

Πειραματική διερεύνηση της πλαστικής συμπεριφοράς σκυροδέματος ομοιόμορφα περισφιγμένου από μανδύα ινωπλισμένων πολυμερών υπό σταδιακά αυξανόμενη φόρτιση – αποφόρτιση

A.I. Καραμπίνης

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός. Καθηγητής ΔΠΘ, karabin@civil.duth.gr*

Θ.Χ. Ρουσάκης

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός. ΕΕΔΙΠ ΔΠΘ, trousak@civil.duth.gr .*

**Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης (ΔΠΘ), Ξάνθη 67100.*

Λέξεις κλειδιά: Ινωπλισμένα πολυμερή, περίσφιγξη, πλαστική διόγκωση, βλάβη, αποφόρτιση

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Παρουσιάζονται οι πειραματικές καμπύλες πλαστικών παραμορφώσεων του περισφιγμένου με ινωπλισμένα πολυμερή σκυροδέματος όπως προέκυψαν από ευρύ πειραματικό πρόγραμμα σταδιακά αυξανόμενης επαναλαμβανόμενης θλιπτικής καταπόνησης. Διερευνάται η ογκομετρική πλαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος καθώς και η μεταβολή της βλάβης του, σε σχέση με την τροχιά πλαστικής παραμόρφωσης. Ο συντελεστής πλαστικής διόγκωσης εξαρτάται εκτός από την αντοχή του σκυροδέματος και από τη δυστένεια του μέσου περισφιγξης. Η παράμετρος βλάβης αυξάνει σημαντικά στο πρώτο κυρίως στάδιο φόρτισης του σκυροδέματος ενώ η κλίση της καμπύλης αποφόρτισης προκύπτει ίση με το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος τουλάχιστον για τα πρώτα στάδια ανελαστικοποίησής του επιτρέποντας τον έμμεσο διαχωρισμό ελαστικών και πλαστικών παραμορφώσεων.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έως τώρα έρευνα έχει θεμελιώσει την ευεργετική δράση των ινωπλισμένων πολυμερών (ΙΩΠ) ως οπλισμού περίσφιγξης για το σκυροδέμα τα οποία βελτιώνουν σημαντικά τόσο την αντοχή όσο και την παραμορφωσιμότητά του σε εφαρμογές επισκευής ή ενίσχυσης δομικών στοιχείων. Οι μελέτες διερεύνησης της συμπεριφοράς του σκυροδέματος σε συνθήκες τριαξονικής θλίψης (ομοιόμορφης περίσφιγξης) περιλαμβάνουν δοκίμια σκυροδέματος περισφιγμένα με υφάσματα ΙΩΠ ή σκυροδέμα εγκιβωτισμένο σε σωλήνες σύνθετων υλικών (Harmon και Συνεργάτες 1995, Samaan και Συνεργάτες 1998, Fam & Rizkalla 2001, Rochette & Labossière 2000, Pantazopoulou & Zanganeh 2001, Kim και Συνεργάτες 2003, κλπ) υποβαλλόμενα σε κεντρική αξονική μονότονη θλίψη προκειμένου να αποτιμηθεί η συμπεριφορά τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων των υλικών. Τα παραπάνω αποτελέσματα αξιοποιούνται για την διαβάθμιση ή ανάπτυξη προσομοιωμάτων εμπειρικών ή καταστατικών.

Από τη διεθνή βιβλιογραφία διαπιστώνεται η διεξαγωγή ελάχιστων πειραμάτων με σταδιακά αυξανόμενη θλιπτική φόρτιση - αποφόρτιση περισφιγμένου με ΙΩΠ σκυροδέματος μέσης κυρίως αντοχής (Harmon & Slattery 1992, Mirmiran & Shahawy 1997) με σκοπό την προσομοίωση ψευδοσεισμικού ιστορικού φόρτισης δεδομένης της εκτεταμένης χρήσης των υφασμάτων ΙΩΠ σε αντισεισμικές εφαρμογές. Στα παραπάνω πειράματα κατά την αποφόρτιση του περισφιγμένου σκυροδέματος (ή γενικότερα του σκυροδέματος) παρατηρούνται σε κάθε κύκλο υστέρησης παραμένουσες παραμορφώσεις και απορρόφηση ενέργειας. Μετά την αρχικά θεωρούμενη ελαστική περιοχή της απόκρισης του σκυροδέματος (έως το 0.3 περίπου της αντοχής του

απερίσφιγκτου σκυροδέματος, Chen 1994) αρχίζει η ανελαστική συμπεριφορά κατά την οποία για κάθε επόμενη φόρτιση (αύξηση του φορτίου ή της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης) το απερίσφιγκτο ή περισφιγμένο σκυρόδεμα βρίσκεται σε κατάσταση τέτοια ώστε δεν υπάρχει δυνατότητα επιστροφής στην προηγούμενη κατάσταση όταν αποφορτιστεί. Δηλαδή εάν αποφορτίσουμε έως την τιμή προγενέστερα επιβαλλόμενου φορτίου, η τιμή της αντίστοιχης παραμόρφωσης δεν είναι η ίδια.

Στην παρούσα εργασία αξιοποιούνται τα αποτελέσματα κατάλληλα σχεδιασμένου πειραματικού προγράμματος δοκιμών σταδιακά αυξανόμενης φόρτισης – αποφόρτισης ώστε να αποτιμηθεί η ελαστική και πλαστική απόκριση του περισφιγμένου σκυροδέματος μετρώντας τις παραμένουσες παραμορφώσεις. Στην συνέχεια διερευνάται η πλαστική ογκομετρική συμπεριφορά του σκυροδέματος καθώς και ο ρυθμός συσσώρευσης βλάβης στο σκυρόδεμα (απόκριση φθίνοντα κλάδου). Προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα για την εξάρτηση των πλαστικών παραμέτρων καθώς και την δυνατότητα έμμεσου διαχωρισμού ελαστικών και πλαστικών παραμορφώσεων σε πειράματα μονότονης φόρτισης σκυροδέματος περισφιγμένου με ΙΩΠ.

