοιγμάτων (Δ5)

Η δοκός Δ5 έχει μήκος 3.30 m, διατομή 150x300 mm, διαμήκη όπλιση 2+2Φ14 άνω/κάτω και σταθερό διατμητικό οπλισμό Φ8/100 σε όλο της το μήκος (Σχήμα 3.35). Η σκυροδέτηση έγινε την 18/5/2015 και η δοκιμή την 5/9/2015.

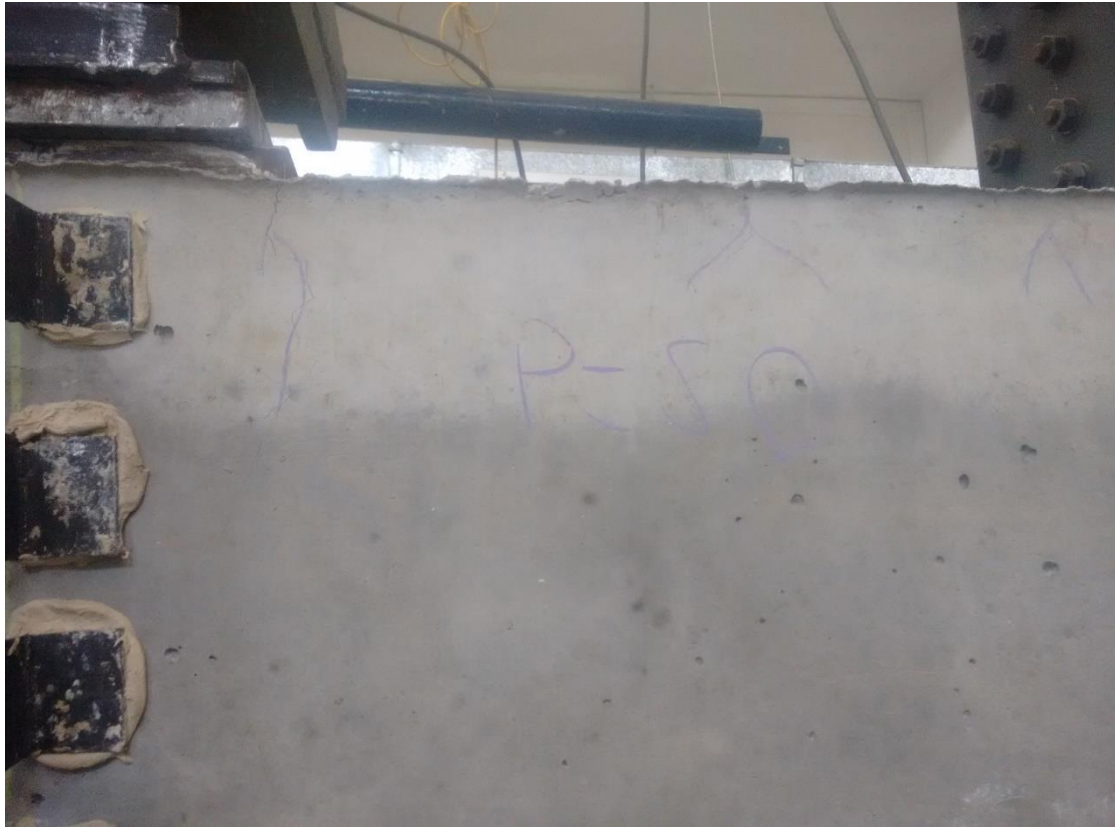


Σχήμα 3.35: Λεπτομέρειες όπλισης δοκού Δ5 και θέση strain gauges



Εικόνα 3.25: Η δοκός Δ5, η πειραματική διάταξη και ο ενόργανος εξοπλισμός πριν τη δοκιμή

Η Δ5 καταπονήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση ελεγχόμενων μετατοπίσεων, για μετατοπίσεις ± 0.5 ως 6 δ_y , με τρεις κύκλους για τη κάθε μια. Η πειραματική διάταξη και ο ενόργανος εξοπλισμός περιγράφονται αναλυτικά στο 3.3.4. Η κατακόρυφη μετατόπιση στο μέσο του μεγάλου ανοίγματος συμβολίζεται με δ . Από τις καταγραφές του προσαρτημένου strain gauge στον άνω οπλισμό, η διαρροή του τελευταίου μετρήθηκε τη στιγμή που η δ ισούται με 6.2 mm ενώ η θεωρητικά υπολογιζόμενη ισούται με 7.5 mm. Η αρχική μεταβολή της δυσκαμψίας της δοκού πριν τη διαρροή, που αντιστοιχεί στην αλλαγή της κλίσης του διαγράμματος P- δ , συμβαίνει σε φορτίο 54 kN και $\delta=3.5$ mm, με τη θεωρητικά προβλεπόμενη αντίστοιχη ροπή ρηγμάτωσης και δ ρηγμάτωσης ίσα με 9.45 kNm και 0.7 mm αντίστοιχα. Η καμπτική αυτή ρηγμάτωση παρατηρήθηκε και οπτικά τη στιγμή που συνέβη (βλ. παρακάτω εικόνα).



Εικόνα 3.26: Η πρώτη ρηγμάτωση στο χώρο του μέσου του μεγάλου ανοίγματος της δοκού Δ5 στο φορτίο 50 kN

Στην ανακύκλιση του φορτίου, στους κύκλους διαρροής, οι ρωγμές αυτές κλείνουν και αντίστοιχα ανοίγουν ίδιου τύπου (καμπτικές) στην κάτω παρειά της δοκού. Στην πρώτη ανακύκλιση της $\delta = \delta_y$, παρατηρούνται τριχοειδείς καμπτικές ρωγμές στη μεσαία στήριξη, μικρότερες από τις αντίστοιχες στο μέσο του μεγάλου ανοίγματος της δοκού. Στην πρώτη ανακύκλιση της $\delta = -2 \cdot \delta_y$, στο φορτίο $P = -110$ και $\delta = -9.3$ mm, η καμπτική ρηγμάτωση έχει κατανεμηθεί στο χώρο του μέσου του μεγάλου ανοίγματος (Εικόνα 3.27).



Εικόνα 3.27: Η ρηγμάτωση της δοκού Δ5 στο χώρο του μέσου του μεγάλου ανοίγματος της δοκού Δ5 στο φορτίο -110 kN, στην 1^η ανακύκλιση της $2 \cdot \delta_y$

Στις ανακυκλίσεις της $\delta = 3 \cdot \delta_y$ το πάχος των καμπτικών ρωγμών αυξάνεται και ειδικά στην τρίτη ανακύκλιση η αύξηση γίνεται σημαντική. Την ίδια ώρα οι ρωγμές στην στήριξη παραμένουν μικρές. Από τον πρώτο κύκλο της $\delta = 4 \cdot \delta_y$ η μεσαία περιοχή σταδιακά

αποδιοργανώνεται και πλαστικοποιείται περαιτέρω, ενώ οι ρωγμές στην στήριξη παραμένουν τάξης μεγέθους μικρότερες.



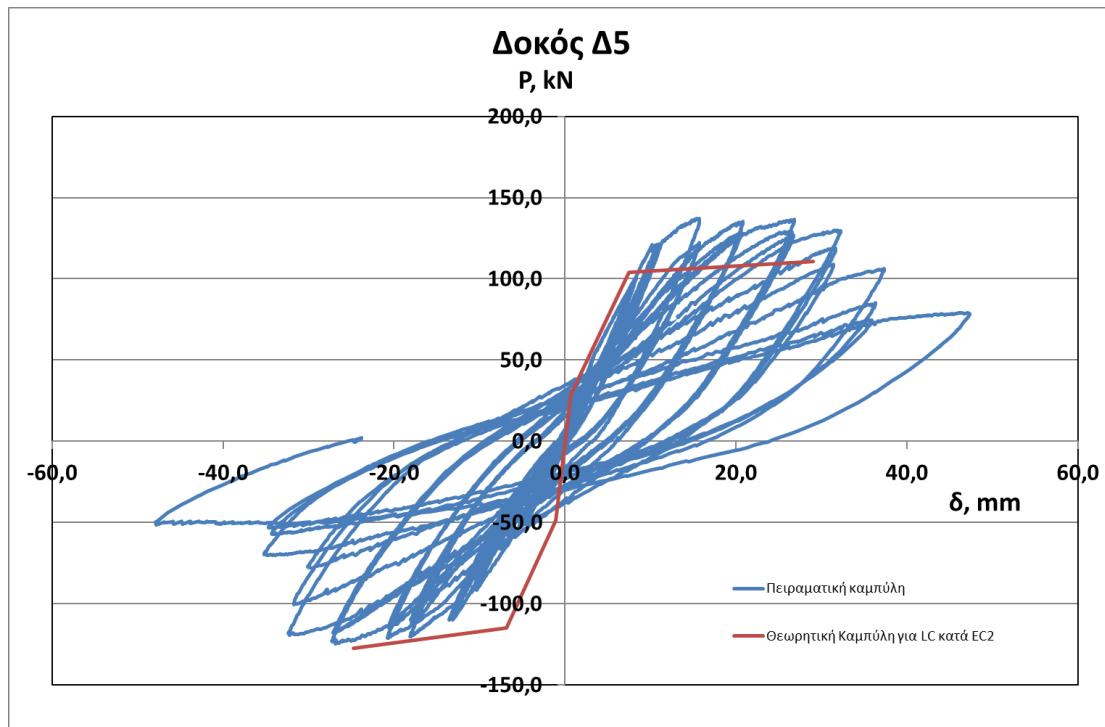
Εικόνα 3.28: Οι ρηγματώσεις στην 2^η ανακύκλιση της $\delta = 4 \cdot \delta_y$ στο μέσο του μεγάλου ανοίγματος της Δ5

Αποφλοιώσεις του σκυροδέματος επικάλυψης ξεκινούν να συμβαίνουν στη δεύτερη ανακύκλιση της $\delta = 5 \cdot \delta_y$, ενώ δεν παρατηρείται πλαστικοποίηση της στήριξης, παρά μόνο μικρή ρηγματώση συγκριτικά με το χώρο του μέσου. Τελικά, στις ανακυκλίσεις της $\delta = 6 \cdot \delta_y$, του σκυροδέμα στο χώρο του μέσου αποδιοργανώνεται πλήρως και χάνει την αντοχή του χωρίς να έχει σχηματιστεί πλαστική άρθρωση στη στήριξη.



Εικόνα 3.29: Η δοκός Δ5 στη $\delta = +6 \cdot \delta_y$

Το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης στο μέσο του μεγάλου ανοίγματος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.36: Διάγραμμα φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο του μεγάλου ανοίγματος της Δ5

Η δοκός ανέπτυξε μεγαλύτερες αντοχές από τις θεωρητικά αναμενόμενες, με τη μέγιστη αναπτυσσόμενη δύναμη να ισούται με 137.22 kN ενώ η θεωρητικά εκτιμώμενη ισούται με 110.67 kN. Κατά την άλλη διεύθυνση φόρτισης η πειραματική τιμή είναι 124.63 kN, ενώ η αντίστοιχη θεωρητική τιμή είναι 127.25 kN. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι θεωρητικές τιμές κατά τον EC2 για ελαφροσκυρόδεμα.

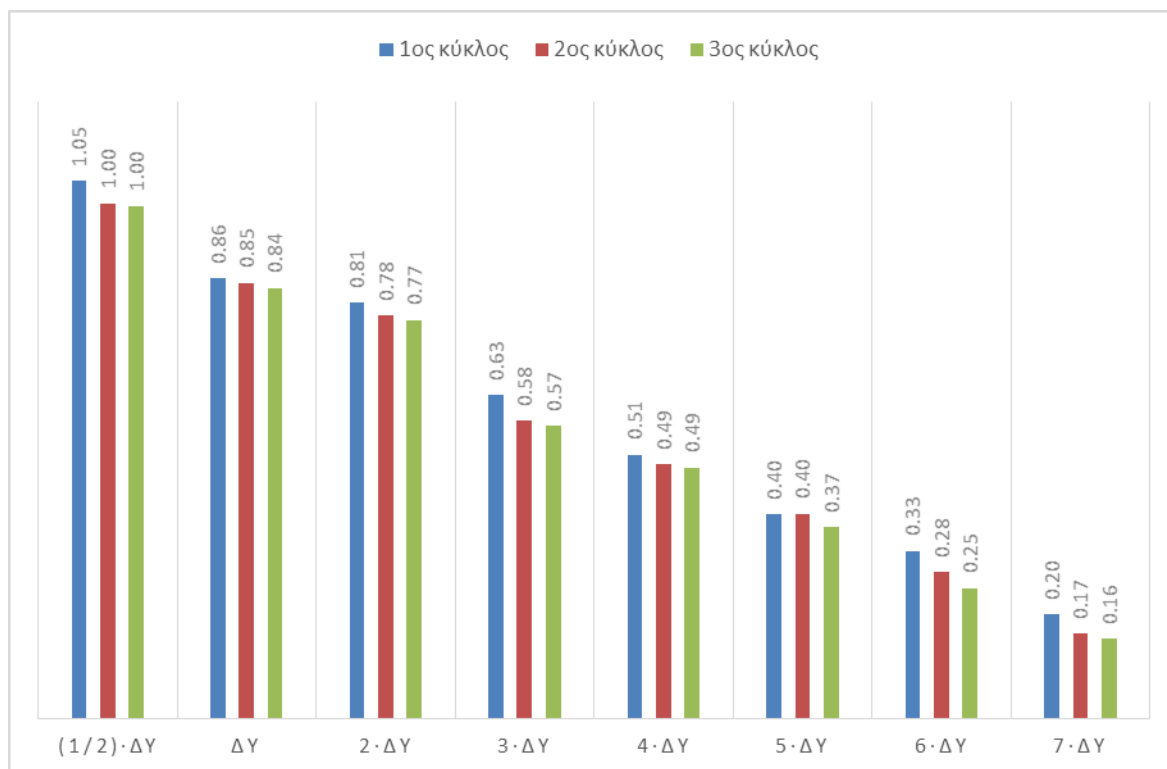
Πίνακας 3.13: Θεωρητικές τιμές κατά EC2 για την δοκό 2 ανοιγμάτων Δ5

Κατάσταση	M [kNm]	P [kN]	ϕ [1/m]	ϵ_{t2} [‰]	ϵ_{s1} [‰]	Κατακόρυφη μετατόπιση δ [mm]
Αστοχία	-41,45	-127,25	-0,05685	3,118	10,710	-24,7
Διαρροή	-37,48	-115,06	-0,01580	1,099	2,750	-6,9
Ρηγμάτωση	-15,9	-48,81	-0,00254	0,382	0,257	-1,1
0	0	0,00	0,00000	0,000	0,000	0,0
Ρηγμάτωση	9,45	29,01	0,00151	0,226	0,147	0,7
Διαρροή	33,84	103,89	0,01720	1,098	2,750	7,5
Αστοχία	36,05	110,67	0,06675	3,118	11,780	29,0

Η αστοχία θεωρείται ότι επέρχεται όταν η πτώση της αντοχής ξεπεράσει το 20% της μέγιστης τιμής της. Για τα θετικές επιβαλλόμενες μετατοπίσεις, αυτό συμβαίνει στην πρώτη ανακύκλιση της μετακίνησης $\delta = 7 \cdot \delta_y$ ενώ για τις αρνητικές στη δεύτερη ανακύκλιση της $\delta = -6 \cdot \delta_y$. Η αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα σε όρους μετακινήσεων ισούται με 5.76, ενώ σε όρους

