ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΔΠΜΣ:ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΝΤΟΝΙΖΟΥΣΑ ΣΧΟΛΗ: ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΣΤΕΡΕΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΚΛΙΜΑΚΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ

ΜΑΡΚΟΣ ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:ΒΗΣΣΑΡΙΩΝ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	1
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
δομή σκυροδέματος	4
Αδρανή υλικά	5
Κατανομή μεγέθους αδρανών υλικών	5
Μοντέλο καμπύλης Fuller	6
Διαδικασία τοποθέτησης κόκκων	7
Διαδικασία ελέγχου	8
Ίνες	9
Βλάβη σκυροδέματος	10
σότροπο μοντέλο βλάβης σκυροδέματος και παράμετροί του	
ΚΥΡΙΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	12
Σύνθεση/ανάλυση	12
Γεχνική ενσωματωμένου στοιχείου(embedded element technique)	14
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	18
Αριθμητικά αποτελέσματα παραμέτρων βλάβης D, Eeq	
Αριθμητικα αποτελέσματα τάσεων	26
Σύγκριση αποτελεσμάτων παρούσας μελέτης με αντίστοιχες	41
ΕΙΚΟΝΕΣ	45
Εικόνες δοκιμίου Α	45
Εικόνες δοκιμίου Β	53
Ξικόνες δοκιμίου C	61
Εικόνες δοκιμίου D	69
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	76
ΊΑΡΑΠΟΜΠΕΣ	78

<u>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</u>

Ευχαριστώ ιδιαιτέρως τον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας εργασίας κύριο Βησσαρίωνα Παπαδόπουλο,επίκουρο καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την καθοδήγηση του.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία(FEM)σε δοκίμια σκυροδέματος οπλισμένα με ίνες χάλυβα και μελετάται η επιρροή των ινών χάλυβα στα μηχανικά χαρακτηριστικά και στην εξέλιξη της βλάβης του σκυροδέματος.

Η κύρια διαδικασία συνίσταται στη σύνθεση και δισδιάστατη(2D) ανάλυση 4 κυβικών δοκιμίων από σκυρόδεμα(15x15x15 εκ)σε υπολογιστικό πρόγραμμα.Τα υλικά που αποτελούν τη σύνθεση του σκυροδέματος είναι τσιμέντο,νερό,αδρανή υλικά και ίνες χάλυβα.Η θεωρητική σύνθεση είναι όμοια για τα 4 δοκίμια,ενώ μεταβάλλεται το ποσοστό των ινών κατ'όγκο.Το πρώτο δοκίμιο δε φέρει ίνες ,το δεύτερο δοκίμιο φέρει ίνες(μήκους I=30mm και πάχους d=0.8mm),ενώ το τρίτο και το τέταρτο δοκίμιο φέρουν ίνες (μήκους I=30mm και πάχους d=1mm) σε μεγαλύτερο ποσοστό ινών κ.ο.Τα αδρανή υλικά έχουν γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά,ενώ η τσιμεντόπαστα ακολουθεί ισότροπο μοντέλο βλάβης. Αρχικά έγινε ο ορισμός των υλικών,των μηχανικών χαρακτηριστικών και των διατομών των επι μέρους συστατικών του σκυροδέματος.Επιλέχθηκαν αδρανή υλικά από διάφορες κατηγορίες με διατομές 4,8,16,31.5mm.

Μετέπειτα, έγινε εισαγωγή των επι μέρους συστατικών στο δοκίμιο με βάση τις συνθέσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως για κάθε δοκίμιο και στη συνέχεια έγινε η συγχώνευση (merge) των συστατικών στο δοκίμιο.

Συγκεκριμένα, όσον αφορά τις ίνες χάλυβα ακολουθήθηκε η διαδικασία του ενσωματωμένου στοιχείου (embedded element technique) κατά την οποία οι ίνες επιλέγονται ως ομάδα (embedded element) και ενσωματώνονται στην τσιμεντόπαστα (host element). Με αυτόν τον τρόπο δεσμεύονται οι μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας κίνησης των ινών σε σχέση με τους αντίστοιχους της μήτρας (host element).

Εξάλλου επιβληθηκαν συνοριακές συνθήκες σε κάθε δοκίμιο.Συγκεκριμένα στη κάτω πλευρά του κάθε δοκιμίου επιβλήθηκε πάκτωση που δεσμεύει τις οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις και τη στροφή(δισδιάστατη κατάσταση).Τελικώς, έγινε ανάλυση σε περίπου 6600 πεπερασμένα στοιχεία(FEM) πολύπλευρου σχήματος(quadratic) και τύπου plane stress(επίπεδης τάσης).

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη και μονοαξονικό εφελκυσμό.Η παραμόρφωση επιβλήθηκε στη άνω πλευρά του κάθε δοκιμίου, και υπολογίστηκε το διάγραμμα τάσεων-τροπών(σ-ε) του δοκιμίου και ο συντελεστής βλάβης D της τσιμεντόπαστας.

Τα αριθμητικά αποτελέσματα της ανάλυσης επαλήθευσαν τη συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος όπως περιγράφεται στη θεωρία. Το διάγραμμα τάσεωντροπών(σ-ε)υπο μονοαξονική θλίψη του άοπλου δοκιμίου με αντίστοιχο που προέκυψε από πειραματική διαδικασία.Η απόκλιση στην θλιπτική αντοχή και στην παραμόρφωση θραύσης από θλίψη ήταν μικρή,αλλα η εξέλιξη της βλάβης του σκυροδέματος ήταν ταχεία. Η προσθήκη ινών επέφερε μικρή αύξηση της θλιπτικής αντοχής και μεγάλη αύξηση της εφελκυστικής αντοχής όπως ήταν αναμενόμενο. Η προσθήκη των ινών χάλυβα στο δοκίμιο επέφεραν αύξηση της παραμόρφωσης θραύσης του σκυροδέματος και μικρή βελτίωση της πλαστιμότητας.Εξάλλου,υπήρξε αύξηση του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας της τοιμεντόπαστας μετά την παραμόρφωση θραύσης,που συνεπάγεται επιβράδυνση της εξέλιξης της βλάβης του σκυροδέματος.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Δομή σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα είναι το πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό στις κατασκευές παγκοσμίως.Σε ένα κατασκευαστικό έργο το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται για την κατασκευή στοιχείων όπως πεδίλων,θεμελιώσεων, υποστηλωμάτων,δοκών και στοιχείων τοιχοποιίας.

Η μικροδομή του σκυροδέματος είναι ετερογενής και η μηχανική συμπεριφορά των συστατικών του είναι πολύπλοκη.Πολλές θεωρητικές μελέτες που βασίζονται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των συστατικών του σκυροδέματος έχουν γίνει αλλά δεν έχει ληφθεί υπόψιν η μικροδομή των συστατικών και η μακροσκοπική επίδραση τους.Η ρεαλιστική προσομοίωση της μικροδομής του σκυροδέματος είναι ένα χρήσιμο εργαλείο στον έλεγχο της μηχανικής συμπεριφοράς

Τα βασικά συστατικά του σκυροδέματος αποτελείται από αδρανή υλικά, τσιμέντο και νερό σε κατάλληλη αναλογία.

<u>Αδρανή υλικά</u>

Τα αδρανή υλικά καταλαμβάνουν περίπου το 60-80% του όγκου του σκυροδέματος και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες του.Η κατανομή του μεγέθους του κόκκου των αδρανών επηρεάζει τις ιδιότητες του σκυροδέματος όπως την εργασιμότητα, τη διαπερατότητα, και την μηχανική αντοχή. Η αναλογία των αδρανών σε μία σύνθεση σκυροδέματος καθορίζεται από την κοκκομετρική διαβάθμιση.Τα αδρανή υλικά διαχωρίζονται ανάλογα με τη διάμετρο του μεγαλύτερου κόκκου στις εξής κατηγορίες:

A)άμμος(0-4mm)

B)ρύζι(4-8mm)

Γ)γαρμπίλι(8-16mm)

Δ)Σκύρα(16-31,5mm)

Τα αδρανή υλικά έχουν εν γένει ακανόνιστο σχήμα,αλλά στη συγκεκριμένη μελέτη,όπως και σε πολλές άλλες μελέτες γίνεται η παραδοχή του σφαιρικού σχήματος.

Κατανομή μεγέθους αδρανών υλικών

Η κατανομή των κόκκων των αδρανών γίνεται με βάση μια σειρά τύπων και γραφημάτων. Η κοκκομετρική διαβάθμιση ορίζει την κατανομή των αδρανών ανάλογα με το μέγεθος του κόκκου τους και καθορίζεται από ομάδα πρότυπων κόσκινων διαφόρων οπών όπου γίνεται το κοσκίνισμα των κόκκων.Ανάλογα με τις ποσότητες των αδρανών που συγκρατούνται σε κάθε κόσκινο,προκύπτει και η αναλογία κατ'όγκο κάθε αδρανούς που θα χρησιμοποιηθεί στο μίγμα.

