

3

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΩΠΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Εισαγωγή

Βασική προϋπόθεση για την ορθή κατασκευή ενός δομικού στοιχείου από σκυρόδεμα είναι το σκυρόδεμα να μπορεί να διαστρωθεί και να συμπυκνωθεί σωστά στις προβλεπόμενες διαστάσεις και το προβλεπόμενο σχήμα. Εάν δεν πληρούνται οι προϋποθέσεις αυτές το σκυρόδεμα είναι σχεδόν άχρηστο. Η γνώση επομένως των ιδιοτήτων του νωπού σκυροδέματος είναι απαραίτητη για να μπορούν να εξασφαλιστούν οι παραπάνω βασικές απαιτήσεις.

Εργασιμότητα¹

Με τον όρο αυτό συνήθως εκφράζεται η ιδιότητα του νωπού σκυροδέματος, η οποία καθορίζει την ευκολία με την οποία το σκυρόδεμα αναμιγνύεται, διαστρώνεται, συμπυκνώνεται και μορφώνεται τελικά, παίρνοντας το σχήμα των τύπων χωρίς να απομιγνύεται. Ο ορισμός αυτός είναι πολύ γενικός και αόριστος διότι δεν ορίζεται η μορφή και το σχήμα των τύπων ούτε τα συμπυκνωτικά μέσα τα οποία διατίθενται, χαρακτηριστικά από τα οποία εξαρτάται η ευκολία επίτευξης των παραπάνω απαιτήσεων.

Θα ήταν επίσης δυνατόν να ορισθεί ως εργασιμότητα το έργο που απαιτείται για να υπερνικηθούν οι εσωτερικές τριβές μεταξύ των κόκκων του σκυροδέματος και μεταξύ σκυροδέματος και των επιφανειών των καλουπιών και των επιφανειών των ράβδων οπλισμού.

Συχνά αντί του όρου εργασιμότητα χρησιμοποιείται ο όρος «συνεκτικότητα» (πχ το Πρότυπο ΕΛΟΤ / EN 206). Επίσης, συχνά η ρευστότητα ή η ικανότητα του σκυροδέματος να μετακινείται αναφέρεται και ως συνεκτικότητα.

Η εργασιμότητα είναι σύνθετη έννοια και περιλαμβάνει έννοιες όπως:

- **Πλαστιμότητα** ή πλαστικότητα: έννοια που έχει να κάνει με την **συνοχή** του μίγματος με την ικανότητα αυτού να παραμορφώνεται χωρίς να εμφανίζει ρωγμές.
- **Ρευστότητα**: την ικανότητα του μίγματος να ρέει δηλ το «ιξώδες» του μίγματος.

¹ Ο αντίστοιχος όρος στα αγγλικά είναι Workability
στα γαλλικά είναι maniabilité, ouvrabilité,
στα γερμανικά είναι Verarbeitbarkeit

- **Σταθερότητα** (ή αναπόμικτον): την ικανότητα του μίγματος να διατηρεί την ομοιγένειά του και να μην απομινύεται (διαχωρίζεται) κατά την διάρκεια της μεταφοράς, διάστρωσης και συμπύκνωσής του. Η έννοια αυτή σε μεγάλο βαθμό εξαρτάται από τη συνοχή του μίγματος.

Με την ευρύτερη έννοια ο όρος “εργασιμότητα” θα μπορούσε κατ’ επέκταση να συμπεριλαμβάνει και την:

- **Τελειωσιμότητα**: την ικανότητα του σκυροδέματος να μορφώνεται τελικά και η επιφάνειά του να παίρνει την επιθυμητή μορφή με ευκολία.
- **Αντλησιμότητα**: την ικανότητα του μίγματος να αντλείται χωρίς προβλήματα.
- **Εξίδρωση**: την μετακίνηση μέρους του νερού ανάμιξης κατακόρυφα προς τα πάνω, και την εμφάνιση ελεύθερου νερού στις οριζόντιες επιφάνειες του σκυροδέματος, έννοια που εν μέρει περιλαμβάνεται στον όρο σταθερότητα (αναπόμικτον). (Μέθοδος μέτρησης ASTM C232 & C243)

Οι έννοιες όμως αυτές έχουν κυρίως περιγραφικό χαρακτήρα, διακρίνουν το μίγμα «ποιοτικά» αλλά οι περισσότερες δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν εύκολα.

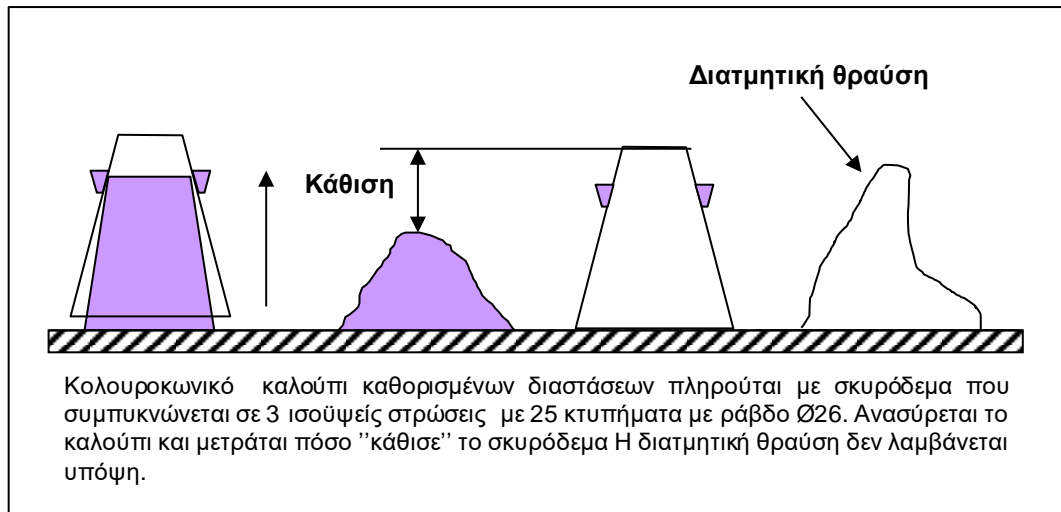
Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες να χαρακτηριστεί η συμπεριφορά του νωπού σκυροδέματος, θεωρώντας το ως υγρό, με θεμελιώδεις έννοιες, όπως είναι το ιξώδες και η “τάση έναρξης μετακίνησης” γνωστή ως τάση διαρροής (yield stress) (βλ ρεολογικές ιδιότητες).

Στην πράξη έχουν αναπτυχθεί διάφορες εμπειρικές δοκιμές με τις οποίες χαρακτηρίζεται η συμπεριφορά του νωπού σκυροδέματος για τις δεδομένες συνθήκες της δοκιμής.

