

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΡΙΠΛΩΝ ΕΝΕΜΑΤΩΝ ΥΔΡΑΣΒΕΣΤΟΥ-ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΟΖΟΛΑΝΗΣ – ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΠΟΖΟΛΑΝΩΝ

Ε.-Ε. Τουμπακάρη

Υπηρεσία Συντήρησης Μνημείων Ακρόπολης, Υπουργείο Πολιτισμού, Πολυγνώτου 10, 10555 Αθήνα

Χ.-Ε. Αδάμη, Ε. Βιντζηλαίου

*Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου
5, 15773 Ζωγράφου, Αθήνα*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία αναφέρεται η λογική σχεδιασμού τριμερών συνθέσεων ενεμάτων, η οποία στηρίζεται στον περιορισμό της περιεκτικότητας σε τσιμέντο και στη χρήση υδρασβέστου και ποζολανών. Παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα αντοχών και μικροδομής και σχολιάζεται η επιρροή των συνθηκών συντήρησης. Τέλος, γίνεται αναφορά σε αποτελέσματα συνάφειας και σχολιάζονται ορισμένοι παράγοντες που την επηρεάζουν. Οι τριμερείς συνθέσεις παρουσιάζουν ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά, περισσότερη έρευνα όμως απαιτείται για την παραγωγή συνθέσεων σταθερών επιτελεστικότητας.

Λέξεις κλειδιά: ιστορικές τοιχοποιίες, τριμερή ενέματα, πυριτική παιπάλη, μετακαολίνη

PROPERTIES AND EFFECTIVENESS OF LIME – NATURAL POZZOLANAS – CEMENT GROUTS WITH ADDITION OF ARTIFICIAL POZZOLANAS

E.-E. Toumbakari

*Office for the Conservation of the Acropolis Monuments, Ministry of Culture, Polygnotou 10,
10555 Athens*

C.-E. Adami, E. Vintzileou

*Laboratory of Reinforced Concrete, School of Structural Engineers NTUA, Iroon Polytechniou 5,
15773 Zografou, Athens*

ABSTRACT: In the present paper, the logic for the development of composite grouts is described, based on the limitation of the cement content and the use of hydrated lime and pozzolans. Characteristic results on strength and microstructure are presented and the effect of curing conditions is discussed. Finally, reference is made on bond results and on factors that affect bond. Composite mixtures present interesting properties, further research is nevertheless required for the production of mixtures with a constant performance.

Keywords: historic masonry, composite grouts, silica fume, metakaoline

ΤΡΙΜΕΡΕΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ: ΛΟΓΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Τα υλικά και οι συνθέσεις των ενεμάτων που προορίζονται για την επισκευή κι ενίσχυση ιστορικών τοιχοποιιών πρέπει να βελτιώνουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων και συγχρόνως να είναι συμβατά από φυσικο-χημικής απόψεως με τα υπάρχοντα υλικά. Η ικανοποίηση της πρώτης απαίτησης κάνει αναπόφευκτη την χρήση υδραυλικών συνθέσεων, καθώς η εφαρμογή αερικών δεν θα επέτρεπε την ανάπτυξη των αντοχών σε ένα εύλογο, από δομοστατικής άποψης, χρονικό ορίζοντα. Παράλληλα, όμως, τεκμηριώθηκε ότι η χρήση συνθέσεων που περιέχουν τσιμέντο σε μεγάλο ποσοστό δεν είναι αναγκαία για το επίπεδο και, κυρίως, το είδος των αντοχών που απαιτούνται σε μια κατασκευή από τοιχοποιία (Vintzileou 2001, Toumbakari 2002). Εντούτοις, η πλήρης αντικατάσταση του τσιμέντου από μίγματα που περιέχουν μόνο ασβέστη και ποζολάνη, εμφανίζει το μειονέκτημα της πολύ βραδείας ανάπτυξης των μηχανικών αντοχών. Φυσικά, η παρουσία φυσικών ή τεχνητών ποζολανών είναι απαραίτητη για λόγους ανθεκτικότητας. Επομένως, η χρήση τριμερών συνθέσεων τσιμέντου-υδρασβέστου-ποζολανών αποτελεί μια ενδιαφέρουσα πρό-ταση (Penelis et al. 1988). Από την παράλληλη μελέτη της ανάπτυξης της μικροδομής τριμερών συνθέσεων σε συνδυασμό με τη μελέτη για την αύξηση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών (Toumbakari et al. 1999), αποδεικνύεται ότι οι τριμερείς συνθέσεις, είτε αυτές αφορούν σε ενέματα είτε σε κονιάματα, μπορούν να αναπτύξουν μια ευρεία γκάμα μηχανικών αντοχών, χωρίς να πάψουν να πληρούν τα κριτήρια συμβατότητας που θέτουν οι διεθνείς συστάσεις. Στα πλεονεκτήματα των τριμερών συνθέσεων συγκαταλέγεται η χρήση μειωμένης ποσότητας τσιμέντου, οπότε αυτομάτως περιορίζεται το περιεχόμενο του αργίλικού τριασβεστίου, της γύψου και των διαλυτών αλκαλίων, συστατικά τα οποία συγκαταλέγονται μεταξύ των παραγόντων αστοχίας των τοιχοποιιών (Collepardi 1990). Η παρουσία των ποζολανών ενισχύει, άλλωστε, την ανθεκτικότητα και έναντι ατμοσφαιρικής φθοράς (Sabbioni et al. 2001). Στην παρούσα ανακοίνωση γίνεται αναφορά τόσο σε ορισμένες χαρακτηριστικές ιδιότητες των τριμερών συνθέσεων, όσο και σε πιθανά προβλήματα που σχετίζονται με την ανταγωνιστική ανάπτυξη της ποζολανικής αντίδρασης, της ενυδάτωσης του τσιμέντου και της ενανθράκωσης της υδρασβέστου. Με τη χρήση τεχνητών ποζολανών επετεύχθη σαφής βελτίωση των ιδιοτήτων των συνθέσεων αυτών. Κατά συνέπεια, φαίνεται ότι είναι εφικτός ο σχεδιασμός υλικών στη βάση τριμερών μιγμάτων, τα οποία ανταποκρίνονται σε κριτήρια αντοχής και ανθεκτικότητας ενώ συγχρόνως επιτρέπουν την χρήση υλικών «χαμηλών δυνατοτήτων» (Parayianni 1998).

