



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διερεύνηση αντοχής περισφιγμένου σκυροδέματος με αντικατάσταση του χονδρόκοκκου αδρανούς από κίσηρη σε κυλινδρικά δοκίμια

Σπουδαστής: ΠΑΝΤΑΖΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Α.Μ 43103)



Εισαγωγικό ευχαριστήριο σημείωμα

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Κο Δρίβα Δημήτριο για την άψογη συνεργασία που είχαμε κατά την διάρκεια αυτής της εργασίας καθώς και για την καθοδήγησή του στην επίλυση διάφορων θεμάτων που προέκυψαν στην πορεία.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Γεωργαλά Νικόλαο υπεύθυνο του εργαστηρίου αντοχής υλικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την πολύτιμη βοήθειά του.

Τέλος το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου που όλο αυτό το διάστημα με στήριξαν ώστε να μπορέσω να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΠΑΝΤΑΖΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ του ΙΩΑΝΝΗ με αριθμό μητρώου 43013 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ δηλώνω υπεύθυνα ότι:

<< Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από εμένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου>>.

Ο Δηλών



Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Δημήτριος Δρίβας(Επιβλέπων)	ΙΣΑΑΚ ΒΡΥΖΙΔΗΣ(εξεταστής)	Κωνσταντίνος Ρεπαπής (εξεταστής)

Περιεχόμενα

1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	5
1.1 Ορισμός σκυροδέματος:	5
1.2 Κατηγορίες σκυροδέματος:	7
1.3 Επιμέρους συστατικά σκυροδέματος:	9
1.3.1 Ιδιότητες τσιμέντου:	10
1.3.2 Τύποι τσιμέντου	11
1.3.3 Αδρανή υλικά:	13
1.3.4 Χαρακτηριστικά αδρανών	15
1.3.5 Νερό αναμίξεως	17
1.4 Πρόσμικτα και πρόσθετα του σκυροδέματος	18
2 Κίσηρη:	22
2.1 Δομή κίσηροδέματος:	22
3 Οπλισμένο σκυρόδεμα:	24
3.1 Ποιότητες χάλυβα οπλισμού-Χαρακτηριστικά:	24
3.1.1 Τύποι χαλύβων οπλισμού στην Ελλάδα	27
3.1.2 Επιφάνεια και διάμμετροι των ράβδων:	29
3.1.3 Διαχωρισμός χαλύβων σύμφωνα με την μέθοδο παραγωγής:	30
3.1.4 Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα:	30
3.1.5 Φυσικά χαρακτηριστικά:	32
3.1.6 Ελάχιστες επικαλύψεις του οπλισμού με σκυρόδεμα και ελάχιστες αποστάσεις οπλισμού: ..	34
4 Θλίψη σκυροδέματος:	37
4.1 Συμβατική αντοχή σκυροδέματος:	42
4.2 Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος:	42
4.3 Κατηγορίες σκυροδέματος και πεδίο εφαρμογής τους:	43
4.4 Μέση αντοχή σκυροδέματος:	43
5 Περίσφιξη και σκυρόδεμα	44
5.1 Αναλυτικά προσομοιώματα περίσφιξης:	45
5.2 Παράμετροι περίσφιξης	49
6 Πειραματικό μέρος	53
7 Εργαστηριακά αποτελέσματα δοκιμών	67
8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	74
9 Βιβλιογραφικές αναφορές	75

1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1 Ορισμός σκυροδέματος:

Σκυρόδεμα ονομάζεται ο τεχνητός λίθος που δημιουργείται από την ανάμειξη και πήξη τσιμέντου, νερού, αδρανών υλικών καθώς και σε ορισμένες περιπτώσεις πρόσμικτων υλικών.



Το σκυρόδεμα έχει την ιδιότητα να περνάει σε μικρό χρονικό διάστημα από τη ρευστή κατάσταση (νωπό), στη στερεά (σκληρυσμένο), παρέχοντας τη δυνατότητα να μορφωθεί σε καλούπια κάθε σχήματος, που θα μπορούσε να επιθυμήσει κανείς, πριν στερεοποιηθεί και αποκτήσει τις τελικές αντοχές του.

Σε παγκόσμιο επίπεδο το σκυρόδεμα συνιστά το πιο διαδεδομένο και ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό, γεγονός που στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στον ιδανικό συνδυασμό κόστους και ιδιοτήτων που έχει. Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος είναι ότι παρουσιάζει εξαιρετική ανθεκτικότητα στην επίδραση του νερού, έχει τη δυνατότητα να αποκτήσει μια ποικιλία σχημάτων και μεγεθών. Επίσης, για την παρασκευή του απαιτούνται μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις, όπως και μειωμένη διαθεσιμότητα πρώτων υλών.

Στην βασική του μορφή το σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται περισσότερο αποτελείται από ένα μίγμα που είναι ομογενοποιημένο με ελεγχόμενες αναλογίες, έχοντας ως συστατικά το τσιμέντο σε σκόνη, το νερό, την άμμο καθώς και σκύρα, είτε φυσικής, είτε τεχνητής προέλευσης. Αρχικά, το σκυρόδεμα βρίσκεται σε μια ρευστή κατάσταση, ενώ όσο περνάει ο χρόνος, μέσα από εξωθερμικές διεργασίες στερεοποιείται και έτσι αποκτά φέρουσα ικανότητα. Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι οι ιδιότητες που αποκτά το σκυρόδεμα στον χρόνο, όπως είναι η αρχική ανάμειξη, η διακίνηση, η διάστρωση, η συντήρηση, καθώς επίσης και η μακροχρόνια ανθεκτικότητα, μπορούν να ελεγχθούν ανάλογα με την εφαρμογή μέσω της προσθήκης στο μίγμα χημικών πρόσθετων που μπορούν και αποδίδουν στο τελικό προϊόν συγκεκριμένες ιδιότητες.

Όπως προαναφέρθηκε το σκυρόδεμα βρίσκει ευρύτατη αποδοχή στον τομέα της δόμησης σε παγκόσμιο επίπεδο, ανεξάρτητα από τις επικρατούσες κλιματολογικές και οικονομικές συνθήκες, οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό είναι οι εξής:

1. Το σκυρόδεμα παρουσιάζει άριστη αντοχή στην δράση του νερού, ενώ δεν φθείρεται σε σημαντικό βαθμό σε σχέση με άλλα δομικά υλικά, όπως είναι για παράδειγμα το ξύλο και ο σίδηρος. Το γεγονός αυτό σχετίζεται και με τις πρώτες εφαρμογές σκυροδέματος που αφορούσαν την διαχείριση του νερού, όπως ήταν η κατασκευή δεξαμενών και καναλιών νερού. Στις μέρες μας, το σκυρόδεμα βρίσκει ευρεία χρήση στην κατασκευή φραγμάτων, καναλιών αλλά και οδοστρωμάτων. Ενδεικτικό είναι ότι τα δομικά στοιχεία τα οποία είναι εκτεθειμένα στην υγρασία, όπως είναι οι πάσσαλοι, τα θεμέλια, τα πέδιλα, τα πατώματα, τα δοκάρια, οι κολώνες, οι στέγες, οι εξωτερικοί τοίχοι και οι σωλήνες, είναι αρκετά συνηθισμένο να κατασκευάζονται από οπλισμένο και προεντεταμένο σκυρόδεμα.
2. Τα δομικά στοιχεία που έχουν κατασκευαστεί από σκυρόδεμα, είναι εφικτό να διαμορφωθούν σε διάφορα σχήματα και μεγέθη με σχετικά μεγάλη ευκολία. Το σκυρόδεμα εφόσον είναι φρέσκο έχει τη δυνατότητα να ρέει σε κάποιο προκατασκευασμένο καλούπι και έτσι μπορεί να λάβει το επιθυμητό σχήμα. Αφού περάσει κάποιο χρονικό διάστημα, το σκυρόδεμα αποκτά στέρεα μορφή και έτσι το καλούπι αφαιρείται.
3. Είναι γεγονός ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, το σκυρόδεμα είναι το πλέον διαθέσιμο υλικό και συνήθως βρίσκεται σε χαμηλό κόστος. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει και προηγουμένως τα κύρια συστατικά από τα οποία συντίθεται το σκυρόδεμα είναι το νερό, τα αδρανή υλικά και το τσιμέντο Portland, τα οποία θεωρούνται φθηνά, ενώ μπορεί κανείς να τα βρει με σχετική ευκολία, σε διάφορα μέρη του κόσμου σε ανταγωνιστικό κόστος.
4. Το σκυρόδεμα δεν διαβρώνεται ενώ δεν χρειάζεται κάποιου είδους επιφανειακή επεξεργασία και δύναμή του παρουσιάζει αύξηση με τον χρόνο. Κατά συνέπεια, οι κατασκευές από σκυρόδεμα απαιτούν λιγότερη συντήρηση. Από την άλλη, οι μεταλλικές κατασκευές είναι αρκετά σύνηθες να αντιμετωπίζουν διάβρωση, ιδίως σε υπεράκτιες εφαρμογές ή όταν είναι εγκατεστημένες κοντά σε θαλάσσια περιοχή. Επιπλέον, οι μεταλλικές κατασκευές απαιτούν δαπανηρή επιφανειακή επεξεργασία, καθώς επίσης και άλλες μεθόδους προστασίας, όπως είναι για παράδειγμα η καθοδική προστασία, γεγονός που συνεπάγεται υψηλό κόστος συντήρησης και επισκευής.
5. Η αντοχή που δείχνει το σκυρόδεμα στην περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς συνιστά ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα στη χρήση του, ενώ αποτελεί παράγοντα ασφαλείας ιδίως για τις εφαρμογές σε υπεράκτιο περιβάλλον. Καλύπτοντας τα μεταλλικά στοιχεία από οπλισμένο και προεντεταμένο σκυρόδεμα εκτός από την δομική ευστάθεια που δημιουργείται, παρέχεται προστασία από την υπερβολική θερμότητα.
6. Στο σκυρόδεμα η πλειοψηφία των κωδικών που βρίσκονται σε ισχύ, η αντοχή σε κόπωση επιτρέπεται να είναι μόνο το 50% της αντοχής του. Από την άλλη η αντοχή σε κόπωση των μεταλλικών κατασκευών σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα πεδία των τάσεων, τους αρμούς συγκόλλησης, την διάβρωση και τα σκασίματα.

1.2 Κατηγορίες σκυροδέματος:

Το σκυρόδεμα διακρίνεται σε διάφορες κατηγορίες αναλόγως της αντοχής του σε θλίψη, σε ηλικία 28 ημερών, της εργασιμότητάς του, της ανθεκτικότητάς (διάρκεια στο χρόνο) και της κατηγορίας έκθεσης σε διάφορα περιβάλλοντα, κ.λ.π., σύμφωνα με τα επόμενα (ειδικές απαιτήσεις που μπορεί να υπάρχουν ανάλογα με τις ανάγκες και τις συνθήκες του έργου).

1. Κατηγορίες αντοχής(strength classes):

Για τη μελέτη και κατασκευή των έργων χρησιμοποιούνται οι κατηγορίες σκυροδέματος του πίνακα 2.2 του ΚΤΣ-97, όπου ο πρώτος αριθμός κάθε κατηγορίας ορίζει την χαρακτηριστική αντοχή εκφραζόμενη σε MPa που διαπιστώνεται όταν ο έλεγχος γίνεται με κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 15 και ύψους 30 cm και ο δεύτερος την χαρακτηριστική αντοχή όταν ο έλεγχος γίνεται με κυβικά δοκίμια ακμής 15 cm.

Πίνακας 1 : Κατηγορίες σκυροδέματος (ΚΤΣ-97)

Κατηγορία σκυροδέματος	f_{ck}, κυλ. (MPa)	f_{ck}, κύβου (MPa)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60

2. Κατηγορίες κάθισης:

Οι κατηγορίες κάθισης ορίζονται στον πίνακα 12.1.1.16 του ΚΤΣ-97 και ύστερα από την αναθεώρησή του της Υ.Α. Δ14/50504/12-4-2002 (ΦΕΚ 537/1-5-2002), είναι οι εξής :

Πίνακας 2 : Κατηγορίες καθίσεως (ΚΤΣ-97)

Κατηγορία	Κάθιση σε mm
S ₁	10 – 40
S ₂	50 – 90
S ₃	100 – 150
S ₄	160 – 210
S ₅	> 220

Η μετρούμενη κάθιση πρέπει να στρογγυλεύεται στα πλησιέστερα 10mm

3. Κατηγορίες ανθεκτικότητας(durability classes):

Οι κατηγορίες ανθεκτικότητας, δηλαδή εκείνες οι κατηγορίες που εκφράζουν την αντοχή του σκυροδέματος στην διάρκεια του χρόνου και την ικανότητά του να ανταπεξέρχεται ικανοποιητικά στην έκθεσή του σε εξωτερικό περιβάλλον (exposure classes), περισσότερο ή λιγότερο βλαπτικό ή διαβρωτικό, περιλαμβάνονται στον ΚΤΣ-97 και στις συστάσεις του ΕΛΟΤ EN 206-1 και απαιτούν συνήθως προσοχή σε (5) παράγοντες, τα λεγόμενα “5C”, δηλαδή :

- Cement content (ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου)
- Water / Cement ratio (λόγος Νερού προς Τσιμέντο)
- Compaction (συμπύκνωση / δόνηση σκυροδέματος)
- Curing (συντήρηση σκυροδέματος)
- Cover (πάχος της στρώσεως της επικάλυψης σπλισμού)

Το σκυρόδεμα διακρίνεται αν είναι σε:

- Εσωτερικό / εξωτερικό χώρο
- Περιβάλλον διαβρωτικό με χλωριόντα, σε θαλάσσιο περιβάλλον
- Περιβάλλον με κίνδυνο παγοπληξίας
- Περιβάλλον με κίνδυνο από ενανθράκωση (carbonation)
- Περιβάλλον με κίνδυνο από δράση θεικών (π.χ. τσιμέντο με αντίσταση στα θειικά, κ.λπ.)
- Επιχρισμένο ή ανεπιχριστο

Κατηγορίες περιβαλλοντικής έκθεσης

Πίνακας F.1 — Σχέδιο Ελάχιστων τιμών για την σύνθεση και τις ιδιότητες του σκυροδέματος

	Κατηγορίες έκθεσης																	
	Μη διακινδύνευση οξείδωσης και προσβολής	Ενανθράκωση				Οξείδωση οφειλόμενη σε χλωριόντα						Προσβολή ψύξης απόψυξης				Περιβάλλον με έντονα χημικές προσβολές		
						Θαλασσινό νερό			Άλλης προέλευσης χλωριόντα									
X0	XC 1	XC 2	XC 3	XC 4	XS 1	XS 2	XS 3	XD 1	XD 2	XD 3	XF 1	XF 2	XF 3	XF 4	XA 1	XA 2	XA 3	
Μέγιστη σχέση νερού / τσιμέντο	-	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	0,55	0,55	0,50	0,50	0,55	0,50	0,45
Ελάχιστη κατηγορία αντοχής	C12/15	C20/25	C25/30	C28/35	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C32/40	C35/45	C28/35	C25/30	C35/45	C30/37	C28/35	C30/37	C35/45
Ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο	-	270	300	320	320	330	340	360	330	340	360	300	300	320	320	320	350	370
Περιεκτικότητα σε αέρα	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,0 ^a	4,0 ^a	4,0 ^a	-	-	-
Ελάχιστο πάχος επικάλυψης						40	40	45	40	40	45							
Άλλες Απαιτήσεις	Μη οπλισμένο	ΑΘΗ			Παραθαλάσσιο	Μόνιμα εντός	Ειδικά αδρανή						Τα./θειικά					

Σκυρόδεμα χωρίς απαιτήσεις								Σκυρόδεμα ανθεκτικό σε επιφανειακή φθορά	Σκυρόδεμα μειωμένης υδατοπερατότητας	Σκυρόδεμα μέσα σε νερό (όχι διαβρωτικό)	Σκυρόδεμα στη θάλασσα	Σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε αέρα κορεσμένο με θαλάσσια άλατα (παραθαλάσσιο περιβάλλον)	Σκυρόδεμα ανθεκτικό σε χημικές προσβολές	
Επιγρτισμένο				Ανεπίγρτιστο										
Μέγιστος κόκκος 3/8" ή 8 mm	Μέγιστος κόκκος 1/2" ή 16 mm	Μέγιστος κόκκος 1" ή 31,5 mm	Μέγιστος κόκκος 1 1/2" ή 63 mm	Μέγιστος κόκκος 3/8" ή 8 mm	Μέγιστος κόκκος 1/2" ή 16 mm	Μέγιστος κόκκος 1" ή 31,5 mm	Μέγιστος κόκκος 1 1/2" ή 63 mm	Μέγιστος κόκκος 1" ή 31,5 mm	Μέγιστος κόκκος 1/2" ή 16 mm					
Τύπος τσιμέντου										I ή II				
Μέγιστος λόγος νερό/τσιμέντο (N/T)	0,70	0,70	0,70	0,70	0,67	0,67	0,67	0,67	0,58	0,50	0,60	0,48	0,60	
Ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου (Kg/m ³)	320	300	270	270	350	330	300	300	350	350	400	350	400	330
Ελάχιστη κατηγορία αντοχής									C 25/30					
Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος αδρανών									Κάτω μισό υποζώνης Δ	Κοντά στη μέση γραμμή της υποζώνης Δ	Κοντά στη μέση γραμμή της υποζώνης Δ	Κοντά στη μέση γραμμή της υποζώνης Δ	Κοντά στη μέση γραμμή της υποζώνης Δ	Κοντά στη μέση γραμμή της υποζώνης Δ

Ελάχιστες απαιτήσεις για σκυροδέματα που καλύπτονται από τον ΚΤΣ-97

1.3 Επιμέρους συστατικά σκυροδέματος:

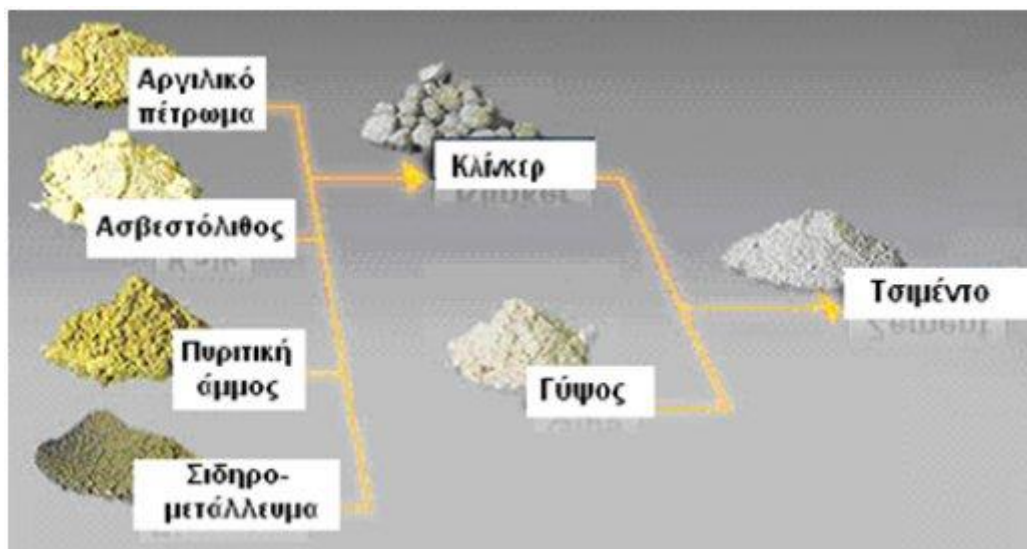
Τσιμέντο: Το τσιμέντο είναι ένα συνθετικό υλικό που σκληραίνεται στον αέρα και στο νερό. Αποτελείται από ενώσεις π.χ οξείδιο του σιδήρου(FeO₃), οξείδιο της άσβεστου, πυριτικού οξειδίου(SiO₂) κ.α.

Ο πιο διαδεδομένος τύπος που χρησιμοποιείται στις διάφορες κατασκευές είναι το τσιμέντο τύπου Portland. Ο τρόπος παραγωγής του περιλαμβάνει την καύση που γίνεται στους 1450 °C των ασβεστολιθικών και των αργιλοπυριτικών πετρωμάτων σε ποσοστά που κυμαίνονται από 75% και 25% αντίστοιχα, ανάλογα με το είδος του τσιμέντου και τις ιδιότητες που επιθυμούμε αυτό να έχει. Από την διαδικασία της καύσης προκύπτει το κλίνκερ, το οποίο αφού πρώτα ψυχθεί οδηγείται σε ανάμειξη με γύψο σε ποσοστό που φθάνει το 5%, αλέθεται και εν συνεχεία παράγεται τελικά το καθαρό τσιμέντο.

Προκειμένου να υπάρξει μείωση της ποσότητας του κλίνκερ, προστίθενται άλλα πρόσθετα τα οποία χαρακτηρίζονται από ιδιότητες πληρωτικών (fillers), δηλαδή πρόκειται ουσιαστικά για φυσικές πρώτες ύλες όπως είναι ποζολάνες, άχνη ασβεστόλιθου, ή βιομηχανικά παραπροϊόντα, όπως είναι η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία των υψικαμίνων. Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι τα υλικά αυτά θεωρούνται απολύτως συμβατά με τσιμέντο, καθώς μπορούν και βελτιώνουν τις ιδιότητές του στην παραγωγή σκυροδέματος, όπως ενδεικτικά είναι η βελτίωση της εργασιμότητας, η μείωση της διαπερατότητας, ενώ παράλληλα συμβάλλουν στην μείωση του κόστους παραγωγής του.

Τα Κυριότερα συστατικά τσιμέντου και ο συμβολισμός τους

Συστατικό	Συμβολισμός
Κλίνκερ	K
Ποζολάνη φυσική	P
Ποζολάνη φυσική ψημένη	Q
Ιπτάμενη τέφρα πυριτική	V
Ιπτάμενη τέφρα ασβεστούχος	W
Ψημένος σχιστόλιθος	T
Ασβεστόλιθος	L
Σκωρία υψικαμίνου	S
Πυριτική παιπάλη	D



Πρώτες ύλες παραγωγής τσιμέντου

1.3.1 Ιδιότητες τσιμέντου:

Οι σημαντικότερες ιδιότητες του τσιμέντου που έχουν σχέση με την συμπεριφορά του και τις χρήσεις του είναι:

- **Η λεπτότητα** του τσιμέντου μπορεί να εκφραστεί από την κοκκομετρική του ανάλυση, καθώς επίσης και από τον αριθμό Blaine (ειδική επιφάνεια) σε μονάδες m^2/kg ή cm^2/g . Όσο πιο μεγάλη είναι η λεπτότητα του τσιμέντου, τόσο πιο γρήγορη μπορεί να καταστεί η ενυδάτωση και συνεπώς τόσο πιο μεγάλη να είναι η αντοχή σε μικρό χρονικό

διάστημα,κυρίως τις πρώτες επτά ημέρες.Ωστόσο σε περίπτωση που υπάρχει μεγαλύτερη λεπτότητα αυτό σημαίνει ότι απαιτείται πιο μεγάλη κατανάλωση ενέργειας και άρα αυξημένο κόστος παραγωγής.

- **Η υγεία (διόγκωση):** Πρόκειται για την ικανότητα που έχει η σκληρυμένη τσιμεντόπαστα να διατηρεί τον όγκο της ύστερα από τη πήξη.Ένα τσιμέντο μπορεί να χαρακτηριστεί ως μη «υγιές» όταν ύστερα από την πάροδο ορισμένου χρονικού διαστήματος από την χρήση του,παρουσιάζει καταστροφική για το σκυρόδεμα διόγκωση,η οποία προκαλεί και διάρρηξη της κατασκευής.
- Η **συνεκτικότητα** ή συνάφεια, όπου περιγράφει την ιδιότητα του ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού να ρέει.
- **Εργασιμότητα:** Πρόκειται για την ιδιότητα που έχει το νωπό σκυρόδεμα,η οποία χαρακτηρίζει ουσιαστικά την ευκολία με την οποία αυτό έχει την δυνατότητα να μεταφέρεται,να διαστρώνεται και να συμπυκνώνεται.Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι η εργασιμότητα δεν συνιστά απόλυτο μέγεθος και δεν έχει σχέση με την ρευστότητα και την συνεκτικότητα του νωπού σκυροδέματος,δηλαδή την περιεκτικότητα που έχει το μίγμα νώπου σκυροδέματος σε νερό.
- **Ο χρόνος πήξης:**Είναι το χρονικό διάστημα το οποίο μεσολαβεί από την στιγμή που γίνεται έναρξη την ανάμιξης του τσιμέντου με το νερό,μέχρις ότου η σχηματιζόμενη πλαστική μάζα χάσει τις πλαστικές και τις συγκολλητικές της ιδιότητες.
- **Η αντοχή σε θλίψη:**Είναι μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες του τσιμέντου,ενώ μετράται σε χρονικά διαστήματα των 27 και 28 ημερών.Θα πρέπει να τονίσουμε ότι τελική θεωρείται η θλιπτική αντοχή των 28 ημερών.
- **Η θερμότητα ενυδάτωσης:**Είναι η θερμότητα η οποία απελευθερώνεται κατά την διάρκεια της αντίδρασης του τσιμέντου σε νερό.

