

Επεμβάσεις σε ιστορικές τοιχοποιίες: Διερεύνηση του μηχανισμού συνάφειας μεταξύ λίθων ή πλίνθων και ενεμάτων

Χ.-Ε. Αδάμη

Πολιτικός Μηχανικός-Υπ. Διδάκτορας. Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ.

Ε. Βιντζηλαίου

Αναπληρώτρια καθηγήτρια. Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ.

Ε.-Ε. Τουμπακάρη

Πολιτικός Μηχανικός. Υπηρεσία Συντήρησης Μνημείων Ακρόπολης, Υπουργείο Πολιτισμού.

Λέξεις κλειδιά: ενέματα, τριμερείς συνθέσεις, υπόβαθρα, διεπιφάνεια, άμεσος εφελκυσμός, διάτμηση, αντοχή συναφείας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία μελετάται ο μηχανισμός συνάφειας μεταξύ υλικών επεμβάσεων (ενέματα) και υλικών που απαντώνται σε ιστορικές τοιχοποιίες (λιθοσώματα και πλίνθοι). Ειδικότερα, εξετάζεται η μεταβολή με τον χρόνο των μηχανικών χαρακτηριστικών της διεπιφάνειας τριών τύπων ενεμάτων (υδρασβέστου-ποζολάνης-τσιμέντου) με τρεις τύπους υποβάθρων, όταν αυτή υποβάλλεται σε άμεσο εφελκυσμό. Παρουσιάζεται επίσης μέρος του προγράμματος πειραμάτων διάτμησης, το οποίο βρίσκεται εν εξελίξει. Τα κύρια συμπεράσματα αυτής της έρευνας είναι ότι με τις τριμερείς συνθέσεις ενεμάτων είναι δυνατή η επίτευξη αντοχών συναφείας σε εφελκυσμό που είναι συγκρίσιμες με εκείνες τις οποίες αναπτύσσουν τα τσιμεντενέματα, όπως επίσης ότι η τιμή της εφελκυστικής αντοχής της διεπιφάνειας ελέγχεται κυρίως από τα χαρακτηριστικά των υποβάθρων. Με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης επιβεβαιώνεται η επιτελεσματικότητα των τριμερών συνθέσεων με περιεκτικότητα τσιμέντου ίση με 30% για την επισκευή και ενίσχυση ιστορικών τοιχοποιιών.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σχεδιασμός ενεμάτων για την επισκευή και ενίσχυση ιστορικών τοιχοποιιών

Ένα από τα κύρια θέματα έρευνας στο πεδίο της διατήρησης της δομημένης πολιτιστικής κληρονομιάς είναι η χρήση υλικών επισκευής, τα οποία θα πρέπει να βελτιώνουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων και ταυτοχρόνως να είναι συμβατά από φυσικο-χημικής απόψεως με τα υπάρχοντα υλικά. Σε προηγούμενες εργασίες αποδείχθηκε ότι η χρήση υλικών επισκευής με μεγάλη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, δεν είναι αναγκαία για το επίπεδο και για το είδος των αντοχών (θλιπτική ή εφελκυστική) που απαιτείται από μια κατασκευή από τοιχοποιία (Vintzileou 2001, Toumbakari 2002). Ειδικώς για την περίπτωση των ενεμάτων, η παράλληλη μελέτη της μικροδομής σε συνδυασμό με τη μελέτη των μηχανικών χαρακτηριστικών (Toumbakari et al. 1999), επέτρεψε τον σχεδιασμό τριμερών συνθέσεων υδρασβέστου-ποζολάνης-τσιμέντου με μια χαμηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο Portland ίση με 30%. Εξ άλλου, η χρήση υδρασβέστου και ποζολανών σε διάφορες αναλογίες, εξασφαλίζει τα κριτήρια συμβατότητας που θέτουν οι διεθνείς συστάσεις και επιπλέον επιτρέπει την ανάπτυξη μεγάλης ποικιλίας μηχανικών αντοχών, που είναι επαρκείς για ένα πλήθος ιστορικών τοιχοποιιών. Η επιτελεσματικότητα αυτών των τριμερών συνθέσεων αποδείχθηκε μέσω της πειραματικής διερεύνησης της επίδρασής τους σε τρίστρωτες τοιχοποιίες (Toumbakari 2000, 2002, Toumbakari et al 2004). Ως προς την θλιπτική και την εφελκυστική τους αντοχή, τρίστρωτοι τοίχοι που ενισχύθηκαν με τριμερή ενέματα εμφάνισαν παραπλήσια συμπεριφορά με τοίχους που ενισχύθηκαν με τσιμεντενέματα (περιεκτικότητα σε

τσιμέντο 80% κ.β.). Η επίδραση του κάθε τύπου του ενέματος έγινε ιδιαίτερος εμφανής στις τιμές του μέτρου ελαστικότητας και της εγκάρσιας οριζόντιας (εκτός επιπέδου) παραμόρφωσης των επισκευασμένων με ενέματα τοίχων. Αποδείχθηκε δε, ότι ο κύριος παράγοντας που ελέγχει την συμπεριφορά της τοιχοποιίας μετά την επέμβαση είναι η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας ενέματος/υπαρχόντων υλικών. Υψηλότερες τιμές της αντοχής οδηγούν σε ουσιώδη αναβολή της αποκόλλησης των εξωτερικών από την εσωτερικής στρώση (για υψηλότερες τιμές του εφαρμοζόμενου φορτίου). Επομένως, η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης μιας τοιχοποιίας με ενέματα ελέγχεται κυρίως από την «συγκολλητική» ικανότητα των ενεμάτων) και όχι από την θλιπτική τους αντοχή. Η σπουδαιότητα του μηχανισμού συνάφειας και οι περιορισμένες σε πλήθος μελέτες που σχετίζονται με αυτό το θέμα στο πεδίο των ιστορικών τοιχοποιιών, επιβάλλει μια συστηματική μελέτη η οποία θα επικεντρώνεται στις συγκολλητικές ιδιότητες των τριμερών συνθέσεων και στην συμπεριφορά των διεπιφανειών μεταξύ υπαρχόντων υλικών και ενεμάτων (Αδάμη 2006).

1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την συνάφεια

Η συνάφεια μεταξύ διεπιφανειών οφείλεται σε δυο μηχανισμούς: 1) στην χημική συνάφεια (οφείλεται στην ανάπτυξη μοριακών δυνάμεων τύπου Van der Waals, μεταξύ των υλικών της διεπιφάνειας) και-κυρίως- 2) στην μηχανική συνάφεια που οφείλεται στην αλληλεμπλοκή των προϊόντων ενυδάτωσης στην διεπιφάνεια και των πόρων των υποστρώματος.

Η χημική συνάφεια οφείλεται στις χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται μεταξύ των υλικών των κονιαμάτων ή των σκυροδεμάτων και των υποβάθρων. Οι πρώτες μελέτες που διαπιστώνουν διαφορές στην χημική σύσταση μεταξύ της μεταβατικής ζώνης αδρανών-τσιμεντοπολτού και του καθαρού τσιμεντοπολτού πραγματοποιήθηκαν από τον Farran (1956). Αργότερα, οι Lyubimova & Pinus (1962) επιβεβαίωσαν αυτές τις διαφορές, μετρώντας την μικροσκληρότητα διεπιφανειών τσιμεντοπολτού-αδρανών. Έκτοτε, αυτή η ζώνη, ονομαζόμενη διεπιφανειακή ζώνη (ITZ), μελετήθηκε διεξοδικά από πολλούς ερευνητές. Στους παράγοντες που επηρεάζουν την χημική συνάφεια συγκαταλέγονται η ορυκτολογική σύσταση του υποβάθρου, τα χαρακτηριστικά της διεπιφανειακής ζώνης (πορώδες, παρουσία κρυστάλλων πορτλαντίτη και προσανατολισμός τους, παρουσία C-S-H και μορφολογία τους κτλ), ο τύπος του συνδετικού υλικού (τσιμέντο, άσβεστος, ποζολάνες κτλ) και η παρουσία ή μη εξαιρετικά λεπτόκοκκων υλικών (πυριτική παιπάλη κτλ). Η χημική συνάφεια αποτρέπει τις ολισθήσεις κατά μήκος της διεπιφάνειας, αλλά καταστρέφεται με την ενεργοποίηση των ολισθήσεων. Πάντως, η χημική συνάφεια είναι θεμελιώδης για λόγους ανθεκτικότητας.