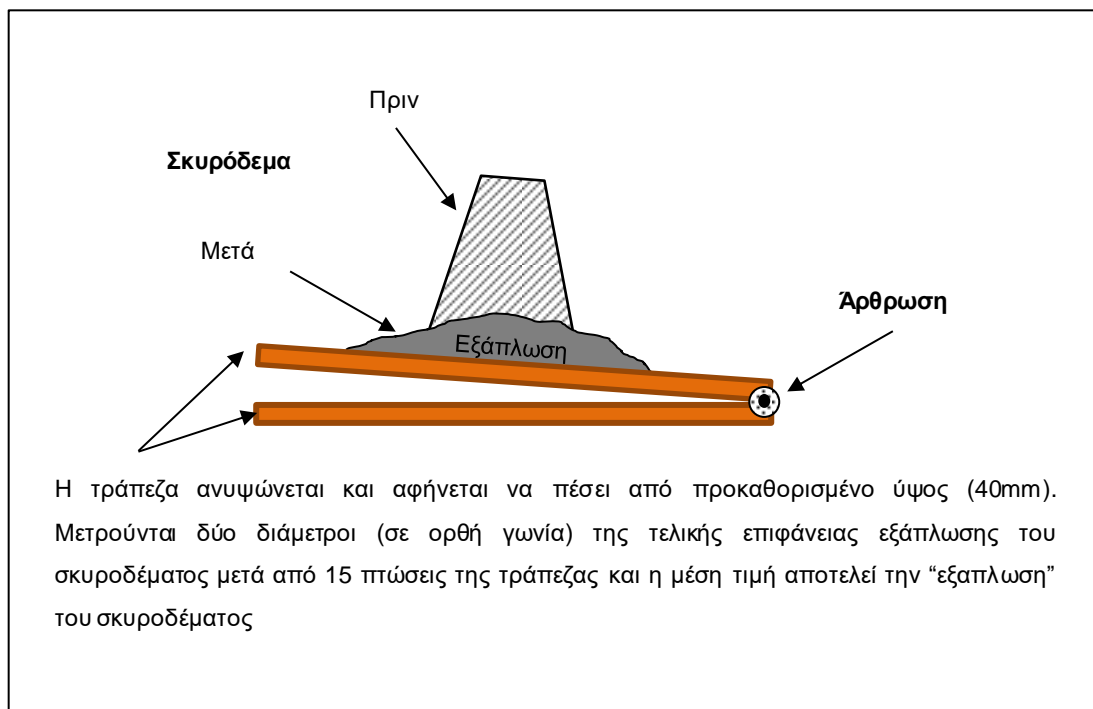
Έτσι σήμερα, χρησιμοποιούνται πολλές εμπειρικές μέθοδοι δοκιμής από τις οποίες οι πιο διαδεδομένες που προβλέπονται από το Πρότυπο ΕΛΟΤ/ΕΝ 206, είναι οι δοκιμές που παρατίθενται στον Πίνακα 1 και παρουσιάζονται σύντομα στα Σχ.1, Σχ. 2, Σχ.3, και Σχ. 4.

Πίνακας 1: Δοκιμές εργασιμότητας σκυροδέματος.

Δοκιμή	Πρότυπο ΕΛΟΤ/ΕΝ	Συνιστώμενη Περιοχή Μέτρησης (ΕΛΟΤ/ΕΝ 206)	Ανοχές μετρήσεων	
			Για τιμές	Ανοχή
Κάθιση (Σχ. 1)	12350-2	≥ 10 mm και ≤ 210 mm	≤ 40 mm > 50 mm < 90 mm ≥ 100 mm	± 10 mm ± 20 mm ± 30 mm
Εξάπλωση (Σχ. 2)	12350-5	≥ 340 mm ≤ 620	± 30 mm για όλες τις τιμές	
VeBe (Σχ. 3)	12350-3	≤ 30 s > 5 s	≥ 11 s Μεταξύ 10 και 6 s ≤ 5 s	± 3 s ± 2 s ± 1 s
Βαθμός Συμπύκνωσης (Σχ. 4)	12350-4	≥ 1.04 και ≤ 1.45	≤ 1.10 1.25 έως 1.11 ≥ 1.26	± 0.05 ± 0.08 ± 0.10

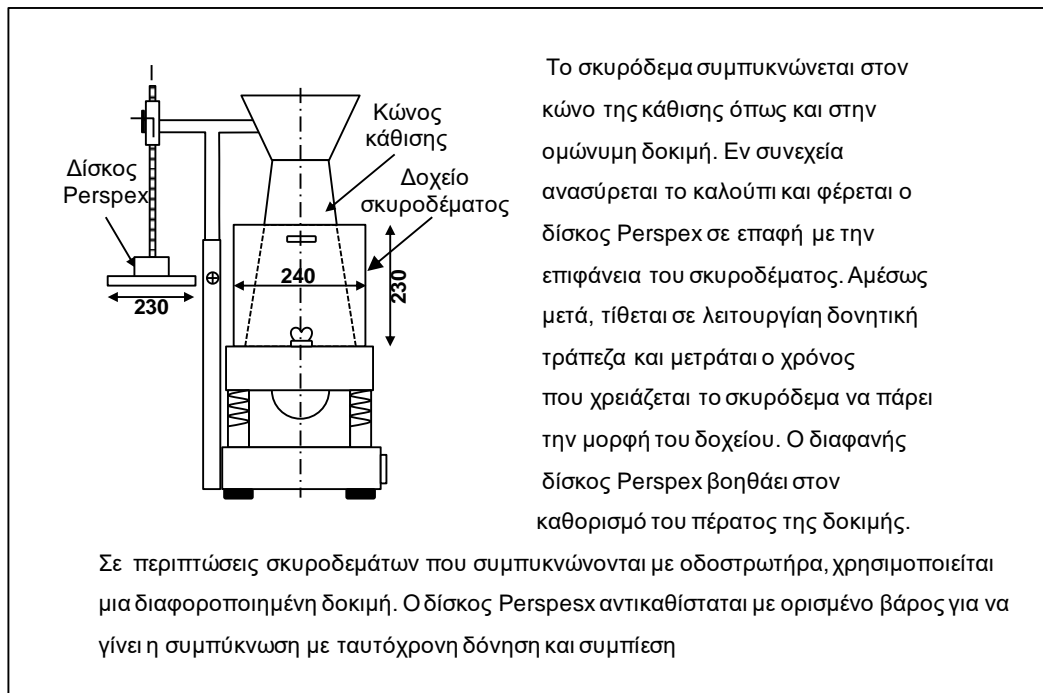


Σχ. 1: Δοκιμή κάθισης.