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Υλικά και συνθέσεις

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τα τριμερή ενέματα ήταν: (α) σκόνη υδρασβέστου, (β) τσιμέντο Portland CEM I 42.5, (γ) ποζολάνη από την Μήλο (Μηλαϊκή γη) (0-75 μm), (δ) ποζολάνη Rheinisch Trass (0-80 μm), (ε) μετακαολίνης (0-20 μm), (στ) πυριτική παιπάλη και (ζ) υπερρυστοποιητής. Οι συνθέσεις των ενεμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Η περιεκτικότητα σε νερό (W/S) κυμαινόταν μεταξύ 0.8-0.9 (για τα ενέματα 13a-0 έως 15b-10), 1.1 (για τα ενέματα G2 και G3) και 0.85-0.90 (για τα ενέματα G1, G4 & G5), και προέκυψε από τις δοκιμές διεισδυτικότητας σε στήλες άμμου με κενά μικρότερα των 0.3mm. Για την αύξηση της ρευστότητας, χρησιμοποιήθηκε υπερρυστοποιητής (1-1.5%-κ.β.στερεών).

Χαρακτηριστικά τριμερών ενεμάτων

Αρχικά μελετήθηκαν ενέματα χωρίς τεχνητές ποζολάνες, με σκοπό να καθοριστεί το ελάχιστο απαιτούμενο ποσοστό τσιμέντου. Δυο ποσοστά τσιμέντου εξετάστηκαν: 10%-κ.β. και 30%-κ.β. στερεών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε κάμψη και θλίψη δοκιμίων 40x40x160mm

παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Η θλιπτική αντοχή των ενεμάτων που περιέχουν τσιμέντο Portland σε ποσοστό 30%-κ.β. αυξάνεται σταθερά. Τα ενέματα με αναλογία ασβέστη:ποζολάνη 1:3 εμφάνισαν μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή από όλα τα υπόλοιπα, φτάνοντας τα 13 MPa. Αντιθέτως, ανάμεσα στα ενέματα με το χαμηλότερο περιεχόμενο ποσοστό τσιμέντου (10%-κ.β.) δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στην θλιπτική αντοχή. Όμως η ιδιότητα που δίνει τις καλύτερες πληροφορίες σχετικά με την μικροδομή του υλικού και την εξέλιξη της είναι η καμπτική αντοχή των ενεμάτων και όχι η θλιπτική τους αντοχή. Οι συνθέσεις που περιέχουν 30% τσιμέντο εμφανίζουν μεγαλύτερες αντοχές σε κάμψη από εκείνες με το 10%. Η καμπτική αντοχή, και για τους δυο τύπους ενεμάτων αυξήθηκε μέχρι την ηλικία των 60 ημερών. Τότε, παρατηρήθηκε μια πτώση της καμπτικής αντοχής των ενεμάτων που περιείχαν.

Πίνακας 1. Συνθέσεις τριμερών ενεμάτων

κωδικός	σύνθεση [%-κ.β.]				υδράσβεστος : ποζολάνες
	υδράσβεστος	Rh.Trass	πυρ.παιπάλη	τσιμέντο	
13a-0	22.5	67.5	0.0	10.0	1:3
14a-0	18.0	72.0	0.0	10.0	1:4
15a-0	15.0	75.0	0.0	10.0	1:5
13b-0	17.5	52.5	0.0	30.0	1:3
14b-0	14.0	56.0	0.0	30.0	1:4
15b-0	11.7	58.3	0.0	30.0	1:5
13b-5	17.5	47.5	5.0	30.0	1:3
14b-5	14.0	51.0	5.0	30.0	1:4
15b-5	11.7	53.3	5.0	30.0	1:5
13b-10	17.5	42.5	10.0	30.0	1:3
14b-10	14.0	46.0	10.0	30.0	1:4
15b-10	11.7	48.3	10.0	30.0	1:5
	υδράσβεστος	μετακαολίνη	τσιμέντο		
G1	20.0	0.0	80.0		-
G2	35.0	35.0	30.0		1:1
G3	47.0	23.0	30.0		2:1
	υδράσβεστος	Μηλαϊκή γη	τσιμέντο		
G4	20.0	50.0	30.0		1: 2.5
G5	35.0	35.0	30.0		1:1