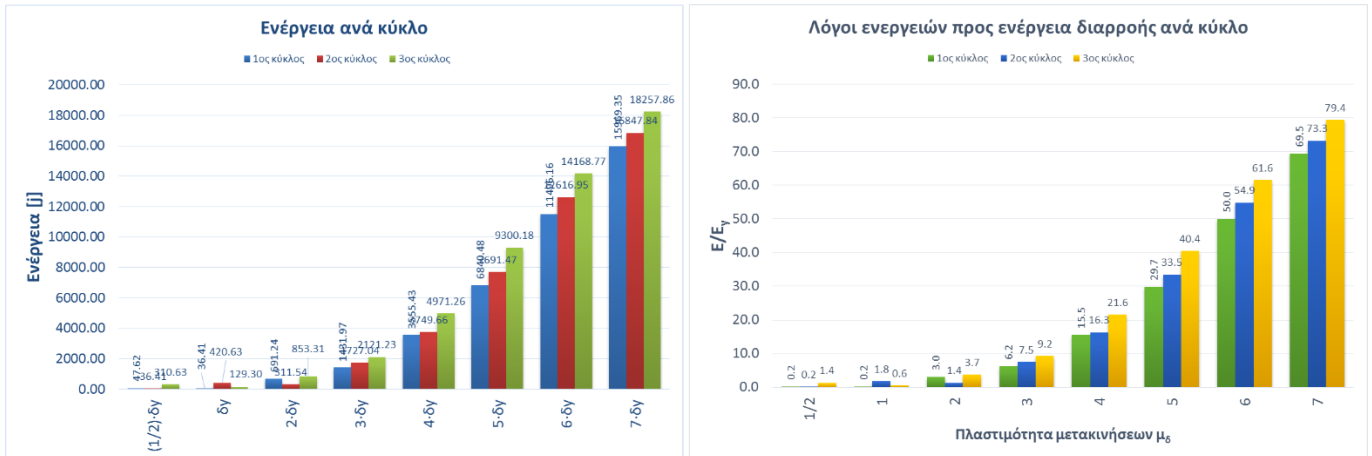
καμπυλοτήτων $\mu_{1/r}$ δεν κατέστη εφικτό να μετρηθούν καθώς τα οριζόντια μηκυνσίόμετρα στην αστοχία είχαν αποκολληθεί από το σκυρόδεμα. Υιοθετώντας την ίδια παραδοχή που έγινε στη δοκό Δ6, δηλαδή ότι ο λόγος $(\mu_{1/r} - 1) / (\mu_\delta - 1)$ ισούται με 1.4 (βλ. αναλυτικά § 3.4.1.5 της παρούσας ενότητας εργασίας), ο $\mu_{1/r}$ προκύπτει ίσος με 6.7 και ο αντίστοιχος βασικός δείκτης συμπεριφοράς q_0 ίσος με 4.0, που αντιστοιχεί σε υψηλή κατηγορία πλαστιμότητας. Η μέση γωνία στροφής χορδής στην αστοχία θ_u προκύπτει το 67% της αντίστοιχης θεωρητικά υπολογιζόμενης κατά ΚΑΝΕΠΕ, 0.0383 έναντι 0.0477. Και σε αυτή τη δοκό δηλαδή, η αναπτυσσόμενη πλαστική στροφή χορδής υπολείπεται τον πειραματικό μέσο όρο δοκών από σύνηθες σκυρόδεμα, αποδεικνύοντας ότι η προσέγγιση μείωσης της διαθέσιμης πλαστικής στροφής που υιοθετεί ο EC2 κινείται προς τη σωστή κατεύθυνση.

Η πτώση της δυσκαμψίας του υποστυλώματος με τους κύκλους φόρτισης προς τη δυσκαμψία διαρροής παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα. Η δυσκαμψία διαρροής ισούται με 11998.71 kN/m.



Σχήμα 3.37: Λόγοι δυσκαμψίας κάθε κύκλου προς τη δυσκαμψία διαρροής της δοκού Δ5

Η ενέργεια που καταναλώθηκε κατά τις ανακυκλίσεις παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα, τόσο σε απόλυτες τιμές όσο και διαιρεμένα με την αντίστοιχη ενέργεια τη στιγμή της διαρροής.

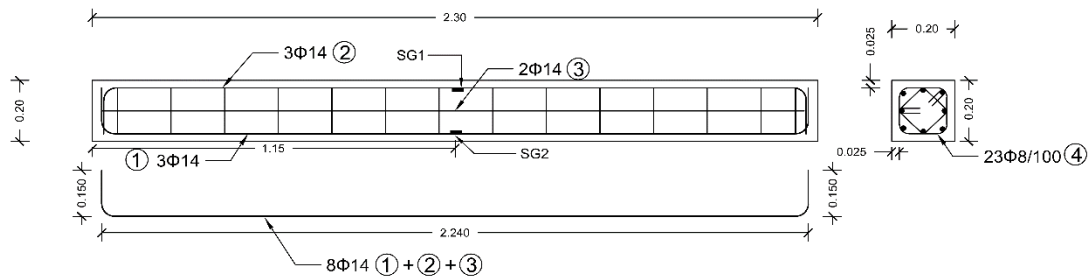


Σχήμα 3.38: Ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης σε joule (αριστερά) και σε λόγους ενεργειών προς ενέργεια διαρροής (δεξιά) της δοκού Δ5

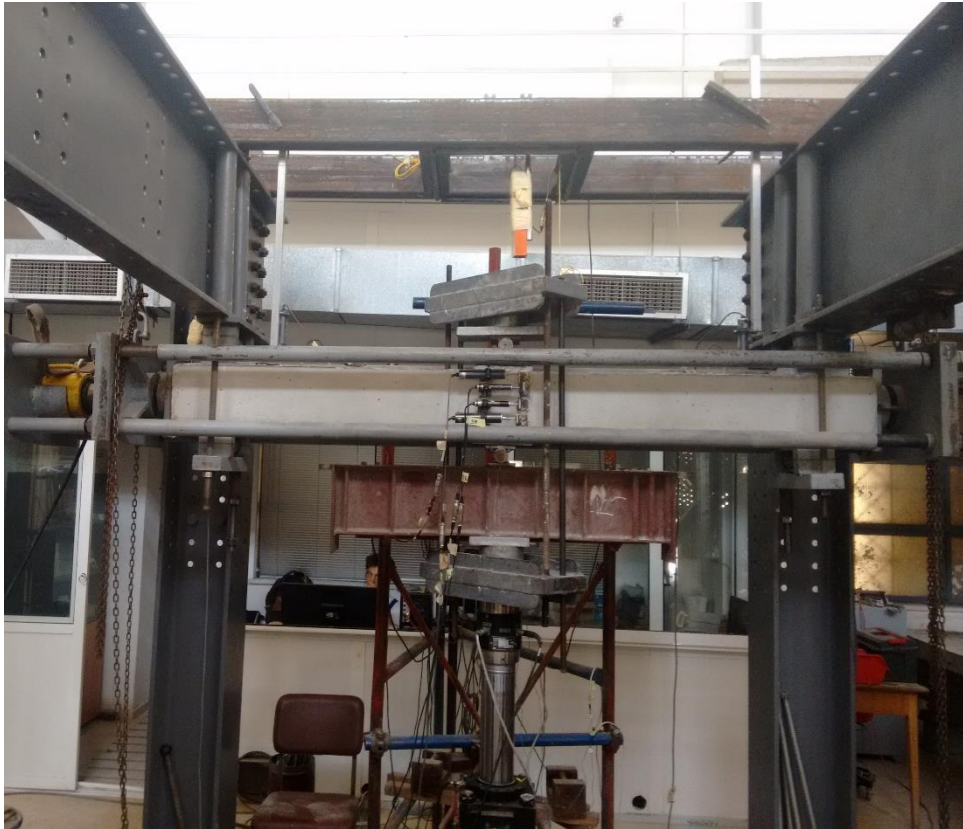
3.4.3 Αποτελέσματα Δοκιμών Υποστύλωματων

3.4.3.1 Υποστύλωμα Υ1

Το υποστύλωμα Υ1 έχει μήκος 2.30 m και διατομή 200x200 mm, περιμετρικό οπλισμό 8Φ14 και σταθερό οπλισμό διάτμησης σε όλο της το μήκος Φ8/100 mm, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Το Υ1 υποβάλλεται σε ανακυκλιζόμενη κάμψη τριών σημείων με σταθερό αξονικό θλιπτικό φορτίο ίσο με 150 kN ($N/bdf_{cd} = 0.20$, όπου N το αξονικό φορτίο και b,d οι διαστάσεις της διατομής). Η περιγραφή της πειραματικής διάταξης και της ενόργανης παρακολούθησης παρουσιάζεται αναλυτικά στο § 3.3.3.

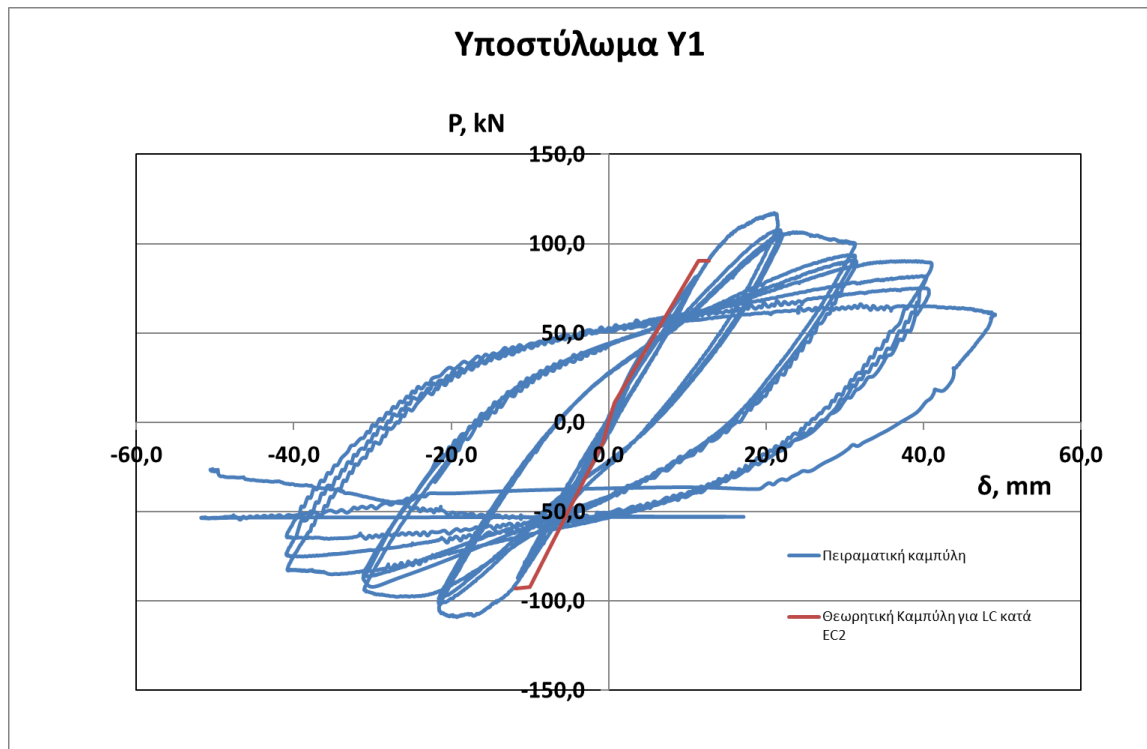


Σχήμα 3.39: Λεπτομέρειες όπλισης υποστύλωματος Υ1 και θέσεις strain gauges



Εικόνα 3.30: Το υποστύλωμα Y1, η πειραματική διάταξη και ο ενόργανος εξοπλισμός πριν την έναρξη του πειράματος

Το υποστύλωμα Y1 καταπονήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση ελεγχόμενων μετατοπίσεων, για μετατοπίσεις ± 0.5 ως $5 \delta_y$, με τρεις κύκλους για τη κάθε μια. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στις 2/9/2015, ενώ η σκυροδέτηση την 6/4/2015.



Σχήμα 3.40: Διάγραμμα φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο του υποστυλώματος Υ1

Οι σημαντικές ρωγμές παρατηρούνται κυρίως από τους κύκλους $2 \cdot \delta_y$ και μετά, οι οποίες αρχικά είναι καμπτικές περί το μέσο της δοκού. Στη συνέχεια, στον δεύτερο κύκλο της $2 \cdot \delta_y$ εμφανίζεται αστοχία σε κάμψη του θλιβόμενου σκυροδέματος στο μέσο της δοκού με συνέπεια τη αρχική αποδιοργάνωση του στο σημείο αυτό (βλ. παρακάτω εικόνα).





Εικόνα 3.31: Ρηγμάτωση του Y1 στην μετατόπιση 2·δ_y, 1^{ος} κύκλος (πάνω) και στην -2·δ_y, 2^{ος} κύκλος (κάτω)

Στους κύκλους των 3·δ_y η αποδιοργάνωση της θλιβόμενης ζώνης συνεχίζεται και το σκυρόδεμα επικάλυψης αποφλοιώνεται. Στους επόμενους τρεις κύκλους, η αποδιοργάνωση στη θλιβόμενη ζώνη στο χώρο του μέσου του υποστύλωματος εκτείνεται σταδιακά σε όλο το ύψος της διατομής, με επακόλουθο την αντίστοιχη πτώση της καμπτικής απόκρισης.



Εικόνα 3.32: Το υποστύλωμα Y1 στην αστοχία

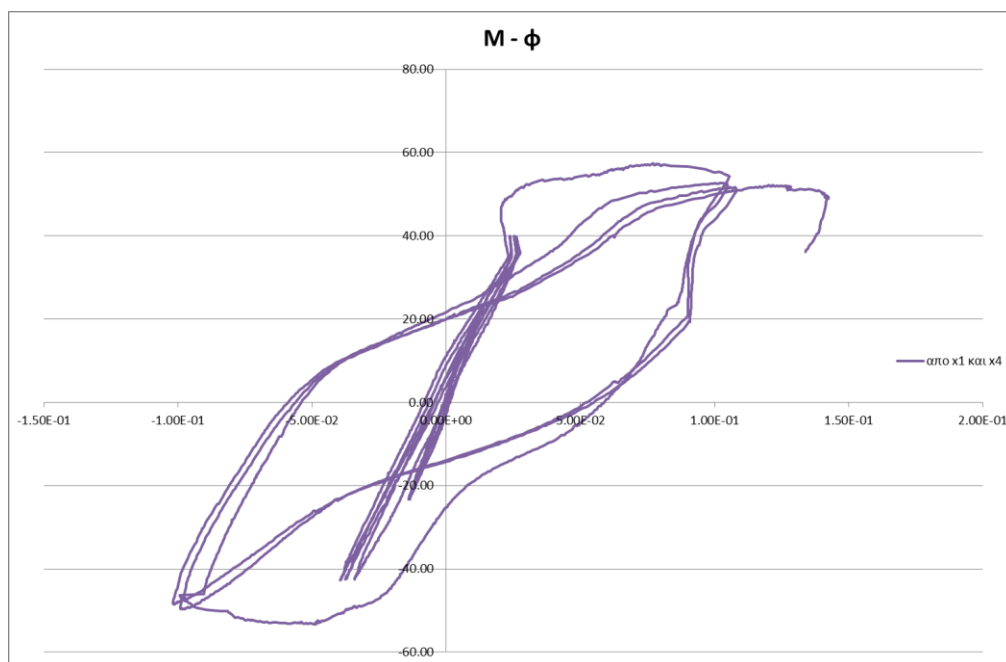
Μετά το τέλος της δοκιμής, αποφλοιώθηκε εντελώς η περιοχή του μέσου της δοκού για να φανεί ο κλωβός οπλισμού και διαπιστώθηκε ότι οι διαμήκεις οπλισμοί έχουν υποστεί και παραμορφώσεις στην εγκάρσιά τους διεύθυνση (βλ. παρακάτω εικόνα).



Εικόνα 3.33: Παραμόρφωση διαμήκων ράβδων οπλισμού μετά την τελική αστοχία

Το υποστύλωμα υπέστη σημαντική σταδιακή μείωση της απόκρισής τους με τις ανακυκλίσεις. Ενώ το μέγιστο φορτίο που ανέλαβε το Y1 ήταν 117.3 kN και επιτεύχθηκε στους κύκλους διαρροής, στους κύκλους μετακίνησης 2·δ_y η απόκριση σε όρους αναπτυσσόμενου φορτίου μειώθηκε κατά 15%, στους κύκλους 3·δ_y κατά 26% και στους κύκλους 4·δ_y κατά 49%.