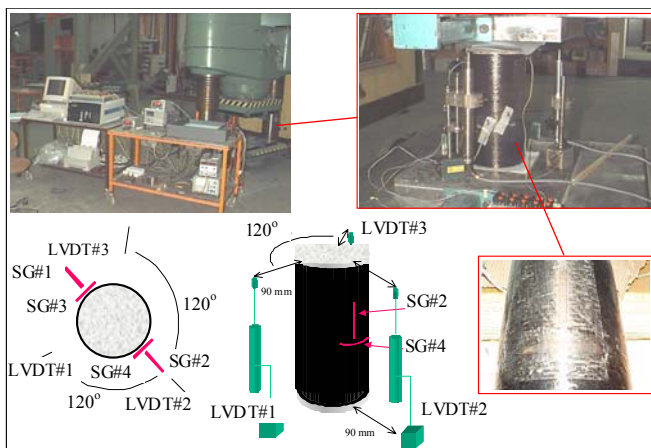
2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Για την διερεύνηση της πλαστικής (ανελαστικής) συμπεριφοράς του περισφιγμένου σκυροδέματος αξιοποιούνται τα αποτελέσματα από ευρύ πειραματικό πρόγραμμα κυκλικών διατομών σκυροδέματος έξι διαφορετικών ποιτήτων με κυλινδρική αντοχή από 25.2 MPa έως 82.1 MPa. Εφαρμόστηκαν δύο τεχνικές περίσφιγξης: περιέλιξης ανθρακούφασμάτων συνήθους (234 GPa - 240 GPa) και υψηλού (377 GPa) μέτρου ελαστικότητας σε τρία και πλέον επίπεδα περίσφιγξης με φάσμα δυστένειας από 280 MPa ($2\epsilon_{E\gamma/D}$, εγκάρσια σε κυκλική διατομή) έως 4300 MPa καθώς και περιέλιξης προεντεταμένης δέσμης ανθρακοϊνών με δυστένεια 2833 MPa ως ενεργητική περίσφιγξη. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονότονη καθώς και σε σταδιακά αυξανόμενη θλιπτική φόρτιση – αποφόρτιση. Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη φόρτισης, καθώς και η διάταξη μέτρησης παραμορφώσεων (τρία γραμμικά επιμηκυνσιόμετρα και τέσσερις αντιδιαμετρικοί μετρητές ανηγμένων παραμορφώσεων (Strain Gauges). Στο παραπάνω σχήμα διακρίνονται τα φύλλα τεφλόν τα οποία τοποθετήθηκαν στις βάσεις των δοκιμίων για την μείωση της διεπιφανειακής τριβής με τις πλάκες φόρτισης. Η αποτίμηση της αποτελεσματικότητας της περίσφιγξης του σκυροδέματος σε μεγέθη αντοχής, παραμορφωσιμότητας και ογκομετρικής συμπεριφοράς των παραπάνω δοκιμίων παρουσιάζονται εκτενέστερα σε προηγούμενες εργασίες των Karabinis & Rousakis (2001), Rousakis & Terfers (2003, 2004), Rousakis και Συνεργάτες (2003), Ρουσάκης (2005). Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται η συμπεριφορά τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων των δοκιμίων σκυροδέματος 25.2 MPa αντοχής περισφιγμένων με ανθρακούφασμα 300 M υψηλού μέτρου ελαστικότητας. Παρατηρείται η σημαντική αύξηση της αντοχής όσο και της παραμορφωσιμότητας του περισφιγμένου σκυροδέματος για αύξηση των στρώσεων του υφάσματος ΙΩΠ. Παράλληλα παρατηρείται ισχυρός περιορισμός του ρυθμού αύξησης των πλευρικών παραμορφώσεων ο οποίος προκαλείται από την ελαστική συνεχώς αυξανόμενη έως την αστοχία αντίδραση του μανδύα έναντι της ασταθούς διόγκωσης του σκυροδέματος. Η περιοριστική δράση του μανδύα μεταβάλλει σημαντικά την ογκομετρική συμπεριφορά του σκυροδέματος (σχ. 3) και μπορεί να οδηγήσει σε συνεχή συρρίκνωση του δοκιμίου και μάλιστα με μεγαλύτερο ρυθμό από ότι πριν την σημαντική ρηγμάτωση του απερίσφιγκτου σκυροδέματος. Η συμπεριφορά δοκιμίων υποβαλλόμενων σε μονότονη ή σταδιακά αυξανόμενη φόρτιση – αποφόρτιση είναι παρόμοια.

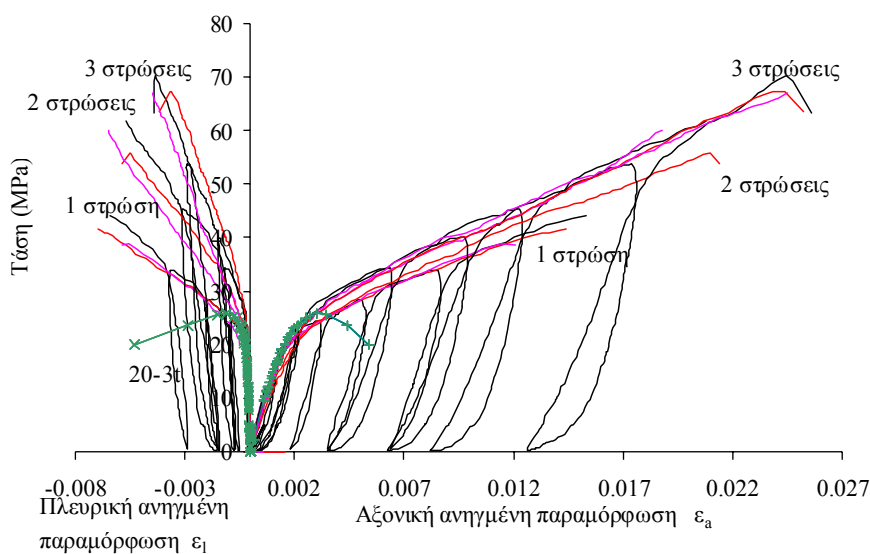
Από την εξέταση του βαθμού συσχέτισης της αποτελεσματικότητας της περίσφιγξης με βασικές παραμέτρους σχεδιασμού, τις ιδιότητες των υλικών καθώς και το επίπεδο προέντασης προέκυψαν εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης της μέγιστης αναλαμβανόμενης τάσης και παραμορφωσιμότητας σκυροδέματος περισφιγμένου με ΙΩΠ όπου το γινόμενο της παραμορφωσιακής κατάστασης του

ΙΩΠ στην αστοχία (ϵ_{je}) επί τον συντελεστή αποτελεσματικότητας της περισφιγξης (k_1) εκφράζονται μέσω του μέτρου ελαστικότητας του ΙΩΠ (Ρουσάκης, 2005).

Στην παρούσα εργασία τα αποτελέσματα σταδιακά αυξανόμενης θλιπτικής φόρτισης – αποφόρτισης υφίστανται περαιτέρω επεξεργασία για την άμεση εξαγωγή των πλαστικών παραμέτρων της συμπεριφοράς του σκυροδέματος.



Σχήμα 1. Πειραματική διάταξη φόρτισης και ενοργάνωση δοκιμίων σκυροδέματος



Σχήμα 2. Απόκριση τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων των δοκιμίων της παρτίδας σκυροδέματος 25.2 MPa αντοχής περισφιγμένων με 0, 1, 2 και 3 στρώσεις ανθρακούφασματος υψηλού μέτρου ελαστικότητας

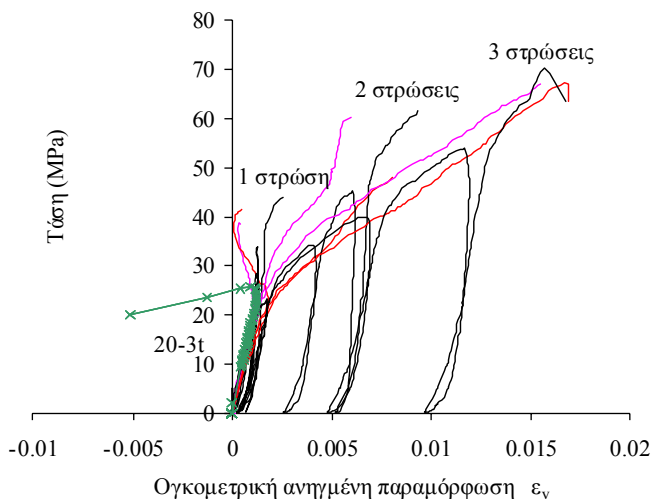
3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει σημαντική διαφοροποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος σε θλίψη: για διαφοροποίηση της δυστένειας και της