10% τσιμέντο. Στις 180 ημέρες, η καμπτική αντοχή αυτών των ενεμάτων φαίνεται να είναι πρακτικώς μηδενική! Αντίθετα, η καμπτική αντοχή των συνθέσεων που περιείχαν τσιμέντο Portland 30%-κατά βάρος, αυξήθηκε έως την ηλικία των 90 ημερών και έπειτα μειώθηκε ελαφρώς μέχρι τις 180 ημέρες.

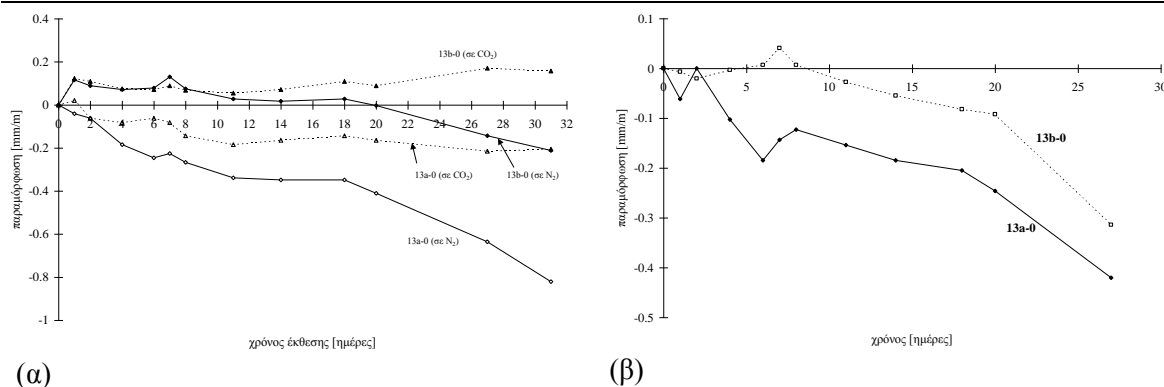
Επιρροή της περιεκτικότητας σε τσιμέντο και των συνθηκών συντήρησης στην εσωτερική ρηγμάτωση τριμερών συνθέσεων

Η καμπτική αντοχή είναι μια μηχανική ιδιότητα ευάλωτη στην εσωτερική μικρορηγμάτωση. Η παρατηρηθείσα μείωση της αντοχής μπορεί πιθανώς να αποδοθεί σε μια προοδευτική μικρορηγμάτωση, στην οποία τα ενέματα με ποσοστό τσιμέντου 10%κ.β. είναι πιο ευάλωτα. Οι παράγοντες που προκαλούν μικρορηγμάτωση είναι φυσικά η συστολή ξήρανσης καθώς και οι διάφορες χημικές αντιδράσεις (ενυδάτωση τσιμέντου, ποζολανική αντίδραση). Στις μελετηθείσες

τριμερείς συνθέσεις παρατηρήθηκε η ανάπτυξη δύο περιοχών, μιας εξωτερικής ενανθρακωμένης ζώνης κι ενός πυρήνα,

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

ηλικία [ημέρες]	13a-0		14a-0		15a-0		13b-0		14b-0		15b-0	
	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$
14	0.7	0.3	0.6	0.3	0.7	0.4	1.8	0.8	1.8	0.7	1.8	0.7
28	2.2	0.7	2.4	0.9	2.1	0.8	3.2	1.5	3.3	1.3	3.5	1.2
60	4.7	1.6	4.7	1.9	4.5	1.9	6.9	2.0	4.5	1.5	5.5	1.9
90	5.0	1.0	4.9	1.7	5.4	1.1	7.8	2.5	6.5	2.2	7.3	2.3
180	5.6	0.4	4.6	0.4	4.1	0.0	13.1	2.3	10.9	2.0	11.2	1.9



Σχήμα 1. Επιρροή (α) των συνθηκών συντήρησης στη μεταβολή του μήκους των δοκιμίων, (β) της περιε-κτικότητας σε τσιμέντο στη μεταβολή του μήκους των δοκιμίων που συντηρήθηκαν σε συνθήκες N_2 και CO_2