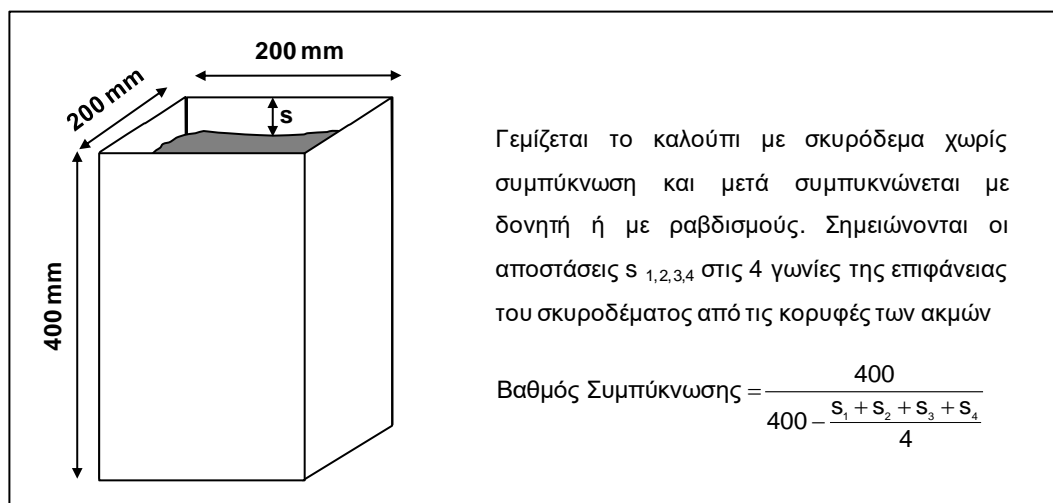


Σχ. 2: Δοκιμή Εξάπλωσης.

Έχουν επίσης αναπτυχθεί πολλές άλλες δοκιμές της εργασιμότητας του σκυροδέματος, όπως πχ η δοκιμή προσδιορισμού του συντελεστή συμπύκνωσης (compacting factor, αγγλική δοκιμή BS 1881), του χρόνου ροής (LCL γαλλική δοκιμή), του βάθους διείσδυσης σφαίρας (Kelly ball penetration) κ.α. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι κάθε μέθοδος μετρά διαφορετική ιδιότητα του σκυροδέματος και η σύγκριση των μετρήσεων είναι πολύ δύσκολη ή ανέφικτη.



Σχ. 3: Δοκιμή VeBe.



Σχ. 4: Δοκιμή προσδιορισμού του βαθμού συμπύκνωσης (Walz) EN 12350-4.

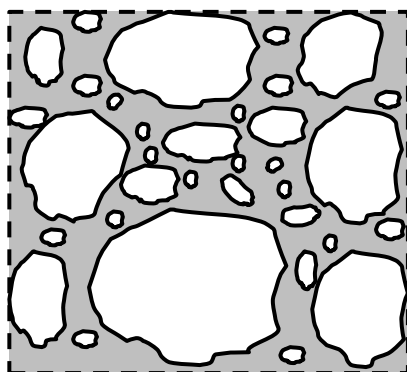
Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την εργασιμότητα του σκυροδέματος είναι:

- Η ποσότητα του νερού.
- Η ποσότητα του τσιμέντου.
- Η ειδική επιφάνεια των κόκκων των αδρανών – διαβάθμιση των αδρανών.
- Ο λόγος του τσιμέντου προς τα αδρανή (δηλ η σχέση τσιμεντοπολτού προς αδρανή).
- Ο τύπος του τσιμέντου (κυρίως η λεπτότητα).
- Η μορφή των κόκκων των αδρανών (και η επικάλυψη αυτών με παιπάλη).

Σ. Κόλιας

- Η ποσότητα, το μέγεθος και η μορφή των κοκκωδών προσμίκτων.
- Η ύπαρξη και ο τύπος των χημικών προσθέτων.
- Η υδαταπορρόφηση των αδρανών (εφ' όσον μπαίνουν στον αναμικτήρα σε μη κορεσμένη κατάσταση).
- Ο χρόνος που μεσολάβησε από την ανάμιξη.
- Η θερμοκρασία.
- Η υγρασία του περιβάλλοντος.
- Η ταχύτητα του ανέμου.

Εκτός από την εργασιμότητα, σημαντική πρακτική σημασία έχει ο ρυθμός μεταβολής της συναρτήσεως του χρόνου που μεσολαβεί από το πέρας της ανάμιξης μέχρι τη στιγμή της διάστρωσης και συμπύκνωσης του σκυροδέματος. Αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό που τελευταία παρουσιάζει αυξημένο ενδιαφέρον, γιατί πληθαίνουν οι περιπτώσεις που το σκυρόδεμα μετά την παρασκευή του, μεταφέρεται σε σημαντικές αποστάσεις για να φθάσει στη θέση διάστρωσης.



Σχ. 5: Προσομοίωση νωπού σκυροδέματος

Μία βασική αρχή για την επιλογή της ορθής σύνθεσης σκυροδέματος για δεδομένη εργασιμότητα είναι ότι το μίγμα πρέπει να περιέχει ικανό όγκο πολτού (τσιμέντο, νερό και λεπτόκοκκα αδρανή συνήθως $< 0.25 \text{ mm}$ ή $125 \mu\text{m}$), ο οποίος να περιβάλλει τα αδρανή σχηματίζοντας ένα υμένα ικανού πάχους ώστε να μειώνονται οι τριβές μεταξύ των κόκκων Σχ. 5 (γκρίζα περιοχή). Αν η ποσότητα του πολτού ελαττωθεί το πάχος του υμένα μικραίνει και οι τριβές αυξάνουν (αυξάνει η τ_0 , βλ Σχ. 12). Αν αυξηθεί η ποσότητα τότε η διατμητική παραμόρφωση του πολτού επιβραδύνεται. Προφανώς η σύνθεση του πολτού επηρεάζει σημαντικά το εργάσιμο. Αν αυξηθεί το νερό τότε ο πολτός γίνεται περισσότερο παραμορφώσιμος αλλά πέρα από ένα όριο η παραμόρφωση είναι τόσο μεγάλη, ώστε δεν συγκρατεί πλέον τα αδρανή απομεμακρυσμένα, οπότε αυτά έρχονται σε επαφή και δεν μπορούν να ολισθήσουν. Αν το νερό αυξηθεί ακόμη περισσότερο τότε επέρχεται διαχωρισμός (απόμιξη) του μίγματος. Αν επίσης τα λεπτόκοκκα υλικά που συνιστούν τα στερεά του πολτού - εκτός από το τσιμέντο - έχουν ανώμαλη επιφάνεια τότε προβάλλουν μεγαλύτερη