Μοντέλο καμπύλης Fuller

Η πιο γνωστή μέθοδος κατανομής κόκκων αδρανών υλικών δίδεται από την καμπύλη Fuller.Η καμπύλη Fuller εκφράζεται από την εξής σχέση:

P(d)=100(d/dmax)ⁿ,όπου:

P(d):το συνολικό ποσοστό που διαπερνάει κόσκινο διαμέτρου d

dmax:Η διάμετρος του μέγιστου κόκκου αδρανους

n:συντελεστής της εξίσωσης με τιμή 0,45 έως 0,70

Σε μία σύνθεση σκυροδέματος η ποσότητα των αδρανών υλικών εκφράζεται ως βάρος ανα μονάδα όγκου σκυροδέματος. Μολαταύτα, ο λόγος μπορεί να εκφραστεί με βάση τον όγκο ως εξής:

Up = <u>Wp</u>, όπου: p_p *V Up: ο λόγος όγκου των αδρανών

wp: συνολικό βάρος των κόκκων αδρανών

pp:το ειδικό βάρος του δοκιμίου

V:ο όγκος του δοκιμίου

Εάν η κατανομή του μεγέθους των κόκκων ορίζεται από τις καμπύλες διαβάθμισης,τότε η ποσότητα του αδρανούς υλικού στο τμήμα [ds,ds+1] υπολογίζεται ως εξής:

 $Vp[ds,ds+1] = \underline{P(ds)-P(ds+1)} x up x V$ P(dmax)-P(dmin)

Vp[ds,ds+1] ο όγκος των αδρανών υλικών στο τμήμα [ds,ds+1]

dmax:Η μέγιστη τιμή διαμέτρου των κόκκων των αδρανών

dmin: Η ελάχιστη τιμή διαμέτρου των κόκκων των αδρανών

Διαδικασία τοποθέτησης κόκκων

Οι κόκκοι των αδρανών τοποθετούνται στο δοκίμιο με βάση συγκεκριμένους αλγόριθμους.

Αν υποθέσουμε οτί χρησιμοποιούμε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων στο δοκίμιο και x είναι η συντεταγμένη του κέντρου Ο του σφαιρικού κόκκου που λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς,τότε η συντεταγμένη x κυμαίνεται στα εξής όρια:

x=xmin +n(xmax -xmin),όπου:

xmin : η ελάχιστη συντεταγμένη στον όγκο του σκυροδέματος

Xmax : η μέγιστη συντεταγμένη στον όγκο του σκυροδέματος

n : τιμή μεταξύ 0 και 1

Η τοποθέτηση ενός κόκκου σε κάποιο ελεύθερο σημείο πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής συνθήκες:

α)ο κόκκος πρέπει να είναι εντός του όγκου του σκυροδέματος

β)ο κόκκος δεν πρέπει να επικαλύπτει κάποιον κόκκο που τοποθετήθηκε προηγουμένως

γ)επιπλέον κάθε κόκκος που τοποθετείται πρέπει να περικλέιεται από στρώμα κονίας με ελάχιστο πάχος ίσο με γ*d,όπου d είναι η διάμετρος του κόκκου που τοποθετείται και γ συντελεστής που εξαρτάται από το ποσοστό των αδρανών στο σκυρόδεμα



Σχ.1:διαδικασία τοποθέτησης κόκκων αδρανών υλικών σε δοκίμιο διατηρώντας συγκεκριμένες αποστάσεις

Διαδικασία ελέγχου

Η αναλογία των αδρανών υλικών στο σκυρόδεμα (κατ'όγκο) όπως και η διάταξη τους μέσα στο μίγμα επηρεάζουν το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος.Σε αρκετές μελέτες που αφορούν μοντέλα σκυροδέματος, γίνονται αρκετές δοκιμές με διαφορετική αναλογία αδρανών και διαφορετική διάταξη τους στο μίγμα για να υπολογιστεί η επιρροή τους στο μέτρο ελαστικότητας.

Μεγαλύτερα ποσοστά αδρανών υλικών στο μίγμα αυξάνουν το μέτρο ελαστικότητας(Wriggers και Moftah)⁽¹⁾

Η χρήση ινών με σκοπό την ενίσχυση των υλικών δόμησης εμφανίζεται στην αρχαιότητα με διάφορες μορφές.Στην σύγχρονη εποχή πρωτοεμφανίζεται η εφαρμογή ινοπλισμένου σκυροδέματος τη δεκαετία του 1960.

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή και τη βιομηχανία είναι κυρίως από χάλυβα,γυαλί, προπυλένιο και άνθρακα.

Οι χαλύβδινες ίνες που είναι οι πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενες βρίσκουν εφαρμογή σε επενδύσεις πεζοδρομίων, καταστρώματα γεφυρών και τσιμεντοσωλήνες(D.Frank)⁽³⁾.

Οι ίνες χάλυβα έχουν διάφορες μορφές αλλά συνήθως είναι ευθύγραμμες και έχουν διαμορφωμένα άκρα τους ώστε να συγκρατούνται από το σκυρόδεμα.

Εξάλλου,οι ίνες χάλυβα είναι μικρού μήκους,συνήθως 13-76 mm,και διαμέτρου έως 1mm. Η εφελκυστική αντοχή μίας ίνας χάλυβα κυμαίνεται μεταξύ 276 και 2413 MPa ανάλογα με τον τύπο της.

Το ποσοστό ανάμιξης τους στο σκυρόδεμα κυμαίνεται συνύθως μεταξύ 0,5-2% κ.ο.Ποσοστά μεγαλύτερα του 2%κ.ο επιφέρουν μείωση της εργασιμότητας του μίγματος.

Η προσθήκη χαλύβδινων ινών στο σκυρόδεμα επιτυγχάνει τη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του.Συγκεκριμένα, η επίδραση στα μηχανικά χαρακτηριστικά είναι η εξής:

- αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό
- αύξηση της αντοχής σε κάμψη
- αύξηση της πλαστιμότητας και της τελικής παραμόρφωσης
- μικρή αύξηση της θλιπτικής αντοχής
- αύξηση της δυσθραυστότητας

<u>Βλάβη σκυροδέματος</u>

Η αριθμητική προσομοίωση της διαδικασίας της βλάβης και της αστοχίας του σκυροδέματος είναι απαραίτητη.Είναι εν γένει αποδεκτό οτί η παραμόρφωση του σκυροδέματος σχετίζεται με την έναρξη και τη ανάπτυξη των μικρορωγμών.

ισότροπο μοντέλο βλάβης του σκυροδέματος και παράμετροι του

Το μοντέλο βλάβης του Mazars για το σκυρόδεμα έχει την παραδοχή οτί η απομείωση της ακαμψίας είναι ισότροπος.Η τάση σύμφωνα με το μοντέλο του J.Mazars^{(4),(5)} δίδεται από τη εξής σχέση:

σ=(1-D)*E*eel

Ε: το μέτρο ελαστικότητας

eel: η ελαστική τροπή

D: η κλίμακα βλάβης του υλικού που αναλύεται από την εξής σχέση:

$D=\alpha t * Dt + \alpha c * Dc$,

όπου Dt και Dc είναι οι κλίμακες βλάβης για εφελκυσμό και θλίψη αντίστοιχα. Για μονοαξονική θλίψη ισχύει: αt =0 και αc=1,ενώ για μονοαξονικό εφελκυσμό ισχύει: αt =1 και αc=0.

Η εξέλιξη της βλάβης καθορίζεται από τις παραμέτρους Dt και Dc,με τις εξής σχέσεις:

 $Dt=1- \frac{\kappa_0(1-At)}{\kappa} - At = exp[Bt(\kappa-\kappa_0)]$

Dc=1- <u>κο (1-Ac</u>) <u>Ac</u> κ exp[Bc(κ- κο)]

Όπως είναι φανερό, καθώς αυξάνεται η βλάβη του σκυροδέματος, μειώνεται η τιμή της τάσης που μπορεί να παραληφθεί. Εάν ορίσουμε ως:

σ την πραγματική τιμή τάσης που μετράται και

σ΄ την ενεργή τάση,δηλ. την θεωρητική τάση που θα προέκυπτε εάν η παραμόρφωση είναι μόνιμα ελαστική,ισχύει η σχέση:

σ= <u>σ΄</u> 1-D και το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας που προκύπτει με την εξέλιξη της βλάβης ισούται με:

Eeq=E*(1-D)

Ο συντελεστής κ αντιπροσωπεύει την ισοδύναμη εφελκυστική τροπή που προκύπτει στο σκυρόδεμα και ισούται με τη ρίζα του αθροίσματος των κύριων τροπών ανα κατεύθυνση. Λαμβάνονται υπόψιν μόνο οι θετικές τροπές ανα κατεύθυνση για τη διατομή σκυροδέματος είτε υπόκειται σε θλιπτική παραμόρφωση είτε σε εφελκυστική. Αυτό ισχύει διότι η εφελκυστική παραμόρφωση είναι η πλέον κρίσιμη αφού η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος είναι αισθητά μικρότερη της θλιπτικής

$$\kappa = \varepsilon_{eq} = \left[\sum_{i=1}^{3} (\langle \varepsilon_i \rangle_{+})^2 \right]^{0.5}$$

ει είναι η κύρια τροπή στην κατεύθυνση i

<εi>+ =1,εάν εi ≥ 0

<εi>+ =0 ,εάν εi < 0

Η τιμή **Ko** είναι η τιμή της ισοδύναμης τροπής κατά την οποία ενεργοποιείται η βλάβη και ισοδυναμεί με το λόγο της εφελκυστικής αντοχης προς το μέτρο ελαστικότητας.