1.3.2 Τύποι τσιμέντου

Εκτός από το τσιμέντο Portland, το οποίο έχει ήδη εξεταστεί προηγουμένως, διακρίνουμε και άλλους τύπους τσιμέντου που έχουν περισσότερο εξειδικευμένα χαρακτηριστικά ανάλογα με την σύστασή τους τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά:

- **Τα αργιλικά τσιμέντα:**Περιέχουν στον μεγαλύτερο βαθμό οξειδίο του ασβεστίου,όπως και οξειδίο του αργίλου,η περιεκτικότητα του οποίου αγγίζει το 40-45%.Τα αργιλικά

τσιμέντα είναι χρώματος μαύρου και χαρακτηρίζονται από την ταχεία ανάπτυξη της αντοχής που μπορεί να συμβεί και σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι κάποιες φορές η αντοχή του τσιμέντου παρουσιάζει μείωση σε σχέση με τον χρόνο και το γεγονός αυτό οφείλεται στην αστάθεια που εμφανίζουν ορισμένα από τα προϊόντα ενυδάτωσης. Συνεπώς, εξαιτίας των παραγόντων αυτών συνίσταται να αποφεύγεται η χρήση αργιλικών τσιμέντων στα δομικά έργα. Οι συνηθέστερες χρήσεις των αργιλικών τσιμέντων είναι για επιδιορθώσεις όπου απαιτείται ταχεία αποκατάσταση καθώς επίσης και σε βιομηχανικά δάπεδα. Επίσης, τα αργιλικά τσιμέντα βρίσκουν εφαρμογές για την εσωτερική προστασία μεταλλικών σωλήνων, είτε λειτουργούν ως διασυνδεδετικό σεεπισκευαστικά και συγκολλητικά κονιάματα. Άλλες χρήσεις που απαντώνται τα αργιλικά τσιμέντα είναι για σκυροδέτηση σε ψυχρές περιοχές, ως πυροπροστατευτικά κονιάματα και σκυροδέματα, είτε χυτά, είτε εκτοξευόμενα τα οποία βρίσκουν εφαρμογές στον κλάδο της μεταλλουργίας και της σιδηρουργίας, στους καπνοδόχους, στους φούρνους καθώς και σε άλλες κατασκευές που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, σε θαλάσσιο, αγροτικό, βιομηχανικό ή αστικό διαβρωτικό περιβάλλον, σε πλάκες επίστρωσης επιφανειών και τέλος σε μικρά προκατασκευασμένα στοιχεία.

- **Τα ταχύπηκτα τσιμέντα:** Η εν λόγω κατηγορία τσιμέντου παρασκευάζεται από ασβεστοαργιλώδη πετρώματα απουσίας γύψου, εξαιτίας του οποίου επιβραδύνεται η πήξη. Η πήξη ξεκινά τρία λεπτά μετά την σκυροδέτηση στους 20 οC και ύστερα από δέκα λεπτά συνεχίζεται στους 0 οC. Όταν είναι αναγκαίος κάποιος συγκεκριμένος χρόνος πήξης, τότε γίνεται ανάμειξη των ταχύπηκτων τσιμέντων με ποσότητες συμβατικού τσιμέντου, καθώς επίσης και με ποσότητες ασβεστόλιθου, είτε με κάποια οξέα έτσι ώστε να υπάρξει επιβράδυνση της πήξης και να γίνει εντός του επιθυμητού χρονικού πλαισίου. Τα ταχύπηκτα τσιμέντα εφαρμόζονται κυρίως στην κατασκευή καναλιών για υδρορροές, στις καπνοδόχους που βρίσκουν χρήση στον κλάδο της βιομηχανίας, στις ειδικές θεμελιώσεις στα σφραγίσματα σωληνώσεων, στα κονιάματα και στις επιδιορθώσεις, όπως επίσης και σε ορισμένες δομικές μονάδες.
- **Τα λευκά τσιμέντα:** όπου παρασκευάζονται από λευκά ασβεστολιθικά υλικά χωρίς να έχουν μεταλλικές προσμίξεις, κυρίως σιδήρου σε μύλους που πληρούν ειδικές προδιαγραφές και εξαιτίας του γεγονότος αυτού φαίνεται να έχουν σημαντικά υψηλότερο κόστος, σε σχέση με τα κοινά τσιμέντα. Η συγκεκριμένη κατηγορία τσιμέντου βρίσκει χρήσεις εκεί που καθίσταται αναγκαίο να πληρούνται συγκεκριμένες αρχιτεκτονικές και αισθητικές απαιτήσεις
- **Τα τσιμέντα που έχουν μεταβαλλόμενο όγκο,** όπου περιέχουν προσμίξεις, που ενισχύουν την ενυδάτωση μετά την πήξη την διόγκωση ή την συρρίκνωση του όγκου των τσιμέντων, έτσι ώστε να αποκτήσουν τις επιθυμητές διαστάσεις.



1.3.3 Αδρανή υλικά:

Αδρανή ονομάζονται τα διαβαθμισμένα υλικά που είναι ορυκτής ή βιομηχανικής προέλευσης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε με συγκολλητικό μέσο, δηλαδή για παρασκευή κονιαμάτων, σκυροδεμάτων, ασφαλτομιγμάτων κτλ, είτε χρησιμοποιούνται αυτούσια όπως συμβαίνει στα έργα των σιδηροδρομικών σταθμών, στην κατασκευή στραγγιστηρίων, όπως επίσης και στους βράχους θωράκισης και σε πάσης φύσεως τεχνικά έργα. Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι τα αδρανή καταλαμβάνουν περίπου το 60%-80% του συνολικού όγκου του σκυροδέματος. Τα αδρανή δεν παρουσιάζουν χημικές συνδετικές ιδιότητες μεταξύ τους, αλλά παρουσιάζουν φυσική συνοχή που σχετίζεται με την γεωμετρική ταξινόμηση των κόκκων τους και του βάρους. Εξαιτίας του ποσοστού των αδρανών στο σκυρόδεμα, αυτό διατηρείται σε χαμηλό κόστος, λαμβάνοντας υπόψη ότι αποτελούν μια φθηνή πρώτη ύλη. Η επιλογή των αδρανών, θα πρέπει να γίνεται με την δέουσα προσοχή, με βάση τα επιδιωκόμενα χαρακτηριστικά τους ως προς τη σύνθεση του σκυροδέματος και κυρίως ως προς την ανθεκτικότητά του. Ακόμη, να αναφέρουμε ότι τα αδρανή που χρησιμοποιούνται για την Παρασκευή σκυροδέματος, θα πρέπει να είναι διαβαθμισμένα σε μέγεθος, να είναι υγιή, καθαρά χωρίς να έχουν επιβλαβείς προσμίξεις, καθώς επίσης να είναι σκληρά και ανθεκτικά.

Ταξινόμηση αδρανών

Τα αδρανή μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους, μερικοί από αυτούς είναι οι παρακάτω:

1. Λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος του κόκκου, σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο 12620), μπορούν να διαχωριστούν ως εξής:

- **Παιπάλη**, με το μέγεθος κόκκου να είναι μικρότερο (<) από 0,063mm.
- **Λεπτόκοκκα**, που έχουν μέγεθος κόκκων που κυμαίνεται 0,063<D<4 mm και πρόκειται συνήθως για διάφορα είδη άμμου.
- **Χονδρόκοκκα**, που έχουν μέγιστο μέγεθος κόκκου D>4 mm και ελάχιστο d>2mm και είναι ογκόλιθοι, κροκάλες, έρμα, χαλίκι γαρμπίλι, ρυζάκι.
- **Filler**, όπου πρόκειται για ένα διαβαθμισμένο λεπτομερές αδρανές υλικό που έχει μέγιστο κόκκο D=2mm και διέρχεται σε ποσοστό που κυμαίνεται από 70% έως και 100% από κόσκινο που έχει διάμετρο 0,063mm. Το αδρανές αυτό προστίθεται σε ορισμένα δομικά υλικά, προκειμένου να προσδώσει συγκεκριμένες ιδιότητες.

2. Με βάση το βάρος τους χωρίζονται σε:

- **Κανονικά**, όπου η πυκνότητα των κόκκων κυμαίνεται μεταξύ 2.000 3.000 kg/m³.
- **Ελαφρά**, με την πυκνότητα των κόκκων να είναι μικρότερη (<) από 2.000 kg/m³ και χρησιμοποιούνται κατά την παρασκευή του ελαφροσκυροδέματος.
- **Βαρέα**, όπου η πυκνότητα των κόκκων είναι μεγαλύτερη (>) από 3.000 kg/m³

3. Με βάση την προέλευσή τους μπορούν να διαχωριστούν ως εξής:

- Σε **φυσικά**, τα οποία λαμβάνονται από το φυσικό περιβάλλον και δεν έχουν προβεί σε κανενός είδους επεξεργασία, πέρα από την θραύση, το πλύσιμο και την διαλογή.
- Σε **τεχνητά ή βιομηχανικά**, τα οποία προκύπτουν ως προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας, όπως είναι για παράδειγμα η σκωρία υψικαμίνου, η ιπτάμενη τέφρα κτλ, που προκύπτουν συνήθως από χημική ή θερμική επεξεργασία των ορυκτών.
- Σε **ανακυκλωμένα** αδρανή, τα οποία προκύπτουν κατόπιν επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίηση δομικών υλικών που προέρχονται από υφιστάμενες οικοδομές, όπως είναι τα υλικά κατεδάφισης.

4. Με βάση την πηγή λήψης τους, τα φυσικά αδρανή μπορούν να διαχωριστούν ως εξής:

- Σε **συλλεκτά**, όπου προέρχονται από τη φύση κατόπιν φυσικών διεργασιών, όπως είναι η αποσάθρωση, η απολέπιση κτλ.
- Σε **θραυστά**, όταν προέρχονται από τη θραύση πετρωμάτων.

1.3.4 Χαρακτηριστικά αδρανών

Οι προδιαγραφές αντοχής και χρήσης του σκυροδέματος καθορίζουν τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά των αδρανών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Τα χαρακτηριστικά αυτά και γενικότερα η καταλληλότητα των αδρανών ορίζονται σύμφωνα με τις ελληνικές προδιαγραφές από το πρότυπο ΕΛΟΤ 408 και τον ΚΤΣ-97 και σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές προδιαγραφές από το ΕΛΟΤ EN12620:2002+A1:2008 (για τα κανονικού βάρους και βαρέα αδρανή) και από το EN13055 (για τα ελαφρά αδρανή)

Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να ελέγχονται είναι:

- **Η αντοχή του μητρικού πετρώματος:** Οι ιδιότητες των αδρανών ως προϊόντων ελάττωσης μεγέθους από μεγαλύτερα τεμάχια μητρικού πετρώματος εξαρτώνται κατά βάση από τις ιδιότητες του αρχικού πετρώματος. Για τον λόγο αυτό βάσει του προτύπου ΕΛΟΤ-408 πρέπει το μητρικό πέτρωμα να έχει θλιπτική αντοχή τουλάχιστον 65 ΜΡα. Αξίζει να αναφερθεί ότι στο Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12620 δεν υπάρχει απαίτηση για έλεγχο του μητρικού πετρώματος.
- **Η αντοχή σε επιφανειακή φθορά και κρούση:** Τα αδρανή υλικά πρέπει να έχουν ικανοποιητική αντοχή στην καταπόνηση σε φθορά και κρούση. Ελέγχεται με τη συσκευή Los Angeles, η οποία προσδιορίζει την αντίσταση στη φθορά από τριβή και κρούση κατά την ανάμιξη, μεταφορά και διάσπρωση των αδρανών.
- **Η ανθεκτικότητα σε αποσάθρωση (υγεία):** Είναι η ιδιότητα των αδρανών να μην παρουσιάζουν έντονες αυξομειώσεις όγκου ή απώλεια υλικού λόγω των εναλλασσόμενων καιρικών συνθηκών και κυρίως λόγω διαδικασιών ψύξης – θέρμανσης, διαβροχής – ξήρανσης και ψύξης – απόψυξης. Τα αδρανή που είναι ανθεκτικά στην αποσάθρωση χαρακτηρίζονται ως υγιή.
- **Η πραγματική και φαινομενική πυκνότητα:** Ως πραγματική πυκνότητα του αδρανούς (ρ_s) ορίζεται η πυκνότητα του πετρώματος, δηλαδή ο όγκος της μάζας προς τον όγκο των κόκκων (χωρίς τα μεταξύ τους κενά). Ως φαινόμενη πυκνότητα (ρ) ορίζεται η πυκνότητα του σωρού και ισούται με τον λόγο της μάζας προς τον όγκο του σωρού των αδρανών (μαζί με τα κενά). Εξαρτάται από το βαθμό συμπύκνωσής τους. Ο λόγος ρ/ρ_s ονομάζεται βαθμός πυκνότητας και δίνει μια γενική εικόνα της γεωμετρικής ποιότητας των αδρανών.
- **Υγρασία και ικανότητα απορρόφησης:** Η υγρασία απορρόφησης αναφέρεται στην ποσότητα του νερού που απορροφάται στους πόρους του υλικού ως ποσοστό επί τοις εκατό % του ξηρού βάρους του δείγματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η υγρασία απορρόφησης τόσο μικρότερη είναι η ανθεκτικότητα των αδρανών. Τα αδρανή ανάλογα με το βαθμό υγρασίας τους χωρίζονται σε 1) εντελώς ξηρά, 2) ξηρά με λίγη μόνο εσωτερική υγρασία, 3) κορεσμένα και επιφανειακά ξηρά, χωρίς καθόλου επιφανειακή υγρασία αλλά με κορεσμένους τους εσωτερικούς πόρους και 4) υγρά, με κάποια ποσότητα επιφανειακής υγρασίας και κορεσμένους όλους τους εσωτερικούς πόρους. Τα αδρανή ανάλογα με την υγρασία τους μπορούν να διαθέσουν ή να απορροφήσουν νερό από το μίγμα του σκυροδέματος. Ως ικανότητα απορρόφησης υγρασίας ορίζεται η συνολική ποσότητα υγρασίας που απαιτείται για τη μετατροπή των αδρανών από εντελώς ξηρά σε κορεσμένα και επιφανειακά ξηρά και σχετίζεται άμεσα με το πορώδες και την αντοχή των αδρανών.
- **Οι μηχανικές ιδιότητες:** Η θλιπτική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας εξαρτώνται από το πορώδες και για τα συνηθισμένα αδρανή είναι ανώτερες από τις αντίστοιχες του

σκυροδέματος. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η ελάχιστη αντοχή αδρανών για την παρασκευή κοινού σκυροδέματος στη χώρα μας είναι 65 MPa (Πρότυπο ΕΛΟΤ-408). Επίσης, αδρανή με αντοχή μεταξύ 45 MPa και 65 MPa ή μικρότερη από 45 MPa μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σκυρόδεμα φέροντος οργανισμού ή για επιχρισμένο οικοδομικό σκυρόδεμα, αντίστοιχα, όταν ικανοποιούν τις απαιτήσεις αδρανών του ΚΤΣ και εφόσον από τη μελέτη σύνθεσης αποδειχθεί ότι επιτυγχάνεται η απαιτούμενη αντοχή του σκυροδέματος για το οποίο προορίζονται.

- **Το σχήμα και η επιφανειακή υφή:** Το σχήμα και η επιφανειακή υφή των αδρανών επηρεάζουν ως επί το πλείστον τις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος και όχι τόσο του σκληρωμένου. Γενικά τα αδρανή πρέπει να έχουν, κατά το δυνατόν, σφαιρική ή κυβική μορφή με τραχεία επιφάνεια. Ένας κόκκος θεωρείται ότι έχει δυσμενή μορφή, όταν η σχέση της μεγαλύτερης προς τη μικρότερη διάστασή του ξεπερνά το 3:1. Το ποσοστό των κόκκων με δυσμενή μορφή δεν επιτρέπεται να ξεπερνά το 50%. Τα γωνιώδη και επιμήκη αδρανή με τραχεία επιφάνεια χρειάζονται μεγαλύτερη ποσότητα τσιμεντοπολτού από τα στρογγυλεμένα για την παρασκευή εργάσιμου σκυροδέματος, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους. Από την άλλη, η αύξηση της πολυγωνικότητας των κόκκων βελτιώνει τη στήριξη μεταξύ τους και την πρόσφυση με το κονίαμα.
- **Η κοκκομετρική διαβάθμιση:** Πρόκειται για την ποσοστιαία επί τοις εκατό σύνθεση του αδρανούς σε κόκκους διαφόρων μεγεθών. Η καλή κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών συνεπάγεται λιγότερα κενά μεταξύ των κόκκων και ως εκ τούτου συμβάλλει στη μείωση του κόστους του σκυροδέματος καθώς απαιτείται μικρότερη ποσότητα τσιμεντοπολτού για την κάλυψη τους. Επιπλέον τα καλά διαβαθμισμένα αδρανή παρουσιάζουν καλύτερη συνεκτικότητα, ογκοσταθερότητα καθώς και εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος. Η κοκκομετρική διαβάθμιση καθορίζεται από σειρά πρότυπων κόσκινων, Γερμανικών προδιαγραφών (κατά DIN 4187- 4188), που συμβολίζονται με □ πριν από τον αριθμό του κόσκινου ή Αμερικάνικων προδιαγραφών (κατά ASTM E11), που συμβολίζονται με το No που γράφεται πριν από τον αριθμό του κόσκινου. Επιτυγχάνεται με το κοσκίνισμα του υλικού σε κόσκινα τοποθετημένα με αύξουσα σειρά μεγέθους βροχίδων, ζύγιση των ποσοτήτων που συγκρατούνται σε κάθε κόσκινο, υπολογισμό της συνολικά διερχόμενης ποσότητας αδρανούς από κάθε κόσκινο και τελικά χάραξη της κοκκομετρικής καμπύλης σε ημιλογαριθμικό χαρτί.
- **Η καθαρότητα:** Τα αδρανή μπορεί να περιέχουν βλαβερές προσμίξεις, οι οποίες είναι δυνατόν να επηρεάσουν δυσμενώς την πήξη και την σκλήρυνση των σκυροδεμάτων και να μειώσουν την αντοχή τους, την σταθερότητα του όγκου τους και την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση. Για τις ουσίες, ανάλογα με το είδος τους και την ποιότητα του παρασκευαζόμενου σκυροδέματος καθορίζονται από τα αντίστοιχα πρότυπα ανώτατα επιτρεπτά όρια.

Με σειρά κοκκομετρίας (από το πιο λεπτόκοκκο στο πιο χονδρόκοκκο):

Άμμος



Γαρμπίλι



Χαλίκι



1.3.5 Νερό αναμίξεως

Το νερό ανάμιξης μπορεί να επιφέρει μείωση της αντοχής του σκυροδέματος στην περίπτωση που το πρώτο περιέχει επιβλαβείς χημικές ουσίες. Για το λόγο αυτό δεν πρέπει να χρησιμοποιείται θαλασσινό νερό για την παρασκευή σκυροδέματος. Επίσης όπως προδιαγράφεται από το πρότυπο ΕΛΟΤ 345, το νερό ανάμιξης όπως και το νερό συντήρησης δεν θα πρέπει να περιέχει συστατικά που θα έχουν δυσάρεστες συνέπειες στην αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος και του οπλισμού του. Το χρησιμοποιούμενο νερό δεν πρέπει να προέρχεται από βιομηχανικά απόβλητα ούτε θα πρέπει να περιέχει ζωικά απορρίμματα, σάκχαρα και ανθρακικό κάλιο. Επιπλέον δεν πρέπει να αμελείται η σημασία του λόγου νερού προς τσιμέντο (N/T) στη θλιπτική αντοχή του παραχθέντος σκυροδέματος. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων ο λόγος N/T κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,40 και 0,65 ενώ αν χρησιμοποιηθούν ρευστοποιητές η απαίτηση για νερό αυξάνεται και συνεπώς αυξάνεται και ο λόγος N/T. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι αύξηση του λόγου N/T επιφέρει μείωση της τελικής αντοχής του σκυροδέματος. Συνοψίζοντας λοιπόν είναι εμφανής ο καταλυτικός ρόλος του νερού στην ανθεκτικότητα μιας κατασκευής από σκυρόδεμα, κι αυτό γιατί:

- Επηρεάζει το πορώδες (υψηλός λόγος w/c, αυξάνει την παρουσία τριχοειδών πόρων).
- Αποτελεί το μέσο διάχυσης των διαβρωτικών συστατικών στους πόρους τους σκυροδέματος.
- Αποτελεί το διαλύτη των διαβρωτικών μέσων
- Συμμετέχει στην αντίδραση διάβρωσης του οπλισμού και στην καταστροφή της παθητικής του προστασίας.
- Συμμετέχει στην αλκαλοπυριτική αντίδραση και στην ενανθράκωση.
- Απουσία νερού, δεν προχωράει σχεδόν καμία δράση φθοράς.

1.4 Πρόσμικτα και πρόσθετα του σκυροδέματος

Πρόσμικτα ονομάζονται τα χημικά υλικά, που χρησιμοποιούνται κατά την ανάμιξη του σκυροδέματος με σκοπό την μεταβολή των ιδιοτήτων του σκυροδέματος κατά την νωπή και την σκληρυσμένη φάση του. Οι λόγοι που οδηγούν στη χρήση οποιουδήποτε πρόσμικτου στο σκυρόδεμα είναι πολλοί, κυριότερος από τους οποίους είναι οι απαιτήσεις για τις κατασκευές, οι οποίες έχουν αυξηθεί κατά την διάρκεια των τελευταίων χρόνων. Η εφαρμογή νέων τεχνολογιών για τη δόμηση απαιτούν επίσης σημαντικές μεταβολές στις ιδιότητες του σκυροδέματος. Άλλοι παράγοντες που απαιτούν τη χρήση πρόσμικτου είναι η όσο το δυνατόν οικονομικότερη δαπάνη του έργου, τα αυξανόμενα φόρτια μιας κατασκευής και το μεγάλο ποσοστό ρύπανσης του περιβάλλοντός με αποτέλεσμα την αύξηση της διάβρωσης των έργων. Ο ρόλος των προσμίκτων είναι πολύ σημαντικός, καθώς χωρίς την χρήση τους δεν θα ήταν δυνατή η κατασκευή αξιόλογων έργων σκυροδέματος. Τέλος τα πρόσμικτα διακρίνονται σε έξι κατηγορίες, οι οποίες είναι:

1. Επιταχυντικά πρόσμικτα.

Τα επιταχυντικά πρόσμικτα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που πρέπει να αναπτυχθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα οι αυξημένες αρχικές αντοχές. Επίσης, βελτιώνουν την ταχύτητα ενυδάτωσης του τσιμέντου, αυξάνουν το χρόνο πήξης και σκλήρυνσης, καθώς και την αρχική αντοχή του. Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα τους είναι ότι η χρήση τους προκαλεί μείωση της τελικής αντοχής του σκυροδέματος.

2. Επιβραδυντικά πρόσμικτα.

Σε αντίθεση με τα επιταχυντικά πρόσμικτα, τα επιβραδυντικά χρησιμοποιούνται για να επιβραδύνουν την ενυδάτωση του τσιμέντου και συνεπώς ο χρόνος πήξης και σκλήρυνσης του μειώνεται. Η διατήρηση της εργασιμότητας είναι εφικτή και έτσι ο χρόνος για την μεταφορά και την διάστρωση του σκυροδέματος αυξάνεται. Τέλος, η αρχική αντοχή του σκυροδέματος φαίνεται μειωμένη, αλλά η τελική αντοχή του δεν επηρεάζεται.

3. Αερακτικά πρόσμικτα.