Συνεπώς, το Υ1 θεωρείται ότι αστοχεί ήδη στους κύκλους μετατοπίσεων $3 \cdot \delta_y$ αφού τότε περίπου η αντοχή υποβιβάζεται στο 80% της μέγιστης. Λόγω της αποφλοιώσης του ΚΔ στο χώρο του μέσου όπου είχαν προσαρτηθεί τα μηκυνσιόμετρα, αυτά αποκολλήθηκαν περίπου στο τέλος του τρίτου κύκλου της μετατόπισης $2 \cdot \delta_y$, με συνέπεια να μην είναι δυνατός ο άμεσος προσδιορισμός των καμπυλοτήτων στο μέσο της δοκού κατά την αστοχία, επομένως και της πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων. Παρατίθεται το διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων μέχρι το σημείο που υπάρχουν μετρήσεις στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 3.34: Διάγραμμα ροπών – καμπυλοτήτων μέχρι και τον πρώτο κύκλο της μετακίνησης $3 \cdot \delta_y$

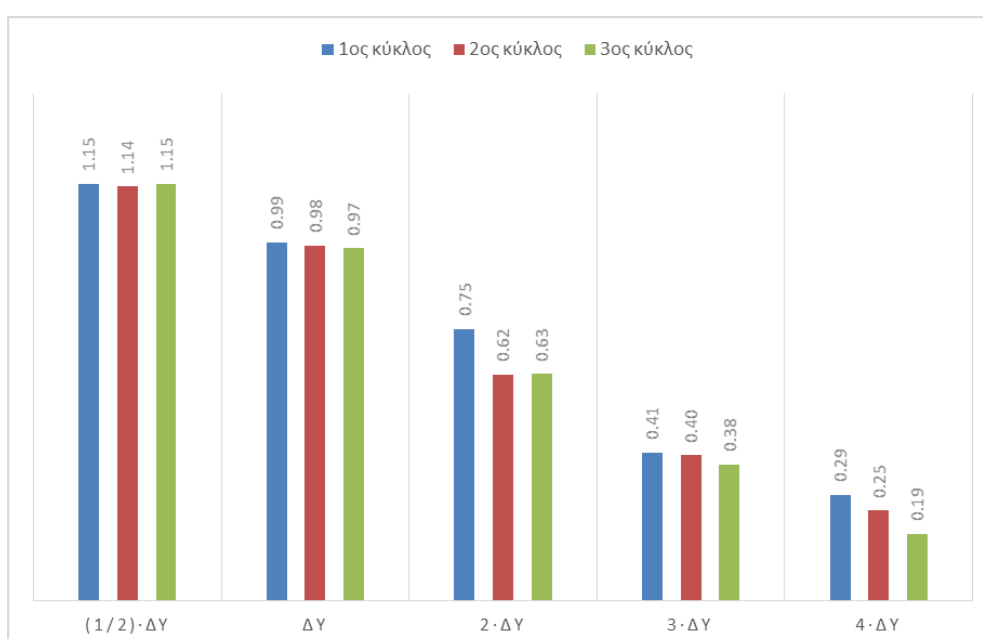
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι θεωρητικές τιμές κατά τον EC2 για ελαφροσκυρόδεμα.

Πίνακας 3.14: Θεωρητικές τιμές κατά EC2 για το υποστόλωμα Υ1

Κατάσταση	M [kNm]	P [kN]	φ [1/m]	ϵ_{lc2} [‰]	ϵ_{s1} [‰]	Κατακόρυφη μετατόπιση δ [mm]
Αστοχία	-45,53	-93,01	-0,03705	2,927	3,050	-11,8
Διαρροή	-45,05	-92,03	-0,03140	2,725	2,750	-10,0
Ρηγμάτωση	-5,47	-11,17	-0,00228	0,230	0,227	-0,7
0	0	0,00	0,00000	0,000	0,000	0,0
Ρηγμάτωση	5,4	11,03	0,00225	0,224	0,227	0,7
Διαρροή	44,19	90,28	0,03580	2,732	2,750	11,4
Αστοχία	44,21	90,32	0,03980	2,927	3,130	12,7

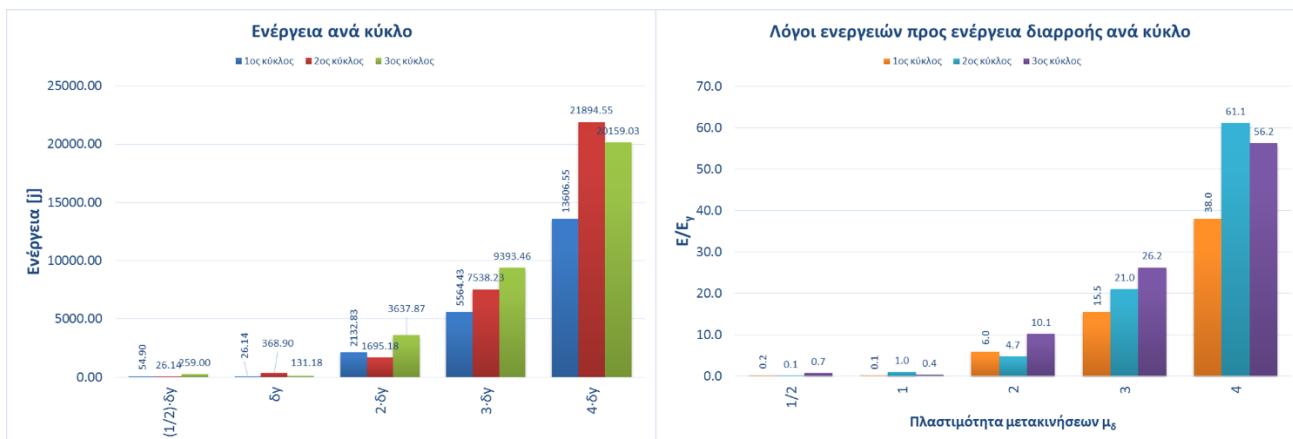
Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η τιμή της καμπυλότητας στον πρώτο κύκλο της μετακίνησης $3 \cdot \delta_y$ ισούται με 0.134 και η αντίστοιχη πλαστιμότητα καμπυλοτήτων $\mu_{1/r}$ ίση με 4.87, που σημαίνει ότι πλαστιμότητα καμπυλοτήτων στην αστοχία είναι μεγαλύτερη από 4.9, με αντίστοιχη βασική τιμή του δείκτη συμπεριφοράς q_0 να υπερβαίνει την τιμή 2.9. Η πλαστιμότητα σε όρους μετακινήσεων που αναπτύχθηκε στην αστοχία ισούται με 2.7. Η μέση γωνία στροφής χορδής στην αστοχία θ_u μετρήθηκε 0.0320 με την αντίστοιχη υπολογιζόμενη κατά ΚΑΝΕΠΕ 0.0571, δηλαδή η θ_u του Υ1 υπολείπεται κατά 45% του «μέσου όρου» υποστυλωμάτων από ΣΠΣ.

Η πτώση της δυσκαμψίας του υποστυλώματος με τους κύκλους φόρτισης προς τη δυσκαμψία διαρροής παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα. Η δυσκαμψία διαρροής ισούται με 7565.23 kN/m.



Σχήμα 3.41: Λόγοι δυσκαμψίας κάθε κύκλου προς τη δυσκαμψία διαρροής του υποστυλώματος Υ1

Η ενέργεια που καταναλώθηκε κατά τις ανακυκλίσεις παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα, τόσο σε απόλυτες τιμές όσο και διαιρεμένα με την αντίστοιχη ενέργεια τη στιγμή της διαρροής.



Σχήμα 3.42: Ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης σε j (αριστερά) και σε λόγους ενεργειών προς ενέργεια διαρροής (δεξιά)

3.4.3.2 Υποστύλωμα Y2

Το υποστύλωμα Y2 είναι πανομοιότυπο με το Y1, δηλαδή μήκος 2.30 m, διατομή 200x200 mm, περιμετρικό διαμήκη σπλισμό 8Φ14 και σταθερό σπλισμό διάτμησης Φ8/100 mm σε όλο του το μήκος (βλ. και Σχήμα 3.39). Η διαφοροποίηση με το Y1 έγκειται στο διαφορετικό αξονικό θλιπτικό φορτίο, το οποίο επιλέχθηκε ίσο με 250 kN ($N/bdf_{cd} = 0.30$).



Εικόνα 3.35: Το υποστύλωμα Y2, η πειραματική διάταξη και ο ενόργανος εξοπλισμός πριν τη δοκιμή

Το υποστύλωμα Y2 καταπονήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση ελεγχόμενων μετατοπίσεων, για μετατοπίσεις ± 0.5 ως $5 \delta_y$, με τρεις κύκλους για τη κάθε μια. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στις 3/9/2015, ενώ η σκυροδέτηση την 6/4/2015. Από τις καταγεγραμμένες τιμές του strain gauge που είναι προσαρτημένο στον άνω οπλισμό, η διαρροή του συμβαίνει σε κατακόρυφη μετατόπιση στο μέσο του Y2 ίση με 9.3 mm, ενώ η θεωρητικά υπολογιζόμενη ισούται με 12 mm. Στις ανακυκλίσεις των μετακινήσεων $0.5 \cdot \delta_y$ και δ_y δεν παρατηρούνται ρηγματώσεις. Στις ανακυκλίσεις $2 \cdot \delta_y$ υπάρχουν ρωγμές μικρού πάχους, κυρίως καμπτικού τύπου στο χώρο του μέσου του υποστύλωματος. Στο πρώτο κύκλο της μετατόπισης $3 \cdot \delta_y$ παρατηρείται ρηγματώση λόγω αστοχίας της θλιβόμενης ζώνης σε κάμψη με συνέπεια τοπικά στο χώρο του μέσου περιορισμένες αποφλοιώσεις του σκυροδέματος επικάλυψης. Στον τρίτο κύκλο της $-3 \cdot \delta_y$, η αποφλοίωση έχει επεκταθεί σε σημαντικό βαθμό (βλ. παρακάτω εικόνες).



Εικόνα 3.36: Ρηγματώση και αποφλοίωση στον 1^ο κύκλο της μετατόπισης $+3 \cdot \delta_y$ (αριστερά) και στον 3^ο κύκλο της $-3 \cdot \delta_y$

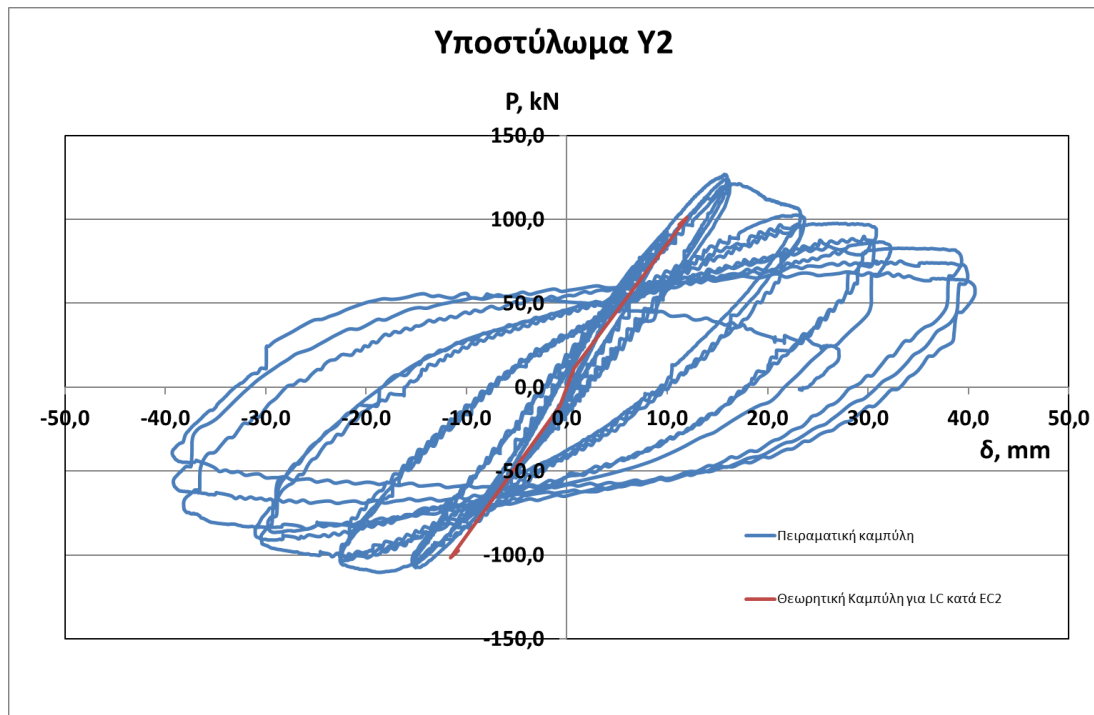
Η αποδιοργάνωση του χώρου του μέσου συνεχίζεται και στους επόμενους κύκλους με την συνεπακόλουθη πτώση της ικανότητας του υποστύλωματος να αναλαμβάνει φορτία, μέχρι την τελική αστοχία.



Εικόνα 3.37: Το υποστύλωμα Y2 στη μετατόπιση $+5 \cdot \delta_y$ μετά από τρεις ανακυκλίσεις

Από το διάγραμμα P- δ του υποστύλωματος (Σχήμα 3.43) είναι φανερή η σημαντική πτώση της φέρουσας ικανότητας με τις ανακυκλίσεις. Από το μέγιστο φορτίο το οποίο επιτυγχάνεται στις ανακυκλίσεις διαρροής και ισούται με 126.50 kN, το φορτίο μειώνεται στις ανακυκλίσεις 2,3,4 και $5 \cdot \delta_y$ σε ποσοστά μείωσης 20, 25, 43 και 76 %, αντίστοιχα. Επειδή στον πρώτο κύκλο της

μετατόπισης $3 \cdot \delta_y$ το φορτίο πέφτει κάτω από το 80% του μέγιστου φορτίου, θεωρείται ότι το υποστύλωμα έχει αστοχήσει. Το θεωρητικά εκτιμώμενο φορτίο αστοχίας είναι ίσο με 96.92 kN για την θετική φορά φόρτισης και 97.49 kN για την αρνητική φορά.



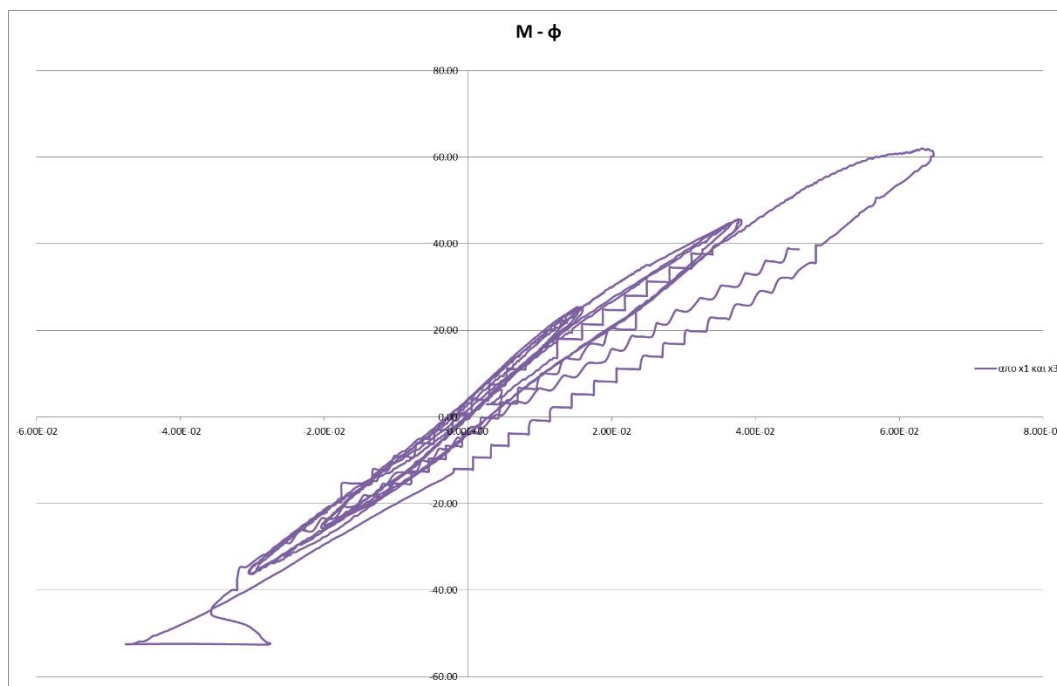
Σχήμα 3.43: Διάγραμμα φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο του υποστυλώματος Y2

Όπως και στο Y1, οι διαμήκεις οπλισμοί παραμορφώθηκαν και κατά την εγκάρσια διεθύνση μετά το τέλος των ανακυκλίσεων, αφού το σκυρόδεμα στο μέσο του Y2 είχε πλήρως αποδιοργανωθεί.



