

Αναλυτική προσομοίωση της πλαστικής συμπεριφοράς σκυροδέματος υπό ομοιόμορφη περίσφιγξη από μανδύα ινωπλισμένων πολυμερών

Θ.Χ. Ρουσάκης

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

Α.Ι. Καραμπίνης

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

Π.Δ. Κιούσης

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός. Καθηγητής Colorado School of Mines, Golden, CO 80401, pkiousis@mines.edu

R. Tepfers

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός. Επίτιμος Καθηγητής Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden

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

Λέξεις κλειδιά: Ινωπλισμένα πολυμερή, περίσφιγξη, θεωρία της πλαστικότητας, διόγκωση, βλάβη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Παρουσιάζεται μεθοδολογία αποτίμησης και διαβάθμισης της πλαστικής συμπεριφοράς του περισφιγμένου με ινωπλισμένα πολυμερή σκυροδέματος βασισμένη στην έμμεση εξαγωγή πειραματικών δεδομένων από πειράματα μονότονης φόρτισης. Προτείνεται αναλυτικό προσομοίωμα τύπου Drucker-Prager με αναβαθμισμένη συνάρτηση κράτυνσης, σε συμφωνία με τις πειραματικές παρατηρήσεις, όπου οι ανελαστικές παράμετροι του σκυροδέματος εκφράζονται μονοσήμαντα μέσω κλειστών αναλυτικών σχέσεων. Ο συντελεστής (πλαστικής) διόγκωσης εξαρτάται εκτός από την αντοχή του σκυροδέματος και από τη δυστένεια του μέσου περίσφιγξης. Οι προβλέψεις του προσομοιώματος συγκρίνονται με πειραματικά δεδομένα διαφόρων ερευνητών καθώς και με προσομοιώματα της διεθνούς βιβλιογραφίας.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος που υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση σταδιακά αυξανόμενων βραχύνσεων παρουσιάζει έντονη μη γραμμικότητα και φθίνοντα κλάδο μετά το μέγιστο αναλαμβανόμενο φορτίο. Παράλληλα παρατηρείται έντονη μείωση της δυσθλιψίας μεταξύ 'κύκλων' φόρτισης ιδιαίτερα στην περιοχή του φθίνοντα κλάδου. Ωστόσο υποβάλλοντας σκυροδέμα περισφιγμένο με μανδύα ΙΩΠ σε αντίστοιχο ιστορικό φόρτισης παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση, όπου τουλάχιστον για τα πρώτα στάδια ανελαστικοποίησης του σκυροδέματος, η κλίση της καμπύλης αποφόρτισης ισούται με το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος E_c (Ρουσάκης, 2005) επιτρέποντας χωρίς μεγάλο σφάλμα τη θεώρηση ότι οι μόνιμες (πλαστικές) παραμορφώσεις (αξονικές και πλευρικές) μπορούν να προσδιοριστούν έμμεσα από πειράματα μονότονης φόρτισης πολλαπλασιάζοντας τις στοιχειώδεις αυξήσεις της αναλαμβανόμενης αξονικής και εγκάρσιας τάσης επί το αντίστροφο μητρώο στιβαρότητας (ελαστικότητας) του σκυροδέματος $\{\Delta \varepsilon^e\} = [E]^{-1} \{\Delta \sigma\}$. Στην συνέχεια οι στοιχειώδεις αυξήσεις των παραμενουσών παραμορφώσεων προκύπτουν με αφαίρεση της ελαστικής συνιστώσας από τις συνολικές ανηγμένες παραμορφώσεις. Με βάση την παραπάνω θεώρηση μπορούν να εξαχθούν συνεχείς καμπύλες μεταβολής της πλαστικής συμπεριφοράς του περισφιγμένου σκυροδέματος σε

όλα τα στάδια φόρτισης και ιδιαίτερα στην αστοχία, παρέχοντας σημαντικές πληροφορίες για ακριβέστερη ανάλυση.

Από τη σύγκριση πολλών από τα υφιστάμενα αναλυτικά προσομοιώματα με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα διαφόρων ερευνητών (και της παρούσας πειραματικής διερεύνησης) προέκυψαν αποκλίσεις στην εκτίμηση της αντοχής περισφιγμένων με ΙΩΠ δοκιμίων ενώ σημαντικές είναι οι αποκλίσεις στην εκτίμηση της ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης (De Lorenzis & Terfers (2003) κ.α.). Περισσότερο ικανοποιητικά στην πρόβλεψη της αντοχής δοκιμίων σκυροδέματος περισφιγμένων με υφάσματα ΙΩΠ ή/και εγκιβωτισμένων σε σωλήνες παρουσιάστηκαν τα προσομοιώματα των Samaan και συνεργάτες (1998), Saafi και συνεργάτες (1999) και Spoelstra & Monti (1999) με μέσο όρο απόλυτου σφάλματος από 13.4% έως 15.2% αντίστοιχα. Όσον αφορά την πρόβλεψη της ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης στην αστοχία κανένα από τα παραπάνω προσομοιώματα δεν παρείχε ικανοποιητική πρόβλεψη (μέσος όρος απόλυτου σφάλματος μεγαλύτερος του 120%). Οι De Lorenzis & Terfers προτείνουν νέα εμπειρική σχέση ειδικά για την πρόβλεψη της αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης αστοχίας που διαφοροποιείται για περίσφιξη με υφάσματα ή σωλήνες ΙΩΠ και λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση των παραμορφώσεων του σκυροδέματος από το ιστορικό φόρτισης τροποποιώντας την επιρροή της δυστένειας του μέσου περίσφιξης (μέσος όρος απόλυτου σφάλματος 19.7%).

Οι Fujikake και συνεργάτες (2004) τροποποίησαν καταστατικό ορθοτροπικό προσομοίωμα μη γραμμικής ελαστικότητας το οποίο αρχικά αναπτύχθηκε για σκυρόδεμα υπό σταθερή πίεση περίσφιξης (περίσφιξη με χάλυβα) μειώνοντας την αρχικά θεωρούμενη επιφάνεια αστοχίας. Θεώρησαν ότι μετά την πρώτη τομή του ιστορικού φόρτισης με την οριακή επιφάνεια αστοχίας, η επιφάνεια αστοχίας γίνεται γραμμική και η κλίση της ορίζεται από την μείωση κατά συντελεστή λ της επιπλέον αύξησης της αντοχής που θα παρείχε στην αστοχία η αρχική οριακή επιφάνεια. Ο συντελεστής λ βαθμονομήθηκε στην τιμή 0.5 βάσει των πειραματικών δεδομένων των Karabinis & Rousakis (2002). Τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα αποτελούν μέρος ευρέως πειραματικού προγράμματος περισφιγμένων κυκλικών διατομών σκυροδέματος από 25.2 MPa έως 82.1 MPa με ανθρακοϋφάσματα σε διάφορα επίπεδα δυστένειας και προεντεταμένες δέσμες ανθρακοϊνών (Karabinis & Rousakis 2002, Rousakis & Terfers 2004, Ρουσάκης 2005). Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονότονη καθώς και σε σταδιακά αυξανόμενη θλιπτική φόρτιση – αποφόρτιση. Από την εξέταση του βαθμού συσχέτισης της αποτελεσματικότητας της περίσφιξης 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 η παραμορφωσιακή κατάσταση του ΙΩΠ στην αστοχία (και ο συντελεστής αποτελεσματικότητας της περίσφιξης, $k_1 \epsilon_{je}$) εκφράζονται μέσω του μέτρου ελαστικότητας του ΙΩΠ (Ρουσάκης 2005). Οι προβλέψεις της προτεινόμενης σχέσης (η οποία δεν απαιτεί την γνώση της ενεργού πλευρικής παραμόρφωσης του μανδύα) σε σύγκριση με τα προαναφερόμενα πειραματικά δεδομένα (καθώς και με αυτά που παρουσιάζονται στην εργασία των Lorenzis & Terfers (2003) και περιλαμβάνουν δοκίμια περισφιγμένα με υφάσματα και εγκιβωτισμένα σε σωλήνες) είναι ακριβέστερες αυτών αρκετών προσομοιωμάτων που προτείνονται από διεθνείς συστάσεις σχεδιασμού.