στον οποίο η ενυδάτωση του τσιμέντου και η ποζολανική αντίδραση συνεχίζονταν. Οι παρατηρήσεις αυτές επιβεβαιώθηκαν με την εφαρμογή φαινολφθαλείνης. Οι διαφορετικές συστολές που σχετίζονται με τις δύο αυτές αντιδράσεις πιθανώς δημιούργησαν εφελκυστικές τάσεις στη διεπιφάνεια των δύο αυτών περιοχών, οι οποίες οδήγησαν σε προοδευτική μικρορηγμάτωση. Άλλωστε, στη βιβλιογραφία (Justnes 1998) αναφέρεται ότι η συνολική χημική συστολή συνθέσεων υδρασβέστου – ιπτάμενων τεφρών είναι μεγαλύτερη εκείνης συνθέσεων με τσιμέντο Portland. Αντίστοιχα δεδομένα για συνθέσεις υδρασβέστου – φυσικών ποζολανών δεν είναι, εξ όσων γνωρίζουμε, διαθέσιμα. Για να ελεγχθεί πάντως η υπόθεση αυτή, μετρήθηκε η μεταβολή του μήκους δοκιμίων διαστάσεων 40x40x160mm, τα οποία παρασκευάστηκαν από τα ενέματα 13a-0 και 13b-0 και συντηρήθηκαν σε δύο διαφορετικές συνθήκες: δοκίμια και από τις δύο συνθέσεις συντηρήθηκαν σε αποξηραντή, στον οποίο διοχετευόταν συστηματικά άζωτο (ώστε να αποφευχθεί η ενανθράκωση), ενώ μια άλλη ομάδα δοκιμίων συντηρήθηκε σε αποξηραντή, στον οποίο διοχετευόταν συστηματικά διοξείδιο του άνθρακα (ώστε να επιταχυνθεί η ενανθράκωση). Με τον τρόπο αυτό θεωρούμε ότι επετεύχθη η «περιγραφή» των δύο διαφορετικών ζωνών του υλικού. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα του Σχήματος 1(α), η συστολή των ενεμάτων που συντηρήθηκαν σε συνθήκες N_2 συνεχίζεται καθ'όλη τη διάρκεια των δοκιμών και, μάλιστα, είναι πολύ μεγαλύτερη για τη σύνθεση με τη μικρότερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Αντίθετα, η μεταβολή μήκους των δοκιμίων που συντηρήθηκαν σε συνθήκες CO_2 σταματά με το πέρασ 7-10 ημερών. Στο Σχήμα 1(β) παρουσιάζεται, για κάθε σύνθεση ξεχωριστά, η διαφορά μεταξύ των μεταβολών μήκους που μετρήθηκαν στις δύο διαφορετικές συνθήκες. Η διαφορά αυτή αποτελεί εκτιμήτρια των εντάσεων στη διεπιφάνεια μεταξύ της εξωτερικής ενανθρακωμένης ζώνης και του

πυρήνα. Η διαφορά αυτή είναι σαφώς πιο σημαντική για τη σύνθεση με το μικρότερο ποσοστό τσιμέντου, και συνεπώς θα μπορούσε να εξηγήσει την ανάπτυξη μικρορηγματώσεων, οι οποίες οδηγούν στη μείωση της καμπτικής αντοχής των δοκιμίων. Αντίθετα, η παρουσία ενός μεγαλύτερου ποσοστού τσιμέντου δημιουργεί μια ανθεκτικότερη μικροδομή στις μικρές ηλικίες, στο εσωτερικό της οποίας μπορεί να εξελιχθεί, με το δικό της βραδύτερο ρυθμό, η ποζολανική αντίδραση.

Πίνακας 3. Θλιπτική και καμπτική αντοχή ενεμάτων που περιέχουν πυριτική παιπάλη [MPa]

ηλικία	13b-5		13b-10		14b-5		14b-10		15b-5		15b-10	
[ημέρες]	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$
28	4.3	1.2	6.5	1.7	4.4	1.2	5.4	1.5	4.1	1.2	5.6	1.2
60	8.2	1.6	11.9	2.0	6.8	1.3	8.7	2.0	7.3	1.2	8.2	1.8
90	12.9	3.0	15.9	3.4	11.5	3.0	16.0	2.6	12.0	2.8	17.2	2.7
180	13.6	3.2	16.0	3.3	13.0	2.7	16.2	2.9	15.8	2.7	16.1	3.0

Επιρροή της προσθήκης πυριτικής παιπάλης και μετακαολίνη στην αντοχή των συνθέσεων