Η μηχανική συνάφεια εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υποβάθρου, όπως η αντοχή, το επιφανειακό πορώδες και το μέγεθος των πόρων, η τραχύτητα, οι αρχικές συνθήκες υγρασίας του υποβάθρου και η υδαταπορροφητικότητα. Επί πλέον, εξαρτάται από τις ιδιότητες του συγκολλητικού υλικού (αντοχή και πάχος), όπως επίσης και από την παρουσία θλιπτικού φορτίου στην διεπιφάνεια. Η επιστράτευση της μέγιστης αντίστασης του μηχανικού δεσμού επιτυγχάνεται για τιμή της ολισθήσεως εξαρτώμενη από τα χαρακτηριστικά των υλικών και το μέγεθος της επιβαλλόμενης θλίψης. Πάντως, σημαντικό χαρακτηριστικό του μηχανικού δεσμού της συνάφειας είναι ότι μέρος της αντοχής συνάφειας διατηρείται ακόμη και για μεγάλες τιμές των ολισθήσεων, στοιχείο πολύ σημαντικό για την φέρουσα ικανότητα των δομικών στοιχείων, ιδιαίτερος υπό σεισμικές δράσεις.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ-ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΜΕΣΟΥ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

2.1 Υλικά

Για να διερευνηθεί η εφελκυστική αντοχή συναφείας της διεπιφάνειας μεταξύ ενεμάτων και υποστρωμάτων, παρασκευάστηκαν σύνθετα δοκίμια αποτελούμενα από δύο τμήματα υποβάθρου συνδεδεμένα με έναν αρμό ενέματος. Η επιλογή των τριών τύπων υποβάθρων έγινε λόγω της

συχνής εμφάνισής τους σε ιστορικά κτίρια: εξετάστηκαν δύο τύποι ασβεστολιθικών λιθοσωμάτων με διαφορετικό πορώδες (μάρμαρο Διονύσου και τραβερτίνης) και μια οπτόπλινθος.

Η θλιπτική αντοχή του μαρμάρου Διονύσου (Vardoulakis & Kourkoulis (1997), Vardoulakis et al. (2000)) είναι ίση με 83 N/mm^2 και 70 N/mm^2 στην ισχυρή και ασθενή διεύθυνσή του αντιστοίχως. Η εφελκυστική αντοχή στην ισχυρή διεύθυνση του μαρμάρου προέκυψε ίση με 8.7 N/mm^2 . Επί πλέον, μετρήθηκε το φαινόμενο πορώδες του μαρμάρου το οποίο βρέθηκε ίσο με 0.2%. Ως προς τον τραβερτίνη, πρέπει να αναφερθεί ότι είναι ποικίλλουσας ποιότητας. Οι φυσικο-μηχανικές ιδιότητές του επηρεάζονται από την παρουσία μεγάλου ποσοστού πόρων, καθώς και από αργιλικές ασυνέχειες. Πράγματι, σχετικές δοκιμές έδειξαν μεγάλο εύρος τιμών για την αντοχή σε εφελκυσμό από κάμψη (μεταξύ 4.0 MPa και 21.5 MPa) και για την θλιπτική αντοχή (από 12.1 MPa έως 95.5 MPa), καθώς και του φαινόμενου πορώδους (από 2.9% έως 16.8%). Επομένως, είναι αναμενόμενο ότι αυτή η ποικιλία στις ιδιότητες του διατιθέμενων τεμαχίων τραβερτίνη θα επηρεάσει τον τύπο αστοχίας και την τιμή της εφελκυστικής αντοχής συναφείας της διεπιφάνειας των αντίστοιχων σύνθετων δοκιμών. Τέλος, η θλιπτική αντοχή των χρησιμοποιούμενων οπτοπλίνθων βρέθηκε ίση με 12.2 MPa και το φαινόμενο πορώδες ίσο με 21.4%.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των τριμερών ενεμάτων ήταν: (α) σκόνη υδρασβέστου (HL), (β) τσιμέντο Portland CEM I 42.5 (C), (γ) ποζολάνη από την Μήλο (Μηλαϊκή γη) (0-75 μm) (LA), (δ) μετακαολίνης METASTAR 501 (0-16 μm) (MK). Οι συνθέσεις των ενεμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 (Αδάμη, 2006). Το τσιμεντένεμα G1 χρησιμοποιήθηκε ως ένεμα αναφοράς. Η περιεκτικότητα σε τσιμέντο των τριμερών ενεμάτων επιλέχθηκε να είναι ίση με 30% κ.β.. Η επιλογή του λόγου υδρασβέστου προς ποζολανικών υλικών βασίζεται στην εκτίμηση ότι πέραν του χρησιμοποιούμενου λόγου η περιεκτικότητα είτε της υδρασβέστου είτε των ποζολανών θα είναι τόσο υψηλή, που δεν θα επιτρέπει την βελτιστοποίηση της ποζολανικής αντίδρασης. Πάντως, και στις δύο περιπτώσεις ένα μεγάλο μέρος του υλικού θα παραμείνει αδρανές και επομένως δεν θα συνεισφέρει στην αντοχή μέσω του μηχανισμού ενυδάτωσης (Toumbakari, 2002). Η περιεκτικότητα σε νερό (W/S) κυμαίνεται μεταξύ 0.8-0.9 (για τα ενέματα G1 και G4) και 1.1 (για το ένεμα G2), και προέκυψε από τις δοκιμές διεισδυτικότητας σε στήλες άμμου με κενά μικρότερα των 0.3mm. Για την αύξηση της ρευστότητας, χρησιμοποιήθηκε υπερρευστοποιητής. Τα ενέματα παρασκευάστηκαν με την χρήση μηχανικού αναμικτήρα στις 2400 στροφές ανά λεπτό. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή του λεπτόκοκκου μετακαολίνης στα ενέματα, δεν απαιτούσε την χρήση ειδικής μηχανής ανάδευσης, παρ' όλων ότων η αυξημένη λεπτότητα των στερεών οδήγησε σε μια αναπόφευκτη αύξηση του περιεχόμενου νερού από 0.8-0.9 σε 1.1.