Εικόνα 3.38: Παραμόρφωση διαμήκων οπλισμών μετά την τελική αστοχία του Y2

Παρόμοια με το Υ1, τα οριζόντια μηκυνσιόμετρα στο μέσο του αποκολλήθηκαν λόγω της αποφλοιώσης του σκυροδέματος επικάλυψης στην πρώτη ανακύκλιση της μετατόπισης $2 \cdot \delta_y$, με συνέπεια να μην είναι δυνατή η εκτίμηση του διαγράμματος ροπών – καμπυλοτήτων μέχρι το τέλος της δοκιμής, άρα και της αναπτυσσόμενης πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων $\mu_{1/r}$. Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει τη σχέση ροπών – καμπυλοτήτων μέχρι το σημείο που χάθηκαν τα οριζόντια μηκυνσιόμετρα.



Εικόνα 3.39: Διάγραμμα ροπών – καμπυλοτήτων του Υ2 μέχρι και τον πρώτο κύκλο της μετακίνησης $2 \cdot \delta_y$

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι θεωρητικές τιμές κατά τον EC2 για ελαφροσκυρόδεμα.

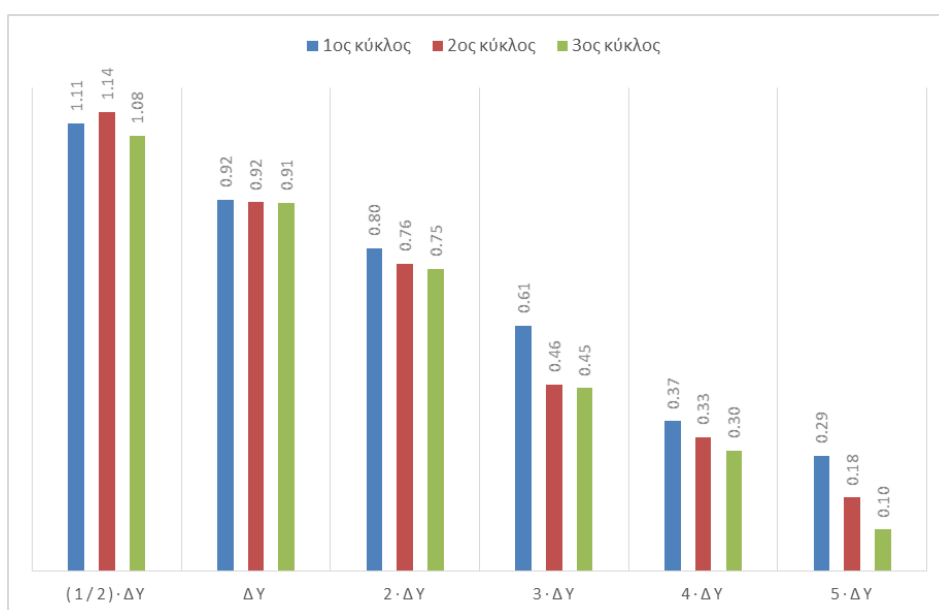
Πίνακας 3.15: Θεωρητικές τιμές κατά EC2 για το υποστύλωμα Υ2

Κατάσταση	M [kNm]	P [kN]	φ [1/m]	ϵ_{tc2} [‰]	ϵ_{s1} [‰]	Κατακόρυφη μετατόπιση δ [mm]
Αστοχία	-47,65	-97,49	-0,03395	2,927	3,380	-10,8
Διαρροή	-49,65	-101,59	-0,03640	2,725	2,750	-11,6
Ρηγμάτωση	-5,54	-11,34	-0,00228	0,229	0,227	-0,7
0	0	0,00	0,00000	0,000	0,000	0,0
Ρηγμάτωση	5,49	11,23	0,00226	0,225	0,227	0,7
Διαρροή	49,48	101,24	0,03760	2,732	2,750	12,0
Αστοχία	47,37	96,92	0,03505	2,927	3,130	11,2

Η αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα σε όρους μετατοπίσεων μ_δ μέχρι την αστοχία του Υ2 (δηλαδή μέχρι την πτώση του φορτίου στο 80% του μεγίστου) μετρήθηκε 2.37. Με την παραδοχή που

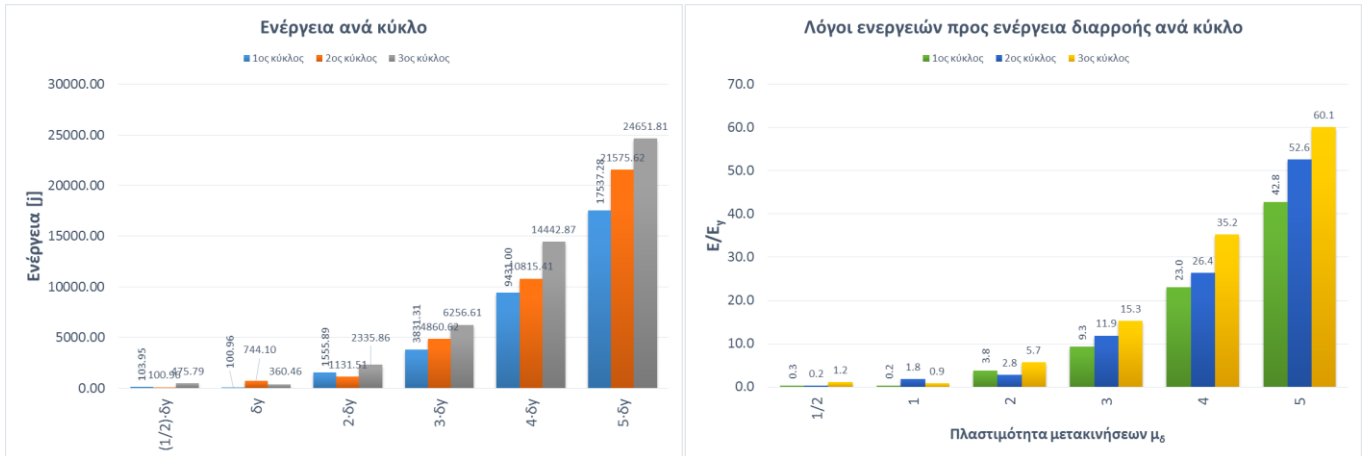
υιοθετείται και στα δοκίμια Δ6 και Δ5, η $\mu_{1/r}$ προκύπτει 3.6 και ο αντίστοιχος q_0 2.3. Η αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα είναι μικρή, μικρότερη και από αυτή της Υ1, αναμενόμενο καθώς το αξονικό θλιπτικό φορτίο αυξάνεται. Η μέση γωνία στροφής χορδής του μέλους στην αστοχία θ_u που προέκυψε πειραματικά ισούται με 0.0310, με την θεωρητικά υπολογιζόμενη τιμή κατά ΚΑΝΕΠΕ 0.0495. Η γωνία στροφής χορδής δηλαδή του Υ2 κατά την αστοχία είναι περίπου 40% μικρότερη από τον αντίστοιχο πειραματικό «μέσο όρο» υποστυλωμάτων από ΣΠΣ.

Η πτώση της δυσκαμψίας του υποστυλώματος με τους κύκλους φόρτισης προς τη δυσκαμψία διαρροής παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα. Η δυσκαμψία διαρροής ισούται με 9510.56 kN/m.



Σχήμα 3.44: Λόγοι δυσκαμψίας κάθε κύκλου προς τη δυσκαμψία διαρροής του υποστυλώματος Υ2

Η ενέργεια που καταναλώθηκε κατά τις ανακυκλίσεις παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα, τόσο σε απόλυτες τιμές όσο και διαιρεμένα με την αντίστοιχη ενέργεια τη στιγμή της διαρροής.

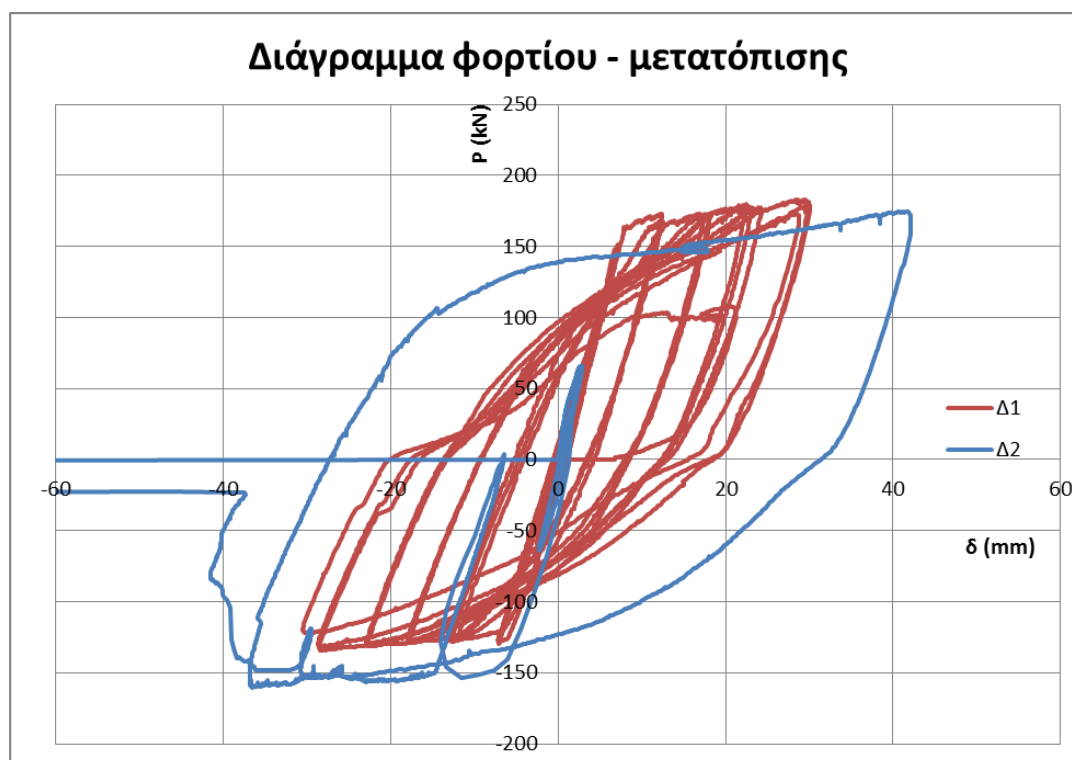


Σχήμα 3.45: Ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης σε joule (αριστερά) και σε λόγους ενεργειών προς ενέργεια διαρροής (δεξιά) του Y2

Τέλος, ο έμμεσος υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας δίνει $E=18.04$ GPa.

3.4.4 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

Οι δοκοί Δ1 και Δ2 είχαν ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ίδιο διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό και ίδιο μήκος διάτμησης, με τη μόνη διαφορά στον τύπο φόρτισης, καθώς η Δ1 φορτίστηκε με ανακυκλιζόμενο φορτίο τριών κύκλων για κάθε μια από τις 6 διαφορετικές μετατοπίσεις ενώ η Δ2 για μονοτονικό φορτίο κατά τις δύο διευθύνσεις. Από την μεταξύ τους σύγκριση των αντίστοιχων διαγραμμάτων φορτίου μετατόπισης, προκύπτουν τα εξής:

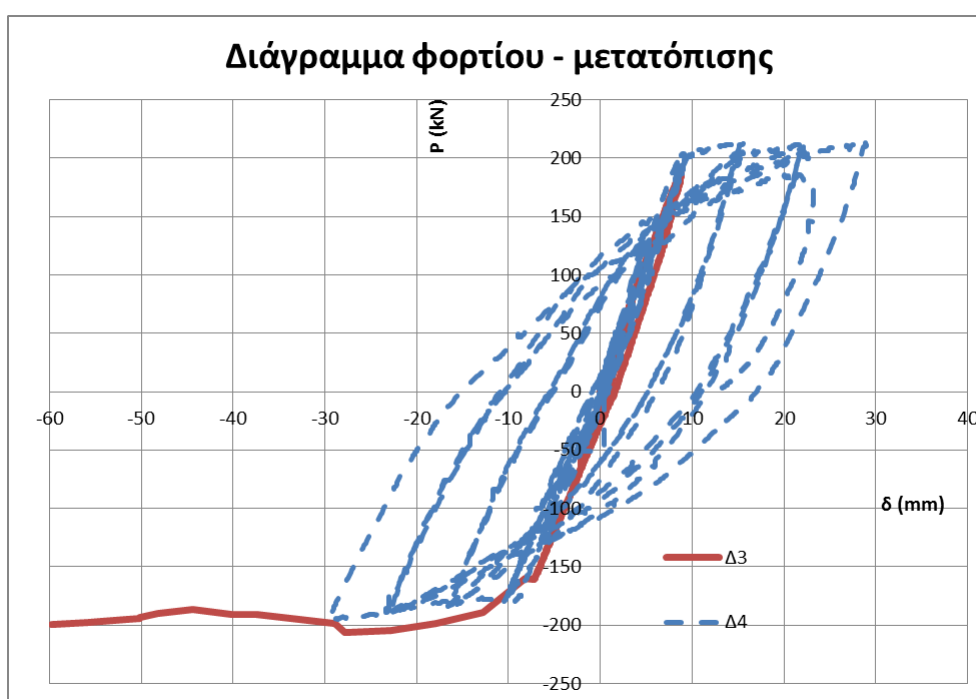


Σχήμα 3.46: Σύγκριση διαγραμμάτων P-δ των δοκών Δ1 και Δ2

- Παρατηρείται η τάση αύξησης της απόκρισης σε όρους φορτίου με την αύξηση των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων στη δοκό Δ1. Το γεγονός αυτό αποδίδεται τόσο στην κράτυνση του χάλυβα όσο και στο ότι το ΚΔ είναι ικανό να διατηρήσει τις αντοχές του σε σχετικά υψηλές πλαστικές παραμορφώσεις. Επιπλέον, η δοκός Δ1 διατηρεί την αύξηση των αντοχών αυτών παρά τις ανακυκλίσεις, το οποίο αποτελεί θετικό χαρακτηριστικό στη συμπεριφορά του ΚΔ υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις.
- Η μέγιστη απόκριση σε όρους μετακινήσεων είναι μειωμένη για την ανακυκλιζόμενη φόρτιση κατά 23% (μέσος όρος για τις δύο φορές τις φόρτισης). Η μείωση αυτή είναι σημαντική και οφείλεται στη σταδιακή μείωση της διατμητικής αντοχής του ΚΔ με τις ανακυκλίσεις. Η μείωση αυτή αποδίδεται στην ελάττωση της αποδοτικότητας των μηχανισμών που προσφέρουν διατμητική αντοχή και συγκεκριμένα η δράση βλήτρου των διαμήκων οπλισμών, η μείωση της αντοχής του διαγώνιου θλιπτήρα του ΚΔ αλλά και η μείωση της δράσης της αλληλεμπλοκής αδρανών. Ειδικά για την τελευταία,