Στην παρούσα εργασία αξιοποιούνται τα αποτελέσματα του προαναφερόμενου κατάλληλα σχεδιασμένου πειραματικού προγράμματος δοκιμών μονότονης και σταδιακά αυξανόμενης φόρτισης – αποφόρτισης ώστε να διαχωριστεί έμμεσα 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). Αναπτύσσεται στρατηγική διαβάθμισης των απαιτούμενων ανελαστικών (και ελαστικών) παραμέτρων προσομοιώματος για το σκυρόδεμα βασισμένου στη θεωρία της πλαστικότητας τύπου Drucker-Prager όπως αυτό έχει προταθεί από τους Karabinis & Kiousis (1994, 1996) για υλικό με κράτυνση και φθίνοντα κλάδο. Οι ανελαστικές παράμετροι της θεωρίας της πλαστικότητας εκφράζονται μονοσήμαντα με κλειστές αναλυτικές σχέσεις. Η επεξεργασία των άμεσα μετρούμενων πειραματικών τιμών πλαστικών παραμορφώσεων μαζί με άλλα αποτελέσματα από τη διεθνή βιβλιογραφία, χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση του νέου προτεινόμενου προσομοιώματος.

2 ΕΜΜΕΣΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ – ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.

Θεωρώντας σταθερή κλίση της καμπύλης αποφόρτισης μεταξύ των κύκλων φόρτισης οι μόνιμες (πλαστικές) παραμορφώσεις (αξονικές και πλευρικές) μπορούν να προσδιοριστούν έμμεσα από πειράματα μονότονης φόρτισης πολλαπλασιάζοντας τις στοιχειώδεις αυξήσεις της αναλαμβανόμενης αξονικής και εγκάρσιας τάσης επί το αντίστροφο μητρώο ελαστικότητας (στιβαρότητας) του σκυροδέματος $\{\Delta \varepsilon^e\} = [E]^{-1} \{\Delta \sigma\}$. Αφαιρώντας την ελαστική συνιστώσα από τις πειραματικές τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων εξάγονται έμμεσα οι στοιχειώδεις αυξήσεις των πλαστικών παραμορφώσεων. Από τις τιμές αξονικών και πλευρικών μόνιμων παραμορφώσεων κατασκευάζονται συνεχή διαγράμματα μεταβολής των μη ελαστικών (πλαστικών) παραμέτρων του σκυροδέματος έως την αστοχία. Επιλέγεται το μέτρο ελαστικότητας του CEB-FIP Model Code 90 καθώς συγκλίνει με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές κλίσης (οι πλαστικές παραμορφώσεις προκύπτουν από τις ελαστικές, η επιλογή του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος E_c καθώς και του μέτρου εγκάρσιας παραμόρφωσης ν_c επηρεάζει τα αποτελέσματα). Για το μέτρο εγκάρσιας παραμόρφωσης ν_c επιλέγεται η τιμή 0.2. Ως όριο ελαστικής περιοχής θεωρείται το $0.3f_{c0}$ όπου και η πλαστική παραμόρφωση είναι μηδέν.

2.1 Προσδιορισμός διαγραμμάτων τάσης - ανηγμένης πλαστικής παραμόρφωσης

Στα σχήματα 1 και 2 παρουσιάζονται τα έμμεσα διαγράμματα της πλαστικής συμπεριφοράς των δοκιμών 25.2 MPa αντοχής σκυροδέματος περισφιγμένων με ανθρακούφασμα. Επίσης παρουσιάζονται οι άμεσες πειραματικές καμπύλες σε σύγκριση για δοκίμιο περισφιγμένο με μια στρώση υφάσματος. Παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση τόσο στην συμπεριφορά των αξονικών όσο και των πλευρικών ανηγμένων παραμορφώσεων με την αναλαμβανόμενη τάση από το σκυρόδεμα.

2.2 Προσδιορισμός πλαστικής διόγκωσης σκυροδέματος

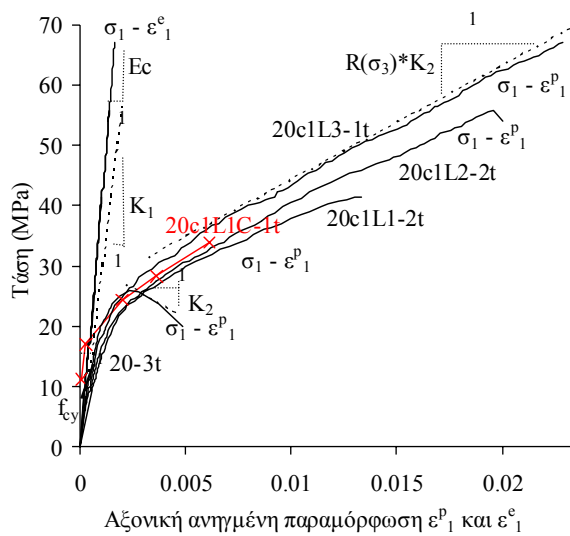
Στο σχήμα 3 παρουσιάζονται τα έμμεσα διαγράμματα πρώτης αναλλοίωτης πλαστικών παραμορφώσεων (I_1^p) με την τετραγωνική ρίζα της δεύτερης αναλλοίωτης του εκτροπέα πλαστικών παραμορφώσεων ($\sqrt{I_{2D}^p}$) των περισφιγμένων δοκιμών 20c1L1,2,3-t σε σύγκριση με τα αντίστοιχα άμεσα διαγράμματα από δοκίμια υποβαλλόμενα σε ιστορικό επαναλαμβανόμενης φόρτισης. Η σύγκλιση μεταξύ των άμεσων και έμμεσων διαγραμμάτων είναι ικανοποιητική. Η κλίση των διαγραμμάτων είναι ο συντελεστής πλαστικής διόγκωσης του σκυροδέματος

($a = dI_1^p / d\sqrt{I_{2D}^p}$). Στο σχήμα 4 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα μεταβολής του

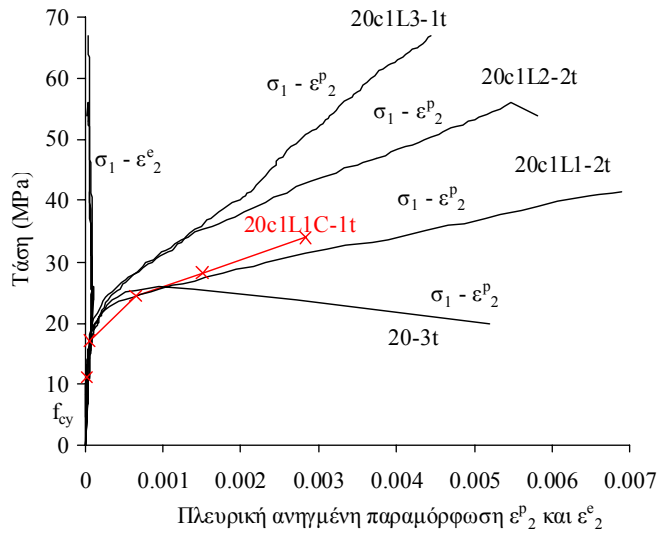
συντελεστή διόγκωσης (α) με την τροχιά πλαστικών παραμορφώσεων $\hat{\varepsilon} = \int \sqrt{d\varepsilon^p \cdot d\varepsilon^p}$.

Παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει η δυστένεια του μανδύα ΙΩΠ, τόσο μειώνεται ο αρχικός ρυθμός αύξησης της τιμής του συντελεστή α του σκυροδέματος και σταθεροποιείται σε τιμές οι οποίες αντιστοιχούν στον επιβαλλόμενο περιορισμό της εγκάρσιας διόγκωσης. Έτσι για το απερίσφιγτο σκυρόδεμα ο αυξανόμενος ρυθμός διόγκωσης του σκυροδέματος οδηγεί από την αρχική πλαστική συρρίκνωση στην ασταθή διόγκωση του σκυροδέματος. Για σκυρόδεμα περισφιγμένο με 3 στρώσεις ΙΩΠ ο ρυθμός διόγκωσης του σκυροδέματος περιορίζεται σημαντικά έτσι ώστε η αρχική πλαστική συρρίκνωση του σκυροδέματος να σταθεροποιείται σε χαμηλότερα επίπεδα οδηγώντας σε συμπεριφορά συνεχούς συρρίκνωσης του σκυροδέματος. Για χαμηλότερη περίσφιγξη παρατηρείται κατά τη διάρκεια της φόρτισης αναστροφή της αρχικού ρυθμού διόγκωσης σε ισχυρή τάση συρρίκνωσης έτσι ώστε η αρχική συρρίκνωση του σκυροδέματος να

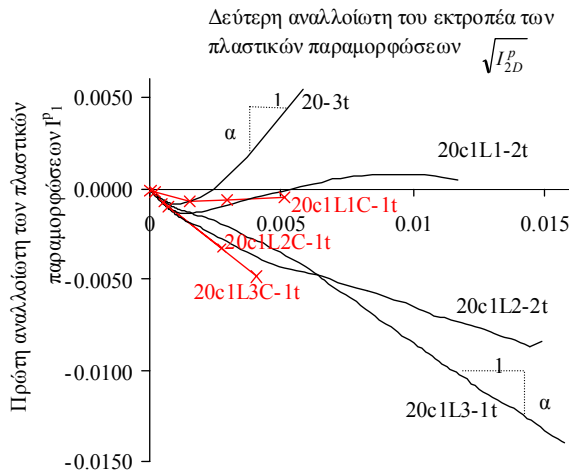
ακολουθείται από πρόσκαιρη διόγκωση η οποία αναστρέφεται λόγω της επενέργειας του μανδύα ΙΩΠ.



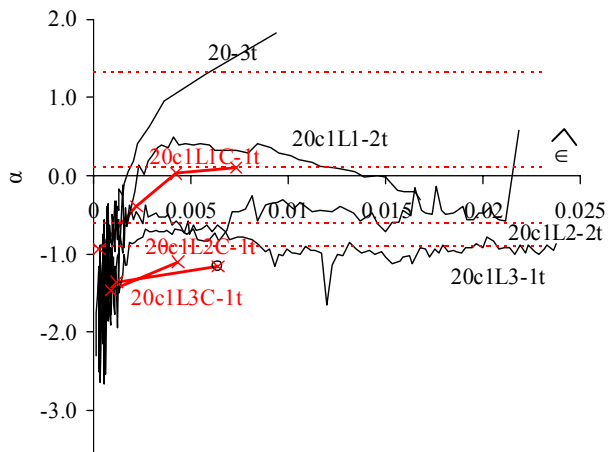
Σχήμα 1. Συμπεριφορά τάσεων – αξονικών ανηγμένων παραμορφώσεων ελαστικών (ϵ_1^e) και πλαστικών (ϵ_1^p) δοκιμών 25.2 MPa αντοχής σκυροδέματος περισφιγμένων με ανθρακούφασμα.



Σχήμα 2. Συμπεριφορά τάσεων – πλευρικών ανηγμένων παραμορφώσεων ελαστικών (ϵ_2^e) και πλαστικών (ϵ_2^p) δοκιμών 25.2 MPa αντοχής σκυροδέματος περισφιγμένων με ανθρακούφασμα.



Σχήμα 3. Διάγραμμα πρώτης αναλλοίωτης πλαστικών παραμορφώσεων (P_1) – τετραγωνικής ρίζας δεύτερης αναλλοίωτης εκτροπέα πλαστικών παραμορφώσεων ($\sqrt{I_{2D}^p}$) των δοκιμών σκυροδέματος 25.2 MPa.

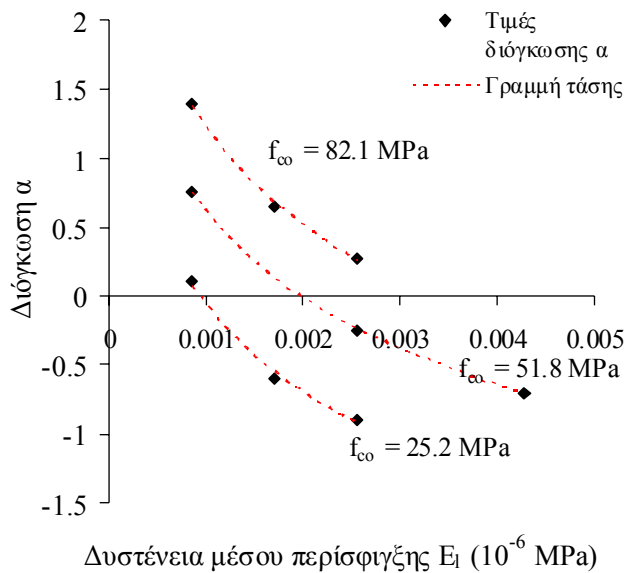


Σχήμα 4. Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή διόγκωσης (α) – τροχιάς πλαστικών παραμορφώσεων $\hat{\epsilon} = \int \sqrt{d\epsilon^p} d\epsilon^p$ των δοκιμών σκυροδέματος 25.2 MPa.