Τα αερακτικά πρόσμικτα χρησιμοποιούνται για την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος στο παγετό, καθώς και για την βελτίωση της ρευστότητας του. Τα αερακτικά πρόσμικτα παράγουν μέσα στη μάζα του νωπού σκυροδέματος φυσαλίδες με σκοπό την αύξηση του πορώδους του. Η περιεκτικότητα, όμως, του αέρα δεν πρέπει να ξεπερνά τα προκαθορισμένα όρια, διότι είναι δυνατό να μειωθεί η τελική αντοχή του σκυροδέματος. Με την χρήση αερακτικών προσμίκτων θα πρέπει η πρόσθετη ποσότητα τσιμέντου στο ανάμιγμα να είναι τόση, ώστε να μην μειωθεί η μηχανική αντοχή του. Επίσης, η ποσότητα του νερού που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να είναι μειωμένη, αφού το αερακτικό αυξάνει την εργασιμότητα του σκυροδέματος.

4. Ρευστοποιητικά πρόσμικτα.

Τα ρευστοποιητικά πρόσμικτα χρησιμοποιούνται για την αύξηση της ρευστότητας και της ομοιομορφίας του σκυροδέματος, επιτρέποντας τη μείωση της ποσότητας του νερού για την ανάμιξη και την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος. Παρόλο, που με τη χρήση ρευστοποιητικών βελτιώνεται η υδατοπερατότητα και η αντοχή του στον παγετό, υπάρχει η πιθανότητα αύξησης της

συστολής ξήρανσης και των πόρων, με αποτέλεσμα την καθυστέρηση της πήξης και τη μείωση της αντοχής.

5. Στεγανοποιητικά πρόσμικτα.

Τα στεγανοποιητικά πρόσμικτα χρησιμοποιούνται για την μείωση της ποσότητας του νερού, ώστε να αυξηθεί η στεγανότητα του σκυροδέματος, και έχουν τη δυνατότητα να μειώνουν σημαντικά το ποσοστό των τριχοειδών αγγείων και των πόρων. Τέλος, είναι δυνατόν ο χρόνος για την εξέλιξη της πήξης να μεταβληθεί και η αντοχή του σκυροδέματος να μειωθεί.

6. Πρόσμικτα για το σκυρόδεμα υπό πίεση.

Τα πρόσμικτα για το σκυρόδεμα υπό πίεση χρησιμοποιούνται για την βελτίωση της ρευστότητας του και για την αύξηση της αντοχής του στον παγετό.

Πρόσθετα του σκυροδέματος ονομάζονται οι διάφορες ουσίες, οργανικές ή ανόργανες, οι οποίες αναμειγνύονται μαζί με τα υπόλοιπα βασικά συστατικά του σκυροδέματος και προστίθενται σε μικρές ποσότητες, με μέγιστο μέχρι 5% κατά βάρος του τσιμέντου και σε κάθε περίπτωση βελτιώνουν την ιδιότητά του. Τα πρόσθετα μπορεί να είναι οργανικής προέλευσης, δηλαδή πλαστικά, καουτσούκ, άσφαλτος, κ.ά. ή ανόργανης προέλευσης, δηλαδή θηραϊκή γη, τέφρα, άβυσσος κ.ά. Η κύρια χρήση τους είναι για να βελτιώνουν ή για να δίνουν συγκεκριμένες ιδιότητες στο σκυρόδεμα. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα μείωσης της θερμότητας ενυδάτωσης και της διαπερατότητας του σκυροδέματος, αύξησης της εργασιμότητας, της συνεκτικότητας, της εξίδρωσης και της ανθεκτικότητας του σε παγοπληξία και αύξησης ή μείωσης του χρόνου πήξεως.

Ιπτάμενη τέφρα

Ιπτάμενη τέφρα ονομάζεται μία πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται ως πρόσμικτο στην παρασκευή τσιμέντου, προσφέροντας του ενδιαφέρουσες τεχνικές με αποτέλεσμα να εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα κοινά τσιμέντα. Η συμπεριφορά της είναι διαφορετική από τις ποζολάνες αλλά δείχνει να επηρεάζει κατά μεγάλο λόγο στις τελικές αντοχές των μιγμάτων. Η ιπτάμενη τέφρα αντιθέτως με τα βασικά ποζολανικά υλικά έχει διαφορετική συμπεριφορά. Η ιπτάμενη τέφρα είναι υλικό περίπου ίδιας χημικής σύστασης με το κλίνκερ αφού και αυτή περιέχει οξείδια CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , κ.ά. και έχει πάρει σχήμα σε μεγάλες θερμοκρασίες. Η αναμενόμενη συμπεριφορά της προκύπτει να είναι ίδια με του κλίνκερ ως προς την πορεία της ενυδάτωσης, χωρίς αυτή η ενυδάτωση να σημαίνει και ανάπτυξη υψηλών αντοχών όπως τσιμέντο. Η ενυδάτωση του τσιμέντου είναι μια απαραίτητη αντίδραση για να αντιδράσει η τέφρα με το Ca(OH)_2 του ενυδατωμένου τσιμέντου.

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προϊόντα με βάση το τσιμέντο, όπως αναμεμιγμένο τσιμέντο, τσιμεντένιο τετράγωνο, ψηφιδωτά πλακίδια, και τούβλα, ή για έργα οδοποιίας που χρησιμοποιούν τσιμέντο τσιμέντου Πόρτλαντ (Pcc) Πεζοδρόμιο. Ως πρόσθετο, Fly τέφρα μπορεί να είναι ένα οικονομικά αποδοτικό υποκατάστατο τσιμέντου τσιμέντο Πόρτλαντ, σε πολλές περιπτώσεις. Σε

φρέσκο-αναμεμειγμένο τσιμέντο, η προσθήκη της τέφρας μειώνει την ποσότητα νερού που απαιτείται για την ανάμειξη, και επίσης λειτουργεί ως "λιπαντικό" για τη βελτίωση της εργασιμότητας. Αυτό όχι μόνο βελτιώνει την ικανότητα άντλησης από το φορηγό ανάμειξης, παρέχει επίσης μια ομαλότερη, επίπεδη φινιρίσμα.

Όταν σκληρύνει, τσιμέντο αναμεμειγμένο με μύγα τέφρα θα συνεχίσει να αποκτήσει δύναμη με την πάροδο του χρόνου, λόγω του πρόσθετου δεσμευτικού στοιχείου η τέφρα φέρνει στην εξίσωση χημική αντίδραση.

Επίσης, μειώνει τη διαπερατότητα του σκυροδέματος, που συμβάλλει στη βελτίωση της μακροχρόνιας ανθεκτικότητας. Είναι ανθεκτικό στον ψυχρό καιρό και θεωρείται μη συρρικνούμενο υλικό, που σημαίνει ότι είναι πιο ανθεκτικό σε ρωγμές και καταρρέει.

Πυριτική παιπάλη

Η πυριτική παιπάλη, είναι άμορφη, μη κρυσταλλική, και αποτελείται κατά κύριο λόγο από διοξείδιο του πυριτίου. Είναι μια σκόνη πολύ λεπτή που συλλέγεται σαν παραπροϊόν της βιομηχανίας πυριτικών μετάλλων και σιδηροπυριτικών κραμάτων και αποτελείται από σφαιρικά σωματίδια με μέση διάμετρο σωματιδίων 150 nm. Αυτό την καθιστά περίπου 100 φορές μικρότερη από το μέσο όρο των σωματιδίων του τσιμέντου. Το κύριο εύρος χρησιμοποίησής της είναι ως ποζολανικό υλικό για σκυρόδεμα υψηλών επιδόσεων. Με την χρήση της πυριτικής παιπάλης στο σκυρόδεμα γίνεται μείωση της διαπερατότητας του σε ιόντα χλωρίου το συγκεκριμένο παρέχει ένα στρώμα προστασίας στον οπλισμό από την διάβρωση πιο συγκεκριμένα σε περιβάλλοντα με μεγάλη περιεκτικότητα σε χλωριόντα, όπως παραθαλάσσιες περιοχές ή ακόμα γέφυρες που βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Σκωρία υψικαμίνου

Ένα υποπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας κατά την τήξη του χάλυβα και του σιδήρου, η αλεσμένη κοκκώδης σκωρία υψικαμίνου χρησιμοποιείται συχνότερα στα προϊόντα τσιμέντου. Γνωστή και ως GGBS ή GGBFS, η ξηρή σκόνη παράγεται με την άλεση του προϊόντος που προκύπτει από τη διαβροχή της σκωρίας λιωμένου σιδήρου. Σκωρία είναι ο όρος που χρησιμοποιείται στα απόβλητα που παράγονται κατά τη διαδικασία τήξης του σιδήρου. Η αλεσμένη σκωρία υψικαμίνου και το συνηθισμένο τσιμέντο Πόρτλαντ (OPC) συνδυάζονται συνήθως για να σχηματίσουν δύο προϊόντα τσιμέντου. Από αυτά τα δύο προϊόντα, το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο είναι το Portland Last Furnace Cement (PBFC), το οποίο περιέχει περίπου το 30% της σκωρίας υψικαμίνου. Το εναλλακτικό προϊόν είναι γνωστό ως τσιμέντο υψηλής υψικαμίνου (HSBFC) και περιέχει υψηλότερη συγκέντρωση σκωρίας υψικαμίνου, συνήθως έως και 70%. Και τα δύο προϊόντα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή παρτίδων έτοιμου σκυροδέματος για δομικές εφαρμογές. Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα από τη χρήση αλεσμένης κοκκοποιημένης σκωρίας υψικαμίνου σε εφαρμογές έτοιμου σκυροδέματος. Αυτά τα πλεονεκτήματα είναι επιπρόσθετα της προφανούς περιβαλλοντικής βιωσιμότητας που μπορεί να αποκομιστεί από τη χρήση ενός δευτερογενούς αποβλήτου αντί για ένα υλικό πρωτογενούς πηγής. Η συμπερίληψη της σκωρίας υψικαμίνου βοηθά στην αποφυγή εισροής χλωρίου στη δομή του σκυροδέματος. Η είσοδος χλωρίου μπορεί να οδηγήσει σε προχωρημένη διάβρωση των εξαρτημάτων ενίσχυσης από χάλυβα – μια κατάσταση που είναι κοινώς γνωστή ως καρκίνος του σκυροδέματος. Από οικονομική

άποψη, η χρήση σκωρίας υψικαμίνου ως πρόσμιξης στο σκυρόδεμα είναι γενικά λιγότερο δαπανηρή από τα τυπικά μείγματα

Το προϊόν είναι επίσης ανθεκτικό στην προσβολή θεικών αλάτων και στην αντίδραση αλκαλίου-πυριτίου, τα οποία μπορούν να μειώσουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα μπορεί επίσης να είναι πιο ευχάριστο αισθητικά λόγω της λευκής εμφάνισης του σκληρυμένου προϊόντος σε σύγκριση με τον θαμπό γκρι χρωματισμό που παρέχεται από τα κανονικά μείγματα. Η συμπερίληψη αλεσμένης σκωρίας υψικαμίνου σε έτοιμο σκυρόδεμα σημαίνει ότι το προϊόν απαιτεί μεγαλύτερη περίοδο σκλήρυνσης – το χρονοδιάγραμμα που απαιτείται για το σκυρόδεμα να επιτύχει την αντοχή του.

2 Κίσηρη:

Η κίσηρη ή αλλιώς ελαφρόπετρα είναι ένα ηφαιστιογενές πέτρωμα όξινης σύστασης(πλούσιο σε SiO₂)χημικά αδρανές, που χαρακτηρίζεται από την παρουσία μεγάλου πορώδους.

Είναι το καταλληλότερο αδρανές από το οποίο μπορεί να γίνει παραγωγή ελαφροβαρών δομικών στοιχείων (κίσηρολίθων), ελαφροσκυροδέματος (δομικού και πληρώσεως) ελαφροβαρών προκατασκευασμένων στοιχείων και ελαφροβαρών μονωτικών επιχρισμάτων. Επειδή είναι ένα ισχυρό 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, δηλαδή πετρωμάτων που έχουν δημιουργηθεί από την σκλήρωση και την στεριοποίηση του μάγματος . Το μάγμα είναι φυσικό τήγμα που βρίσκεται 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 βασάλτης και οι περιδοτίτες. Συγκεκριμένα, ο ρυόλιθος προκύπτει ως έκτυση του γρανίτη. Έχει πορφυριτικό ιστό και αποτελείται από φαινοκρυστάλλους χαλαζία και σανιδίνου. Ο βιοτίτης και σπάνια η κερροσίλβη είναι αυτά που επικρατούν από τα φεμικά. Περλίτης είναι η ρυολιθική λάβα σφαιρικής μορφής με νερό σε ποσοστό 3-10%, ενώ αν η υφή είναι κίσηρώδης, πράγμα που οφείλεται στην διαφυγή πολλών αερίων, ονομάζεται κίσηρης. Η κίσηρης είναι όπως προαναφέρθηκε ένα χημικά αδρανές, πορώδες, ηφαιστειογενές ορυκτό. Η πορώδης μορφή του υλικού είναι άμεση συνέπεια των κενών που δημιουργούνται, ενώ ψύχεται η λάβα, από τον ατμό που διαφεύγει. Η ελαφρόπετρα στην Ελλάδα παράγεται εξ ολοκλήρου στο ορυχείο της νησίδας Γυαλί.

Φυσικά χαρακτηριστικά κίσηρης:

- το χαμηλό ειδικό βάρος
- το σταθερό και ομοιόμορφο χρώμα
- οι θερμομονωτικές και ηχοαπορροφητικές ιδιότητες
- η μεγάλη μηχανική αντοχή

2.1 Δομή κίσηροδέματος:

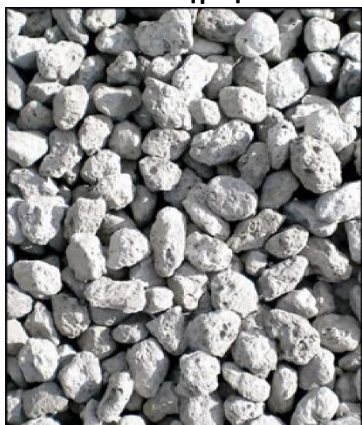
Οι μηχανικές ιδιότητες του κίσηροδέματος διαφοροποιούνται σημαντικά από αυτές του κανονικού σκυροδέματος. Η αιτία βρίσκεται στη δομή του όπως αυτή εξετάζεται σε μεσοσκοπική κλίμακα.

Θεωρώντας στην κλίμακα αυτή απλοποιητικά το σκυρόδεμα ως υλικό δύο φάσεων, δηλαδή ως αδρανή και τσιμεντόπαστα, τα αδρανή έχουν σημαντικά μεγαλύτερο μετρο ελαστικότητας και

αντοχή από τον τσιμεντοπολτό με συνέπεια να αναλαμβάνουν μεγαλύτερες τάσεις. Η κατάσταση αυτή παρουσιάζει μια ανομοιομορφία στην κατανομή των τάσεων καθώς αυτές αυξάνονται. Παράλληλα παρατηρούνται μικρορηγματώσεις στην διεπιφανειακή ζώνη μεταξύ της τσιμεντόπαστας και των αδρανών.

Από τη άλλη πλευρά στο κισσηρόδεμα, η κίσσηρη έχει αντοχές και μέτρο ελαστικότητας μικρότερα σε σχέση με την τσιμεντόπαστα με συνέπεια την αντίθετη κατανομή των τάσεων. Επιπλέον η διαφορά μεταξύ των δύο φάσεων δεν είναι τόσο μεγάλη όσο στο κανονικό σκυρόδεμα, έτσι η κατανομή των τάσεων παρουσιάζει μεγαλύτερη ομοιομορφία. Κατ' επέκταση η μικρορηγματώση στην επιφανειακή ζώνη είναι μικρότερη με συνέπεια να μην αποκλίνει η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων του υλικού από την ευθυγραμμία αλλά να αστοχεί απότομα και με μεγάλη ψαθυρότητα. Επίσης οι ρωγμές δεν διέρχονται μόνο από την διεπιφανειακή ζώνη αλλά έχουν την τάση να διαπερνούν και τα αδρανή. Το γεγονός αυτό σημαίνει λιγότερες και μεγαλύτερες ρωγμές δημιουργώντας επίπεδες επιφάνειες, σε αντίθεση με τις ρωγμές στο κανονικό σκυρόδεμα που είναι ακανόνιστες καθώς παρακάμπτουν τα σωματίδια των αδρανών που έχουν μεγαλύτερες αντοχές από την περιβάλλουσα τσιμεντόπαστα.

Κίσσηρη



Κισσηρόλιθος



3 Οπλισμένο σκυρόδεμα:

Οπλισμένο είναι το σκυρόδεμα που ενισχύεται με χαλύβδινο σκελετό.

Το τσιμέντο έχει την ιδιότητα να επικολλάται, κατά την σκλήρυνσή του στον χάλυβα, έτσι δημιουργείται ένα ενιαίο σώμα.

Το οπλισμένο σκυρόδεμα κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται σε φέρουσες κατασκευές, π.χ στον φέροντα οργανισμό των σύγχρονων κτιρίων. Επειδή το άοπλο σκυρόδεμα πρακτικά δεν έχει αντοχή στον εφελκυσμό, χρησιμοποιούμε τον χαλύβδινο οπλισμό ώστε αυτός να παραλάβει τις εφελκυστικές τάσεις καθώς η αντοχή του σε εφελκυσμό είναι υψηλή. Η συνεργασία των δύο υλικών στην ανάληψη των εξωτερικών φορτίων και δράσεων που καταπονούν την κατασκευή είναι δυνατή καθώς ισχύουν οι παρακάτω συνθήκες:

1. Μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας του οπλισμού και της επιφάνειας του σκυροδέματος που έρχονται σε επαφή δημιουργούνται δυνάμεις συνάφειας, οι οποίες έχουν σαν συνέπεια τα δύο υλικά να λειτουργούν σαν ένα σώμα. Για την αύξηση των δυνάμεων συνάφειας χρησιμοποιούμε χάλυβες με νευρώσεις. Ακόμη πρέπει ο οπλισμός να μην έχει σκουριά η οποία δημιουργεί περίβλημα στον οπλισμό και πρακτικά εξουδετερώνει τις τάσεις της συνάφειας. Σημειώνουμε εδώ ότι η αγκύρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα μέσω της συνάφειας, ενισχύεται με τα άγκιστρα στο άκρο του οπλισμού με εγκάρσια τεμάχια συγκολλητού δομικού πλέγματος ή ράβδους.
2. Το σκυρόδεμα και ο οπλισμός υφίστανται τις ίδιες παραμορφώσεις θερμικών συστολών, διαστολών, καθώς έχουν σχεδόν τον ίδιο συντελεστή θερμικής διαστολής α . Θυμίζουμε τον τύπο $\Delta l = \alpha \times L \times \Delta T$ όπου Δl είναι η μεταβλητού μήκους της ράβδου, μήκους L , της οποίας η θερμοκρασία μεταβάλλεται κατά ΔT . Ο συντελεστής θερμικής διαστολής για τον χάλυβα είναι 10×10^{-6} ανά $^{\circ}\text{C}$.

Το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει μεγάλη αντοχή σε θλίψη. Η συνεργασία οπλισμού - σκυροδέματος έχει επίσης τις εξής ευνοϊκές επιπτώσεις στην φυσική κατάσταση του υλικού: Ο οπλισμός επιδρά στον περιορισμό των ρηγμάτων που σημειώνονται στο σκυρόδεμα λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών. Επιπλέον μειώνει τα ρήγματα του σκυροδέματος λόγω συστολής πήξεως. Επίσης ο οπλισμός συντείνει στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας των θλιβομένων στοιχείων. Η ενίσχυση αυτή γίνεται με οπλισμό σε δύο κάθετες κατευθύνσεις: οπλισμό παράλληλο στην θλιπτική δύναμη και οπλισμό κάθετο στον προηγούμενο π.χ. στα υποστυλώματα όπου έχουμε τον διαμήκη οπλισμό και τους συνδετήρες. Ακόμη ο οπλισμός περιορίζει το εύρος των ρηγμάτων εφελκυσμού που παρατηρούνται στο σκυρόδεμα.

3.1 Ποιότητες χάλυβα οπλισμού-Χαρακτηριστικά:

Ο χάλυβας δεν είναι ένα μοναδικό προϊόν. Σήμερα υπάρχουν περισσότερα από 3.500 διαφορετικά είδη χαλύβων με πολύ διαφορετικές φυσικές, χημικές και περιβαλλοντικές ιδιότητες. Περίπου τα τρία τέταρτα των ειδών των χαλύβων δημιουργήθηκαν μόλις τα τελευταία είκοσι

χρόνια. Οι σύγχρονοι χάλυβες είναι πολύ πιο ανθεκτικοί σε σύγκριση με παλιότερες ποιότητες χαλύβων.

Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος οι οποίοι παράγονται σήμερα στην Ελλάδα όσο και διεθνώς, προέρχονται στο μεγαλύτερο μέρος τους από τήξη παλαιοσιδήρου (scrap) σε ηλεκτρικές καμίνους (Electric Arc Furnance).

Η ποιότητα των χαλύβων που παράγονται, εξαρτάται αρχικά από την καθαρότητα της πρώτης ύλης, η οποία όπως προαναφέρθηκε είναι κυρίως παλαιοσίδηρος. Με τον όρο καθαρότητα εννοείται το ποσοστό των υπολειμματικών στοιχείων όπως, ο χαλκός (Cu), το νικέλιο (Ni), ο κασσίτερος (Sn), το κοβάλτιο (Co), το αντιμόνιο (Sb), το αρσενικό (As), το βολφράμιο (W) και το μολυβδαίνιο (Mo) τα οποία δεν απομακρύνονται πλήρως κατά την τήξη και κατά συνέπεια ο περιορισμός του ποσοστού τους στο τελικό προϊόν εξασφαλίζεται κυρίως με την κατάλληλη επιλογή πρώτης ύλης. Άλλα κραματικά στοιχεία, όπως το χρώμιο (Cr), το θείο (S), ο φώσφορος (P), το μαγγάνιο (Mn), το άζωτο (N), και το υδρογόνο (H) ελέγχονται έως ενός ορισμένου σημείου, ενώ στοιχεία όπως ο ψευδάργυρος (Zn) εξατμίζονται και απομακρύνονται κατά την διάρκεια της τήξης. Εκτός από τα στοιχεία τα οποία προέρχονται από την πρώτη ύλη υπάρχουν και άλλα στοιχεία τα οποία προέρχονται από την ίδια τη μεταλλουργική επεξεργασία όπως το ασβέστιο (Ca), το μαγνήσιο (Mg), το πυρίτιο (Si) και το αλουμίνιο (Al).

Φωτογραφία συνεχούς τροφοδοσίας scrap





Ηλεκτρικός κλίβανος τόξου(ELECTRIC ARC FURNACE)

Οι χάλυβες διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με την χημική τους σύσταση, την περαιτέρω κατεργασία τους, την κρυσταλλική τους δομή ή και την τελική τους χρήση.

Ως προς την χημική τους σύσταση, οι χάλυβες ταξινομούνται ως εξής:

- **Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες** . Περιέχουν άνθρακα (έως 2,06%) και μικρό ποσοστό μαγγανίου (έως 1,65%), πυριτίου (έως 0,6%) και χαλκού (έως 0,6%). Χρησιμοποιούνται πολύ και συγκολλούνται εύκολα.
- **Κραματωμένοι χάλυβες** , δηλαδή κράματα σιδήρου με άλλα μέταλλα σε σημαντική περιεκτικότητα.

Η ονοματολογία των χαλύβων γίνεται σύμφωνα με διάφορα συστήματα τυποποίησης όπως DIN, ASTM, ΕΛΟΤ κ.λπ. Συχνά υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στο όνομα μιας κατηγορίας χάλυβα και την αντοχή της συγκεκριμένης κατηγορίας χάλυβα σε εφελκυσμό. Για παράδειγμα, το πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3 ορίζει ότι ο χάλυβας B500C πρέπει να έχει όριο διαρροής μεγαλύτερο από 500 MPa.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τις κατηγορίες χάλυβα σύμφωνα με τις ελληνικές προδιαγραφές.