Σ. Κόλιας

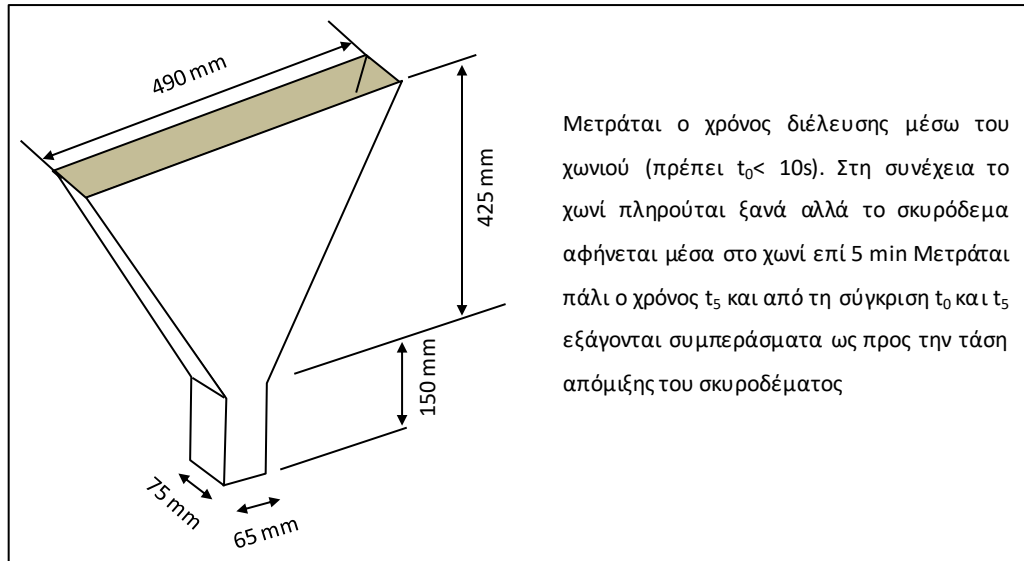
αντίσταση στην μετακίνηση από τα στρογγυλεμένα υλικά. Ορισμένα πρόσμικτα λεπτόκοκκα υλικά χρησιμοποιούνται για να μειώνουν τις «τριβές» αλλά πρέπει να δίνεται πάντοτε προσοχή στο σχήμα και την επιφάνεια των κόκκων. Για παράδειγμα, υπάρχουν πολλά είδη πυριτικής ιπτάμενης τέφρας που έχουν αυτές τις ευεργετικές ιδιότητες, χάρις στους σφαιρικούς κόκκους από τους οποίους αποτελείται, αλλά η ελληνική ασβεστούχος ιπτάμενη τέφρα δυστυχώς δεν μειώνει τις τριβές αλλά αντίθετα τις αυξάνει. Είναι ενδιαφέρον να τονιστεί ότι κόκκοι <125μm. ενώ λόγω μικρού μεγέθους έχουν πολύ μεγάλη ειδική επιφάνεια και επομένως θα έπρεπε να αυξάνουν σημαντικά την απαίτηση σε νερό, εντούτοις, λόγω της δράσεώς τους ως μειωτές τριβών. ελαττώνουν την απαίτηση σε νερό.

Στην πράξη για κοινά σκυροδέματα αυτές οι αρχές ακολουθούνται με καθορισμό των αναλογιών της άμμου και των χαλικιών γνωρίζοντας ότι αύξηση της άμμου επιφέρει και αύξηση του απαιτούμενου νερού, γιατί η ειδική επιφάνεια των κόκκων της άμμου είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη των χονδρόκοκκων αδρανών.

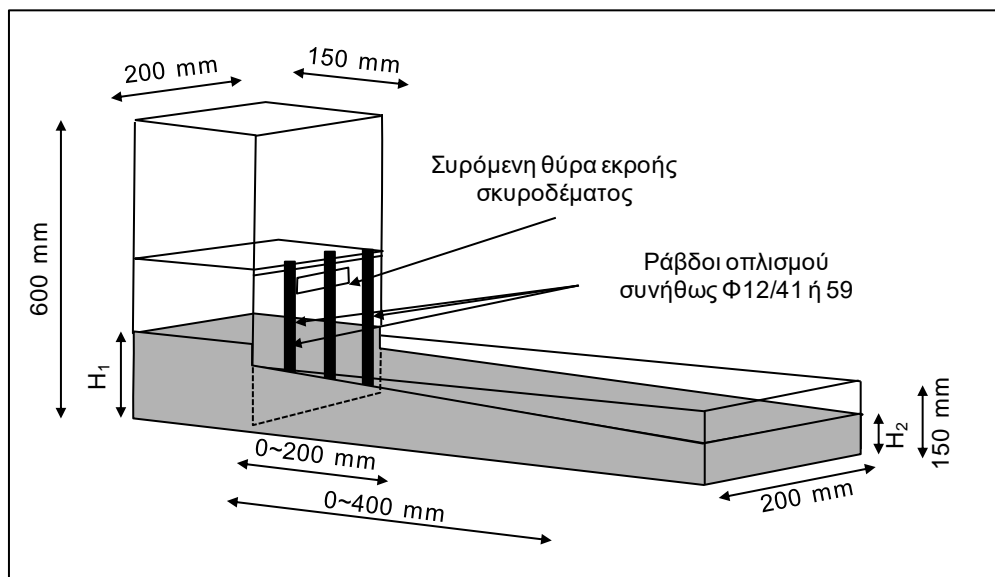
Φυσικά η διαβάθμιση των αδρανών πρέπει επίσης να εξασφαλίζει-στο μέτρο του δυνατό- την μεγαλύτερη δυνατή συγκέντρωση αδρανών μέσα στο μίγμα με τα μικρότερα κενά. Τα παραπάνω δεν είναι πάντοτε συμβατά και πρέπει να βρίσκεται κάθε φορά η βέλτιστη λύση με γνώμονα την καλή συμπίκνωση του σκυροδέματος χωρίς απομίξεις και κενά. Υπάρχουν περιπτώσεις που βελτιώνεται η εργασιμότητα του σκυροδέματος όταν σε μία δεδομένη διαβάθμιση η ποσότητα των κόκκων με ενδιάμεσο μέγεθος ελαττωθεί σημαντικά. Αυτό δημιουργεί τις λεγόμενες ασυνεχείς διαβαθμίσεις οι οποίες διακρίνονται για την παρασκευή σκυροδεμάτων με μεγαλύτερη ρευστότητα αλλά με επικίνδυνες τάσεις απόμειξης.

Πρέπει να τονιστεί ότι οι παραπάνω αναλογίες των διαφόρων συστατικών του σκυροδέματος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ως αναλογίες όγκου διότι η αλληλεπίδραση των συστατικών γίνεται με τις επιφάνειές τους που έρχονται σε επαφή και με τον όγκο τους. Σε περιπτώσεις μεγάλων διαφορών στα ειδικά βάρη/σχετικές πυκνότητες των συστατικών οι αναλογίες κατά βάρος, οι οποίες διευκολύνουν πρακτικά την δοσολόγηση, πρέπει να μετατρέπονται σε αναλογίες όγκου.

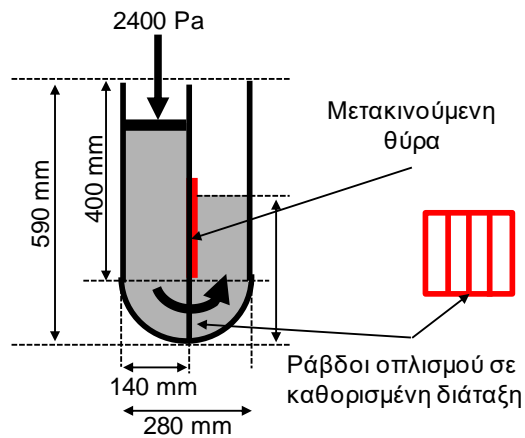
Για τον έλεγχο του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος έχει αναπτυχθεί επιπλέον μία σειρά δοκιμών μερικές από τις οποίες φαίνονται στα Σχ. 6, Σχ. 7 και Σχ. 8 (EFNARC). Με τις συσκευές αυτές ελέγχεται η ρευστότητα, η σταθερότητα, το αναπόμικτον, η διεισδυτικότητα και άλλα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος αυτού του τύπου.