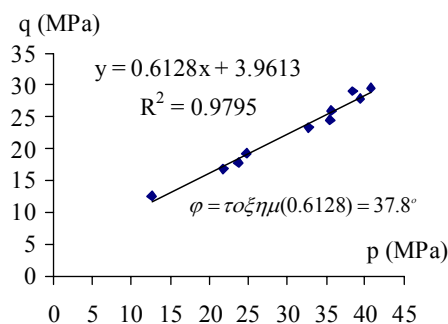
παραμορφωσιμότητας του χρησιμοποιούμενου μέσου περισφιγξης, είτε για διαφοροποίηση της παρεχόμενης αρχικής τάσης περισφιγξης μέσω προέντασης του χρησιμοποιούμενου μέσου περισφιγξης, είτε για διαφοροποίηση της αντοχής του απερίσφιγκτου σκυροδέματος όπως αυτή παρουσιάζεται στα διαγράμματα τάσεων – ανηγμένων αξονικών, πλευρικών και ογκομετρικών παραμορφώσεων (Ρουσάκης, 2005). Παρατηρείται έντονη μη γραμμικότητα στην συμπεριφορά τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων ενώ κυρίως στο απερίσφιγκτο σκυρόδεμα είναι αισθητή η απομείωση των τάσεων για περαιτέρω βράχυνση μετά το μέγιστο αναλαμβανόμενο φορτίο (κυρίως στο σκυρόδεμα χαμηλής αντοχής έχει καταγραφεί). Λαμβάνοντας υπόψη τα πειραματικά αποτελέσματα τάσεων και ανηγμένων παραμορφώσεων του σκυροδέματος σε μονοαξονική και τριαξονική φόρτιση διερευνάται η πλαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό το πρίσμα της θεωρίας της πλαστικότητας και συνάρτηση αστοχίας της μορφής $F = \sqrt{J_{2D}} + \theta J_1 - k(\alpha, \chi) = 0$ η οποία αναπαριστά υλικό με κράτυνση και φθίνοντα κλάδο. Εξάγονται αρχικά οι ελαστικές και στην συνέχεια οι πλαστικές παράμετροι του σκυροδέματος.

3.1 Παράμετροι ελαστικής συμπεριφοράς σκυροδέματος

Η μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος εξαρτάται από τις ιδιότητες των σκύρων, του τσιμεντοπολτού, από τη μεταξύ τους συνάφεια καθώς και την μεταξύ τους αναλογία. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι υφίσταται έντονο το φαινόμενο των μικρορηγματώσεων στην διεπιφάνεια μεταξύ σκύρων και τσιμεντοπολτού ακόμη και πριν τη φόρτιση του σκυροδέματος (λόγω απόμειξης, συστολής ξήρανσης ή θερμικής διαστολής) καθώς και ότι ο τσιμεντοπολτός έχει υψηλό πορώδες (περίπου 30%) που αντιστοιχεί στην παρουσία νερού ή/και αέρα (Chen, 1994). Το σκυρόδεμα θεωρείται ότι έχει ελαστική συμπεριφορά όσο οι μικρορηγματώσεις που υπήρχαν πριν την φόρτιση παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες για επιβολή φορτίου. Έχει παρατηρηθεί έναρξη τοπικών μικρορηγματώσεων σε επίπεδο μεταξύ 30% - 50% της αντοχής του απερίσφιγκτου σκυροδέματος. Θεωρείται για όλα τα σκυροδέματα της μελέτης ως τάση ορίου της ελαστικής περιοχής f_{cy} (τάση ‘διαρροής’) το 0.3 της μέσης αντοχής του απερίσφιγκτου σκυροδέματος ($0.3f_{co}$) όπως προτείνεται από τους Kotsovos & Newman, 1977 (Chen, 1994). Επομένως στην θεωρούμενη



Σχήμα 3. Απόκριση τάσεων - ογκομετρικών ανηγμένων παραμορφώσεων των δοκιμών της παρτίδας σκυροδέματος 25.2 MPa αντοχής περισφιγμένων με 0, 1, 2 και 3 στρώσεις ανθρακούφασματος υψηλού μέτρου ελαστικότητας



Σχήμα 4. Περιβάλλουσα αστοχίας δοκιμών σκυροδέματος 25.2 MPa κατά Mohr – Coulomb. Προσδιορισμός της γωνίας εσωτερικής τριβής ϕ

ελαστική περιοχή για την εύρεση των τάσεων σε στοιχειώδες τμήμα σκυροδέματος υπό οποιαδήποτε παραμορφωσιακή κατάσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχέση της μορφής $\{\sigma\} = [E] \{\varepsilon\}$, όπου $[E]$ το μητρώο δυσθλιψίας (ή ελαστικότητας, γενικά στιβαρότητας) του σκυροδέματος.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα των απερίσφιγκτων δοκιμών του προγράμματος προκύπτουν με εφαρμογή του προτύπου ASTM C469-94 χαμηλές τιμές μέτρων ελαστικότητας από 17.3 GPa έως 30.5 GPa για σκυρόδεμα 25.2 MPa και 82.1 MPa αντίστοιχα. Για την περαιτέρω επεξεργασία το (εφαπτομενικό) μέτρο ελαστικότητας ανάλογα με την αντοχή του σκυροδέματος υπολογίζεται από τη σχέση (CEB-FIP Model Code 90):

$$E_c = E_{co} \left(\frac{f_{co}}{f_{cmo}} \right)^{1/3} \quad (1)$$

όπου: $E_{co} = 21500 \text{ MPa}$

και $f_{cmo} = 10 \text{ MPa}$ σταθεροί συντελεστές ισοδυναμίας μονάδων εξίσωσης,

η οποία προτείνεται για αντοχές από 20 MPa έως και 88 MPa και οδηγεί σε τιμές μέτρων ελαστικότητας 29.2 GPa και 43.3 GPa αντίστοιχα για αντοχές 25.2 MPa και 82.1 MPa.

Οι τιμές του μέτρου εγκάρσιας παραμόρφωσης υπολογίζονται από τα πειραματικά αποτελέσματα των απερίσφιγκτων δοκιμών βάσει του προτύπου ASTM C469-94, από 0.17 έως 0.20. Για την περαιτέρω επεξεργασία το μέτρο εγκάρσιας παραμόρφωσης του σκυροδέματος λαμβάνεται σταθερό και ίσο με 0.20, που αποτελεί μια αντιπροσωπευτική τιμή για τα περισσότερα σκυροδέματα ανεξάρτητα από την αντοχή τους (Chen, 1994).

