

### 14.2.7 Λεπτά υλικά προστιθέμενα στο σκυρόδεμα

Τα λεπτά υλικά που προστίθενται στο σκυρόδεμα, είναι κυρίως ανόργανα και σε μορφή αλεύρου. Τα λεπτά υλικά προστιθέμενα υπό ορισμένες αναλογίες, βελτιώνουν κατά περίπτωση τις ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου σκυροδέματος. Λόγω της μεγάλης ποσότητας των λεπτών υλικών, σε αντίθεση με τα πρόσθετα υλικά που φθάνουν μέχρι 1% κατά βάρος, πρέπει αυτά να λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό του μείγματος του σκυροδέματος.

Τα κυριότερα λεπτά υλικά που προστίθενται στο σκυρόδεμα, δίνονται στον πίνακα 14.1.

Πίνακας 14.1 Λεπτά υλικά προστιθέμενα στο σκυρόδεμα.

Ανόργανα	Οργανικά
1. Πουζολάνες	1. Συνθετικά
2. Υδράσβεστος	2. Καουτσούκ
3. Ιπτάμενη Τέφρα	3. Ασφαλτικά υλικά
4. Άλεуро πετρωμάτων (π.χ. άλεуро ασβεστόλιθου, πυριτικής άμμου κ.λπ.)	
5. Μπεντονίτης	
6. Χρώματα τσιμέντου	

Τα ανόργανα λεπτά υλικά βελτιώνουν κυρίως την εργασιμότητα, την αντοχή και την πυκνότητα του σκυροδέματος.

Οι πουζολάνες, φυσικές ή τεχνητές, συνυπολογίζονται στο βάρος του τσιμέντου και βελτιώνουν τις ακόλουθες ιδιότητες:

- α. Την εργασιμότητα
- β. Τη στεγανότητα
- γ. Την αντίσταση σε διάφορες χημικές ενώσεις
- δ. Εμποδίζουν τον σχηματισμό εξανθημάτων, επειδή δεσμεύουν το  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Ο μπεντονίτης βελτιώνει την ικανότητα μεταφοράς των υγρών σκυροδεμάτων.

Κατά τη χρήση χρωμάτων, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, ότι τα χρώματα τσιμέντου με τη μεγάλη ειδική επιφάνεια (μπορεί να φθάσει τα  $700\text{m}^2/\text{g}$ ) επηρεάζουν την ενυδάτωση

του τσιμέντου, επειδή δεσμεύουν μεγάλο ποσοστό από το νερό μίξεως.

Τα οργανικά λεπτά υλικά χρησιμοποιούνται για πυκνά και κυρίως για ελαστικά σκυροδέματα.

#### 14.2.8 Μίξη του σκυροδέματος

Η μίξη του σκυροδέματος γίνεται σε αναμικτήρες και αποσκοπεί στην ανάμιξη των υλικών του σκυροδέματος μεταξύ τους, ώστε να επέλθει μια ομοιόμορφη κατανομή. Η ποιότητα της μίξεως επηρεάζει σημαντικά το απαιτούμενο νερό μίξεως, την ενυδάτωση του τσιμέντου, την αντοχή και τη στεγανότητα του σκυροδέματος.

Οι αναμικτήρες πώσεως είναι κατάλληλοι για ύφυγρα και πολύ πλούσια σε τσιμέντο σκυροδέματα, ενώ οι αναμικτήρες βίαιης αναμίξεως είναι κατάλληλοι κυρίως για σκυροδέματα υψηλής αντοχής.

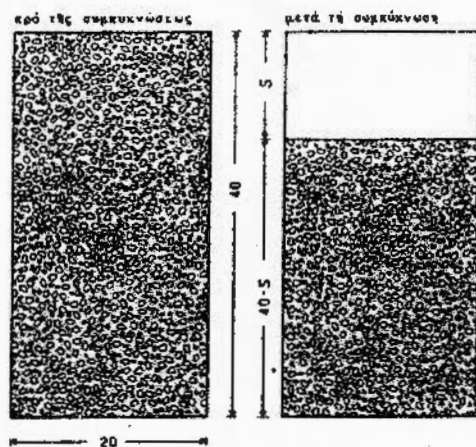
Η διάρκεια μίξεως ανέρχεται στα 30 δευτερόλεπτα κατ'ελάχιστο και συνήθως στο 1-1,5 λεπτό. Σε μικτήρες ελευθέρως πώσεως η διάρκεια φθάνει τα 1,5-2 λεπτά, όταν το σκυροδέμα είναι πλούσιο σε τσιμέντο. Διάρκεια μίξεως πέρα των 2 λεπτών δεν δίνει γενικά καλύτερη ανάμιξη και υψηλότερη αντοχή, εκτός από τα ύφυγρα μίγματα, που περιέχουν σε μεγάλο βαθμό λεπτά υλικά.

Η ποσότητα του νερού μίξεως που προστίθεται κατά την παρασκευή του σκυροδέματος, φθάνει το 3% της συνολικής ποσότητάς του.

#### 14.2.9 Συμπύκνωση του σκυροδέματος

Το σκυροδέμα μετά τη διάσπρωση (ή εντύπιση) πρέπει να συμπυκνωθεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να απομακρυνθεί ο παγιδευμένος αέρας που κλείστηκε στη μάζα του σκυροδέματος κατά την ανάμιξη. Ο αέρας που παραμένει στο σκυροδέμα μετά τη συμπύκνωση, σχηματίζει τους πόρους αέρος του σκυροδέματος και, ανάλογα με τον όγκο του, επηρεάζει σημαντικά την αντοχή. Κατά τη συμπύκνωση, προσπαθούμε πάντοτε να επιτύχουμε πλήρη συμπύκνωση, η οποία στην πράξη παρουσιάζει ένα υπόλοιπο πόρων αέρος, της τάξεως του 1-2%. Το απαιτούμενο έργο συμπυκνώσεως εξαρτάται από τη συνεκτικότητα του σκυροδέματος.

Οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη συμπύκνωση του σκυροδέματος, είναι οι ακόλουθες.



Σχήμα 14.2 Ελάττωση όγκου μετά τη συμπίκνωση.