Σχ. 6 : Δοκιμή χωνιού σχήματος V.



Σχ. 7: Συσκευή τύπου L: Πληρούται με σκυρόδεμα χωρίς συμπίκνωση το αριστερό ορθογώνιο καλούπι. Εν συνεχεία ανασύρεται η διαχωριστική θύρα και μετράται ο χρόνος που χρειάζεται το σκυρόδεμα για να φθάσει στις αποστάσεις 200 mm και 400 mm. Σημειώνονται και τα ύψη ισορροπίας του σκυροδέματος H_1, H_2 .

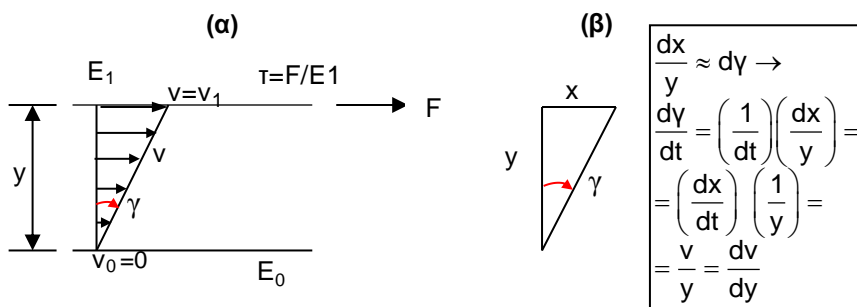


Σχ. 8: Συσκευή τύπου U: Η δοκιμή ακολουθεί την ίδια αρχή με τη δοκιμή τύπου L.

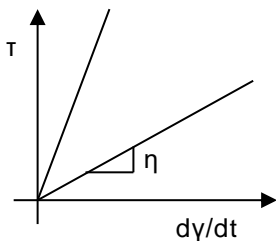
Βασικές αρχές ρεολογίας σκυροδέματος

Έστω ότι σε ένα «ιδεώδες» υγρό (Νευτώνιο υγρό) στην επιφάνεια E_1 ασκείται δύναμη F κατά το επίπεδο E_1 ήτοι ασκείται διατμητική τάση

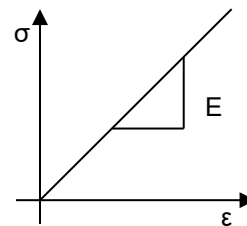
$$\tau = F / E_1$$



Σχ. 9: Ομαλή (στρωτή) ροή υγρού μεταξύ επιπέδων E_1 (με ταχύτητα v_1) και E_0 (με ταχύτητα $v_0 = 0$)



Σχ. 10: Διάγραμμα ροής υγρού. Ορισμός ιξώδους



Σχ. 11: Διάγραμμα σ-ε στερεού. υλικού.

Υπό την επίδραση της δύναμης F , η επιφάνεια $E1$ κινείται με ταχύτητα $v=v_1$, η οποία όμως μειώνεται στα άλλα επίπεδα E_i όσο μεγαλώνει η απόσταση τους από το επίπεδο $E1$, Σχ 9.

Σε μία απόσταση y από την επιφάνεια $E1$, η ταχύτητα μετακίνησης του υγρού είναι μηδενική και επομένως καταμήκος της y υπάρχει μία μεταβολή της ταχύτητας dv/dy που οφείλεται στην μεταξύ των μορίων αναπτυσσόμενη αντίσταση (τριβή). Για τα ιδεώδη υγρά με ομαλή ροή, η μεταβολή της ταχύτητας ως προς την απόσταση είναι γραμμική και ισχύει η σχέση:

$$\tau = \eta \, dv/dy$$

όπου “ η ” είναι το ιξώδες του υγρού και

$$dv/dy \text{ η μεταβολή της ταχύτητας καταμήκος του άξονα } y$$

Αποδεικνύεται ότι $dv/dy = dy/dt$ (βλ Σχ. 9β) οπότε:

$$\tau = \eta \, dy/dt \quad (1)$$

όπου: η είναι το ιξώδες του υγρού (κινηματικό ιξώδες) Σχ. 10

dy/dt είναι η ταχύτητα μεταβολής της γωνίας ήτοι ο ρυθμός της διαμητρικής παραμόρφωσης

Οι συνήθεις μονάδες του ιξώδους είναι $N/m^2 / 1/s = s \, N/m^2$ ή $Pa \, s$, [$1Poise = 0.1 \, N.s/m^2$]

Μεγάλες τιμές του “ η ” σημαίνουν παχύρρευστο υγρό ενώ μικρές τιμές λεπτόρρευστο.

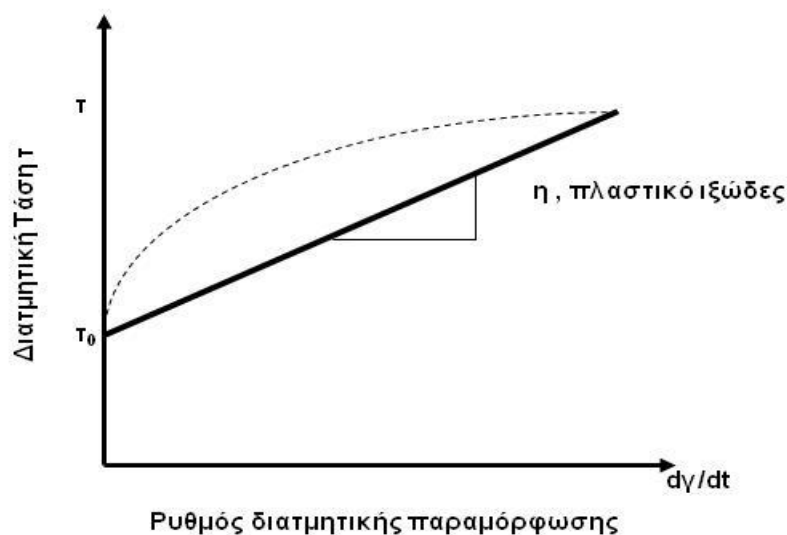
Η σχέση (1) εκφράζει την μετακίνηση των ιδεωδών υγρών και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να εκφράσει κατά προσέγγιση την μετακίνηση τσιμεντοπολτού. Στο Σχ. 11 παρουσιάζεται η γνωστή σχέση τάσεων – παραμορφώσεων “σ-ε” ελαστικών στερεών για σύγκριση. (Το ιξώδες αντιστοιχεί με το μέτρο ελαστικότητας και η ταχύτητα μεταβολής της γωνίας με την ανηγμένη παραμόρφωση).

Το σκυρόδεμα σε νωπή κατάσταση είναι μίγμα κυρίως αδρανών, τσιμέντου και νερού και θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι είναι ένα αιώρημα μεγάλης συγκέντρωσης στερεών - τα αδρανή- μέσα σε «μέσον διασποράς» σχετικά μεγάλου ιξώδους -τον τσιμεντοπολτό ή τον πολτό που αποτελείται από τσιμέντο και λεπτόκοκκα αδρανή.