3.2 Πειραματικός προσδιορισμός γωνίας εσωτερικής τριβής σκυροδέματος φ – παράμετρος τριβής θ

Για την αποτίμηση της ευαισθησίας του σκυροδέματος σε τριαξονική συμμετρική καταπόνηση απαιτείται η εκτίμηση της γωνίας εσωτερικής τριβής του σκυροδέματος φ , όπως αυτή προκύπτει από περιβάλλουσες αστοχίας κύκλων του Mohr για το υλικό. Από πειραματικά δεδομένα προκύπτει ότι για χαμηλή εγκάρσια περίσφιγξη το σκυρόδεμα εμφανίζει μεγάλο φ ενώ για αύξηση της εγκάρσιας τάσης η φ πρακτικά σταθεροποιείται σε χαμηλότερες τιμές (Chen, 1994). Στην παρούσα διερεύνηση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος με την θεωρία πλαστικότητας χρησιμοποιείται κριτήριο αστοχίας τύπου Drucker-Prager. Έτσι η γωνία εσωτερικής τριβής θεωρείται σταθερή και προσδιορίζεται κατά τα γνωστά από την κλίση της επιφάνειας αστοχίας, θεωρούμενου κριτηρίου αστοχίας δύο παραμέτρων (συνοχής c και γωνίας εσωτερικής τριβής φ) κατά Mohr-Coulomb από διάγραμμα της διδιάστατης τάσης περίσφιγξης $p = (\sigma_{1u} + \sigma_{2u})/2$ προς τον εκτροπέα της τάσης $q = (\sigma_{1u} - \sigma_{2u})/2$ (Μεϊ και Συνεργάτες, 2001). Το σ_{1u} είναι η αντοχή του σκυροδέματος (f_{cu}) για διάφορα επίπεδα πλευρικής τάσης περίσφιγξης σ_{2u} . Στο σχήμα 4 απεικονίζονται τα πειραματικά σημεία της περιβάλλουσας αστοχίας των περισφιγμένων με ανθρακούφασμα 300M δοκιμών αντοχής σκυροδέματος των 25.2 MPa. Από την κλίση της ευθείας του σχήματος (περιβάλλουσα αστοχίας) προσδιορίζεται η γωνία εσωτερικής τριβής φ . Με τον ίδιο τρόπο προκύπτουν οι γωνίες εσωτερικής τριβής μεταξύ 32.2° και 37.8° για σκυροδέματα από 25.2 MPa έως 82.1 MPa χωρίς κάποια σαφή σχέση εξάρτησης των αποτελεσμάτων από την αντοχή του σκυροδέματος. Για την εκτίμηση της γωνίας εσωτερικής τριβής για μεταβολή της αντοχής σκυροδέματος χρησιμοποιείται η γραμμική σχέση που αναφέρεται από τους Li και Συνεργάτες (2003):

$$\varphi = 36^\circ + 1^\circ \left(\frac{f_{co}}{3.5 f_{cmo}} \right) \leq 45^\circ \quad (2)$$

όπου: $f_{cmo} = 10 \text{ MPa}$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει γωνία εσωτερικής τριβής που κυμαίνεται από 36.7° έως και 38.3° για τα σκυροδέματα που εξετάζονται. Έτσι μπορεί να υπολογιστεί η παράμετρος τριβής θ , που εκφράζει την ευαισθησία σε πίεση του υλικού, βάσει της σχέσης :

$$\theta = \frac{2\eta\mu\phi}{\sqrt{3}(3-\eta\mu\phi)} \quad (3)$$

για σύμπτωση των κριτηρίων αστοχίας Mohr – Coulomb και Drucker – Prager υλικού σε τριαξονική θλίψη με ίση τάση σε δύο από τους τρεις άξονες (σκυροδέμα σε θλίψη υπό ομοιόμορφη περισφιγξη). Οι αντίστοιχες παράμετροι τριβής θ για σκυροδέματα από 25.2 MPa έως 82.1 MPa βάσει της σχέσης (3) κυμαίνονται από 0.287 έως 0.3.

3.3 Πειραματικά διαγράμματα τάσης - ανηγμένης πλαστικής παραμόρφωσης

Από τις πειραματικές καμπύλες τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση – αποφόρτιση εξάγεται η συμπεριφορά τάσεων - πλαστικών παραμορφώσεων των δοκιμίων. Κάθε απειροστή ανηγμένη αξονική παραμόρφωση $d\varepsilon$ που προκαλείται από τη φόρτιση του σκυροδέματος στην ανελαστική περιοχή ισούται με:

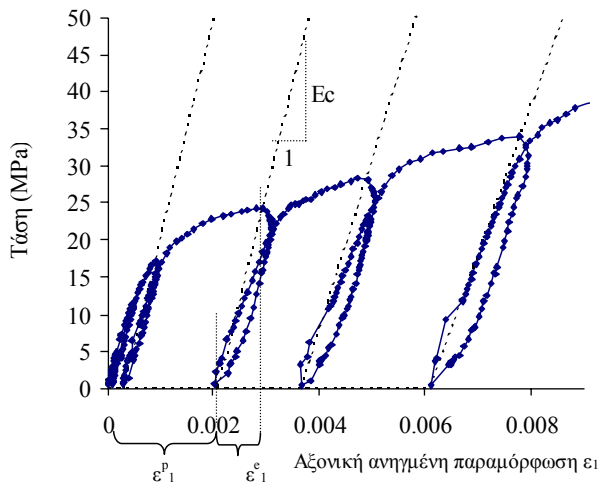
$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p \quad (4)$$

όπου $d\varepsilon^e$ η ελαστική και $d\varepsilon^p$ η πλαστική (μόνιμη) ανηγμένη παραμόρφωση αντίστοιχα. Η αποφόρτιση είναι ελαστική ενώ για μηδενισμό του επιβαλλόμενου φορτίου εξάγεται το μέγεθος της μόνιμης παραμόρφωσης ε^p που αντιστοιχεί στην ανηγμένη παραμόρφωση ε πριν την έναρξη της αποφόρτισης. Στο σχήμα 5 απεικονίζονται οι αξονικές ελαστικές και πλαστικές ανηγμένες παραμορφώσεις δοκιμίου περισφιγμένου με μια στρώση ανθρακούφασματος υψηλού μέτρου ελαστικότητας 300M. Παρατηρείται ότι, τουλάχιστον για τα πρώτα στάδια ανελαστικοποίησης του σκυροδέματος, η κλίση της καμπύλης αποφόρτισης ισούται με το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος E_c . Για επανάληψη της αποφόρτισης – επαναφόρτισης σε υψηλότερες βραχύνσεις του σκυροδέματος παρατηρείται σταδιακή μείωση της στιβαρότητας του σκυροδέματος σε σχέση με το αρχικό μέτρο ελαστικότητας. Το παραπάνω γεγονός φανερώνει ότι η ανελαστική συμπεριφορά του περισφιγμένου σκυροδέματος δεν οφείλεται μόνο στην πλαστικοποίηση του αλλά και στην μικρορηγμάτωση και θραύση του υλικού. Ωστόσο η συμπεριφορά του περισφιγμένου με ΙΩΠ σκυροδέματος διαφέρει σημαντικά από αυτήν του άοπλου, όπου παρατηρείται συνεχής μείωση της δυσθλιψίας και ιδιαίτερα έντονη μετά το μέγιστο αναλαμβανόμενο φορτίο όπου επέρχεται σημαντική χαλάρωση των παραμορφώσεων (βλέπε πειράματα άοπλου σκυροδέματος από τους Sinha και Συνεργάτες (1964), Karsan & Jirsa, 1969).