Κατηγορία χάλυβα	Προδιαγραφή	Ελάχιστο όριο διαρροής [MPa]	Περίοδος χρήσης (Δεκαετίες)
S220	ΕΛΟΤ 956	220	έως '60
S400	ΕΛΟΤ 956	400	'60 έως '90
S400s	ΕΛΟΤ 971	400	αρχές '90
S500	ΕΛΟΤ 956	500	αρχές '90
S500s	ΕΛΟΤ 971	500	αρχές '90
B500A	ΕΛΟΤ 1421	500	από τέλη 2006
B500C	ΕΛΟΤ 1421	500	από τέλη 2006

3.1.1 Τύποι χαλύβων οπλισμού στην Ελλάδα

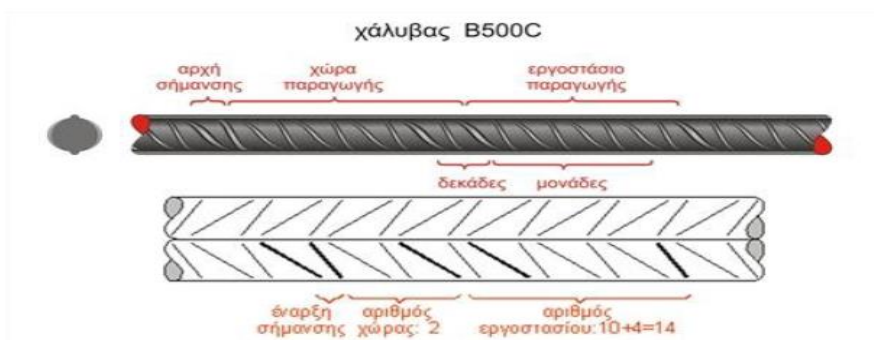
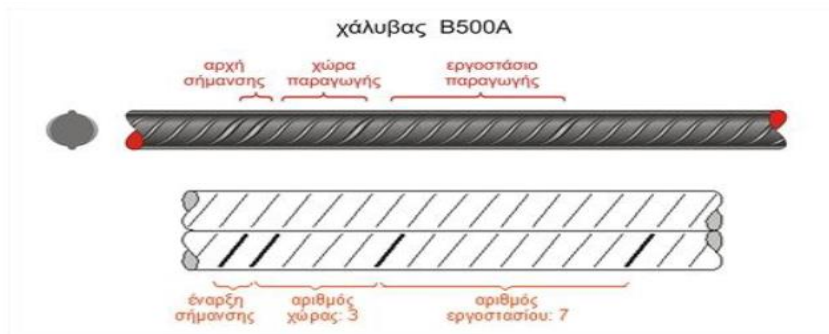
Νευροχάλυβας (ή χάλυβας υψηλής συνάφειας) S500 ή S500s. Παράγεται με θερμή έλαση και οφείλει την αντοχή του στη χημική του σύνθεση, δηλ. στα αυξημένα ποσοστά Mn και V (όπως δηλ. και ο S220). Έχει τη μορφή ευθύγραμμων ράβδων, με νευρώσεις στην επιφάνεια για λόγους συνάφειας με το σκυρόδεμα. Έρχεται στο εμπόριο συνήθως σε μήκη 14m (ο εγχώριος) ή 12m (ο εισαγόμενος) και σε διαμέτρους από 8mm έως 25mm. Οι ονομαστικές διάμετροι είναι 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28 και 32mm, αλλά γενικά είναι διαθέσιμες στην Ελλάδα οι διάμετροι από 8 έως 20mm. Στην Ευρωπαϊκή αγορά είναι σπανιότερες οι διάμετροι 18, 22 και 28mm, αλλά χρησιμοποιούνται συχνά οι Φ25, Φ32 και Φ40. Η ονομαστική τάση διαρροής είναι 500MPa. Ο χάλυβας S500s, που παράγεται σήμερα και στην Ελλάδα, είναι "συγκολλησιμος χωρίς προϋποθέσεις" και είναι τύπου Tempcore, δηλ. οφείλει την υψηλότερη αντοχή του σε ειδική θερμική κατεργασία μετά τη θερμή εξέλασή του. Η κατεργασία αυτή δημιουργεί στη ράβδο ένα εξωτερικό στρώμα πολύ υψηλότερης αντοχής από τον πυρήνα, εξαιτίας του οποίου βελτιώνεται η μέση αντοχή της διατομής της ράβδου.

Συγκολλητά δομικά πλέγματα χάλυβα S500 (παραδοσιακή ονομασία: χάλυβας κατηγορίας IVb ή StIVb). Έχει ονομαστική τάση διαρροής 500MPa. Οφείλει την αυξημένη αντοχή του σε ψυχρή κατεργασία (όλκηση συρματοποίηση). Έρχεται στο εμπόριο με τη μορφή πλέγματος (εσχάρας) ράβδων μικρής διαμέτρου με ή (συνήθως) χωρίς νευρώσεις, διαστάσεων 2,15m x 5,0m συνήθως. Οι ράβδοι της κάθε διεύθυνσης είναι ηλεκτροσυγκολλημένες στις εγκάρσιες και έχουν την ίδια ή διαφορετική απόσταση και στις δύο διευθύνσεις, δημιουργώντας αντίστοιχα τετραγωνικά ή ορθογωνικά ανοίγματα. Στην Ελλάδα τα

συγκολλητά δομικά πλέγματα χρησιμοποιούνται κυρίως σε ελαφρά οπλισμένα δάπεδα που εδράζονται στο έδαφος, σε οδοστρώματα, δεξαμενές, προκατασκευασμένους σωλήνες, τοίχους αντιστήριξης και περιμετρικά τοιχώματα υπογείων, σε πλάκες οικοδομών, κ.α. Έχουν υψηλότερο κόστος υλικού αλλά επιτρέπουν σημαντική οικονομία σε εργατικά τοποθέτησης. Για το λόγο αυτό στις περισσότερες αναπτυγμένες οικονομικά χώρες τα πλέγματα χρησιμοποιούνται ευρύτατα σαν οπλισμός πλακών, παρόλο που απαιτείται έτσι μεγαλύτερη ποσότητα χάλυβα ανά μονάδα όγκου σκυροδέματος. Ο τύπος 0 είναι "ορθογωνικός", δηλ. έχει διαφορετική διατομή και/ή αποστάσεις ράβδων στις δύο διευθύνσεις. Ο αριθμός που χαρακτηρίζει το κάθε πλέγμα είναι η διατομή του οπλισμού στη διαμήκη διεύθυνση (αυτήν με τον περισσότερο οπλισμό) σε mm^2/m .

Στην Ελλάδα, σε πρακτικό κυρίως επίπεδο, ο μόνος χάλυβας που επιτρέπεται να χρησιμοποιείται για τον οπλισμό έργων από σκυρόδεμα, είναι η κατηγορία B500c και για τα δομικά πλέγματα ο χάλυβας B500A. Ο χάλυβας B500c, είναι η βελτίωση του χάλυβα S500s, όχι τόσο σε αντοχή (που παραμένει η ίδια 500MPa) όσο σε αυξημένη ολκιμότητα και συγκολλησιμότητα.

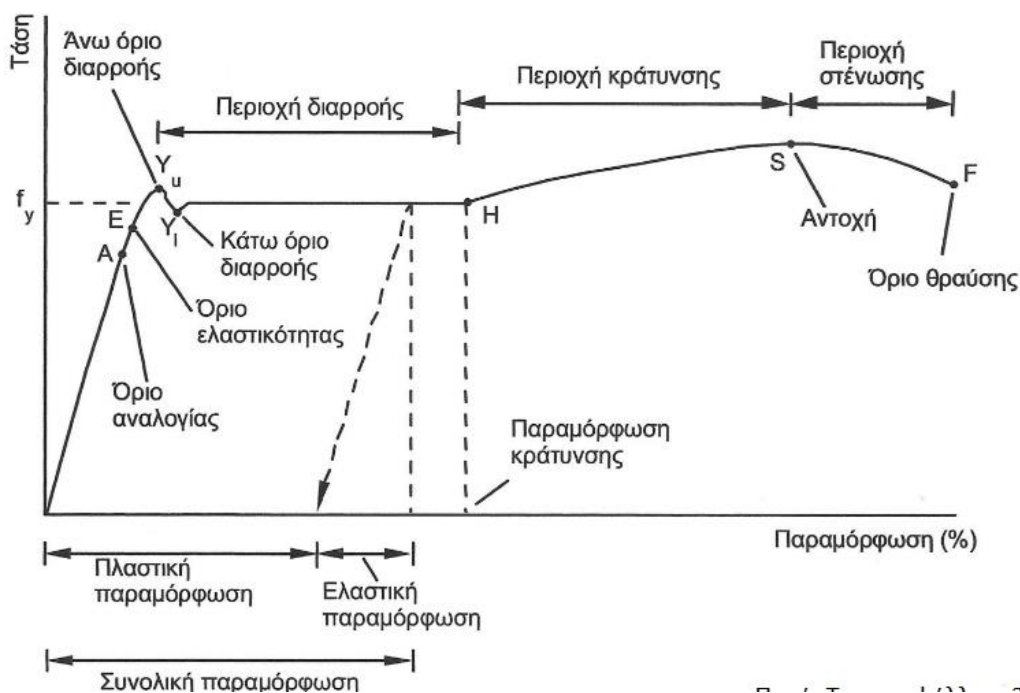
Παράδειγματα σήμανσης για την αναγνώριση της χώρας και της μονάδας παραγωγής χάλυβα κατηγορίας B500A και B500C αντίστοιχα.



Για τους υπολογισμούς της αντοχής και τη διαστασιολόγηση μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα, ο Ευρωκώδικας 2 δέχεται για το χάλυβα ένα απλοποιημένο ελαστοπλαστικό διάγραμμα σ - ϵ , με ευθύγραμμο κλάδο μετά τη χαρακτηριστική τάση διαρροής, f_{yk} , ο οποίος τερματίζεται στην παραμόρφωση ϵ_{uk} στη μέγιστη τάση που λαμβάνεται σαν όριο αστοχίας του χάλυβα. Εναλλακτικά ο Ευρωκώδικας 2 υιοθετεί ένα λιγότερο απλό διγραμμικό διάγραμμα, με κρατυνόμο κλάδο

που ενώνει το σημείο διαρροής, σε τάση και παραμόρφωση f_{yk} και $f_{yk}/E_{santistoiha}$, και το σημείο της μέγιστης τάσης, f_{tk} , σε παραμόρφωση.

Υπολογιστικό διαγράμμα σ-ε χάλυβα κατά τον Ευρωκώδικα 2



3.1.2 Επιφάνεια και διάμετροι των ράβδων:

Υπάρχουν λείες ράβδοι και ράβδοι με νευρώσεις.

- Οι λείες ράβδοι έχουν κυκλική διατομή σταθερή s' όλο τους το μήκος, και έχουν διάμετρο από 6 mm ως 32 mm, ανά δύο χιλιοστά. Διατίθενται σε ρολούς για διαμέτρους μέχρι $\varnothing 12$ mm, σε δέματα γι' όλες τις μεγαλύτερες διαμέτρους, και σε επιμήκειες ράβδους μήκους 12 ως 14 m κατόπιν παραγγελίας.
- Οι ράβδοι με νευρώσεις έχουν ανάγλυφες νευρώσεις βάσει ειδικών προδιαγραφών. Αυτοί είναι χάλυβες υψηλής συνάφειας και υψηλής ποιότητας. Έχουν διάμετρο από 8 mm ως 26 mm, ανά δύο χιλιοστά.

Με νευρώσεις



Λείες



3.1.3 Διαχωρισμός χαλύβων σύμφωνα με την μέθοδο παραγωγής:

Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος διακρίνονται ως εξής, σύμφωνα με την μέθοδο παραγωγής:

- Θερμής έλασης, χωρίς καμία άλλη περαιτέρω θερμική ή θερμομηχανική κατεργασία οποιασδήποτε μορφής
- Θερμής έλασης, που ακολουθείται από μια άμεση εν σειρά διαδικασία θερμικής κατεργασίας. Από τα μέσα της δεκαετίας του 90' κυκλοφορούν σχεδόν αποκλειστικά χάλυβες που είναι γνωστοί ως Tempcore, Thermex κτλπ.
- Ψυχρής κατεργασίας, με ολκή ή έλαση του αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμή έλαση ή με στρέψη του αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμή έλαση ή με συνδιασμό των παραπάνω.

3.1.4 Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα:

Ιδιότητες σε εφελκυσμό

Τα υποχρεωτικά όρια των μηχανικών χαρακτηριστικών σε εφελκυσμό των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Για το όριο διαρροής f_y οι αναφερόμενες στον πίνακα τιμές είναι χαρακτηριστικές ποσοστημορίου 95%. Για την συνολική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο, ϵ_u , για τον λόγο f_t/f_y και για τον λόγο $f_{yact}/f_{y, nom}$ οι αναφερόμενες στον πίνακα τιμές είναι χαρακτηριστικές ποσοστημορίου 90%

Οι τιμές των f_y και f_t υπολογίζονται με βάση την ονομαστική διατομή.

Ιδιότητα	Τεχνική κατηγορία ποιότητας	
	B500A	B500C
Όριο διαρροής, f_y (MPa)	≥500	≥500
Λόγος της πραγματικής προς την ονομαστική τιμή του ορίου διαρροής, $f_{y,act}/f_{y,nom}$	-	≤1.25
Λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής, f_t/f_y	≥1.05 (≥1.03 για $d < 6\text{mm}$)	≥1.15 ≤1.35
Συνολική ανηγμένη παραμόρφωση (επιμήκυνση) στο μέγιστο φορτίο ϵ_{uk} (%)	≥2.5 (≥2 για $d < 6\text{mm}$)	≥7.5

Αντοχή σε διάτμηση

Για τα δομικά πλέγματα το Πρότυπο του ΕΛΟΤ EN 10080 ορίζει ότι η αντοχή σε διάτμηση των σημείων συγκόλλησης των διασταυρούμενων ράβδων πρέπει να ικανοποιεί την σχέση

$$F_s \geq 0,25 f_{ypl} m A$$

Όπου f_{ypl} η ονομαστική τιμή του ορίου διαρροής του χάλυβα σπλισμού (500MPa)

A η ονομαστική διάμετρος ράβδου με την μεγαλύτερη ονομαστική διάμετρο

Ωστόσο σύμφωνα με τον Ευροκώδικα EN 1992-1-1/2005 ο συντελεστής διάτμησης για τα δομικά πλέγματα ορίζεται τουλάχιστον 0,30.

Συμπεριφορά σε κόπωση

Γενικώς σύμφωνα με τα πρότυπα ΕΛΟΤ 10080 και ΕΛΟΤ 1421-3, οι χάλυβες σπλισμού σκυροδέματος θα πρέπει να αντέχουν σε ένα συγκεκριμένο πλήθος κύκλων επαναλαμβανόμενης αξονικής εφελκυστικής καταπόνησης με τάσεις κυμαινόμενες από σ_{min} - σ_{max} ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενες με έυρος διακυμανσης:

$$2\sigma_A = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

Ο έλεγχος κόπωσης εφαρμόζεται μόνο στους χάλυβες κατηγορίας B500C.

Οι ράβδοι σπλισμού σκυροδέματος κατηγορίας B500C πρέπει να αντέχουν σε δοκιμή κόπωσης $2 \cdot 10^6$ κύκλους φόρτισης με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μέγιστη τάση $\sigma_{max} = 300 \text{ MPa}$.
- Έυρος διακύμανσης τάσεων $2\sigma_A = 150 \text{ MPa}$.
- Η συχνότητα μεταβολής του φορτίου θα είναι μικρότερη ή ίση με 200Hz.

Οι ηλεκτροσυγκολλημένες ράβδοι και τα πλέγματα κατηγορίας B500C πρέπει να αντέχουν σε δοκιμή κόπωσης $2 \cdot 10^6$ κύκλους φόρτισης με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μέγιστη τάση $\sigma_{max} = 300 \text{ MPa}$.
- Έυρος διακύμανσης τάσεων $2\sigma_A = 150 \text{ MPa}$.
- Η συχνότητα μεταβολής του φορτίου θα είναι μικρότερη ή ίση με 200Hz.
- Το δοκίμιο θα φέρει υποχρεωτικά και τμήμα εγκάρσιας ηλεκτροσυγκολλημένης ράβδου, ελάχιστου μήκους $5d_{trans}$ εκατέρωθεν της συγκόλλησης, όπου d_{trans} η ονομαστική διάμετρος της εγκάρσιας συγκολλημένης ράβδου.

3.1.5 Φυσικά χαρακτηριστικά:

Οι φυσικές ιδιότητες των ελαφρά κραματωμένων ή μη κραματωμένων χαλύβων χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, όπως είναι οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος, είναι παραπλήσιες με εκείνες του καθαρού σιδήρου. Οι τιμές που δίνονται παρακάτω αφορούν τον καθαρό σίδηρο, εκτός από τις περιπτώσεις που αναφέρονται ρητά στους χάλυβες, και δύνανται να χρησιμοποιηθούν για τους υπολογισμούς που αφορούν τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος.

Μέτρο ελαστικότητας E

Σε θερμοκρασία 20 βαθμών Κελσίου η τιμή που λαμβάνεται υπ όψη είναι 200GPa.

Έχουν μετρηθεί τιμές έως 210GPa.

Το μέτρο ελαστικότητας E, επιρεάζεται από την θερμοκρασία απομειούμενο σημαντικά για υψηλές θερμοκρασίες. Ενδεικτικές τιμές δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

T σε °C	20	200	425	550	650
E σε GPa	200	185	155	135	125

Μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση G και μέτρο διογκωσης K

Το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση λαμβάνεται 80GPa και το μέτρο διογκωσης 165GPa.

Λόγος Poisson, ν

Για πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιείται η τιμή 0,30.

Συγκολλησιμότητα

Συγκολλησιμότητα είναι η ικανότητα ενός μετάλλου να συγκολλάται από προδιαγεγραμμένες συνθήκες, έτσι ώστε η προκύπτουσα σύνδεση να ικανοποιεί τις απαιτήσεις σχεδιασμού.

Οι χάλυβες διακρίνονται ως προς την συγκολλησιμότητά τους στις εξής κατηγορίες σύμφωνα με τον KTX-2000:

- Συγκολλησίμους, των οποίων η συγκολλησιμότητα εξασφαλίζεται από την χημική σύστασή τους.
- Συγκολλησίμους υπό προϋποθέσεις, των οποίων η συγκολλησιμότητα μπορεί να εξασφαλιστεί με κατάλληλο σχεδιασμό και ελέγχεται με ειδικές δοκιμές.

Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος B500A και B500C που ορίζονται από τα Πρότυπα ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3 αντιστοίχως είναι συγκολλησιμοι.

Στις υφιστάμενες κατασκευές ενδέχεται να υπάρχουν επίσης:

- Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος S500s και S400s οι οποίοι είναι συγκολλησιμοι.
- Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος B500, S400 και S220 καθώς και οι StI και StIIIa οι οποίοι είναι συγκολλησιμοι υπο προϋποθέσεις.
- Ελικοχάλυβας, ο οποίος πρακτικά δεν συγκολλάται, εκτός αν υπάρχει κατάλληλος ειδικός σχεδιασμός.

Συμπεριφορά σε ακραίες θερμοκρασίες

Για του χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος ως ακραίες μπορούν να θεωρηθούν θερμοκρασίες κάτω των 0 βαθμών Κελσίου και μεγαλύτερες των 200 βαθμών Κελσίου. Στις περιοχές ακραίων θερμοκρασιών ενδέχεται να υπάρξουν μεταβολές των μηχανικών χαρακτηριστικών των χαλύβων αλλά και του σκυροδέματος και της συνάφειάς του με τον οπλισμό. Με την επάνοδο των χαλύβων στην θερμοκρασία περιβάλλοντος ορισμένες από τις μεταβολές είτε παραμένουν είτε αίρονται μερικώς η ολικώς.

Οι ιδιότητες που επηρεάζονται με την μεταβολή της θερμοκρασίας είναι κυρίως το όριο διαρροής η εφελκυστική αντοχή και η παραμόρφωση.

Η συμπεριφορά των χαλύβων σε ακραίες θερμοκρασίες επηρεάζεται απο:

- Τη θερμοκρασία έκθεσης.
- Τον χρόνο έκθεσης.
- Τη χημική σύσταση και τη μέθοδο παραγωγής.

Έκθεση χαλύβων σε χαμηλές θερμοκρασίες

Κατά τη έκθεση των χαλύβων σε χαμηλές θερμοκρασίες μειώνεται η παραμόρφωση θραύσης(ψαθυροποίηση του υλικού) ενώ δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές του ορίου διαρροής και της εφελκυστικής αντοχής.

Γενικώς για τους χάλυβες, η μετάπτωση από όλκιμη σε ψαθυρή θραύση παρατηρείται σε θερμοκρασίες μικρότερες των 0 βαθμών Κελσίου. Ειδικότερα, για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος B500A και B500C η θερμοκρασία μετάπτωσης είναι μικρότερη από τους -30 βαθμούς Κελσίου. Η παραπάνω μεταβολή είναι ανεξάρτητη του χρόνου έκθεσης.

Οι μεταβολές που αναφέρονται ανωτέρω αίρονται μετά την επάνοδο των χαλύβων σε συνήθεις θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Έκθεση χαλύβων σε υψηλές θερμοκρασίες

Οι αντοχές και το μέτρο ελαστικότητας των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος μειώνονται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία έκθεσης. Οι μειώσεις είναι σχετικά μικρές για εκθέσεις σε θερμοκρασίες μέχρι 200 βαθμούς Κελσίου και γίνονται μεγαλύτερες για υψηλότερες θερμοκρασίες, φτάνοντας σε μείωση έως και 60% των αρχικών τιμών για θερμοκρασία 600 βαθμών Κελσίου. Σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες η γραμμική παρεμβολή δίδει ικανοποιητική προσέγγιση.

Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 600 βαθμών Κελσίου ο ρυθμός μείωσης της αντοχής αυξάνεται ενώ λόγω και των υπόλοιπων μεταβολών που θα συμβούν στον χάλυβα και στο σκυρόδεμα (μείωση συνάφειας με το σκυρόδεμα, μεταβολές μικρογραφικής μορφής κτλπ) είναι πιθανό να προκληθούν σοβαρές βλάβες σε στοιχεία τις κατασκευής.

Για πολύ μεγάλους χρόνους έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες είναι δυνατόν να παρατηρηθούν και άλλα φαινόμενα (πχ ερπυσμος). Για τους χάλυβες που είναι αντικείμενο του ΚΤΧ-2000 η έκθεση σε θερμοκρασίες μέχρι 200 βαθμών Κελσίου δεν δημιουργεί πρακτικώς φαινόμενα ερπυσμού. Όσο όμως οι θερμοκρασίες και οι επιβαλλόμενες τάσεις αυξάνονται το φαινόμενο του ερπυσμού γίνεται εντονότερο.

Χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα:

Χαρακτηριστική αντοχή f_{yk} , ονομάζεται η τιμή του ορίου αντοχής κάτω της οποίας ενδέχεται να βρεθεί το 5% των τιμών του ορίου διαρροής του υπόψη χάλυβα. Δηλαδή αν στον υπ' όψη χάλυβα πάρουμε 100 δείγματα και τα υποβάλλουμε σε έλεγχο αντοχής διαρροής, τα 95 δείγματα θα έχουν τουλάχιστον τη συγκεκριμένη τιμή, ενώ τα 5 δεν θα μπορέσουν να πιάσουν την τιμή αυτή.

3.1.6 Ελάχιστες επικαλύψεις του οπλισμού με σκυρόδεμα και ελάχιστες αποστάσεις οπλισμού:

Το σκυρόδεμα πρέπει να περιβάλλει τον οπλισμό υποχρεωτικά γύρω από όλη την επιφάνεια του οπλισμού για δύο λόγους.

1. Με την επικάλυψη του χάλυβα από το σκυρόδεμα προστατεύεται ο χάλυβας από την σκουριά η οποία τον διαβρώνει, μειώνει την διατομή του και ο οπλισμός δεν μπορεί να παραλάβει τις δυνάμεις για τις οποίες είχε γίνει πρόβλεψη, με την στατική μελέτη. Δευτερευόντως η σκουριά δρα σαν περίβλημα το οποίο εμποδίζει την επαφή των υλικών χάλυβα-σκυροδέματος, και πρακτικά εξουδετερώνει την συνολική δύναμη συνάφειας που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο υλικών.

2. Όταν το σκυρόδεμα περικλείει τον χάλυβα με την ελάχιστη επικάλυψη, τότε στην επιφάνεια επαφής των δύο υλικών, του χάλυβα και του σκληρυμένου σκυροδέματος, αναπτύσσονται φυσικοχημικές τάσεις συνάφειας, οι οποίες κρατούν τα δύο υλικά κολλημένα μεταξύ τους και τα αναγκάζουν να συνεργάζονται πρακτικά σαν ένα σώμα.

Η ύπαρξη της συνάφειας είναι θεμελιώδης για την συνεργασία των δύο υλικών. Πρακτικά χωρίς την συνάφεια των δύο υλικών δεν υπάρχει οπλισμένο σκυρόδεμα. Για την αύξηση των δυνάμεων συνάφειας χρησιμοποιούμε χάλυβες με νευρώσεις ώστε να αυξηθεί η επιφάνεια επαφής σκυροδέματος οπλισμού. Σημειώνουμε εδώ ότι η αγκύρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα μέσω της συνάφειας, ενισχύεται με τα άγκιστρα στο άκρο του οπλισμού ή σε ενδιάμεσα σημεία με εγκάρσια τεμάχια συγκολλητού δομικού πλέγματος ή ράβδους.