α) Συμπύκνωση με κόπανο.

Η συμπύκνωση με κόπανο γίνεται χειρωνακτικά ή μηχανικά. Το πάχος κάθε στρώσεως φθάνει το πολύ τα 15cm. Η μέθοδος με κόπανο χρησιμοποιείται για ύφυγρα συροδέματα.

β) Αναμόχλευση με σιδερένια ραβδιά ή ξύλινες πήχες.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε σκυρόδεμα υγρό έως και πλαστικό με αβέβαια αποτελέσματα.

γ) Συμπύκνωση με δονητές.

Με τη δόνηση επιτυγχάνεται η μείωση των στατικών δυνάμεων μεταξύ των κόκκων και το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται σαν ένα υγρό, όπου τα πιο βαριά συστατικά καταβυθίζονται στη μάζα του και λαμβάνουν μια πιο πυκνή θέση μεταξύ τους. Το φαινόμενο αυτό, οδηγεί εύκολα στην απόμειξη του σκυροδέματος, δηλαδή διαχωρισμό των συστατικών του σκυροδέματος, ιδίως σε υγρά σκυροδέματα. Κατά τη συμπύκνωση με δονητές, δεν πρέπει να εμφανίζεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος ρευστός τσιμεντοπολτός, γιατί αυτό δείχνει απόμειξη.

Οι δονητές διακρίνονται σε εσωτερικούς, εξωτερικούς και σε δονητικές τράπεζες. Ο εσωτερικός δονητής βυθίζεται στη μάζα του σκυροδέματος σε αποστάσεις από 0,5-1,0m και για χρόνο από 5-30 δευτερόλεπτα, ανάλογα με το πάχος της στρώσεως του σκυροδέματος. Το πάχος των στρώσεων φθάνει συνήθως μέχρι 50cm, γιατί σε μεγαλύτερο πάχος δεν απομακρύνεται εύκολα ο παγιδευμένος αέρας.

Η ανύψωση του δονητή πρέπει να γίνεται με ταχύτητα 8cm/sec περίπου και κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η σπή που αφήνει, να κλείνει χωρίς να παγιδεύεται αέρας. Για την καλή συνάφεια μεταξύ των στρώσεων, ο δονητής πρέπει να εισχωρεί 10-20cm μέσα στη μάζα της προηγούμενης στρώσης.

Οι εξωτερικοί δονητές και οι δονητικές τράπεζες χρησιμοποιούνται συνήθως στη συμπύκνωση προκατασκευασμένων δομικών στοιχείων.

#### 14.2.10 Ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος

##### Εξίδρωση

Εξίδρωση ονομάζουμε το φαινόμενο του διαχωρισμού του νερού από τα στερεά συστατικά του σκυροδέματος, που παρουσιάζεται στην περίοδο πριν από την πήξη.

Τα στέρεα συστατικά καθιζάνουν λόγω της βαρύτητας, ενώ το νερό, λόγω των τριχοειδών δυνάμεων, έχει την τάση να κινηθεί προς τα επάνω. Έτσι εμφανίζεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος λεπτό στρώμα νερού που μοιάζει με εξίδρωση. Το νερό αυτό τελικά εξατμίζεται.

Η εξίδρωση, επομένως, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του τελικού όγκου του μείγματος και την απομάκρυνση μέρους του νερού.

Η ελάττωση του νερού είναι, βέβαια, επιθυμητή, γιατί έχει ευνοϊκό αποτέλεσμα στην αντοχή, αλλά το φαινόμενο του διαχωρισμού είναι επιβλαβές και ανεπιθύμητο γενικά, λόγω της ανομοιογένειας που δημιουργεί μέσα στη μάζα του σκυροδέματος και ειδικότερα για τα ακόλουθα δυσμενή φαινόμενα:

Α) Όπως το νερό κινείται προς τα επάνω, συμπαρασύρει το λεπτόκοκκο τμήμα του τσιμέντου. Κατά τον τρόπο αυτό το μείγμα γίνεται φτωχότερο σε τσιμέντο και στην επάνω επιφάνεια δημιουργείται λεπτό στρώμα κονίας, που ρηγματώνεται και αποφλοιώνεται.

Β) Κατά τη δίοδο του νερού ανάμεσα από τα στερεά συστατικά δημιουργούνται μέσα στον τσιμεντοπολτό λεπτοί σωληνίσκοι.

Γ) Η συγκέντρωση του νερού δε γίνεται μόνο στην επάνω επιφάνεια του σκυροδέματος, αλλά το ίδιο φαινόμενο εμφανίζεται τοπικά και στις κοιλότητες μεταξύ των σκύρων, όπου γίνεται τοπική συγκέντρωση νερού με αποτέλεσμα τη δημιουργία κοιλοτήτων.

Δ) Το ίδιο φαινόμενο δημιουργείται και σε όλο το μήκος κάτω από τις ράβδους του οπλισμού, όπου το κενό που σχηματίζεται, μειώνει την επιφάνεια συνεργασίας ανάμεσα στο σκυρόδεμα και το σίδηρο και συγχρόνως αυξάνει τον κίνδυνο διαβρώσεως των οπλισμών.

Το φαινόμενο της εξιδρώσεως επιτείνεται με την αύξηση του νερού αναμείξεως, καθώς και με την έλλειψη λεπτόκοκκων υλικών της άμμου και του τσιμέντου, γιατί με αυτό τον τρόπο διευκολύνεται η κίνηση του νερού προς τα επάνω.

Κάθε είδος τσιμέντου έχει διαφορετική ικανότητα συγκρατήσεως νερού. Ρόλο παίζει κυρίως η λεπτότητα του τσιμέντου και οι προσμίξεις.

Οι δυσμενείς επιδράσεις της εξιδρώσεως αίρονται τελείως, αν στην αρχή της πήξεως αποκατασταθεί, με αναμόχλευση και αναδόνηση της μάζας, η ομοιογένεια του υλικού. Στην περίπτωση αυτή μάλιστα η ποιότητα του σκυροδέματος βελτιώνεται λόγω της μείωσεως του νερού που έχει ήδη γίνει και λόγω μη εμφανίσεως πλέον περαιτέρω εξιδρώσεως. Προσοχή όμως απαιτεί η εκλογή της κατάλληλης στιγμής για την αναμόχλευση, γιατί πέρα από κάποιο χρονικό όριο μπορεί να καταστραφεί με την αναμόχλευση η κρυσταλλική δομή της κονίας.