Πίνακας 1. Συνθέσεις τριμερών ενεμάτων

κωδικός ενέματος	Τσιμέντο	σύνθεση [%-κβ]		
		Υδρασβέστος	Μετακαολίνης	Μηλαϊκή Γή
G1	80	20	-	-
G2	30	35	35	-
G4	30	47	-	23

Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε κάμψη και θλίψη δοκιμών ενεμάτων με διαστάσεις 40x40x160mm παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Αρχικά, η ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής των ενεμάτων καθορίστηκε από το περιεχόμενο τσιμέντο. Αυτή η εξέλιξη ήταν αναμενόμενη, καθώς η ποζολανική αντίδραση (για μέγεθος κόκκων ποζολάνης ανάλογο με την λεπτότητα του τσιμέντου) εμφανίζεται περίπου μετά από 2 έως 4 εβδομάδες. Η θλιπτική αντοχή των τριμερών ενεμάτων που περιείχαν 30%κ.β. τσιμέντο συνέχισε να αυξάνεται λόγω της εξέλιξης της ποζολανικής αντίδρασης. Ως προς τις επιτευχθείσες αντοχές, παρατηρείται ότι το ένεμα G2 στις 230 ημέρες προσέγγισε την θλιπτική αντοχή του ενέματος G1 στις 90 ημέρες, αναδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο τις δυνατότητες των τριμερών συνθέσεων, υπό την προϋπόθεση της βελτιστοποίησης του λόγου υδρασβέστου προς ποζολάνη. Παρά τις αυξομειώσεις στις παρατηρούμενες τιμές της, η

καμπτική αντοχή των τριμερών συνθέσεων γενικά αυξήθηκε (για το ένεμα G2) ή παρέμεινε σταθερή εν χρόνω (για το ένεμα G4). Είναι δε γενικά αποδεκτό, ότι η καμπτική αντοχή είναι μια μηχανική ιδιότητα πολύ ευάλωτη στην εσωτερική μικρορρηγμάτωση. Η αύξηση επομένως, της καμπτικής αντοχής του ενέματος G2 υποδηλώνει την παρουσία μιας μικροδομής που σταδιακά πυκνώνει. Η πυκνωση αυτή οφείλεται τόσο στην ποζολανική αντίδραση, όσο και στην λεπτότητα της ποζολάνης. Η σταθεροποίηση της τιμής της καμπτικής αντοχής του ενέματος G4, μαρτυρά μια λιγότερο πυκνή μικροδομή, η οποία παρά ταύτα είναι ανθεκτική στην μικρορρηγμάτωση (άλλως, η καμπτική αντοχή θα μειωνόταν με τον χρόνο).

Πίνακας 2. Θλιπτική και καμπτική αντοχή των ενεμάτων [MPa]

ημέρες	G1(C=80%, L=20%)	G2(C=30%,L:MK=1:1)	G4 (C=30%, L:LA=1:2.5)
7	13.3	3.7	5.1
28	14.6	3.4	9.9
90	17.9	4.5	13.6
230	-	-	17.9

2.2 Πρόγραμμα πειραμάτων και παράμετροι

Διερευνήθηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των σύνθετων δοκιμίων ενεμάτων/υποβάθρων για ηλικίες ενέματος 28, 60, 90 και 180 ημερών. Η επιλογή αυτού του εύρους των ηλικιών έγινε για να εκτιμηθούν τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας στις πρώτες μέρες-πληροφορία που είναι ιδιαίτερος χρήσιμη για τους Μηχανικούς που εφαρμόζουν ενέματα στο εργοτάξιο-και για να διαπιστωθούν οι μεταβολές σε βάθος χρόνου. Από όλους τους συνδυασμούς υποβάθρων και ενεμάτων έγινε επιλογή με βάση τα ακόλουθα κριτήρια: (1) πρακτικός, ολοκλήρωση της ποζολανικής δράσης στις 180 ημέρες για τις συνθέσεις που περιέχουν μετακαολίνη ή μηλαϊκή γη και (2) μη περαιτέρω ανάπτυξη των αντοχών του ενέματος αναφοράς (G1 (C=80%κ.β., L=20%κ.β.)) μετά τις 28 ημέρες. Συνολικά παρασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν σε εφελκυσμό 111 σύνθετα δοκίμια.

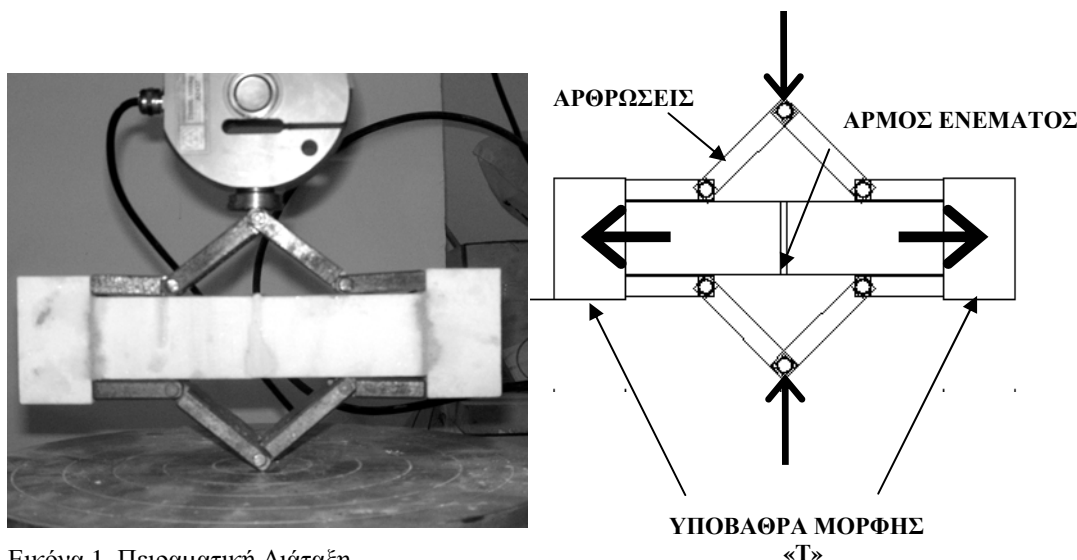
Οι παράμετροι που διερευνήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, όπως αυτές υπαγορεύθηκαν από την σχετική βιβλιογραφία, ήταν: ο τύπος του υποβάθρου (φυσικο-μηχανικά χαρακτηριστικά), ο τύπος των συγκολλητικών υλικών και η ηλικία των σύνθετων δοκιμίων.

2.3 Προετοιμασία Δοκιμίων

Τεμάχια μαρμάρου Διονύσου, τραβερτίνη και πλακίδια οπτοπλίνθων, κόπηκαν σε ορθογωνικά πρίσματα, τα οποία έπειτα συγκολλήθηκαν με εποξειδική ρητίνη για να σχηματισθούν μορφής «T» δοκίμια υποβάθρων. Για να προσομοιωθεί η τραχύτητα των λίθων στις εσωτερικές στρώσεις των τρίστρωτων τοιχοποιιών, η επιφάνεια (το πρόσωπο) του δοκιμίου του υποβάθρου στο οποίο θα γινόταν η έγχυση του ενέματος, τραχύνθηκε με μηχανικά μέσα. Η επιφάνεια επαφής καθαρίστηκε με πεπιεσμένο αέρα και έπειτα τα μορφής «T» δοκίμια συντηρήθηκαν για τουλάχιστον δύο εβδομάδες στον υγρό θάλαμο σε συνθήκες 95% R.H. και 20°C. Ακολούθησε η προετοιμασία των σύνθετων δοκιμίων. Για την έγχυση του ενέματος στον (3mm πάχους) αρμό του σύνθετου δοκιμίου, χρησιμοποιήθηκαν σύριγγες μιας χρήσης χωρητικότητας 10 και 20ml. Ιδιαίτερη μέριμνα ελήφθη για την αποφυγή εισαγωγής αέρα στον αρμό του ενέματος κατά την έγχυση. Για τον λόγο αυτό, η εφαρμογή του ενέματος με την σύριγγα πραγματοποιήθηκε αργά και σε δυο φάσεις: αρχικά εγχύθηκε η μισή ποσότητα του ενέματος, η οποία συμπυκνώθηκε με την βοήθεια μεταλλικού σύρματος. Έπειτα η υπόλοιπη ποσότητα του ενέματος εγχύθηκε ακολουθώντας την ίδια διαδικασία. Καθ' όλη την διάρκεια της εισαγωγής του ενέματος στον αρμό και της συντήρησης, τα σύνθετα δοκίμια διατηρήθηκαν σε οριζόντια θέση, ενώ το πάχος του αρμού παρέμεινε σταθερό μέσω συστήματος περίσφιγξης αποτελούμενου από μεταλλικές ράβδους και ελάσματα. Τα σύνθετα δοκίμια συντηρήθηκαν στον υγρό θάλαμο, σε συνθήκες 95% R.H. και 20°C, μέχρι την ημερομηνία του πειράματος.