Κατά την διάστρωση του νωπού σκυροδέματος στα καλούπια όπου ήδη υπάρχει τοποθετημένος ο χαλύβδινος οπλισμός, παρουσιάζονται συνθήκες οι οποίες μπορεί να επιδράσουν στην ποιότητα του σκυροδέματος.

Υπάρχουν περιοχές οι οποίες δημιουργούν στενώσεις, δηλαδή δύσκολα <<περάσματα>>

- Μεταξύ των ράβδων του οπλισμού
 - Μεταξύ των ράβδων και των καλουπιών (τύπων)
 - Στις εξωτερικές και εσωτερικές δίεδρες γωνίες των καλουπιών όπου πάντα υπάρχει οπλισμός.
- Εκεί το σκυροδέμα πρέπει να διαστρωθεί χωρίς να υποστεί οποιαδήποτε μεταβολή στην σύνθεσή του. Αυτό σημαίνει ότι δεν θα δημιουργηθούν κενά αέρος τα οποία δημιουργούν μετέπειτα πόρους. Οι πόροι σε επαφή με τον οπλισμό αφ ενός μειώνουν την συνάφεια, αφ ετέρου διευκολύνουν, αν υπάρχουν δίοδοι, την είσοδο της υγρασίας και διαβρωτικών παραγόντων. Το μειονέκτημα αυτό, εξουδετερώνεται με την σωστή συμπίκνωση του σκυροδέματος που εκτελείται στην διάρκεια της διάστρωσης με τη βοήθεια δονητών. Κατά την τοποθέτηση του οπλισμού προβλέπονται αποστάσεις των ράβδων τέτοιες που να χωράει δονητής ανάμεσα τους. Επίσης στις περιοχές όπου υπάρχει στένωση, πρέπει η απόσταση των ράβδων μεταξύ τους να είναι τέτοια ώστε κατά το χρόνο διάστρωσης του σκυροδέματος να μην γίνει οποιαδήποτε απόμειξη του υλικού π.χ. οι μεγαλύτεροι κόκκοι των αδρανών να εισχωρούν ανεμπόδιστα μεταξύ των ράβδων, στην εξωτερική επιφάνεια ή στις γωνίες, να μην «φρακάρουν» δηλαδή. Έτσι επιτυγχάνουμε σε όλες τις περιοχές του σκυροδέματος να υπάρχει η προβλεπόμενη σύνθεση των αδρανών, όπως αυτή είχε προβλεφθεί από την κοκκομετρική ανάλυση

Δόνηση σκυροδέματος



Για να εξασφαλισθεί η σωστή συμπίκνωση και σκυροδέτηση οι κανονισμοί προβλέπουν :

1. Τις ελάχιστες επικαλύψεις του οπλισμού από το σκυρόδεμα. Ήδη επισημάνθηκε ότι για να λειτουργήσει η συνάφεια χρειάζεται μία ελάχιστη επικάλυψη του οπλισμού.
2. Τις ελάχιστες αποστάσεις που έχουν οι ράβδοι του οπλισμού μεταξύ τους στα θεμέλια, δοκούς, πλάκες υποστυλώματα και γενικά σε όλη την κατασκευή.

Ελάχιστες επικαλύψεις: Βάσει των ισχυόντων κανονισμών ορίζονται 4 κατηγορίες συνθηκών περιβάλλοντος :

- κατηγορία 1 : Ελάχιστα διαβρωτικό περιβάλλον.
- κατηγορία 2 : Μέτρια διαβρωτικό περιβάλλον.

- κατηγορία 3 : Παραθαλάσσιο περιβάλλον, παραθαλάσσιες περιοχές σε απόσταση 1 km από την ακτή, ή υποθαλάσσια έργα.
 - κατηγορία 4 : Πολύ διαβρωτικό περιβάλλον. Βιομηχανικές ζώνες, χώροι με υψηλή περιεκτικότητα σε χημικά προϊόντα (αέρια, υγρά, ξηράς μορφής)
- Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ οποιουδήποτε οπλισμού και της πλησιέστερης επιφάνειας σκυροδέματος (επικάλυψη), δίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Τιμές c_{min}				Διόρθωση για:		
Κατηγορία συνθηκών περιβάλλοντος				Πλάκες ή κελύφη	Προτανωόμενους τένοντες	Προεντεταμένους τένοντες
1	2	3	4	-5	+5	+10
20	25	30	30-45*			

* Αναλόγως της διαβρωτικότητας του μέσου. Για προσβολή κατά την παρ.12.4 του Κ.Τ.Σ. ισχύει $c_{min} = 30,35,40$ και 45mm για ασθενή, μέτριο, ισχυρό και πολύ ισχυρό βαθμό προσβολής, αντιστοίχως.

* Ανάλογα της διαβρωτικότητας του μέσου

Η επικάλυψη δεν μπορεί να είναι μικρότερη από 15 mm.

Για απ' ευθείας σκυροδέτηση στο έδαφος το ελάχιστο 75 mm.

Για απ' ευθείας σκυροδέτηση σε διαμορφωμένο έδαφος 40 mm.

Ελάχιστες αποστάσεις ράβδων οπλισμού: Η καθαρή απόσταση μεταξύ δύο παραλλήλων οπλισμών (εκτός των ενώσεων) πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση:

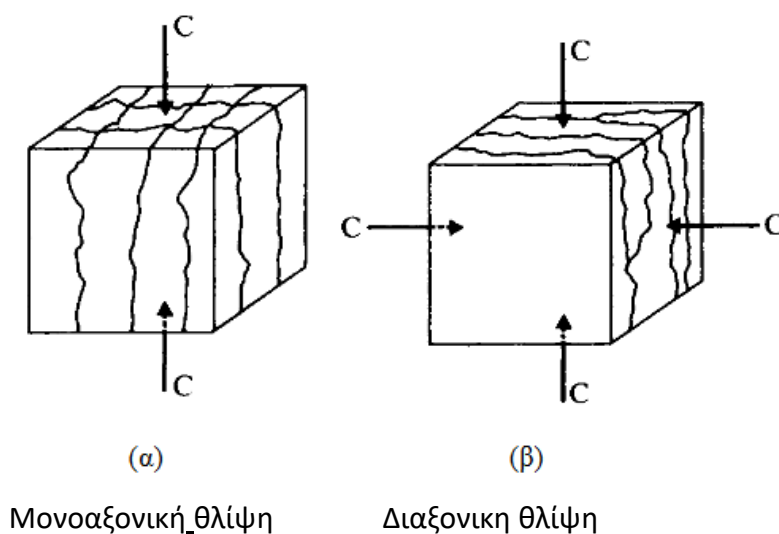
- με 20 mm
- την μεγαλύτερη διάμετρο από τις δύο ράβδους

Όταν οι ράβδοι τοποθετούνται σε περισσότερες από μία οριζόντιες στρώσεις, τότε πρέπει να τοποθετούνται η μία επάνω από την άλλη, στον ίδιο κατακόρυφο άξονα. Μεταξύ τους οι οριζόντιες στρώσεις έχουν αποστάσεις όπως ορίστηκε πιο πάνω. Εξαίρεση των καθαρών αυτών αποστάσεων γίνεται στις ράβδους με υπερκάλυψη στην περιοχή της ένωσης όπου μπορεί η μία να εφάπτεται με την άλλη. Σε παλαιότερες οδηγίες της CEB*, στην καθαρή απόσταση μεταξύ ράβδων οριζόντιας στρώσης, υπήρχε και τρίτος όρος ότι η απόσταση αυτή πρέπει να είναι 1.5 φορά το μέγιστο μέγεθος κόκκου των αδρανών, ώστε να μπορεί να διαστρωθεί το σκυρόδεμα μεταξύ των ράβδων. Για την καθαρή απόσταση μεταξύ ράβδων που βρίσκονται στον ίδιο κατακόρυφο άξονα σαν τρίτος όρος υπήρχε και το μισό του μέγιστου κόκκου των αδρανών.

4 Θλίψη σκυροδέματος:

Η δοκιμή σε θλίψη αποτελεί την πιο κοινή ίσως δοκιμή για το σκυρόδεμα, κυρίως λόγω του ότι είναι απλή στη διεξαγωγή της. Επίσης η αντοχή σε θλίψη είναι ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος απαραίτητο για κάθε υπολογισμό. Γενικά χρησιμοποιούνται δοκίμια μικρού μεγέθους για πρακτικούς λόγους. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ενδέχεται να επηρεαστούν από διάφορους άλλους δευτερογενείς παράγοντες πέρα από το μέγεθος του δοκιμίου, όπως ο ρυθμός επιβολής του φορτίου, η υγρασία ή ακόμα και το μηχάνημα στο οποίο γίνεται η δοκιμή και οι επιβαλλόμενες συνθήκες φόρτισης και παραμόρφωσης στα σημεία επιβολής του φορτίου

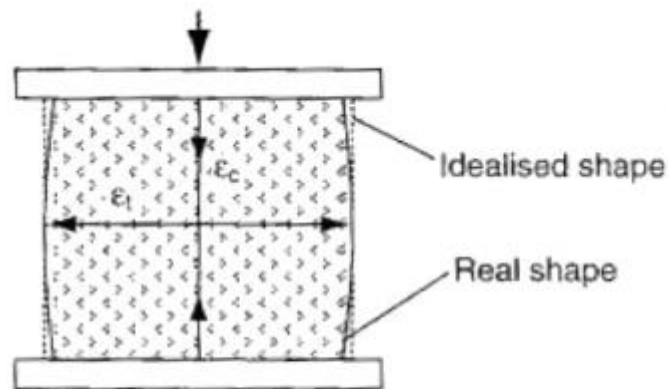
Στη συνέχεια απεικονίζονται οι μορφές θραύσης κυβικού δοκιμίου υπό μονοαξονική και διαξονική θλίψη.



Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της μονοαξονικής θλίψης σχηματίζονται ρωγμές κυρίως παράλληλες με τα επιβαλλόμενα φορτία. Οι ρωγμές σχηματίζουν επίπεδα κάθετα μεταξύ τους και τελικά το δοκίμιο αστοχεί σχηματίζοντας κολονάκια. Αντίθετα στην περίπτωση της διαξονικής θλίψης σχηματίζονται ρωγμές παράλληλες στο επίπεδο που ορίζουν οι δύο φορτίσεις και το δοκίμιο αστοχεί με τον σχηματισμό πλακοειδών στοιχείων. Στην περίπτωση της τριαξονικής θλίψης έχουμε αστοχία λόγω σύνθλιψης και το σκυρόδεμα δεν συμπεριφέρεται πλέον ψαθυρά. Στις πραγματικές δοκιμές όμως οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων είναι διαφορετικές. Αυτό οφείλεται κυρίως στην επαφή του δοκιμίου με τις μεταλλικές πλάκες της μηχανής στην οποία γίνεται η δοκιμή. Το σκυρόδεμα κατά τη θλίψη παραμορφώνεται εγκάρσια περισσότερο από τις

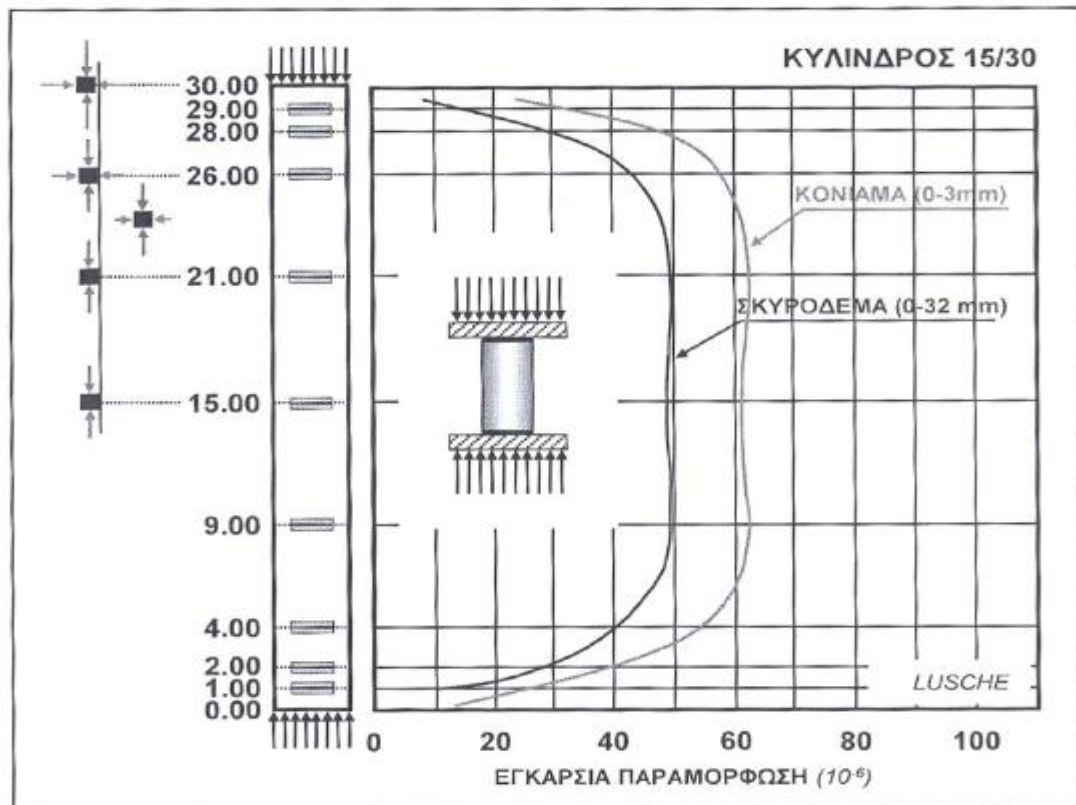
χαλύβδινες πλάκες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται, λόγω τριβής, η οριζόντια παραμόρφωση και να αναπτύσσονται συνθήκες τριαξονικής θλίψης, όπως φαίνεται παρακάτω. Αποτέλεσμα της τριαξονικής θλίψης είναι να αυξάνεται φαινομενικά η αντοχή του δοκιμίου.

Οι εγκάρσιες αυτές δυνάμεις εξασθενούν καθώς απομακρυνόμαστε από τις πλάκες. Όταν το ύψος του δοκιμίου είναι μεγαλύτερο από δύο φορές το πλάτος του στο μέσο του δοκιμίου έχουμε συνθήκες μονοαξονικής θλίψης. Έτσι εξηγείται το ότι στα κυλινδρικά δοκίμια όπου ικανοποιείται η παραπάνω συνθήκη ($H/D \geq 2$) η αντοχή είναι μικρότερη απ' ό,τι στα κυβικά δοκίμια ($H/D=1$). Η αντοχή του κυλίνδρου είναι ανάλογη της αντοχής του κύβου και είναι περίπου το 80% αυτής. Η σχέση των δύο αντοχών εξαρτάται και από το μέγεθος της μέγιστης επιβαλλόμενης δύναμης αλλά και από τις συνθήκες υγρασίας. Στη συνέχεια φαίνεται η κατανομή των τάσεων καθ' ύψος κυλινδρικού δοκιμίου και η σχέση της αντοχής με την αναλογία ύψους-διαμέτρου (ASTM c 42-04).

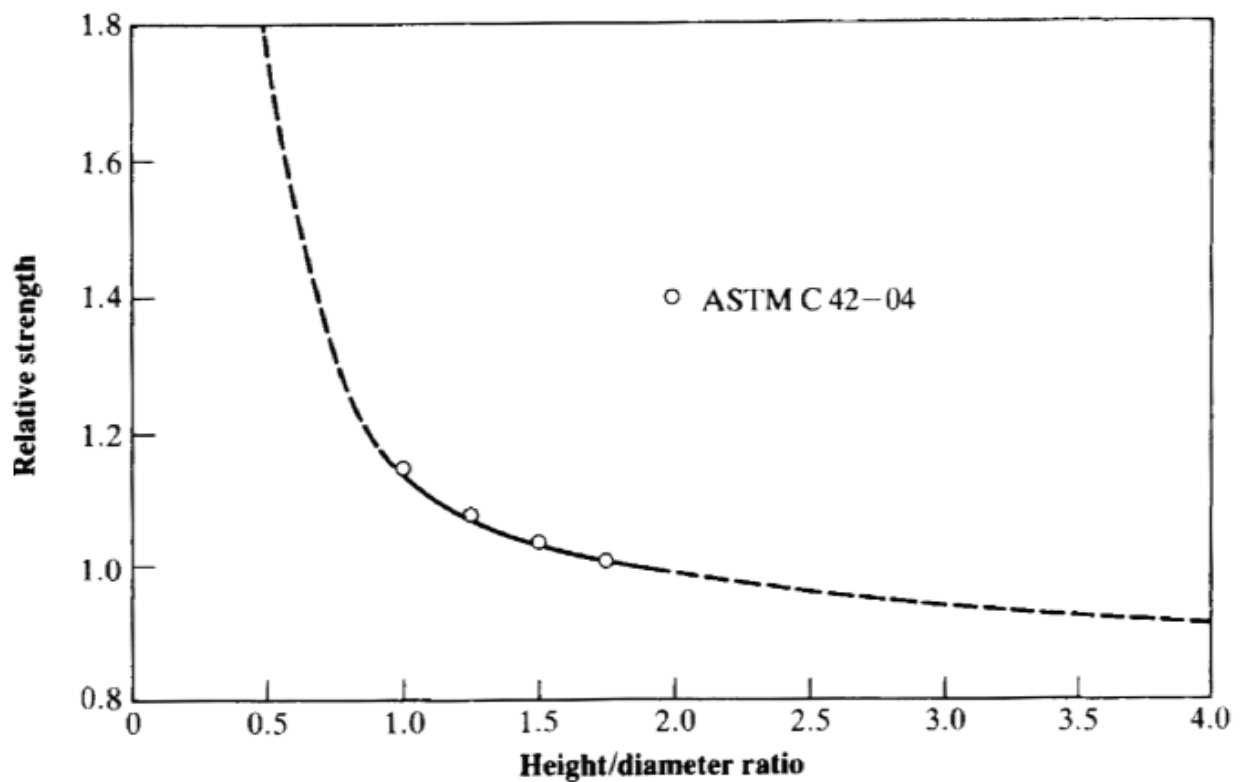


Παραμόρφωση του δοκιμίου κατά τη δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη.

Η χρήση κυλινδρικών δοκιμίων υπερέχει λόγω του ότι επιτυγχάνουμε πιο ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Ωστόσο τα κυβικά δοκίμια είναι πιο εύχρηστα κυρίως διότι δεν απαιτείται απίσωση (καπέλωμα).

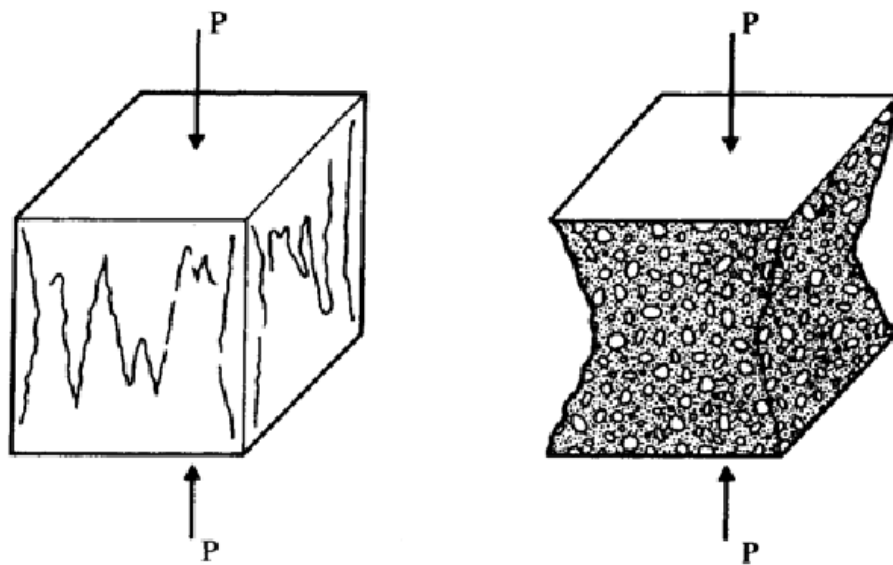


Διάγραμμα παραμόρφωσης καθ' ύψος κυλινδρικού δοκιμίου κατά τη δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη.

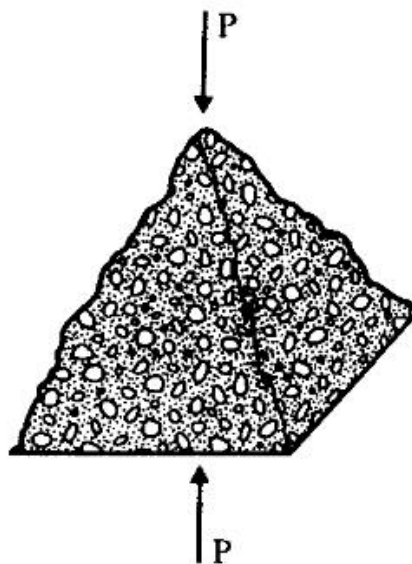


Επιρροή του λόγου ύψος/διάμετρο στην αντοχή κυλίνδρου σε θλίψη.

Στα κυβικά δοκίμια παρατηρείται η ακόλουθη μορφή αστοχίας.



Οι οριζόντιες τάσεις εξασθενούν καθώς κινούμαστε προς το μέσον του δοκιμίου. Οι πλευρές του δοκιμίου είτε εμφανίζουν κατακόρυφες ρωγμές, είτε διασπώνται τελείως και ο πυρήνας παραμένει πρακτικά άθικτος. Εάν η μηχανή στην οποία γίνεται η δοκιμή είναι δεν είναι αρκετά δύσκαμπτη υπάρχει η περίπτωση να εμφανισθεί αστοχία εκρηκτικού τύπου όπως φαίνεται παρακάτω



Αστοχία εκρηκτικού τύπου

Στη συνέχεια εμφανίζονται οι συνηθέστερες μορφές αστοχίας κυλινδρικού δοκιμίου



Η βασική μας απαίτηση από μία φέρουσα κατασκευή είναι να διατηρεί την ακεραιότητά της υπό την επίδραση των εξωτερικών φορτίων. Η απαίτηση αυτή ικανοποιείται αν το υλικό της κατασκευής έχει επαρκή αντοχή. Επειδή γενικά στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, το σκυρόδεμα, όπου δεν έχει ρηγματωθεί λόγω εφελκυσμού, είναι περίπου σε μονοαξονική θλίψη, η μονοαξονική θλιπτική αντοχή είναι το κύριο χαρακτηριστικό μέγεθος του σκυροδέματος. Επιπλέον, αυτή η αντοχή είναι γενικό μέτρο της ποιότητας του υλικού, γιατί όλες σχεδόν οι ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος (υδατοστεγανότητα, αντοχή σε επιφανειακή φθορά, ανθεκτικότητα σε διάρκεια και σε δυσμενείς χημικές επιδράσεις, κ.λ.π.), βελτιώνονται με αύξηση της θλιπτικής αντοχής, επειδή βελτιώνονται με μείωση του πορώδους και των κενών του σκυροδέματος, όπως ακριβώς και η αντοχή.

Τα αποτελέσματα της δοκιμασίας αντοχής σε θλίψη επηρεάζονται από το σχήμα του δοκιμίου, και συγκεκριμένα το λόγο ύψους προς διάσταση βάσης, το μέγεθος του δοκιμίου και την ηλικία του δοκιμίου.