### **Απόμιξη**

Τα στερεά συστατικά, όχι μόνο σαν σύνολο διαχωρίζονται από το νερό, αλλά και μεταξύ τους χωρίζονται, κατά την κίνηση προς τα κάτω, ανάλογα με το βάρος τους. Τα βαρύτερα κινούνται προς τα χαμηλότερα στρώματα και έτσι τελικά τακτοποιούνται σε στρώσεις ανάλογα με το βάρος τους. Το φαινόμενο αυτό λέγεται **απόμιξη** του σκυροδέματος.

Αν οι κόκκοι είναι από το ίδιο πέτρωμα και επομένως έχουν το ίδιο ειδικό βάρος, ο διαχωρισμός γίνεται ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων.

Το φαινόμενο της απομίξεως είναι από τα πιο καταστρεπτικά για την αντοχή και γενικά για την ποιότητα του σκυροδέματος, γιατί, όπως είναι φανερό, μεταβάλλει τις αναλογίες μίξεως κατά τρόπο ανομοιόμορφο και απρόβλεπτο.

Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται περιοχές με μειωμένη αντοχή, καθώς επίσης και μειωμένη πρόσφυση μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος από την έλλειψη κονιάματος.

### **Εργάσιμο**

Με τον όρο «εργάσιμο» ή «εργασιμότητα» χαρακτηρίζουμε γενικά την ευκολία με την οποία μπορούμε να μεταφέρουμε, διαστρώσουμε και συμπυκνώσουμε το σκυρόδεμα.

Ο ορισμός όμως αυτός δεν είναι απόλυτα ακριβής, γιατί η ευκολία αυτή κατεργασίας του νωπού σκυροδέματος συνδέεται και με τα μέσα που διαθέτουμε.

Το εργάσιμο θα πρέπει να το φανταστούμε ανεξάρτητα από τις εξωτερικές αυτές συνθήκες. Γι'αυτό σωστότερο είναι να το ορίσουμε ως το έργο που απαιτείται για την υπερνίκηση των εσωτερικών τριβών έως ότου πετύχουμε πλήρη συμπύκνωση.

Το εργάσιμο είναι μια πολύ χρήσιμη για την πράξη έννοια, γιατί αποδίδει ακριβώς αυτό που ενδιαφέρει τον κατασκευαστή κατά τον χρόνο της σκυροδετήσεως, είναι όμως ιδιότητα σύνθετη που συνδέεται με άλλες ρεολογικές ιδιότητες και που δύσκολα μπορεί να αποδοθεί ποσοτικά.

Τέτοιες ιδιότητες, με τις οποίες συνδέεται και από τις οποίες εξαρτάται το εργάσιμο, είναι οι ακόλουθες:

α) Η **ρευστότητα** που σημαίνει την ευκολία με την οποία ρέει ένα υλικό. Η ρευστότητα

εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα του νερού αναμίξεως.

β) Η **πλαστικότητα**, με την οποία νοείται η ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται χωρίς διακοπή της συνέχειάς του.

γ) Η **συνοχή**, η οποία είναι το αποτέλεσμα των δυνάμεων που έλκουν τα μόρια του υλικού μεταξύ τους και επομένως είναι μια από τις ιδιότητες που συντελούν στην πλαστικότητα.

δ) Η **συμπυκνωσιμότητα**, δηλαδή η δυνατότητα του υλικού να συμπυκνωθεί και που εξαρτάται από τον αρχικό βαθμό συμπυκνώσεως.

ε) Τέλος τον όρο **συνεκτικότητα** χρησιμοποιούμε πολλές φορές, για να εκφράσουμε άλλοτε το εργάσιμο και άλλοτε τη ρευστότητα.

Το εργάσιμο αυξάνεται γενικά όσο αυξάνεται το νερό αναμίξεως, δηλαδή η ρευστότητα του μίγματος. Η ρευστότητα εξαρτάται περισσότερο από την ποσότητα του νερού αναμίξεως και πολύ λιγότερο από τον λόγο νερού προς τσιμέντο.

Για την ίδια ρευστότητα το απαιτούμενο νερό ελαττώνεται γενικά όσο ελαττώνεται η ειδική επιφάνεια των αδρανών. Έτσι ελαττώνεται όσο αυξάνεται ο μέγιστος κόκκος και η καμπύλη κοκκομετρικής συνθέσεως των αδρανών κατεβαίνει (αυξάνεται δηλαδή το χοντρόκοκκο υλικό). Από τη άλλη πλευρά όμως η αύξηση του μέγιστου κόκκου και των χοντρόκοκκων αδρανών συντελεί στη μείωση της πλαστικότητας και της συνοχής με κίνδυνο την απόμιξη.

Με την προϋπόθεση ότι το σκυρόδεμα θα συμπυκνωθεί τελείως, το εργάσιμο δεν έχει επίδραση στην τελική αντοχή του σκυροδέματος.

Η μέτρηση του εργάσιμου δεν μπορεί να γίνει απευθείας. Γίαιυτό έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι με τις οποίες μετρούμε, όπως θα δούμε, μία ή περισσότερες από τις άλλες ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Με τις μετρήσεις αυτές αποκτούμε μια άμεση και κατά προσέγγιση εικόνα του βαθμού εργασιμότητας του σκυροδέματος. Οι κυριότερες από τις μεθόδους αυτές, που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα, είναι σε συντομία οι ακόλουθες:

#### α) Κάθιση

Μεταλικός κόλουρος κώνος ανοιχτός επάνω και κάτω (διάμετρος κάτω βάσεως 8 ίντσες, διάμετρος άνω βάσεως 4 ίντσες και ύψος 12 ίντσες) γεμίζεται με σκυρόδεμα και συμπυκνώνεται με καθορισμένο τρόπο. Μετά την πλήρωση αφαιρείται ο κώνος κατακόρυφα, οπότε το σκυρόδεμα παραμορφώνεται και κάθετα. Η κάθιση πρέπει να γίνει χωρίς διατμητική θραύση του υλικού. Μετρούμε τη διαφορά του ύψους του υλικού μετά την πτώση από το αρχικό ύψος.

