

Πρόταση Απλοποίησης και Ενοποίησης της Συμβατικής Ταξινόμησης και Δοκιμασίας του Σκυροδέματος

Α. ΜΠΑΚΑ

Βοηθός Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Εντοπίζεται η φαινομενική βάση της συμβατικής ταξινόμησης και ταυτοποίησης του σκυροδέματος με βάση τη θλιπτική αντοχή του και προτείνεται ο λόγος «θλιπτική αντοχή/μέτρο ελαστικότητας» ως θεμελιώδης δείκτης συμπεριφοράς και ταυτοποίησης του σκυροδέματος, ο οποίος επιτρέπει την ενοποίηση των διαφόρων κατηγοριών σκυροδέματος. Με την ενοποίηση αυτή περιορίζεται σημαντικά ο όγκος των απαιτούμενων πειραματικών δεδομένων, καθώς τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς των νέων τύπων σκυροδέματος μπορούν να προκύψουν από υπάρχοντα πειραματικά στοιχεία συμπεριφοράς παλιότερων τύπων σκυροδέματος. Αναντιστοιχίες συμπεριφοράς του σκυροδέματος σε επίπεδο δοκιμίου και δομικού στοιχείου συσχετίζονται με πολυπλοκότητες και αδυναμίες της συμβατικής δοκιμασίας του σκυροδέματος, και προδιαγράφεται και αιτιολογείται τροποποιημένη μέθοδος δοκιμασίας για την αναίρεσή τους.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρακολουθώντας τις εξελίξεις στην περιοχή του σκυροδέματος παρατηρούμε μια ανακολουθία. Οι νέες εξελίξεις στον τομέα της τεχνολογίας του σκυροδέματος, όπως τα ελαφροσκυροδέματα και τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής, δεν έχουν συνοδευθεί από αντίστοιχη εξέλιξη και προσαρμογή των δεικτών συμπεριφοράς του υλικού και της μεθόδου δοκιμασίας του. Ως βασικός δείκτης συμπεριφοράς και ταξινόμησης του σκυροδέματος εξακολουθεί να υιοθετείται η θλιπτική αντοχή. Η συμβατική μέθοδος μέτρησής της παραμένει σχεδόν αμετάβλητη από την αρχή της υιοθέτησής της: «ψευδομονοαξονική θλίψη» σε κυβικά ή κυλινδρικά δοκίμια.

Στην ανακολουθία αυτή μπορεί να αποδοθούν εν μέρει: (α) η συνεχής διόγκωση των πειραματικών εργασιών, καθώς οι ίδιες διερευνήσεις γίνονται ξεχωριστά για σύνθετες κανονικό σκυρόδεμα, κανονικό σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, σύνθετες ελαφροσκυρόδεμα, ελαφροσκυρόδεμα υψηλής αντοχής και (β) οι διατυπούμενες επιφυλάξεις για την αποτελεσματικότητα των πολυάριθμων ερευνών και δημοσιεύσεων, καθώς οι αρχικές εγγενείς, και σε μεγάλο βαθμό αναγνωρισμένες, αδυναμίες των υιοθετημένων δεικτών και δοκιμασιών μεγεθύνονται με τους νέους τύπους σκυροδέματος και αυξάνουν

την πολυπλοκότητα των αποτελεσμάτων και των ερμηνειών τους. Χαρακτηριστικό είναι το άρθρο του Adam Neville, συγγραφέα διεθνώς αναγνωρισμένου εγχειριδίου τεχνολογίας σκυροδέματος, στο περιοδικό «Concrete International» [1] με τίτλο: «Η έρευνά μας μοιάζει να βελτιώνει το σκυρόδεμα;»

Στην εργασία αυτή εντοπίζονται χαρακτηριστικές περιπτώσεις πολυπλοκότητας σχετιζόμενων με την παραπάνω ανακολουθία, αναζητούνται οι αιτίες τους και για την αναίρεσή τους, προτείνονται η υιοθέτηση ενός ορθολογικότερου δείκτη συμπεριφοράς του σκυροδέματος και μια συνεκτικότερη μέθοδος δοκιμασίας του με απλή τροποποίηση της συμβατικής θλιπτικής δοκιμής, χωρίς απαίτηση πρόσθετου εξοπλισμού.

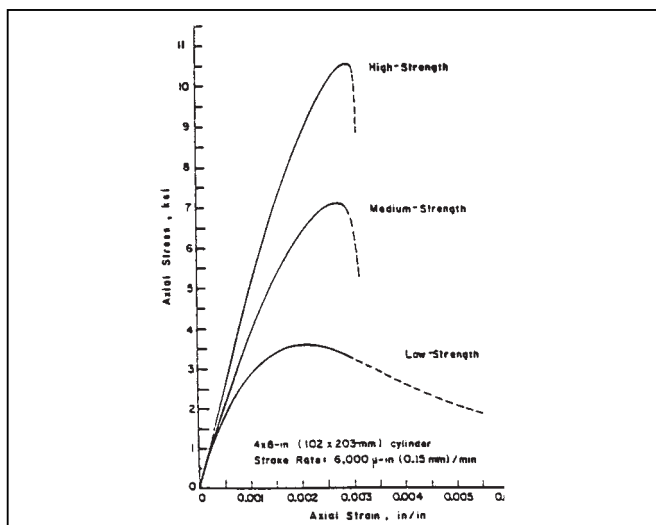
2. Η ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Σύμφωνα με την ισχύουσα πρακτική, τα σκυροδέματα ταξινομούνται ανάλογα με τη στάθμη της θλιπτικής αντοχής τους σε συμβατικά σκυροδέματα, κανονικά σκυροδέματα υψηλής αντοχής, συνήθη ελαφροσκυροδέματα, ελαφροσκυροδέματα υψηλής αντοχής κ.λπ.

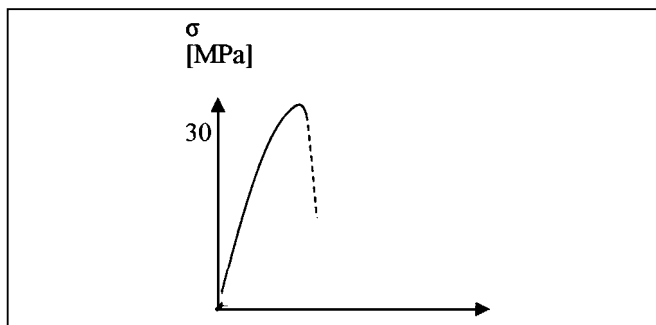
Ακολουθώντας την εξέλιξη της τεχνολογίας, το κατώτερο όριο αντοχής για τον ορισμό των σκυροδεμάτων υψηλής αντοχής μεταβάλλεται με το χρόνο συνεχώς αυξανόμενο: από 30 MPa στη δεκαετία του 1950 αυξάνεται στα 50 MPa το 1994 [2] και στα 70 MPa το 1996 [3].

Αρκετοί ερευνητές θέτουν δικά τους όρια και ταξινομήσεις. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τους Floyed, Slate, Nilson and Martinez [4] τα σκυροδέματα ταξινομούνται σε χαμηλής αντοχής, μέσης αντοχής και υψηλής αντοχής. Τα κατώτερα όρια για τα σκυροδέματα μέσης και υψηλής αντοχής ορίζονται 33 MPa και 53 MPa για το κανονικό σκυρόδεμα, 28 MPa και 40 MPa για το ελαφροσκυρόδεμα.

Για κάθε κατηγορία σκυροδέματος συντάσσονται ιδιαίτερες προδιαγραφές και κανονιστικές διατάξεις [3] και γίνον-



Σχήμα 1: Διαγράμματα σ - ϵ του σκυροδέματος [4].
Figure 1: Stress-strain diagrams of concrete [4].



Σχήμα 2: Διαγράμματα σ - ϵ μικροκισσηροδέματος [6].
Figure 2: Stress-strain diagrams of pumice microconcrete [6].

νται ιδιαίτερες βιβλιογραφικές αναφορές, καθώς κάθε κατηγορία ερευνάται ιδιαίτερα και υπόκειται σε ιδιαίτερες ερμηνείες της μηχανικής συμπεριφοράς.

Στην περίπτωση των ελαφροσκυροδεμάτων, ανάλογα με το είδος του χρησιμοποιούμενου ελαφρού αδρανούς, διακρίνονται επί μέρους υποκατηγορίες και γίνονται επί μέρους ερευνητικές εργασίες και αναφορές.

3. Η ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΛΟΓΙΚΗ ΒΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ

3.1. Ένα παράδειγμα συμβατικού ελαφροσκυροδέματος με συμπεριφορά σκυροδέματος υψηλής αντοχής: το μικροκισσηρόδεμα

Μία από τις βασικές διαφορές των συμβατικών σκυροδεμάτων και των σκυροδεμάτων υψηλής αντοχής αποτελεί ο καταστατικός νόμος τάσεων-παραμορφώσεων [4], [5].

Στο σχήμα 1 δίνονται τυπικά διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για τις δύο κατηγορίες σκυροδεμάτων [4]. Τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής εμφανίζουν πιο ευθύγραμμο ανερχόμενο κλάδο και πιο απότομο κατερχόμενο κλάδο.

Στο σχήμα 2 δίνεται το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του μικροκισσηροδέματος αντοχής 30 Mpa [6]. Είναι εμφανής η ομοιότητα της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς του με το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής.

Η ομοιότητα των δύο σκυροδεμάτων εκτείνεται και σε άλλα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς, όπως στην ταχύτερη εξέλιξη της αντοχής με την ηλικία, στη μικρότερη ερπυστική παραμόρφωση κ.ά.

3.2. Η ανεπάρκεια της θλιπτικής αντοχής ως δείκτη συμπεριφοράς του σκυροδέματος

Με βάση τη στάθμη της αντοχής του, το μικροκισσηρόδεμα κατατάσσεται στα συμβατικά σκυροδέματα (μέσης αντοχής). Με βάση τη συμπεριφορά του, αντιστοιχεί στα σκυροδέματα υψηλής αντοχής. Η θλιπτική αντοχή δεν αποτελεί, λοιπόν, επαρκή δείκτη για την ταυτοποίηση του υλικού.

4. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΙΤΙΩΝ ΤΗΣ ΑΝΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

4.1. Οι δύο μηχανισμοί ανάληψης φορτίου

Λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών των τριών φάσεων του σκυροδέματος: του τσιμεντοπολτού, των αδρανών και της ενδιάμεσης μεταβατικής ζώνης στην περιοχή μεταξύ αδρανών και τσιμεντοπολτού [7], η εντατική κατάσταση του σκυροδέματος υπό ομοιόμορφη θλιπτική επιπόνηση δεν είναι ομοιόμορφη. Οι αναπτυσσόμενες θλιπτικές τάσεις στις τρεις φάσεις είναι (αντίστροφα ανάλογες των δυσκαμψιών τους) διαφορετικές με συνέπεια καμπύλωση των τροχιών των θλιπτικών τάσεων.

Λόγω της καμπύλωσης αυτής αναπτύσσονται για λόγους ισορροπίας εγκάρσιες τάσεις θλιπτικές ή εφελκυστικές. Με την αύξηση της επιπόνησης στις θέσεις των εφελκυστικών τάσεων εμφανίζονται ρωγμές, όταν υπερβαίνεται η αντίστοιχη μέγιστη τιμή τους.

Λόγω της διαφορετικής δυσκαμψίας του τσιμεντοπολτού και της ενδιάμεσης ζώνης (η ενδιάμεση φάση είναι ασθενέστερη, πιο πορώδης, από τη φάση του τσιμεντοπολτού) αναπτύσσονται μικρορρωγμές στην περιοχή συνάφειας τσιμεντοπολτού και αδρανών, θέση ανάπτυξης των εφελκυστικών τάσεων.

Λόγω της διαφορετικής δυσκαμψίας τσιμεντοπολτού και αδρανών αναπτύσσονται ρωγμές στην περιοχή συνάφειας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.δ (στην ίδια περιοχή με τις προαναφερθείσες ρωγμές της ενδιάμεσης ζώνης), ή στις θέσεις επάνω και κάτω από τα αδρανή, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.δ.

Η πρώτη περίπτωση αντιστοιχεί σε σκυρόδεμα με ισχυρή φάση τα αδρανή (βλέπε σχήμα 3.1), ενώ η δεύτερη αντιστοι-

χεί σε σκυρόδεμα με ισχυρή φάση τον τσιμεντοπολτό (βλέπε σχήμα 3.2). Για δεδομένο αδρανές ισχυρή φάση είναι τα αδρανή, όταν η αντοχή του σκυροδέματος είναι μικρή, ενώ, όταν η αντοχή του σκυροδέματος είναι μεγάλη, ισχυρή φάση είναι ο τσιμεντοπολτός.

Καθοριστικό, λοιπόν, παράγοντα για τον μηχανισμό ανάληψης φορτίου αποτελεί ο λόγος της αντοχής του σκυροδέματος προς την αντοχή του αδρανούς θεωρώντας ότι μεγαλύτερη δυσκαμψία αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη αντοχή. Για μικρό λόγο ισχυρή φάση είναι τα αδρανή και ο αντίστοιχος μηχανισμός είναι αυτός του σχήματος 3.1 με κρίσιμη την αντοχή συνάφειας μεταξύ αδρανών και τσιμεντοπολτού και εξαρτώμενος από την ποιότητα της ενδιάμεσης φάσης (οι ρωγμές διαδίδονται μέσω του τσιμεντοπολτού). Για μεγάλο λόγο ισχυρή φάση είναι ο τσιμεντοπολτός και ο αντίστοιχος μηχανισμός είναι αυτός του σχήματος 3.2 με κρίσιμη την εφελκυστική αντοχή του τσιμεντοπολτού μη εξαρτώμενος ιδιαίτερα από την ποιότητα της ενδιάμεσης φάσης (οι ρωγμές διαδίδονται μέσω των αδρανών).

4.2. Οι δύο τύποι συμπεριφοράς

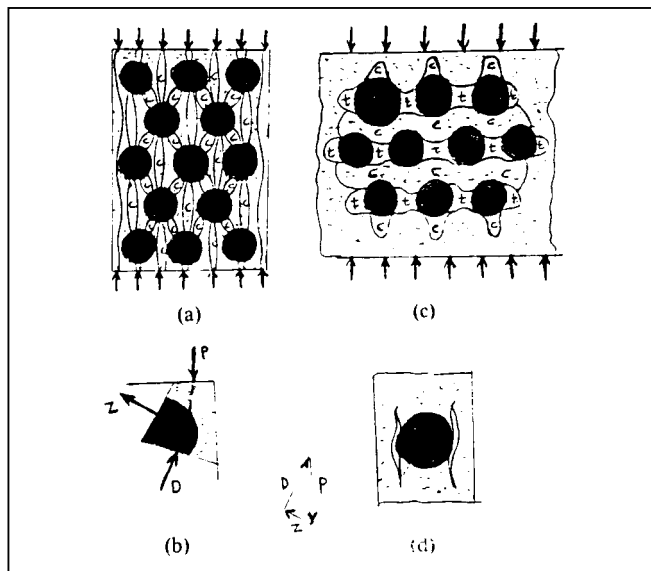
Δεδομένου ότι η εφελκυστική αντοχή του τσιμεντοπολτού είναι μεγαλύτερη από την αντοχή συνάφειας τσιμεντοπολτού και αδρανών (η οποία είναι εξασθενημένη και λόγω του πορώδους της ενδιάμεσης ζώνης), η έναρξη της μικρορρηγμάτωσης και η συνεπαγόμενη καμπύλωση του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων καθυστερούν, στην περίπτωση που ισχυρή φάση είναι ο τσιμεντοπολτός. Το διάγραμμα συμπεριφοράς τάσεων-παραμορφώσεων στην περίπτωση αυτή είναι περίπου ευθύγραμμο.

Οι δύο μηχανισμοί ανάληψης φορτίου αντιστοιχούν, λοιπόν, σε διαφορετικούς τύπους συμπεριφοράς, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.

Οι διαφοροποιήσεις των δύο τύπων συμπεριφοράς αντανακλώνται και σε άλλα μηχανικά χαρακτηριστικά εκτός από τη μορφή του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων. Αναφέρονται ενδεικτικά η ερπυστική παραμόρφωση και η εξέλιξη της αντοχής με το χρόνο.

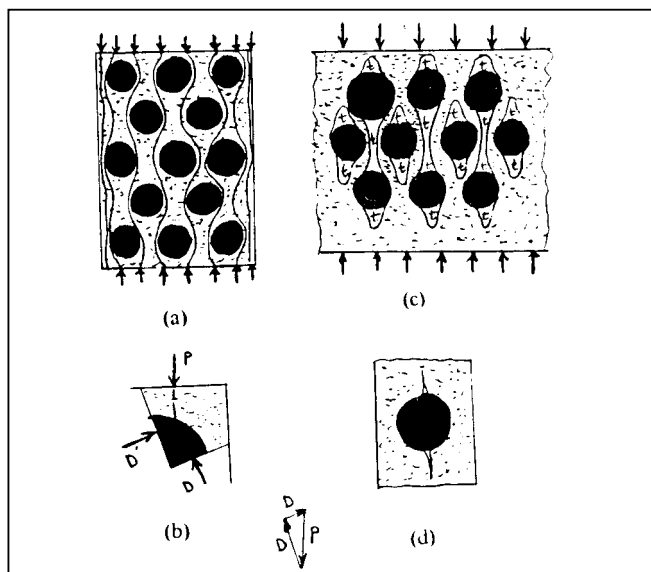
Λόγω της μικρότερης ερπυστικής παραμόρφωσης των αδρανών από αυτήν του τσιμεντοπολτού, με την πάροδο του χρόνου συμβαίνει ανακατανομή της έντασης: ο τσιμεντοπολτός αποφορτίζεται και το αδρανές επιφορτίζεται.

Η ανακατανομή αυτή, στην περίπτωση που ισχυρή φάση είναι το αδρανές (το οποίο αναλαμβάνει το μεγαλύτερο βραχυχρόνιο μέρος του φορτίου), ενισχύει τη διαφορά τάσεων μεταξύ των δύο φάσεων του σκυροδέματος και γι' αυτό αυξάνει την ένταση του συστήματος. Στην περίπτωση που ισχυρή φάση είναι ο τσιμεντοπολτός (ο οποίος αναλαμβάνει το μεγαλύτερο βραχυχρόνιο μέρος του φορτίου), η ανακατανομή αυτή μειώνει την ένταση του συστήματος. Σκυροδέματα,



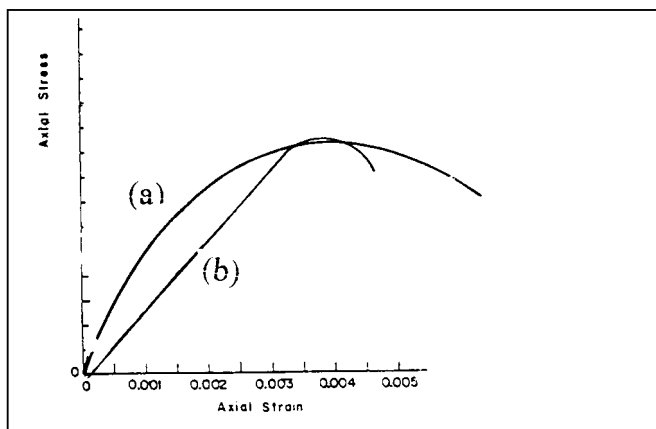
Σχήμα 3.1: Εντατική κατάσταση για σκυρόδεμα με ισχυρή φάση τα αδρανή: (α) τροχιές θλιπτικών τάσεων, (β) ανάπτυξη εγκάρσιων τάσεων λόγω καμπύλωσης των θλιπτικών τροχιών, (γ) περιοχές εγκάρσιων θλιπτικών, c , και εφελκυστικών, t , τάσεων, (δ) θέση έναρξης ρηγμάτωσης.