Αναλυτικότερα:

1) **Επίδραση λόγου ύψους βάσης:** Κατά τη δοκιμή θλίψης το δοκίμιο τείνει να διογκωθεί πλευρικά (κατά Poisson). Στις επιφάνειες επαφής με τις άκαμπτες πλάκες της μηχανής φόρτισης, η εγκάρσια παραμόρφωση εμποδίζεται από δυνάμεις τριβής με διεύθυνση προς το κέντρο της επιφάνειας επαφής. Ο πλευρικός περιορισμός (περίσφιγξη) όπως θα αναλύσουμε στην επόμενη ενότητα αυξάνει τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, γιατί επιβραδύνει την παράλληλα με την τάση θλίψης επέκταση των εσωτερικών μικρορωγμών. Επειδή ο εγκάρσιος περιορισμός των ακραίων διατομών επηρεάζει μόνο την αντοχή των ακραίων περιοχών του δοκιμίου, η επίδραση στο αποτέλεσμα της δοκιμής θλίψης αυξάνει όσο πιο κοντόχονδρο είναι το δοκίμιο. Ετσι κυβικά δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή από κυλινδρικά ή πρισματικά με λόγο ύψους προς διάσταση βάσης 2:1 ή μεγαλύτερο. Για λόγο 2:1, η επίδραση των συνοριακών συνθηκών στις ακραίες διατομές πάνω στις εσωτερικές τάσεις στο μέσο του ύψους είναι ασήμαντη. Γι' αυτό κυλινδρικά ή πρισματικά δοκίμια με λόγο ύψους προς βάση τουλάχιστον 2:1 δίνουν περίπου την πραγματική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

2) **Μέγεθος δοκιμίου:** : Όσο μεγαλύτερο είναι το δοκίμιο τόσο μικρότερη είναι η αντοχή, γιατί η πιθανότητα να βρεθεί ένα αδύνατο σημείο απ' όπου θα αρχίσει η αστοχία αυξάνει με το μέγεθος του δοκιμίου. Επίσης η συντήρηση του δοκιμίου επηρεάζει περισσότερο ένα μικρό δοκίμιο από ένα μεγάλο, ενώ ακόμη και η διαφορά θερμοκρασίας 2 μεταξύ επιφάνειας και εσωτερικού του δοκιμίου λόγω της θερμότητας ενυδάτωσης είναι μεγαλύτερη και προκαλεί εντονότερη ρηγμάτωση της επιφάνειας όσο μεγαλύτερο είναι το δοκίμιο.

3) Ηλικία δοκιμίου: Επειδή η ενυδάτωση του τσιμέντου συνεχίζεται για πάρα πολλά χρόνια μετά τη σκυροδέτηση, η αντοχή αυξάνεται με το χρόνο. Παίρνοντας ως βάση αναφοράς την αντοχή στις 28 μέρες, για το κοινό ή καθαρό τσιμέντο Portland κανονικής ανάπτυξης αντοχής η αντοχή του σκυροδέματος στις 7 μέρες είναι περίπου το 70%-75% της αντοχής σε 28 μέρες, και στις 14 μέρες το 80%. Στους 3 μήνες η αντοχή ξεπερνά την αντοχή των 28 ημερών κατά 15-20%, σε 1 χρόνο κατά 25-40% και σε 3 χρόνια κατά 50% περίπου.

4.1 Συμβατική αντοχή σκυροδέματος:

Επειδή η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος εξαρτάται από όλους τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, οι κανονισμοί ορίζουν σαν βάση για τον έλεγχο της ποιότητας του σκυροδέματος τη συμβατική αντοχή, δηλαδή αυτήν που εκτιμάται με δοκίμια τυποποιημένης μορφής και διαστάσεων, τα οποία παρασκευάζονται από το νωπό σκυρόδεμα λίγο πριν τη διάστρωσή του, συντηρούνται με καθορισμένο τρόπο, και δοκιμάζονται σε θλίψη σε ορισμένη ηλικία με αυστηρά τυποποιημένο τρόπο. Ως συμβατικά δοκίμια ορίζονται από τους περισσότερους κανονισμούς ο κύλινδρος ύψους 300mm και διαμέτρου 150mm και ο κύβος πλευράς 150mm. Το κυλινδρικό δοκίμιο προσφέρεται για δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό από διάρρηξη και για τη μέτρηση της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων ή του Μέτρου Ελαστικότητας και δίνει αποτελέσματα πλησιέστερα στην πραγματική μονοαξονική αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη. Τα μειονεκτήματά του είναι η μικρή επιφάνεια διατομής του, που είναι ευαίσθητη σε συγκεντρώσεις σκύρων, οδηγώντας σε μεγάλη διασπορά αποτελεσμάτων δοκιμής, και κυρίως η απαίτηση καπελώματος της πάνω επιφάνειάς του πριν τη δοκιμή, με τσιμεντοκονία ή λυωμένο θειάφι, για τη δημιουργία ομαλής και επίπεδης επιφάνειας για την εφαρμογή του φορτίου θλίψης (μικροανωμαλίες ή έλλειψη επιπεδότητας της επιφάνειας εφαρμογής του φορτίου μπορεί να προκαλέσουν μείωση της αντοχής μέχρι και πάνω από 35%). Αντίθετα στα κυβικά δοκίμια η θλίψη εφαρμόζεται σε δύο απέναντι πλευρές που σκυροδετούνται σε επαφή με τα τοιχώματα της μήτρας, επομένως είναι από κατασκευής ομαλές, επίπεδες και παράλληλες και δεν χρειάζεται καπέλωμα.

Επειδή η μετατροπή της αντοχής από μία μορφή δοκιμίου σε άλλη είναι εντελώς εμπειρική και χαρακτηρίζεται από σημαντική αβεβαιότητα, πρέπει για τους ελέγχους συμμόρφωσης ενός έργου, να χρησιμοποιούνται δοκίμια με την ίδια μορφή και διαστάσεις όπως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη σύνθεσης, ώστε να αποφεύγεται η μετατροπή αντοχής από μία μορφή δοκιμίου σε άλλη, για την κατάταξη του σκυροδέματος σε κάποια κατηγορία.

4.2 Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος:

Από τη φύση του το σκυρόδεμα είναι ανομοιογενές υλικό. Η ανομοιογένεια αυτή οφείλεται σε μικροδιαφορές στην ποιότητα των υλικών (κυρίως των αδρανών) και την αναλογία τους στο μείγμα (λόγω π.χ. απορρύθμισης των ζυγιστηρίων, του αναμεικτήρα, κ.λ.π.) και σε διαφορές στη διάστρωση, συμπύκνωση ή συντήρηση του σκυροδέματος από θέση σε θέση της κατασκευής (π.χ. περιοχές μεγάλης ή μικρής πυκνότητας οπλισμού, επιφάνεια ή εσωτερικό ενός δομικού στοιχείου, κορυφή ή βάση ενός υποστυλώματος ή τοιχώματος, κ.λ.π.). Λόγω της ανομοιομορφίας αυτής, η ποιότητα, και πιο συγκεκριμένα η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

σ' ένα σημείο της κατασκευής, f_c , θεωρείται ως τυχαία μεταβλητή, χαρακτηρίζεται δηλ. από μία πιθανοτική κατανομή, με μέσο όρο, f_{cm} , τυπική απόκλιση, s , κ.λ.π.

Καθοριστικά για την ασφάλεια μιας κατασκευής είναι τα αδύνατα σημεία της. Γι' αυτό ο σχεδιασμός των δομικών στοιχείων βασίζεται όχι στη μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, f_{cm} , αλλά σε μία μικρότερη τιμή, τη χαρακτηριστική αντοχή, f_{ck} . Κατά γενικά αποδεκτή σήμερα σύμβαση, ως χαρακτηριστική αντοχή ορίζεται η τιμή εκείνη κάτω από την οποία έχει πιθανότητα 5% να βρεθεί η αντοχή ενός τυχαίου δοκιμίου σκυροδέματος. (Δηλ. αν ολόκληρη η ποσότητα του σκυροδέματος μετατρεπόταν σε δοκίμια, μόνο το $p=5\%$ των αντοχών αυτών των δοκιμίων θα ήταν κάτω από τη χαρακτηριστική αντοχή και **ΤΟ** υπόλοιπο 95% θα ήταν πάνω απ' αυτήν: "ποσοστό υποαντοχής" $p=5\%$). Έτσι αν η αντοχή του σκυροδέματος ακολουθεί την Κανονική κατανομή πιθανοτήτων (κατανομή Gauss), με μέση τιμή f_{cm} και τυπική απόκλιση s , είναι: $f_{ck} \approx f_{cm} - 1,645s$, όπου ο συντελεστής $-1,645$ αντιστοιχεί σε τιμή της σωρευτικής συνάρτησης κατανομής κατά Gauss ίση με 5%.

4.3 Κατηγορίες σκυροδέματος και πεδίο εφαρμογής τους:

Ο Ευρωκώδικας 2 ορίζει κατηγορίες σκυροδέματος με βάση τη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή κυλίνδρου, f_{ck} . Οι κατηγορίες σκυροδέματος, ανάλογα με τη χαρακτηριστική τιμή της συμβατικής θλιπτικής αντοχής (σε MPa) κυλίνδρου διαμέτρου 150mm και ύψους 300mm (ο πρώτος αριθμός), ή κύβου πλευράς 150mm (ο δεύτερος αριθμός) είναι: **C12/15, C16/20, C20/25, C25/30, C30/37, C35/45, C40/50, C45/55, C50/60, C55/67, C60/75, C70/85, C80/95, C90/105**. Δηλ. το σκυρόδεμα C16/20 έχει χαρακτηριστική τιμή συμβατικής αντοχής f_{ck} κυλίνδρου 16MPa και κύβου, $f_{ck,cube}$ 20MPa.

Η χρήση δύο συμβατικών αντοχών για το χαρακτηρισμό της κατηγορίας σκυροδέματος δίνει τη δυνατότητα επιλογής είτε κυλινδρικών συμβατικών δοκιμίων ή κυβικών 150mm για την (εργαστηριακή) μελέτη σύνθεσης του σκυροδέματος. Περαιτέρω, αν ο έλεγχος του κατά πόσον ένα σκυρόδεμα ανήκει ή όχι στην κατηγορία που προδιαγράφηκε γίνεται από εκείνον που είναι υπεύθυνος για τη μελέτη σύνθεσης, τότε ο εργαστηριακός έλεγχος του σκυροδέματος πρέπει να γίνεται με τον τύπο συμβατικών δοκιμίων στον οποίο στηρίχθηκε η μελέτη σύνθεσης. Για το έτοιμο σκυρόδεμα πρέπει να προδιαγράφεται όχι μόνον η κατηγορία σκυροδέματος αλλά και ο τύπος του συμβατικού δοκιμίου (κυλινδρικό ή κυβικό) με τον οποίο θα ελεγχθεί η ποιότητα του σκυροδέματος. Πρέπει να αποφεύγεται για τον έλεγχο της ποιότητας του σκυροδέματος να γίνονται οι εργαστηριακοί έλεγχοι σε δοκίμια του ενός συμβατικού τύπου και να ελέγχεται η συμμόρφωση ή όχι με βάση τη χαρακτηριστική αντοχή για τον άλλο τύπο συμβατικού δοκιμίου, μετά από μετατροπή της αντοχής από τον ένα τύπο δοκιμίου στον άλλο. Κατά τον Ευρωκώδικα 8 σε κτίρια Κατηγορίας Πλαστιμότητας Μέσης (M) επιτρέπεται η κατηγορία από C16/20 και πάνω και για Κατηγορία Πλαστιμότητας Υψηλή (ΚΠΥ) από C20/25 και πάνω.

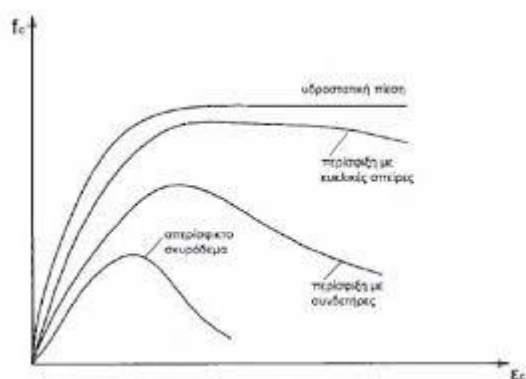
4.4 Μέση αντοχή σκυροδέματος:

Η μέση αντοχή κυλίνδρου, f_{cm} , λαμβάνεται, κατά τον Ευρωκώδικα 2, ίση με τη χαρακτηριστική κυλίνδρου συν 8MPa: $f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa).

5 Περίσφιξη και σκυρόδεμα

Όπως είναι γνωστό αντοχή, αλλά και ικανότητα παραμόρφωσης του σκυροδέματος, αυξάνεται σημαντικά όταν αυτό βρίσκεται υπό συνθήκες τριαξονικής έντασης. Στην πράξη, τριαξονική επιπόνηση δημιουργείται, όταν οι εγκάρσιοι σπλισμοί (κλειστοί συνδετήρες, σπείρες) παρεμποδίζουν την πλευρική διόγκωση ενός μονοαξονικά θλιβόμενου στοιχείου. Το σκυρόδεμα το οποίο υφίσταται την ευνοϊκή λειτουργία του εγκάρσιου σπλισμού ονομάζεται περισφιγμένο ή εγκιβωτισμένο. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι ένα βαθμό περισφίξης μπορούν να συνεισφέρουν και οι διαμήκεις σπλισμοί ενός στοιχείου, ιδιαίτερα όταν αποτελούνται από ράβδους μεγάλης διαμέτρου, διατεταγμένες σε μεγάλες αποστάσεις. Ακόμα ρόλο περισφίξης μπορεί να παίζει σε ορισμένες περιπτώσεις και το αξονικό φορτίο (δημιουργία τριαξονικής έντασης).

Στο διάγραμμα που ακολουθεί μπορούμε να παρατηρήσουμε με πιο εποπτικό τρόπο την συμπεριφορά του περισφιγμένου σκυροδέματος:



Διάγραμμα θλιπτικών τάσεων-παραμορφώσεων σκυροδέματος για διάφορα είδη περισφίξης.

Από το παραπάνω σχήμα και όσον αφορά το απερίσφικτο σκυρόδεμα παρατηρούμε ότι καμπύλη ($\sigma_c - \epsilon_c$) αποτελείται από τρία τμήματα:

α) Το αρχικό, περίπου γραμμικό τμήμα με βάση το οποίο αναπτύχθηκε η θεωρία των επιτρεπόμενων τάσεων.

β) Ένα δεύτερο τμήμα, που ορίζεται από τις παραμορφώσεις που αντιστοιχούν σε τάσεις ίσες προς το 60% έως 100% της θλιπτικής αντοχής και το οποίο χαρακτηρίζεται από μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού (διαρκής μείωση του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας)

γ) Ένα τρίτο τμήμα, κατά μήκος του οποίου παραμόρφωση αυξάνεται ενώ τάση μειώνεται (φθίνων κλάδος). μείωση αυτή της τάσης οφείλεται στον σχηματισμό ρωγμών συνάφειας στην διεπιφάνεια αδρανών - κονιάματος εξαιτίας της διαφορετικής δυσκαμψίας των δύο υλικών, καθώς επίσης και σε μικρορωγμές του κονιάματος που προέρχονται από συγκεντρώσεις τάσεων στην περιοχή των ρωγμών συνάφειας. Στους διάφορους υπολογισμούς όπως είναι γνωστό

χρησιμοποιείται κατά κανόνα, ένα μόνο τμήμα του φθίνοντα κλάδου, πού καθορίζεται από την μέγιστη «χρήσιμη» παρμόρφωση (ϵ_{cu}), πέρα από την οποία βλάβη του υλικού θεωρείται μη αποδεκτή (συμβατικό σημείο αστοχίας).

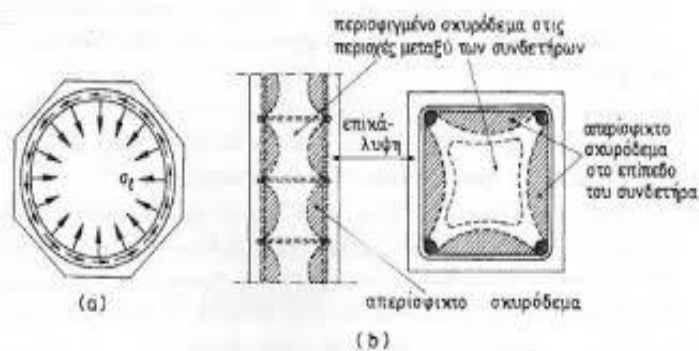
Η παρουσία τώρα της περίσφιξης αρχίζει να επηρεάζει την συμπεριφορά του σκυροδέματος από την στιγμή που εσωτερική ρηγματώση προκαλεί διόγκωση του υλικού. Έτσι λοιπόν οι εγκάρσιοι οπλισμοί διάτμησης δεν επηρεάζουν το πρώτο τμήμα της καμπύλης ($\sigma_0 - 0$) και συνεισφορά της περίσφιξης αρχίζει να γίνεται σημαντική, όσο πλησιάζουμε στην θλιπτική αντοχή, ενώ γίνεται καθοριστική στην περιοχή του φθίνοντα κλάδου. Πρέπει να σημειωθεί ότι περίσφιξη έχει ένα διπλά ευνοϊκό ρόλο και συγκεκριμένα:

α) Αυξάνει την αντοχή του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα να αναπληρώνονται τυχόν απώλειες που δημιουργούνται από την αποφλοίωση (θραύση του σκυροδέματος της επικάλυψης των οπλισμών) των στοιχείων, οποία επέρχεται όταν οι θλιπτικές παραμορφώσεις ξεπερνούν το 4%.

β) Μειώνει την κλίση του φθίνοντα κλάδου του διαγράμματος ($\sigma - \epsilon$) και επομένως αυξάνει την μέγιστη χρήσιμη παραμόρφωση του (σε τιμές που μπορεί να ξεπερνούν κατά πολύ την τιμή 3.5% που δέχονται οι περισσότεροι κανονισμοί), δηλαδή αυξάνει την πλαστιμότητα του σκυροδέματος. Αυτός είναι και σημαντικότερος ρόλος της περίσφιξης και το κλειδί για την υλοποίηση των απαιτήσεων των σύγχρονων κανονισμών.

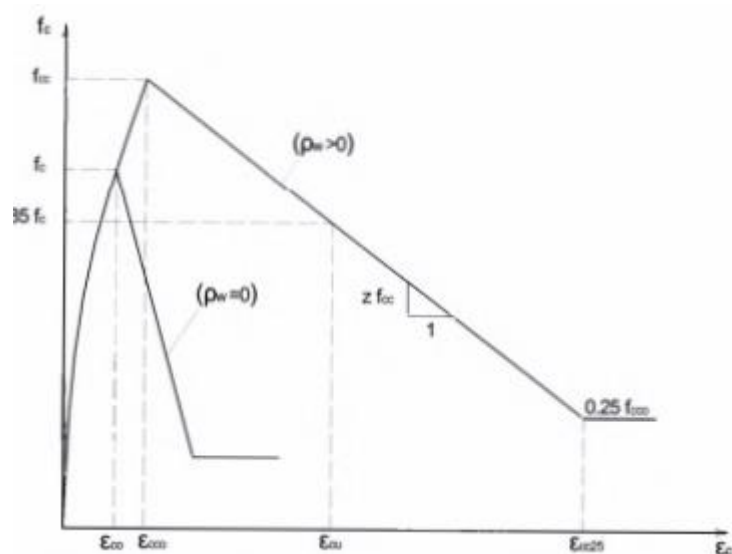
5.1 Αναλυτικά προσομοιώματα περίσφιξης:

Συνήθη είδη περίσφιξης:



Οι πολυάριθμες πειραματικές εργασίες που έγιναν πάνω στον ρόλο της περίσφιξης επαλήθευσαν ότι περίσφιξη με κυκλικές σπείρες είναι γενικά δραστικότερη από αυτή των ορθογωνικών τετραγωνικών συνδετήρων. Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα η περίσφιξη από κυκλική σπείρα μπορεί να φτάσει κοντά σε κείνη που αντιστοιχεί σε υδροστατική πίεση, δηλαδή σε συνθήκες πλήρους τριαξονικής επιπόνησης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι, λόγω του σχήματός τους οι κυκλικές σπείρες βρίσκονται σε περιφερειακό εφελκυσμό και δημιουργούν συνεχή πίεση περίσφιξης σε όλη την περιφέρεια (σχήμα α). Από την άλλη μεριά, οι τετραγωνικοί ορθογωνικοί συνδετήρες μπορούν να προσφέρουν σημαντική πίεση μόνο στις γωνίες τους, δεδομένου ότι διόγκωση του σκυροδέματος στο εσωτερικό τους εκτρέπει τις πλευρές των συνδετήρων προς τα έξω, αφήνοντας τμήματα της διατομής μορφής τόξου (σχήμα.β) χωρίς περίσφιξη. Τα τμήματα

αυτά, είναι ακόμη μεγαλύτερα στις διατομές ανάμεσα από τους συνδετήρες, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα.b.



Καταστατικό προσομοίωμα τάσεων-παραμορφώσεων για περισφιγμένο σκυρόδεμα

Για την επιρροή της περίσφιξης με συνδετήρες πάνω στην συμπεριφορά του σκυροδέματος έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφορα αναλυτικά προσομοιώματα. Εμείς θα αναφερθούμε σε τρία από τα πλέον πρόσφατα και πιο συγκεκριμένα στην καταστατική εξίσωση των: Park et al (1982), Κάππου (1990) και του Ευρωκώδικα (1988).

Για την αύξηση της αντοχής λόγω περίσφιξης οι ερευνητές Park et al. (1982) θεωρούν ότι $f_{cc} = k f_c$ όπου: f_{cc} είναι αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος, f_c αντοχή του απερίσφικτου και:

$$k = 1 + \frac{\rho_w f_{yw}}{f_c}$$

όπου: ρ_w το ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού και f_{yw} τάση διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού. Γίνεται δηλαδή δεκτό, ότι αύξηση της αντοχής λόγω της παρουσίας του εγκάρσιου οπλισμού είναι ανάλογη προς το μηχανικό ποσοστό (u)_w του οπλισμού αυτού. Για την παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην μέγιστη τάση (f_{cc}) οι Park et al. δέχονται ότι $\epsilon_{cc50} = k \epsilon_{cc0}$, ενώ για την κλίση του φθίνοντα κλάδου προτείνουν 0.50 την σχέση:

$$z = \frac{0.50}{\epsilon_{cc50} - \epsilon_{cc0}}$$

όπου: ϵ_{cc50} παραμόρφωση που αντιστοιχεί σε μείωση της αντοχής του απερίσφικτου σκυροδέματος κατά 50% και δίνεται από τη σχέση:

$$\epsilon_{cc50} = \frac{3 + 0.29 f_c}{145 f_c - 1000} + 0.75 \rho_w \sqrt{\frac{b_0}{s}}$$

Στη σχέση με b_0 συμβολίζεται διάσταση του πυρήνα μιας τετραγωνικής διατομής, s είναι απόσταση των συνδετήρων, ενώ τάση f_c δίνεται σε MPa.

Για την αύξηση της αντοχής λόγω περίσφιξης Κάππος προτείνει την σχέση $f_{cc} = k f_c$ όπου:

$$k = 1 + \alpha \omega_w^\beta, \text{ όπου } \omega_w = \rho_w \frac{f_{yw}}{f_c}$$

ενώ οι συντελεστές και λαμβάνουν τις τιμές:

- $\alpha = 0.55, \beta = 0.75$ για διάταξη μονού συνδετήρα
- $\alpha = 1.00, \beta = 1.00$ για διάταξη διπλού συνδετήρα
- $\alpha = 1.25, \beta = 1.00$ για διάταξη τριπλού τετραπλού συνδετήρα

Η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση δίνεται από τη σχέση:
 $\epsilon_{cc0} = k^2 \epsilon_{cc}$, ενώ κλίση του φθίνοντα κλάδου από τη σχέση:

$$z = \frac{0.50}{0.75 \rho_w \sqrt{\frac{b_0}{s} + \frac{3 + (0.29 \frac{f_c}{k})}{(145 \frac{f_c}{k}) - 1000}} - \epsilon_{cc0}}$$

όπου: με b_0 συμβολίζεται διάσταση του πυρήνα μιας τετραγωνικής διατομής, s είναι απόσταση των συνδετήρων, ενώ τάση f_c δίνεται σε MPa

Τέλος, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος προκύπτει από τη σχέση:

$$f_{cc} = f_c (1 + 2.5 \omega w) \text{ για } u)w < 0.1/\alpha$$

$$f_{cc} = f_c (1 + 2.5 u)w) \text{ για } u > w > 0.1/\alpha$$

ενώ παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση από τη σχέση:

$$\epsilon_{cc0} = \epsilon_{co} \left(\frac{f_{cc}}{f_c} \right)^2$$

Με βάση τη μειωμένη τιμή της θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής σκυροδέματος $0.85f_c$ που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αντοχής των φορέων σε κάμψη σύμφωνα με πολλούς σύγχρονους κανονισμούς, ο ευρωκώδικας 8 προτείνει τον υπολογισμό του ω από την σχέση:

$$\epsilon_{cu} = \epsilon_{co} + 0.1 \alpha_1 \alpha_2 \omega w$$

Όπου: $\epsilon_{co} = 3.5 + 4\%$ είναι οριακή παραμόρφωση του απερίσφικτου σκυροδέματος και $\alpha_1 \alpha_2$ όπου:

$$\alpha_1 = 1 - \frac{n \left(\frac{b_1^2}{6} \right)}{A_0}$$

Και

$$\alpha_2 = \left(1 - \frac{1}{2} \frac{s}{b_0} \right)^2$$

Στις παραπάνω σχέσεις με b_0 συμβολίζεται διάσταση του περσιφισμένου πυρήνα μιας ισοδύναμης τετραγωνικής διατομής, είναι αριθμός των ράβδων που συγκρατούνται από σκέλος συνδετήρα, b , απόσταση μεταξύ τους και s η απόσταση των συνδετήρων κατά μήκος του άξονα του φορέα.