### β) Μέτρο εξαπλώσεως

Μεταλλικός τύπος που έχει τη μορφή της παράπλευρης επιφάνειας κώλου που γεμίζεται με το σκυρόδεμα και συμπυκνώνεται με καθορισμένο τρόπο. Ο τύπος με το σκυρόδεμα είναι τοποθετημένος επάνω σε βάση (τράπεζα εξαπλώσεως) που έχει τη δυνατότητα να ανυψώνεται και να πέφτει ελεύθερα σε τρόπο και να μεταδίδει τις κρούσεις στη μάζα του σκυροδέματος. Μετά την αφαίρεση του κώνου (όπως και στη μέτρηση της καθίσεως) η βάση αναγκάζεται να πραγματοποιήσει ορισμένο αριθμό κρούσεων, έτσι ώστε το σκυρόδεμα να απλωθεί πέρα από την αρχική κάθιση.

Η μέση διάμετρος της μάζας του σκυροδέματος, όπως έχει διαμορφωθεί ονομάζεται **μέτρο εξαπλώσεως**.

### γ) Μέτρο συμπυκνώσεως

Το σκυρόδεμα εισάγεται χωρίς καμία συμπύκνωση σε μεταλλικό δοχείο, διαστάσεων 20x20cm και ύψος 40cm. Μόλις το δοχείο γεμίσει, δονείται ωστόσο συμπυκνωθεί τελείως.

Ο λόγος του αρχικού ύψους προς το τελικό 40/h, χαρακτηρίζεται ως **μέτρο συμπυκνώσεως**.

### δ) Δοκιμή VEBE

Η συσκευή VEBE αποτελείται από έναν κώνο παρόμοιο με τον κώνο καθίσεως τοποθετημένο μέσα σε άλλο κυλινδρικό δοχείο διαμέτρου και μια τράπεζα δονήσεως. Μετά την αφαίρεση του κώνου το σκυρόδεμα κάθεται, αλλά συγχρόνως υποβάλλεται σε δόνηση και συμπυκνώνεται παίρνοντας την μορφή του εξωτερικού κυλινδρικού δοχείου.

Ο χρόνος από τη στιγμή της απομακρύνσεως του κώνου και της σύγχρονης ενάρξεως της δονήσεως έως την πλήρη επιπεδότητα της άνω επιφάνειας ονομάζεται **χρόνος VEBE**.

Η επιπεδότητα της άνω επιφάνειας διαπιστώνεται από διαφανή κυκλικό δίσκο που παρακολουθεί την παραμόρφωση του σκυροδέματος. Η επιπεδότητα έχει πραγματοποιηθεί, όταν το σκυρόδεμα καλύψει ολόκληρο τον κυκλικό δίσκο.

(Η συσκευή VEBE έχει υιοθετηθεί από τους Κανονισμούς πολλών χωρών)

Με βάση τις τιμές των χαρακτηριστικών αυτών μεγεθών, που τις μετρούμε με τις παραπάνω μεθόδους, χωρίζεται συμβατικά το σκυρόδεμα σε διάφορες κατηγορίες εργασίμου. Έτσι π.χ. οι Γερμανικοί κανονισμοί προβλέπουν τις κατηγορίες: ύφυγρο, πλαστικό, και ρευστό σκυρόδεμα.

Καθεμία από τις παραπάνω μεθόδους είναι κατάλληλη για διαφορετική περιοχή εργασίμου. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν δονητή είναι κατάλληλες για περισσότερο ύφυγρα σκυροδέματα, δηλαδή σκυροδέματα με μικρότερο εργασίμο.

Ο ακόλουθος συγκεντρωτικός πίνακας δίνει την αντιστοιχία των τιμών που προκύπτουν από διάφορες μεθόδους που έχουν προταθεί για τη μέτρηση του εργασίμου.

Ο Ελλ. Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος προδιαγράφει για τη μέτρηση του εργασίμου την κάθιση (Προδιαγραφή ΣΚ – 309), την εξάπλωση (ΣΚ – 318) και για ύφυγρα μίγματα τη μέθοδο VEBE (ΣΚ – 310).

Όσον αφορά τις απαιτήσεις εργασίμου, για τα οπλισμένα σκυροδέματα που συμπυκνώνονται στο εργοτάξιο με συνήθη δονητικά μέσα, απαιτεί κάθιση τουλάχιστον 5cm για θραυστά αδρανή και τουλάχιστον 3cm για φυσικά αδρανή. Σκυροδέματα με μικρότερη κάθιση μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνον για προκατασκευασμένα στοιχεία.

Αν, τέλος, η εργασιμότητα δεν προδιαγράφεται από τον μελετητή ή τον επιβλέποντα, η μελέτη συνθέσεως θα γίνει με κάθιση 10 – 12cm.

Συνήθως όμως στην πράξη απαιτούνται εργασιμότητες της τάξεως των 14 – 15 cm κάθισης, πράγμα το οποίο μπορεί να επιτευχθεί, χωρίς μείωση της αντοχής, με την προσθήκη υπερρρευστοποιητικών.

#### **14.2.11 Αντοχή των πρώτων ωρών του νωπού σκυροδέματος**

Η αντοχή των πρώτων ωρών του σκυροδέματος προέρχεται κυρίως από τη συνοχή, την εσωτερική τριβή και από τα ένυδρα του τσιμέντου που σχηματίζονται τις πρώτες ώρες μετά τη μίξη. Η αντοχή αυτή ανέρχεται, για ευνοϊκές συνθήκες του μείγματος του σκυροδέματος και  $w=0,35-0,45$ , σε 2 έως  $3\text{kp/cm}^2$  και κατά μέγιστο σε  $5\text{kp/cm}^2$ . Η αντοχή των πρώτων ωρών είναι απαραίτητη, συνήθως στην προκατασκευή δομικών στοιχείων, για το γρήγορο ξεκαλούπωμα.