Figure 3.1: Internal stress state in uniaxial compression for concretes with the aggregate strength higher than the cement paste matrix strength: (a) paths of compressive stresses, (b) development of transverse stresses due to the deflection from linearity of the compressive stress paths, (c) regions of transverse compressive, c , and tensile, t , stresses (d) initial crack formation.

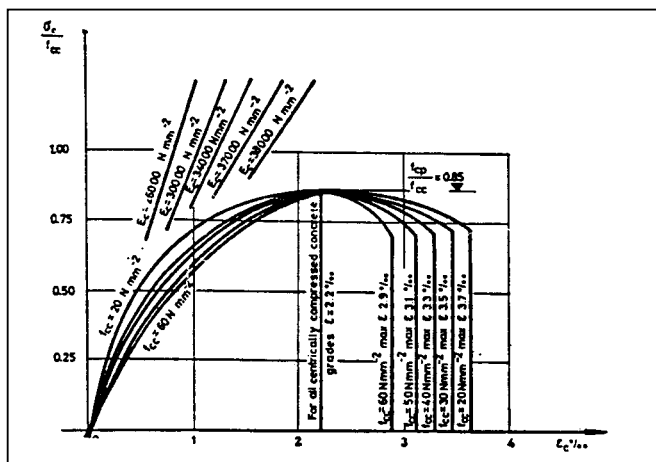


Σχήμα 3.2: Εντατική κατάσταση για σκυρόδεμα με ισχυρή φάση τον τσιμεντοπολτό.

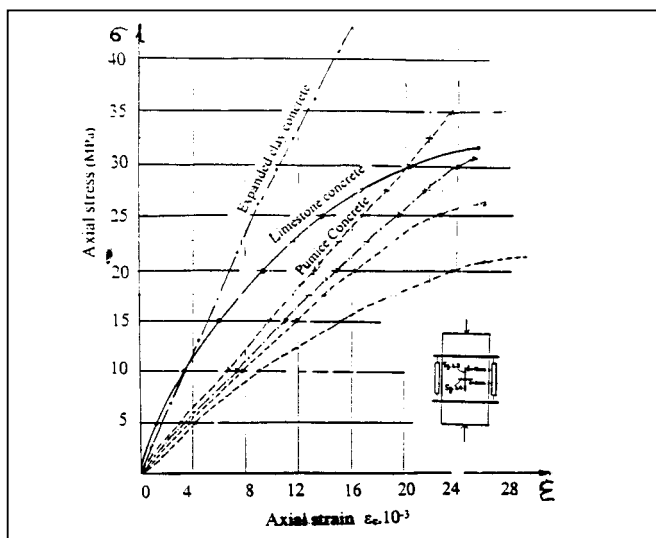
Figure 3.2: Internal stress state in uniaxial compression for concretes with the cement-paste matrix strength higher than the aggregate strength.



Σχήμα 3: Διαγράμματα σ - ϵ ανάλογα με τον τύπο συμπεριφοράς: (α) τύπος του ισχυρού αδρανούς, (β) τύπος του ισχυρού τσιμεντοπολτού.
Figure 3: Stress-strain diagrams depending on the behavior type: (a) type of the strong aggregate, (b) type of the strong cement-paste.



Σχήμα 4: Διαγράμματα σ - ϵ κατά DIN 1045.
Figure 4: Stress-strain diagrams according to DIN 1045.



Σχήμα 5: Διαγράμματα σ - ϵ [6].
Figure 5: Stress-strain curves [6].

λοιπόν, με ισχυρή φάση τον τσιμεντοπολτό θα αναπτύσσουν μικρότερες μακροχρόνιες παραμορφώσεις.

Αντίστοιχη διαφοροποίηση θα εμφανίζεται και στην εξέλιξη της αντοχής με το χρόνο. Σκυροδέματα με ισχυρή φάση τον τσιμεντοπολτό θα εμφανίζουν ταχύτερη εξέλιξη. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο μηχανισμός ανάπτυξης εσωτερικών τάσεων εξαρτάται από το λόγο της αντοχής του σκυροδέματος προς την αντοχή του αδρανούς. Για κάθε αδρανές θα υπάρχει μια μεταβατική στάθμη της αντοχής του σκυροδέματος. Για αντοχές μεγαλύτερες από αυτήν ο μηχανισμός του σκυροδέματος θα αντιστοιχεί σε αυτόν με ισχυρή φάση τον τσιμεντοπολτό, κατά τον οποίο οι ρωγμές διαδίδονται μέσω των αδρανών και γι' αυτό η αντοχή του αδρανούς θα καθορίζει τη μέγιστη στάθμη σκυροδέματος που μπορεί να επιτευχθεί με το συγκεκριμένο αδρανές. Αναμένεται, λοιπόν, καθυστέρηση στην εξέλιξη της αντοχής μετά την ηλικία του σκυροδέματος, για την οποία η αναπτυχθείσα αντοχή του σκυροδέματος προσεγγίζει τη μέγιστη αντοχή που μπορεί να επιτευχθεί με το δεδομένο αδρανές. Έτσι η εξέλιξη της αντοχής στην περίπτωση αυτή θα είναι ταχύτερη (για παράδειγμα, η αντοχή των επτά ημερών θα είναι μεγαλύτερο ποσοστό της αντοχής των είκοσι οκτώ ημερών).

5. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ Ο ΛΟΓΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΠΡΟΣ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Σύμφωνα με τις παραπάνω θεωρήσεις, ο τύπος συμπεριφοράς του σκυροδέματος εξαρτάται από τη σχέση της αντοχής του σκυροδέματος προς την αντοχή του αδρανούς. Δεδομένου ότι η αντοχή και η δυσκαμψία του αδρανούς σχετίζονται άμεσα με το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, προτείνεται ως δείκτης συμπεριφοράς του σκυροδέματος ο λόγος της αντοχής προς το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος.

Σκυροδέματα με την ίδια τιμή του προτεινόμενου δείκτη θα αντιστοιχούν στον ίδιο τύπο συμπεριφοράς. Σκυροδέματα με μικρή τιμή του δείκτη θα αντιστοιχούν στον τύπο του ισχυρού αδρανούς, σκυροδέματα με μεγάλη τιμή του δείκτη θα αντιστοιχούν στον τύπο του ισχυρού τσιμεντοπολτού.

Στο σχήμα 4 δίνονται οι καμπύλες συμπεριφοράς σ - ϵ σύμφωνα με το DIN 1045 και στο σχήμα 5 δίνονται οι αντίστοιχες καμπύλες για σκυροδέματα με διάφορα είδη αδρανών, ενώ στο σχήμα 6 δίνεται η συσχέτιση αντοχής και μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος για τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής [8] και στον πίνακα 1 η αντίστοιχη συσχέτιση για κανονικά σκυροδέματα [9].

Όπως προκύπτει από το σχήμα 4, οι τιμές του προτεινόμενου δείκτη για προοδευτική μετάβαση από τον ένα τύπο συμπεριφοράς στον άλλο είναι: 0,7 1,0 1,2 1,3 1,6, ενώ στο σχήμα 6 οι τιμές του δείκτη για τύπο συμπεριφοράς αυτόν

του ισχυρού τσιμεντοπολτού κυμαίνονται από 2,3 έως 3,0 και στον πίνακα 1 οι τιμές του δείκτη για τύπο συμπεριφοράς αυτόν του ισχυρού αδρανούς είναι: 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0 1,2 1,3 1,4. Για τα σκυροδέματα του σχήματος 5 η τιμή του δείκτη για τον τύπο του ισχυρού τσιμεντοπολτού είναι 2,9 (για το μικροκισσηρόδεμα αντοχής 30 MPa), 2,5 (για ελαφροσκυρόδεμα με σπογγοκέραμο αντοχής 50 MPa) και για τον τύπο συμπεριφοράς αυτόν του ισχυρού αδρανούς 1,2 (για ασβεστολιθικά αδρανή αντοχής 25 MPa).

Η μεταβατική τιμή του παραπάνω δείκτη για μετάβαση από τον ένα τύπο συμπεριφοράς στον άλλο, όπως φαίνεται από τα παραπάνω στοιχεία, μπορεί να θεωρηθεί ότι κυμαίνεται από 1,4 έως 1,8.

6. Ο ΑΠΛΟΠΟΙΗΤΙΚΟΣ ΚΑΙ ΕΝΟΠΟΙΗΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΑΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΔΕΙΚΤΗ

6.1. Άρση της αναντιστοιχίας ταξινόμησης και συμπεριφοράς

Το μικροκισσηρόδεμα αντοχής 25 έως 30 MPa με βάση τη στάθμη της αντοχής του κατατάσσεται στα σκυροδέματα χαμηλής αντοχής, ενώ, όπως φαίνεται στο σχήμα 2, εμφανίζει συμπεριφορά σκυροδέματος υψηλής αντοχής.

Το μικροκισσηρόδεμα συγκρινόμενο με βάση τον προτεινόμενο δείκτη κατατάσσεται στον ίδιο τύπο συμπεριφοράς με τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής, αφού η τιμή του δείκτη του (3,0) είναι παρόμοια με την τιμή των σκυροδεμάτων αυτών.