2.4 Πειραματική Διάταξη

Για την μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής των σύνθετων δοκιμίων, εφαρμόστηκε η μέθοδος των θραυσμάτων (Tassios et. al, 1989) σε πειραματική διάταξη (Εικόνα 1) που χρησιμοποιείται για την επιβολή άμεσου εφελκυσμού (Katsaragakis, 1987). Τα δοκίμια φορτίστηκαν μέσω υδραυλικής πρέσας (μεγίστου φορτίου 300KN). Μια δυναμοκυψέλη DBBSE (μεγίστου φορτίου 10 KN) ήταν στερεωμένη στην πρέσσα και συνδεόταν με ηλεκτρονικό υπολογιστή, στον οποίο μεταφέρονταν οι μετρήσεις του επιβαλλόμενου φορτίου.



Εικόνα 1. Πειραματική Διάταξη

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Τύποι αστοχίας σύνθετων δοκιμίων ενεμάτων/υποβάθρων

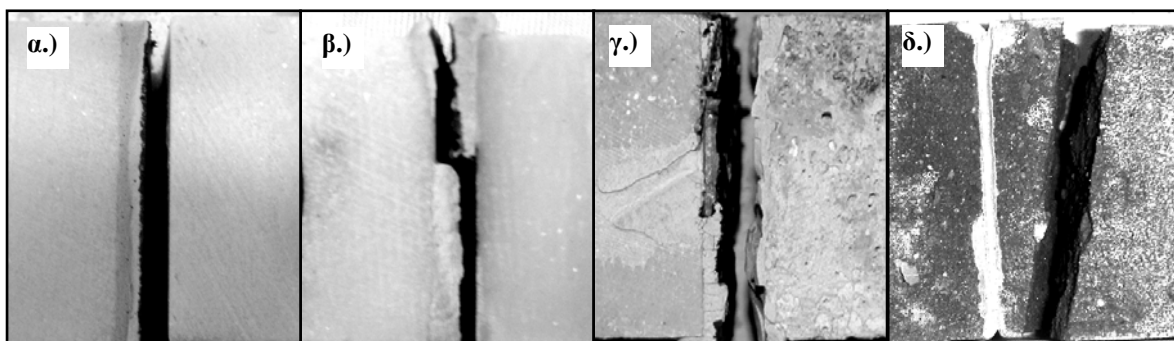
Παρατηρήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί τύποι αστοχίας (Εικόνα 2):

1. Τύπος ITZ (αστοχία στην διεπιφανειακή ζώνη): Το ένεμα αποκολλάται από το υπόβαθρο κατά μήκος της μιας διεπιφάνειας ενέματος/υποβάθρου, ενώ ο αρμός του παραμένει κολλημένος στην άλλη διεπιφάνεια με το υπόβαθρο. Με άλλα λόγια, το επίπεδο αστοχίας εμφανίζεται στην διεπιφάνεια ενέματος/υποβάθρου.
2. Τύπος Z: Είναι παρεμφερής τύπος αστοχίας με τον τύπο ITZ. Σε αυτήν την περίπτωση όμως, πρακτικώς το μισό του αρμού του ενέματος παραμένει κολλημένο στο ένα πλακίδιο του υποβάθρου, ενώ το υπόλοιπο μισό είναι κολλημένο στο δεύτερο πλακίδιο.
3. Τύπος E: Η αστοχία συμβαίνει εντός του αρμού του ενέματος (εφελκυστική αστοχία του ενέματος).
4. Τύπος S: Αστοχία του υποβάθρου

3.2 Αποτελέσματα και Σχολιασμός

Σε αυτήν την ενότητα, στην οποία παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα, δεν περιλαμβάνονται όλα τα δοκίμια. Πράγματι, έχουν απορριφθεί τα δοκίμια στα οποία ο αρμός του ενέματος δεν ήταν πλήρης ή περιείχε μεγάλες ποσότητες αέρα. Επίσης, δοκίμια στα οποία ο αρμός του ενέματος είχε μερικώς ενανθρακωθεί δεν λήφθηκαν υπόψη, καθώς θεωρείται ότι δεν αντιπροσωπεύουν την κατάσταση στην οποία θα βρίσκεται το ένεμα στο εσωτερικό της τοιχοποιίας, όπου και δεν αναμένεται να εμφανισθεί ενανθράκωση. Τέλος, δοκίμια στα οποία η

αστοχία εμφανίσθηκε στο υπόβαθρο (μακριά από την διεπιφάνεια) δεν συμπεριλαμβάνονται, καθώς δεν δίνουν πληροφορίες για την συμπεριφορά της διεπιφάνειας (η οποία είναι ισχυρότερη του υποβάθρου).



Εικόνα 2. Τύποι Αστοχίας: α) ITZ, β) Z, γ) E, δ) S.

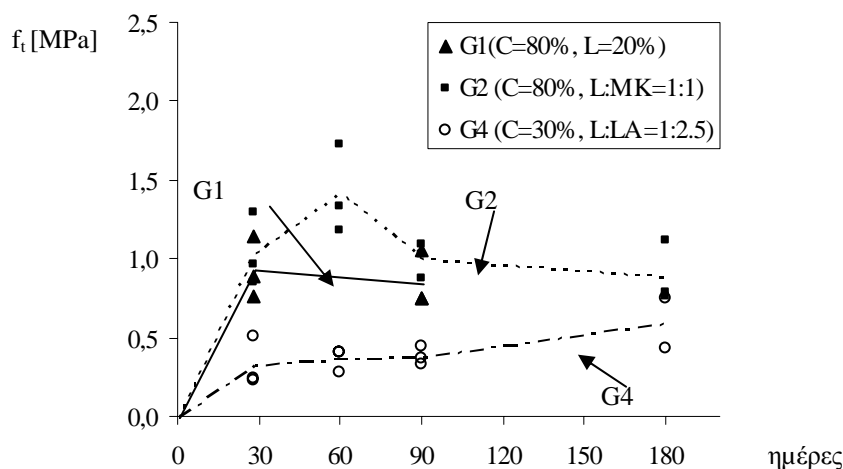
3.2.1 Σύνθετα δοκίμια μαρμάρου/ενεμάτων

Στην Εικόνα 3, απεικονίζεται η αντοχή συναφείας των διεπιφανειών μεταξύ των τριών τύπων ενεμάτων και του μαρμάρου συναρτήσει της ηλικίας του ενέματος. Η χαμηλότερη τιμή της εφελκυστικής αντοχής (0.23 MPa) μετρήθηκε για το τριμερές ένεμα G4 (με την μηλαϊκή γη ως ποζολάνη), ενώ η υψηλότερη τιμή της εφελκυστικής αντοχής (1.72 MPa) παρατηρήθηκε για το ένεμα που περιείχε ως ποζολανικό υλικό τον μετακαολίνη G2.