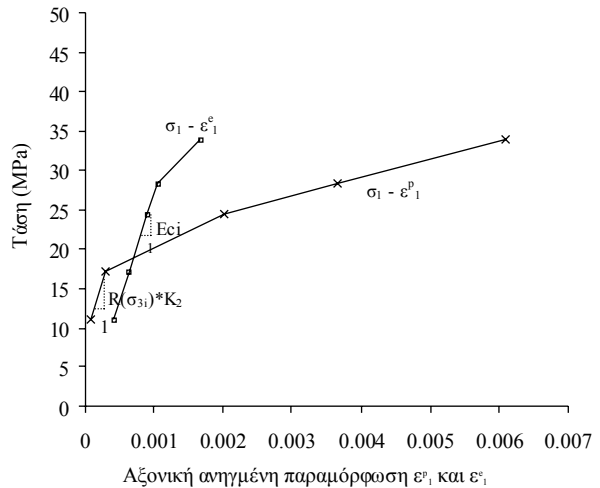
Εξάγοντας τις πλαστικές ανηγμένες παραμορφώσεις σε κάθε αποφόρτιση κατασκευάζεται το διάγραμμα 6 τάσεων – αξονικών ανηγμένων ελαστικών και πλαστικών παραμορφώσεων του δοκιμίου. Από αντίστοιχο διάγραμμα με κατάλληλες αποφορτίσεις – επαναφορτίσεις τόσο στο όριο της ελαστικής περιοχής όσο και κατά την αστοχία μπορεί να εκτιμηθεί η πειραματική τιμή του αρχικού και τελικού μέτρου πλαστικότητας του περισφιγμένου σκυροδέματος (κλίση διαγράμματος τάσεων - αξονικών ανηγμένων πλαστικών παραμορφώσεων) για κάθε δοκίμιο. Ομοίως από τη καμπύλη τάσεων - πλευρικών ανηγμένων παραμορφώσεων κατασκευάζεται το διάγραμμα που απεικονίζει τις πλευρικές ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις για κάθε δοκίμιο.

3.4 Προσδιορισμός πλαστικής διόγκωσης σκυροδέματος

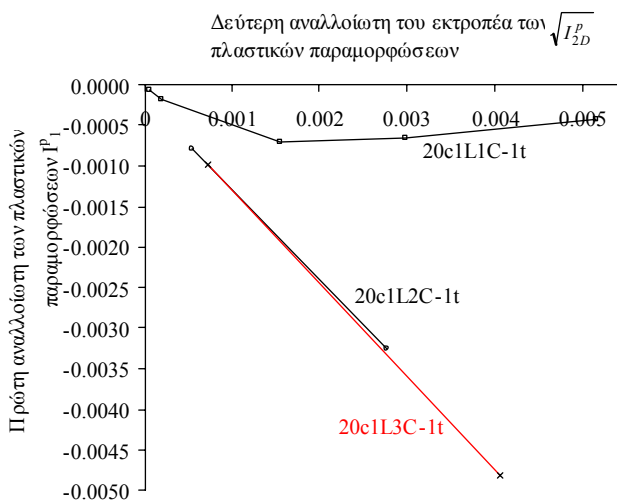
Δεδομένων των κύριων αξονικών και πλευρικών ανηγμένων πλαστικών παραμορφώσεων του περισφιγμένου σκυροδέματος υπολογίζονται για κάθε διακεκριμένο σημείο η πρώτη αναλλοίωτη των πλαστικών παραμορφώσεων ($P_1 = \varepsilon^p_1 + \varepsilon^p_2 + \varepsilon^p_3$) καθώς και η τετραγωνική ρίζα της



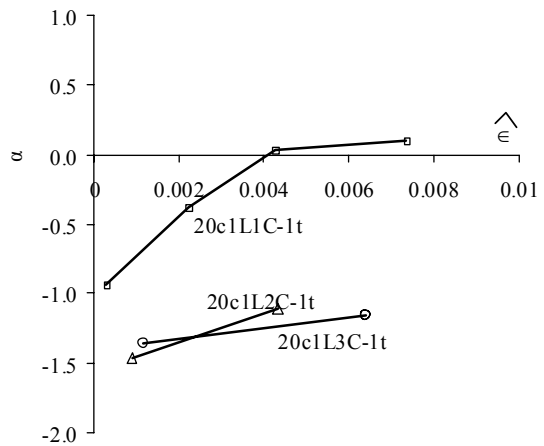
Σχήμα 5. Συμπεριφορά τάσεων – αξονικών ανηγμένων παραμορφώσεων (ϵ_1) του περισφιγμένου δοκιμίου 20c1L1C-1t. Προσδιορισμός πειραματικών ελαστικών (ϵ_1^e), πλαστικών παραμορφώσεων (ϵ_1^p) και μέτρου ελαστικότητας αποφόρτισης (E_c).



Σχήμα 6. Συμπεριφορά τάσεων – αξονικών ανηγμένων ελαστικών (ϵ_1^e) και πλαστικών παραμορφώσεων (ϵ_1^p) παραμορφώσεων του περισφιγμένου δοκιμίου 20c1L1C-1t για τα διακεκριμένα σημεία αποφόρτισης - επαναφόρτισης



Σχήμα 7. Διάγραμμα πρώτης αναλλοίωτης πλαστικών παραμορφώσεων (P_1) – τετραγωνικής ρίζας δεύτερης αναλλοίωτης εκτροπέα πλαστικών παραμορφώσεων ($\sqrt{I_{2D}^p}$) των περισφιγμένων δοκιμίων 20c1L1,2,3C-1t για τα διακεκριμένα σημεία αποφόρτισης - επαναφόρτισης.



Σχήμα 8. Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή διόγκωσης (α) – τροχιάς πλαστικών παραμορφώσεων $\hat{\epsilon} = \int \sqrt{d\epsilon^p} d\epsilon^p$ των περισφιγμένων δοκιμίων 20c1L1,2,3C-1t για τα διακεκριμένα σημεία αποφόρτισης - επαναφόρτισης.

δεύτερης αναλλοίωτης του εκτροπέα των πλαστικών παραμορφώσεων ($\sqrt{I_{2D}^p}$) των περισφιγμένων δοκιμίων όπου $P_{2D} = 1/6([\varepsilon^{p_1} - \varepsilon^{p_2}]^2 + [\varepsilon^{p_2} - \varepsilon^{p_3}]^2 + [\varepsilon^{p_3} - \varepsilon^{p_1}]^2)$. Η κλίση του διαγράμματος $I_1^p - \sqrt{I_{2D}^p}$ ισούται με τον συντελεστή διόγκωσης α του σκυροδέματος. Στο σχήμα 7 απεικονίζεται το αντίστοιχο διάγραμμα για όλα τα δοκίμια του σχήματος 2.