#### **14.2.12 Δοκιμές νωπού σκυροδέματος**

Εκτός από τις δοκιμές του τσιμέντου και των αδρανών, είναι επίσης απαραίτητες και οι δοκιμές του σκυροδέματος, τις οποίες κατατάσσουμε σε τρεις κατηγορίες.

- I. Δοκιμές καταλληλότητας
- II. Δοκιμές ελέγχου ποιότητας
- III. Δοκιμές σκληρύνσεως.

Στις δοκιμές καταλληλότητας ελέγχεται, εάν ένα σκυρόδεμα που σκοπεύουμε να χρησιμοποιήσουμε, από δεδομένα αδρανή και τσιμέντο, ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις ενός συγκεκριμένου έργου.



Οι δοκιμές ελέγχου ποιότητας, γίνονται κατά τη διάρκεια της κατασκευής του έργου σε δοκίμια από το ίδιο σκυρόδεμα, με προκαθορισμένη συντήρηση των δοκιμίων. Η αντοχή που βρίσκεται, δεν είναι η ίδια με εκείνη του σκυροδέματος του δομικού στοιχείου (από το σκυρόδεμα του οποίου έγιναν και τα δοκίμια ελέγχου), γιατί η σκλήρυνση του δομικού στοιχείου γίνεται υπό διαφορετικές συνθήκες.

Οι δοκιμές σκληρύνσεως δίνουν μια πραγματική εικόνα της αντοχής του σκυροδέματος του έργου, γιατί τα δοκίμια συντηρούνται ακριβώς όπως και το δομικό στοιχείο.

Οι κυριότερες δοκιμές του νωπού σκυροδέματος είναι οι ακόλουθες:

1. Προσδιορισμός συνεκτικότητας
2. Προσδιορισμός του όγκου των πόρων αέρος
3. Προσδιορισμός της σύνθεσης του σκυροδέματος
  - α) αναλογία μίξεως
  - β) περιεκτικότητα τσιμέντου
  - γ) υδατοτσιμεντοσυντελεστής

#### 14.2.13 Σκληρωμένο σκυρόδεμα - Η αντοχή σε εξωτερικές δυνάμεις

*Γενικά για την αντοχή*

Μια από τις βασικές ιδιότητες του υλικού είναι η αντοχή του.

**Αντοχή ονομάζουμε γενικά τη μέγιστη τιμή της δυνάμεως, που μπορεί να παραληφθεί και μεταβιβαστεί από ένα στοιχειώδες τμήμα του υλικού στο γειτονικό, χωρίς καταστροφή ή επικίνδυνη παραμόρφωσή του.**

**Επειδή η δύναμη αυτή μεταβάλλεται με το μέγεθος του στοιχειώδους τμήματος, διαιρούμε τη δύναμη με την επιφάνεια στην οποία εξασκείται η δύναμη. Το νέο μέγεθος αναφέρεται σε τάσεις που μετρούνται σε μονάδες δύναμης προς επιφάνειας.**

Αλλά η αντοχή εξαρτάται τόσο από τη φύση και την ποιότητα του υλικού, όσο και από τη μορφή της εντατικής καταστάσεως (απλοποιητικά θα μπορούσαμε να πούμε τις δυνάμεις και τη διεύθυνση και το σημείο που ασκούνται). Διαφορετική εμφανίζεται η αντοχή σε κάποια συγκεκριμένη καταπόνηση από ένα στοιχείο σ'ένα άλλο και διαφορετική για το ίδιο στοιχείο, αν η καταπόνηση είναι αποτέλεσμα διαφορετικής εντατικής καταστάσεως.

Το σωστό στην προκείμενη περίπτωση είναι ότι η «αντοχή» δεν είναι σταθερή ιδιότητα του υλικού, αλλά αντοχή συγκεκριμένου υλικού σώματος σε συγκεκριμένη εξωτερική καταπόνηση.

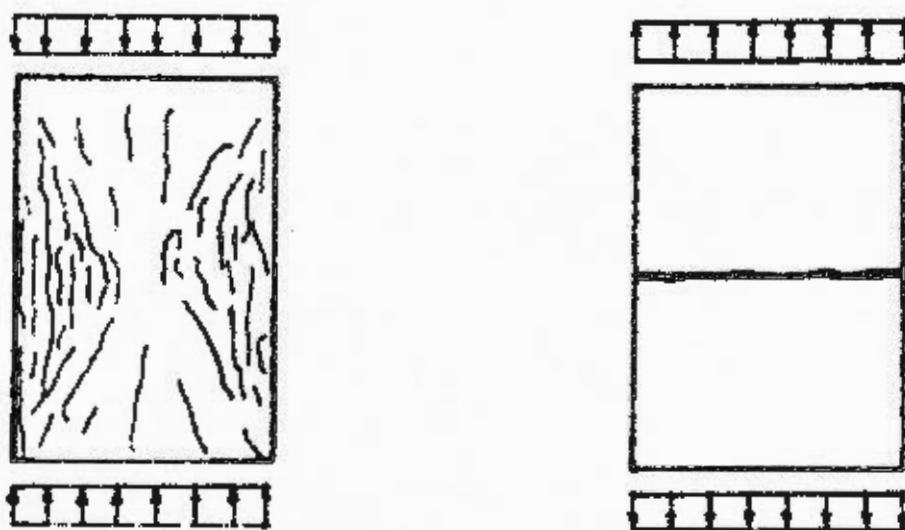
Για να γίνει το φαινόμενο καλύτερα κατανοητό, χρήσιμη είναι μια λεπτομερέστερη θεώρηση του μηχανισμού της αντοχής.

#### Η αντοχή του σκυροδέματος και ο μηχανισμός της θραύσεως

Έως τώρα, εξετάστηκε η αντοχή μόνο ως μηχανικό φαινόμενο ανεξάρτητα από τη φύση του υλικού. Εκτός απ'αυτό όμως, πρακτικοί, τεχνολογικοί παράγοντες επιδρούν, τόσο κατά την παρασκευή του σκυροδέματος, όσο και στη μέτρηση της αντοχής.