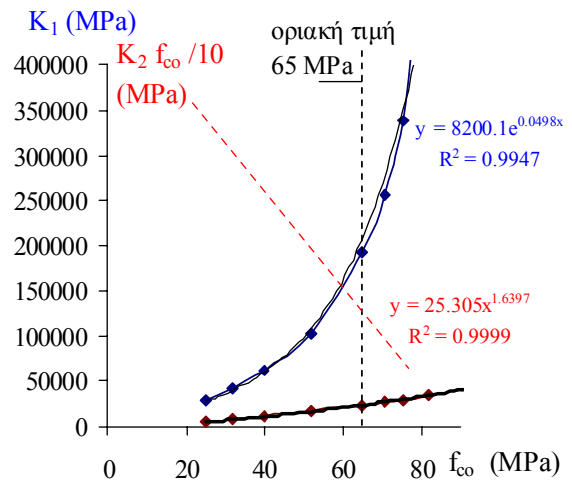
Ο συντελεστής πλαστικής διόγκωσης α διαβαθμίζεται θεωρώντας ότι εξαρτάται τόσο από την δυστένεια του μέσου περίσφιγξης E_1 όσο και από την αντοχή του σκυροδέματος f_{co} . Προτείνεται για κάθε σκυροδέμα, συσχέτιση γραμμικής μορφής με σταθερή τιμή διόγκωσης σε σχέση με τη τροχιά πλαστικής παραμόρφωσης αλλά διαφοροποιούμενη με τη δυστένεια (σχ. 4). Από τη διαδικασία διαβάθμισης του συντελεστή διόγκωσης α προκύπτουν οι τιμές στο σχήματος 5. Ο συντελεστής διόγκωσης α μειώνεται όσο μεγαλύτερη είναι η δυστένεια του μέσου περίσφιγξης με σχέση λογαριθμικής μορφής ($\alpha = A \ln(E_1) + B$) για κάθε αντοχή σκυροδέματος. Ο συντελεστής διόγκωσης α αυξάνεται όσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή σκυροδέματος. Προκύπτει η παρακάτω συσχέτιση του συντελεστή διόγκωσης με τη δυστένεια και την αντοχή του σκυροδέματος:

$$a = (-80.481(f_{co}/(100f_{cmo}))^2 + 6.64448(f_{co}/(100f_{cmo})) - 1.0373) \ln(E_1/(100000E_{fo})) - 646.27(f_{co}/(100f_{cmo}))^2 + 78.251(f_{co}/(100f_{cmo})) - 7.9847$$

όπου $a \leq 1.5$, $f_{cmo} = 10 \text{ MPa}$ και $E_{fo} = 10 \text{ MPa}$ (παράμετροι μονάδων) (1)



Σχήμα 5. Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή διόγκωσης (α) – δυστένειας μέσου περίσφιγξης (E_1), δοκιμίων αντοχής σκυροδέματος 25.2 MPa, 51.8 MPa και 82.1 MPa.



Σχήμα 6. Συσχέτιση αρχικού (K_1) και τελικού (K_2)μέτρου πλαστικότητας με την αντοχή σκυροδέματος.

Η σχέση προτείνεται για σκυροδέματα από 25.2 MPa έως 82.1 MPa και για δυστένεια μέσου περίσφιγξης έως 2600 MPa (για την αντοχή των 51.8 MPa έχει ελεγχθεί και για δυστένεια έως 4300 MPa). Αναμένεται να υποεκτιμά το φορτίο όσο μικραίνει η δυστένεια (μικρότερη των 854 MPa, που αντιστοιχεί σε 1 στρώση ανθρακούφασματος) και όσο μεγαλώνει η αντοχή του σκυροδέματος λόγω απόκλισης της μεταβολής του α ως προς το $\bar{\epsilon}$ από την γραμμική συμπεριφορά.

2.3 Προσδιορισμός της συσσωρευμένης βλάβης στο σκυροδέμα

Για τον έμμεσο προσδιορισμό της συσσωρευμένης βλάβης στο σκυροδέμα είναι απαραίτητος ο καθορισμός του τελικού μέτρου πλαστικότητας του σκυροδέματος. 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 (καθώς και το μέγεθος του δοκιμίου). Επειδή είναι πρακτικά δύσκολο να εκτελεστούν κύκλοι αποφόρτισης - επαναφόρτισης σε απερίσφιγκτο σκυρόδεμα και ιδίως στο φθίνοντα κλάδο, το μέτρο πλαστικότητας K_2 υπολογίζεται χρησιμοποιώντας σε αντιστοιχία με το επιλεγμένο μέτρο ελαστικότητας τις πρότυπες καμπύλες συμπεριφοράς του απερίσφιγκτου σκυροδέματος για αντοχές από 20 MPa έως 88 MPa όπως προτείνονται από τον CEB-FIP Model Code 90. Για κάθε σκυρόδεμα κατασκευάζονται οι καμπύλες τάσεων - αξονικών ανηγμένων ελαστικών και πλαστικών παραμορφώσεων.

Το αρχικό και το τελικό μέτρο πλαστικότητας K_1 και K_2 υπολογίζονται σε σχέση με την κλίση της εφαπτομένης στο $0.3f_{co}$ και στο $0.85f_{co}$ αντίστοιχα. Συγκεκριμένα το αρχικό μέτρο πλαστικότητας K_1 συσχετίζεται μονοσήμαντα με την αντοχή του σκυροδέματος με την εκθετική έκφραση όπως προκύπτει από την γραμμή τάσης των τιμών του σχήματος 6:

$$K_1 = 0.3814 E_{co} e^{0.498 f_{co} / f_{cmo}} \leq 208752 \text{ MPa} , \quad (2)$$

όπου: $E_{co} = 21500 \text{ MPa}$

και $f_{cmo} = 10 \text{ MPa}$

Το τελικό μέτρο πλαστικότητας K_2 συσχετίζεται μονοσήμαντα με την αντοχή του σκυροδέματος με την υπερβολική έκφραση όπως προκύπτει από τη γραμμή τάσης των τιμών του σχήματος 6:

$$K_2 f_{co} / f_{cmo} = 0.05134 E_{co} (f_{co} / f_{cmo})^{1.6397} \leq 23760 \text{ MPa} , \quad (3)$$

όπου: $E_{co} = 21500 \text{ MPa}$

και $f_{cmo} = 10 \text{ MPa}$

Η μεταβολή της βλάβης χ με τη τροχιά πλαστικής παραμόρφωσης αν και παρουσιάζει σημαντική διαφοροποίηση στις αρχικές τιμές της τροχιάς $\hat{\epsilon}$, εμφανίζει σύγκλιση ανεξάρτητα από τη δυστένεια του μέσου περίσφιγξης (σχ. 7). Παρατηρείται αρχικά σημαντική αύξηση από σημαντικά αρνητικές τιμές σε θετικές ενώ μετά το επίπεδο μεταξύ 0.002 και 0.005 τροχιάς πλαστικών παραμορφώσεων επέρχεται σύγκλιση. Η συνάρτηση βλάβης $R(\sigma_3)$ που συσχετίζεται με τον συντελεστή βλάβης χ και την παρεχόμενη πλευρική τάση περίσφιγξης σ_3 με τη σχέση:

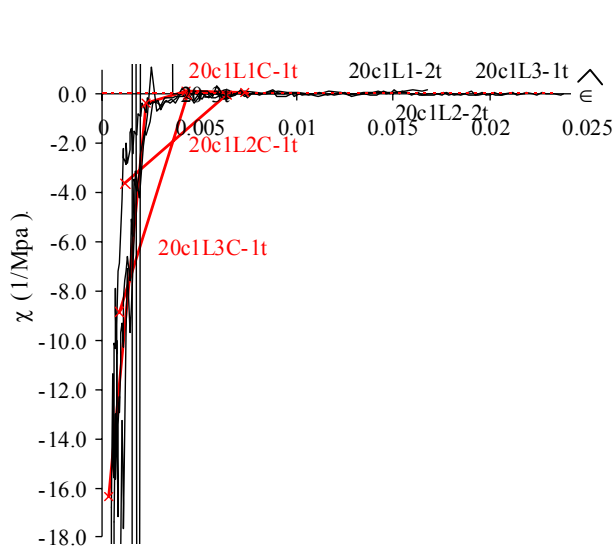
$$R(\sigma_3) = e^{\chi \sigma_3} \quad (4)$$