ко=	<u>ft</u>
	Ε

ΚΥΡΙΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σύνθεση/ανάλυση

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο υπολογιστικό πρόγραμμα ABAQUS. Η κύρια διαδικασία αυτής της εργασίας αφορά τη θεωρητική σύνθεση 4 κυβικών δοκιμίων από σκυρόδεμα(15x15x15 εκ)και την δισδιάστατη ανάλυση τους με πεπερασμένα στοιχεία.

Τα υλικά που αποτελούν τη σύνθεση του σκυροδέματος είναι τσιμέντο, νερό, αδρανή υλικά και ίνες χάλυβα. Το πρώτο δοκίμιο Α είναι άοπλο, το δεύτερο δοκίμιο Β φέρει ίνες (μήκους I=30 mm και πάχους d=0.8mm) ενώ το τρίτο C και το τέταρτο δοκίμιο D φέρουν ίνες (μήκους I=30 mm και πάχους d=1mm). Η διάταξη των αδρανών υλικών και η αναλογία τους στο μίγμα αλλάζει ελάχιστα με την εισαγωγή των ινών στα δοκίμια B,C,D. Η σύνθεση του σκυροδέματος της παρούσας μελέτης ελήφθη με βάση σύνθεση σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή κυβικών και κυλινδικών δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε πειραματική διαδικασία θλίψης και διάρρηξης (Ε.Τέζιας και Μ.Πετρόπουλος)⁽⁵⁾

Η σύνθεση του σκυροδέματος είναι σε κατ'όγκο αναλογία για τα δοκίμια η κάτωθι:

Δοκίμιο Α	Δοκίμιο Β	Δοκίμιο C	Δοκίμιο D
Τσιμέντο: 11%	Τσιμέντο: 10,91%	Τσιμέντο : 10,87%	Τσιμέντο: 10,78%
Νερό: 18%	Νερό: 17,9%	Νερό: 17,84%	Νερό: 17,68%
Αδρανή υλικά:71%	Αδρανή υλικά :70,66%	Αδρανή υλικά: 70,36%	Αδρανή υλικά: 69,87%
-	Ίνες χάλυβα (l=30mm,d=0.8mm):0,53%	Ίνες χάλυβα (l=30mm,d=1mm):0,93%	Ίνες χάλυβα (l=30mm,d=1mm) :1,67 %

Πίνακας 1:Σύνθεση κ.ο(%)του σκυροδέματος των δοκιμίων

Η συνολική μελέτη των δοκιμίων έγινε στη δισδιάστατη κατάσταση.Δηλαδή, αποτυπώθηκε μία αντιπροσωπευτική κατακόρυφη δισδιάστατη τομή(15x15cm)για κάθε δοκίμιο(Σχ.2)

Αρχικά έγινε ο ορισμός των υλικών,των μηχανικών χαρακτηριστικών και των διατομών των επι μέρους συστατικών του σκυροδέματος(πίνακας 2).Επιλέχθηκαν αδρανή υλικά από

διάφορες κατηγορίες με διατομές 4,8,16,31mm.Εξάλλου οι ίνες χάλυβα είναι ευθύγραμμες με μήκος 30mm και κυκλικής διατομής με διάμετρο 0,8mm(δοκίμιο B) και 1mm(δοκίμια C και D)και διατάσσονται σε διάφορες κατευθύνσεις στη μάζα του σκυροδέματος.

Μετέπειτα, έγινε εισαγωγή των επι μέρους συστατικών στο δοκίμιο, με βάση τις συνθέσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως, και στη συνέχεια έγινε η συγχώνευση (merge) των συστατικών στο δοκίμιο.

Συγκεκριμένα,όσον αφορά τις ίνες χάλυβα ακολουθήθηκε η διαδικασία του ενσωματωμένου στοιχείου(embedded element technique)κατά την οποία οι ίνες επιλέγονται ως ομάδα(embedded element)και ενσωματώνονται στην τσιμεντόπαστα(host element). Με αυτόν τον τρόπο δεσμεύονται οι μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας κίνησης των ινών σε σχέση με τους αντίστοιχους της μήτρας (host element)(σχ.2,3)

Εξάλλου επιβλήθηκαν συνοριακές συνθήκες σε κάθε δοκίμιο.Συγκεκριμένα στη κάτω πλευρά του κάθε δοκιμίου επιβλήθηκε πάκτωση που δεσμεύει την οριζόντια μετακίνηση,την κατακόρυφη μετακίνηση και και τη στροφή (για δισδιάστατη κατάσταση). Τελικώς, έγινε ανάλυση σε περίπου 6600 πεπερασμένα στοιχεία (FEM) πολύπλευρου σχήματος και τύπου επίπεδης τάσης (plane stress).

Τα τέσερα(4) δοκίμια (15x15x15cm) υποβλήθηκαν σε θλιπτική και εφελκυστική μονοαξονική παραμόρφωση.Συγκεκριμένα επιβλήθηκε σε ομοιόμορφη παραμόρφωση η άνω πλευρά του δοκιμίου.Σε κάθε δοκιμή παραμόρφωσης που έγινε, υπολογίστηκε η αντίστοιχη αντίδραση RF που προέκυπτε στην πάκτωση. Η τιμή της τάσης για κάθε αντίστοιχη δοκιμή παραμόρφωσης υπολογίστηκε διαιρώντας την αντίστοιχη αντίδραση με την επιφάνεια που επιβάλλεται η παραμόρφωση(σε αυτήν την περίπτωση είναι η οριζόντια πλευρά λόγω δισδιάστατου μοντέλου).

Σε κάθε δοκιμή παραμόρφωσης μεταβάλλεται το μέτρο ελαστικότητας της τσιμεντόπαστας ανάλογα με τον συντελεστή βαθμού βλάβης D.Συγκεκριμένα,όσο αυξάνεται η παραμόρφωση, αυξάνεται η ισοδύναμη τροπή εeq (που εξαρτάται από τις κύριες τροπές) και όταν επέλθει η οριακή τιμή κο αρχίζει η μείωση του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας της τσιμεντοκονίας. Το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών υλικών παραμένει σταθερό καθώς έγινε η παραδοχή οτί έχουν γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων και παραμέτρων βλάβης των στοιχείων του μίγματος.Οι παράμετροι για την τσιμεντοκονία και τα αδρανή υλικά συμπίπτουν με τις αντίστοιχες της μελέτης των Wriggers-Moftah⁽¹⁾

Τσιμεντοκονία	Αδρανή υλικά	Ίνες χάλυβα
E=20000 MPa	E=60000 MPa	E=200000 MPa
v=0.20	v=0.22	v=0.28
ко=1.0x10 ⁻⁴		fy=379 MPa
At=1.2		
Bt=1.5x10 ⁴		
Ac=1.0		
Bc=1.555x10 ³		
β=1.0		

Πίνακας 2: μηχανικά χαρακτηριστικά και παράμετροι βλάβης των_συστατικών του σκυροδέματος



Σχ.2 δισδιάστατη(2D) αποτύπωση τομής του δοκιμίου A(15 x15 cm)



Σχ.3 οι ίνες χάλυβα ενσωματώνονται στην τσιμεντόπαστα

Τεχνική ενσωματωμένου στοιχείου(embedded element technic)

Όπως προαναφέρθηκε,όσον αφορά τις ίνες χάλυβα ακολουθήθηκε η διαδικασία του ενσωματωμένου στοιχείου(embedded element technique)κατά την οποία οι ίνες επιλέγονται ως ομάδα (embedded element)και ενσωματώνονται στην τσιμεντόπαστα (host element). Με αυτόν τον τρόπο συνδέονται οι μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας κίνησης των ινών σε σχέση με τους αντίστοιχους της μήτρας (host element) (D.Savvas, V.Papadopoulos, M.Papadrakakis)⁽⁸⁾ όπως φαίνεται στα σχ.3,4. Θεωρώντας ένα πεπερασμένο δισδιάστατο στοιχείο μήτρας (τσιμεντόπαστα) με 4 κόμβους στο οποίο είναι ενσωματωμένο ένα τμήμα της ίνας με άκρα Ι, j(σχ.4), οι μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας του στοιχείου της ίνας δίδονται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_{i} \\ \mathbf{u}_{j} \\ \mathbf{v}_{i} \\ \mathbf{v}_{j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}^{\mathsf{M}} \mathbf{N}^{\mathsf{M}} \\ \mathbf{N}^{\mathsf{M}} \mathbf{N}^{\mathsf{M}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}^{\mathsf{M}} \\ \mathbf{V}^{\mathsf{M}} \end{bmatrix}$$

όπου Ν^Μ είναι το μητρώο συναρτήσεων σχήματος του πεπερασμένου στοιχείου μήτρας και U^M, V^M τα μητρώα μετατόπισης της μήτρας,όπου

$$N^{M} = \begin{bmatrix} N_{1(i),\dots,N_{4(i)}} \\ \\ \\ N_{1(j),\dots,N_{4(j)}} \end{bmatrix}$$

 $U^{M} = [U_{1} \quad U_{2} \quad U_{3} \quad U_{4}]^{T} \qquad V^{M} = [V_{1} \quad V_{2} \quad V_{3} \quad V_{4}]^{T}$

Το μητρώο δυσκαμψίας της ινας Κ^b στο τοπικό σύστημα αξόνων προκύπτει με βάση τις συναρτήσεις σχήματος Ν^M.