Η διερεύνηση της μεταβολής του συντελεστή διόγκωσης α κατά τη διάρκεια της φόρτισης του σκυροδέματος (ψαθυρό υλικό) είναι απαραίτητη διότι εκφράζει τη σχέση μεταξύ αξονικών και πλευρικών πλαστικών παραμορφώσεων καθώς και την διεύθυνση μεταβολής τους, κάθετα σε επιφάνεια πλαστικής ροής G διαφορετική της επιφάνειας φόρτισης – αστοχίας F . Ο συντελεστής α απαιτείται για την εφαρμογή μη συντηριστικού νόμου πλαστικής ροής. Επιπλέον ο συντελεστής α βάσει της πρότασης των Karabinis & Kiousis (1996) ενσωματώνεται και στην συνάρτηση κράτνσης – απομείωσης κ . Μάλιστα εισάγεται με την σχέση:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2\hat{\varepsilon}}{\alpha - 1} \quad (5)$$

όχι μόνο στον παράγοντα που επηρεάζει την κράτνση του υλικού (hardening) αλλά και στον παράγοντα φθοράς του υλικού (softening). Στη σχέση 5 η διόγκωση συναρτάται με την τροχιά πλαστικών παραμορφώσεων $\hat{\varepsilon}$ της θεωρίας της πλαστικότητας:

$$\hat{\varepsilon} = \int \sqrt{d\varepsilon^p T d\varepsilon^p} \quad (6)$$

όπου ο δείκτης T δηλώνει την αναστροφή του μητρώου των κύριων πλαστικών ανηγμένων παραμορφώσεων. Η τροχιά πλαστικών παραμορφώσεων $\hat{\varepsilon}$ αποτελεί μια θετική ολοένα αυξανόμενη παράμετρο που εκφράζει την συσσώρευση βλάβης στο υλικό λόγω φόρτισης και αναπαριστά ολόκληρο το ιστορικό πλαστικής φόρτισης. Η μεταβολή της διόγκωσης για την εκάστοτε τροχιά πλαστικής παραμόρφωσης για κάθε δοκίμιο αναπαριστάται στο σχήμα 8.

Από τις μελέτες των Han (1984), Han & Chen (1985) προκύπτουν τιμές αρχικού συντελεστή διόγκωσης μεταξύ -0.6 και -0.7 ενώ στην αστοχία οι αντίστοιχες τιμές είναι μεταξύ 0.1 και 0.28. Μάλιστα θεωρείται γραμμική μεταβολή της πλαστικής διόγκωσης σε σχέση με την παράμετρο κράτνσης. Επίσης θεωρείται ότι ο συντελεστής διόγκωσης εξαρτάται αποκλειστικά από την αντοχή του σκυροδέματος. Από τα σχήματα 7 και 8 αν και δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για το είδος μεταβολής της διόγκωσης διαφαίνεται μη γραμμική μεταβολή τουλάχιστον για ελαφρά περίσφιξη σκυροδέματος, ενώ παρατηρείται εξάρτηση της παραμέτρου διόγκωσης α από την παρεχόμενη περίσφιξη του ελαστικού μανδύα ΙΩΠ. Η μείωση της τιμής της διόγκωσης είναι έντονη για αύξηση των στρώσεων ΙΩΠ από 1 σε 2 ή 3.

3.5 Προσδιορισμός της συσσωρευμένης βλάβης στο σκυρόδεμα

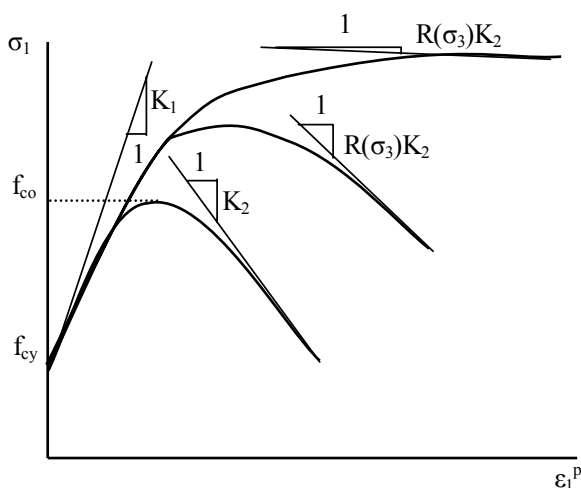
Προσδιορίζεται η πειραματική παράμετρος χ που καθορίζει τον παράγοντα βλάβης του σκυροδέματος $R(\sigma_3)K_2\bar{\varepsilon}$ ο οποίος υπεισέρχεται στην σχέση της κράτνσης – απομείωσης της συνάρτησης φόρτισης αστοχίας τύπου Drucker-Prager (βλέπε πρόταση των Karabinis & Kiousis, 1996). Η παράμετρος χ (μονάδες σε MPa^{-1}) καθορίζει τη μεταβολή της κλίσης της καμπύλης τάσεων – αξονικών πλαστικών παραμορφώσεων $n = R(\sigma_3)K_2$ σε σχέση με την κλίση του φθίνοντα κλάδου του απερίσφιγτου σκυροδέματος K_2 (σχήμα 9) με τη σχέση:

$$\chi = \ln\left(\frac{n}{K_2}\right) / \sigma_3 \quad (7)$$

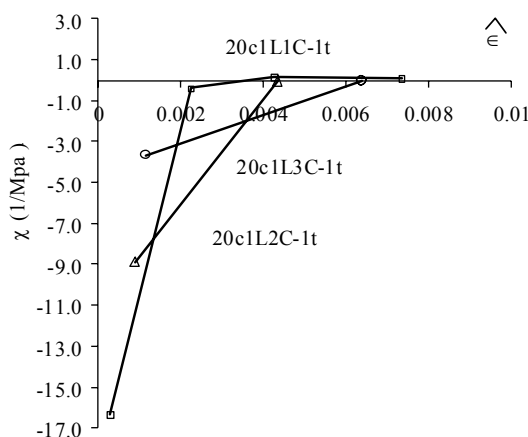
Η παράμετρος βλάβης αυξάνεται ως ποσοστό της τελικής κλίσης του φθίνοντα κλάδου του απερίσφιγκτου σκυροδέματος K_2 για επιβαλλόμενη βράχυνση στο σκυρόδεμα ενώ η παρεχόμενη πλευρική περίσφιγξη ($\sigma_3 = \sigma_2$) ενεργεί αποτρεπτικά.

Η κλίση του φθίνοντα κλάδου του διαγράμματος τάσεων - αξονικών ανηγμένων πλαστικών παραμορφώσεων του απερίσφιγκτου σκυροδέματος K_2 είναι δύσκολο να εκτιμηθεί διότι επηρεάζεται σημαντικά από την τριβή που αναπτύσσεται στις επιφάνειες φόρτισης του δοκιμίου. Επιπλέον είναι δύσκολο να εκτελεστούν κύκλοι αποφόρτισης - επαναφόρτισης σε απερίσφιγκτο σκυρόδεμα και ιδίως στο φθίνοντα κλάδο. Για αντοχή σκυροδέματος 25.2 MPa, προκύπτει το διάγραμμα της παραμέτρου βλάβης χ σε σχέση με την τροχιά πλαστικής παραμόρφωσης $\hat{\epsilon}$ (σχήμα 10).

Παρατηρείται σημαντική αύξηση της παραμέτρου βλάβης κυρίως στο πρώτο στάδιο φόρτισης όπου δεν έχει ενεργοποιηθεί πλήρως ο μανδύας περίσφιγξης, παρουσιάζοντας αρχικά υψηλές αρνητικές τιμές (τιμή -16.3 για δοκίμιο περισφιγμένο με 1 στρώση ΙΩΠ). Για επίπεδο τιμής τροχιάς πλαστικής παραμόρφωσης γύρω στο 0.002 έως 0.005 παρατηρείται σταθεροποίηση της τιμής της βλάβης του σκυροδέματος περισφιγμένου με 1 στρώση ΙΩΠ σε θετικές τιμές, ενώ διαφαίνεται παρόμοια συμπεριφορά και για δοκίμια με ισχυρότερη περίσφιγξη.