Σχετικώς με την εν χρόνω ανάπτυξη της αντοχής συναφείας, παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα: για το ένεμα αναφοράς G1(C=80%, L=20%) η εφελκυστική αντοχή της διεπιφάνειας παρουσίασε μια αμελητέα πτώση μεταξύ της 28^{ης} και 90^{ης} ημέρας (από 0.93 MPa σε 0.85 MPa αντιστοίχως). Αυτή η μείωση ευρίσκεται εντός των ορίων διασποράς των πειραματικών αποτελεσμάτων, τα οποία αφορούν μια ιδιότητα ιδιαίτερος ευαίσθητη όπως είναι η εφελκυστική αντοχή. Για το ένεμα G2 (C=80%, L:MK=1:1) ο αρχικός σχηματισμός (την 28^η ημέρα) των άμορφων C-S-H εξασφάλισε την μηχανική αλληλεμπλοκή μεταξύ του μαρμάρου και του ενέματος G2 και, επομένως, βελτίωσε την εφελκυστική αντοχή συναφείας. Έπειτα, παρατηρήθηκε μια μη αναμενόμενη πτώση των αντοχών που δεν μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά στην διασπορά των πειραματικών αποτελεσμάτων. Άλλωστε και η καμπτική αντοχή του ενέματος G2 παρουσίασε πτώση μεταξύ της 28^{ης} και 90^{ης} ημέρας (Πίνακας 3). Επομένως, είναι αναγκαία μια περαιτέρω διερεύνηση του θέματος ώστε να ερμηνευθεί αυτή η εξέλιξη των αντοχών. Τέλος, η αύξηση μεταξύ της 28^{ης} και 180^{ης} ημέρας (από 0.33 MPa σε 0.59 MPa) της εφελκυστικής αντοχής της διεπιφάνειας σύνθετων δοκιμίων μαρμάρου/G4 (C=30%, L:LA=1:2.5) αποδόθηκε στην πυκνωση της δομής της διεπιφάνειας λόγω της ποζολανικής αντίδρασης, η οποία ήταν βραδύτερη για την χονδρόκοκκη ποζολάνη της μηλαϊκής γης. Συμπεραίνεται ότι η εφελκυστική αντοχή συναφείας μεταξύ μαρμάρου και ενέματος G1(C=80%, L=20%) ή ενέματος G2 (C=80%, L:MK=1:1) είναι περίπου ίση με 1 MPa και αναπτύσσεται μέχρι την 90^η ημέρα. Αντιθέτως, η αυξανόμενη τάση της αντοχής συναφείας της διεπιφάνειας μαρμάρου/G4 συναρτήσει του χρόνου, που αποδίδεται στην αργή εξέλιξη της ποζολανικής αντίδρασης, επιτρέπει μια περαιτέρω αύξηση της εφελκυστικής αντοχής συναφείας σε μεγαλύτερες ηλικίες.

Όσον αφορά την μορφή αστοχίας, παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα: όλα τα σύνθετα δοκίμια με το ένεμα αναφοράς G1(C=80%, L=20%) και το τριμερές ένεμα με την φυσική ποζολάνη G4(C=30%, L:LA=1:2.5) αστόχησαν κατά μήκος της διεπιφάνειας (Αστοχία τύπου ITZ). Τα σύνθετα δοκίμια με το τριμερές ένεμα G2 (C=80%, L:MK=1:1) αστόχησαν είτε στην διεπιφάνεια (Αστοχία τύπου ITZ ή τύπου Z) είτε λόγω εφελκυστικής αστοχίας του ενέματος του αρμού (Αστοχία τύπου E). Από τους εμφανιζόμενους τύπους αστοχίας μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η διεπιφάνεια μεταξύ μαρμάρου και μετακαολίνη παρουσιάζει βελτιωμένα χαρακτηριστικά οφειλόμενα στην παρουσία

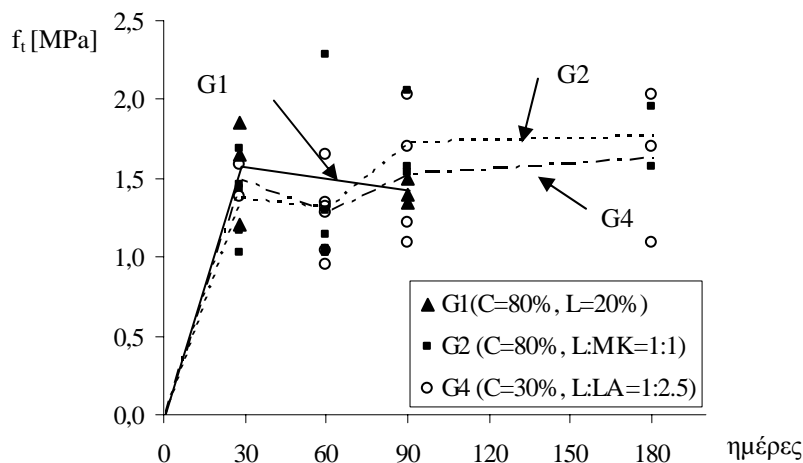
των ιδιαίτερος λεπτών κόκκων του μετακαολίνης. Τέλος, για αυτόν τον τύπο υποβάθρου δεν παρατηρήθηκαν, μακροσκοπικά, εμφανείς ρωγμές στον αρμό του ενέματος.



Εικόνα 3. Εν χρόνω εξέλιξη της εφελκυστικής αντοχής συναφείας σύνθετων δοκιμίων μαρμάρου

3.2.2 Σύνθετα δοκίμια τραβερτίνη/ενέματος

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα της εφελκυστικής αντοχής συναφείας των διεπιφανειών μεταξύ των τριών τύπων ενεμάτων με τον τραβερτίνη. Οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής για αυτές τις διεπιφάνειες είναι σχεδόν κατά 50% υψηλότερες από αυτές που μετρήθηκαν για τις διεπιφάνειες του μαρμάρου. Αυτό εξηγείται από τις υψηλότερες τιμές του πορώδους και της επιφανειακής απορρόφησης ύδατος που έχει ο τραβερτίνης σε σχέση με το μάρμαρο. Αυτό το χαρακτηριστικό οδήγησε αφ' ενός σε καλύτερη αλληλεμπλοκή του συνδετικού υλικού με το υπόβαθρο και αφ' ετέρου σε τοπική μείωση του περιεχόμενου νερού στην διεπιφάνεια. Καθώς, δε, τα υψηλής διεισδυτικότητας ενέματα περιέχουν μεγάλες ποσότητες νερού, αυτή η μείωση δεν επιδρά αρνητικά στην εξέλιξη της διαδικασίας ενυδάτωσης των κονιών. Αντιθέτως, οδηγεί σε μια μείωση του πορώδους τοπικώς και σε πιο πυκνή δομή της διεπιφάνειας ενέματος/τραβερτίνης. Επίσης, οι υψηλότερες τιμές της εφελκυστικής αντοχής συναφείας που παρατηρήθηκαν για αυτόν τον τύπο υποβάθρου, σε σχέση με τα υπόβαθρα από μάρμαρο, μπορούν πιθανόν να εξηγηθούν και από την μείωση των τριχοειδών φαινομένων στα τοιχώματα των πόρων. Η μέση τιμή της εφελκυστικής αντοχής της διεπιφάνειας για το ένεμα αναφοράς G1 (C=80%, L=20%) παρουσίασε μια πτώση από τα 1.57 MPa την 28^η ημέρα στα 1.41 MPa την 90^η ημέρα. Αυτή η μεταβολή αποδίδεται στην αναμενόμενη διασπορά των πειραματικών αποτελεσμάτων. Άνοδος στις τιμές της αντοχής συναφείας παρατηρήθηκε για το ένεμα G2 (C=80%, L:MK=1:1): η εφελκυστική αντοχή συναφείας της διεπιφάνειας, (ίση με 1.35 MPa την 28^η ημέρα) ανήλθε στα 1.72 MPa την 90^η ημέρα και μετά σταθεροποιήθηκε στα 1.75 MPa στις 180 ημέρες. Αυτό το αποτέλεσμα, όπως επίσης και η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής της διεπιφάνειας σύνθετων δοκιμίων τραβερτίνη/ενέματος G4 (C=30%, L:LA=1:2.5) μπορούν να εξηγηθούν από την πύκνωση της διεπιφάνειας η οποία προκλήθηκε από την εξέλιξη της ποζολανικής δράσης. Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής συναφείας διεπιφανειών τραβερτίνη και ενέματος G4 ήταν ίση με 1.48 MPa την 28^η ημέρα και 1.65 MPa στις 180 ημέρες. Πρέπει να τονιστεί ότι τελικώς, σύνθετα δοκίμια τραβερτίνη τα οποία παρασκευάστηκαν με ενέματα με διαφορετική θλιπτική και εφελκυστική αντοχή, επέδειξαν παραπλήσια συμπεριφορά όσον αφορά την αντοχή της διεπιφάνειας υπό άμεσο εφελκυσμό.