Το μητρώο δυσκαμψίας του στοιχείου της ίνας στο καθολικό σύστημα αξόνων,που προκύπτει από την αλληλεπίδραση του στοιχείου της μήτρας με το στοιχείο της ίνας(beam element) έχει ως εξής:

 $K^{B} = T^{T} K^{b} T$, όπου Τ: το μητρώο μετασχηματισμού

Το συνολικό τελικό μητρώο δυσκαμψίας που προκύπτει από την αλληλεπίδραση του στοιχείου της μήτρας με το στοιχείο της ίνας(beam element) περικλείει και τις στροφες θzi,θzj.



Σχ.4: Πεπερασμένο στοιχείο μήτρας με ενσωματωμένο στοιχείο ίνας

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αριθμητικά αποτελέσματα παραμέτρων βλάβης τσιμεντόπαστας D, Eeq

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν ανάλογα με τις τιμές των εφελκυστικών και θλιπτικών παραμορφώσεων που επιβλήθηκαν.

Μονοαξονική θλιπτική παραμόρφωση

ΔΟΚΙΜΙΟ Α(ΑΟΠΛΟ)

Παραμόρφωση	Μήκος	ε(Δl/L)	Ισοδύναμη	Συντελεστής	Eeq
ΔI(mm)	δοκιμίου		τροπή Eeq	βλάβης	(τσιμεντόπαστας)
	L(mm)		(x 10 ⁻⁴)	Dc(=D)	(MPa)
0.03	150	0.0002	0.55	0	20000
0.045	150	0.0003	0.82	0	20000
0.06	150	0.0004	0.98	0	20000
0.075	150	0.0005	1.12	0.018	19630
0.1125	150	0.00075	1.9	0.131	17388
0.15	150	0.001	3	0.267	14654.7
0.225	150	0.0015	6.15	0.551	8979.17
0.3	150	0.002	8.55	0.691	6182.40
0.375	150	0.0025	12.5	0.832	3345
0.45	150	0.003	17	0.917	1661.52
0.60	150	0.004	21.5	0.958	825.29
0.75	150	0.005	29	0.9873	257.1

ΔΟΚΙΜΙΟ Β(ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΝΩΝ 0,53%)

Παραμόρφωση ΔΙ (mm)	Μήκος δοκιμίου L(mm)	ε(ΔΙ/Ι)	Ισοδύναμη τροπή εeq x 10 ⁻⁴	Συντελεστής βλάβης Dc(=D)	Eeq (τσιμεντόπαστας) (MPa)
0.03	150	0.0002	0.61	0	20000
0.045	150	0.0003	0.80	0	20000
0.06	150	0.0004	0.96	0	20000
0.075	150	0.0005	1.11	0.017	19660.81
0.1125	150	0.00075	1.88	0.128	17442.20
0.15	150	0.001	2.90	0.256	14883.93
0.225	150	0.0015	6	0.54	9191.07
0.3	150	0.002	8.35	0.681	6377.70
0.375	150	0.0025	12	0.819	3615.51
0.45	150	0.003	16	0.903	1941.06
0.60	150	0.004	21	0.955	892.02
0.75	150	0.005	28.5	0.986	277.89

ΔΟΚΙΜΙΟ C(ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΝΩΝ 0,93%)

Παραμόρφωση Δl(mm)	Μήκος δοκιμίου L(mm)	Τροπή ε(ΔΙ/L)	Ισοδύναμη τροπή εeq (x 10⁻⁴)	Συντελεστής βλάβης Dc(=D)	Eeq (τσιμεντόπαστας) (MPa)
0.03	150	0.0002	0.48	0	20000
0.045	150	0.0003	0.725	0	20000
0.06	150	0.0004	0.957	0	20000
0.075	150	0.0005	1.12	0.0174	19652
0.1125	150	0.00075	1.85	0.124	17523.75
0.15	150	0.001	2.80	0.244	15117.18
0.225	150	0.0015	5.75	0.52	9555.41
0.3	150	0.002	8.10	0.668	6630.51
0.375	150	0.0025	11.7	0.81	3788.16
0.45	150	0.003	15.5	0.895	2098
0.60	150	0.004	20.6	0.953	949.26
0.75	150	0.005	28.3	0.9855	288.89

ΔΟΚΙΜΙΟ D(ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΝΩΝ 1,67%)

Παραμόρφωση Δl(mm)	Μήκος δοκιμίου L(mm)	Τροπή ε(ΔΙ/L)	Ισοδύναμη τροπή ε _{eq} (x 10 ⁻⁴)	Συντελεστής βλάβης Dc (=D)	Eeq (τσιμεντόπαστας) (MPa)
0.03	150	0.0002	0.425	0	20000
0.045	150	0.0003	0.675	0	20000
0.06	150	0.0004	0.903	0	20000
0.075	150	0.0005	1.10	0.0154	19692
0.1125	150	0.00075	1.77	0.113	17735.80
0.15	150	0.001	2.68	0.23	15400
0.225	150	0.0015	5.56	0.504	9920
0.3	150	0.002	7.80	0.653	6940
0.375	150	0.0025	11.15	0.798	4045.75
0.45	150	0.003	14.92	0.886	2270.04
0.60	150	0.004	20	0.948	1040
0.75	150	0.005	27.5	0.983	340

Μονοαξονική εφελκυστική παραμόρφωση

ΔΟΚΙΜΙΟ Α

Παραμόρφωση ΔΙ (mm)	Μήκος L(mm)	Τροπή ε (ΔΙ/Ι)	Ισοδύναμη τροπή Eeq. (x 10 ⁻⁴)	Συντελεστής βλάβης Dt(=D)	Eeq (τσιμεντόπαστας) (MPa)
0.00375	150	0.000025	0.29	0	20000
0.0075	150	0.00005	0.633	0	20000
0.009	150	0.00006	0.83	0	20000
0.0105	150	0.00007	0.91	0	20000
0.012	150	0.00008	1.04	0.062	18753.85
0.0135	150	0.00009	1.28	0.368	12638
0.015	150	0.0001	1.45	0.527	9460
0.01575	150	0.000105	1.88	0.788	4280
0.0165	150	0.00011	2.08	0.859	2830
0.018	150	0.00012	2.30	0.916	1680
0.01875	150	0.000125	2.40	0.936	1280

ΔΟΚΙΜΙΟ Β(ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΝΩΝ 0,53%)

Παραμόρφωση Δl(mm)	Μήκος δοκιμίου L (mm)	Τροπή ε (ΔΙ/L)	Ισοδύναμη τροπή εeq (x 10 ⁻⁴)	Συντελεστής βλάβης Dt	Εeq (τσιμεντόπαστας) (MPa)
0.00375	150	0.000025	0.27	0	20000
0.0075	150	0.00005	0.58	0	20000
0.009	150	0.00006	0.8	0	20000
0.0105	150	0.00007	0.89	0	20000
0.012	150	0.00008	1.00	0	20000
0.0135	150	0.00009	1.19	0.267	14660
0.015	150	0.0001	1.38	0.467	10661
0.01575	150	0.000105	1.49	0.559	8815
0.0165	150	0.00011	1.62	0.65	7000
0.018	150	0.00012	1.90	0.794	4120
0.01875	150	0.000125	2.15	0.879	2420

ΔΟΚΙΜΙΟ C(ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΝΩΝ 0,93%)

παραμόρφωση Δl(mm)	Μήκος δοκιμίου l(mm)	ε(ΔΙ/Ι)	Ισοδύναμη τροπή εeq. (x 10⁻⁴)	Συντελεστής βλάβης Dt	Εeq (τσιμεντόπαστας) (MPa)
0.00375	150	0.000025	0.247	0	20000
0.0075	150	0.00005	0.54	0	20000
0.009	150	0.00006	0.67	0	20000
0.0105	150	0.00007	0.77	0	20000
0.012	150	0.00008	0.91	0	20000
0.0135	150	0.00009	0.99	0	20000
0.015	150	0.0001	1.18	0.253	14940
0.01575	150	0.000105	1.32	0.409	11820
0.0165	150	0.00011	1.42	0.502	9963
0.018	150	0.00012	1.55	0.603	7940
0.01875	150	0.000125	1.78	0.74	5200

ΔΟΚΙΜΙΟ D(ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΝΩΝ 1,67%)