Το δεύτερο μέρος της έρευνας, περιελάμβανε την βελτίωση των τριμερών συνθέσεων με την προσθήκη πυριτικής παιπάλης. Δυο τύποι ενεμάτων εξετάστηκαν: με 5%-κατά βάρος και 10%-κατά βάρος πυριτική παιπάλη, σε αντικατάσταση της ίδιας ποσότητας της Rheinisch Trass. Η προσθήκη της πυριτικής παιπάλης αύξησε την θλιπτική αντοχή των ενεμάτων, ήταν δε ακόμα πιο αποτελεσματική σε σχέση με την καμπτική αντοχή των ενεμάτων (Πίνακας 3). Για παράδειγμα, η καμπτική αντοχή του ενέματος 13b-10 ήταν 40% υψηλότερη από την αντίστοιχη του ενέματος 13b-0. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα ενέματα που σχεδιάστηκαν με ένα λόγο 1:3 παρουσίασαν τις μεγαλύτερες τιμές της καμπτικής αντοχής. Η χρήση της πυριτικής παιπάλης, παρουσιάζει όμως μειονεκτήματα, τα οποία σχετίζονται κυρίως με την βελτιστοποίηση της διασποράς, καθώς απαιτεί συγκεκριμένες συνθήκες ιδιαίτερα στην περίπτωση που η περιεκτικότητα σε νερό πρέπει να διατηρηθεί χαμηλή. Η χρήση πολύ λεπτόκοκκων ποζολανών-όχι όμως τόσο λεπτόκοκκων όσο η πυριτική παιπάλη- θα μπορούσε να είναι μια εναλλακτική πρόταση. Πράγματι, η εφαρμογή του λεπτόκοκκου μετακαολίνη σε ενέματα (Αδάμη 2005), δεν απαιτούσε την χρήση ειδικής μηχανής ανάδευσης, παρόλο που η αυξημένη λεπτότητα των στερεών οδήγησε σε μια αναπόφευκτη αύξηση του περιεχόμενου νερού από 0.8-0.9 σε 1.1-1.2. Σχετικά με τις αντοχές (Πίνακας 4), το ένεμα G2 στις 90 ημέρες προσέγγισε την αντοχή του ενέματος 13b-0 που αντιστοιχεί στις 180 ημέρες. Το ποσοστό του ασβέστη στις δυο συνθέσεις ήταν 30%-κ.β. και 17.5%-κ.β. αντίστοιχα. Η αύξηση του ποσοστού του ασβέστη στο ένεμα G3 (από 35% στο 47%) είχε ως (αναμενόμενο) αποτέλεσμα την μείωση των αναπτυσσόμενων αντοχών. Τα αποτελέσματα του ενέματος G2 είναι συγκρίσιμα με αυτά των 13b-5 και 15b-5 στην ηλικία των 90 ημερών, τα οποία περιέχουν 5%-κ.β. πυριτική παιπάλη. Η σύνθεση του ενέματος G4 είναι πρακτικώς συγκρίσιμη με εκείνη του ενέματος 13b-0. Γενικά, η θλιπτική αντοχή αποτελεί μια καλή ένδειξη για το αν ο λόγος ασβέστη:ποζολάνη είναι ο βέλτιστος για μια σύνθεση.

Επιρροή της προσθήκης μετακαολίνη στην συνάφεια

Σε αυτό το μέρος της έρευνας εξετάστηκε η επίδραση της προσθήκης μετακαολίνη στην συνάφεια σε εφελκυσμό σύνθετων δοκιμίων υποβάθρου/ενέματος, και στην αντοχή και στον τρόπο αστοχίας. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα απευθείας εφελκυσμού με την χρήση μιας τροποποιημένης μεθόδου των θραυσμάτων (Katsaragakis 1987). Εξετάστηκαν τρεις τύποι υποβάθρων: ένα ασβεστολιθικό με χαμηλό πορώδες (μάρμαρο), ένα ασβεστολιθικό με υψηλό πορώδες (τραβερίτης) και ένα αργιλικό (οπτόπλινθος βυζαντινού τύπου). Για την καλύτερη προσομοίωση του εσωτερικού της τοιχοποιίας στην οποία εγχώνεται τελικώς το ένεμα, έγινε μηχανική τράχυνση

των επιφανειών των ασβεστο-λιθικών υποβάθρων. Το πάχος του αρμού ενέματος του σύνθετου δοκιμίου επιλέχθηκε να είναι ίσο με 3 mm, και υλοποιήθηκε με ένα σύστημα από μεταλλικές πλάκες και ντίξες. Μετά την παρασκευή τους, τα σύνθετα δοκίμια συντηρήθηκαν σε πλαστική μεμβράνη στον υγρό θάλαμο σε συνθήκες σχετικής υγρασίας RH=98%±2 και θερμοκρασίας T=20±2 °C. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στις ηλικίες των 28, 60 και 90 ημερών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 4. Θλιπτική και καμπτική αντοχή των ενεμάτων που περιέχουν μετακαολίνη [MPa]

ημέρες	G1 (αναφορά)		G2		G3		G4		G5	
7	13.3	3.7	5.1	1.3	3.5	0.7	1	0.6	-	-
28	14.6	3.4	9.9	2.0	7.3	2.3	3.3	1.7	2.8	0.8
90	17.9	4.5	13.6	1.0	7.9	1.9	7.6	1.9	5.7	1.4
180	25.9	4.7	8.1	1.3	7.1	1.3	6.9	1.3	-	-

Πίνακας 5 Τρόπος αστοχίας και συνάφεια σε εφελκυσμό σύνθετων δοκιμίων που περιέχουν μετακαολίνη [MPa]