Οι παράγοντες αυτοί είναι οι ακόλουθοι:

- οι αναλογίες συνθέσεως, δηλαδή οι ποσότητες του τσιμέντου, του νερού και των αδρανών σε κάθε κυβικό μέτρο,
- η ποιότητα των υλικών, στην οποία περιλαμβάνονται όχι μόνον η ποιότητα των τριών συστατικών, αλλά και ο βαθμός αλέσεως του τσιμέντου, το σχήμα και η μορφή των αδρανών, η κοκκομετρική διαβάθμιση, η ποιότητα του πετρώματος των αδρανών,



Σχήμα 14.3 Θραύση σκυροδέματος σε θλίψη και εφελκυσμό.

- τα παρασπτικά υλικά που αθέλητα εισχωρούν είτε μαζί με τους κόκκους των αδρανών, είτε με το νερό,
- η συμπύκνωση του νωπού σκυροδέματος,
- η ηλικία του σκυροδέματος,
- ο τρόπος συντηρήσεως, δηλαδή οι θερμοκρασιακές και υγρομετρικές συνθήκες του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο γίνεται η πήξη και σκλήρυνση του σκυροδέματος,
- η μορφή του δοκιμίου, στην οποία πρέπει να περιλάβουμε το σχήμα, το μέγεθος, την εξωτερική υφή, την επιπεδότητα ή καμπυλότητα των παρειών και την ακρίβεια των γωνιών,

- τέλος, η μορφή της καταπόνησεως, δηλαδή ο τρόπος και η ταχύτητα φορτίσεως.

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες δημιουργούν ένα μεγάλο πλήθος μικροδιαφορών μέσα στη μάζα του σκυροδέματος, οι οποίες προκαλούν διακύμανση των τιμών της αντοχής.

Έχει διαπιστωθεί ότι ασυνέχειες (μικρορρωγμές) υπάρχουν στη μάζα του υλικού ακόμα και πριν από κάθε καταπόνηση. Οι μικρορρωγμές αυτές δημιουργούνται κυρίως από τις συστολές της κονίας κατά την πήξη, από τις συστολές που οφείλονται στην εξάτμιση του νερού και ενδεχομένως από κακή πρόσφυση μεταξύ κονιάματος και αδρανών. Οι ρωγμές αυτές παραμένουν περίπου σταθερές, εφόσον το φορτίο είναι το πολύ ίσο προς το 1/3 περίπου του φορτίου θραύσεως. Από την τιμή αυτή περίπου οι ρωγμές αρχίζουν να επεκτείνονται και πολλαπλασιάζονται γρήγορα ωσότου το φορτίο φτάσει τα 2/3 περίπου του φορτίου θραύσεως. Κατά το στάδιο αυτό οι ρωγμές αποτελούν συνεχές πλέγμα και μεταξύ κονιάματος και αδρανών και μέσα στο κονίαμα. Με αύξηση του φορτίου πέρα από την τιμή αυτή το πλέγμα των ρωγμών επεκτείνεται πάρα πολύ γρήγορα έως την κατάρρευση του υλικού.

Από την περιγραφή αυτή του μηχανισμού της θραύσεως προκύπτει ότι στην από κατασκευής ανομοιογένεια του υλικού (σκύρα, κονίαμα) πρέπει να συμπεριληφθούν και οι μικρορρωγμές που υπάρχουν απαρχής στο υλικό. Οι ρωγμές αυτές είναι διασκορπισμένες προς κάθε κατεύθυνση μέσα στη μάζα του υλικού, σε τρόπο ώστε να μη δημιουργείται μακροσκοπικώς ετερογενής συμπεριφορά. Όταν όμως επιβληθεί εξωτερικό, π.χ. θλιπτικό, φορτίο, οι εσωτερικές δυνάμεις μέσα στη μάζα δεν κατανέμονται ομοιόμορφα, αλλά δημιουργούνται σημεία τοπικής συγκεντρώσεως τάσεων, καθώς και περιοχές εφελκυσμού. Τα σημεία αυτά αποτελούν τα σημεία από τα οποία αρχίζει η καταστροφή του υλικού.

*Η αντοχή στις διάφορες μορφές καταπόνησεων.*

- Στατική καταπόνηση σε θλίψη και εφελκυσμό

Οι θλιπτικές αντοχές που κατορθώνουμε να πετύχουμε βρίσκονται συνήθως ανάμεσα στα όρια 50kg/cm<sup>2</sup> και 600kg/cm<sup>2</sup> περίπου. Για ειδικούς όμως σκοπούς, όπως στην κατασκευή κώνων αγκυρώσεως, κατασκευάζονται σκυροδέματα με ακόμη μεγαλύτερες αντοχές.

Η εφελκυστική αντοχή κυμαίνεται στο 1/10 έως 1/15 της θλιπτικής αντοχής. Δεν έχει βρεθεί άμεση αντιστοιχία ανάμεσα στη θλιπτική και εφελκυστική αντοχή.

Από τα πειραματικά στοιχεία που έχουμε, προκύπτει ότι με την αύξηση της θλιπτικής αντοχής αυξάνεται και η εφελκυστική αντοχή, ο λόγος όμως εφελκυστικής προς θλιπτική αντοχή μειώνεται, δηλαδή η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής δεν είναι ανάλογη με την αύξηση της θλιπτικής.

Τέλος, η εφελκυστική αντοχή είναι πιο ευαίσθητη στη συντήρηση. Το τελευταίο μπορεί να εξηγηθεί από την άμεση εξάρτηση του εφελκυσμού από την έκταση των

μικρορρηγματώσεων μέσα τη μάζα του σκυροδέματος.

Ο ελληνικός κανονισμός δίνει για την τιμή της εφελκυστικής αντοχής από τη θλιπτική το ακόλουθο πίνακίδιο:

$f_{ck}$	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ctk} 0,05$	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
$f_{ctm}$	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4	3,7	4,0
$f_{ctk} 0,95$	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	4,8	5,2

Όπου  $f$  σημαίνει αντοχή και οι δείκτες  $c$  σκυρόδεμα,  $t$  εφελκυσμό,  $m$  τη μέση τιμή και την καμπτική αντοχή και  $k$  τη χαρακτηριστική αντοχή υπολογισμένη όπως προβλέπει ο κανονισμός.