Παραμόρφωση Δl(mm)	μήκος δοκιμίου L(mm)	ε(ΔI/L)	Ισοδύναμη τροπή εeq. (x 10⁻⁴)	Συντελεστής βλάβης Dt	Eeq (τσιμεντόπαστας)
					(MPa)
0.00375	150	0.000025	0.245	0	20000
0.0075	150	0.00005	0.53	0	20000
0.009	150	0.00006	0.65	0	20000
0.0105	150	0.00007	0.76	0	20000
0.012	150	0.00008	0.86	0	20000
0.0135	150	0.00009	0.97	0	20000
0.015	150	0.0001	1.08	0.121	17580
0.01575	150	0.000105	1.25	0.335	13295
0.0165	150	0.00011	1.36	0.448	11038.82
0.018	150	0.00012	1.50	0.566	8676.7
0.01875	150	0.000125	1.62	0.65	7000

Αριθμητικα αποτελέσματα τάσεων

Μονοαξονική θλίψη

ΔΟΚΙΜΙΟ Α(ΧΩΡΙΣ ΙΝΕΣ)

παραμόρφωση Δl(mm)	Μήκος δοκιμίου l(mm)	Επιφάνεια φόρτισης Α(mm ²)	Αντίδραση Rғ(N)	Τροπή ε(ΔΙ/Ι)	Τάση σ(MPa)
0.03	150	150	1006.65	0.0002	6,71
0.045	150	150	1515.26	0.0003	10,11
0.06	150	150	2020.69	0.0004	13,47
0.075	150	150	2489.18	0.0005	16,59
0.1125	150	150	3475.5	0.00075	23,17
0.15	150	150	4151.09	0.001	27,67
0.225	150	150	4424.91	0.0015	29,50
0.3	150	150	4437.54	0.002	29,58
0.375	150	150	3331.28	0.0025	22,21
0.45	150	150	2134.65	0.003	14,23
0.60	150	150	1475.60	0.004	9,84
0.75	150	150	635.06	0.005	4,24

ΔΟΚΙΜΙΟ Β(ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΝΩΝ 0.53%Κ.Ο)

Παραμόρφωση	Μήκος	Επιφάνεια	Αντίδραση RF	τροπή ε	τάση σ
∆l(mm)	οσκιμιου	φοριισης		(Δ1/1)	(IVIPa)
	L(mm)	A(mm²)			
0.03	150	150	10012,62	0.0002	6,75
0.045	150	150	1518.93	0.0003	10,13
0.06	150	150	2025.25	0.0004	13,50
0.075	150	150	2505.14	0.0005	16,70
0.1125	150	150	3468.81	0.00075	23,13
0.15	150	150	4172.82	0.001	27,82
0.225	150	150	4506.85	0.50015	30,05
0.3	150	150	4512.26	0.002	30,08
0.375	150	150	3537.99	0.0025	23,59
0.45	150	150	2460.35	0.003	16,40
0.6	150	150	1598.27	0.004	10,66
0.75	150	150	703.50	0.005	4,69

ΔΟΚΙΜΙΟ C(ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΝΩΝ 0.93%Κ.Ο)

Παραμόρφωση ΔΙ	Μήκος δοκιμίου	Επιφάνεια Φόρτισης	Αντίδραση RF	Τροπή ε (ΔΙ/L)	τάση σ(MPa)
(mm)	L(mm)	A(mm ²)	(N)		
0.03	150	150	1037.48	0.0002	6,92
0.045	150	150	1557	0.0003	10,38
0.06	150	150	2074.50	0.0004	13,83
0.075	150	150	2569.50	0.0005	17,13
0.1125	150	150	3561	0.00075	23,74
0.15	150	150	4408.50	0.001	29,39
0.225	150	150	4966.50	0.0015	33,11
0.3	150	150	5043	0.002	33,62
0.375	150	150	4107	0.0025	27,38
0.45	150	150	2452.5	0.003	16,35
0.60	150	150	1998	0.004	13,32
0.75	150	150	873	0.005	5,82

ΔΟΚΙΜΙΟ D(ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΝΩΝ 1.67%Κ.Ο)

Παραμόρφωση	Μήκος δοκιμίου	Επιφάνεια φόρτισης	Αντίδραση Rғ (N)	Τροπή ε(ΔΙ/Ι)	Τάση σ(MPa)
ΔI(mm)	L(mm)	A(mm²)			
0.03	150	150	1026.65	0.0002	6,84
0.045	150	150	1540.23	0.0003	10,27
0.06	150	150	2053.99	0.0004	13,69
0.075	150	150	2543.88	0.0005	16,96
0.1125	150	150	3523.96	0.00075	23,49
0.15	150	150	4285.23	0.001	28,57
0.225	150	150	4744.18	0.0015	31,62
0.3	150	150	4754.28	0.002	31,70
0.375	150	150	3775.31	0.0025	25,17
0.45	150	150	2708.87	0.003	18,06
0.60	150	150	1738.21	0.004	11,59
0.75	150	150	711.477	0.005	4,74

Μονοαξονικός εφελκυσμός

ΔΟΚΙΜΙΟ Α(ΑΟΠΛΟ)

Παραμόρφωση Δl(mm)	Μήκος δοκιμίου L (mm)	Επιφάνεια φόρτισης Α (mm ²)	Αντίδραση RF (N)	Τροπή ε (ΔΙ/L) (x 10 ⁻⁴)	Τάση σ (MPa)
0	150	150	0	0	0
0.00375	150	150	125.78	0.25	0.84
0.0075	150	150	251.56	0.50	1.68
0.009	150	150	301.86	0.60	2.01
0.0105	150	150	352.17	0.70	2.35
0.012	150	150	388.09	0.80	2.59
0.0135	150	150	335.25	0.90	2.24
0.015	150	150	303.79	1.00	2.025
0.01575	150	150	171.38	1.05	1.14
0.0165	150	150	126.45	1.10	0.84
0.018	150	150	85.26	1.20	0.57
0.01875	150	150	68.86	1.25	0.46

ΔΟΚΙΜΙΟ Β(ΙΝΕΣ ΜΕ ΠΟΣΟΣΤΟ 0,53%)

Παραμόρφωση Δl(mm)	Μήκος δοκιμίου L(mm)	Επιφάνεια φόρτισης Α(mm ²)	Αντίδραση RF (N)	Τροπή ε (ΔΙ/L) (x 10 ⁻⁴)	τάση σ (MPa)
0	150	150	0	0	0
0.00375	150	150	126.58	0.25	0.84
0.0075	150	150	253.16	0.50	1.69
0.009	150	150	303.79	0.60	2.025
0.0105	150	150	354.41	0.70	2.36
0.012	150	150	405.05	0.80	2.70
0.0135	150	150	373.89	0.90	2.49
0.015	150	150	331.49	1.00	2.21
0.01575	150	150	303	1.05	2.02
0.0165	150	150	267.1	1.1	1.78
0.018	150	150	189.07	1.2	1.26
0.01875	150	150	124.52	1.25	0.83

ΔΟΚΙΜΙΟ C(ΙΝΕΣ ΜΕ ΠΟΣΟΣΤΟ 0,93%Κ.Ο)

Παραμόρφωση ΔΙ (mm)	Μήκος δοκιμίου L(mm)	Επιφάνεια φόρτισης Α (mm ²)	Αντίδραση RF (N)	Τροπή ε (ΔΙ/L) (x 10 ⁻⁴)	Τάση σ (MPa)
0	150	150	0	0	0
0.00375	150	150	128.28	0.25	0.86
0.0075	150	150	261.4	0.50	1.74
0.009	150	150	307.86	0.60	2.05
0.0105	150	150	359.16	0.70	2.39
0.012	150	150	410.46	0.80	2.74
0.0135	150	150	461.76	0.90	3.08
0.015	150	150	411.60	1.00	2.74
0.01575	150	150	381.44	1.05	2.54
0.0165	150	150	367.84	1.10	2.45
0.018	150	150	327.133	1.20	2.18
0.01875	150	150	245.19	1.25	1.63

ΔΟΚΙΜΙΟ D(ΙΝΕΣ ΜΕ ΠΟΣΟΣΤΟ 1,67%Κ.Ο)

Παραμόρφωση ΔΙ	Μήκος δοκιμίου L	Επιφάνεια φόρτισης Α	Αντίδραση Rϝ (N)	Τροπή ε(ΔΙ/L) (x 10 ⁻⁴)	Τάση σ
(mm)	(mm)	(mm²)			(MPa)
0	150	150	0	0	0
0.00375	150	150	129.75	0.25	0.865
0.0075	150	150	262.5	0.50	1.75
0.009	150	150	310.50	0.60	2.07
0.0105	150	150	363	0.70	2.42
0.012	150	150	415.50	0.80	2.77
0.0135	150	150	466.50	0.90	3.11
0.015	150	150	480	1.00	3.20
0.01575	150	150	448.50	1.05	2.99
0.0165	150	150	388.50	1.10	2.59
0.018	150	150	336	1.20	2.24
0.01875	150	150	318	1.25	2.12

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ



Πίνακας 3 : Συγκριτικό διάγραμμα τάσης-τροπής υπο μονοαξονική θλιπτική <u>παραμόρφωση</u>



Πίνακας 4 : Συγκριτικό διάγραμμα τάσης-τροπής υπο μονοαξονική εφελκυστική παραμόρφωση


Πίνακας 5 : Συγκριτικό διάγραμμα θλιπτικής αντοχής δοκιμίων



Πίνακας 6 : Συγκριτικό διάγραμμα εφελκυστικής αντοχής δοκιμίων



Πίνακας 7 : Συγκριτικό διάγραμμα ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας της τσιμεντόπαστας υπο μονοαξονική θλίψη



Πίνακας 8:Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστή βλάβης D της τσιμεντόπαστας υπο μονοαξονική θλίψη



Πίνακας 9:Συγκριτικό διάγραμμα ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας της τσιμεντόπαστας υπο μονοαξονικό εφελκυσμό



Πίνακας 10: Συγκριτικό διάγραμμα συντελεστή βλάβης D της τσιμεντόπαστας υπο μονοαξονικό εφελκυσμό

Όπως φαίνεται από τα άνω συγκριτικά διαγράμματα, η προσθήκη ινών χάλυβα στο σκυρόδεμα είχε ως αποτέλεσμα την αισθητή αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του και στην μικρή αύξηση της θλιπτικής αντοχής.