Σχήμα 9. Απεικόνιση του αρχικού και τελικού μέτρου πλαστικότητας K_1 και K_2 απερίσφιγκτου σκυροδέματος καθώς και της συνάρτησης βλάβης $R(\sigma_3)$ για περισφιγμένο σκυρόδεμα.



Σχήμα 10. Διάγραμμα της παραμέτρου βλάβης (χ) - τροχιάς πλαστικών παραμορφώσεων $\hat{\epsilon} = \int \sqrt{d\epsilon^p d\epsilon^p}$ των περισφιγμένων δοκιμίων 20c1L1,2,3C-1t για τα διακεκριμένα σημεία αποφόρτισης - επαναφόρτισης.

3.6 Ακρίβεια πειραματικών αποτελεσμάτων πλαστικής συμπεριφοράς σκυροδέματος

Από την διεξαγωγή κατάλληλα σχεδιασμένου ιστορικού φόρτισης σταδιακά αυξανόμενης φόρτισης - αποφόρτισης προέκυψαν τιμές πλαστικών παραμορφώσεων για κάθε επίπεδο αναλαμβανόμενου φορτίου σκυροδέματος περισφιγμένου με ελαστικό μέσο. Οι τιμές αυτές έχουν εξαχθεί τόσο για το πρώτο στάδιο φόρτισης (πριν την εκτεταμένη ρηγμάτωση του σκυροδέματος), στο στάδιο ενεργοποίησης του μανδύα, καθώς και στο στάδιο σταθεροποίησης της δυσθλιψίας του περισφιγμένου σκυροδέματος. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι η ακρίβεια των παραπάνω πειραματικών διαγραμμάτων συμπεριφοράς (ιδίως των $\alpha - \hat{\epsilon}$ και $\chi - \hat{\epsilon}$ που έχουν έντονη μεταβολή) εξαρτάται άμεσα από την πυκνωση των φορτίσεων - αποφορτίσεων - επαναφορτίσεων

των δοκιμίων. Επομένως απαιτούνται “κύκλοι” φόρτισης στο αρχικό στάδιο πλαστικοποίησης του σκυροδέματος, διεξαγωγή αξιόπιστων “κύκλων” φόρτισης σε απερίσφιγκτο σκυρόδεμα τόσο στην κρατυνόμενη περιοχή όσο και στην περιοχή χαλάρωσης των παραμορφώσεων οι οποίοι είναι δύσκολο να γίνουν όπως προαναφέρθηκε. Δυσκολότερο ακόμη είναι να διεξαχθούν “κύκλοι” φόρτισης πολύ κοντά στην αστοχία των δοκιμίων. Για την εξαγωγή πιο αξιόπιστων διαγραμμάτων πλαστικής συμπεριφοράς απαιτείται πύκνωση των “κύκλων” φόρτισης ωστόσο πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ενδεχόμενη επιρροή της κόπωσης των υλικών στα αποτελέσματα.

Για την ακριβέστερη διαβάθμιση προσομοιωμάτων της θεωρίας της πλαστικότητας απαιτείται η εξαγωγή των πλήρων καμπυλών πλαστικής συμπεριφοράς του περισφιγμένου σκυροδέματος. Διερευνάται η έμμεση εξαγωγή τέτοιων καμπυλών από τα πειράματα μονότονης φόρτισης. Στο σχήμα 5 παρατηρείται ότι τουλάχιστον για τα πρώτα στάδια ανελαστικοποίησης του σκυροδέματος, η κλίση της καμπύλης αποφόρτισης ισούται με το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος E_c . Επομένως μπορεί να θεωρηθεί χωρίς σημαντικό σφάλμα ότι οι στοιχειώδεις αυξήσεις των ελαστικών παραμορφώσεων κατά την αξονική και εγκάρσια διεύθυνση προκύπτουν από τις στοιχειώδεις αυξήσεις της αναλαμβανόμενης αξονικής και εγκάρσιας τάσης πολλαπλασιαζόμενης επί το αντίστροφο μητρώο στιβαρότητας (ελαστικότητας) του σκυροδέματος $\{\Delta \varepsilon^e\} = [E]^{-1} \{\Delta \sigma\}$. Στην συνέχεια οι στοιχειώδεις αυξήσεις των πλαστικών παραμορφώσεων υπολογίζονται με αφαίρεση των ελαστικών από τις πειραματικές τιμές. Σύμφωνα με την παραπάνω πρόταση μπορούν να εξαχθούν έμμεσα από πειράματα μονότονης φόρτισης αξιόπιστες συνεχείς πλαστικές καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων για την διαβάθμιση των πλαστικών παραμέτρων από περισφιγμένο με ΙΩΠ σκυρόδεμα σύμφωνα με τη θεωρία της πλαστικότητας δίνοντας τη δυνατότητα για μονοσημαντές κλειστές συσχετίσεις με την αντοχή του σκυροδέματος και τη δυστένεια του μέσου περισφιγξής όπως προέκυψε από την πειραματική διερεύνηση. Οι παραχθείσες καμπύλες πλαστικής συμπεριφοράς – λαμβάνοντας υπόψη ότι η ακρίβειά τους εξαρτάται από την πύκνωση των “κύκλων” φόρτισης - μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της αξιοπιστίας της παραπάνω πρότασης.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αξιοποιούνται τα αποτελέσματα κατάλληλα σχεδιασμένου πειραματικού προγράμματος δοκιμών σταδιακά αυξανόμενης φόρτισης – αποφόρτισης για την διερεύνηση της πλαστικής συμπεριφοράς του περισφιγμένου με ΙΩΠ σκυροδέματος. Από την μέτρηση των παραμενουσών παραμορφώσεων διαχωρίζεται άμεσα η απόκριση του σκυροδέματος σε ελαστική και πλαστική.

Από τα διαγράμματα του συντελεστή πλαστικής διόγκωσης του σκυροδέματος με την τροχιά πλαστικής παραμόρφωσης διαφαίνεται μη γραμμική μεταβολή τουλάχιστον για ελαφρά περισφιγξη με ΙΩΠ ενώ παρατηρείται εξάρτηση της παραμέτρου διόγκωσης α από την παρεχόμενη περισφιγξη του ελαστικού μανδύα ΙΩΠ. Η μείωση της τιμής της διόγκωσης είναι έντονη για αύξηση της παρεχόμενης περισφιγξης.

Από τα διαγράμματα του συντελεστή συσώρευσης της βλάβης του σκυροδέματος χ με την τροχιά πλαστικής παραμόρφωσης παρατηρείται σημαντική αύξηση της παραμέτρου βλάβης, έχοντας αρχικά υψηλές αρνητικές τιμές κυρίως στο πρώτο στάδιο φόρτισης. Στην συνέχεια παρατηρείται σταθεροποίηση της τιμής της βλάβης του σκυροδέματος περισφιγμένου με 1 στρώση ΙΩΠ σε θετικές τιμές, ενώ διαφαίνεται παρόμοια συμπεριφορά και για δοκίμια με ισχυρότερη περισφιγξη.