Η αντοχή σε καμπτικό εφελκυσμό είναι περίπου διπλάσια. Αυτό συμβαίνει και λόγω του μικρότερου κρίσιμου όγκου και λόγω της βαθμιαίας πλαστικοποίησης του υλικού.

- *Πολυαξονική καταπόνηση*

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε πολυαξονική καταπόνηση, ιδίως θλιπτική, είναι γενικά παρόμοια με τη συμπεριφορά των άλλων υλικών. Σε περίπτωση σύγχρονης παρουσίας εγκάρσιων θλιπτικών τάσεων, η θλιπτική αντοχή εμφανίζεται αυξημένη. Η παρουσία εγκάρσιας εφελκυστικής τάσεως μειώνει γρήγορα την αντοχή σε θλίψη κατά την άλλη διεύθυνση.

- *Επαναλαμβανόμενη καταπόνηση*

Επαναλαμβανόμενη καταπόνηση με το ίδιο φορτίο ή μεταβολή της δύναμης μεταξύ δύο ορίων  $F_{min}$  και  $F_{max}$  μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη θραύση του υλικού, έστω και αν η μέγιστη δύναμη  $F_{max}$  (και κυρίως η αντίστοιχη τάση) δεν υπερβαίνει τη στατική αντοχή του υλικού. Το φαινόμενο αυτό, όπως είναι γνωστό, ονομάζεται κόπωση του υλικού.

Για να συμβεί όμως η αστοχία, πρέπει η τάση  $\sigma_{max}$  να υπερβαίνει κάποιο όριο, που ονομάζεται όριο κοπώσεως. Στην προκείμενη περίπτωση αναφερόμαστε σε θλιπτικές μόνο καταπονήσεις. Το όριο αυτό στο σκυρόδεμα βρίσκεται στα 0,65-0,70 περίπου της στατικής αντοχής σε θλίψη.

Αντίθετα, όταν η μέγιστη τάση δεν υπερβεί το όριο αυτό, έχει παρατηρηθεί, ύστερα από ένα αριθμό επαναλήψεων, βελτίωση του σκυροδέματος, αύξηση δηλαδή της στατικής αντοχής (και της αντοχής σε κόπωση) έως 10% περίπου.

Διακοπή της καταπόνησεως για λίγα λεπτά έχει ως αποτέλεσμα να ανακτήσει το σκυρόδεμα μέρος της αντοχής του.

Η καταστροφή του σκυροδέματος κατά την επαναλαμβανόμενη καταπόνηση αποδίδεται σε βαθμιαία κατάλυση της συνάφειας κονιάματος και σκυροδέματος. Η απορροφούμενη ενέργεια εκδηλώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού.

Η κόπωση, πάντως, του σκυροδέματος είναι φαινόμενο που δεν αντιμετωπίζεται στις συνηθισμένες κατασκευές, εφόσον το όριο κοπώσεως είναι μεγαλύτερο από 0,65 της στατικής αντοχής, ενώ οι τάσεις που επιτρέπουμε ανέρχονται σε 0,33-0,57 της στατικής αντοχής.

#### 14.2.14 Η ανάπτυξη της αντοχής με τον χρόνο

Η αντοχή είναι αποτέλεσμα της ενυδατώσεως του τσιμέντου και γι'αυτό η εξέλιξη της ακολουθεί τον ίδιο εκθετικό νόμο που ακολουθεί η χημική αντίδραση. Η ανάπτυξη της αντοχής όμως είναι διαφορετική για καθένα από τα βασικά συστατικά του τσιμέντου και γι'αυτό και η χρονική εξέλιξη της αντοχής, ιδιαίτερα στις μικρές ηλικίες, εξαρτάται από τη σύνθεση του τσιμέντου. Άλλοι παράγοντες είναι ο βαθμός αλέσεως του τσιμέντου δηλαδή το μέγεθος των κόκκων του καθώς και οι θερμοκρασιακές και υγρομετρικές συνθήκες του περιβάλλοντος.

Για όλους αυτούς τους λόγους, η ακριβής ποσοτική εκτίμηση της εξελίξεως της αντοχής μόνο με δοκιμές με τον ίδιο τύπο τσιμέντου, τα ίδια υλικά και τις ίδιες συνθήκες συντηρήσεως μπορεί να γίνει.

Στην περίπτωση που αυτό δεν είναι δυνατό να γίνει, οι Κανονισμοί προβλέπουν ορισμένους συντελεστές που δίνουν ένδειξη του μεγέθους της αντοχής, για συνηθισμένες μέσες συνθήκες συντηρήσεως.

Ο Γερμανικός Κανονισμός DIN 1045, έκδοση 1972, δίνει τις τιμές του πίνακα 14.3 και οι Κανονισμοί της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Σκυροδέματος (C.E.B.) τις τιμές του πίνακα 14.4.

Κατηγορία Τσιμέντου	αντοχή 28 ημερών / αντοχή 7 ημερών
250	1.4
350L	1.3
350F και 450L	1.2
450F και 550	1.1

Πίνακας 14.3 Μεταβολή αντοχής για 7 & 28 ημέρες κατά DIN 1045-1972.

Ηλικία σκυροδέματος (ημέρες)	3	7	28	90	360
Τσιμέντο κανονικό	0.40	0.65	1.00	1.20	1.35
Τσιμέντο ταχύηκτο	0.55	0.75	1.00	1.15	1.20
Εφελκυστική αντοχή/ Τσ. Κανον.	0.40	0.70	1.00	1.05	1.10

Πίνακας 14.4 Συντελεστής εξελίξεως αντοχής σκυροδέματος κατά CEB

#### 14.2.15 Η μέτρηση της αντοχής

Επειδή η αντοχή εξαρτάται, όπως είδαμε, από το σχήμα και το μέγεθος του δοκιμίου επάνω στο οποίο μετρείται και επειδή επίσης επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων, είναι ανάγκη να καθορίσουμε κάποιον συμβατικό τρόπο μετρήσεως της, ώστε τα αποτελέσματα των μετρήσεων να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους.