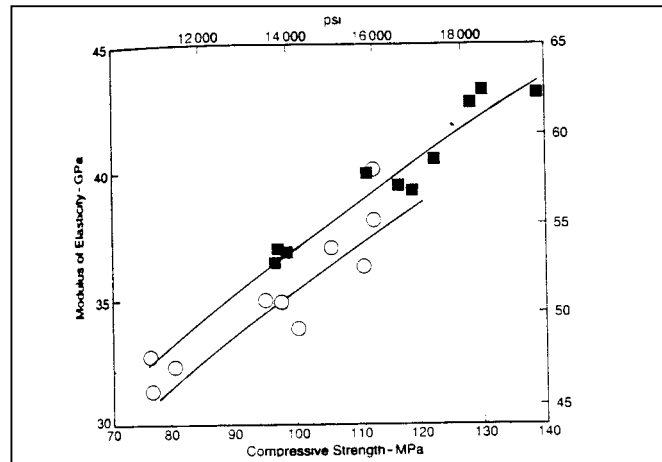
6.2. Ενοποίηση των σκυροδεμάτων ανεξάρτητα από τον τύπο του αδρανούς και τη στάθμη της αντοχής

Σύμφωνα με τη συμβατική ταξινόμηση, τα σκυροδέματα ανάλογα με τον τύπο του αδρανούς και τη στάθμη της αντοχής διακρίνονται σε συμβατικά κανονικά σκυροδέματα, σε κανονικά σκυροδέματα υψηλής αντοχής, σε ελαφροσκυροδέματα χαμηλής αντοχής και σε ελαφροσκυροδέματα υψηλής αντοχής. Κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες ερευνάται ξεχωριστά και γίνονται ξεχωριστές αναφορές υιοθετώντας διαφορετικές οπτικές και δίνοντας διαφορετικές ερμηνείες, με αποτέλεσμα μεγάλος όγκος εργασίας να επαναλαμβάνεται δύο και τρεις φορές, ενώ ένα άλλο μέρος να καθυστερεί ακόμη για μια άλλη κατηγορία σκυροδέματος (για παράδειγμα, για την περίπτωση του πιο πρόσφατου σκυροδέματος υψηλής αντοχής) από ανεπάρκεια στοιχείων, μολονότι τα στοιχεία αυτά είναι δυνατόν να υπάρχουν ήδη από τα αποτελέσματα για μια άλλη κατηγορία σκυροδέματος (για παράδειγμα τα ελαφροσκυροδέματα).

Αφ' ετέρου, δεδομένου ότι οι τύποι των αδρανών, ιδιαίτερα στην περίπτωση των ελαφροσκυροδεμάτων, ποικίλ-

Πίνακας 1: Συσχέτιση αντοχής και μέτρου ελαστικότητας [9].
Table 1: Correlation of strength and modulus of elasticity [9].

f_c [MPa]	10	15	20	25	30	40	45	50	60
E_c [GPa]	17	21	24	27	29	33	34	36	38



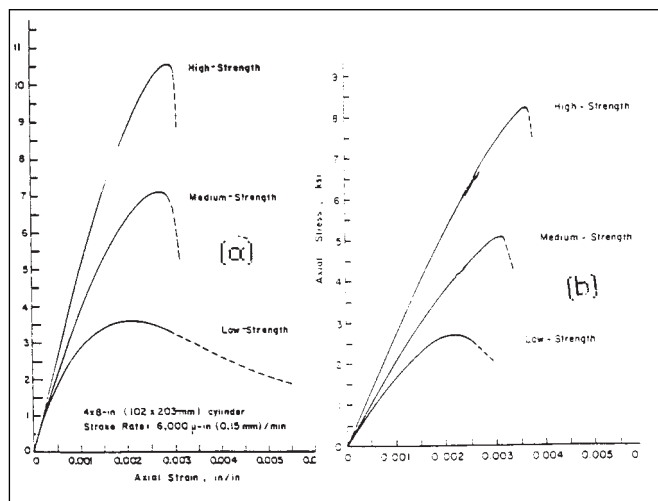
Σχήμα 6: Συσχέτιση αντοχής και μέτρου ελαστικότητας [8].
Figure 6: Correlation of strength and modulus of elasticity [8].

λουν για σκυροδέματα της ίδιας κατηγορίας, προκύπτουν σημαντικές αποκλίσεις στα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα (ή και αντιτιθέμενα αποτελέσματα και συμπεράσματα), αφού σκυροδέματα της ίδιας κατηγορίας μπορεί να αντιστοιχούν σε διαφορετικό τύπο συμπεριφοράς (όπως για παράδειγμα το μικροκισσηρόδεμα, που αναφέρθηκε παραπάνω και το οποίο αποκλίνει από τη συμπεριφορά των ελαφροσκυροδεμάτων χαμηλής αντοχής στην οποία κατατάσσεται με βάση τη συμβατική ταξινόμηση).

Με βάση τον προτεινόμενο δείκτη, οι παραπάνω κατηγορίες ενοποιούνται σε μία με παράμετρο συμπεριφοράς την τιμή του προτεινόμενου δείκτη: σκυροδέματα με μεγάλη τιμή του δείκτη (υπερδοσολογημένα, με μεγαλύτερη καταπόνηση τσιμέντου για επίτευξη μεγαλύτερης αντοχής) θα εμφανίζουν διαφορετική συμπεριφορά από σκυροδέματα με μικρή τιμή του δείκτη (υποδοσολογημένα).

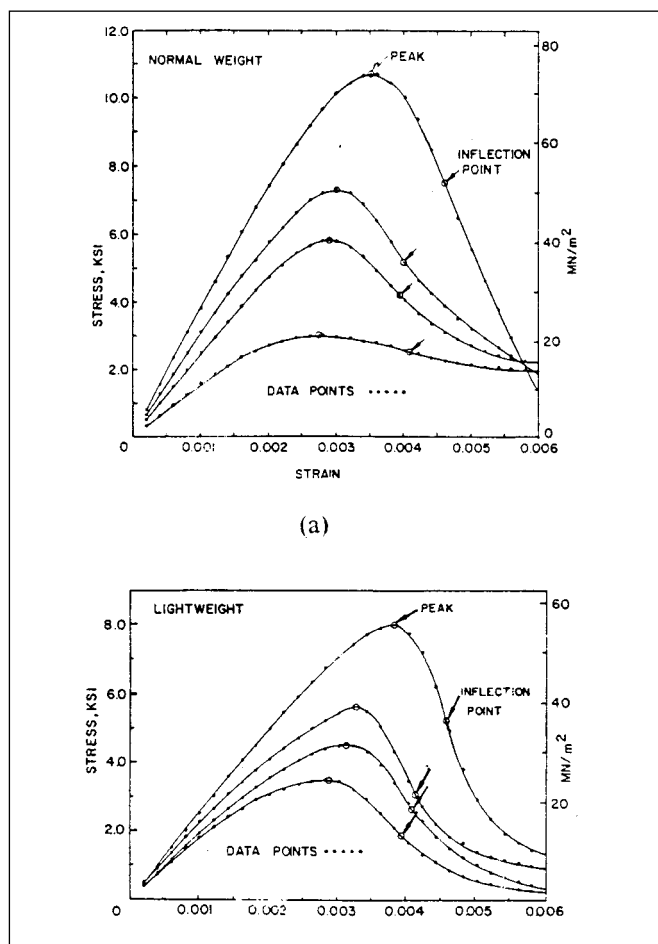
Για παράδειγμα, στα σχήματα 7 [4] και 8 [10], τα οποία εμφανίζουν πειραματικά αποτελέσματα για σκυροδέματα διαφόρων κατηγοριών, είναι εμφανής η ταυτότητα της παραμορφωσιακής συμπεριφοράς υπό το πρίσμα του προτεινόμενου δείκτη (καθώς τα ελαφροσκυροδέματα συσχετίζονται με κανονικά σκυροδέματα με μεγαλύτερη αντοχή για ίδια τιμή του δείκτη, δηλαδή του λόγου αντοχής προς μέτρο ελαστικότητας).

Έτσι, φαινόμενα, όπως η ταχύτερη εξέλιξη της αντοχής, ο μικρότερος ερπυσμός κ.ά., των σκυροδεμάτων υψηλής



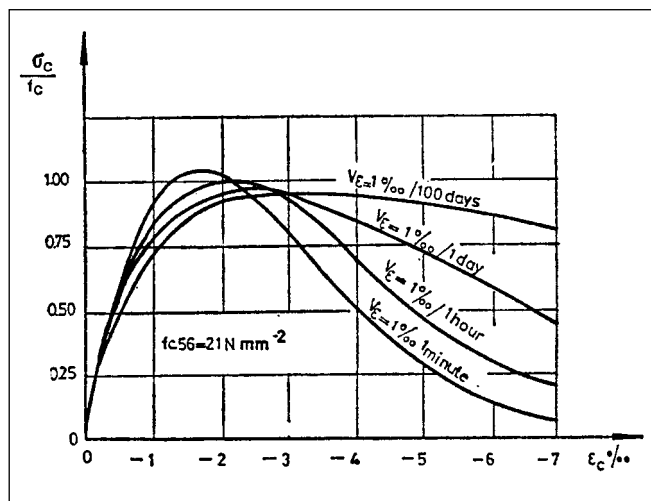
Σχήμα 7: Διαγράμματα σ - ϵ για (α) κανονικά σκυροδέματα και (β) για ελαφροσκυροδέματα [4].

Figure 7: Stress-strain curves for (a) normal concretes and (b) for lightweight concretes [4].



Σχήμα 8: Διαγράμματα σ - ϵ για (α) κανονικά σκυροδέματα και (β) για ελαφροσκυροδέματα [10].

Figure 8: Stress-strain curves for (a) normal concretes and (b) for lightweight concretes [10].



Σχήμα 9: Η επιρροή της ταχύτητας επιπόνησης V [8].

Figure 9: The influence of strain or stress rate V [8].

αντοχής [5] και κάποιων ελαφροσκυροδεμάτων [6] υπό το πρίσμα του προτεινόμενου δείκτη και συσχετιζόμενα με τον τύπο συμπεριφοράς των υπερδοσολογημένων σκυροδεμάτων (με μεγάλη τιμή του δείκτη) μοιάζουν αναμενόμενα (βλέπε 4.2).