Εικόνα 4. Εν χρόνο εξέλιξη της εφελκυστικής αντοχής συναφείας σύνθετων δοκιμίων τραβερτίνη

Σχετικά με τον τρόπο αστοχίας των σύνθετων δοκιμίων αναφέρονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις: όλα τα σύνθετα δοκίμια με το ένεμα αναφοράς G1(C=80%, L=20%) και το τριμερές ένεμα με την φυσική ποζολάνη G4(C=30%, L:LA=1:2.5) αστόχησαν κατά μήκος της διεπιφάνειας (Αστοχία τύπου ITZ ή τύπου Z). Τα σύνθετα δοκίμια με το τριμερές ένεμα G2 (C=80%, L:MK=1:1) αστόχησαν κυρίως λόγω εφελκυστικής αστοχίας του ενέματος του αρμού (Αστοχία τύπου E). Επομένως, η διεπιφάνεια ήταν ισχυρότερη από την αντίστοιχη καθαρή πάστα του ενέματος.

3.2.3 Σύνθετα δοκίμια οπτοπλίνθου/ενεμάτων

Στο σύνολο των σύνθετων δοκιμίων με υπόβαθρο την οπτόπλινθο, η αστοχία εμφανίστηκε στο υπόβαθρο, ανεξαρτήτως της σύνθεσης του ενέματος ή της ηλικίας του δοκιμίου. Επομένως, τα πειραματικά αποτελέσματα μετρούν την εφελκυστική αντοχή των οπτοπλίνθων, η οποία είναι ίση με 0.80 MPa. Σ' αυτήν την περίπτωση, το μόνο που διαπιστώνεται ως προς τις διεπιφάνειες είναι ότι έχουν εφελκυστική αντοχή μεγαλύτερη από την εφελκυστική αντοχή της οπτοπλίνθου.

3.3 Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας

Σ' αυτήν την παράγραφο επιχειρείται να γίνει μια σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης με πειραματικά δεδομένα προηγούμενων ερευνών πάνω στα τριμερή ενέματα (Toumbakari, 2002). Σε ηλικία 60 ημερών διερευνήθηκε η μηχανική συμπεριφορά της διεπιφανειακής ζώνης (α) τριμερών ενεμάτων με διάφορες αναλογίες υδρασβέστου:ποζολάνης και 30% κ.β. περιεκτικότητα σε τσιμέντο Portland (παρεμφερέ με τα G2 και G4) και (β) ενός τσιμεντένεματος αναφοράς (ίδιας σύνθεσης με το G1). Σύνθετα δοκίμια για δύο τύπους υποβάθρων (ενός ασβεστόλιθου και μιας πορώδους οπτοπλίνθου) υποβλήθηκαν σε άμεσο εφελκυσμό και σε διάτμηση. Τα πειραματικά αποτελέσματα συσχετίστηκαν με τον τύπο αστοχίας της διεπιφάνειας και με την μικροδομή της. Η εφελκυστική αντοχή συναφείας των τριμερών συνθέσεων με το ασβεστολιθικό υπόβαθρο κυμαινόταν μεταξύ 1.35 έως 1.63 MPa, ενώ για το ένεμα αναφοράς ήταν ίση με 1.76 MPa στις 60 ημέρες. Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Δοκιμές για την μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής συναφείας έγιναν από την Miltiadiou (1990). Εξετάσθηκαν διεπιφάνειες (πάχος αρμού ίσο με 3 mm) μεταξύ διαφόρων ξηρών λίθων και ενεμάτων τα οποία περιείχαν 50% -κ.β. τσιμέντο, υδράσβεστο και πυριτική άχνη (με θλιπτική αντοχή: 10-12 MPa). Η εφελκυστική αντοχή της διεπιφάνειας αναλόγως με τον τύπο του υποβάθρου, κυμαινόταν μεταξύ 0.8-1.6 MPa

την 28^η ημέρα. Και αυτές οι τιμές εμπίπτουν στο εύρος τιμών που επιτεύχθηκαν από τα τριμερή ενέματα, τα οποία είχαν μικρότερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο (30% αντί του 50%) και πιο χονδρόκοκκες ποζολάνες (Rheinisch trass, μηλαϊκή γη και μετακαολίνη) από την χρησιμοποιούμενη πυριτική άχνη. Στην ίδια εργασία, ένα ένεμα με σύνθεση 75% τσιμέντο και 25% ασβέστη, με παραπλήσια δηλαδή σύνθεση με το ένεμα αναφοράς G1, ανέπτυξε εφελκυστική αντοχή διεπιφάνειας μεταξύ 1.1 έως 3 MPa στις 28 ημέρες.

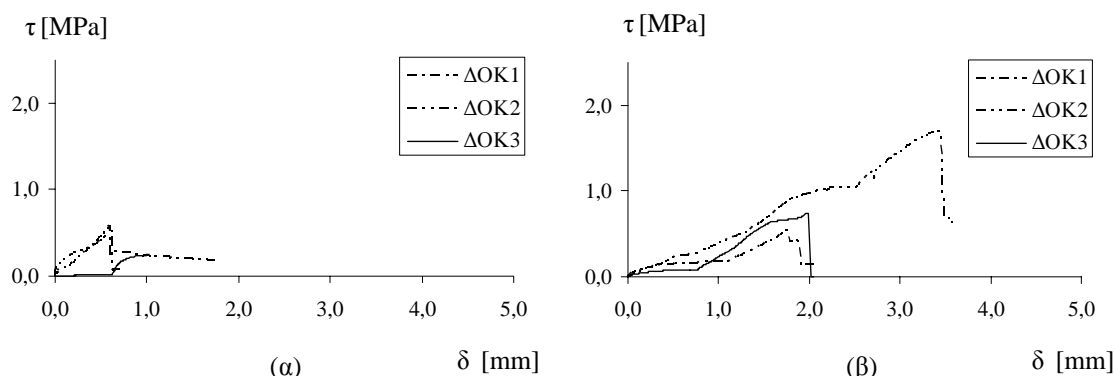
4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ-ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Στα επόμενα, γίνεται μια προκαταρκτική παρουσίαση των πρώτων αποτελεσμάτων ενός ευρύτερου, εν εξελίξει προγράμματος στο ΕΩΣ. Το πρόγραμμα αφορά την μελέτη της συμπεριφοράς διεπιφανειών σύνθετων δοκιμών ενεμάτων και υποβάθρων υπό ταυτόχρονη ορθή θλιπτική τάση. Στο πλαίσιο αυτού του προγράμματος, έχουν κατασκευασθεί δοκίμια από τα ίδια υλικά (τόσο υποβάθρου όσο και ενεμάτων) με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη της εφελκυστικής συμπεριφοράς των διεπιφανειών. Οι δοκιμές πραγματοποιούνται υπό συνθήκες επιβαλλόμενων παραμορφώσεων σε συσκευή η οποία μελετήθηκε και κατασκευάστηκε επί τούτους.