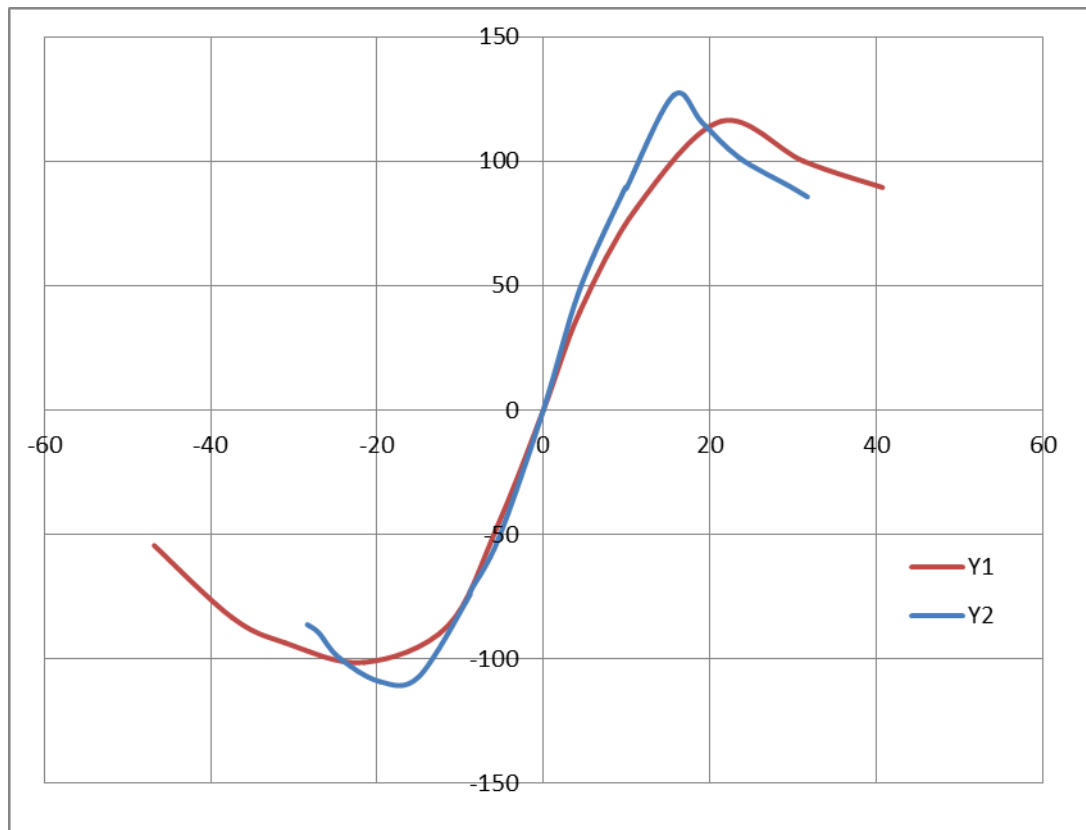
σημειώνονται τα εξής: στο ΚΔ λόγω της μικρής αντοχής των αδρανών που περιέχει, οι ρωγμές τείνουν να διέρχονται εντός αυτών και όχι να τις παρακάμπτουν, μιας και ο τσιμεντοπολτός παρουσιάζει μεγαλύτερες αντοχές, με συνέπεια οι ρωγμές να αποκτούν λεία μορφή, γεγονός που δεν επιτρέπει την σημαντική ανάπτυξη δυνάμεων αντίστασης λόγω αλληλεμπλοκής των αδρανών. Επομένως, το τμήμα της διατμητικής αντοχής που οφείλεται στο φαινόμενο αυτό τείνει να εξαλειφθεί πολύ γρήγορα με τις ανακυκλίσεις. Επιπλέον, το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας του ΚΔ πιθανόν να επιδρά αρνητικά στην αντοχή του διαγώνιου θλιπτήρα.

Οι Δ3 και Δ4, κατ' αντιστοιχία με τις Δ1 και Δ2, είχαν τα ίδια χαρακτηριστικά μεταξύ τους και φορτίστηκαν με μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση αντίστοιχα.



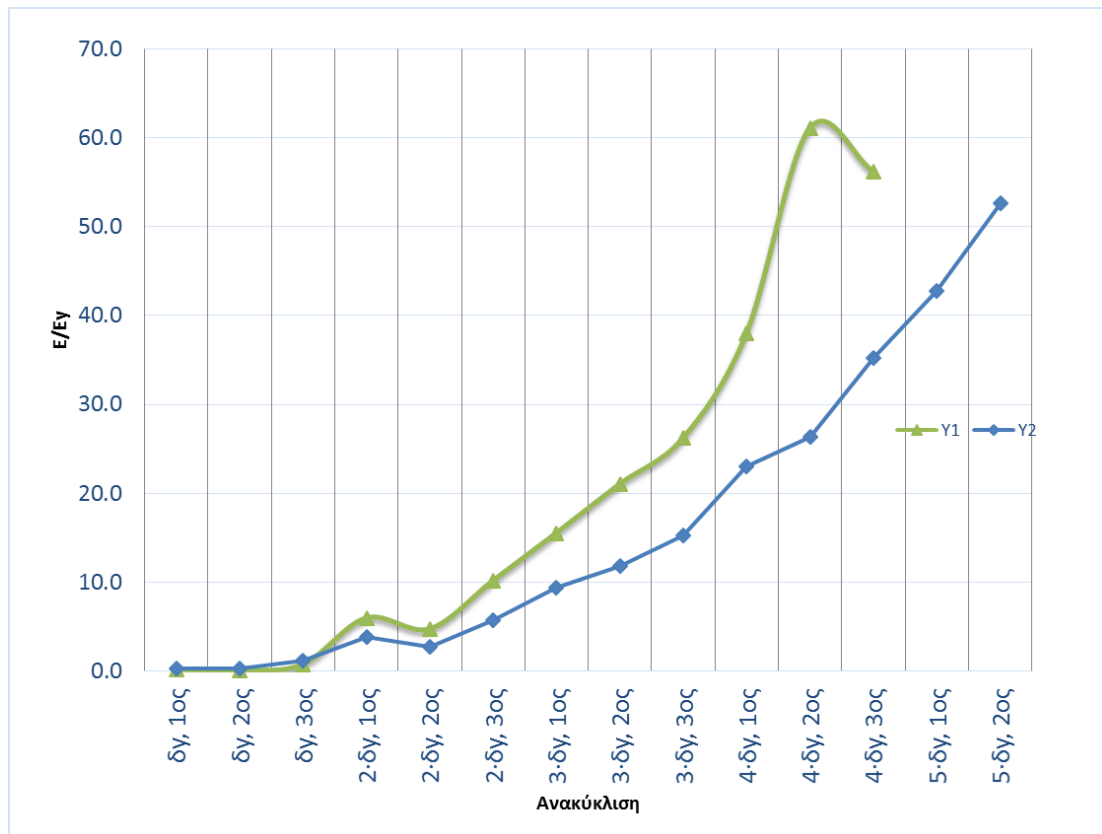
Σχήμα 3.47: Σύγκριση διαγραμμάτων P-δ των δοκών Δ3 και Δ4

Παρόμοια, τα δύο υποστρώματα που δοκιμάστηκαν είχαν ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ίδια όπλιση και αντοχή ΚΔ με τη μόνη διαφορά το επίπεδο του ανηγμένου αξονικού θλιπτικού φορτίου $v_d = N/bdf_{cd}$. Ο λόγος αυτός επιλέχθηκε 0.20 για το Y1 και 0.30 για το Y2.



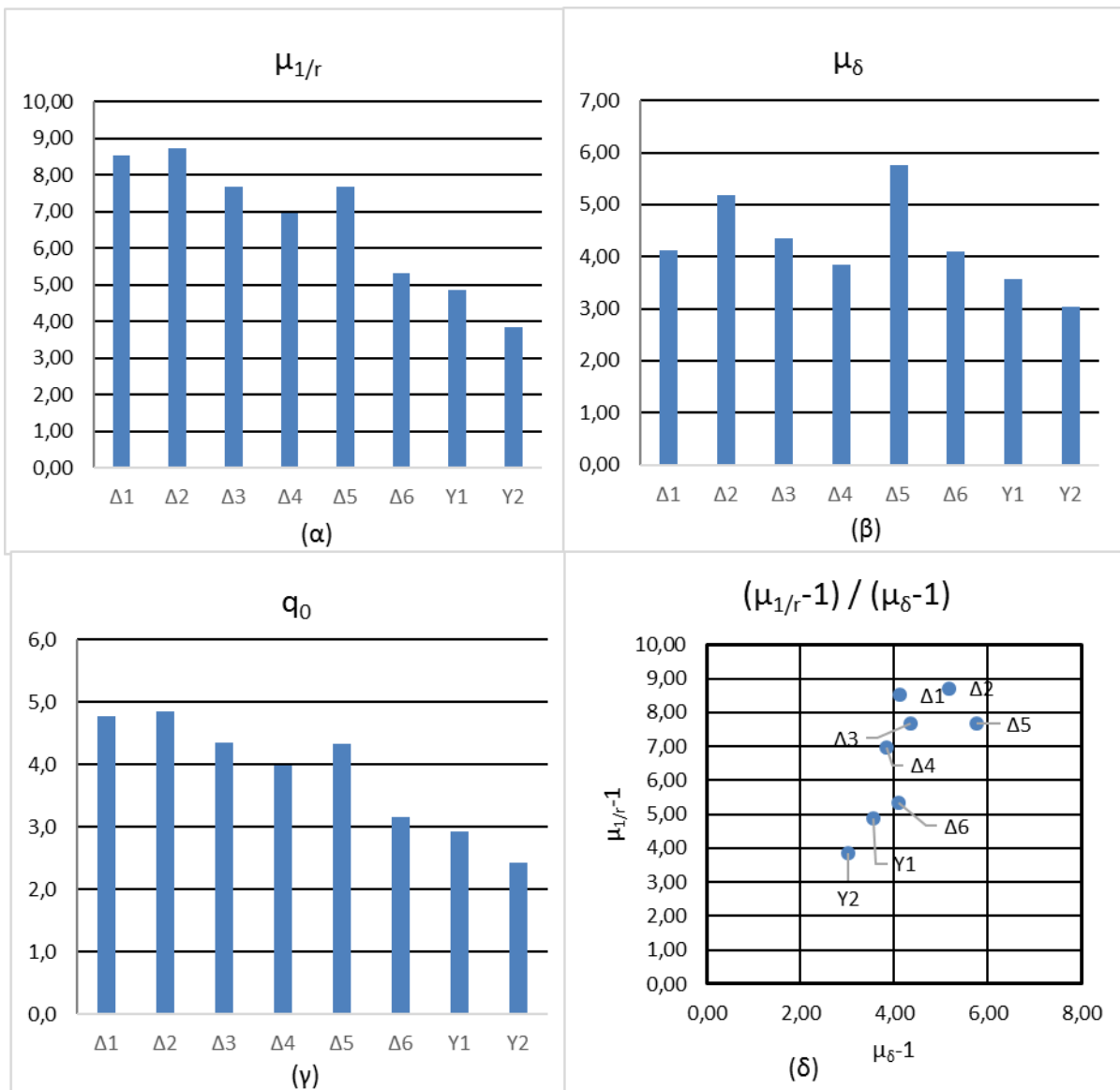
Σχήμα 3.48: Περιβάλλουσες των διαγραμμάτων P-δ των υποστυλωμάτων Y1 και Y2 με $\nu_d = 0.2$ και 0.3 αντίστοιχα

Το Y2 ανέπτυξε μεγαλύτερο φορτίο αστοχίας από το Y1, το οποίο ήταν αναμενόμενο καθώς λόγω της επίδρασης του θλιπτικού φορτίου η ροπή αντοχής του μεγαλώνει. Επίσης, παρατηρείται ότι το Y1 ανέπτυξε μεγαλύτερες μετατοπίσεις από το Y2, επομένως το αξονικό φορτίο επιδρά αρνητικά στις μέγιστες μετατοπίσεις και στο ΚΔ, όπως και στο ΣΠΣ, αφού «μετατοπίζει» τις παραμορφώσεις στη διατομή του ΚΔ προς τη θλίψη με συνέπεια τη μικρότερη καμπυλότητα αστοχίας. Λόγω της αύξησης του αξονικού φορτίου, οι φθίνοντες κλάδοι του διαγράμματος P-δ του Y2 είναι πιο κλειστοί με συνέπεια την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας ανά ανακύκλιση.



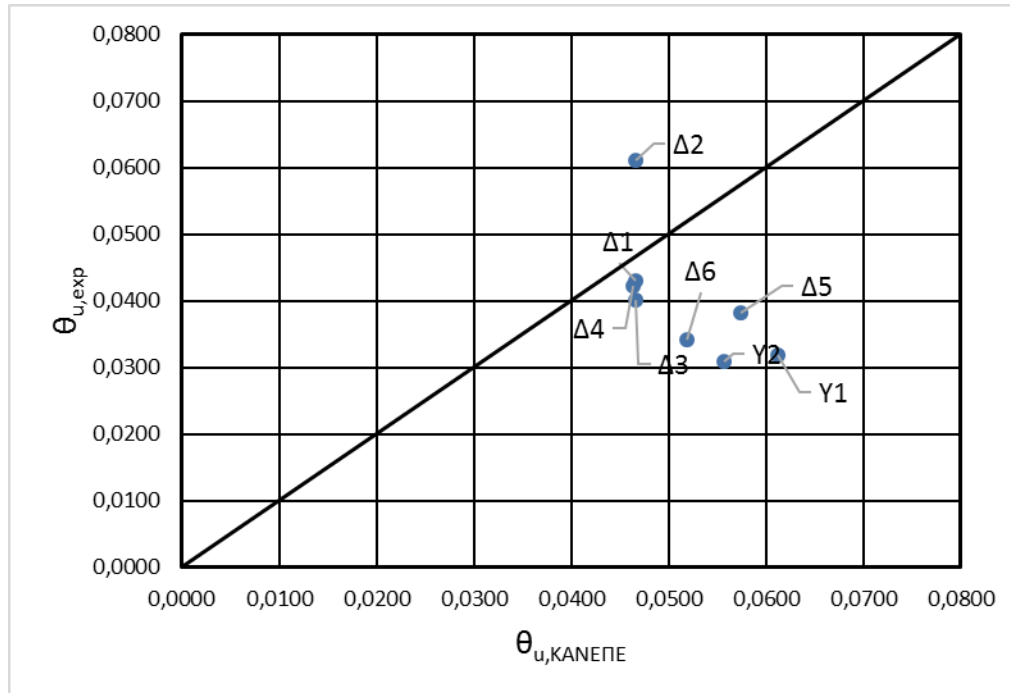
Σχήμα 3.49: Σύγκριση ενεργειών ανακυκλίσεων των υποστυλωμάτων Y1 και Y2

Στα παρακάτω ραβδογράμματα παρουσιάζονται τα μεταλαστικά χαρακτηριστικά των δοκών και υποστυλωμάτων. Επίσης, στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται αυτές οι τιμές και οι αντίστοιχες θεωρητικά υπολογιζόμενες κατά ΚΑΝΕΠΕ.



Σχήμα 3.50: α. Πλαστιμότητα καμπυλοτήτων $\mu_{1/r}$ ² β. πλαστιμότητα μετατοπίσεων μ_{δ} γ. Βασική τιμή του δείκτη συμπεριφοράς q_0 που αντιστοιχεί στη $\mu_{1/r}$ του δοκιμίου δ. σχέση $\mu_{1/r}$ και μ_{δ}

²Λόγω της αποκόλλησης των μετρητικών οργάνων πριν τη στιγμή της καμπυλότητας αστοχίας, οι αναγραφόμενες τιμές των πλαστιμοτήτων σε όρους καμπυλοτήτων $\mu_{1/r}$ έχουν προκύψει από τις εξής παραδοχές για κάθε περίπτωση: Για τα δοκίμια $\Delta 2$ και Y1, οι τιμές του $\mu_{1/r}$ αντιστοιχούν σε καταγεγραμμένες τιμές πριν την αστοχία. Για τα δοκίμια $\Delta 5$, $\Delta 6$ και Y2 γίνεται η παραδοχή ότι $(\mu_{1/r} - 1)/(\mu_{\delta} - 1) = 1.4$, όπου 1.4 η ελάχιστη μετρούμενη τιμή από την παρούσα ενότητα εργασίας που αποτελεί και συντηρητική προσέγγιση καθώς από τη βιβλιογραφία οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 2 και 3.7. Λεπτομερής περιγραφή και αιτιολόγηση για κάθε δοκίμιο πραγματοποιείται στο αντίστοιχο εδάφιο του κάθε δοκιμίου της παρούσας έκθεσης.