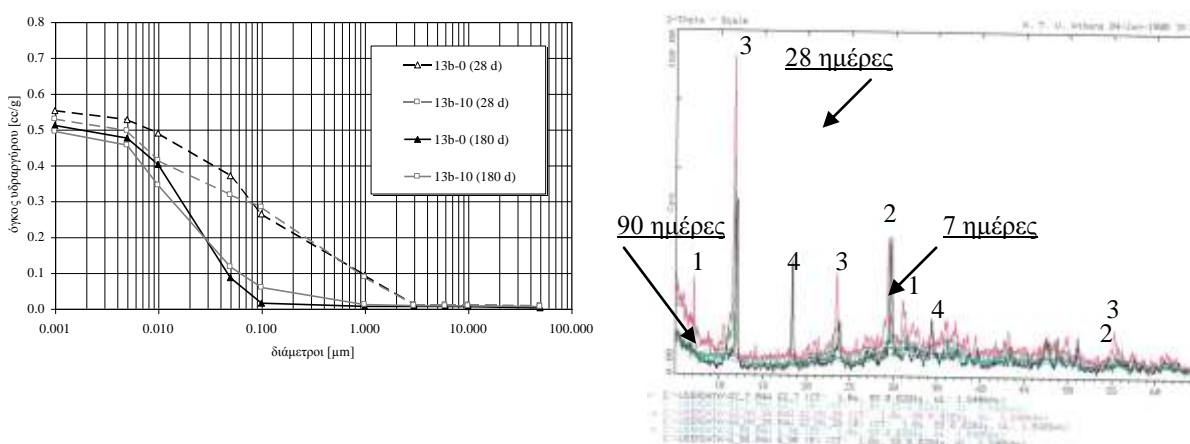
ένεμα	ημέρες	υπόβαθρο					
		μάρμαρο		τραβερίτινης		οπτόπλινθος	
		θέση αστοχίας	f _t	θέση αστοχίας	f _t	θέση αστοχίας	f _t
G1	28	[Δ+E,Δ+E,Δ]	0.93	[Y,Y,Δ+E]	1.57	[Y,Y,Y]	0.85
G1	90	[Δ+E,Δ+E,Δ]	0.85	[Z,Z,Z]	1.41	[Y,Y,Y]	0.71
G2	28	[Z,Z,Z]	1.04	[E,E,E,Z,E,Z]	1.23	[Y,Y,Y,Y]	0.75
G2	60	[E+Y,E+Y,E+Y]	1.41	[E,E,E+Y]	1.07	[Y,Y,Y+Δ]	0.73
G2	90	[Z,Z,Δ]	1.00	[E,Δ,E+Y]	1.72	[Y,Y,Y]	0.79
G4	28	[Δ,Δ,Δ]	0.33	[-,Z,Z]	1.48	[Y,Y,Y]	0.88
G4	60	[Δ,Δ,Δ]	0.36	[Z,Δ,Z]	1.18	[Y,Y,Y]	0.78
G4	90	[Z,Δ,Z]	0.38	[E,E,E]	0.75	[Y,Y,Y]	0.69

Υπόμνημα:

- Δ: αστοχία με αποκόλληση του αρμού ενέματος από το υπόβαθρο (αστοχία της διεπιφάνειας), ένεμα παραμένει κολλημένο στην μια επιφάνεια του υποβάθρου
- Z: αστοχία με αποκόλληση του αρμού ενέματος, ένεμα όμως παραμένει συγκολλημένο και στις δυο επιφάνειες του υποβάθρου
- E: εφελκυστική αστοχία του ενέματος
- Y: αστοχία στο υπόβαθρο
- Η ύπαρξη του συμβόλου «+» υποδηλώνει την μίξη δυο τρόπων αστοχίας

Τα αποτελέσματα για την εφελκυστική αντοχή των σύνθετων δοκιμίων υποβάθρων/ενέματος κυμαίνονται για όλους τους συνδυασμούς από 0,68MPa έως 1.72MPa. Η διασπορά των τιμών της εφελκυστικής αντοχής εντός κάθε τριάδας δοκιμίων είναι μικρή, κάτι που υποδηλώνει ότι όλα τα ενέματα παρουσιάζουν σταθερότητα. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι η υψηλότερη τιμή της εφελκυστικής αντοχής σύνθετου δοκιμίου εμφανίζεται για όλους τους τύπους των ενεμάτων στο υπόβαθρο του τραβερίτινη, κάτι που πιθανώς να οφείλεται στην φυσική τραχύτητα του λίθου λόγω του μεγάλου πορώδους του. Οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής των σύνθετων δοκιμίων με τον τραβερίτινη παρουσιάζουν μια σταθερότητα με τον χρόνο για το ένεμα αναφοράς (της τάξης του 1.5MPa) και μια αυξητική τάση για το ένεμα G2, που για την ηλικία των 90 ημερών προσεγγίζει την τιμή των 1.72 MPa. Η άνοδος αυτή μπορεί να εξηγηθεί από την πύκνωση της δομής της ζώνης της διεπιφάνειας υποβάθρου και ενέματος μετακαολίνη, λόγω της εξέλιξης της ποζολανικής