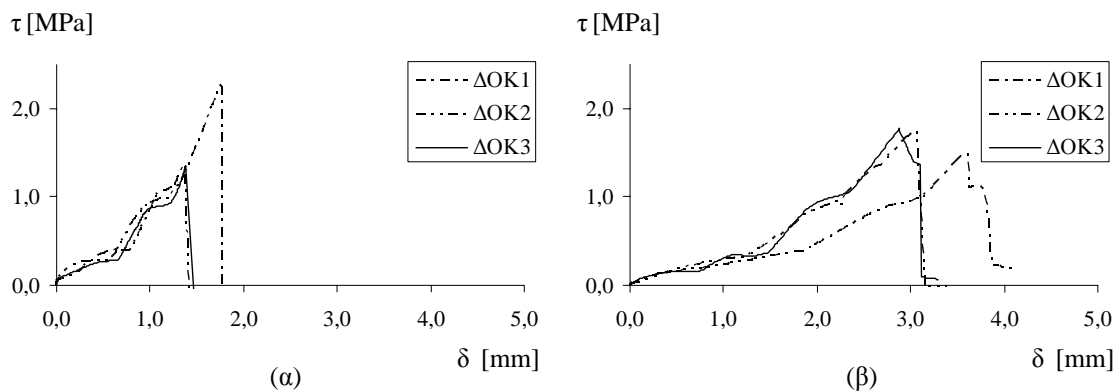
Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών (μέση τιμή της διατμητικής αντοχής τ_u [MPa] με τις αντίστοιχες μέσες ολισθήσεις δ_u [mm] και ο συντελεστής τριβής μ (ως ο λόγος της διατμητικής αντοχής προς την επιβαλλόμενη ορθή θλιπτική τάση)), για μερικούς συνδυασμούς σύνθετων δοκιμών ενεμάτων/υποβάθρων, ηλικιών και ορθής τάσης. Στις Εικόνες 5, 6 και 7, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα (ανά τριάδα δοκιμών) της διατμητικής τάσης συναφείας συναρτήσει της επιβαλλόμενης ολίσθησης.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα δοκιμών διάτμησης σύνθετων δοκιμών

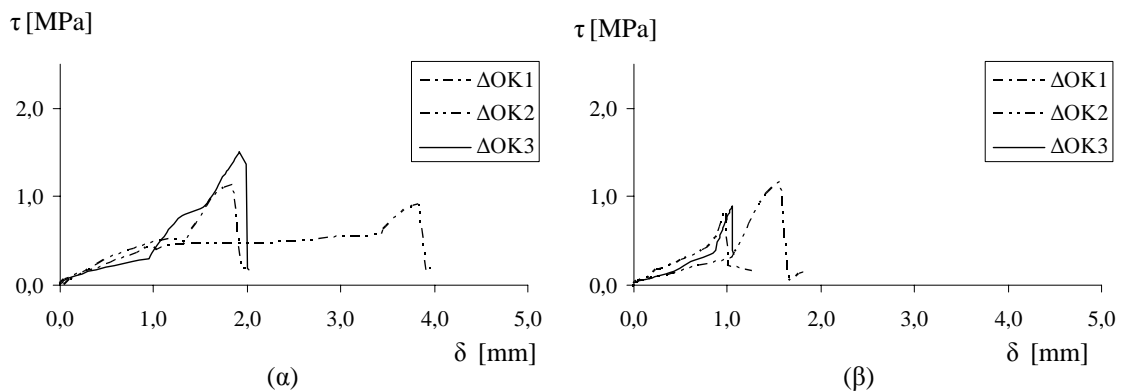
Τύπος ενέματος	ηλικία (ημέρες)	Υλικό υποβάθρου	σ [MPa]	τ_u [MPa]	δ_u [mm]	μ
G1	28	μάρμαρο	0.37	0.55	0.60	1.49
		οπτόπλινθος	0.12	1.00	2.39	-
G2	60	τραβερίνης	0.30	1.66	1.50	5.53
		οπτόπλινθος	0.30	1.68	3.17	-
G4	90	τραβερίνης	0.30	0.97	1.20	3.23
		οπτόπλινθος	0.30	1.19	2.53	3.96



Εικόνα 5. Διατμητική τάση-ολίσθηση σύνθετων δοκιμών ενέματος αναφοράς και (α) μαρμάρου, υπό ορθή θλιπτική τάση 0.3 MPa (β) οπτοπλίνθου υπό ορθή θλιπτική τάση 0.1 MPa, σε ηλικία 28 ημερών.



Εικόνα 6. Διατμητική τάση-ολίσθηση σύνθετων δοκιμίων τριμερούς ενέματος G2 και (α) τραβερίτινη, (β) οπτοπλίνθου σε ηλικία 60 ημερών, υπό ορθή θλιπτική τάση 0.3 MPa.



Εικόνα 7. Διατμητική τάση-ολίσθηση σύνθετων δοκιμίων τριμερούς ενέματος G4 και (α) τραβερίτινη, (β) οπτοπλίνθου σε ηλικία 90 ημερών, υπό ορθή θλιπτική τάση 0.3 MPa.

Η διατμητική αντοχή (για $\sigma=0.37$ MPa) της διεπιφάνειας του ενέματος αναφοράς G1 με το μάρμαρο, για $\sigma=0.37$ MPa είναι αρκετά μικρή (0.55 MPa), επιστρατεύεται δε υπό σχετικώς μικρές ολισθήσεις (Εικόνα 5 (α)). Ο αντίστοιχος συντελεστής τριβής προκύπτει ίσος με 1.50 περίπου. Οι διεπιφάνειες μεταξύ τραβερίτινη και τριμερούς ενέματος G2, σε ηλικία 60 ημερών και υπό ορθή θλιπτική τάση ίση με 0.30 MPa, επιστράτευσαν διατμητική αντοχή ίση με 1.66 MPa κατά μέσον όρο. Έτσι, προκύπτει συντελεστής τριβής ίσος με 5.50 περίπου. Επίσης, παρατηρείται επιστράτευση της διατμητικής αντοχής σε μεγαλύτερες τιμές ολισθήσεως (1.50 mm έναντι 0.60 mm στην περίπτωση του μαρμάρου). Αντιστοίχως, η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας τραβερίτινη και ενέματος G4 στις 90 ημέρες βρέθηκε περίπου ίση με 1.00 MPa, τιμή που είναι σαφώς μικρότερη από εκείνη που παρατηρήθηκε για την διεπιφάνεια του ενέματος G2 με τον ίδιο τύπο υποβάθρου. Σε μεγαλύτερες ηλικίες αναμένεται περαιτέρω αύξηση των παρατηρούμενων τιμών για το ένεμα G4 λόγω της εξέλιξης της ποζολανικής δράσης. Ο συντελεστής τριβής μ προέκυψε ίσος με 3.20 περίπου. Η επιστράτευση της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας τραβερίτινη και ενέματος G4 έγινε σε σχετικά μικρότερες τιμές της ολισθήσεως (1.20mm). Επομένως, από τις πρώτες δοκιμές στα σύνθετα δοκίμια ενεμάτων με ασβεστολιθικά υπόβαθρα, φαίνεται να επαληθεύονται οι διαπιστώσεις των πειραμάτων του εφελκυσμού, σχετικά α) με την επιρροή του τύπου του υποβάθρου στις τιμές της συνάφειας και του συντελεστή τριβής (μεγαλύτερες τιμές για τα υπόβαθρα από τραβερίτινη) και β) με τις συγκολλητικές ιδιότητες των τριμερών ενεμάτων, που δείχνουν να είναι, τουλάχιστον, εφάμιλλες με εκείνες των τσιμεντενεμάτων. Ως προς τον τρόπο αστοχίας αναφέρεται ότι όλα τα σύνθετα δοκίμια με λίθινο υπόβαθρο (μάρμαρο ή τραβερίτινης) αστόχησαν στην διεπιφάνεια είτε με τον τύπο αστοχίας ITZ

(για το τριμερές ένεμα με την μηλαϊκή γη) είτε με τον τύπο αστοχίας Z (για το ένεμα αναφοράς και το τριμερές ένεμα με τον μετακαολίνη ως ποζολανικό υλικό).