Παρόμοιες σχέσεις συναντούμε στο κεφάλαιο 18.4.4.2 του Ε.Κ.Ω.Σ 2000

5.2 Παράμετροι περίσφιξης

Οι κυριότερες παράμετροι που υπεισέρχονται στο φαινόμενο της περίσφιξης είναι:

- 1) **Το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού.** Συνήθως εκφράζεται μέσω του ογκομετρικού ποσοστού, ρ_w , που ορίζεται σαν το λόγο του όγκου των συνδετήρων προς τον όγκο του περισφιγμένου πυρήνα της διατομής. Από τα προηγούμενα διαγράμματα, γίνεται φανερό ότι, όσο αυξάνει το ρ_w , τόσο αυξάνει οριακή θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος και κατά συνέπεια πλαστιμότητά του.
- 2) **Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (f_c).** Είναι φανερό ότι τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής χαρακτηρίζονται από μειωμένη πλαστιμότητα, σε σχέση με τα σκυροδέματα χαμηλότερης αντοχής
- 3) **Το όριο διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού (f_{yw}).** Προφανώς όσο αυξάνεται αντοχή των συνδετήρων τόσο αυξάνει ικανότητα περίσφιξής τους.
- 4) **Η διάταξη των συνδετήρων στην διατομή.** Εάν αντί ενός μονού συνδετήρα χρησιμοποιηθούν διπλοί και περισσότεροι συνδετήρες μειώνονται τα τμήματα που παραμένουν χωρίς ενεργό περίσφιξη και πλαστιμότητα και αντοχή της διατομής αυξάνουν.
- 5) **Η απόσταση των συνδετήρων (s).** Για σταθερό ποσοστό συνδετήρων (ρ_w) περίσφιξη αυξάνει όταν μικραίνει απόστασή τους διότι μειώνεται το τμήμα του στοιχείου που παραμένει χωρίς ενεργό περίσφιξη. Εδώ θα ήταν σκόπιμο να αναφερθεί ότι μείωση της απόστασης των συνδετήρων βελτιώνει την πλαστιμότητα ενός θλιβόμενου στοιχείου, διότι παρεμποδίζει τον λυγισμό των διαμήκων ράβδων, ιδιαίτερα μετά την αποφλοίωση του σκυροδέματος της επικάλυψης.
- 6) **Το ποσοστό του διαμήκη οπλισμού (ρ_l).** Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της παρούσας ενότητας και διαμήκης οπλισμός συμβάλλει, σε ένα βαθμό, στην παρεμπόδιση της πλευρικής διόγκωσης του πυρήνα, άρα συμβάλλει στην περίσφιξη. Όσο μεγαλύτερη είναι διάμετρος του, και όσο μεγαλύτερο το ποσοστό του (ρ_l), τόσο αυξάνει συμβολή του στην περίσφιξη. Ωστόσο συμβολή αυτή είναι πολύ μικρή και μπορούμε να την αγνοήσουμε, όταν εγκάρσια περίσφιξη είναι επαρκής.
- 7) **Η ταχύτητα επιβολής της φόρτισης.** Στην περίπτωση της σεισμικής επιπόνησης είναι ορθότερο να γίνεται αναφορά στην ταχύτητα επιβολής της παραμόρφωσης ϵ , αύξηση της οποίας (σε σχέση με τη στατική επιπόνηση) προκαλεί αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος, μείωση της παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση και αύξηση

της κλίσης του φθίνοντα κλάδου του διαγράμματος σ-ε. Κατά συνέπεια αύξηση της ταχύτητας επιβολής της φόρτισης έχει τόσο θετικά, όσο και αρνητικά αποτελέσματα.

- 8) **Το είδος της φόρτισης (κεντρική έκκεντρη σύνθλιψη).** εκκεντρότητα στη φόρτιση δεν επηρεάζει σημαντικά την αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος, βελτιώνει όμως την πλαστιμότητα, δεδομένου ότι τμήμα της διατομής βρίσκεται σε ευμενέστερη εντατική κατάσταση απ' ότι το ακραίο θλιβόμενο τμήμα (στις εφελκόμενες ζώνες περίσφιξη δεν επιδρά σημαντικά).

5.3 Προηγούμενες πειραματικές εργασίες σχετικά με την περίσφιξη στο ελαφροσκυρόδεμα.

Για την έρευνα της περίσφιξης στο ελαφροσκυρόδεμα αναφέρονται εργασίες βιβλιογραφικά, που σχετίζονται με την συμπεριφορά υποστυλωμάτων από ελαφροσκυρόδεμα (κυρίως κισσηροδέματος) καθώς σε χώρες ιδιαίτερα σεισμικές του εξωτερικού χρησιμοποιείται σε ευρεία κλίμακα αυτό το υλικό.

Οι πειραματικές έρευνες αυτές ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες.

1) Πειράματα τα οποία επικεντρώνονται στο να διερευνούν την συμπεριφορά κοντών υποστυλωμάτων σε κεντρική θλίψη και στην αποτίμηση του διαγράμματος μέσης τάσεις-ανηγμένης παραμόρφωσης περισφιγμένων πυρήνων υποστυλωμάτων. Στο τέλος καταλήγουν στην πρόταση μίας αναλυτικής σχέσης για χρήση στους αντισεισμικούς υπολογισμούς.

2) Πειράματα που επικεντρώνονται κυρίως στην διερεύνηση καμπτόμενων υποστυλωμάτων από ελαφροσκυρόδεμα υπό ανακυκλιζόμενη ένταση όπου η περίσφιξη αποτελούσε παράμετρο προς έρευνα.

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στην πρώτη κατηγορία λόγω του αντικείμενου της. Παρακάτω θα δούμε σχετικές βιβλιογραφικές αναφορές πειραμάτων.

Allington(2003)

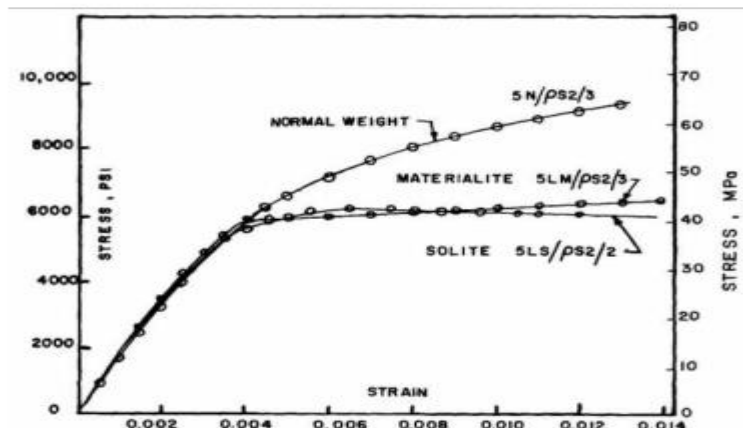
Ο Allington (2003) ερεύνησε εκτενώς πειραματικά τη συμπεριφορά περισφιγμένων υποστυλωμάτων. Για αυτό το σκοπό παρασκεύασε δεκαεννέα άοπλα και είκοσι οκτώ οπλισμένα υποστυλώματα, φυσικής κλίμακας από τέσσερα διαφορετικά είδη ελαφροσκυροδέματος, τα δύο με την χρήση αδρανών από διογκωμένο αργιλικό σχιστόλιθο (expanded shale) και τα υπόλοιπα δύο από διογκωμένη άργιλο (expanded clay). Οι πυκνότητες και των τεσσάρων συνθέσεων ήταν περίπου 1600 kg/m³ και οι αντοχές μεταξύ 25 και 55 MPa. Για τις δοκιμές του, χρησιμοποιήθηκαν τρεις διατάξεις οπλισμού περισφιγξης. Τα οκτώ εκ των υποστυλωμάτων είχαν κυκλική διατομή με σπειροειδή οπλισμό ενώ τα υπόλοιπα ήταν τετραγωνικής διατομής. Σχεδόν σε όλα τα οπλισμένα υποστυλώματα παρατηρήθηκε λογισμός των διαμήκων οπλισμών, ενώ στις τετραγωνικές διατομές και όταν η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των οπλισμών αυξανόταν, το φαινόμενο ήταν εντονότερο.

Shah et al. (1983)

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

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

Πειραματικά διαγράμματα μέσης τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης περισφιγμένου κανονικού σκυροδέματος και ελαφροσκυροδέματος.



Hussain et al. (1988)

Οι Hussain et al. (1988) εκτέλεσαν ένα πειραματικό πρόγραμμα σε τριάντα ένα οπλισμένα και εννέα άοπλα δοκίμια υποσυλωμάτων από ελαφροσκυρόδεμα με λόγο ύψους προς πλάτος 1 προς 4, υπό κεντρική θλίψη. Το ελαφρό αδρανές που χρησιμοποιήσαν ήταν LECA. Οι παράμετροι του προγράμματος ήταν η διάταξη και απόσταση των συνδετήρων, η κατανομή του διαμήκους οπλισμού και ο τύπος του ελαφροσκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε, του οποίου η θλιπτική αντοχή κυμαίνονταν μεταξύ 26 MPa και 45 MPa. Τα σημαντικότερα αποτελέσματα της εργασίας αυτής συνοψίζονται παρακάτω: Η αύξηση της περίσφιγξης μέσω πύκνωσης των συνδετήρων ή αύξησης της διαμέτρου των είχε ευμενή δράση στην αύξηση της μέγιστης θλιπτικής αντοχής και στη μείωση της αρνητικής κλίσης του φθίνοντα κλάδου μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής και στο ελαφροσκυρόδεμα, όπως παρατηρείται και στο κανονικό σκυρόδεμα. Εν τούτοις, παρατηρήθηκε ότι η ευμενής αυτή δράση της περίσφιγξης εμφανίσθηκε να μειώνεται, όσο αυξανόταν η θλιπτική αντοχή του ΕΣ. Παρατηρήθηκε επίσης ότι ο εγκάρσιος οπλισμός περίσφιγξης σπάνια έφτανε στη διαρροή πριν το δοκίμιο να φτάσει στη μέγιστη αξονική θλιπτική του τάση, άρα η συνήθης πρακτική να υπολογίζεται η επίδραση της περίσφιγξης με την εγκάρσια τάση που παρέχεται από τον οπλισμό περίσφιγξης να ισούται με την τιμή διαρροής, όπως στο ΣΚΒ, είναι κατά της ασφαλείας και της πειραματικής παρατήρησης

5.4 Συμπεράσματα Βιβλιογραφικής Διερεύνησης

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

6 Πειραματικό μέρος

Περιγραφή

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει την μελέτη της σύνθεσης και την παραγωγή των δοκιμών καθώς και την υποβολή τους σε δοκιμή κεντρικής θλίψης.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε ογκομέτρηση σε κυλινδρική μήτρα (15x45) τόσο στην κίσηρη όσο και στο χονδρόκοκκο αδρανές έτσι ώστε να βρεθεί η ποσότητα κίσηρης που χρησιμοποιήθηκε στη σύνθεση. Η σύνθεση μελετήθηκε για σταθερό λόγο νερού προς τσιμέντο N/T 0,7 με σκοπό να επιτύχουμε κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (π.χ κάθιση S3).

Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν 6 κύλινδροι σκυροδέματος κανονικού βάρους οι 3 οπλισμενοι και 18 κύλινδροι ελαφροσκυροέματος εκ των οποίων 3 άοπλοι (λεπτομέριες παρακάτω).

6.1 Υλικά-Μελέτη σύνθεσης

Ελαφρό αδρανές

Το αδρανές το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή του πειράματος είναι η κίσηρης ή αλλιώς ελαφρόπετρα . Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε κίσηρη (0- 8mm).

Αδρανή κανονικού βάρους

Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ασβεστολιθική άμμος (0-2 mm), γαρμπίλι (4-8 mm) και χαλίκι (8-16 mm).

Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης αδρανών κανονικού βάρους

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι ποσότητες διερχόμενων αδρανών από τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν σύμφωνα με το Πρότυπο EN 933-1

Νο Κοσκίνου	Χαλίκι (gr)	Γαρμπίλι (gr)	Άμμος (gr)
3/8''	2112	2125,5	
1/2''	2257,5	51,5	
3/4''	238,5		
1''	19,5		
1 1/2''	0		
4	81,5	262,5	2,5
8	15	41,5	651
100	5	12	4306
200	2413	2472	
Παιπάλη			39

Τσιμέντο

Τόσο για τη μελέτη σύνθεσης όσο και για τα οπλισμένα γραμμικά στοιχεία από ελαφροσκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEM II/A-M(P-LL)42,5N της εταιρίας Lafarge.

Υπερ-ρυστοποιητές

Χρησιμοποιήθηκαν οι υπερ-ρυστοποιητές ViscoCrete Techno-10+ και Plastocrete της εταιρίας Sika σε όλες τις περιπτώσεις παρασκευής σκυροδέματος. Πληρούν τις προδιαγραφές των Προτύπων EN 934-2 § 3.1. - 3.2, ASTM C 494 A & F (ΣΚ 308) και C1017 (ΣΚ 316). Η ποσότητα των ρυστοποιητών Plastocrete και Visco Techno 10+ που χρησιμοποιήθηκαν υπολογίστηκαν ίση με 0,5% και 0,6% αντίστοιχα ανά βάρος τσιμέντου

Χάλυβας

Για την παρασκευή των οπλισμένων δοκών προτύπων και πειραματικών χρησιμοποιήθηκε χάλυβας οπλισμού κατηγορίας B500C, με διάμετρο στην περίπτωση των διαμήκων οπλισμών εφελκυσμού και θλίψης Φ8 και Φ8 και στην περίπτωση του κατακόρυφου οπλισμού διάτμησης Φ8. Οι ονομαστικές διαμέτροι, οι ονομαστικές διατομές καθώς και η ονομαστική μάζα δίνονται παρακάτω. Οι τιμές βρίσκονται σε συμφωνία με τα Πρότυπα ΕΛΟΤ 971 και ΕΛΟΤ 1421.

Ονομαστική διάμετρος d(mm): 8

Ονομαστική διατομή A(mm²): 50.3 , Ανοχές(%): ±6

Ονομαστική μάζα (kg/m): 0.395

Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος C16/20 κάθισης S3

Πραγματοποιήθηκαν δύο κύριες (2) συνθέσεις (σύνθεση 1 και 2) οι οποίες προκύπτουν από τη σύνθεση(0) τα επιμέρους στοιχεία των οποίων παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. Η σύνθεση 0 αφορά σε συμβατικό σκυρόδεμα C16/20 και ορίστηκε ως σύνθεση αναφοράς για τις υπόλοιπες. Οι συνθέσεις 1 και 2 ήταν αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των δοκών. Τα υλικά εισήχθησαν στην ηλεκτρική μπετονιέρα με βάση τον όγκο των δοκιμών σκυροδέτησης κάθε παρτίδας. Σε όλες τις συνθέσεις διατηρήθηκε ο λόγος νερού προς τσιμέντο ίσος με 0,7 (N/T=0,7).

Σύνθεση (0):

Άμμος: 1090 kg
Χαλίκι: 640kg
Γαρμπίλι: 180kg
Τσιμέντο: 270kg
Νερό: 190kg

Έπειτα από αναγωγή των παραπάνω σε όγκο 6 κυλινδρικών δοκιμών σκυροδέματος κανονικού βάρους και 18 κυλινδρικών δοκιμών ελαφροσκυροδέματος προκύπτουν οι παρακάτω συνθέσεις:

Για τα 6 κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος κανονικού βάρους η σύνθεση (0) ανάγεται σε:

Σύνθεση (1)

Άμμος: 51,98kg
Χαλίκι: 30,52kg
Γαρμπίλι: 8,59kg
Τσιμέντο: 6,92kg
Νερό: 19,28 kg

Για τα 18 κυλινδρικά δοκίμια ελαφροσκυροδέματος η σύνθεση (0) έπειτα από μείωση του χονδρόκοκκου αδρανούς(χαλίκι) κατά 50% και ογκομέτρησής του συγκριτικά με την αντίστοιχη κίσηρη(στον όγκο του ενός δοκιμίου αντιστοιχεί βάρος 12,280kg χαλίκι και 7,137kg κίσηρη) ανάγεται σε:

Σύνθεση (2)

Άμμος: 155,94kg
Χαλίκι: 45,78kg
Γαρμπίλι: 25,75kg
Τσιμέντο: 20,74kg
Νερό: 19,28kg
Κίσηρη: 26,61kg

6.2 Δοκίμια

Οι διαστάσεις των κυλινδρικών δοκιμών είναι: Διάμετρος 15εκ και ύψος 45 εκ(αναλογία 1/3)

Χαρακτηριστικά κυλίνδρων:

Διάμετρος 15εκ

Ύψος 45 εκ

Οπλισμός : B500C ξεκινώντας από 4 κατακόρυφα στοιχεία και 3 συνδετήρες και φτάνοντας μέχρι 4 κατακόρυφα στοιχεία και 7 συνδετήρες

Επικάλυψη δοκιμίων: 2εκ πανταχόθεν(με χρήση αποστατών).

Τα κυλινδρικά δοκίμια που παρασκευάστηκαν και παρέμειναν εμβαπτισμένα σε νερό για 28 ημέρες στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος για το πείραμα ζυγίστηκαν και υποβλήθηκαν σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός της θλιπτικής τους αντοχής F_c .



Δοκίμια αμέσως μετά την αφαίρεση των καλουπιών



Καλούπια από σωλήνες PVC που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμών με μεταλικά καπάκια στο κάτω μέρος.



Σκελετός οπλισμού τριών συνδετήρων που χρησιμοποιήθηκε σε δοκίμιο

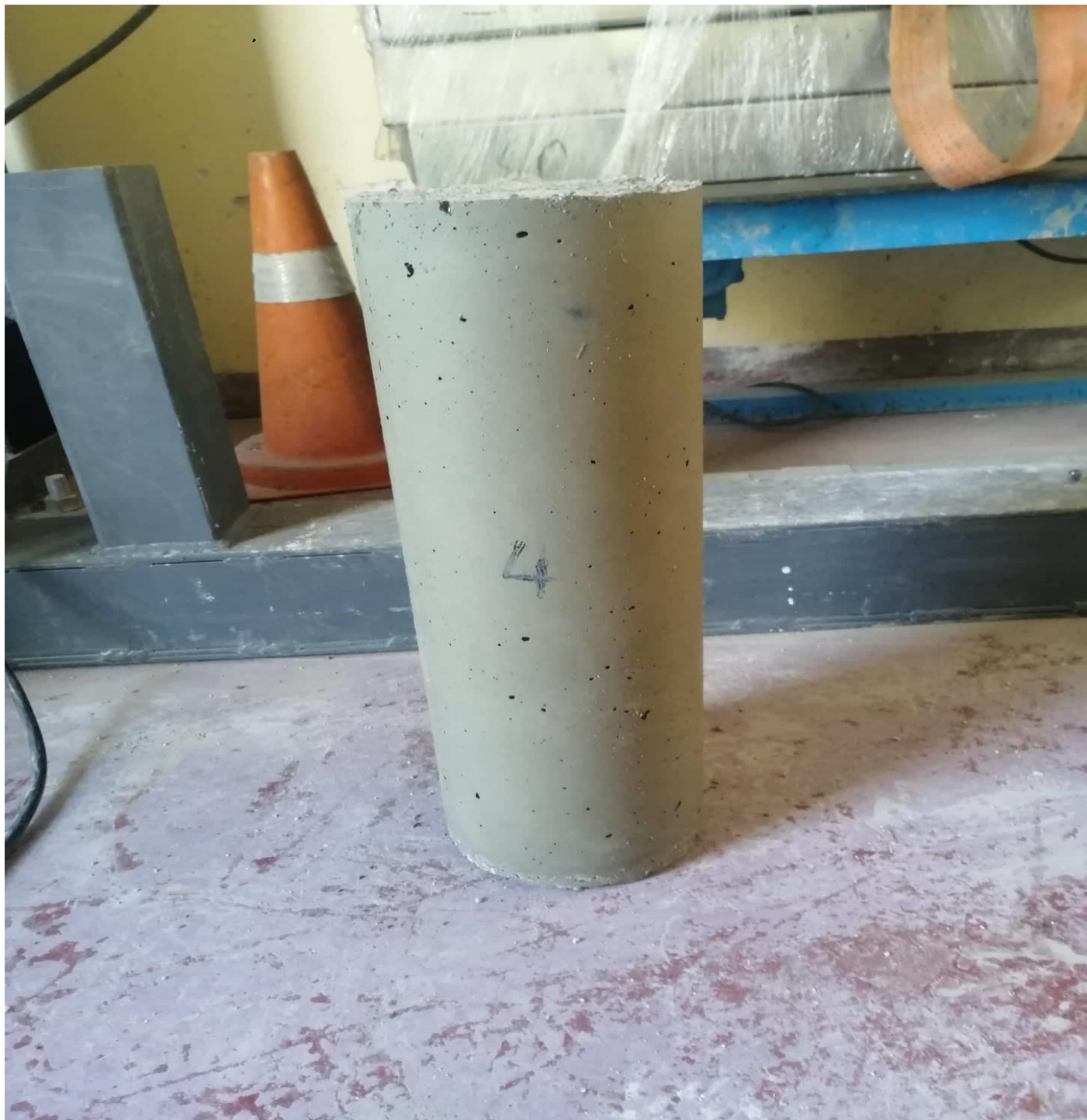


Δοκίμια αμέσως μετά την σκυροδέτησή τους.



Κυλινδρικά δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές

Σε όλα τα δοκίμια πραγματοποιήθηκε ομαλοποίηση της ελεύθερης τους επιφάνειας με οικοδομικό γύψο ταχείας πήξης(καπέλωμα) με σκοπό την δημιουργία δύο παράλληλων επιπέδων για την σωστή υποβολή της φόρτισης.



Δοκίμιο κίσηρης με τη σήμανση των συνδετήρων του οπλισμού(4) πριν την εξομάλυνση της επιφάνειάς του.

Η δοκιμή τους σε θλίψη έγινε στο κτήριο του Εργαστηρίου Αντοχής Υλικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



Κτήριο Αντοχής Υλικών Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο



Διάταξη μηχανής μονοαξονικής θλίψης εργαστηρίου αντοχής υλικών Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

6.3 3 Πειραματική διάταξη δοκιμής θλίψης

Επειδή τα δοκίμια δεν είχαν τις τυπικές διαστάσεις (διαμετρο 15εκ και ύψος 45εκ αντί για διάμετρο 10 και ύψος 30 εκ) δεν χρησιμοποιήθηκε η συμβατική διάταξη μηχανής για την δοκιμή θλίψης αλλά η παραπάνω.

Η συγκεκριμένη μηχανή μονοαξονικής θλίψης αποτελείται από δύο τμήματα:

Στα δεξιά της εικόνας βρίσκεται ένα πλατό στο οποίο επάνω τοποθετείται το δοκίμιο όπως βλέπουμε. Στο πάνω μέρος του υπάρχει ένα έμβολο το οποίο κατεβαίνει και ασκεί το θλιπτικό φορτίο στο δοκίμιο.

Στα αριστερά της εικόνας υπάρχει η μηχανή ελέγχου της μηχανής. Απο εκεί ρυθμίζουμε την ταχύτητα επιβολής της φόρτισης και της αποφόρτισης. Σε αυτό το μεγάλο λευκό καντράν που βλέπουμε υπάρχουν 2 δείκτες ένας κόκκινος και ένας μαύρος οι οποίοι συντρέχουν όσο αυξάνεται το θλιπτικό φορτίο που ασκείται στο δοκίμιο. Η τιμή του φορτίου ανα πάσα στιγμή αναγράφεται στην περίμετρο του κύκλου. Όταν επέλθει η αστοχία ο μαύρος δείκτης παραμένει στο τελικό φορτίο, ενώ ο κόκκινος υποχωρεί σταδιακά μέχρι το μηδέν.