Η ροή του σκυροδέματος είναι για τους λόγους αυτούς πιο πολύπλοκη και θεωρείται ότι κατά προσέγγιση εκφράζεται από τη σχέση Bingham, σχέση (2) (βλ. Σχ. 12):

η φυσική έννοια του όρου τ_0 είναι ότι για να (μετακινηθεί) γίνει έναρξη ροής του σκυροδέματος απαιτείται πρώτα να υπερνικηθεί μία αρχική τάση τ_0 που ονομάζεται τάση διαρροής (yield stress).

Ο συντελεστής " η " ονομάζεται "πλαστικό ιξώδες" του υλικού και συχνά συμβολίζεται με το γράμμα " μ ".



Σχ. 12. Σχέση Bingham ροής ρευστού και συνήθεις μη γραμμικές σχέσεις για σκυρόδεμα και επίδραση της συμπύκνωσης.

Έχουν προταθεί και άλλες εξισώσεις που εκφράζουν την ροή αιωρημάτων μεγάλης συγκέντρωσης στερεών, όπως το σκυρόδεμα, αλλά το μειονέκτημα των εξισώσεων αυτών είναι ότι οι παράμετροι των εξισώσεων δεν εκφράζουν φυσικές ιδιότητες, όπως στην εξίσωση Bingham. Μία από τις προταθείσες εξισώσεις, η οποία βρέθηκε ότι περιγράφει ικανοποιητικά την συμπεριφορά των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων είναι η σχέση Herschel-Buckley:

$$\tau = \tau_0 + K (d\gamma/dt)^n$$

όπου ο εκθέτης " n " δεν εκφράζει φυσική ιδιότητα αλλά την απόκλιση από την ευθυγραμμία της σχέσης $\tau - d\gamma/dt$.

Είναι φανερό ότι για να εκφραστεί η ρεολογική συμπεριφορά του σκυροδέματος χρειάζονται δύο παράμετροι το «πλαστικό ιξώδες» και η «τάση διαρροής τ_0 ». Οι δοκιμές εργασιμότητας που κυρίως χρησιμοποιούνται δίνουν μία εκτίμηση μόνο για μία από τις παραμέτρους αυτές που φυσικά αυτό δεν είναι αρκετό. Δύο σκυροδέματα με ίσες μία από τις παραμέτρους μπορεί να έχουν πολύ διαφορετική ρεολογική συμπεριφορά αν η άλλη παράμετρος είναι διαφορετική.

Σ. Κόλιας

Η δοκιμή κάθισης δίνει μία εκτίμηση της τάσης t_0 (τάση διαρροής) αφού το σκυρόδεμα θα μετακινηθεί μόνο όταν γίνει υπέρβαση της αρχικής τάσης t_0 και θα σταματήσει όταν η τάση αυτή γίνει μικρότερη από την t_0 . Η αναπτυσσόμενη τάση στον κώνο είναι φυσικά ανάλογη του βάρους του σκυροδέματος και της επιφάνειας που εφαρμόζεται. Στην πράξη συνήθως μπορεί να αποκτηθεί μία εικόνα της συνοχής –και επομένως του πλαστικού ιξώδους- του μίγματος με ελαφρό οριζόντιο κτύπημα του κώνου (μετά την κάθιση) με τη ράβδο συμπίκνωσης. Αν ο κώνος καταρρεύσει ή αν μετακινηθεί χωρίς ρωγμές είναι στοιχεία με τα οποία μπορεί να κριθεί εμπειρικά αν το μίγμα έχει συνοχή ή όχι. Τελευταία προτάθηκαν ορισμένες τροποποιήσεις της δοκιμής κάθισης έτσι ώστε εκτός της αρχικής τάσης t_0 να εκτιμάται και το ιξώδες με τη μέτρηση του χρόνου που απαιτείται για να καθίσει ο κώνος κατά 100mm. Σύμφωνα με άλλες τροποποιήσεις (Ιαπωνία) πληρούται ο κώνος της κάθισης χωρίς συμπίκνωση εν συνεχεία αφαιρείται και μετράται η τελική εξάπλωση του σκυροδέματος (μέσος όρος δύο καθέτων μεταξύ τους διαμέτρων). Επίσης μετράται και ο χρόνος που χρειάζεται το σκυρόδεμα να αποκτήσει διάμετρο 500 mm. Οι μετρήσεις αυτές φυσικά είναι συνάρτηση του ιξώδους του σκυροδέματος.

Η δοκιμή Ve-Be βασίζεται στο ότι με την δόνηση υπερνικάται η αρχική τάση t_0 και ο μετρούμενος χρόνος για να πάρει το σκυρόδεμα το απαιτούμενο σχήμα σχετίζεται έμμεσα με το πλαστικό ιξώδες του μίγματος.

Η δοκιμή εξάπλωσης δίνει επίσης μία εκτίμηση του ιξώδους του μίγματος αφού η κρούση από την πτώση του πυθμένα έχει σαν αποτέλεσμα να εξασφαλιστεί υπέρβαση της αρχικής τάσης t_0 και η εξάπλωση του μίγματος έχει σχέση με την τιμή του πλαστικού ιξώδους του σκυροδέματος.

Οι δοκιμές χωνιού που χρησιμοποιούνται για τσιμεντοπολτό, τσιμεντοκονίαμα ή σκυρόδεμα, με ανάλογες για κάθε χρήση διαστάσεις, μετρούν χρόνους εκκένωσης που έχουν σχέση με το ιξώδες του μίγματος. Αν δεν γίνει έναρξη εκκένωσης τότε δεν έχει επιτευχθεί υπέρβαση της αρχικής τάσης. Αν η εκκένωση αρχίσει και μετά σταματήσει τότε συμπεραίνεται ότι το μίγμα δεν είναι ομοιογενές ή δεν έχει την απαιτούμενη σταθερότητα.

Είναι φανερό ότι αφού οι διάφορες δοκιμές μετρούν ουσιαστικά διαφορετικές ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος θα έχουν συσχετίσεις οι οποίες θα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.

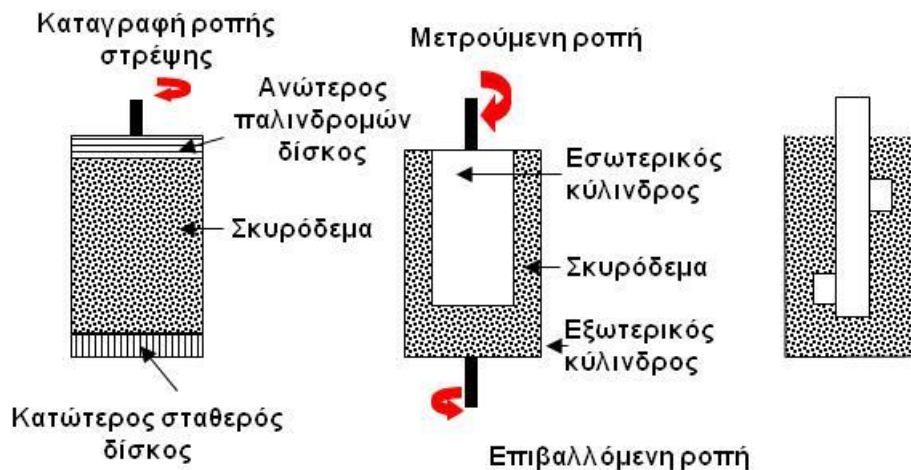
Στο Σχ.13 παρουσιάζονται ορισμένοι τύποι ρεομέτρων που χρησιμοποιούνται για την διερεύνηση της συμπεριφοράς του νωπού σκυροδέματος στο εργαστήριο. Θα πρέπει όμως να επισημανθεί ότι παρ'όλες τις σχετικές προόδους στον τομέα αυτόν απομένουν πολλά ακόμη να γίνουν ώστε να μπορεί να μετρηθούν εύκολα και αξιόπιστα στο εργαστήριο και στο εργοτάξιο τα δύο θεμελιώδη χαρακτηριστικά του σκυροδέματος δηλ. το πλαστικό ιξώδες και η