Εξάλλου,όσον αφορά τον μονοαξονικό εφελκυσμό,οι ίνες χάλυβα επέφεραν την αύξηση της παραμόρφωσης κατά την οποία επέρχεται η αστοχία του δοκιμίου και μικρή βελτίωση της πλαστιμότητας(κυρίως στο δοκίμιο D με το υψηλότερο ποσοστό ινών).

Όσον αφορά την μονοαξονική θλιπτική παραμόρφωση,ο συντελεστής βλάβης Dc και το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας της τσιμεντόπαστας δεν επηρεάστηκε αισθητά(Πίνακες 7,8). Όσον αφορά την μονοαξονική εφελκυστική παραμόρφωση, η προσθήκη των ινών χάλυβα στο σκυρόδεμα επέφεραν περιορισμό στην ταχεία εξέλιξη της βλάβης του σκυροδέματος.Υπήρξε μείωση του συντελεστή βλάβης D,όπως και του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας της τσιμεντόπαστας.(Πίνακες 9,10).

Σύγκριση αποτελεσμάτων παρούσας μελέτης με αντίστοιχες

Στα κάτωθι διαγράμματα γίνεται η παραβολή του διαγράμματος σ-ε του άοπλου δοκιμίου Α(χωρίς ίνες) της παρούσας εργασίας με αντίστοιχο δοκίμιο της μελέτης των Wriggers και Moftah¹ και τα πειραματικά αποτελέσματα του Cordes¹⁰.Στην παρούσα μελέτη τα μηχανικά χαρακτηριστικά και οι παράμετροι βλαβης των συστατικών του σκυροδέματος που τέθηκαν είναι κοινοί με τις αντίστοιχες της μελετης των Wriggers και Moftah.

Η σύγκριση της παρούσας εργασίας με την πειραματική διαδικασία του Cordes¹⁰ έδειξε τα εξής αποτελέσματα:

-Η θλιπτική αντοχή του δοκιμίου Α(χωρίς ίνες) της παρούσας εργασίας έχει μια μικρή απόκλιση(μικρότερη κατά 5,2%) από την τιμή της πειραματικής διαδικασίας.

-η παραμόρφωση θραύσης του άοπλου δοκιμίου της παρούσας εργασίας εθρ =0,2%) είναι Κατά 10-15%(σε σχέση με την αντίστοιχη της πειραματικής εργασίας

-η εξέλιξη της βλάβης του σκυροδέματος και η πτώση της τάσης έχει πιο ταχεία εξέλιξη στην παρούσα εργασία

Ο λόγος της πειραματικής τιμής της θλιπτικής αντοχής με την θεωρητική, είναι:

<u>Vu(exp)</u>= <u>31,20</u>=1,0547

Vu(th) 29,58

Το διάγραμμα τάσης-τροπής(σ-ε)των Wriggers-Moftah¹ προσεγγίζει καλύτερα την πειραματική διαδικασία τόσο στην θλιπτική αντοχή όσο και στην εξέλιξη της βλάβης.

Αυτό οφείλεται πιθανώς στην διαφορετική αναλογία αδρανών στο δοκίμιο και στο μέγεθος του μέγιστου κόκκου(40%κ.ο και 19mm ο μέγιστος κόκκος για την μελέτη Wriggers-Moftah).Επίσης σημαντικό παράγοντας διαφοροποίησης μεταξύ των δύο μελετών είναι ο τύπος μοντελοποίησης του δοκιμίου,αφού στη μελέτη των Wriggers και Moftah εφαρμόστηκε τρισδιάσταση μοντελοποίηση.



Σχ.5 Διάγραμμα σ-ε υπο μονοαξονική θλίψη(μελέτη P.Wriggers- S.Moftah,2006)





Ο λόγος της πειραματικής τιμής της θλιπτικής αντοχής με την θεωρητική, είναι:

 $\frac{Vu(exp)}{Vu(th)} = \frac{31,20}{29,58} = 1,0547$

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκριτικοί πίνακες όπου παρουσιάζεται η επιρροή των ινών χάλυβα της παρούσας εργασίας σε σύγκριση με άλλες εργασίες.

Παρούσα εργασία						
Ποσοστό ινών χάλυβα vf(%)	0	0,53	0,93	1,67		
Λόγος l/d	-	37,50	30	30		
Θλιπτική αντοχή fc	29,58	30,08	31,70	33,62		
Εφελκυστική αντοχή(μονοαξονική)	2,59	2,70	3,08	3,20		
Ποσοστό μεταβολής θλιπτικής αντοχής(%)	-	1,69	7,17	13,66		
Ποσοστό μεταβολής εφελκυστικήςαντοχής(%)	-	4,25	18,92	23,55		

Πίνακας 9: Παρούσα εργασία

1

M.Orgass,Y.Klug ¹¹				
Ποσοστό ινών χάλυβα vf(%)	0	1	2	
Λόγος Ι/d	-	81,25	81,25	
Θλιπτική αντοχή fc	144	155	160	
αντοχή σε εφελκυσμό από διάρρηξη ftk	8,3	11,4	12,1	
Ποσοστό μεταβολής θλιπτικής αντοχής(%)	-	5,17	11,11	
Ποσοστό μεταβολής εφελκυστικής αντοχής(%)	-	37,35	45,78	

Πίνακας 10: M.Orgass, Y.Klug

Ε.Τέζιας,Μ.Πετρόπουλος ⁶						
Ποσοστό ινών χάλυβα vf(%)	0	0,9	0,9	0,9		
Λόγος l/d	-	40	60	40-60 (50%-50%)		
Θλιπτική αντοχή fc	16,96	18,87	18,66	18,17		
αντοχή σε εφελκυσμό από διάρρηξη ftk	2,28	2,56	3,13	2,62		
Ποσοστό μεταβολής θλιπτικής αντοχής(%)	-	11,26	10,02	7,13		
Ποσοστό μεταβολής εφελκυστικής αντοχής(%)	-	12,28	37,28	14,91		

Πίνακας 11: Συγκριτικός πίνακας Ε.Τέζιας, Μ.Πετρόπουλος

<u>ΕΙΚΟΝΕΣ</u>

• <u>Εικόνες δοκιμίου Α</u>



Εικόνα 1:Δοκίμιο Α(χωρίς ίνες)



Εικόνα 2:Δοκίμιο Α(χωρίς ίνες)-ανάλυση σε 6602 πεπερασμένα στοιχεία



Εικόνα 3:Δοκίμιο Α(χωρίς ίνες) υπο μονοαξονική εφελκυστική παραμόρφωση



Εικόνα 4:Δοκίμιο Α(χωρίς ίνες) υπο μονοαξονική εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%).Μεγαλύτερη παραμόρφωση του δοκιμίου εμφανίζεται στην τσιμεντόπαστα-μικρές παραμορφώσεις των αδρανών υλικών



Εικόνα 5: λεπτομέρεια δοκιμίου Α(χωρίς ίνες) υπο μονοαξονική εφελκυστική παραμόρφωση (ε=0,01%)-η μέγιστη παραμόρφωση του δοκιμίου εμφανίζεται στην τσιμεντόπαστα

Eemax(pr)=0.04932%



Εικόνα 6:Δοκίμιο Α(χωρίς ίνες) υπο μονοαξονική εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%). Μεγαλύτερες τάσεις παραλαμβάνονται από τα αδρανή υλικά, μικρές τιμές τάσεων παρατηρούνται στην τσιμεντόπαστα



Εικόνα 7: λεπτομέρεια Δοκιμίου Α(χωρίς ίνες) υπο μονοαξονική εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%) -η μέγιστη τάση Mises εμφανίζεται στη μάζα των αδρανών υλικών

SMises(max)=5,30MPa



Εικόνα 8:Δοκίμιο Α(χωρίς ίνες) υπο μονοαξονική θλιπτική παραμόρφωση(ε=0,4%)



Εικόνα 9:Δοκίμιο Α(χωρίς ίνες)υπο μονοαξονική θλιπτική παραμόρφωση-Ανάλυση σε 6602 πεπερασμένα στοιχεία(FEM)



Εικόνα 10:Δοκίμιο Α(χωρίς ίνες)-εικόνα τάσεων στο εσωτερικό του δοκιμίου υπο μονοαξονική θλιπτική παραμόρφωση(ε=0,4%).Μεγαλυτερες τιμές τάσεων παραλαμβάνονται από τα αδρανή υλικά-μικρότερες τάσεις στην τσιμεντόπαστα



Εικόνα 11: λεπτομέρεια Δοκιμίου Α(χωρίς ίνες) υπο μονοαξονική θλιπτική παραμόρφωση(ε=0,4%) Η μέγιστη τιμή της τάσης Mises εμφανίζεται στα αδρανή υλικά SMises(max)=40,51 MPa



Εικόνα 12:Δοκίμιο Α(χωρίς ίνες) υπο θλιπτική παραμόρφωση-ελαστικές

παραμορφώσεις.