εμφανίζει σημαντικότερη σύγκλιση ανεξάρτητα από τη δυστένεια του μέσου περίσφιγξης (σχ. 8). Κατά τις πρώτες ανελαστικές βραχύνσεις του σκυροδέματος έως και την αντοχή του απερίσφιγκτου σκυροδέματος η συνάρτηση βλάβης του σκυροδέματος έχει έντονη μεταβολή. Μετά το επίπεδο του 0.005 περίπου για την τροχιά πλαστικής παραμόρφωσης (οπότε και ενεργοποιείται ουσιαστικά η πλευρική περίσφιγξη), παρατηρείται σχετική σταθεροποίηση της βλάβης του σκυροδέματος έστω και για μικρή παρεχόμενη πλευρική περίσφιγξη. Η τιμή της παραμέτρου βλάβης θεωρείται σταθερή (μια μεταβλητή). Έτσι για θεωρούμενη σταθερή τιμή του χ της τάξης του 0.045 MPa^{-1} για σκυρόδεμα 25.2 MPa προκύπτει ικανοποιητική σύγκλιση με τις πειραματικές τιμές για προχωρημένη τροχιά πλαστικής παραμόρφωσης (σχ. 8). Να σημειωθεί ότι η τιμή της βλάβης χ εξαρτάται επίσης και από τη τιμή του K_2 καθώς και του μέτρου ελαστικότητας που έχει επιλεγεί.

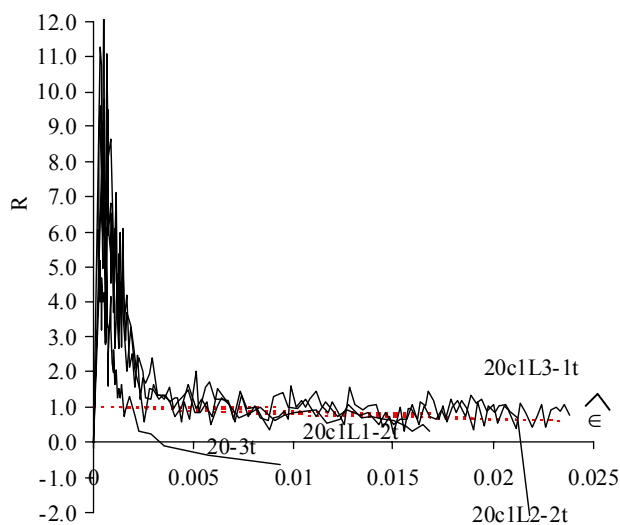
Ακολουθείται η ίδια διαδικασία για σκυροδέματα υψηλής και πολύ υψηλής αντοχής 51.8 MPa και 82.1 MPa αντίστοιχα, από την οποία προκύπτει όπως ήταν αναμενόμενο εξάρτηση της βλάβης από την αντοχή του σκυροδέματος (Ρουσάκης 2005).

Η παράμετρος βλάβης προκύπτει από δοκιμαστικές επιλύσεις και λόγω μη γραμμικότητας των συσχετίσεων που έχουν προηγηθεί δεν εμφανίζει σαφή σχέση μεταβολής με την αντοχή του

σκυροδέματος. Ωστόσο δεν εξαρτάται από τη δυστένεια του μέσου περισφιγξης. Η παράμετρος βλάβης χ κυμαίνεται μεταξύ 0.045 MPa^{-1} και 0.03 MPa^{-1} για σκυροδέματα αντοχής 25.2 MPa και 82.1 MPa (εξαιρέση η τιμή 0.28 MPa^{-1} για το σκυροδέμα των 51.8 MPa)



Σχήμα 7. Διάγραμμα της παραμέτρου βλάβης (χ) – τροχιάς πλαστικών παραμορφώσεων $\hat{\epsilon}$ των περισφιγμένων δοκιμίων 25.2 MPa αντοχής σκυροδέματος.



Σχήμα 8. Διάγραμμα της συνάρτησης βλάβης $R(\sigma_3)$ – τροχιάς πλαστικών παραμορφώσεων $\hat{\epsilon}$ δοκιμίων 25.2 MPa αντοχής σκυροδέματος, για γραμμική προσέγγιση του χ με σταθερή τιμή.

3 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Το προτεινόμενο προσομοίωμα βασίζεται στη θεωρία της πλαστικότητας και την πρόταση των Karabinis & Kiousis (1994, 1996), για σκυρόδεμα περισφιγμένο με χάλυβα. Έχει ήδη δειχθεί από την αρχική διαβάθμιση του προσομοιώματος (Karabinis & Rousakis, 2002), ότι το προσομοίωμα έχει τη δυνατότητα να αναπαράγει την συμπεριφορά του περισφιγμένου με ΙΩΠ σκυροδέματος με εξαιρετική ακρίβεια. Στο προτεινόμενο προσομοίωμα οι ανελαστικές παράμετροι του υλικού συσχετίζονται μονοσήμαντα με κλειστές σχέσεις με τις ιδιότητες του σκυροδέματος και του μέσου περισφιγξης οπότε η σχέση κράτνσης – απομείωσης των τάσεων τροποποιείται. Το νέο προσομοίωμα μπορεί να γενικευθεί για εφαρμογή του σε σκυρόδεμα περισφιγμένο με οποιαδήποτε υλικό διαβαθμίζοντας αποκλειστικά την ανελαστική παράμετρο βλάβης χ για κάθε σκυρόδεμα καθώς και επεκτείνοντας τη συσχέτιση του συντελεστή διόγκωσης α με την αντοχή του σκυροδέματος και τη δυστένεια του χρησιμοποιούμενου μέσου περισφιγξης.

3.1 Αναλυτικές σχέσεις της θεωρίας της πλαστικότητας

Απόκριση σκυροδέματος

Για την ελαστική απόκριση του σκυροδέματος θεωρείται γραμμική συμπεριφορά η οποία ακολουθεί τον νόμο του Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon^e \quad (5)$$

όπου σ είναι ο τανυστής της τάσης, E είναι το καταστατικό μητρώο ελαστικότητας, ε είναι ο τανυστής της παραμόρφωσης και ο δείκτης e δηλώνει ελαστικές παραμορφώσεις. Η ανελαστική