Σχήμα 3.51: Σύγκριση πειραματικής μέσης γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία θ_u με την αντίστοιχη υπολογιζόμενη κατά KANEPE $\theta_{u,KANEPE}$

Πίνακας 3.16: Συγκεντρωτικός πίνακας με τα μεταλαστικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων

Δοκίμιο	KANEPE	Πειραματικές τιμές									$\theta_u / \theta_{u,KANEPE}$	$(\mu_{1/r}-1) / (\mu_6-1)$
	$\theta_{u,KANEPE}$	$(1/r)_{u+}$	δ_{u+} (mm)	θ_{u+}	$(1/r)_{u-}$	δ_{u-} (mm)	θ_{u-}	$\mu_{1/r}$	μ_6	q_0		
Δ1	0,0467	0,1437	29,9	0,0430	0,2310	28,5	0,0118	8,53	4,11	4,8	0,92	2,4
Δ2	0,0466	0,0980	42,2	0,0612	0,0852	36,6	0,0528	8,71	5,18	4,9	1,31	1,8
Δ3	0,0466	0,1517	27,9	0,0403	-	-	-	7,69	4,35	4,3	0,86	2,0
Δ4	0,0464	0,1331	28,9	0,0424	0,1508	29,6	0,0275	6,97	3,85	4,0	0,91	2,1
Δ5	0,0575	-	37,3	0,0383	-	31,7	0,0326	7,66	5,76	4,3	0,67	1,4
Δ6	0,0519	-	33,4	0,0343	-	30,2	0,0310	5,33	4,09	3,2	0,66	1,4
Υ1	0,0613	0,1340	31,2	0,0320	0,1020	31,0	0,0318	4,87	3,56	2,9	0,52	1,5
Υ2	0,0557	-	30,2	0,0310	-	23,6	0,0242	3,84	3,03	2,4	0,56	1,4

Όπου

$\theta_{u,KANEPE}$ θεωρητικά υπολογιζόμενη τιμή της μέσης τιμής της γωνίας στροφής χορδής του μέλους στη αστοχία κατά KANEPE (της μέσης γωνίας κατά την αστοχία)

$(1/r)_u$ πειραματική τιμή της καμπυλότητας τη στιγμή της διαρροής. Το συνοδευόμενο πρόσημο υποδηλώνει την κατεύθυνση του φορτίου, [+] προς τις θετικές μετατοπίσεις (προς επάνω), [-] για τις αρνητικές

δ_u	πειραματική τιμή της μέγιστης μετακίνησης στο μέσο της δοκού ή του υποστρώματος. Το συνοδευόμενο πρόσημο υποδηλώνει την κατεύθυνση του φορτίου, [+] προς τις θετικές μετατοπίσεις (προς επάνω), [-] για τις αρνητικές
$\mu_{1/r}$	πειραματική τιμή της πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων
μ_δ	πειραματική τιμή της πλαστιμότητας σε όρους μετατοπίσεων
q_0	$(\mu_{1/r} + 1)/2$, βασική τιμή του δείκτη συμπεριφοράς κατά EC8

Οι πλαστιμότητες που αναπτύσσονται κυρίως από τις δοκούς είναι σημαντικές και σε πολλές περιπτώσεις αντιστοιχούν σε υψηλή κατηγορία πλαστιμότητας. Οι αντίστοιχες τιμές του βασικού δείκτη πλαστιμότητας q_0 σε όλες τα δοκίμια υπερβαίνουν το 3 και συγκεκριμένα στις δοκούς η ελάχιστη τιμή είναι 3.5 και οι υπόλοιπες από 4 και πάνω. Τα υποστρώματα λόγω του αξονικού θλιπτικού τους φορτίου εμφανίζουν λιγότερο πλάστιμη συμπεριφορά όπως ήταν αναμενόμενο, το οποίο ισχύει και στο ΣΠΣ. Από τα παραπάνω δεδομένα συνεπάγεται ότι το ΚΔ με τις σύγχρονες λεπτομέρειες όπλισης που αποτελούν προαπαιτούμενο σύμφωνα με τον EC2 και EC8, αποτελεί ένα ικανό υλικό για αντισεισμικό σχεδιασμό, αφού η ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά του δεν υπολείπεται σημαντικά από την αντίστοιχη του ΣΠΣ.

Πρέπει να σημειωθεί ότι συνολικά στη παρούσα σειρά πειραμάτων, παρατηρήθηκε μια τάση για ταχύτερη εξασθένιση των μηχανισμών αντίστασης στη τέμνουσα με τη συνεπαγόμενη γρηγορότερη αστοχία, σε μικρότερες καμπυλότητες από αυτές της μονοτονικής συμπεριφοράς. Όπως αναλύθηκε και παραπάνω, σημαντικούς παράγοντες για τη συμπεριφορά αυτή αποτελεί ο μηχανισμός αλληλεμπλοκής αδρανών αλλά και η συμπεριφορά του διαγώνιου θλιπτήρα. Το σημαντικά μειωμένο μέτρο ελαστικότητας φαίνεται να δημιουργεί ένα υλικό στο οποίο με τις ανακυκλίσεις δημιουργούνται «μαλακές» περιοχές στις οποίες φαίνεται να κατευθύνονται οι παραμορφώσεις και να επιταχύνεται η αστοχία.

Αναφέρεται τέλος, ότι ο σκοπός της παρούσας μελέτης, δηλαδή η μελέτη στοιχείων από ΚΔ σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση καμπτικού και διατμητικού τύπου επιτεύχθηκε, με τα αποτελέσματα να αποκτούν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και να συμφωνούν με την υπάρχουσα εμπειρία σχετικά με το ΚΔ.

3.5 Σχόλια – Προβλήματα - Παρατηρήσεις

Η παρούσα ενότητα αφιερώθηκε στην πειραματική μελέτη δοκών και υποστρωμάτων από όπλισμένο κισηρόδεμα (ΚΔ). Μέσω των πειραμάτων αυτών αποκτήθηκαν σημαντικά δεδομένα για την ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά του ΚΔ και συμπεράσματα για την καμπτική και διατμητική συμπεριφορά δοκών και υποστρωμάτων. Τα σημαντικότερα από αυτά συνοψίζονται στα παρακάτω:

- Το ΚΔ που προκύπτει από τη σύνθεση της LaFarge, ως δομικό υλικό δοκών και υποστρωμάτων, με τις λεπτομέρειες όπλισης του συμβατικού σκυροδέματος, αποδείχθηκε ότι αναλαμβάνει φορτία αντίστοιχα με το ΣΠΣ, με τις συστάσεις του EC2 να είναι εφαρμόσιμες αφού οι θεωρητικά αναμενόμενες τιμές βρίσκονται πολύ κοντά στις πειραματικές.
- Το ΚΔ υπό ανακύκλιση παρουσιάζει καλή συμπεριφορά, με την επίτευξη σημαντικών πλαστικών παραμορφώσεων και υψηλών πλαστιμοτήτων σε όρους μετατοπίσεων και καμπυλοτήτων. Οι πλαστιμότητες που αναπτύχθηκαν αντιστοιχούν σε μέση και σε πολλές περιπτώσεις υψηλή κατηγορία πλαστιμότητας κατά τον EC8, γεγονός που σημαίνει ότι τα δομικά στοιχεία που κατασκευάστηκαν, με τις λεπτομέρειες όπλισής τους και το συγκεκριμένο ΚΔ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σχεδιασμό αντισεισμικών κατασκευών ακόμα και υψηλής κατηγορίας πλαστιμότητας σύμφωνα με τον EC8.
- Η μείωση της αποδοτικότητας του μηχανισμού αλληλοεμπλοκής αδρανών όσον αφορά τη διατμητική αντίσταση που προσφέρει φαίνεται να είναι σημαντική στην ανακυκλιζόμενη απόκριση του ΚΔ. Σε πλήθος δοκιμών φάνηκε ότι η ελάττωση αυτή οδηγεί σε ταχύτερη ανάπτυξη διατμητικών παραμορφώσεων σε περιοχές έντονης ρηγμάτωσης και αποδιοργάνωσης του ΚΔ, με συνέπεια την γρηγορότερη αστοχία του στοιχείου.
- Το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας μάλλον επιδρά δυσμενώς στην ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά καθώς με την αύξηση των επιβαλλομένων παραμορφώσεων, σε καταστάσεις έντονης ρηγμάτωσης, ο διαγώνιος θλιπτήρας φαίνεται να χάνει την αντοχή του γρηγορότερα. Επιπλέον, δημιουργούνται «μαλακές» περιοχές στις οποίες συσσωρεύονται παραμορφώσεις και οδηγούν σε ταχύτερη και πιο ψαθυρή αστοχία. Η παραπάνω προσέγγιση έρχεται σε συμφωνία με τη διάταξη του EC2 που μειώνει την διατμητική αντοχή του διαγώνιου θλιπτήρα $V_{rd,max}$ για τα ΕΣ. Η μείωση αυτή γίνεται μέσω της αντικατάστασης του συντελεστή ν με το ν_1 [EC2 § 11].
- Οι γωνίες στροφής χορδής κατά την αστοχία γενικά προκύπτουν μειωμένες συγκριτικά με τις υπολογιζόμενες τιμές κατά ΚΑΝΕΠΕ. Οι τελευταίες, επειδή έχουν εξαχθεί μέσω επεξεργασίας πειραματικών αποτελεσμάτων μεγάλου πλήθους δοκών και υποστρωμάτων, αποτελούν έναν «μέσο όρο» πραγματικών τιμών για στοιχεία από σύνθετο σκυρόδεμα. Επομένως, η σύγκριση με τις τιμές ταυτίζεται με την απευθείας σύγκριση κισσηροδέματος και συνήθους σκυροδέματος. Οι μικρότερες αυτές τιμές υποδηλώνουν την μικρότερη ικανότητα του ΚΔ να αναπτύσσει πλαστικές παραμορφώσεις. Όπως όμως εξηγείται στο σημείο 2, οι μειώσεις αυτές είναι

σημαντικές αλλά όχι απαγορευτικές για αντισεισμικό σχεδιασμό μελών από ΚΔ για σχετικά υψηλές τιμές του δείκτη συμπεριφοράς.

- Οι αναπτυσσόμενες μέγιστες καμπυλότητες σε δοκούς υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση είναι μειωμένες συγκριτικά με τις αντίστοιχες για δοκούς υπό μονοτονική φόρτιση. Η μείωση αυτή δεν είναι μεν καθοριστική, αφού στο σημείο 1 δείχθηκε ότι επιτυγχάνονται σημαντικά μεγάλες πλαστιμότητες, αλλά ούτε και αμελητέα. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε συμφωνία τόσο με τα ήδη υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα, όπως αυτά περιγράφονται στην βιβλιογραφική διερεύνηση, αλλά και με τις κανονιστικές διατάξεις του EC2, ο οποίος μεταξύ άλλων μειώνει τη μέγιστη πλαστική στροφή για τα ΕΣ αλλά και εξαλείφει τον φθίνοντα κλάδο του διαγράμματος σ-ε σχεδιασμού για ανελαστικές αναλύσεις.

Από την παρούσα μελέτη αποδείχθηκε ότι τα μέλη από κισσηρόδεμα πραγματικών διαστάσεων και καταπονήσεων σχεδιασμένα με βάση τις συστάσεις των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών, αναπτύσσουν πολύ καλή συμπεριφορά, με τα κυρίαρχα χαρακτηριστικά τους όχι σημαντικά μειωμένα συγκριτικά με μέλη από σύνηθες σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα, αν και το υλικό παρουσιάζει μεγαλύτερη ψαθυρότητα από το σύνηθες σκυρόδεμα, τα χαρακτηριστικά πλαστιμοτήτων και υπεραντοχών που προκύπτουν πληρούν τις αντισεισμικές απαιτήσεις των κανονισμών, με συνέπεια το υλικό να μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο σε νέες κατασκευές όσο και σε ενίσχυση υφισταμένων.

4 Βιβλιογραφικές αναφορές

1. A. Yeginoball, K.G. Sobolev, S.V. Soboleva and M. Tokyay, *High Strength Natural lightweight Aggregate Concrete with Silica Fume*, Special Publication 178-38 1998
2. ACI 318-95, *Building Code Requirements for Structural Concret.*
3. ASTM C293-02: *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*
4. ASTM C469-02: *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*
5. ASTM C496: *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*
6. ASTM C567-14: *Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete*
7. ASTM C78-02: *Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*
8. Bardhan-Roy, B.K., *Lightweight aggregate concrete in the UK. CEB/FIP International Symposium on Structural Lightweig ht Aggregate Concrete, Sandefjord, Norway, pp 52-69. Editors: I. Holand, et al. 1995.*
9. BBK 94 *Concrete structures* (Swedish code)
10. Bentur A, Igarashi S, Kovler K. *Prevention of autogenous shrinkage in highstrength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates. Cement Concrete Res 2008*
11. Bentur A, Igarashi S, Kovler K., *Prevention of autogenous shrinkage in highstrength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates. Cement Concrete Res 2008*
12. Bremner, T.W., Holm, T.A, *Elastic compatibility and the behavior of concrete. ACI Journal, 1986.*
13. BS 8110 – *Structural use of concrete*
14. CEN/TC 154 prEN, *Aggregates.*
15. Christopher J. Allington, *Seismic Performance of Moment Resisting Frame Members Produced from Lightweight Aggregate Concret*, Doctorate in Philosophy in the Department of Civil Engineering, University Of Canterbury, 2003
16. CUR - *Recommendation 39, Concrete with coarse lightweight aggregates, Part I Section 6.1*

17. E.G. Badogiannis and M.D. Kotsovos, *Monotonic and cyclic flexural tests on lightweight aggregate concrete beam*, Earthquakes and Structures, Vol. 6, No. 3 (2014) 000-000, DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/eas.2014.6.3.000>, 2013
18. ESCSI, *Expanded Shale Clay and Slate Institute, Lightweight Concrete, History, Applications, Economics*. 1971.
19. EuroLightCon, *Definitions and International Consensus Report*, in *Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete*. 1998.
20. European Standard: *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, 2004, ICS 91.010.30; 91.080.40
21. European Standard: *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, 2004, ICS 91.120.25
22. FIP Manual of LWAC, 2nd Edition, 1983
23. H S Lim, T H Wee, M A Mansur and K H Kong, *Flexural behavior of reinforced lightweight aggregate concrete beams*, APSEC 2006
24. Habib Uysal, Ramazan Demirboga, Remzi Sahin, Rustem Gul, *The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete*, Cement and Concrete Research 34, 2004 845–848
25. Hoff, G.C., Walum, R., Weng, J.K., Nu ez, E. , *The use of Structural Lightweight Aggregate in Offshore Concrete Platforms*. CEB/FIP International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord, Norway, Editors: I. Holand, et al. . 1995.
26. Kaffetzakis, M., & Papanicolaou, C. SCC BEAMS AND COLUMNS UNDER CYCLIC LOADING: COMPARISON BETWEEN PUMICE AGGREGATE SCC (PASCC) AND NORMAL WEIGHT SCC (NWSCC) SPECIMENS.
27. Khandaker M. A. Hossain and Mohamed Lachemi, *Mixture Design, Strength, Durability, and Fire Resistance of Lightweight Pumice Concrete*, ACI Materials journal, 2007, 104-M49
28. Khandaker M. Anwar Hossain, *Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concret*, Cement and Concrete Research 34 (2004) 283–291
29. L.H. Nguyen, A.-L. Beaucour, S. Ortola, A. Noumowé, *Influence of the volume fraction and the nature of fine lightweight aggregates on the thermal and mechanical properties of structural concret*, Construction and Building Materials 51 ,2014, 121–132, 2014
30. Lakshmi Kumar Minapu, M K M V Ratnam, Dr. U Rangaraju, *Experimental Study on Light Weight Aggregate Concrete with Pumice Stone, Silica Fume and Fly Ash*

