

ΒΕΛΤΙΩΣΗ – ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΕΝΕΣΕΙΣ ΑΙΩΡΗΜΑΤΩΝ ΛΕΙΟΤΡΙΒΗΜΕΝΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Ι. Ν. Μάρκου

*Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο
Πανεπιστήμιο Θράκης, Βασ. Σοφίας 12, 67100 Ξάνθη*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η βελτίωση που επιφέρουν τα αιωρήματα λειοτριβημένης ιπτάμενης τέφρας Πτολεμαΐδας στα χαρακτηριστικά εμποτισμένων άμμων διερευνήθηκε πειραματικά. Χρησιμοποιήθηκαν καθαρές άμμοι με διαφορετικές κοκκομετρικές συνθέσεις και εμποτίστηκαν δοκίμια διαμέτρου 5 cm και ύψους 11,2 cm. Στα εμποτισμένα δοκίμια έγιναν δοκιμές διαπερατότητας και τριαξονικής φόρτισης. Διαπιστώθηκε ότι η μείωση της διαπερατότητας του εδάφους λόγω εμποτισμού κυμαίνεται από 4 ως 7 τάξεις μεγέθους. Ο εμποτισμός αυξάνει την ακαμψία και μειώνει την παραμορφωσιμότητα της άμμου. Οι τιμές της συνοχής των εμποτισμένων άμμων κυμαίνονται από 280 kPa ως 450 kPa μετά από ωρίμανση 28 ημερών και αυξάνονται κατά 30%, κατά μέσο όρο, για περίοδο ωρίμανσης που φθάνει τους 70 μήνες.

Λέξεις κλειδιά: ενέσεις εμποτισμού, ιπτάμενη τέφρα, εμποτισμένη άμμος, εργαστηριακός προσδιορισμός, διαπερατότητα, διατμητική αντοχή, τριαξονική φόρτιση

SOIL IMPROVEMENT – REINFORCEMENT BY PULVERIZED FLY ASH SUSPENSION GROUTING

I. N. Markou

*Soil Mechanics & Foundation Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering,
Democritus University of Thrace, 12 Vas. Sofias Str., GR-67100 Xanthi*

ABSTRACT: A laboratory investigation was conducted in order to evaluate the improvement of shear strength and permeability of sands grouted with pulverized Ptolemaida fly ash suspensions. Suspensions were injected into clean sands with different gradations and the grouted specimens (diameter 5 cm and height 11.2 cm) were tested in triaxial compression. Permeability tests were also carried out. The coefficient of permeability of the sands is improved by 4 to 7 orders of magnitude. Grouting increases the stiffness and reduces the deformability of the sands. The cohesion values of grouted sands range from 280 kPa to 450 kPa after 28 days of curing and increase by 30%, on the average, when the curing period is extended to 70 months.

Keywords: injection grouting, fly ash, grouted sand, laboratory investigation, permeability, shear strength, triaxial compression