Σ. Κόλιας

τάση διαρροής τ_0 . Αλλά και τα μεγέθη αυτά θα πρέπει να γίνουν ευρύτερα κατανοητά και να βρεθούν τρόποι πρακτικής αξιοποίησής των. Τα ρεόμετρα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εργοταξιακές μετρήσεις όχι μόνο λόγω πολυπλοκότητας και ευαισθησίας των δοκιμών αλλά κυρίως λόγω κόστους συσκευών.

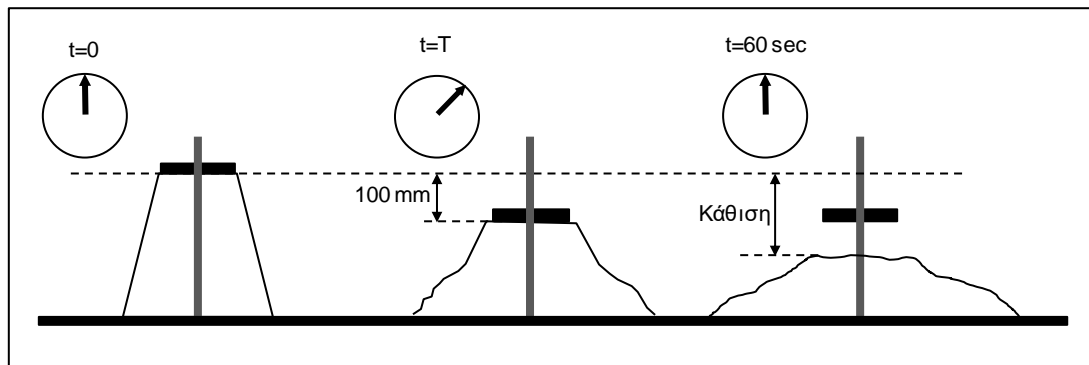
Στο Σχ. 14 παρουσιάζεται μία από τις τροποποιήσεις της δοκιμής κάθισης έτσι ώστε να καταστεί δυνατός ο έμμεσος προσδιορισμός της τάσης διαρροής τ_0 , [Pa] και του πλαστικού ιξώδους μ , [Pa.s] από τον χρόνο T [s] που χρειάζεται η επιφάνεια του σκυροδέματος να "καθίσει" 100 mm και από την τελική τιμή της κάθισης [S mm], η οποία μετράται μέσα σε χρόνο που δεν υπερβαίνει τα 60 s.

Η δοκιμή τροποποιημένης κάθισης εκτελείται πάνω σε βάση η οποία στηρίζει κατακόρυφη ράβδο στην οποία μπορεί να ολισθαίνει χωρίς τριβές κυκλικός δίσκος. Το σκυρόδεμα συμπυκνώνεται όπως προβλέπεται από το πρότυπο κάθισης (σε 3 ισουφείς στρώσεις με 25 ραβδισμούς σε κάθε στρώση), όπως φαίνεται στο Σχ. 13 με τη ράβδο στο κέντρο του κόλουρου κώνου. Μετά την ισοπέδωση με απόξεση της επιφάνειας του σκυροδέματος ο δίσκος φέρεται σε επαφή με την επιφάνεια και ανασύρεται ο κώνος. Το σκυρόδεμα "κάθεται" ακολουθούμενο από τον δίσκο ο οποίος σταματάει σε κατάλληλη εγκοπή της κατακόρυφης ράβδου σε απόσταση από την αρχική θέση 100 mm. Σημειώνεται ο χρόνος T για να "καθίσει" το σκυρόδεμα 100 mm καθώς επίσης η τελική κάθιση του σκυροδέματος σε χρόνο που δεν υπερβαίνει τα 60 s.



α. Παράλληλων δίσκων β. Ομοαξονικών κυλίνδρων γ. Με πτερύγια (Tattersal)

Σχ. 13: Διάφοροι τύποι ρεομέτρων που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση των ρεολογικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος (πλαστικό ιξώδες και τάση διαρροής τ_0)



Σχ. 14: Τροποποίηση της δοκιμής κάθισης για να καταστεί δυνατός ο έμμεσος προσδιορισμός του πλαστικού ιξώδους μ και της τάσης διαρροής τ_0 . [De Larrard, Ferraris]

Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η τάση διαρροής " τ_0 " και το πλαστικό ιξώδες " μ " δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\tau_0 = (\rho/347) \cdot (300-S) + 212$$

$$\mu = \rho \cdot T \cdot 1.08 \cdot 10^{-3} \cdot (\sigma - 175) \quad \text{για } 200 \mu\text{m} \leq s \leq 260 \mu\text{m}$$

$$\mu = 25 \cdot 10^{-3} \cdot \rho \cdot T \quad \text{για } s < 200 \text{ mm}$$

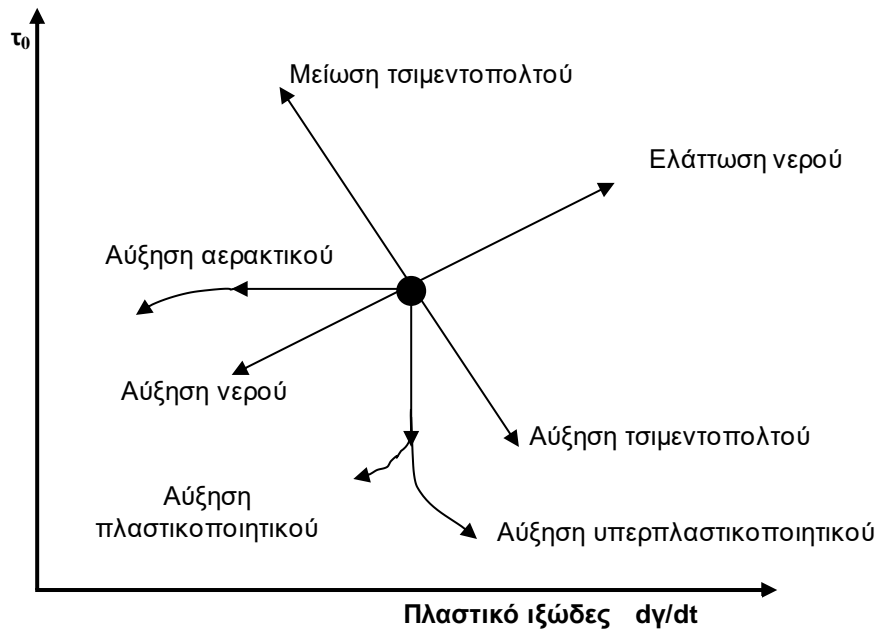
όπου ρ είναι η πυκνότητα του σκυροδέματος σε kg/m^3

Στο Σχ. 15 παρουσιάζονται σχηματικά η επίδραση της ποσότητας του νερού, του τσιμεντοπολτού και των χημικών προσθέτων (αερακτικό, πλαστικοποιητικό, υπερπλαστικοποιητικό) στις παραμέτρους του προσομοιώματος Bingham (τάση διαρροής και ρυθμός διατμητικής παραμόρφωσης).