Το σύνολο των σύνθετων δοκιμών του ενέματος αναφοράς και του ενέματος G2 με υπόβαθρο την οπτόπλινθο αστόχησε με διατμητική αστοχία του υποβάθρου, ανεξαρτήτως της ηλικίας του δοκιμίου ή της επιβαλλόμενης ορθής δύναμης. Επιβεβαιώνεται δηλαδή ότι η διεπιφάνεια για αυτόν τον τύπο υποβάθρου είναι πιο ισχυρή από την διατμητική αντοχή των οπτοπλίνθων (ίση με 1.68 MPa για διάφορες τιμές της θλιπτικής τάσης σ). Αυτή η παρατήρηση είναι σε συνέπεια με τα αποτελέσματα των πειραμάτων εφελκυσμού, όπου και εκεί η αστοχία είχε εμφανισθεί στο υπόβαθρο. Για τον ένεμα G4, όμως, η αστοχία παρατηρήθηκε κατά μήκος της διεπιφάνειας του αρμού του ενέματος με το υπόβαθρο. Η μέση τιμή της διατμητικής αντοχής συναφείας βρέθηκε ίση με 1.20 MPa και ο συντελεστής τριβής μ ίσος με 4.00 περίπου.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αποτελεσματικότητα των τριμερών ενεμάτων για δεδομένο τύπο υποβάθρου θα πρέπει να αποτιμάται σε σύγκριση με ένα τσιμεντένεμα αναφοράς, το οποίο θα ικανοποιεί τα ίδια κριτήρια διεισδυτικότητας. Με βάση την παραπάνω προσέγγιση, αυτή η εργασία επιτρέπει να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Είναι δυνατή η ανάπτυξη τριμερών ενεμάτων υψηλής διεισδυτικότητας με την χρήση περιορισμένης ποσότητας τσιμέντου (30%-κ.β.) και διάφορων ποσοτήτων ασβέστη και ποζολάνης, τα οποία να παρουσιάζουν ικανοποιητική μηχανική συμπεριφορά και να είναι σε θέση να αναπτύξουν μεγάλη ποικιλία αντοχών.
2. Ως προς την εφελκυστική αντοχή διεπιφανειών μεταξύ ενεμάτων και υποβάθρων, τα τριμερή ενέματα που μελετήθηκαν μπορούν να αναπτύξουν εφελκυστική αντοχή συγκρίσιμη με εκείνη των τσιμεντενεμάτων. Τούτο οφείλεται, κυρίως, στην βελτιωμένη δομή της διεπιφανειακής ζώνης και στην κατάλληλη μικροδομή των ενεμάτων. Εννοείται ότι άλλοι τύποι ενεμάτων ή τριμερή ενέματα με διαφορετική λογική σχεδιασμού από αυτήν που υιοθετήθηκε στην παρούσα εργασία, ενδέχεται να εμφανίσουν διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά.
3. Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής της διεπιφάνειας, η οποία αναπτύσσεται από το ένεμα αναφοράς και τα τριμερή ενέματα (όπως αυτά μελετήθηκαν στην παρούσα μελέτη), ελέγχεται από τα χαρακτηριστικά του υποβάθρου και κυρίως από το πορώδες του.
4. Η εφελκυστική αντοχή της διεπιφάνειας στις 28 ημέρες για το υπόβαθρο του μαρμάρου είναι συγκρίσιμη (περίπου 1 MPa) για τα ενέματα G1 και G2. Πρακτικά, δεν παρατηρείται περαιτέρω αύξηση της εφελκυστικής αντοχής συναφείας με τον χρόνο. Αντιθέτως, για το ένεμα G4 αναμένεται περαιτέρω αύξηση της αντοχής.
5. Υψηλότερες τιμές της εφελκυστικής αντοχής συναφείας (>1.50 MPa) παρατηρούνται για τα υπόβαθρα από τραβερτίνη. Εν χρόνω αύξηση της αντοχής συναφείας εμφανίζεται για τα τριμερή ενέματα G2 και G4, η οποία προσεγγίζει τις τιμές 1.75 MPa και 1.65 MPa, αντιστοίχως στην ηλικία των 180 ημερών.
6. Η εφελκυστική αντοχή της διεπιφάνειας σύνθετων δοκιμών ενεμάτων/οπτοπλίνθου είναι μεγαλύτερη από 0.80 MPa.
7. Τα αποτελέσματα των δοκιμών διάτμησης δείχνουν την ίδια τάση με εκείνα του εφελκυσμού ως προς την επιρροή των διαφόρων τύπων υποβάθρων και ενεμάτων στον μηχανισμό της συνάφειας, μολονότι που το πρόγραμμα δοκιμών δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμα .

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η πρώτη συγγραφέας έχει λάβει υποτροφίες από τα Κοινοφελή Ιδρύματα «Α. Σ. ΩΝΑΣΗΣ» και «Α. Γ. ΛΕΒΕΝΤΗΣ» για την εκπόνηση της Διδακτορικής της Διατριβής. Ο υπερρευστοποιητής και η εποξειδική ρητίνη προσφέρθηκαν από την SIKA Hellas και ο μετακαολίνης από την IMERYS Minerals Ltd.

6 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Αδάμη, Χ.-Ε. 2006. Ανάπτυξη και μελέτη των φυσικο-χημικών ιδιοτήτων υψηλής διεισδυτικότητας ενεμάτων ασβέστη-μετακαολίνης. Διερεύνηση της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας μεταξύ υπαρχόντων και υλικών επισκευής. *Διδ. Διατριβή (υπό εκπόνηση)*, Εργ.Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ
- Farran, J. 1956. Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre les constituants hydratés des ciments et les matériaux enrobés. *Revue des Matériaux de Construction et Travaux Publics*, (490-491), pp. 155-172.
- Katsaragakis, E. 1987. A new tensile test for concrete. *Materials & Structures*, 20, pp.120–125.
- Lyubimova, T.Yu. and Pinus, E.R., 1962. Crystallization structure in the contact zone between aggregate and cement in concrete. *Colloid J. USSR*, 24(5), pp. 491-498.
- Miltiadiou, A. 1990. Contribution à l'étude des coulis hydrauliques pour la réparation et le renforcement des structures et des monuments historiques en maçonnerie, *Ph.D.Thesis*, ENPC Paris, p.353
- Tassios et. al, 1989. In-situ strength measurement of masonry mortars. *Structural Conservation of Stone Masonry*. International Technical Conference, ICCROM, Athens.
- Toumbakari, E.-E., Van Gemert D., and Tassios T.P. 1999. Methodology for the design of injection grouts for consolidation of ancient masonry. *International RILEM Workshop on "Historic Mortars: Characteristics and Tests"*, P. J. M. Bartos, C.Groot, J.Hughes eds, Paisley, Scotland 1999, RILEM Publ. PRO12, pp.395-405.
- Toumbakari E.-E. 2002. Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls. *Doctor Thesis*. Katholieke Univ.Leuven.
- Toumbakari, E.-E., Vintzileou, E., Pisano, F., Van Gemert, D.,2000. Development of a model wall for the experimental study of three-leaf masonry walls. *Proc.12th Intern. Brick/Block Masonry Conference*, vol.III, Adell J.-M. ed., pp. 1865-1875, Madrid.
- Toumbakari E.-E., Van Gemert D., Tassios T.P., Vintzileou E. 2004. Experimental investigation and analytical modeling of the effect of injection grouts on the structural behaviour of three-leaf masonry walls. *Proc. IVth Intern. Conf. on Structural Analysis of Historical Constructions*, Padova
- Vardoulakis, I. and Kourkoulis, S.K., 1997. Mechanical properties of Dionysos marble. Final Report of the Environment Project EV5V-CT93-0300 "Monuments under seismic action", Nat. Tech. Univ. of Athens, Athens.
- Vardoulakis, I., Stavropoulou, M., and Papadopoulos, Ch., 2000. Direct tension tests on Dionysos marble. EU DG XII SMT Programme No SMT4-CT96-2130, Final Report.
- Vintzileou, E. 2001. The effect of deep rejoining on the compressive strength of brick masonry. *Masonry International*. 15, 1: pp. 8-12.