Για τους λόγους αυτούς καθορίζεται στους Κανονισμούς το σχήμα και οι διαστάσεις του δοκιμίου και περιγράφεται με κάθε λεπτομέρεια ο τρόπος παρασκευής, συντηρήσεως και μετρήσεως της αντοχής.

Αν για τον προσδιορισμό της αντοχής εφαρμοστεί διαφορετική μέθοδος ή χρησιμοποιηθούν δοκίμια διαφορετικού σχήματος ή μεγέθους από αυτά που καθορίζει ο Κανονισμός, το αποτέλεσμα της μετρήσεως πρέπει να αναχθεί στη «συμβατική αντοχή», δηλαδή στην αντοχή του δοκιμίου που καθορίζει ο Κανονισμός. Αν π.χ. χρησιμοποιηθούν δοκίμια πλευράς 40cm ή 10cm, η αντοχή των δοκιμίων αυτών πρέπει να μετατραπεί στην αντοχή που θα είχε το συμβατικό δοκίμιο πλευράς 20cm. Για να γίνει όμως η μετατροπή αυτή, έστω και αν τα αποτελέσματα προέρχονται από πειραματικά δεδομένα, εισάγεται ένα νέο στατιστικό σφάλμα, που κάνει την τιμή της αντοχής ακόμη περισσότερο αμφίβολη.

Τα φαινόμενα που εξαρτώνται από το μέγεθος και τη μορφή του δοκιμίου και τα οποία επιδρούν, με τη σειρά τους, στην αντοχή είναι συνοπτικά τα ακόλουθα:

- Η εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια και η πρόοδος της ενυδατώσεως εξαρτώνται από την έκταση της επιφάνειας του δοκιμίου σε συσχετισμό με τον όγκο του.
- Η επιφανειακή μικρορρηγμάτωση που ρφείλεται στις διαφορετικές συστολές του δοκιμίου κατά την ξήρανση και την ενυδάτωσή του. Αν η μικρορρηγμάτωση αυτή θεωρηθεί περίπου σταθερή για κάθε μονάδα επιφάνειας, τότε είναι διαφορετική για κάθε μονάδα όγκου και είναι πολύ πιο έντονη η επίδρασή της στα μικρά δοκίμια.
- Η τριβή των πλακών θλίψεως κατά τη δοκιμή θραύσεως παρεμποδίζει την εγκάρσια διαστολή του δοκιμίου και επομένως επηρεάζει περισσότερο τα μικρά δοκίμια.
- Στατιστικοί λόγοι. Στα μεγαλύτερα δοκίμια υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να βρεθούν περιοχές μειωμένης αντοχής. Οι περιοχές αυτές παίζουν αποφασιστικό ρόλο στην έναρξη της θραύσεως.

- Η δομή, τέλος, του δοκιμίου, δηλαδή η σχέση των κόκκων των αδρανών προς τις διαστάσεις του.

#### 14.2.16 Εκτίμηση της αντοχής σκυροδέματος έργου

Με τη θραύση ενός δοκιμίου κατά τον τρόπο που περιγράφει ο Κανονισμός προσδιορίζουμε την αντοχή του συγκεκριμένου δοκιμίου. Πλήθος όμως δοκιμίων από την ίδια ποσότητα σκυροδέματος δε δίνει πάντοτε την ίδια ακριβώς τιμή της αντοχής. Αιτία της "διασποράς" των αντοχών, όπως είδαμε, είναι ο μεγάλος αριθμός δευτερευόντων παραγόντων που ονομάζουμε "τυχαία περιστατικά". Ο κανονισμός δέχεται ένα μοντέλο πιθανοκρατικό για να προσδιορίσει τη «μέση τιμή» όλου του σκυροδέματος. Έτσι ο κανονισμός ορίζει ότι «**χαρακτηριστική τιμή**» είναι η τιμή της αντοχής για την οποία η πιθανότητα να εμφανισθούν τιμές μικρότερες από αυτή είναι 5%.

Στον παλαιό Ελληνικό Κανονισμό (ΒΔ 28-2-54) και το παλαιό DIN 1045 καθορίζεται ως αντοχή της ποσότητας του σκυροδέματος ο μέσος όρος τριών δοκιμίων τουλάχιστο για κάθε ορισμένη ποσότητα (200m<sup>3</sup>). Τα δοκίμια είναι κυβικά πλευράς 20cm, συντηρούνται σε θερμοκρασία 10-25C°, έως την 7<sup>η</sup> ημέρα σκεπάζονται με υγρά υφάσματα και θραύονται την 28<sup>η</sup> ημέρα.

Στον Γερμανικό Κανονισμό (DIN 1045, έκδοση 1972), "ονομαστική αντοχή" του σκυροδέματος ορίζεται η μικρότερη από τις αντοχές τριών δοκιμίων, ενώ ο μέσος όρος οφείλει να είναι μεγαλύτερος κατά 50kg/cm<sup>2</sup> από την τιμή αυτή.

Με τον νέο αυτόν καθορισμό της αντοχής ποσότητας σκυροδέματος έχει ληφθεί υπόψη ο παραπάνω συλλογισμός της αντοχής με πιθανότητα να εμφανισθούν μικρότερες τιμές περίπου 5%.

#### Ελληνικός Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος

Ο Ελληνικός ΚΤΣ προβλέπει για τον έλεγχο της αντοχής τα ακόλουθα:

##### α) Συμβολισμοί

$f_{28}$  = Συμβατική αντοχή δοκιμίου σε θλίψη γενικά

$f_{ck}$  = Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος σε θλίψη

$f_m$  = Μέση αντοχή σκυροδέματος σε θλίψη

$f_a$  = Απαιτούμενη αντοχή σκυροδέματος σε θλίψη

$X_n$  = Μέσος αριθμός συμβατικής αντοχής  $n$  δοκιμίων μιας δειγματοληψίας

$X_i$  = Συμβατική αντοχή ενός δοκιμίου μιας δειγματοληψίας

$S$  = Τυπική απόκλιση των συμβατικών αντοχών ενός αριθμού δοκιμίων

$n$  = Αριθμός δοκιμίων