αντίδρασης. Το ίδιο παρατηρείται και με τα σύνθετα δοκίμια αυτών των συνθέσεων με το μαρμάρينو υπόβαθρο. Σχετικά με το ένεμα G4, παρατηρείται πτώση των αντοχών των δοκιμίων τραβερίνη/G4 από τις 28 στις 60 και στις 90 ημέρες. Από την μελέτη της επιφάνειας θραύσης διαπιστώνεται η ύπαρξη μιας μεγάλης ενανθρακωμένης ζώνης (ως δέσμη) μέσα στο ένεμα, πράγμα που αποδίδεται στην ποιότητα του λίθου, που λόγω του υψηλού πορώδους του επέτρεψε την είσοδο αέρα στον αρμό του ενέματος. Από την άλλη, η εφελκυστική αντοχή στα σύνθετα δοκίμια με μαρμάρينو υπόβαθρο, είναι 3 φορές μικρότερη από εκείνη των ενεμάτων G1 και G2. Τέλος, για όλους τους συνδυασμούς ενεμάτων/ οπτοπλίνθων η αστοχία εμφανίζεται στο υπόβαθρο. Επομένως η εφελκυστική αντοχή της οπτοπλίνθου είναι μεταξύ 0,69 και 0,88MPa. Όσον αφορά το ύψος ενανθράκωσης του αρμού ενέματος για τα σύνθετα δοκίμια, αυτό είναι μεγαλύτερο για το υπόβαθρο μαρμάρου (της τάξης των 4mm για τις 90 ημέρες για τα ενέματα G1 και G4, 2mm για το G2) και πρακτικώς μηδενικό για τα άλλα υπόβαθρα (μικρότερο από 0,5mm). Επίσης, παρατηρούνται ρηγματώσεις στο εσωτερικό του αρμού του ενέματος για τα ενέματα G2 και G4, πιθανώς λόγω συστολής ξήρανσης.



Σχήμα 2 (α) Μεταβολή του συνολικού πορώδους συνθέσεων με και χωρίς πυριτική παιπάλη στην ηλικία των 28 και 180 ημερών, (β) Αποτελέσματα XRD σύνθεσης G2 για τις 7, 28 και 90 ημέρες
Υπόμνημα: 1. Ένυδρος γελενίτης C_2ASH_8 , 2. C-S-H_i ($2\theta=54,930$), 3. Calcium aluminate hydrates C_xAH_y , 4. Πορτλαντίτης ($Ca(OH)_2$)

Προϊόντα ενυδάτωσης και πορώδες τριμερών συνθέσεων: ενδεικτικά στοιχεία

Σε αυτό το τμήμα της μελέτης παρουσιάζονται τα προϊόντα ενυδάτωσης των ενεμάτων που περιείχαν μετακαολίνη, για τις ηλικίες των 7, 28 και 90 ημερών, τα οποία βρέθηκαν με την μέθοδο της περίθλασης ακτίνων X (XRD). Αρχικώς, αναζητήθηκαν από την βιβλιογραφία τα βασικά προϊόντα ενυδάτωσης του συστήματος μετακαολίνη-ασβέστη. Σε πάστες με λόγο μετακαολίνη:ασβέστη ίσο με 1 (MK:L=1) ταυτοποιήθηκαν ένυδρα πυριτικά ασβέστια (C-S-H) και ένυδρος γελενίτης (C_2ASH_8) (Murat 1983). Επίσης, σε πάστες με την ίδια αναλογία MK:L=1 και περίσσεια νερού μέσω DTA/TG ταυτοποιήθηκαν C_2ASH_8 , C_4AH_{13} (ίχνη) και C-S-H, ενώ στις 180 ημέρες ο πορτλαντίτης έχει καταναλωθεί (Cabrera & Rojas 2001, Rojas & Cabrera 2002). Τα ίδια προϊόντα ενυδάτωσης για διάφορους λόγους MK:L βρήκαν οι Da Silva και Glasser (1992). Στην παρούσα εργασία βρέθηκαν ποσότητες ένυδρου γελενίτη (C_2ASH_8), ένυδρων αργιλικών ασβεστίων (C_xAH_y), ένυδρων πυριτικών ασβεστίων (C-S-H) και πορτλαντίτη (CH). Διαπιστώθηκε επίσης μείωση της περιεκτικότητας σε C_xAH_y σε μεγαλύτερες ηλικίες, σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία. Τέλος, αναφέρεται (ποιοτικά) μείωση του CH και κατανάλωσή του ως τις 90 μέρες (Σχήμα 2β).