7. ΑΔΥΝΑΜΙΕΣ ΤΗΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΟΚΙΜΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

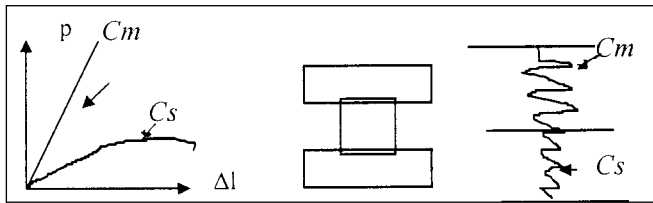
7.1. Ένα παράδειγμα: Η αναντιστοιχία της πλαστιμότητας δοκιμών και δομικών στοιχείων στην περίπτωση του μικροκισσηροδέματος και του σκυροδέματος υψηλής αντοχής

Όπως φαίνεται στα σχήματα 1 και 2, μικροκισσηρόδεμα με αντοχή 25-30 MPa και κανονικό σκυρόδεμα υψηλής αντοχής εμφανίζουν, σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, σαφώς ψαθυρότερη συμπεριφορά από αυτήν του συμβατικού σκυροδέματος (με πιο απότομο τον κατερχόμενο κλάδο του διαγράμματος).

Εν τούτοις, σύμφωνα με τα αποτελέσματα πειραματικού προγράμματος [11], η πλαστιμότητα κατάλληλα οπλισμένων στοιχείων από μικροκισσηρόδεμα προκύπτει παρόμοια με αυτήν του συμβατικού σκυροδέματος. Το ίδιο συμπέρασμα αναφέρεται στη βιβλιογραφία [12] και για στοιχεία από σκυρόδεμα υψηλής αντοχής.

7.2. Αναζητώντας τις αιτίες: Η διαφορετική επιρροή της μηχανής θραύσεως σε σκυροδέματα με διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας

Όπως φαίνεται στο σχήμα 9, ο κατερχόμενος κλάδος του διαγράμματος τάσεων - παραμορφώσεων εξαρτάται έντονα από την ταχύτητα επιπόνησης [8].



Σχήμα 10: Σύστημα μηχανής και δοκιμίου.
Figure 10: Machine and specimen system.

Θεωρώντας, απλοποιητικά, το σύστημα μηχανής και δοκιμίου ως σύστημα δύο ελατηρίων σε σειρά, όπως φαίνεται στο σχήμα 10, η αναπτυσσόμενη ταχύτητα επιπόνησης του δοκιμίου V_s και η επιβαλλόμενη ταχύτητα επιπόνησης του συστήματος V_t συνδέονται με τη σχέση:

$$V_s = V_t [1 / (1 + C_s / C_m)]$$

όπου C_s και C_m είναι οι σταθερές, δυσκαμψίες, δοκιμίου και μηχανής.

Με την αύξηση της επιπόνησης η C_m είναι σταθερή, ενώ η C_s μεταβάλλεται και στη στάθμη του μέγιστου φορτίου γίνεται αρνητική. Σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο, η αναπτυσσόμενη ταχύτητα του δοκιμίου πριν το μέγιστο φορτίο αυξάνει με τη μείωση της δυσκαμψίας του δοκιμίου, ενώ από τη στάθμη του μέγιστου φορτίου και μετά αυξάνει με την αύξηση της δυσκαμψίας του (λόγω της αρνητικής τιμής της δυσκαμψίας).

Δοκίμια από συμβατικό σκυροδέμα 30 MPa και δοκίμια από μικροκισσηρόδεμα αντοχής 30 MPa ή από συμβατικό σκυροδέμα υψηλής αντοχής έχουν σημαντικά διαφορετική δυσκαμψία.

Στην περιοχή του μέγιστου φορτίου τα δοκίμια από το μικροκισσηρόδεμα και το σκυροδέμα υψηλής αντοχής εμφανίζουν σημαντικά μεγαλύτερη δυσκαμψία (λόγω του μεγαλύτερου μέτρου ελαστικότητας στην περιοχή αυτή, βλ. σχήμα 1 και 2). Γι' αυτό, για ίδια επιβαλλόμενη ταχύτητα, η αναπτυσσόμενη ταχύτητα του δοκιμίου είναι μεγαλύτερη γι' αυτά τα σκυροδέματα απ' ό,τι για το συμβατικό σκυροδέμα.

Με βάση τις θεωρήσεις αυτές, συμπεραίνεται ότι ο πιο απότομος κατερχόμενος κλάδος του μικροκισσηροδέματος (με αντοχή 30 MPa) και του σκυροδέματος υψηλής αντοχής από αυτόν του συμβατικού σκυροδέματος αντανακλά, τουλάχιστον εν μέρει, τη μεγαλύτερη αναπτυσσόμενη ταχύτητα του δοκιμίου παρά κάποια εγγενή διαφορά συμπεριφοράς, όπως υιοθετείται γενικά στη βιβλιογραφία [14].

Χαρακτηριστικά της ταυτότητας της συμπεριφοράς στον κατερχόμενο κλάδο είναι τα αποτελέσματα που δίνονται στο σχήμα 8 και τα οποία προέκυψαν με μη συμβατική δοκιμασία σε ιδιαίτερα δύσκαμπτη μηχανή θραύσεως με σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης του δοκιμίου [10].

8. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΟΚΙΜΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

8.1. Στόχοι σχεδιασμού

Για το σχεδιασμό της προτεινόμενης μεθόδου δοκιμασίας τίθενται οι παρακάτω στόχοι:

1. Να αίρει τις βασικές πολυπλοκότητες και αδυναμίες της συμβατικής μεθόδου δοκιμασίας: (α) την αναντιστοιχία της εντατικής κατάστασης δοκιμίου και δομικού στοιχείου υπό θλιπτική επιπόνηση, (β) τη διαφορετική επιρροή των χαρακτηριστικών της μηχανής (δυσκαμψία, διαστάσεις και πάχος πλακών) σε διαφορετικούς τύπους σκυροδέματος και (γ) την εξάρτηση των μετρήσεων των παραμορφώσεων (για τη μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας) από το μήκος και τον τρόπο μέτρησης.
2. Οι απαιτούμενοι δείκτες του σκυροδέματος να προκύπτουν από ενιαία και απλή δοκιμασία.

8.2. Περιγραφή της μεθόδου

8.2.1. Τύπος δοκιμίων και διάταξη δοκιμής

Υιοθετούνται κυβικά δοκίμια για την εκτίμηση τόσο της θλιπτικής αντοχής όσο και του μέτρου ελαστικότητας. Ανάμεσα στις πλάκες της μηχανής και το δοκίμιο ελέγχου παρεμβάλλονται βοηθητικές πλάκες από σκυροδέμα ίδιας αντοχής με το υπό έλεγχο δοκίμιο (ή μεγαλύτερης αντοχής από αυτό) που προκύπτουν από δοκίμιο ίδιων διαστάσεων με αυτό χωρίζοντάς το στη μέση (κοπή) κατά τη διεύθυνση της σκυροδέτησης.

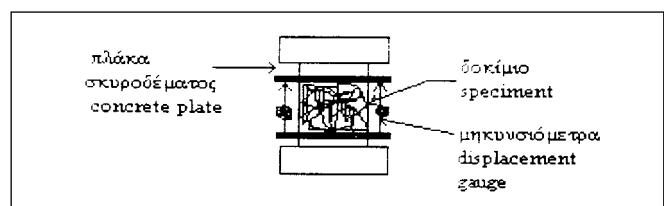
Κάθε πλάκα σκυροδέματος περισφίγγεται περιμετρικά με τη βοήθεια δύο χαλύβδινων κολλάρων, όπως φαίνεται στο σχήμα 11.

8.2.2. Τύπος επιπόνησης

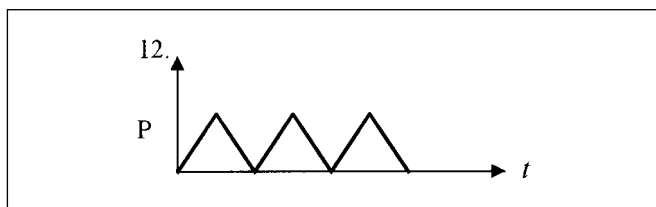
Μετά από δύο-τρεις επαναλήψεις σε χαμηλή στάθμη τάσης, για σταθεροποίηση της διάταξης, τα δοκίμια φορτίζονται κατά το συμβατικό τρόπο μέχρι το μέγιστο φορτίο. Αποφορτίζονται και επαναφορτίζονται μέχρι το εκάστοτε μέγιστο φορτίο τρεις έως πέντε φορές, βλ. σχήμα 12.

8.2.3. Εξοπλισμός και μετρήσεις

Οι διαμήκεις παραμορφώσεις μετρούνται με δύο μηχανοστάθμευτα στηριζόμενα σε χαλύβδινες προεξοχές προσαρμο-



Σχήμα 11: Διάταξη δοκιμής.
Figure 11: Test set-up.



Σχήμα 12: Επιπόνηση.

Figure 12: Loading.

σμένες στα χαλύβδινα κολλάρα περίσφιξης των βοηθητικών πλακών από σκυρόδεμα. Μετρούνται το μέγιστο φορτίο και η μέγιστη παραμόρφωση για κάθε κύκλο φόρτισης.

Δεν τίθενται ιδιαίτερες απαιτήσεις για τη μηχανή θραύσεως. Οι συνήθεις μηχανές με υδραυλική αρχή είναι αποδεκτές. Για τη μέτρηση της παραμόρφωσης μπορούν να υιοθετηθούν απλά ωρολογιακά μηχανισιόμετρα (δεν απαιτείται σύστημα καταγραφής).

8.2.4. Υπολογιζόμενοι δείκτες και η σημασία τους

Υπολογίζονται δύο βασικοί δείκτες:

1. Ο λόγος «μέγιστη τάση/μέτρο ελαστικότητας» της πρώτης φόρτισης.
2. Ο λόγος «διαφορά μέγιστης τάσης/διαφορά μέγιστων παραμορφώσεων» διαδοχικών κύκλων φόρτισης.