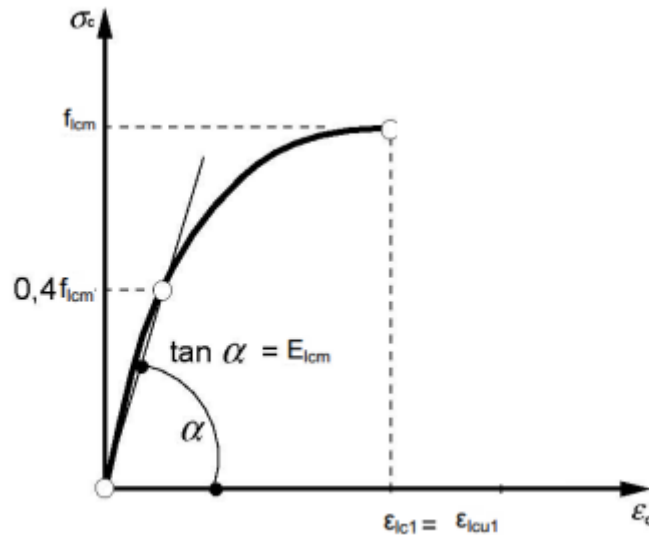
- as a Partial Replacement of Coarse Aggregate*, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2014
31. Lim Hwee Sin, Wee Tiong Huan, Md Rafiqul Islam, and Md Abul Mansur, *Reinforced Lightweight Concrete Beams in Flexure*, 108-S01, 2011
 32. Lo TY, Cui HZ, Li ZG. Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete. *Waste Manage* 2004.
 33. Lo TY, Cui HZ, Li ZG., *Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete*. *Waste Manage* 2004
 34. Mervyn J. Kowalsky, M.J. Nigel Priestley, Frieder Seible, *Lightweight concrete bridge column design in seismic regions*, ACI structural journal, 1999
 35. Moh Azhar, Azwar Manaf, Bambang Soegijono, *Rice Husk Ash and Pumice in Lightweight Concrete of Engineering Materials to Improve Mechanical Strength Portland Cement Composites*, International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS Vol: 14 No: 03, 2014
 36. Monteiro, P.J.M., *A Note on the Hirsch Model*. *Cement and Concrete Research Vol 21*. 1991.
 37. Newman, J.B., Properties of structural lightweight concrete in structural lightweight concrete. Ed. J.L. Clarke, Blackie, Chapman & Hall, London. 1993.
 38. Newman, J.B., Properties of structural lightweight concrete in structural lightweight concrete. Ed. J.L. Clarke, Blackie, Chapman & Hall, London. 1993.
 39. NS 3473 E. Concrete structures - Design and detailing rules
 40. Oguz Akin Duzgun, Rustem Gul, Abdulkadir Cuneyt Aydin, Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete, *Materials Letters* 59 (2005) 3357 – 3363
 41. Papanicolaou, C. G., & Kaffetzakis, M. I. (2011). Lightweight aggregate self-compacting concrete: state-of-the-art & pumice application. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 9(1), 15-29.
 42. Smeplass, Mechanical Properties -Lightweight Concrete. 1992, High Strength Concrete. SP4 -Materials Design, SINTEF.
 43. Smeplass, S., Lightcon Rapport. DP2: Materialegenskaper. Delrapport 2.9: Effekt av masse-forholdet på lettbetongens trykkfasthet. (In Norwegian: Effect of water/binder ratio on compressive strength of light-weight aggregate concrete, summary in English) SINTEF-rapport STF22 A97829. 1977.
 44. T.A., Hammer., High Strength Concrete, R eport 4.11: Effect of Moisture on the Mechanical Properties of High Strength Concrete. SINTEF-report STF70 A93088. Trondheim, Norway. 1993.

45. Zhang, M.H., Gjrv, O.E. , Properties of High -strength Lightweight Concrete. CEB/FIP In -ternational Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord, Norway, Ed. I. Holand et al 1995.
46. Αγγελική Μπάκα, Συμβολή στην τεχνολογία και μηχανική συμπεριφορά στοιχείων ωπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, ΕΜΠ, 1981
47. Τασούλα, Γ.Θ., Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό. 2013, Ε.Μ.Π.: Αθήνα.
48. European Standard EN 206-1: Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity, 2000
49. Shuaib H. Ahmad and Jaime Batts, *Flexural Behavior of Doubly Reinforced High-Strength Lightweight Concrete Beams with Web Reinforcement*, 88-S38, 1991
50. Shuaib H. Ahmad and Roy Barker, *Flexural Behavior of Reinforced High-Strength Lightweight Concrete Beams*, ACI Structural Journal, 88-S9, 1991
51. Αγγελική Μπάκα, *Συρματοκισσηρόδεμα: Ένα υποσχόμενο υλικό για αντισεισμικές κατασκευές*, Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, Ι, τεύχ. 2, 2000
52. Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου, *Δομικά υλικά*. 2013
53. ΚΑΝ.ΕΠΕ.: Κανονισμός Επεμβάσεων, ΟΑΣΠ, 2013
54. Μάνος Γιώργος, *Μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς πλαισίου από οπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα σχεδιασμένου κατά Ευρωκώδικα 2 και 8*, 2014, Ε.Μ.Π.: Αθήνα.

A Παράρτημα: Θεωρητικοί Υπολογισμοί

A.1 Υπολογισμός Διαγράμματος Τάσεων Παραμορφώσεων κατά EC2

Το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων για το ΚΔ ορίζεται από το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα Α.1: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για το ελαφροσκυρόδεμα, σύμφωνα με τον EC2

το οποίο περιγράφεται από τη σχέση

$$\frac{\sigma_c}{f_{1cm}} = \frac{(k \eta - \eta^2)}{1 + (k - 2) \cdot \eta} \quad (\text{A.1})$$

όπου:

$\eta = \epsilon_c / \epsilon_{lc1}$

ϵ_{lc1} παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην κορυφή της τάσης και μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση $\epsilon_{lc1} = \frac{k \cdot f_{1cm}}{E_{1cm}}$ με $k = 1.1$ για ΕΣ με άμμο και 1.0 για ΕΣ μόνο με ΕΑ

E_{1cm} το μέτρο ελαστικότητας του ΕΣ, ο θεωρητικός υπολογισμός του οποίου περιγράφεται στο § Α.3 της παρούσας έκθεσης

k συντελεστής (διαφέρει από τον k που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ϵ_{lc1}), με $k = 1.05 E_{1cm} \cdot |\epsilon_{lc1}| / f_{1cm}$

f_{1cm} η μέση θλιπτική αντοχή του ΕΣ

Πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί δύο καμπυλών:

- Για την πρώτη (καμπύλη Α), χρησιμοποιούνται οι πειραματικές τιμές των E_{1cm} , ϵ_{lc1} και f_{1cm}
- Για τη δεύτερη (καμπύλη Β), χρησιμοποιείται η πειραματική τιμή της f_{1cm} και τα μεγέθη E_{1cm} και ϵ_{lc1} υπολογίζονται με τις παραπάνω σχέσεις του EC2

A.2 Υπολογισμός πυκνότητας μετά από ξήρανση σε κλίβανο

Η πυκνότητα ρ (μετά από ξήρανση σε κλίβανο – oven-dry density) υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τα στοιχεία της μελέτης σύνθεσης κατά το πρότυπο ASTM C567-14, σύμφωνα με το οποίο:

$$\rho = O_c = \frac{M_{df} + M_{dc} + 1.2 M_{ct}}{V} \quad (\text{A.2})$$

όπου

M_{df} ξηρή μάζα λεπτόκοκκου αδρανούς (kg)

M_{dc} ξηρή μάζα χονδρόκοκκου αδρανούς (kg)

M_{ct} μάζα τσιμέντου (kg)

1.2 συντελεστής για την προσέγγιση της μάζας του τσιμέντου συνυπολογίζοντας το χημικά συνδυασμένο νερό

V όγκος του σκυροδέματος

A.3 Εκτίμηση Μέτρου Ελαστικότητας

Σύμφωνα με τον **EC2**, μια εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας E_{lcm} του ΕΣ μπορεί να εξαχθεί από τον πολλαπλασιασμό του E_{cm} του πίνακα 3.2 του EC2 με τον συντελεστή

$$\eta_E = \left(\frac{\rho}{2200} \right)^2 \quad (\text{A.3})$$

με

ρ πυκνότητα του ΕΣ μετά από ξήρανση σε κλίβανο.

$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3}$ με f_{cm} σε MPa και E_{cm} σε GPa

Σύμφωνα με τον κανονισμό **ACI 318-95, Section 8.5.1** το μέτρο ελαστικότητας E_{lcm} του ΕΣ μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$E_{lcm} = w_c^{1.5} \cdot 0.043 \cdot (f_c^{0.5}) \quad (\text{A.4})$$

για τιμές του w_c (ειδικό βάρος σκυροδέματος) μεταξύ 1440 και 2480 kg/m³.

Αντίστοιχα, ο σουηδικός κανονισμός **BBK 94, Section 2.4.4** ορίζει

$$E_{lcm} = E \cdot \frac{\rho}{2400} \quad (\text{A.5})$$

με

E το μέτρο ελαστικότητας του συμβατικού σκυροδέματος ίδιας αντοχής και ρ την πυκνότητα του ΕΣ.

Ο ολλανδικός κανονισμός **CUR - Recommendation 39, Part I Section 6.1** ορίζει (EuroLightCon, 1998)

$$E_{lcm} = E \cdot \left(\frac{\rho}{2300}\right)^{1,5} \quad (\text{A.6})$$

Σύμφωνα με τον κανονισμό της Νέας Ζηλανδίας **NZS3101: 1995**:

$$E_{lcm} = \left(3320\sqrt{f'_{co}} + 6900\right) \left(\frac{\rho}{2300}\right)^{1,5} \quad (\text{A.7})$$

A.4 Εκτίμηση Εφελκυστικής αντοχής

Σύμφωνα με τον EC2 [§ 11.3.1 (3)] η εφελκυστική αντοχή στο ΕΣ f_{lctm} προκύπτει από την αντίστοιχη εφελκυστική αντοχή του ΣΠΣ, f_{ctm} , με πολλαπλασιασμό με τον μειωτικό συντελεστή η_1 με

$$\eta_1 = 0.40 + 0.60 \frac{\rho}{2200} \quad (\text{A.8})$$

όπου ρ το άνω όριο της πυκνότητας για την αντίστοιχη κατηγορία, σύμφωνα με τον Πίνακα 11.1 του EC2 §11.

Για τον υπολογισμό των τιμών του f_{ctm} γίνεται η απλοποιητική θεώρηση ότι οι συνθέσεις 15428, 15538 και R15488 είναι κατηγορίας LC25/28 και η σύνθεση 15517 κατηγορία LC30/33. Επομένως η f_{ctm} κατά EC2 είναι ίση με 2.6 MPa για τις πρώτες και 2.9 MPa για την 15517.

Για να συγκριθεί με τις πειραματικές, η εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη $f_{lctm,sp}$ υπολογίζεται ως $f_{lctm}/0.9$.

B Παράρτημα: Θεωρητικοί υπολογισμοί

Τα δεδομένα για το θεωρητικό υπολογισμό των ελεγχόμενων μεγεθών βασίστηκαν κατά προτεραιότητα σε πειραματικά εκτιμώμενες τιμές και όπου δεν υπήρξε αυτή η δυνατότητα, σε μέσες κανονιστικές τιμές και προτεινόμενες σχέσεις.

B.1 Υπολογισμός Θεωρητικού Διαγράμματος Ροπών - Καμπυλοτήτων

Το διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων υπολογίζεται τόσο για ΕΣ όσο και για ΣΠΣ κατά EC2. Οι ροπές αντοχής και διαρροής υπολογίζονται με τη βοήθεια προγράμματος που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της ενότητας εργασίας σε περιβάλλον Visual Basic και Microsoft Excel, και με τη βοήθεια του ενσωματωμένου επιλυτή (Solver) του Microsoft Excel. Το λογισμικό περιγράφεται στο παράρτημα Β.

Η ε_{lcu2} λαμβάνεται ίση με $3.5 \cdot \eta_1 = 2.93 \%$ για όλα τα δοκίμια εκτός της Δ5, ενώ για τη Δ5 $\varepsilon_{lcu2} = 3.5 \cdot \eta_1 = \%$. Ο η_1 ισούται με $0.4 + 0.6 \cdot \rho / 2200$ όπου ρ το άνω όριο πυκνότητας της κατηγορίας ΕΣ σύμφωνα με τον Πίνακα 11.1 του EC2. Για όλα τα δοκίμια εκτός από τη Δ5 η κατηγορία είναι 1.6 ενώ για τη Δ5 1.8. Επομένως, $\eta_1 = 0.836$ και 0.891 αντίστοιχα.

Τα σημεία του διαγράμματος που υπολογίζονται αντιστοιχούν στη ρηγμάτωση της διατομής, τη διαρροή της, που αντιστοιχεί στη διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα και την θεωρητική της αστοχία, που αντιστοιχεί στην εξάντληση της ε_{lcu2} ή/και στην συμβατική αστοχία του χάλυβα, η οποία θεωρείται ότι συμβαίνει στην παραμόρφωση 6.7%.

Επίσης, μια εκτίμηση της κατακόρυφης μετατόπισης στο μέσο της δοκού που αντιστοιχεί στη διαρροή του διαμήκους εφελκόμενου οπλισμού μπορεί να εξαχθεί από την παραμορφωσιακή κατάσταση καθ' ύψος της μεσαίας διατομής ως εξής:

$$\Delta_y = kL^2 \frac{1}{r} \quad (\text{B.1})$$

όπου

$$k = 0.125 - \left(\frac{\alpha}{6L}\right)^2 \quad (\text{B.2})$$

για τη κάμψη τεσσάρων σημείων, με L το μήκος της δοκού από στήριξη σε στήριξη, α το μήκος διάτμησης και $1/r$ η καμπυλότητα στην διαρροή. Για τις δοκούς τριών σημείων, $k=1/12$.

B.2 Υπολογισμός Διατμητικής Αντοχής

Η διατμητική αντοχή στο κισηρόδεμα αναμένεται μειωμένη.. Ο υπολογισμός της διατμητικής αντοχής γίνεται κατά EC2.

Η αντοχή των διαγώνιων θλιπτήρων ισούται με $V_{rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_c / (\cot\theta + \tan\theta)$ με $v_1 = 0.5\eta_1(1 - f_{ck}/250)$. Οι εγκάρσιοι δίτητοι οπλισμοί $\Phi 8/100$ μπορούν να αναλάβουν τέμνουσα δύναμη ίση με $V_w = A_{sw}/s \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta = 119.05$ kN για τις δοκούς διατομής 15x30 cm και 78.44kN για 20x20 cm.

B.3 Πειραματική Εκτίμηση Διαγράμματος Ροπών - Καμπυλοτήτων

Το διάγραμμα ροπών – καμπυλοτήτων πειραματικά παράγεται με δύο τρόπους. Με τον πρώτο αξιοποιούνται οι μετρούμενες παραμορφώσεις των άνω και κάτω διαμήκων οπλισμών, ϵ_{s2} και ϵ_{s1} , μέσω των αντίστοιχων παραμορφωσιόμετρων (strain gauges). Από αυτές προκύπτει η καμπυλότητα ως εξής:

$$\frac{1}{r} = \frac{\epsilon_{s1} + \epsilon_{s2}}{d_1 - d_2} \quad (B.3)$$

με d_1 και d_2 τα στατικά ύψη των κάτω και άνω οπλισμών αντίστοιχα.