Τέλος, στο Σχήμα 2α παρουσιάζεται και συγκρίνεται η εξέλιξη του συνολικού πορώδους των συνθέσεων 13b-0 και 13b-10 στις ηλικίες των 28 και 180 ημερών, όπως μετρήθηκε με ποροσιμετρία υδραργύρου (MIP). Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μείωση του πορώδους της σύνθεσης 13b-10 σε σχέση με την 13b-0 στην περιοχή κάτω των 0.1μm στην ηλικία των 28 ημερών, προφανώς λόγω της παρουσίας της πυριτικής παιπάλης. Με το πέρας των 180 ημερών, παρατηρείται και στις δύο περιπτώσεις μια εξαιρετική μείωση του πορώδους, ιδιαίτερα στην περιοχή μεταξύ 0.005-3 μm λόγω κυρίως της εξελισσόμενης ποζολανικής αντίδρασης. Στην ηλικία των 180 ημερών, οι δύο συνθέσεις παρουσιάζουν πολύ μικρές διαφορές, παρά το γεγονός ότι στη σύνθεση 13b-10 περιέχεται 10%κ.β. πυριτική παιπάλη.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας επιτρέπουν να συναχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Είναι δυνατή η ανάπτυξη συνθέσεων με την χρήση περιορισμένης ποσότητας τσιμέντου και διάφορων ποσοτήτων ασβέστη και ποζολάνης, τα οποία να παρουσιάζουν καλή μηχανική συμπεριφορά και να είναι σε θέση να αναπτύξουν μια μεγάλη ποικιλία αντοχών.
2. Ένα περιεχόμενο ποσοστό τσιμέντου της τάξης του 30% κατά βάρος είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη ενεμάτων υψηλής διεισδυτικής ικανότητας. Μικρότερα ποσοστά τσιμέντου φαίνεται ότι οδηγούν σε αστάθειες, όσον αφορά στις μηχανικές ιδιότητες και τη μικροδομή των ενεμάτων.
3. Οι τριμερείς συνθέσεις είναι ιδιαίτερα ευπαθείς στις συνθήκες συντήρησης. Για τον λόγο αυτό είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλίζονται οι κατάλληλες συνθήκες συντήρησης στο πεδίο για τουλάχιστον δυο έως τρεις εβδομάδες από την εφαρμογή των ενεμάτων.
4. Με τη χρήση τεχνητών ποζολανών επετεύχθη σαφής βελτίωση των ιδιοτήτων των συνθέσεων αναφοράς.

Γενικεύοντας, θεωρούμε ότι οι τριμερείς συνθέσεις μπορούν να αποτελέσουν μια καλή βάση για το σχεδιασμό σύνθετων υλικών μεγάλου εύρους μηχανικών αντοχών ενώ συγχρόνως επιτρέπουν την χρήση υλικών όπως είναι τα βιομηχανικά παραπροϊόντα και οι τεχνητές ποζολάνες.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Αδάμη, Χ.-Ε.. 2005. *Ανάπτυξη και μελέτη των φυσικο-χημικών ιδιοτήτων υψηλής διεισδυτικότητας ενεμάτων ασβέστη-μετακαολίνη. Διερεύνηση της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας μεταξύ υπαρχόντων και υλικών επισκευής*, Διδ.Διατριβή (υπό εκπόνηση), Εργ.Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ.
2. Cabrera, J. & Frias Rojas, M. 2001. Mechanism of hydration of the metakaolin-lime-water system, *Cement and Concrete Research*, 31: 177-182.
3. Collepardi, M. 1990. Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings, *Materials and Structures*, 23: 81-102.
4. Justnes H., Ardoullie, B. Hendrix, E. Sellevold, E. J. & Van Gemert D. 1998. The chemical shrinkage of pozzolanic reaction products, *Proc. 6th Intern. Conf. on "Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete"* - ACI SP 178-33, V.M.Malhotra ed. Bangkok: 191-205.
5. Katsaragakis, ES. 1987. A new tensile test for concrete. *Materials & Structures*, 20:120-125.
6. Murat, M. 1983. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. I. Preliminary investigation on metakaolinite. *Cement and Concrete Research*, 13 : 259-266.

7. Papayianni, I. 1998. A diachronic principle in construction: the use of mixed type binders – Durability aspects, *Proc J.C.Cabrera Symp.Durability of Building Materials*, R.N.Swamy ed., Bangkok: 115-129.
8. Penelis G., Karaveziroglou M. & Papayianni I. 1988. Grouts for Repairing and Strengthening Old Masonry Structures. *Intern.Conf. on "Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings"-STREMAH*, Brebbia C. ed.: 179-188.
9. Frias Rojas, M. & Cabrera, J. 2002. The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin-lime-water systems, *Cement and Concrete Research*, 32 : 133-138.
10. Sabbioni, C., Zappia, G., Riontino, C., Blanco, M.-T., Aguilera, J., Palomo, A., Van Balen, K. and Toumbakari, E.-E. 2001. Atmospheric deterioration of ancient and modern hydraulic mortars, *Atmospheric Environment*, 35 (3): 539-548.
11. De Silva, P.S. & Glasser, F.P. 1993. Phase relations in the system CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O relevant to metakaolin-calcium hydroxide hydration, *Cement and Concrete Research*, 23 : 627-639.
12. Toumbakari, E.-E., Tenoutasse, N. & Van Gemert, D. 1999. Microstructural evolution and mechanical properties of pozzolanic injection grouts. *Proc. 7th Euroseminar on Microscopy applied to Building Materials*, J. A. Larbi et al eds, Delft: 345-353.
13. Toumbakari, E.-E. 2002. *Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls*. Διδ.Διατριβή, Katholieke Univ.Leuven.
14. Vintzileou, E. 2001. The effect of deep rejoining on the compressive strength of brick masonry, *Masonry International*, 15, 1: pp. 8-12.