Δοκίμιο που υποβάλλεται σε μονοαξονική θλίψη στη μηχανή

Δοκίμια σε διάφορες φάσεις αστοχίας λόγω θλιπτικής καταπόνησης:





7 Εργαστηριακά αποτελέσματα δοκιμών

Έπειτα από την ζύγιση των δοκιμίων και ύστερα την υποβολή τους σε μονοαξονική θλίψη στο μηχάνημα αντλήσαμε τα εξής αποτελέσματα:

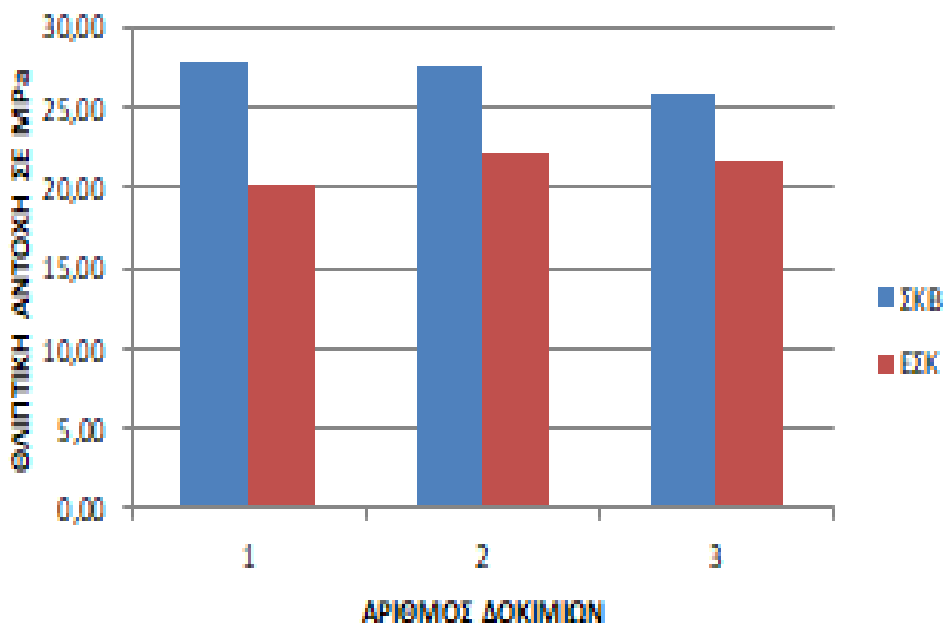
ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΥ ΒΑΡΟΥΣ(ΣΚΒ)			
ΔΟΚΙΜΙΑ	ΒΑΡΟΣ (kg)	ΦΟΡΤΙΟ (ton)	Αντοχή (Μpa)
ΑΟΠΛΟ (1)	18,770	50,300	27,93
ΑΟΠΛΟ (2)	18,578	49,500	27,48
ΑΟΠΛΟ (3)	18,634	46,700	25,93
ΜΕ 3 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (1)	18,974	104,600	58,08
ΜΕ 3 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (2)	18,346	117,600	65,30
ΜΕ 3 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (3)	18,702	111,800	62,08

ΔΟΚΙΜΙΑ ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ(ΕΣΚ)			
ΔΟΚΙΜΙΑ	ΒΑΡΟΣ (kg)	ΦΟΡΤΙΟ (ton)	Αντοχή (Μpa)
ΠΛΟ (1)	17,340	36,400	20,21
ΠΛΟ (2)	17,800	40,000	22,21
ΠΛΟ (3)	17,640	39,150	21,74
3 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (1)	18,020	90,800	50,42
3 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (2)	17,840	86,600	48,08
3 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (3)	17,910	98,300	54,58
4 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (1)	18,170	102,400	56,86
4 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (2)	17,723	117,700	65,34
4 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (3)	18,264	110,900	61,58
5 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (1)	18,530	116,800	64,86
5 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (2)	18,920	118,200	65,62
5 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (3)	18,350'	120,700	67,02
6 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (1)	19,120	126,600	70,30
6 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (2)	19,005	122,100	67,80
6 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (3)	19,254	115,800	64,30
7 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (1)	19,370	128,000	71,06
7 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (2)	19,630	123,700	68,68
7 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ (3)	19,770	129,000	71,62

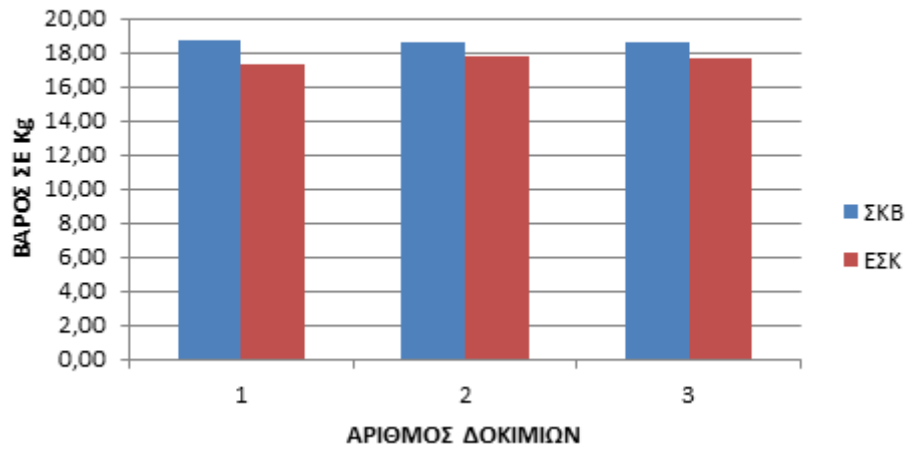
	ΜΕΣΟΙ ΟΡΟΙ ΒΑΡΟΥΣ(kg)			ΜΕΣΟΙ ΟΡΟΙ ΦΟΡΤΙΟΥ(ton)			
	ΣΚΒ	ΕΣΚ		ΣΚΒ	ΕΣΚ	ΕΣΚ(Mpa)	ΣΚΒ(Mpa)
ΑΟΠΛΟ	18,661	17,593	ΑΟΠΛΟ	48,833	38,517	21,39	27,93
3 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ	18,674	17,923	3 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ	111,333	91,900	51,03	61,82
4 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ		18,052	4 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ		110,333	61,26	
5 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ		18,725	5 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ		118,567	65,83	
6 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ		19,126	6 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ		121,500	67,46	
7 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ		19,590	7 ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ		126,900	70,46	

7.1 Διαγράμματα

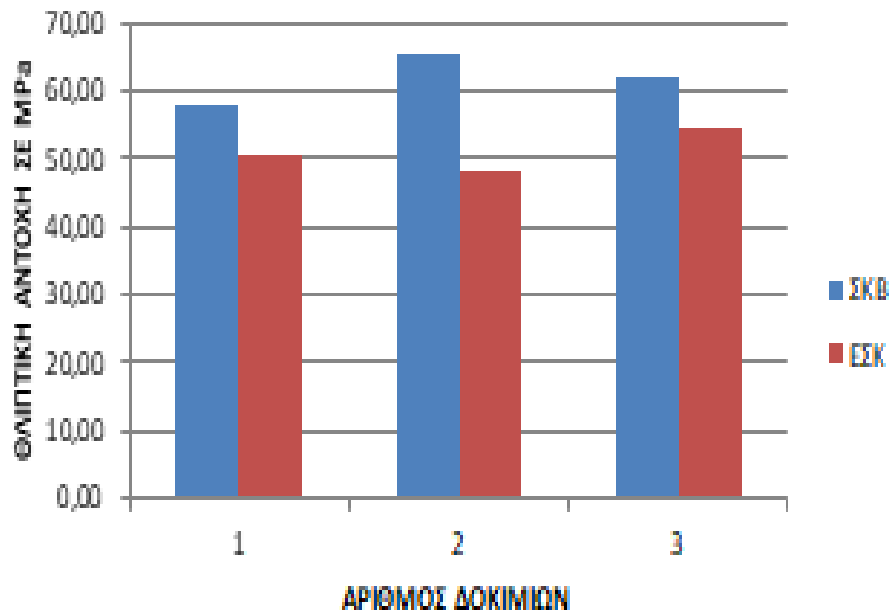
Άσπλα δοκίμια



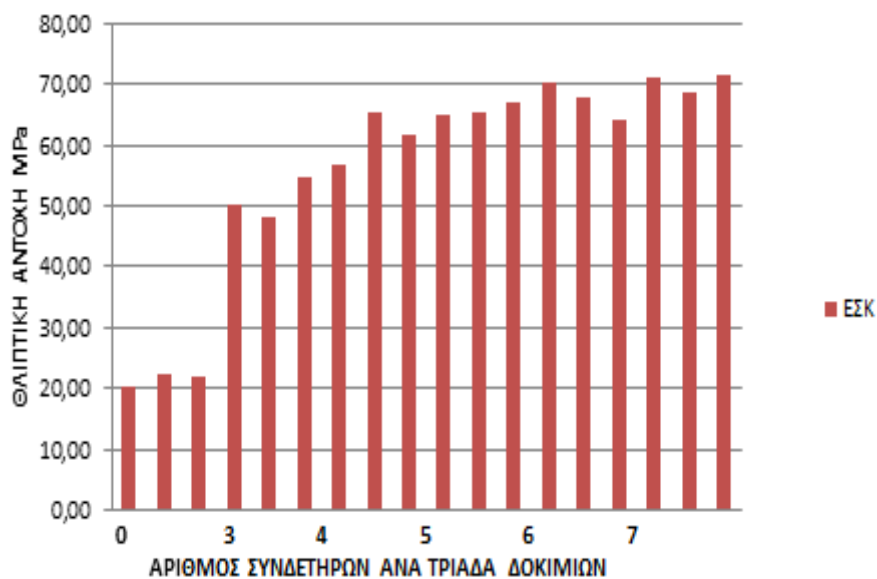
Άσπλα δοκίμια



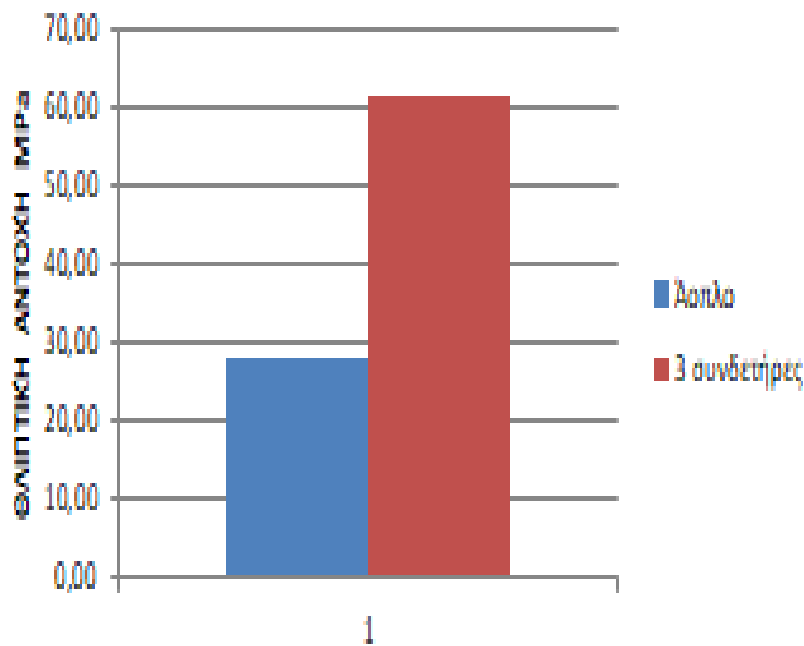
Δοκίμια με 3 συνδετήρες



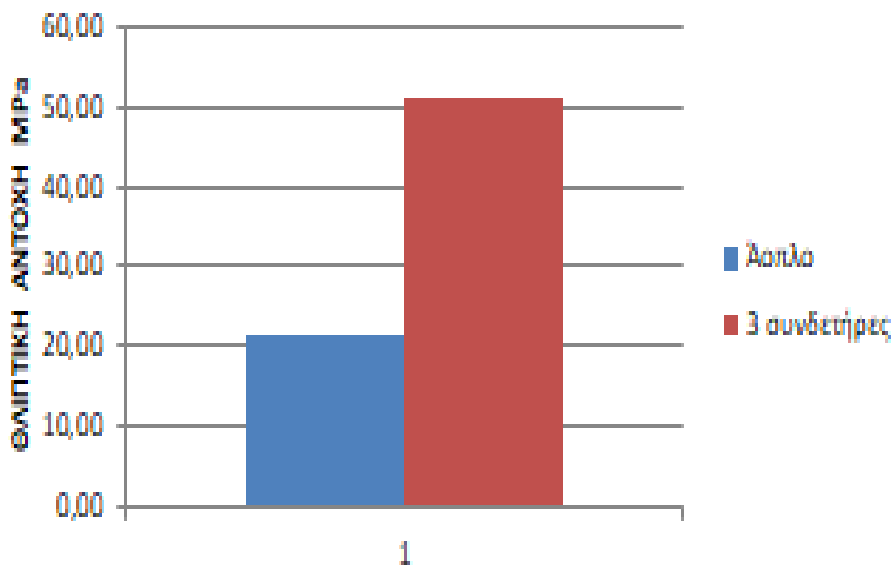
Θλιπτική αντοχή δοκιμίων ελαφροσκυροδέματος



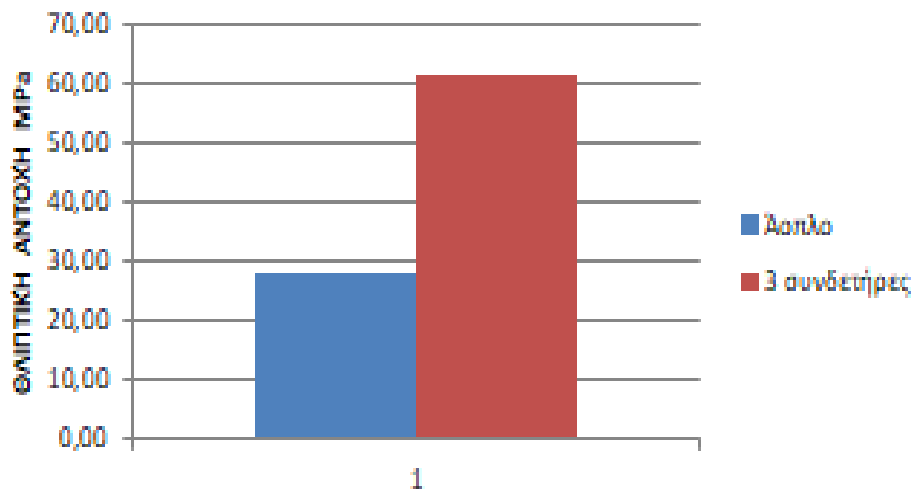
Σύγκριση θλιπτικής αντοχής άοπλου- οπλισμένου ΣΚΒ



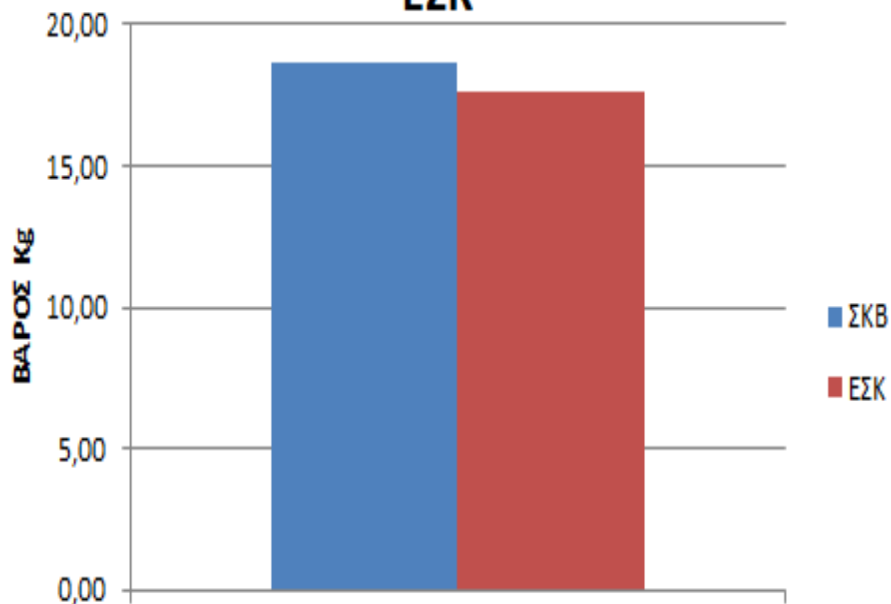
Σύγκριση θλιπτικής αντοχής άοπλου οπλισμένου ΕΣΚ



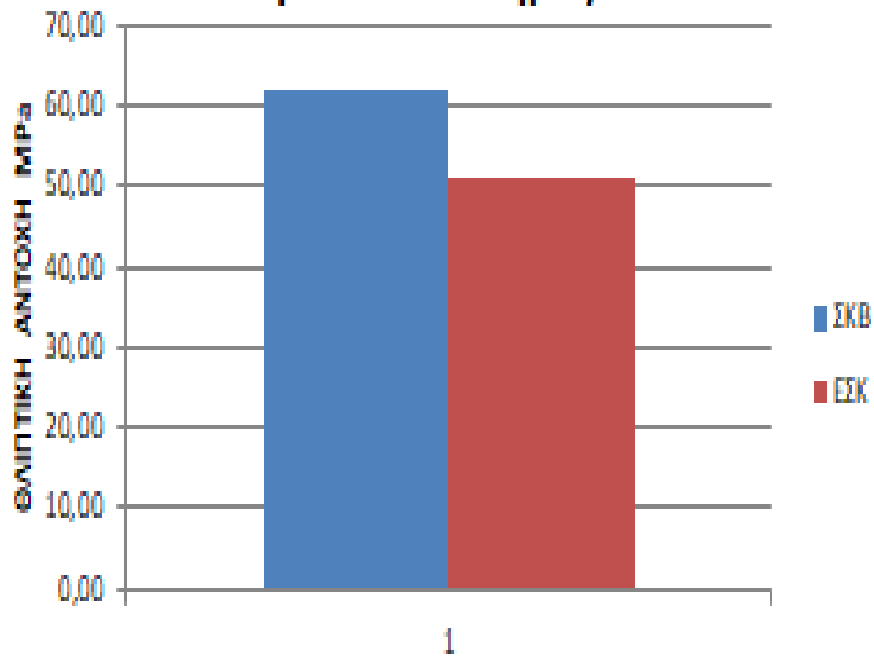
Σύγκριση θλιπτικής αντοχής άοπλου-οπλισμένου ΣΚΒ



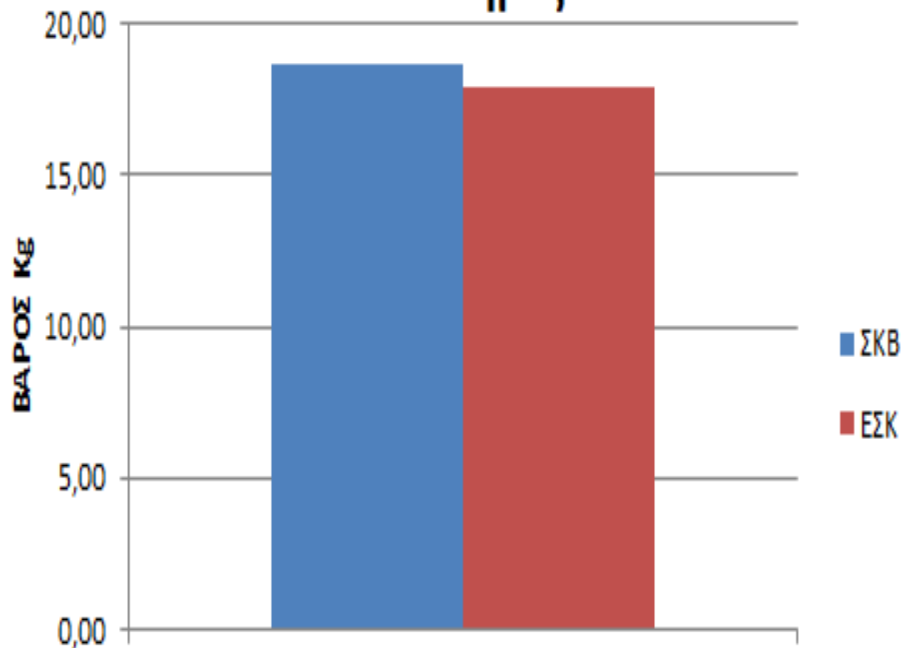
Σύγκριση Μ.Ο βάρους άοπλου ΣΚΒ-ΕΣΚ



Σύγκριση θλιπτικής αντοχής ΣΚΒ-ΕΣΚ με 3 συνδετήρες



Σύγκριση Μ.Ο βάρους ΣΚΒ-ΕΣΚ με 3 συνδετήρες



8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κύρια συμπεράσματα που εξάγονται με βάση την παρούσα διπλωματική εργασία είναι τα ακόλουθα:

- Οι σύγχρονες απαιτήσεις για ελαφριές κατασκευές, μειώνοντας έτσι το βάρος ενώ ταυτόχρονα είναι ευκολότερο και ταχύτερο στην κατασκευή, καθιστούν το σπλισμένο κίσσηρόδεμα (ελαφροσκυρόδεμα) ένα πολύ ανταγωνιστικό δομικό υλικό.
- Η χρήση κίσσηρης αντί για χονδρόκοκκα αδρανή υλικά μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος κατασκευής, τόσο λόγω της χαμηλής τιμής της κίσσηρης όσο και κυρίως λόγω της σημαντικής μείωσης του βάρους κατασκευής που έχει ως αποτέλεσμα.
- Όλα τα δοκίμια μετά το πέρας της δοκιμής θλίψης που υποβλήθηκαν παρουσίασαν πλάστικη συμπεριφορά
- Παρατηρήθηκε μείωση του βάρους των δοκιμών κατά 6% και μείωση της θλιπτικής αντοχής της τάξεως του 20%. Αυτές οι τιμές είναι αποδεκτές για την χρήση του ελαφροσκυροδέματος σε δευτερεύοντα δομικά στοιχεία.

9 Βιβλιογραφικές αναφορές

- Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος 2000, (ΕΚΩΣ 2000, ΟΑΣΠΣΠΜΕ)
- ΝΕΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΤΧ 2008 (ΦΕΚ 1416/Β/17-07-2008 και ΦΕΚ 2113/Β/13-10- 2008)
- Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος, 2000, Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος
- Kaplan, M. F. (1958). The effects of the properties of coarse aggregates on the workability of concrete. Magazine of Concrete Research, 10(29), 63-74.
- Πτυχιακή Εργασία “Πειραματική διερεύνηση της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος, παρασκευασμένου με προσθήκη κίσηρης (ελαφρόπετρας) σε μερική αντικατάσταση του χρονδρόκοκκου αδρανούς”. , Γ.Ανδρίτσος , Κ.Πάτσου , ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ 2020
- ΕΛΟΤ EN 206, Σκυρόδεμα: Προδιαγραφή, επιτελεστικότητα, παραγωγή και συμμόρφωση.
- FIP, Manual of Lightweight Aggregate Concrete Design, Second Edition, Surrey University Press, Halsted Press, New York, 1983.
- ΚΑΝ. ΕΠΕ. Οργανισμός Αντισεισμικής Προστασίας, www.oasp.gr, Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.), 2010
- Allington, J., Seismic Performance of Moment Resisting Frame Members Produced from Lightweight Aggregate Concrete, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Univ. of Canterbury, New Zealand, 2003
- Manrique, M. A., Bertero, V. V., Popov, E. P., Mechanical Behavior of Lightweight Concrete Confined by Different Types of Lateral Reinforcement, EERC 79/05, University of California, Berkeley, 1979
- ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Μάνος Κ. Γεώργιος “Η δράση της περισφιγξης στο οπλισμένο κισηρόδεμα”.
- Δομικά Υλικά. Αθανάσιος Χ.Τριανταφύλου.
- Κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος. Ι.Γ Χουλιάρας.
- Πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς κοντών υποστυλωμάτων από περισφιγμένο κισηρόδεμα, Έκθεση ΕΕ07, ερευνητικό έργο 716-BET-2013 «Δομικό ελαφροσκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας με κίσηρη
- ΟΔΟΠΟΪΙΑ, ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ-ΥΛΙΚΑ, ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ, Αθ. Νικολαΐδης, 1η Έκδοση, Θεσσαλονίκη 1996

- ΣΑΧΛΙΚΙΔΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ, ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΦΙΛΙΚΟ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΕΩΝ, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021
- Μεταπτυχιακή Εργασία , Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό , Γεωργία Θ. Τασούλα , ΕΜΠ, 2013
- Concrete, The international Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 5, 1, σελ. 15- 25, 1983.