Ο πρώτος δείκτης καθορίζει τον τύπο της συμπεριφοράς του σκυροδέματος. Ο δεύτερος δείκτης, δίνοντας την κλίση του κατερχόμενου κλάδου του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων (βλ. 8.3), καθορίζει την πλαστιμότητα του σκυροδέματος. Όσο πιο μικρός είναι ο δείκτης, τόσο μεγαλύτερη η πλαστιμότητα.

8.3. Σκεπτικό για το σχεδιασμό της μεθόδου

8.3.1. Τύπος δοκιμών και διάταξη δοκιμής

Τα κυβικά δοκίμια, όπως χρησιμοποιούνται στη συμβατική μέθοδο δοκιμασίας, επηρεάζονται από τα παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις των πλακών της μηχανής και γι' αυτό η εντατική κατάσταση του δοκιμίου δεν αντιστοιχεί σε αυτήν του δομικού στοιχείου υπό θλιπτική επιπόνηση. Αρκετοί ερευνητές έχουν κατά καιρούς υιοθετήσει διάφορες διαρρυθμίσεις για την υπερνίκηση των τριβών μεταξύ δοκιμίου και πλακών της μηχανής. Οι διαρρυθμίσεις, όμως, αυτές προσανατολιζόμενες σε ερευνητικούς, κυρίως, στόχους δεν προσφέρονται για τυποποιημένες εργαστηριακές δοκιμές.

Με την προτεινόμενη τροποποίηση, το δοκίμιο επιτονεύεται σε μονοαξονική θλίψη, καθώς οι παρεμβαλλόμενες βοηθητικές πλάκες από σκυρόδεμα έχουν τα ίδια παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά με αυτό. Οι πλάκες του σκυροδέματος, χάρη στην περίσφιξη από τις χαλύβδινες πλάκες της μηχανής και τα χαλύβδινα κολλάρα, παραμένουν αρρηγμά-

τωτες και μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για το επόμενο δοκίμιο.

8.3.2. Τύπος επιπόνησης

Όπως αναλύθηκε στην 6.2, η επιρροή της δυσκαμψίας της μηχανής θραύσεως (της συνήθους εργαστηριακής μηχανής με υδραυλική αρχή, χωρίς σερβομηχανισμό) στα αποτελέσματα της δοκιμής είναι σημαντική και ανεξέλεγκτη για την περιοχή των μετρήσεων μετά τη μέγιστη τάση (κατερχόμενο κλάδο του διαγράμματος τάσεων - παραμορφώσεων) και δεν δίνει συγκρίσιμα αποτελέσματα για δοκίμια με διαφορετική δυσκαμψία (διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας ή διαφορετικές διαστάσεις). Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες διαρρυθμίσεις για την υπερνίκηση αυτής της αδυναμίας. Οι περισσότερες από αυτές τις διαρρυθμίσεις είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες ή θέτουν ιδιαίτερες απαιτήσεις για τη μηχανή θραύσεως και δεν προσφέρονται για τυποποιημένες εργαστηριακές δοκιμές.

Με τον προτεινόμενο τύπο επιπόνησης, ο κατερχόμενος κλάδος του διαγράμματος τάσεων - παραμορφώσεων λαμβάνεται ως η περιβάλλουσα των κύκλων της επαναλαμβανόμενης επιπόνησης. Καθώς η μηχανή σταματά αυτόματα στο μέγιστο φορτίο, η επιρροή της δυσκαμψίας της μηχανής δεν είναι σημαντική και τα αποτελέσματα δοκιμών με διαφορετική δυσκαμψία είναι συγκρίσιμα.

8.3.3. Εξοπλισμός και μετρήσεις

Σύμφωνα με τη συμβατική μέθοδο, το μέτρο ελαστικότητας μετρείται σε κυλινδρικά δοκίμια. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, εκτός από τις ανακρίβειες που σχετίζονται με τη διαφορά σχήματος δοκιμίου και δομικού στοιχείου, εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από το μήκος μέτρησης και τη διάταξη μέτρησης, καθώς η εντατική κατάσταση δεν είναι ίδια καθ' ύψος του δοκιμίου. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των μετρήσεων υπόκεινται σε μεγάλη διασπορά, λόγω της τυχαίας θέσης εμφάνισης των ρωγμών του δοκιμίου, με το οποίο έρχονται σε επαφή, άμεσα ή έμμεσα, οι μετρητές των παραμορφώσεων.

8.3.4. Υπολογιζόμενοι δείκτες και η σημασία τους

Οι θεωρήσεις, που οδήγησαν στην υιοθέτηση των προτεινόμενων δεικτών, δίνονται στις § 4 και 5.2.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος δεν αποτελεί θεμελιώδη βάση για την ταξινόμηση και ταυτοποίηση των σκυροδεμάτων.
2. Ο τύπος της συμπεριφοράς του σκυροδέματος εξαρτάται από τη σχέση των αντοχών σκυροδέματος και αδρανούς.

3. Αντί της θλιπτικής αντοχής προτείνεται ο λόγος της αντοχής προς το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος ως πιο αντιπροσωπευτικός δείκτης για την ταξινόμηση και ταυτοποίηση των σκυροδεμάτων.
4. Με τον προτεινόμενο δείκτη είναι δυνατή η ενοποίηση των σκυροδεμάτων των διαφόρων κατηγοριών, καθώς αίρεται η διάκριση των σκυροδεμάτων, από πλευράς μηχανικής συμπεριφοράς, σε κανονικά σκυροδέματα και ελαφροσκυροδέματα, ανάλογα με το είδος του χρησιμοποιούμενου αδρανούς, και σε μικρής και υψηλής αντοχής, ανάλογα με τη στάθμη της αντοχής.
5. Με την ως άνω ενοποίηση μπορεί να περιοριστεί σημαντικά ο απαιτούμενος όγκος πειραματικών δεδομένων, καθώς τα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς των νέων τύπων σκυροδέματος μπορούν να προκύψουν από τα υπάρχοντα στοιχεία συμπεριφοράς παλιότερων τύπων σκυροδέματος.
6. Αναντιστοιχίες στη συμπεριφορά του σκυροδέματος σε επίπεδο υλικού και δομικού στοιχείου σχετίζονται με πολυπλοκότητες της συμβατικής μεθόδου δοκιμασίας του σκυροδέματος.
7. Η συμβατική δοκιμασία του σκυροδέματος σε θλιπτική επιπόνηση δεν δίνει συγκρίσιμα αποτελέσματα στην περίπτωση δοκιμών με διαφορετική δυσκαμψία (με διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας ή διαφορετικές διαστάσεις).
8. Η αποδιδόμενη μεγαλύτερη ψαθυρότητα των ελαφροσκυροδεμάτων και των σκυροδεμάτων υψηλής αντοχής μπορεί να αποδοθεί, τουλάχιστον εν μέρει, στη διαφορετική, απ' ό,τι στο συμβατικό κανονικό σκυρόδεμα, επιρροή της μηχανής θραύσεως στα σκυροδέματα αυτά.
9. Για την αναίρεση των παραπάνω πολυπλοκοτήτων απαιτείται αναθεώρηση της συμβατικής μεθόδου δοκιμασίας του σκυροδέματος.
10. Προδιαγράφεται μια απλή τροποποίηση της συμβατικής μεθόδου χωρίς απαίτηση πρόσθετου εξοπλισμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. A. Neville, "Is our Research Likely to Improve Concrete?", **International Concrete**, March 1995, pp. 45-49.
2. Australian Standards for Concrete Structures, North Sydney, 1994.
3. ACI - ASCE Committee 441, "High-strength concrete columns: State of Art", ACI, Dedroit.
4. F. Slate, A. Nilson, S. Martinez, "Mechanical properties of high strength Lightweight Concrete", **ACI Journal**, July-August 1986.
5. Shah S.P., Ahmad S.H., "**High performance concrete**", McGraw-Hill, New York, 1994.
6. Α. Μπάκα, "**Συμβολή στην τεχνολογία και μηχανική συμπεριφορά γραμμικών στοιχείων από ελαφροσκυρόδεμα**", διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1998.
7. Lusche, "Contribution to the collapse mechanism of ordinary and lightweight concretes with a compact structure, subjected to compression", **Dissertation**, Ruhr-University Bochum, 1971.
8. M. Kakizaki et al., "Effect of Mixing Method on Mechanical Properties and Pore Structure of Ultra High-strength Concrete", **Katri Report** No 90, 19 pp. (Kajima Corporation, Tokyo, 1992) (and also in ACI SP-132, CANMET/ACI, 1992).
9. STAS 10 107/0-75, Civil and Industrial Buildings. Design and structural analysis of concrete, reinforced concrete and prestressed concrete members.
10. P.T. Wang, S.P. Shah, A.E. Naaman, "Stress-Strain Curves of Normal and Lightweight Concrete in Compression", **ACI Journal**, November 1978.
11. Α. Μπάκα, "Η Αντισεισμική αξία του μικροκρυσταλλικού σκυροδέματος", **Πρακτικά Ελληνικού Συνεδρίου**, Βόλος, 1984.
12. A. Azizinamini, "Can High-Strength Concrete Be Used in a Ductile Way?", **Concrete International**, March 1995.

Extended summary

A Proposal for Simplification and Unification of the Conventional Classification and Testing of Concrete

A. BAKA

Assistant of National Technical University of Athens

Abstract

The phenomenological basis for the conventional classification of concrete according to its compressive strength is identified and the ratio "Compressive Strength/ Modulus of Elasticity" is proposed as a more fundamental index of concrete behaviour. On the basis of the proposed index a unification of the various types of concrete becomes possible and, therefore, the amount of experimental data required to study concrete behaviour may be considerably reduced, as the behaviour of concretes for which experimental information is lacking may be defined by existing data obtained from tests carried out on other types of concrete. Non correspondences of concrete behaviour on the specimen and structural element level and the distinction of behaviour between lightweights and normal concretes are related with the complications of the conventional concrete testing: a modified test method is proposed for their elimination.