συμπεριφορά του σκυροδέματος περιγράφεται μαθηματικά με τη θεωρία της πλαστικότητας χρησιμοποιώντας την συνάρτηση φόρτισης F , την συνάρτηση κράτυνσης - απομείωσης κ και την συνάρτηση δυναμικού G . Η μαθηματική έκφραση για τη συνάρτηση φόρτισης F είναι:

$$F = \sqrt{J_{2D}} + \theta J_1 - \kappa = 0 \quad (6)$$

όπου J_{2D} η δεύτερη αναλλοίωτη του εκτροπέα της τάσης και J_1 είναι η πρώτη αναλλοίωτη της τάσης. Η συνάρτηση κράτυνσης - απομείωσης κ εκφράζεται μέσω της τροχιάς πλαστικών παραμορφώσεων $\hat{\varepsilon}$. Η μαθηματική έκφραση για το κ παίρνει τη μορφή $\kappa = f(f_{co}, E_l, \chi)$:

$$\kappa = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \theta \right) \left[\frac{\frac{2\hat{\varepsilon}}{a(f_{co}, E_l) - 1}}{\frac{1}{8200.1 e^{0.0498 f_{co}}} + \frac{\frac{2\hat{\varepsilon}}{a(f_{co}, E_l) - 1}}{(f_{co} - 0.3 f_{co}) \frac{8200.1 e^{0.0498 f_{co}}}{\left(\sqrt{8200.1 e^{0.0498 f_{co}} - \sqrt{10 \frac{25.305 f_{co}^{1.6397}}{f_{co}}} \right)^2}}}} \right] e^{\chi \sigma_3} 10^{\frac{25.305 f_{co}^{1.6397}}{f_{co}}} \frac{2\hat{\varepsilon}}{a(f_{co}, E_l) - 1} + 0.3 f_{co} \quad (7)$$

κατά τις σχέσεις 1 – 4.

Ο συντελεστής τριβής θ εκφράζεται βάσει της γωνίας εσωτερικής τριβής φ όπου:

$$\theta = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \text{ και } \varphi = 36^\circ + 1^\circ (f_{co} / (3.5 f_{cmo})) \leq 45^\circ \quad (8)$$

Στο προτεινόμενο προσομοίωμα χρησιμοποιείται μη συσχετιζόμενος νόμος πλαστικής ροής για την εξέλιξη των πλαστικών παραμορφώσεων για κάθε διαδοχική αύξηση των τάσεων:

$$d\varepsilon^p = d\lambda \frac{dG}{d\sigma} \quad (9)$$

με συνάρτηση πλαστικής ροής G τύπου Drucker-Prager:

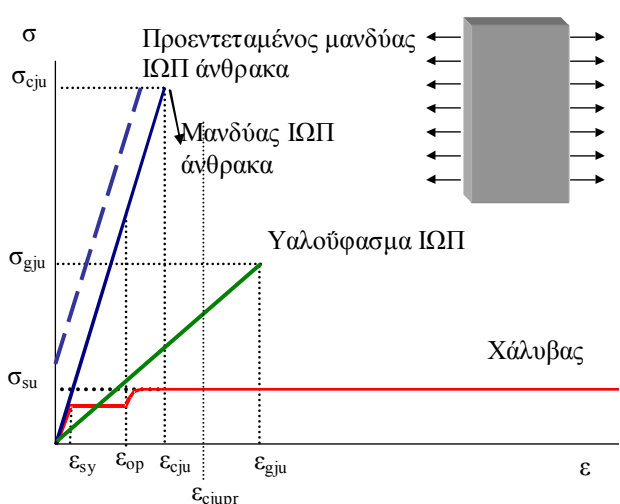
$$G = \sqrt{J_{2D}} + a(f_{co}, E_l) J_1 / 6 \quad (10)$$

Απόκριση του οπλισμού περίσφιγξης από σύνθετα υλικά

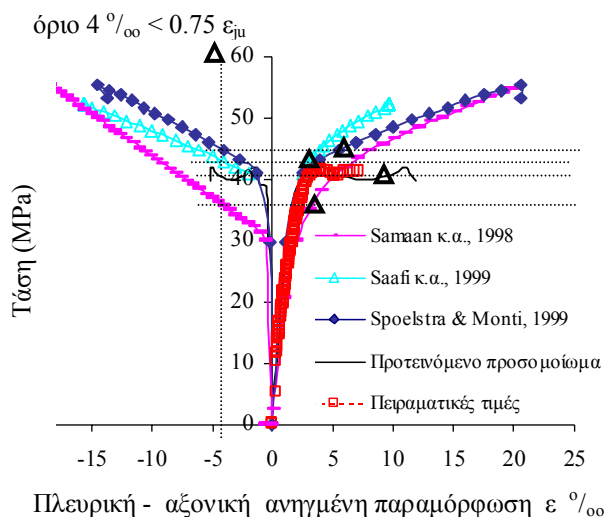
Ο μανδύας σύνθετων υλικών παρουσιάζει γραμμική ελαστική συμπεριφορά έως την αστοχία του. Ανάλογα με τον βαθμό συνάφειας ανάμεσα στον εφαρμοζόμενο μανδύα και την επιφάνεια του σκυροδέματος, μέρος των αξονικών θλιπτικών παραμορφώσεων που επιβάλλονται στο σκυρόδεμα μεταφέρονται και στον μανδύα. Όμως λόγω της πρακτικά ασήμαντης δυσθλιψίας του υλικού

περίσφιγξης κάθετα στις ίνες του, στο προτεινόμενο προσομοίωμα ο μανδύας σύνθετου υλικού θεωρείται φορτιζόμενος αποκλειστικά από την εγκάρσια παραμόρφωση του σκυροδέματος υποκειμένος σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Η μηχανική συμπεριφορά των τυπικών ινοπλισμών άνθρακα και γυαλιού παρουσιάζονται στο σχήμα 9 σε σύγκριση με αυτή του χάλυβα.

Για την περίπτωση του προεντεταμένου οπλισμού περίσφιγξης η συμπεριφορά του μανδύα τροποποιείται. Οπότε θεωρείται ότι λόγω αρχικής προτάνυσης του μανδύα κατά ϵ_{jpr} ασκείται πριν την αξονική φόρτιση του δοκιμίου αρχική τάση ίση με $\sigma_{P1} = \epsilon_{jpr} E_j$ (σχήμα 9) με απομένουσα διαθέσιμη παραμόρφωση $\epsilon_{jupr} = \epsilon_{ju} - \epsilon_{jpr}$.



Σχήμα 9. Μηχανική συμπεριφορά χάλυβα και σύνθετων υλικών σε εφελκυσμό.



Σχήμα 10. Σύγκριση των πειραματικών τιμών $\sigma - \epsilon$ με αναλυτικές προβλέψεις για το δοκίμιο C2 από τους Karabinis & Rousakis, 2002 (1 στρώση ανθρακούφασματος).