 Μικρές παραμορφώσεις στα αδρανή υλικά-μεγάλες παραμορφώσεις στην τσιμεντόπαστα



Εικόνα 13: λεπτομέρεια δοκιμίου Α(χωρίς ίνες) υπο θλιπτική παραμόρφωση–μέγιστη η ελαστική παραμόρφωση στην τσιμεντόπαστα εe(min)=-0.0392

Εικόνες δοκιμίου Β



Εικόνα 14:Δοκίμιο Β(με ποσοστό ινών 0,53%κ.ο)



Εικόνα 15:Δοκίμιο Β(ίνες με χαμηλό ποσοστό 0,53%) υπο μονοαξονική θλιπτική παραμόρφωση(ε=0,4%)



Εικόνα 16:Δοκίμιο Β(ίνες με χαμηλό ποσοστό 0,53%) υπο μονοαξονική θλιπτική παραμόρφωση(ε=0,4%)

-παραμορφώσεις στο εσωτερικό

-μικρές παραμορφώσεις στα αδρανή υλικά και στις ίνες

-μεγαλύτερες παραμορφώσεις στην τσιμεντόπαστα



Εικόνα 17: λεπτομέρεια Δοκιμίου Β(ίνες με χαμηλό ποσοστό 0,53%) υπο θλιπτική παραμόρφωση(ε=0,4%)

Εθλιπτ.max(pr)=3,845%



Εικόνα 18:Δοκίμιο Β(ίνες με χαμηλό ποσοστό 0,53%)υπο θλιπτική

παραμόρφωση(ε=0,4%)- μικρές τάσεις στα αδρανή και την τσιμεντόπαστα-μεγαλύτερες τάσεις παραλαμβάνονται από τις ίνες



Εικόνα 19: λεπτομέρεια δοκιμίου Β(ίνες με χαμηλό ποσοστό 0,53%)υπο

μονοαξονική θλιπτική

παραμόρφωση(ε=0,4%)- η μέγιστη τάση Mises εμφανίζεται στις ίνες

<u>SMises(max) = 378,20MPa</u>



Εικόνα 20:Δοκίμιο Β(ποσοστό ινών 0,53%κ.ο)-δοκίμιο υπο μονοαξονική εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%)



Εικόνα 21:Δοκίμιο Β(ίνες με χαμηλό ποσοστό 0,53%) υπο μονοαξονική εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%) -παραμορφωμένο σχήμα



Εικόνα 22:Δοκίμιο Β(ίνες με χαμηλό ποσοστό 0,53%)υπο εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%)

-μεγαλύτερες παραμορφώσεις στη μάζα της τσιμεντόπαστας -μικρές παραμορφώσεις στους κόκκους των αδρανών

-μικρές παραμορφώσεις των ινών χάλυβα



Εικόνα 23: λεπτομέρεια δοκιμίου Β(ίνες με χαμηλό ποσοστό 0,53%) υπο εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%).

-Η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στη μάζα της τσιμεντόπαστας



Εικόνα 24: Δοκίμιο Β(ίνες με ποσοστό ινών 0,53%κ.ο) υπο μονοαξονική εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%)-εικόνα τάσεων -μεγάλες τάσεις παραλαμβάνονται από τις ίνες χάλυβα -μικρές τάσεις στα αδρανή υλικά -ελάχιστες τάσεις στην τσιμεντόπαστα



Εικόνα 25: λεπτομέρεια δοκιμίου Β υπο μονοαξονική εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%).

• Η μέγιστη τιμή τάσης Mises είναι στις ίνες χάλυβα

SMises(max)=22,12MPa

• <u>Εικόνες δοκιμίου C</u>



<u>Εικόνα 26:</u>Δοκίμιο C(με ποσοστό ινών 0,93% κ.ο)



Εικόνα 27:Δοκίμιο C(με ποσοστό ινών 0,93%κ.ο)-ανάλυση σε 6654 πεπερασμένα στοιχεία



Εικόνα 28:Δοκίμιο C(με ποσοστό ινών 0,93%κ.ο) υπο μονοαξονική θλιπτική παραμόρφωση(ε=0,4%)-παραμορφωμένο σχήμα



Εικόνα 29:Δοκίμιο C(με ποσοστό ινών 0,93%κ.ο) υπο μονοαξονική θλιπτική παραμόρφωση(ε=0,4%)

-μεγαλύτερη παραμόρφωση στην τσιμεντόπαστα

-μικρή παραμόρφωση στα αδρανή υλικά

-ελάχιστες παραμορφώσεις στις ίνες χάλυβα



Εικόνα 30: λεπτομέρεια δοκιμίου C με ποσοστό ινών 0,93%κ.ο)υπο μονοαξονική θλιπτική παραμόρφωση(ε=0,4%) -η μέγιστη θλιπτική κύρια τροπή εμφανίζεται στη τσιμεντόπαστα Εmaxθλ pr=3,53%



Εικόνα 31:Δοκίμιο C(ίνες με υψηλό ποσοστό 0,93%) υπο μονοαξονική θλιπτική παραμόρφωση(ε=0,4%).

- Μεγάλες τάσεις παραλαμβάνονται από τις ίνες χάλυβα
- μικρές τάσεις στα αδρανή υλικά και την τσιμεντόπαστα

	þ.
γ 018.09C 001.49C 001.49C 0010016.001.002.0027200.07091-2010308	
Social Social Back Hine + 1.001 Montrol J. Beet Hine + 1.001 Deformed Veri U. Cereinwachi Sciale Roccor, +2.300e+01	

Εικόνα 32: λεπτομέρεια δοκιμίου C(με ποσοστό ινών 0,93%κ.ο) υπο μονοαξονική θλιπτική παραμόρφωση(ε=0,4%)

-η μέγιστη τάση(Mises) παραλαμβάνεται από τις ίνες χάλυβα

SMises(max)=345,20MPa



Εικόνα 33:Δοκίμιο C(με ποσοστό ινών 0,93%κ.ο)υπο εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%)-παραμορφωμένο σχήμα



Εικόνα 34:Δοκίμιο **C**(με ποσοστό ινών 0,93%κ.ο) υπο εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%)

-μεγαλύτερες παραμορφώσεις στη μάζα της τσιμεντόπαστας-μικρές παραμορφώσεις στους κόκκους των αδρανών

- μικρές παραμορφώσεις στις ίνες χάλυβα



Εικόνα 35: λεπτομέρεια δοκιμίου C υπο εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%).

Η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στην τσιμεντόπαστα
<u>Εmax(εφελκ) pr=0,03162%</u>



Εικόνα 36: Δοκίμιο C υπο εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%)

-Μεγάλες τάσεις παραλαμβάνονται από τις ίνες χάλυβα

- -μικρές τάσεις στους κόκκους των αδρανών
- ελάχιστη τιμή τάσεων στην τσιμεντόπαστα



Εικόνα 37: λεπτομέρεια δοκιμίου C υπο εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%).Η μέγιστη τάση Mises εμφανίζεται στις ίνες

SMises (max)=19,49MPa

• <u>Εικόνες δοκιμίου D</u>



Εικόνα 38: δοκίμιο D(με ποσοστό ινών 1,67%κ.ο)



Εικόνα 39: δοκίμιο D(με ποσοστό ινών 1,67%κ.ο) Ανάλυση σε 5485 πεπερασμένα στοιχεία(FEM)



Εικόνα 40: δοκίμιο D(με ποσοστό ινών 1,67%κ.ο)υπο μονοαξονική θλίψη(ε=0,4%). Παραμορφωμένο σχήμα



Εικόνα 41: δοκίμιο D(με ποσοστό ινών 1,67%κ.ο)υπο μονοαξονική θλίψη

(ε=0,4%)-εικόνα τάσεων Mises.