Με τον δεύτερο τρόπο, η καμπυλότητα λαμβάνεται μέσω των οριζόντιων μηκυνσιομέτρων (LVDT) που έχουν τοποθετηθεί καθ' ύψος της διατομής στο μέσο της δοκού. Από αυτά η καμπυλότητα προκύπτει από τις εξής σχέσεις:

$$\frac{1}{r} = \frac{\delta_4/l_4 + \delta_{1j}/l_1}{d_4 - d_1} \quad (B.4)$$

Όπου δ_i η μέτρηση του μηκυνσιομέτρου και l_i το μήκος μέτρησης, δηλαδή το μήκος μεταξύ των σημείων που προσαρτάται το οριζόντιο μηκυνσιόμετρο με την αντίστοιχη θέση του «στόχου» του μηκυνσιομέτρου.

Μια εκτίμηση για το διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων μέχρι την εμφάνιση των πλαστικών παραμορφώσεων, όπου χωρίς μεγάλο σφάλμα μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει η ελαστική θεωρία δοκού, λαμβάνεται ως εξής:

Η καμπυλότητα μπορεί να προκύψει από την κατακόρυφη μετατόπιση του μέσου, δ , ως εξής:

$$\frac{1}{r} = \frac{\delta}{\left(0.125 - \left(\frac{a}{6L}\right)^2\right) \cdot L^2} \quad (B.5)$$

όπου a το μήκος διάτμησης και L το καθαρό μήκος της δοκού, για τη κάμψη τεσσάρων σημείων. Για τη κάμψη τριών σημείων, ο παρονομαστής της παραπάνω εξίσωσης γίνεται $\frac{1}{12} \cdot L^2$.

B.4 Πειραματικά Μεγέθη Πλαστιμοτήτων

Οι πλαστιμότητα υπολογίζεται τόσο σε όρους καμπυλοτήτων όσο και σε όρους μετατοπίσεων.

Η πλαστιμότητα σε όρους μετατοπίσεων μ_δ ισούται με

$$\mu_\delta = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (\text{B.6})$$

Όπου δ_u είναι η κατακόρυφη μετατόπιση στο μέσο της δοκού/υποστυλώματος στην αστοχία και δ_y στη διαρροή.

Η πλαστιμότητα σε όρους καμπυλοτήτων $\mu_{1/r}$ ισούται με

$$\mu_{1/r} = \frac{\left(\frac{1}{r}\right)_u}{\left(\frac{1}{r}\right)_y} \quad (\text{B.7})$$

Όπου $(1/r)_u$ η τιμή της καμπυλότητας στο μέσο της δοκού/υποστυλώματος τη στιγμή της αστοχίας και $(1/r)_y$ τη στιγμή της διαρροής.

Η αστοχία θεωρείται ότι συμβαίνει όταν το δομικό στοιχείο απωλέσει το 20% της μέγιστης αντοχής που ανέπτυξε.

Η γωνία στροφής χορδής του στοιχείου στην αστοχία για τη φόρτιση τριών σημείων προκύπτει ως εξής:

$$\theta_u = \frac{\delta_u}{\frac{L}{2}} \quad (\text{B.8})$$

Όπου L το καθαρό άνοιγμα του στοιχείου.

B.5 Υπολογισμός Μέσης Γωνίας Στροφής Χορδής κατά ΚΑΝΕΠΕ

Ο θεωρητικός υπολογισμός της μέγιστης γωνίας στροφής χορδής πραγματοποιείται σύμφωνα με τον ελληνικό Κανονισμό Επεμβάσεων (ΚΑΝΕΠΕ), σύμφωνα με τον οποίο:

$$\theta_u = 0.016 \cdot (0.3^v) \left[\frac{\max(0.01; \omega')}{\max(0.01; \omega)} f_c \right]^{0.225} (a_s)^{0.35} \cdot 25^{a \rho_s \frac{f_{yw}}{f_c}} \cdot (1.25_d^{100\rho}) \quad (\text{B.9})$$

Όπου

a_s ο λόγος διάτμησης $M/Vh = L_s / h$

L_s το μήκος διάτμησης

h το ύψος της διατομής της δοκού / του υποστυλώματος

ω, ω' το μηχανικό ποσοστό εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού

ν N/bhf_c

N το αξονικό θλιπτικό φορτίο

ρ_s γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού παράλληλα στη διεύθυνση της φόρτισης

$\alpha = \alpha_n \cdot \alpha_s$, ο συντελεστής αποδοτικότητας περίσφιξης

Τα μεγέθη που προκύπτουν είναι τα εξής:

Δοκίμιο	b (mm)	h (mm)	f_{cm} (MPa)	Άνω οπλισμός	Κάτω οπλισμός	N (kN)	ν	Οπλισμός διάτμησης	ω	ω'	L_s m	α_n	α_s	α	ρ_s	$\theta_{u,KANEPE}$
Δ1	150	300	32	2Φ14	2Φ14	0	0.00	Φ8/100	0.109	0.109	0.540	0.333	0.545	0.182	0.00914	0.0467
Δ2	150	300	32	2Φ14	2Φ14	0	0.00	Φ8/100	0.109	0.109	0.536	0.333	0.545	0.182	0.00914	0.0466
Δ3	150	300	32	2Φ16	2Φ16	0	0.00	Φ8/100	0.109	0.109	0.539	0.333	0.545	0.182	0.00914	0.0466
Δ4	150	300	32	2Φ16	2Φ16	0	0.00	Φ8/100	0.109	0.109	0.531	0.333	0.545	0.182	0.00914	0.0464
Δ5	150	300	44	2Φ14	2Φ14	0	0.00	Φ8/100	0.109	0.109	0.978	0.333	0.545	0.182	0.00914	0.0575
Δ6	150	300	32	2Φ14	2Φ14	0	0.00	Φ8/100	0.109	0.109	0.731	0.333	0.545	0.182	0.00914	0.0519
Υ1	200	200	32	8Φ14 περιμετρικός		150	0.12	Φ8/100	0.123	0.123	0.979	0.667	0.688	0.459	0.00628	0.0613
Υ2	200	200	32	8Φ14 περιμετρικός		250	0.20	Φ8/100	0.123	0.123	0.978	0.667	0.688	0.459	0.00628	0.0557

Πίνακας Β.1: Ενδιάμεσα μεγέθη για τον υπολογισμό του $\theta_{u,KANEPE}$

Κ Παράρτημα: Υπολογισμός Ροπής Αντοχής Στοιχείου από ΕΣ από Μεγέθη Ορθής Έντασης

Παραδοχές και Διαδικασία Υπολογισμού

Ο υπολογισμός της ροπής αντοχής διατομής από μεγέθη ορθής έντασης βασίζεται στις σχέσεις του βιβλίου «Ωπλισμένο Σκυρόδεμα» (Τάσιος, Γιαννόπουλος, Τρέζος, Τσουκαντάς).

Το πρόγραμμα υλοποιείται με συνδυασμό Visual Basic, Excel και τον επιλυτή (solver) του Excel. Οι παραδοχές είναι οι εξής:

1. Επιπεδότητα των διατομών και αγνόηση διατμητικών παραμορφώσεων
2. Πλήρης συνάφεια μεταξύ οπλισμού και περιβάλλοντος σκυροδέματος
3. Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος αγνοείται ($f_{ct} = 0$)
4. $\varepsilon_{lc2} = 3.5 \cdot \eta_1$ (‰). $\varepsilon_{lc2} = 2$ ‰ (βλ. Σχήμα C.1)
5. Η προεπιλεγμένη τιμή της μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης του χάλυβα λαμβάνεται 67%, μπορεί όμως να μεταβληθεί από το χρήστη.
6. Η δύναμη του ΕΣ F_c ορίζεται με τους συντελεστές πλήρωσης a και κέντρου βάρους ζ' :

Για $\varepsilon_{lc} < 2$ ‰:

$$\alpha = \frac{1}{12} \varepsilon_{lc} (6 - \varepsilon_{lc}) \quad (C.1)$$

$$\zeta' = \frac{8 - \varepsilon_{lc}}{4(6 - \varepsilon_{lc})} \quad (C.2)$$

Για $\varepsilon_{lc} > 2$ ‰:

$$a = \frac{3 \cdot \varepsilon_{lc} - 2}{3 \cdot \varepsilon_{lc}} \quad (C.3)$$

$$\zeta' = \frac{\varepsilon_{lc}(3 \cdot \varepsilon_{lc} - 4) + 2}{2 \cdot \varepsilon_{lc}(3 \cdot \varepsilon_{lc} - 2)} \quad (C.4)$$

Οι υπόλοιπες σχέσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής (τα μεγέθη ορίζονται στο Σχήμα C.1):

$$x = \xi d \quad (C.5)$$

$$\xi = \frac{\varepsilon_{lc2}}{\varepsilon_{lc2} + \varepsilon_{s1}} \quad (C.6)$$

$$\sigma_m = -0.85 \cdot a \cdot f_{cd} \quad (C.7)$$

$$F_c = \sigma_m \cdot x \cdot b \quad (C.8)$$

$$c = \zeta' x \quad (C.9)$$

$$F_{s,i} = A_{s,i} \cdot \sigma_{s,i} \quad (C.10)$$

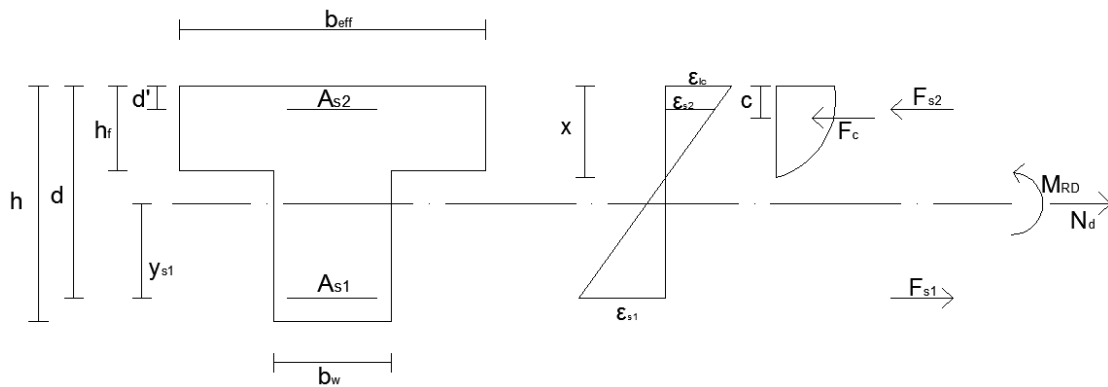
με $i=1$ για τον «κάτω» οπλισμό (συνήθως εφελκυσμένο) και $i=2$ για τον «άνω» (συνήθως θλιβόμενο).

$$z = d - c \quad (C.11)$$

$$\sigma_{s,i} = \varepsilon_{s,i} \cdot \frac{f_{yd}}{\varepsilon_y}, \text{ αν } \varepsilon_{s,i} < \varepsilon_y, \text{ αλλιώς: } \sigma_{s,i} = f_{yd} \quad (C.12)$$

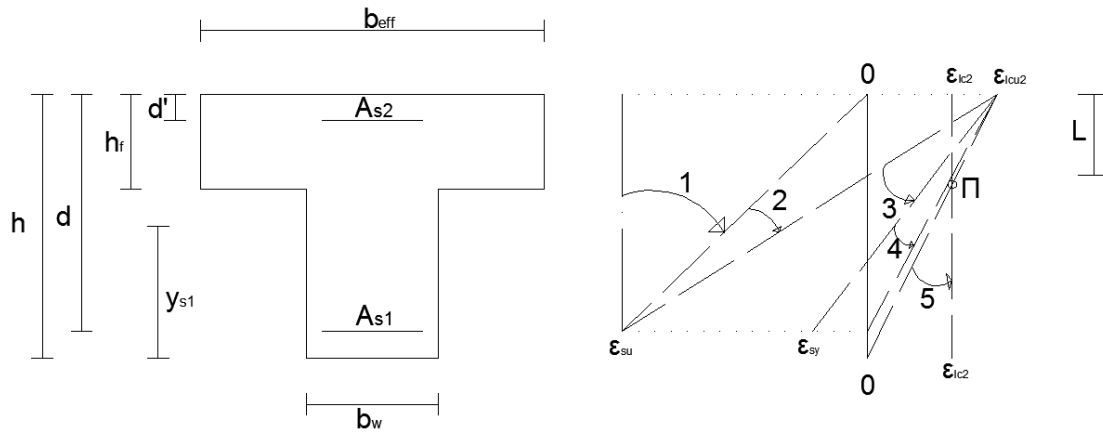
$$\varepsilon_y = \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (C.13)$$

$$M_{rd} - N_d \cdot y_{s1} = F_c z + A_{s2}(d - d') \quad (C.14)$$



Σχήμα C.1: Επεξήγηση υπολογιζόμενων μεγεθών

Το πρόγραμμα λειτουργία τόσο για ορθογωνική διατομή όσο και για λειτουργία πλακοδοκού, με αξονικό φορτίο η χωρίς, είτε εφελκυστικό είτε θλιπτικό. Καλύπτονται όλες οι περιοχές της καθ' ύψος παραμορφωσιακής κατάστασης της διανομής (βλ. Σχήμα C.2).



Σχήμα C.2: Διάγραμμα παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής στην ΟΚΑ από μεγέθη ορθής έντασης

Το σημείο «περιστροφής» Π μεταξύ των περιοχών 4 και 5 για το ΣΠΣ είναι $3h/7$, για το ΕΣ όμως λόγω της διαφορετικής τιμής της παραμόρφωσης ε_{icu2} είναι μεταβλητό, με

$$L = \frac{\varepsilon_{icu2} - \varepsilon_{ic2}}{\varepsilon_{icu2}} h = \frac{3.5 \cdot \eta_1 - 2}{3.5 \cdot \eta_1} h \quad (C.15)$$

Η επίλυση γίνεται με δύο τρόπους. Ο περιλαμβάνει κώδικα που εφαρμόζει επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία μεταβάλλονται οι τιμές των ε_{ic2} και ε_{s1} με βάση το πρόσημο της συνισταμένης των δυνάμεων και την περιοχή του καθ' ύψος διαγράμματος παραμορφώσεων. Ο κώδικας έχει βελτιστοποιηθεί ως προς τα βήματα του, με βάση την τάξη μεγέθους της συνισταμένης δύναμης. Ο δεύτερος τρόπος είναι με τον επιλυτή του excel ο οποίος βελτιστοποιεί το πρόβλημα που του ανατίθεται με ειδικούς αλγόριθμους και συγκεκριμένα η επιλογή των τιμών των παραμορφώσεων ε_{ic} και ε_{s1} . Για να αποκλειστούν μη πραγματικές λύσεις όσον αφορά την καθ' ύψος παραμορφωσιακή κατάσταση της διατομής, εισάγονται μεταβλητά όρια στις τιμές των παραμορφώσεων που ο επιλυτής μπορεί να χρησιμοποιήσει. Ο solver παρέχει πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα σύγκλισης.

Σχόλια

- Η θετική ε_{c2} είναι θλιπτική ενώ η θετική ε_{s1} είναι εφελκυστική.
- Γίνεται έλεγχος πριν την εκτέλεση του κώδικα για αστοχία της διατομής σε θλίψη ή εφελκυσμό.
- Για χρήση ορθογωνικής διατομής πρέπει το h_f να ορίζεται 0 γιατί διαφορετικά ο υπολογισμός μπορεί να είναι λανθασμένος³.
- Έχει προβλεφθεί στην λειτουργία πλακοδοκού και η περίπτωση να θλίβεται ο κορμός.

³ Για την ακρίβεια, αν $h_f = 0$ ή $h_f > x$ ο υπολογισμός είναι σωστός.

- Έχει προβλεφθεί η περίπτωση ο άνω οπλισμός να εφελκύεται.
- Μπορούν να εισαχθούν και ενδιάμεσοι οπλισμοί.