Κριτήριο αστοχίας

Στο περισφιγμένο με ινοπλισμό, κυλινδρικής διατομής στοιχείο σκυροδέματος είναι άμεσα δυνατή η υπόθεση για ανάπτυξη ομοιόμορφων πλευρικών τάσεων σε όλη την εξωτερική του επιφάνεια. Οι τάσεις αυτές εξαρτώμενες άμεσα από την σχέση μεταξύ της δυστένειας του μέσου περίσφιγξης ($E_i = 2t_j E_j / d$) και της εκάστοτε πλευρικής διόγκωσης του σκυροδέματος, υπολογίζονται στο χρησιμοποιούμενο προσομοίωμα με επαναληπτική διαδικασία. Βασική υπόθεση αποτελεί η διαρκής συμβατότητα των παραμορφώσεων μεταξύ του σκυροδέματος και του μέσου περίσφιγξης (ΙΩΠ). Η αξονική θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος καθώς και το αναλαμβανόμενο φορτίο στην αστοχία προκύπτει όταν η πλευρική ανηγμένη παραμόρφωση του σκυροδέματος ισούται με την περιφερειακή ανηγμένη παραμόρφωση στην αστοχία του μανδύα ΙΩΠ. Για μια ικανοποιητική συσχέτιση της παραμόρφωσης αστοχίας του μανδύα με τις ιδιότητές του, απαιτούνται περαιτέρω δοκιμές ώστε να προκύψουν επαρκή πειραματικά δεδομένα. Χρειάζεται να διερευνηθεί η επιρροή της καμπυλότητας του μανδύα, του μέτρου ελαστικότητας και της δυστένείας του, ενώ σημαντική είναι και η επιρροή της ρητίνης όσο και η αντοχή του σκυροδέματος ως μέτρου της πλευρικής δυστένειας που απαιτείται για να εξισορροπήσει την ασταθή διόγκωση του σκυροδέματος κοντά στην αντοχή του απερίσφιγτου (αδυναμία ανακατανομής τάσεων του μανδύα όντας ελαστικός). Σε εφαρμογές αξονικής θλίψης μπορούν να αξιοποιηθούν για την εκτίμηση της αστοχίας του ΙΩΠ οι εμπειρικές σχέσεις όπως προέκυψαν από το πειραματικό πρόγραμμα, Ρουσάκης 2005. Ωστόσο, δεδομένου του σχεδιασμού των

περισφιγμένων δομικών στοιχείων θεωρώντας συνδυασμένη θλίψη και διάτμηση, η εκτίμηση της πλευρικής παραμόρφωσης αστοχίας απλοποιείται (ACI 440.2R-02, 2002). Για το σχεδιασμό τέτοιων δομικών στοιχείων (δοκών και υποστυλωμάτων) η ενεργή πλευρική παραμόρφωση σχεδιασμού δεν υπερβαίνει την προκύπτουσα από τη σχέση:

$$\varepsilon_{je} = 0.004 \leq 0.75\varepsilon_{ju} \quad (11)$$

Μετά την παραμόρφωση του 0.004 έχει παρατηρηθεί απώλεια του μηχανισμού ανάληψης διατμητικών δυνάμεων μέσω αλληλεμπλοκής των αδρανών (Priestley et al, 1996).

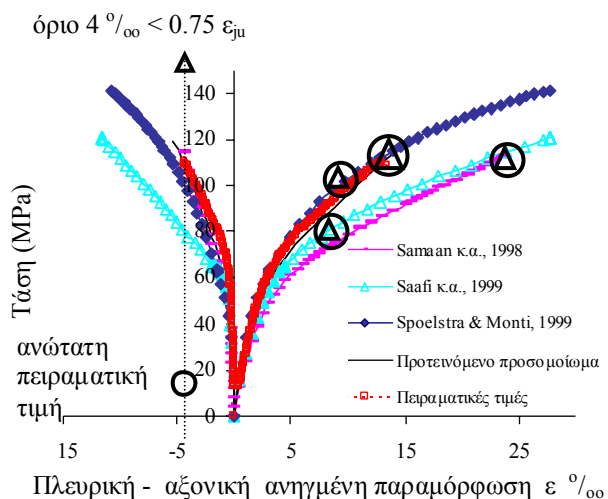
3.2 Συγκρίσεις των προβλέψεων του προσομοιώματος με πειραματικά δεδομένα

Για την βαθμονόμηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του αναλυτικού προσομοιώματος πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις με πειραματικά αποτελέσματα από δοκιμές σε σκυρόδεμα περισφιγμένο με υφάσματα ΙΩΠ, με προεντεταμένη περιελισσόμενη δέσμη ινών καθώς και εγκιβωτισμού του σε σωλήνες ΙΩΠ. Το προτεινόμενο προσομοίωμα συγκρίνεται επίσης με τρία αναλυτικά προσομοιώματα προτεινόμενα από τους Samaan και συνεργάτες (1998), Saafi και συνεργάτες (1999), και Spoelstra & Monti (1999). Οι προβλέψεις του προσομοιώματος έχουν τερματιστεί στην ανώτατη πειραματική τιμή πλευρικής ανηγμένης παραμόρφωσης. Σημειώνονται πάνω στις καμπύλες πρόβλεψης οι αντίστοιχες τιμές αναλαμβανόμενης αξονικής τάσης και ανηγμένης παραμόρφωσης που αντιστοιχούν τόσο στο επίπεδο 0.004 πλευρικής ανηγμένης παραμόρφωσης, όσο και στην ανώτατη πειραματική τιμή πλευρικής ανηγμένης παραμόρφωσης. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται διαγράμματα με δοκίμια σκυροδέματος χαμηλής όσο και υψηλής αντοχής (82.1 MPa) περισφιγμένα με υψηλού μέτρου ελαστικότητας ανθρακούφασματα ΙΩΠ (Ρουσάκης, 2005) ή δοκίμια εγκιβωτισμένα σε σωλήνες ΙΩΠ γυαλιού (Mirimian & Shahawy, 1997). Η βλάβη του σκυροδέματος χ προέκυψε για την αντοχή των 37.2 MPa με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τιμών για σκυρόδεμα των 25.2 MPa και 82.1 MPa.

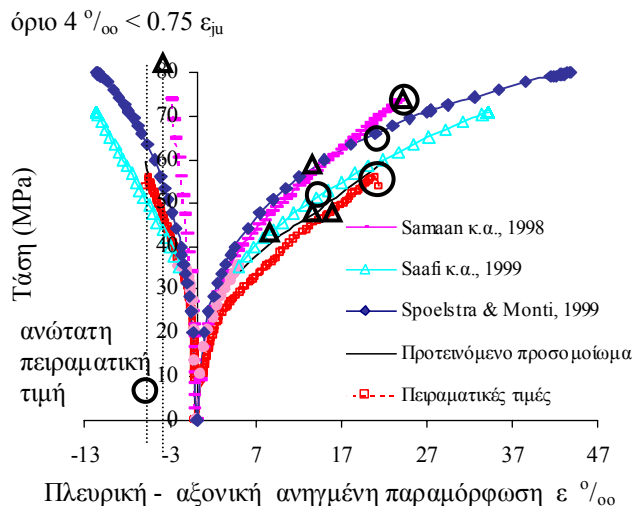
Παρατηρείται ικανοποιητική ακρίβεια στην πρόβλεψη της καμπύλης τάσεων – πλευρικών ανηγμένων παραμορφώσεων. Ικανοποιητική είναι επίσης η ακρίβεια πρόβλεψης των αξονικών ανηγμένων παραμορφώσεων. Το προσομοίωμα μπορεί να αναπαράγει συμπεριφορά φθίνοντα ανελαστικού κλάδου τάσεων – παραμορφώσεων σκυροδέματος με χαμηλή περίσφιγξη (σχήμα 10). Παρατηρούνται ανά περιπτώσεις σημαντικές αποκλίσεις των προβλέψεων τόσο των πλευρικών όσο και αξονικών παραμορφώσεων των τριών συγκρινόμενων ημιεμπειρικών προσομοιωμάτων.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