-Μεγάλες τάσεις παραλαμβάνονται από τις ίνες χάλυβα

-μικρές τάσεις στους κόκκους των αδρανών

- ελάχιστη(min) τιμή τάσεων στην τσιμεντόπαστα



Εικόνα 42: λεπτομέρεια δοκιμίου D(με ποσοστό ινών 1,67%κ.ο)υπο μονοαξονική θλίψη.Μέγιστη τάση στις ίνες χάλυβα SMises (max)=379MPa


Εικόνα 43:δοκίμιο D υπο θλιπτική παραμόρφωση(ε=0,4%) -μεγαλύτερες παραμορφώσεις στη μάζα της τσιμεντόπαστας -μικρές παραμορφώσεις στους κόκκους των αδρανών - μικρές παραμορφώσεις στις ίνες χάλυβα



Εικόνα 44: λεπτομέρεια δοκιμίου D υπο θλιπτική παραμόρφωση (ε=0,01%) - μέγιστη παραμόρφωση στη τσιμεντόπαστα

<u>εmax(θλιπτ) pr=0,0159</u>



Εικόνα 45:δοκίμιο D υπο εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%)



Εικόνα 46:δοκίμιο D υπο εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%). Παραμορφωμένο σχήμα



Εικόνα 47:δοκίμιο D υπο εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%)

-εικόνα τάσεων

- μεγαλύτερες τάσεις παραλαμβάνονται από τις ίνες χάλυβα στη μάζα τηςτσιμεντόπαστας
- μικρές τάσεις στους κόκκους των αδρανών
- ελάχιστες τάσεις στην τσιμεντόπαστα



Εικόνα 48: λεπτομέρεια δοκιμίου D υπο εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%) Μέγιστη τιμή τάσεων Mises στις ίνες χάλυβα <u>SMises (max)=19,27MPa</u>



Εικόνα 49:δοκίμιο D (με ποσοστό ινών 1,67% κ.ο)υπο εφελκυστική παραμόρφωση (ε=0,01%)

-μεγαλύτερες παραμορφώσεις στη μάζα της τσιμεντόπαστας

-μικρές παραμορφώσεις στους κόκκους των αδρανών

- ελάχιστες παραμορφώσεις στις ίνες χάλυβα



Εικόνα 50: λεπτομέρεια δοκιμίου D(με ποσοστό ινών 1,67%κ.ο) υπο εφελκυστική παραμόρφωση(ε=0,01%) -μέγιστη παραμόρφωση στη μάζα της τσιμεντόπαστας

<u> εmax(εφελκ) pr=0,03105%</u>

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την κύρια διαδικασία προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

A)Η προσθήκη των ινών χάλυβα στο δοκίμιο επέφεραν μικρή αύξηση της θλιπτικής

αντοχής του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα:

-αύξηση 1,69% στο δοκίμιο Β(με ποσοστό ινών 0,53%κ.ο)

-αύξηση 7,17% στο δοκίμιο Γ(με ποσοστό ινών 0,93% κ.ο)

-αύξηση 13,66% στο δοκίμιο Δ(με ποσοστό ινών 1,67% κ.ο)

B)Η προσθήκη των ινών χάλυβα στο δοκίμιο επέφεραν μεγάλη αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα:

-αύξηση 4,25% στο δοκίμιο Β(με ποσοστό ινών 0,53% κ.ο)

-αύξηση 18,92% στο δοκίμιο Γ(με ποσοστό ινών 0,93% κ.ο)

-αύξηση 23,55% στο δοκίμιο Δ(με ποσοστό ινών 1,67% κ.ο)

Γ)Η προσθήκη των ινών χάλυβα στο δοκίμιο περιόρισαν την ταχεία εξέλιξη της βλάβης του σκυροδέματος.Υπήρξε μείωση του συντελεστή βλάβης της τσιμεντόπαστας D μετά την παραμόρφωση θραύσης,όπως και του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας της τσιμεντόπαστας.

Για την μονοαξονική θλίψη η μείωση του συντελεστή βλάβης της τσιμεντόπαστας D είναι:

- μείωση της τάξης 0,2-5,5% στο δοκίμιο Β(με ποσοστό ινών 0,53% κ.ο)

- μείωση της τάξης 0,2-8,8% στο δοκίμιο C(με ποσοστό ινών 0,93% κ.ο)

- μείωση της τάξης 0,45-14,5% στο δοκίμιο D(με ποσοστό ινών 1,67% κ.ο)

Για τον <u>μονοαξονικό εφελκυσμό</u> η η μείωση του συντελεστή βλάβης της τσιμεντόπαστας D είναι:

- μείωση της τάξης 6-27,5% στο δοκίμιο Β(με ποσοστό ινών 0,53% κ.ο)

- μείωση της τάξης 21-52% στο δοκίμιο C(με ποσοστό ινών 0,93% κ.ο)

- μείωση της τάξης 30,6-77% στο δοκίμιο D(με ποσοστό ινών 1,67% κ.ο)

Δ)Η προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα επέφερε αύξηση στην <u>παραμόρφωση θραύσης</u> του.Συγκεκριμένα, για τον μονοαξονικό εφελκυσμό ισχύει:

-αύξηση κατα 2,50% στο δοκίμιο Β(με ποσοστό ινών 0,53% κ.ο)

-αύξηση κατα 12,50% στο δοκίμιο C(με ποσοστό ινών 0,93% κ.ο)

-αύξηση κατα 25% στο δοκίμιο D(με ποσοστό ινών 1,67% κ.ο)

Ε)Η προσθήκη ινών χάλυβα στο σκυρόδεμα οδήγησε σε μικρή <u>βελτίωση της πλαστιμότητας</u> <u>για μονοαξονικό εφελκυσμό</u>.

Η βελτίωση της πλαστιμότητας παρουσιάζεται στο δοκίμιο D(με ποσοστό ινών 1,67% κ.ο), ενώ είναι ανεπαίσθητη για τα δοκίμια με μικρότερα ποσοστά ινών.

ΣΤ) Το διάγραμμα τάσης-τροπής(σ-ε) για μονοαξονική θλίψη του άοπλου δοκιμίου Α της παρούσας εργασίας παρουσίασε μικρή απόκλιση σε σχέση με το διάγραμμα του δοκιμίου της πειραματικής διαδικασίας

Η θλιπτική αντοχή του άοπλου δοκιμίου Α είναι μικρότερη κατα 5,2% και η παραμόρφωση θραύσης είναι μικρότερη κατά 10-15% σε σχέση με την πειραματική διαδικασία(H.Cordes) .Αντιθέτως η εξέλιξη της βλάβης φαίνεται να είναι πιο ταχεία σε σχέση με την πειραματική διαδικασία και η απόκλιση των τιμών της τάσης είναι σχετικά μεγάλη για παραμορφώσεις άνω του ορίου θραύσης.

Αυτό οφείλεται πιθανώς στην διαφορετική αναλογία αδρανών στο δοκίμιο και στο μέγεθος του μέγιστου κόκκου(περίπου 70%κ.ο και 31,5mmστην παρούσα εργασία).Επίσης σημαντικό παράγοντας απόκλισης μεταξύ των δύο μελετών είναι ο τύπος μοντελοποίησης του δοκιμίου,αφού η δισδιάσταση(2D) ανάλυση των δοκιμίων που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία πιθανώς υπολείπεται σε ακρίβεια της τρισδιάστατης ανάλυσης

ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

(1)P.Wriggers,S.O Moftah

Mesoscale models for concrete:Homogenisation and damage behaviour

Institute for Mechanics and Computational Mechanics, University of Hannover, Germany

Finite Elements in Analysis and Design 42(2006) 623-636,www.sciencedirect.com

(2)Victor C.Li

Large Volume, High-Performance Applications of Fibers in Civil Engineering

University of Michigan, Nov. 2000

(3) Dean Frank, P.E., Focus on Fibers, MC MAGAZINE ARCHIVE

www.precast.org/publications/mc/TechArticles/01_Summer_FocusFibers.htm

(4)J. Mazars

Application of the damage mechanics to the nonlinear behavior and the fracture of structural

the Doctorate concrete of state of the University Paris VI (1984)

(5)J. Mazars, F. Hamon.

A new strategy to formulate has 3D ramming model for concrete under monotonic, cyclic and severe loadings.

Engineering Structures, 2012, under review

(6)Ε.Τέζιας,Μ Πετρόπουλος

Διπλωματική εργασία: Επιρροή των ινών χάλυβα στα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος και στη διατμητική αντοχή των δοκών

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,2006

(7)Gilles Pijaudier

An elastic plastic damage formulation for concrete:application to elementary and structural test

Ecole Centrale de Nantes-Universite de Nantes-CNRS 1,rue de la Noe-BP 92101-F44300 Nantes

(8) D.N. Savvas, V. Papadopoulos, M. Papadrakakis

The effect of interfacial shear strength on damping behavior of carbon nanotube reinforced composites

Institute of Structural Analysis and Antiseismic Research, National Technical University of Athens, 9 Iron Polytechneiou, Zografou Campus, Athens

(9)K.H Tan,K.Murugappan,P.Paramasivam

Shear behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams

ACI JOURNAL, V.89, No6, November-December 1992

(10)H.Cordes

Uber die Spannungs-Dehnungs-Linie von Beton bei kurzzeitiger Lasteinwirkung

PhD thesis, Technische Universitat Hannover, 1968

(11)M.Orgass,Y.Klug

Steel Fibre Reinforced Ultra-High Strength Concretes

Institute for Structural Concrete and Building Materials, University of Leipzig, MFPA Leipzig GmbH, Lacer No. 9. pp. 12-20 ,2004