1. INTRODUCTION

Regarding concrete developments an inconsistency is noticed. The new developments in the domain of concrete technology, such as lightweight concretes have not been accompanied by a corresponding development and adjustment of identification indices and testing methods. Compressive strength continues to be regarded as the basic performance indice. Its testing remains approximately the same since its first adoption; "pseudo-uniaxial compression" on cube or cylinder specimens.

This inconsistency may be seen to be at least partially, responsible for: (a) the expansion of experimental research, as the same investigations are made specifically for conventional normal concrete, high-strength normal concrete, conventional lightweight concrete, high-strength lightweight concrete, etc. and (b) the questions which arise as to the efficiency of thousands upon thousands of research programmes and published papers, as the initial inherent incompleteness of the adopted indice and of the test method is enlarged in the new types of concrete and increase the complications of results and their interpretation. It comes as no surprise, therefore, the question "Is our Research Likely to Improve Concrete?" [1] posed by Adam Neville in a recent article.

In this paper the concepts underlying a different criterion for the classification of concretes are presented. The proposed classification criterion may be a suitable basis for reanalysing published data in a manner that would lead to a better understanding of the causes of the observed concrete behavior.

2. THE INSUFFICIENCY OF COMPRESSIVE STRENGTH AS AN INDEX OF CONCRETE PERFORMANCE

2.1. The current practice of classification of concretes according to the level of strength

According to current practice, concretes are classified on the basis of their level of compressive strength as: conventional normal concrete, high-strength normal concrete, conventional light-weight concrete and high-strength lightweight concrete. The lower limit of strength for the definition of high-strength concrete, following the development of concrete technology, has changed over time: from 30 MPa (4350 psi) in the 1950s it has increased to 50 MPa (7250 psi) according to Australian Standard for concrete structures AS 3600, 1994 [2] and to 70 MPa (10.000 psi) according to ACI 441R-1996 [3]. Several researchers define their own limit in their research reports. According to Floyed, Slate, Nilson and Martinez [4] concretes are classified as: low-strength, medium-strength and high-strength. The lower limits for medium and high strength concrete are defined as 5000 psi and 8000 psi for normal concrete, 4000 psi and 6000 psi for lightweight concrete. Separate recommendations and research programs are developed for each class of concrete, 1 as the research reports conclude different behaviour for each concrete class.

2.2. The phenomenological basis of the current classification

One of the basic differences between conventional concrete and high-strength concrete is the stress-strain relation. In fig. 1 stress-strain curves for conventional and high

strength concretes are shown [5]. High-strength concrete compared with conventional concrete exhibits a more linear ascending branch and a more abrupt descending branch. In fig. 2 the stress-strain diagram of pumice microconcrete [6] is shown. The deformational behaviour seems similar for both types of concrete: high-strength and pumice microconcrete (with strength 25-30 MPa). Such similarities are also identified in several other aspects [7]. According to the level of its strength, pumice microconcrete corresponds to conventional lightweight concretes. However, according to its deformational behaviour it corresponds to high-strength concretes. So, the classification of concrete according to the level of its strength alone, does not seem sufficient.

3. SEEKING THE REASONS FOR THE NON-CORRESPONDENCE OF CLASSIFICATION AND BEHAVIOUR

3.1. The two types of load-carrying mechanism and the corresponding two types of behavior

The internal stress state of the concrete under a uniform compressive stress depends upon the deformational characteristics of its constituent phases: aggregates, cement-paste matrix and the transition phase between them. As the deformational characteristics of these phases are different, their internal stresses are different, with the stiffer phase carrying the higher stress, and, hence, the compressive paths deflect from linearity. This deviation from linearity leads to the development of transverse compressive or tensile stresses for equilibrium purposes. With increasing load, crack formation begins (or, more precisely, the pre-existing microcracks propagate) at the locations of high tensile-stress concentrations, once the local tensile strength is exceeded.

Due to the different stiffness of the cement-paste matrix and the transition zone, (the transition zone is more weak with a higher porosity), cracking initiates at the transition zone which is the location of high tensile-stress concentrations.

Due to the different stiffness of the transition phase and aggregates cracking develops either at the transition zone, as shown in fig. 3.1d [7], for the case of a stiffer aggregate phase (cracks propagate through the cement paste), or at the top and bottom of the coarse aggregate grains, as shown in fig. 3.2 d, for the case of a stiffer cement-paste matrix (cracks propagate through the aggregates).

Hence, the decisive factor for the overall concrete behavior will be the strength of the bond between cement-paste matrix and aggregate (depending strongly upon the quality of the transition zone) in the first case, or the cement-

paste tensile strength and the aggregate stiffness (as cracks propagate through the aggregates) in the second case.

As it is well established that the cause of non-linearity of the stress-strain curve is crack initiation and subsequent crack extension, it would appear from the above that the start of nonlinear behavior occurs when the strength of the bond between the two constituent phases, for the case of a stiffer aggregate phase, or the tensile strength of the cement-paste matrix, for the case of a stiffer matrix, is exceeded. Moreover, it is considered that it is because bond strength is smaller than matrix strength, that the start of pronounced material non-linearity occurs at a much higher load level for the case with concretes characterised by a stiffer cement-paste matrix. For the latter case the stress-strain curve is approximately linear up to a load level very close to the peak level. Hence, the two types of load-carrying mechanism correspond to two different types of concrete behavior depicted by the different stress-strain curves shown in fig. 3.

The differences between the two types of behavior extend also in several other mechanical characteristics, such as the rate of strength gain with age, the long-term deformation factor, etc. Concretes characterised by a stiffer cement-paste matrix (over-dosed concretes, i.e. concretes with a high cement quantity) exhibit earlier gain in strength and lower long-term deformation factor.

3.2. The ratio f_c/E_c as a concrete criterion

For a given aggregate type, concrete is characterised by a stiffer aggregate phase when its strength is low (under-dosed concrete, concrete with relatively low cement quantity), whereas for a higher level of strength (over-dosed concrete) it is characterised by a stiffer cement-paste phase. So, the decisive factor for the type of behavior is the ratio of concrete strength-to-aggregate stiffness. For a small value of this ratio the stiffer phase is the aggregate phase and the corresponding mechanism and behavior are those of figs 3.1 and 3(a), respectively, whereas for a high value of this ratio the stiffer phase is the cement paste and the corresponding mechanism and type of behavior are those of figs 3.2 and 3(b). As the stiffness of the aggregate content (which keeps much more volume than the other constituent phases) is the more pronounced factor of the modulus of elasticity of concrete, concrete behaviour may be considered to be dictated by the ratio of concrete strength-to-concrete modulus of elasticity, which is proposed as a more fundamental concrete index.

Concretes with the same value of the proposed index exhibit similar behavior, characterising a particular type of concrete. For small values of the above index concrete behavior is that characterising the stiffer aggregate type, whereas for large values of the index it corresponds to that of the stiffer cement paste type.

4. THE UNIFYING POTENTIAL OF THE PROPOSED CRITERION

As discussed above, for each aggregate type there is a critical value of concrete strength marking the transition from the one type of behavior to the other, below this value concrete exhibits the stiffer aggregate type of behavior. For values of concrete strength higher than this critical value concrete exhibits the stiffer cement-paste type of behavior. This critical value is different for each type of aggregate depending upon the aggregate stiffness (it increases with increasing aggregate stiffness). On the basis of the proposed index, therefore, the transition from the one type of behavior to the other is described in a similar manner for all types of aggregates independently of the value of their stiffness. Hence, a unification of all types of concrete is achieved. The current distinction of concretes, according to the type of the aggregate and the level of strength, in conventional normal weight concrete, high-strength normal weight concrete, conventional lightweight concrete and high-strength lightweight concrete is not needed. Moreover, it is misleading, especially in the case of lightweight concretes due to the broader range of lightweight aggregates used. Lightweight concretes with the same strength - and, hence, classified in the same group (for example, as conventional lightweight concretes) - may be characterised by a different type of behavior due to their different values of concrete strength-to-aggregate stiffness, which, as discussed above, is the decisive factor for the type of concrete behaviour.

According to the proposed index, concrete exhibits either the stiffer aggregate type or the stiffer cement-paste type of behavior depending upon the value of the ratio of concrete strength-to-modulus of elasticity. On the basis of existing experimental data the critical value of this ratio for the transition from the one type of behavior to the other seems to vary between 1.4 and 1.8 (with a coefficient of 10^{-3}).

For example, according to fig. 4, which shows the stress-strain curves and the corresponding values of the modulus of elasticity for normal concrete, the values of the proposed index for the progressive transition from the one type of behavior to the other (depicted by the degree of the non-linearity of the ascending branch of the curve) are: 0.7, 1.0, 1.2, 1.3 and 1.6, while in fig. 6 [8], which shows the relation between concrete strength and modulus of elasticity for high-strength concrete, the values of the index for the stiffer cement-paste type vary from 2.3 to 3.0.

In table 1 [9], which shows the relation between concrete strength and modulus of elasticity for conventional normal weight concrete, the values of the index for the stiffer aggregate type are: 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.3 and 1.4.

According to fig. 5 [6], which shows the stress-strain curves for normal weight and lightweight concretes with different levels of strength, the value of the proposed index for the stiffer cement-paste type is 2.9 (for pumice microconcrete with 30 MPa strength and $11 \cdot 10^{-3}$ MPa modulus of elasticity) and 2.5 (for expanded clay lightweight concrete with 50 MPa strength and $20 \cdot 10^{-3}$ MPa modulus of elasticity), while for the stiffer aggregate type 1.2 (for limestone concrete with 25 MPa strength and $23 \cdot 10^{-3}$ MPa modulus of elasticity).

More systematic experimental data are needed for a more precise estimation of the critical value of the proposed index for the transition from the one behavior type to the other.