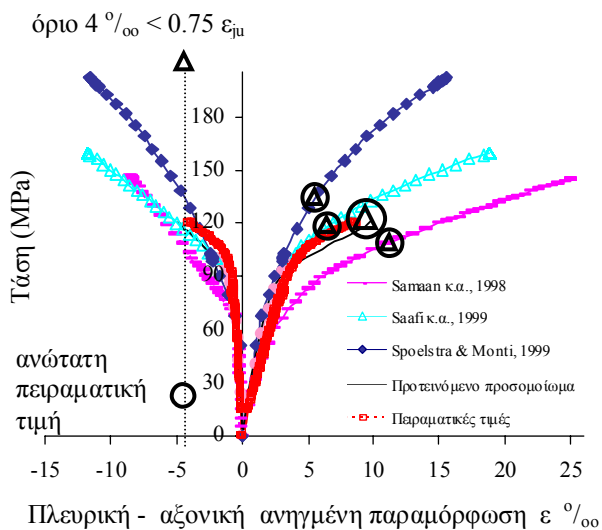
Προτείνεται ο έμμεσος προσδιορισμός της πλαστικής συμπεριφοράς του περισφιγμένου με ΙΩΠ σκυροδέματος αξιοποιώντας τα αποτελέσματα κατάλληλα σχεδιασμένου πειραματικού προγράμματος δοκιμών σταδιακά αυξανόμενης φόρτισης – αποφόρτισης καθώς και μονότονης φόρτισης. Η σύγκλιση μεταξύ άμεσων και έμμεσων διαγραμμάτων πλαστικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος είναι ικανοποιητική. Παρέχονται πλήρεις συνεχείς καμπύλες μεταβολής των παραμέτρων διόγκωσης και βλάβης του σκυροδέματος από τις οποίες προκύπτει εξάρτηση της πλαστικής διόγκωσης του σκυροδέματος εκτός από την αντοχή του σκυροδέματος και από τη δυστένεια του μέσου περίσφιγξης. Αυξάνοντας τη δυστένεια του ΙΩΠ ή μειώνοντας την αντοχή του σκυροδέματος παρατηρείται περιορισμός του ρυθμού πλαστικής διόγκωσης του σκυροδέματος οδηγώντας το σκυρόδεμα σε συνεχή πλαστική συρρίκνωση. Η παράμετρος βλάβης του σκυροδέματος μπορεί να θεωρηθεί εξαρτώμενη αποκλειστικά από την αντοχή του σκυροδέματος. Η βλάβη του σκυροδέματος είναι αρχικά υψηλή ενώ στην συνέχεια σταθεροποιείται σε χαμηλές τιμές ανεξάρτητα από τη δυστένεια του μέσου περίσφιγξης.



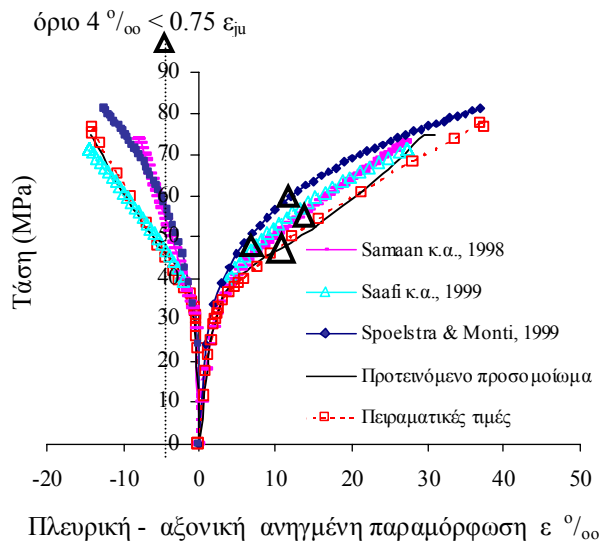
Σχήμα 11. Σύγκριση των πειραματικών τιμών $\sigma - \epsilon$ με αναλυτικές προβλέψεις για το δοκίμιο 60ac1L3-2t από τους Rousakis, 01 (3 στρώσεις ανθρακοϋφάσματος).



Σχήμα 12. Σύγκριση των πειραματικών τιμών $\sigma - \epsilon$ με αναλυτικές προβλέψεις για το δοκίμιο 20c1L2-2t από τους Rousakis, 01 (2 στρώσεις ανθρακοϋφάσματος).



Σχήμα 13. Σύγκριση των πειραματικών τιμών $\sigma - \epsilon$ με αναλυτικές προβλέψεις για το δοκίμιο 100c1L3-3t από τους Rousakis, 01 (3 στρώσεις ανθρακοϋφάσματος).



Σχήμα 14. Σύγκριση των πειραματικών τιμών $\sigma - \epsilon$ με αναλυτικές προβλέψεις για δοκίμια της παρτίδας C από τους Mirmiran & Shahawy, 97 (10 στρώσεις υφάσματος ΙΩΠ E-glass).

Παράλληλα αναπτύσσεται μεθοδολογία διαβάθμισης προσομοιώματος της θεωρίας της πλαστικότητας όπου οι παράμετροι του υλικού συσχετίζονται μονοσήμαντα με κλειστές αναλυτικές σχέσεις με την αντοχή του σκυροδέματος (ή και τη δυστένεια του μέσου περισφιγξης). Προκύπτει νέα αναβαθμισμένη συνάρτηση κράτνυσης προσομοιώματος τύπου Drucker-Prager καθώς και συνάρτηση πλαστικού δυναμικού για υλικό με κράτνυση και φθίνοντα κλάδο.

Προτείνεται για σκυροδέματα χαμηλής όσο και υψηλής αντοχής. Από την σύγκριση με πειραματικά δεδομένα όσο και με προσομοιώματα της διεθνούς βιβλιογραφίας προκύπτει ικανοποιητική πρόβλεψη τόσο στην συμπεριφορά τάσεων – πλευρικών ανηγμένων παραμορφώσεων όσο και στην αξονική ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας.

5 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ACI Committee 440.2R-02. 2002. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. *American Concrete Institute*, Michigan.

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

De Lorenzis L., Tepfers R. 2003. Comparative Study of Models on Confinement of Concrete Cylinders with Fiber-Reinforced Polymer Composites. *ASCE Journal of Composites for Construction*, V. 7, No. 3, August 2003. pp. 219-234.

Fujikake K., Mindess S., Xu H.F. 2004. Analytical model for concrete confined with fiber reinforced polymer composite. *ASCE, Journal of Composites for Construction*, 8 (4), Jul –Aug 2004: 341-351.

Karabinis A. I., Kioussis P. D. 1994. Effects of Confinement on Concrete Columns: Plasticity Approach. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 120:9, pp. 2747-2767.

Karabinis A. I., Kioussis 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., Rousakis T.C. 2002. Concrete Confined by FRP Material: A Plasticity Approach. *Elsevier Engineering Structures Journal*, 24, 923-932.

Priestley M., Seible F., Calvi G. 1996. Seismic Design and Retrofit of Bridges. *John Wiley and Sons*, New York, N.Y

Rousakis T. 2001. Experimental investigation of concrete cylinders confined by carbon FRP sheets, under monotonic and cyclic axial compressive load. *Research Report*, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

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 περισφιγμένου με σύνθετα υλικά. Διδακτορική Διατριβή. *Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ*, Ξάνθη 2005.

Saafi M., Toutanji H.A., Li Z. 1999. Behavior of Concrete Columns Confined with Fiber Reinforced Polymer Tubes. *ACI Materials Journal*, V. 96, No. 4, July – August 1999. pp. 500-509.

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.

Spoelstra M. R., Monti G. 1999. FRP-Confined Concrete Model. *ASCE Journal of Composites for Construction*, V. 3, No. 3, August 1999. pp. 143-150.