Από κάθε “κύκλο” φόρτισης – αποφόρτισης εξάγεται μια τιμή παραμένουσας παραμόρφωσης. Η ακρίβεια των παραπάνω πειραματικών διαγραμμάτων συμπεριφοράς (ιδίως των $\alpha - \hat{\varepsilon}$ και $\chi - \hat{\varepsilon}$ που έχουν έντονη μεταβολή) εξαρτάται άμεσα από την πύκνωση των φορτίσεων – αποφορτίσεων – επαναφορτίσεων των δοκιμίων. Ωστόσο η πύκνωση των ‘κύκλων’ ενδέχεται να

προκαλέσει κόπωση των υλικών ενώ είναι δύσκολο να εκτελεστούν αξιόπιστοι κύκλοι φόρτισης σε απερίσφιγκτο σκυροδέμα ή 'κύκλοι' στο σημείο αστοχίας των δοκιμίων. Από τα αρχικά διαγράμματα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων προκύπτει ότι για τα πρώτα στάδια ανελαστικοποίησης του σκυροδέματος, η κλίση των καμπυλών αποφόρτισης ισούται με το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος E_c . Παράλληλα η συμπεριφορά των περισφιγμένων με ΙΩΠ δοκιμίων υποβαλλόμενων σε μονότονη ή σταδιακά αυξανόμενη φόρτιση – αποφόρτιση είναι παρόμοια. Βάσει των παραπάνω παρατηρήσεων προτείνεται ο έμμεσος προσδιορισμός των παραμενουσών παραμορφώσεων (αξονικών και πλευρικών) από πειράματα μονότονης φόρτισης πολλαπλασιάζοντας τις στοιχειώδεις αυξήσεις της αναλαμβανόμενης αξονικής και εγκάρσιας τάσης επί το αντίστροφο μητρώο στιβαρότητας (ελαστικότητας) του σκυροδέματος $\{\Delta \varepsilon^e\} = [E]^{-1} \{\Delta \sigma\}$. Οι στοιχειώδεις αυξήσεις των παραμενουσών παραμορφώσεων προκύπτουν με αφαίρεση των ελαστικών από τις πειραματικές τιμές. Η προτεινόμενη έμμεση διαδικασία αποτίμησης της ανελαστικής συμπεριφοράς του περισφιγμένου σκυροδέματος ευνοεί σημαντικά την περαιτέρω διερεύνηση της πλαστικής συμπεριφοράς του παρέχοντας πλήρεις συνεχείς καμπύλες μεταβολής σημαντικών παραμέτρων δόγκωσης και βλάβης για την προσομοίωση του σκυροδέματος σε περιπτώσεις αντισεισμικών ενισχύσεων και επισκευών με μανδύες ΙΩΠ.

5 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ASTM, Annual book of ASTM standards. 2000. Section 4, Construction. Volume 4.02, Concrete and Aggregates.

Chen W. F. 1994. Constitutive Equations for Engineering Materials. Volume 2: Plasticity and Modeling. *Studies in Applied Mechanics Part 37B*, Elsevier 1994.

Comite Eurointernational du Beton. 1993. CEB-FIP Model Code 90. T. Telford, London.

Fam A.Z., Rizkalla S.H. 2001. Confinement model for axially loaded concrete confined by circular fiber-reinforced polymer tubes. *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 4, July-August 2001, pp: 451-461

Han D.J. 1984. Constitutive modeling of analysis of concrete structures. PhD Thesis, *School of Civil Engineering, Purdue University*, West Lafayette, IN.

Han D.J. & Chen W.F. 1985. A nonuniform hardening plasticity model for concrete materials. *Mechanics of Materials*, 4, December, 283-302.

Harmon T.G., Slattery K.T. 1992. Advanced composite confinement of concrete. *1st International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, 1992*. Sherbrooke, Québec, Canada. pp. 299-306.

Karabinis A. I., Kiouisis P. D. 1996. Plasticity computations for the design of the ductility of circular concrete columns, *Computers & Structures*, 1996, 60(5), pp 825-835.

Karabinis A.I. & Kiouisis P.D. 1996. Strength and Ductility of Rectangular Concrete Columns – A Plasticity Approach. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, V. 122, No. 3: pp 267-274.

Karabinis A. I, Rousakis T.C. 2001. Carbon FRP Confined Concrete Elements Under Axial Load. *FRP Composites in Civil Engineering Conference*, 12 - 15 December 2001, Hong Kong, pp 309-316.

Karsan P. & Jirsa J.O. 1969. Behavior of concrete under compressive loading. *Journal of the Structural Division., ASCE*, Vol. 95, No ST12, December, pp. 19-28.

- Kim J.H.J., Yi S.T., Lee S.H., Park S.K., Kim J.K. 2003. Compressive behaviour of CFS strengthened concrete specimens with various cross-sectional shapes and laminations. *Magazine of Concrete Research*. 55 (5), Oct 2003: 407-418.
- Mei H., Kiousis P.D., Ehsani M.R., Saadatmanesh H. 2001. Confinement Effects on High-Strength Concrete. *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 4, July-August 2001, pp: 548-553
- Pantazopoulou S.J., Zanganeh M. 2001. Triaxial Tests of Fiber-Reinforced Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, V. 13, No. 5: pp 340-348.
- Rochette P., Labossière P. 2000. Axial Testing of Rectangular Column Models Confined with Composites. *ASCE Journal of Composites for Construction*, V. 4, No. 3, August 2000. pp. 129-136.
- Rousakis T.C, Chi-Sang You, Laura de Lorenzis, Tamuzs V, Tepfers R. 2003. Concrete Cylinders Confined by Carbon FRP Sheets, Subjected to Monotonic and Cyclic Axial Compressive Load. *6th International Symposium on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement of Concrete Structures (FRPRCS-6)*, 8 – 10 July 2003, Singapore.
- Rousakis T.C, Chi-Sang You, Laura de Lorenzis, Tamuzs V, Tepfers R. 2003. Concrete Cylinders Confined by Prestressed Carbon FRP Filament Winding, Subjected to Monotonic and Cyclic Axial Compressive Load. *6th International Symposium on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement of Concrete Structures (FRPRCS-6)*, 8 – 10 July 2003, Singapore.
- Rousakis T.C, Tepfers R. 2003. High Strength concrete confined by high-E-modulus carbon FRP sheets subjected to monotonic and cyclic axial compressive load. *Composites in Construction, International Conference*, University of Calabria, September 16-19 2003.
- Rousakis, T., Tepfers, R. 2004. Behavior of concrete confined by high E-modulus carbon FRP sheets, subjected to monotonic and cyclic axial compressive load. *Nordic Concrete Research Journal*, Publication No. 31, (1), pp. 73-82.
- Ρουσάκης Θ. 2005. Μηχανική συμπεριφορά σκυροδέματος περισιγμένου με σύνθετα υλικά. Διδακτορική Διατριβή. *Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ*, Ξάνθη 2005.
- Samaan M., Mirmiram A., Shahawy M. 1998. Model of Concrete Confined by Fiber Composites. *ASCE Journal of Structural Engineering*, V. 124, No 9, September 1998. pp. 1025-1031.
- Sinha B.P., Gerstle K.H., Tulin L. 1964. Stress-strain relations for concrete under cyclic loading. *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 61, No. 2, pp. 195-211.