5. REANALYSING EXISTING DATA

Fig. 7 extracted from ref. [4] shows the stress-strain curves for lightweight and normal weight concrete. Comparing the two types of concrete on the basis of the same level of strength lightweight concretes exhibit a significantly more pronounced linearity of the ascending branch and a more abrupt descending branch. On the other hand, a comparison based on the proposed index indicates that both types exhibit the same behavior, as the lightweight concretes are compared with the normal weight concretes with a higher level of strength. In fact, the similarity also extends to the descending branch of the stress-strain curves as indicated in fig. 8 [10].

Also in reference [4] it is interesting to note the following conclusion: "At early ages, high-strength lightweight concrete exhibits a rate of strength gain higher than that of low-strength and medium-strength lightweight concrete, possibly the result of the high internal curing temperature developed during hydration. The high heat of hydration is associated with the high cement content in high-strength mixes. Difference in rate of strength gain becomes negligible at later ages".

On the basis of the proposed criterion it is considered realistic to expect the above mentioned early gain of strength. As discussed above, concrete strength is primarily influenced by the strength of the cement paste when the aggregate constituent is the stiffer phase of concrete. Hence, a delay in strength gain is expected after the age at which the strength of concrete has reached its critical value (the value at which aggregates change from the strong phase to the weak one). This delay is not expected for low-strength and medium-strength lightweight concretes as the final strength of such concretes is below the above mentioned critical value.

In ref. [6] an earlier gain of strength is also observed for pumice microconcrete with strength 25-30 MPa and modulus of elasticity 11000 MPa. This seems to contradict the above mentioned conclusion of ref. [4], as pumice microconcrete according to its level of strength is classified as a low-

strength lightweight concrete. On the basis of the proposed index such a contraction does not exist, as pumice microconcrete according to its concrete strength-to-modulus of elasticity ratio, which is higher than 2.0, is characterised by the same type of behavior as the high-strength concretes in ref. [4] (i.e. the concretes with the stiffer cement-paste type).

On the same basis, an earlier gain of strength is also expected for high-strength normal weight concretes (compared with the conventional normal weight concretes). Another observed difference in behavior between these two types of concrete is the lower long-term deformation factor of the former [5].

On the basis of the proposed criterion this difference in behavior is also expected as a result of the more favourable effect of the redistribution of internal stresses with time. As aggregate creep is insignificant in comparison with that of cement paste, a redistribution of stresses occurs with time from the cement paste to the aggregates. For the case of concretes with the cement paste being the stiffer phase (which is the case with the high-strength concretes), this redistribution reduces the internal stresses of the more stressed phase (the cement paste), whereas for the case of concretes with the aggregates being the stiffer phase (which is the case of conventional concretes) such a redistribution further increases the stresses of the more stressed phase (i.e. the aggregates).

6. COMPLICATIONS OF THE CURRENT TEST METHOD - AN EXAMPLE

6.1. The non-correspondence of ductility on material and structural element level

As shown in fig. 1 and fig. 2, high-strength concrete, as well as pumice microconcrete, exhibits a highly less ductile behaviour than that of conventional normal concrete. However, according to an experimental programme on the seismic behaviour of pumice microconcrete linear members [11], the ductility of appropriately reinforced pumice microconcrete members is approximately the same as that of conventional concrete ones. The same conclusions also apply to high-strength concrete members [12].

6.2. Seeking the Reasons: The Different Influence of the Test Machine on Concretes with Different Moduli of Elasticity

As shown in fig. 9, the descending branch of the concrete stress-strain curve depends strongly upon loading rate [10], being steeper with an increasing loading rate.

Considering the “test machine - specimen” system as a simple system of two springs, as shown in fig. 5, specimen loading rate V_s and total system loading rate V_t are correlated through the formula:

$$V_s = V_t [1 / (1 + C_s / C_m)]$$

where C_s , C_m are specimen and test machine stiffness.

During loading, C_m remains constant, though C_s varies and at maximum load takes negative value. So, for a given hydraulic (load controlled) test machine, loading rate at low levels of stress increases with the decrease of C_s , though near maximum stress increases with the increase of C_s . The two types of concrete, conventional concrete and high-strength concrete, or pumice microconcrete (30 Mpa), exhibit significantly different values of C_s . Near maximum stress, high-strength concrete and pumice microconcrete exhibit a much higher value than that of the conventional concrete (see figs 1 and 2). So, for the same imposed system rate V_t , specimen rate V_s is higher for these concretes than for conventional concrete.

According to these considerations we may conclude that the more abrupt descending branch of high-strength concrete and pumice microconcrete may, probably, reflect, at least partially, their higher loading rate and not an inherent behaviour difference between the two types of concrete, as is generally accepted in the literature [4]. The even steeper descending branch in the case of pumice microconcrete (as also of other lightweight concretes) may be seen as a result of the pre-existing higher loading rate even at the lower load levels, as at these levels C_s is considerably lower.

7. A PROPOSAL FOR A REVISED TESTING METHOD

7.1. Objectives

The main objectives of the specific features of the proposed test method were:

1. To overcome the basic complications of the conventional testing, namely: (a) the non-correspondence of specimen stress state with that of the structural element under compression, (b) the different influence of test machine characteristics (stiffness, dimensions and rigidity of plates, etc.) on different types of concrete and (c) the dependence of the strain measurements upon the gage length and measurement device.
2. The required indices to be obtained by a single and simple test.

7.2. Features of the proposed method

7.2.1. Type of specimen and test arrangement

Cube specimens are adopted for the estimation of both, compressive strength and modulus of elasticity. One of the cubes under testing is cut in two halves. Each cube half is restrained by means of a steel collar, as shown in fig. [6], and is inserted between machine plate and each test specimen.

7.2.2. Type of loading

After two or three load repetitions at low stress level, for the stabilisation of the arrangement, specimens are loaded as usual until maximum stress. Then, they are unloaded and undergo in five cycles of repeating loading at the level of maximum stress, as shown in fig. 12.

7.2.3. Instrumentation and measurements

No special features are required for the test machine; the conventional test machines of hydraulic principle are appropriate.

Longitudinal strain is measured by two displacement transducers fixed between two steel clips attached at the steel collars as shown in fig. 7. Maximum load and maximum displacement are measured for each loading cycle.

7.2.4. Computed indices and their significance

Two main indices are computed:

1. The “*maximum stress / modulus of elasticity*” for the first cycle.
2. The “*maximum stress variation / maximum strain variation*” ratio for the successive loading cycles.

The first index indicates the type of concrete performance: the strong aggregate type, or the strong cement paste type, the strong aggregate type corresponding to low values of the index.

The second index, defining the inclination of the descending branch of the stress-strain curve (see 5.3), indicates concrete ductility, the more ductile behaviour corresponding to low values of the index.

7.3. Concepts underlying the proposed test method

7.3.1. Type of specimen and test arrangement

Cube specimens, as used in the conventional method, are influenced by the different deformational characteristics of machine plates and their dimensions, and, therefore, specimen stress state does not correspond to that of the structural element under compression. Several researchers have proposed various modifications to overcome these disadvantages trying to eliminate the friction between machine plates and specimen. However, the proposed modifications do not seem appropriate for serial testing.

By the modification proposed in this paper, the test specimen is subjected to uniaxial compression, as the interposed concrete plates (the cube halves) have the same deformational characteristics as the test specimens. Concrete plates remain uncracked (and can be used again for the next test specimen), due to the restraint offered by the machine steel plates and the steel collars.

7.3.2. Type of loading

As discussed in 4.2, the stiffness of the test machine influences test results by changing the imposed load rate; this influence is significant after peak stress. Several researchers have proposed various modifications to overcome this shortcoming. However, most of them are too complicated or demand special features for the test machine and do not seem applicable for serial testing.

By the proposed type of loading, the descent branch of the stress-strain curve is obtained as an envelope of the repeated loading cycles. As the test machine stops automatically at maximum load, the influence of test machine stiffness involved is not significant. So, test results of specimens with different stiffness (different modulus of elasticity, or different size) may be considered as comparable.

7.3.3. Measurement arrangement

Modulus of elasticity and maximum strain, according to the conventional method, are measured on cylinder specimens and beyond the inaccuracies related to the difference between the shape of the test specimen and that of the actual structural element (usually prismatic), they are significantly dependent upon gauge length and measurement arrangement, as stress state is not uniform over all the specimen height (due to the restriction of the machine plates). In addition to this, test results are subjected to large scatter, as measurement gauges are usually attached at the specimen surface and are subjected to surface crack deterioration.

By the measurement arrangement proposed in this paper, these shortcomings are overcome, as: (a) specimen shape corresponds to structural element shape, (b) the same stress state prevails along all the specimen height and (c) measurement gauges are not attached at the specimen surface.

7.3.4. Computed indices

Concepts underlying the proposed indices are discussed in § 3 and 4.2.

8. CONCLUSIONS

The current classification of concretes according to the level of concrete strength may lead to confusing results as concretes classified to the same type may exhibit different behavior.

The behavior of concrete depends upon which is the stiffer constituent of the material (cement-paste matrix or aggregates). Two types of behavior are distinguished: that dictated by the stiffer aggregate type and that dictated by the stiffer cement paste type. Each behavior type corresponds to a different type of the load-carrying mechanism.

The decisive factor dictating the type of concrete behavior is the ratio of concrete strength-to-modulus of elasticity and this is proposed as an index for the classification and identification of concrete behavior.

Concretes with a low value of the proposed index correspond to the stiffer aggregate type of behavior. Concretes with a high value of the index correspond to the stiffer cement-paste type. The critical value of the index for the transition from the one type to the other seems, according to existing experimental data, to vary between 1.4 and 1.8.

On the basis of the proposed index a unification of the various types of concrete becomes possible, as the classification of concretes to lightweight and normal weight concretes (regarding their mechanical behavior) is not any more needed and the classification of concretes into conventional and high-strength ones may be misleading.

By unifying concrete as described above, the amount of experimental information required to study concrete behavior may be considerably reduced, as the behavior of concretes for which experimental information is lacking may be defined by existing data obtained from tests carried out on other types of concrete.