Έχουν προταθεί και άλλες τροποποιήσεις της δοκιμής κάθισης όπως η μέτρηση του χρόνου που χρειάζεται το σκυρόδεμα να αποκτήσει ορισμένη μέγιστη διάμετρο πχ 200 mm και 500 mm καθώς επίσης και δοκιμές καταγραφής της μεταβολής της κάθισης και της εξωτερικής διαμέτρου του σκυροδέματος καθ'όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

Παρατηρείται ότι ελάττωση της ποσότητας του νερού στο μίγμα αυξάνει και την αρχική τάση τ_0 και το ιξώδες. ενώ ο αυξημένος τσιμεντοπολτός (μεγαλύτερο πάχος επικάλυψης αδρανών) μειώνει την αρχική τάση τ_0 αλλά αυξάνει το ιξώδες. Αύξηση της ποσότητας των πλαστικοποιητικών και υπερπλαστικοποιητικών προσθέτων σε μικρές ποσότητες δεν μεταβάλλουν το ιξώδες αλλά ελαττώνουν την αρχική τάση τ_0 . Σε μεγαλύτερες ποσότητες οι υπερπλαστικοποιητές αυξάνουν το ιξώδες οι δε απλοί πλαστικοποιητές ελαττώνουν το

ιξώδες. Το αερακτικό πρόσθετο δεν επηρεάζει την αρχική τάση αλλά ελαττώνει το ιξώδες γιατί οι λεπτές φυσαλίδες αέρα συμπεριφέρονται σαν μειωτές τριβής μέσα στη μάζα του σκυροδέματος.



Σχ. 15: Επίδραση των διαφόρων παραμέτρων του μίγματος στις τιμές τ_0 και $d\gamma/dt$.

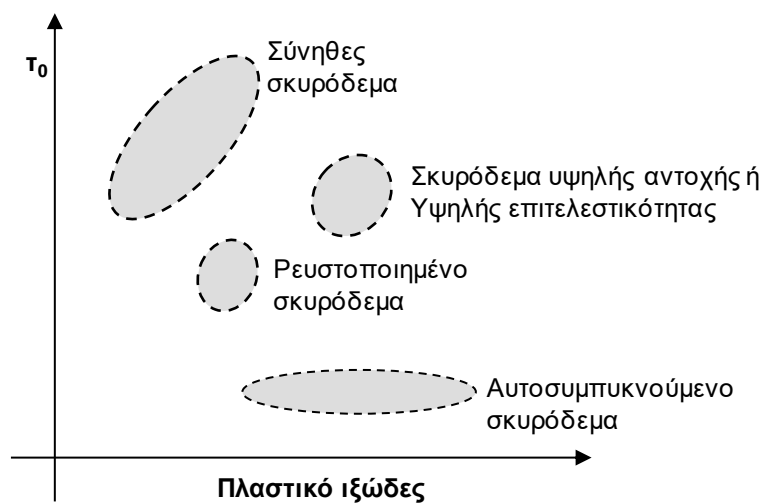
Στο Σχ. 16 παρουσιάζονται σε διάγραμμα " τ_0 –πλαστικό ιξώδες" οι περιοχές στις οποίες συνήθως παρουσιάζονται τα διάφορα είδη σκυροδεμάτων. Είναι φανερό ότι τα κοινά σκυροδέματα με μικρή ή καθόλου χρήση πλαστικοποιητικών-ρευστοποιητικών προσθέτων και με την ανάγκη επίτευξης οικονομίας – λίγο νερό για μικρή ποσότητα τσιμέντου – η απαιτούμενη τάση τ_0 για την έναρξη της μετακίνησης, τάση διαρροής, είναι σχετικά μεγάλη ενώ το πλαστικό ιξώδες είναι σχετικά μικρό. Σημειώνεται ότι εκτιμάται ότι τα σκυροδέματα στη χώρα μας βρίσκονται στη περιοχή με το μεγαλύτερο πλαστικό ιξώδες επειδή η χρησιμοποιούμενη άμμος και γενικά τα αδρανή μας έχουν συνήθως μεγάλο ποσοστό ασβεστολιθικής παιπάλης (αύξηση του ιξώδους) αλλά λόγω χρήσεως συνήθως καθολοκληρίαν θραυστής άμμου, η τ_0 είναι επίσης μεγάλη. Η χρήση λεπτόκοκκων προσμίξεων πχ ιπτάμενης τέφρας, σκωρίας, πυριτικής παιπάλης, ή ορυκτών υλικών θα πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά γιατί η συμπεριφορά τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και δεν μπορεί να προβλεφθεί.

Η χρησιμοποίηση ρευστοποιητικών και ιδιαίτερα υπερ-ρευστοποιητικών προσθέτων για την παραγωγή «ρευστών» σκυροδεμάτων, μειώνει την τάση τ_0 και αυξάνει λίγο το πλαστικό ιξώδες.

Για την παρασκευή «υψηλής αντοχής» ή «υψηλής επιτελεστικότητας» σκυροδέματος χρειάζεται μείωση δραστική του λόγου N/T και επομένως απαιτείται αύξηση της ποσότητας

του τσιμέντου και μείωση του νερού ενώ το σκυρόδεμα πρέπει να είναι εργάσιμο. Αυτό επιτυγχάνεται με υψηλές δόσεις υπερπλαστικοποιητικών προσθέτων και συνοδεύεται με χρήση επιμελούς συμπύκνωσης.

Για την παρασκευή όμως αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος πρέπει να μειωθεί σημαντικά η τάση τ_0 και αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση της σταθερότητας του μίγματος. Ευτυχώς τα υπερ-ρευστοποιητικά πρόσθετα αυξάνουν το πλαστικό ιξώδες, αλλά αυτό δεν επαρκεί και χρειάζεται επίσης προσθήκη σταθεροποιητικών παραγόντων, όπως ειδικών προσθέτων ή συνηθέστερα, λεπτόκοκκων στερεών υλικών. Για περαιτέρω δε βελτίωση της σταθερότητας του μίγματος και αποφυγή φαινομένων απόμιξης ή απόφραξης, πρέπει να μειωθεί ο μέγιστος κόκκος αδρανών και οι αναλογίες λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών να βρίσκονται σε ορισμένα όρια. (βλ ΠΕΤΕΠ 010106).



Σχ. 16: Κατά προσέγγιση ρεολογικά χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων σκυροδεμάτων.