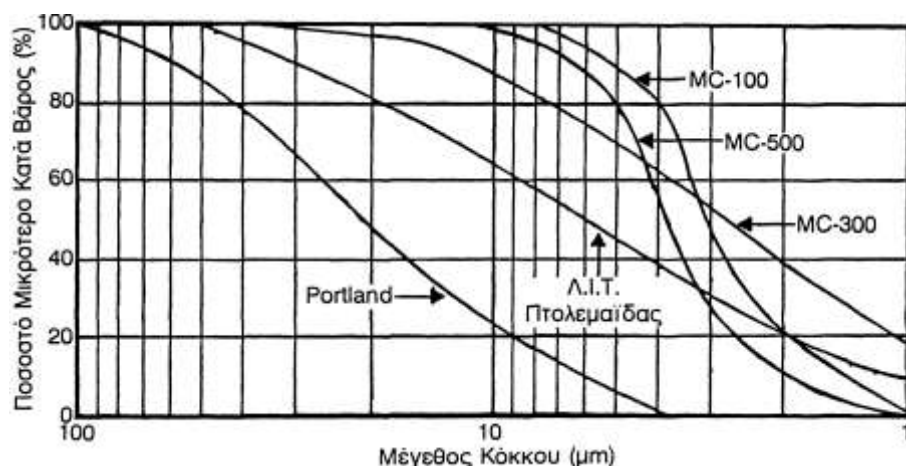
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιπτάμενη τέφρα είναι παραπροϊόν της καύσης του άνθρακα στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Η ποσότητα ιπτάμενης τέφρας που παράγεται ετησίως είναι πολύ μεγάλη αλλά μόνο ένα μικρό ποσοστό αυτής της ποσότητας αξιοποιείται, κυρίως από τις βιομηχανίες παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος. Η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται και σε ενέσεις εμποτισμού για τη βελτίωση – ενίσχυση εδαφών. Στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων χρησιμοποιούνται αιωρήματα ιπτάμενης τέφρας – τσιμέντου. Αιωρήματα που περιέχουν μόνο ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιούνται σαν φθηνά ενέματα χαμηλής αντοχής για την πλήρωση μεγάλων εγκοίλων στο υπέδαφος. Ενέσεις εμποτισμού με αιωρήματα ιπτάμενης τέφρας δεν έχουν αναπτυχθεί λόγω του γεγονότος ότι οι ιπτάμενες τέφρες με ποζολανικές ιδιότητες δεν αναπτύσσουν από μόνες τους σημαντική αντοχή. Όμως, οι “υδραυλικές” ιπτάμενες τέφρες, που περιέχουν αρκετή ποσότητα ασβεστίου ώστε να παρουσιάζουν ιδιότητες αυτοτσιμέντωσης, έχουν δυνατότητα ανάπτυξης αντοχών χωρίς την παρουσία τσιμέντου ή ασβέστου και φαίνεται ότι μπορούν να αξιοποιηθούν από μόνες τους σε ενέσεις εμποτισμού. Η εργαστηριακή διερεύνηση που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία αποτελεί μέρος εκτεταμένου ερευνητικού προγράμματος που είχε σαν στόχο τη δημιουργία ενός σχετικά λεπτόκοκκου υλικού από Ελληνική ιπτάμενη τέφρα (χωρίς την προσθήκη τσιμέντου ή ασβέστου), κατάλληλου για ενέσεις εμποτισμού τύπου αιωρήματος. Ειδικότερα, παρουσιάζονται αποτελέσματα σχετικά με τη βελτίωση που επιφέρει ο εμποτισμός με αιωρήματα ιπτάμενης τέφρας στα χαρακτηριστικά (διατμητική αντοχή και διαπερατότητα) και στις παραμέτρους παραμορφωσιμότητας των άμμων.

ΥΛΙΚΑ

Η ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας επελέγη ως η πλέον κατάλληλη για την έρευνα αυτή διότι είναι άριστο ποζολανικό υλικό με υδραυλικές ιδιότητες που βελτιώνονται με τη λειοτριβήση. Κονιάματα που αποτελούνται μόνο από ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας, αναπτύσσουν αντοχές ίσες με το 60% έως 70% αυτών που αναπτύσσουν παρόμοια μίγματα από κοινό τσιμέντο Portland στις 28 ημέρες (Papaïanni 1987). Σκυροδέματα από ιπτάμενη τέφρα αναπτύσσουν αντοχές περίπου ίσες με το 40% των αντοχών των σκυροδεμάτων χωρίς ιπτάμενη τέφρα και ικανοποιητική αντοχή σε διάρκεια (Papaïanni 1986). Η ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας αποτελείται από τα ίδια οξείδια όπως και τα τσιμέντα σε διαφορετικές, όμως, συγκεντρώσεις. Το ποσοστό CaO που περιέχει αυτή η ιπτάμενη τέφρα (32%) θεωρείται υψηλό σε σχέση με άλλες απλά ποζολανικές ιπτάμενες τέφρες. Η υδραυλική δράση της σχετίζεται με την παρουσία σε αυτήν ελεύθερης ασβέστου και ενεργού πυριτίου τα οποία αντιδρούν και σχηματίζουν πυκνωμα C-S-H που επιφέρει αύξηση της αντοχής (Papaïanni 1987). Η ιπτάμενη τέφρα λειοτριβήθηκε για να βελτιωθεί η ενεσιμότητα και η διεισδυτικότητα των αιωρημάτων της και για να αυξηθεί η υδραυλική δράση της. Η λειοτριβημένη ιπτάμενη τέφρα έχει ειδική επιφάνεια κατά Blaine μεγαλύτερη από 8300 cm²/gr και κοκκομετρική διαβάθμιση που φαίνεται στο Σχήμα 1. Στο Σχήμα 1 δίνονται και οι κοκκομετρικές καμπύλες διαφόρων τσιμέντων (Schwarz & Krizek 1992) και παρατηρείται ότι η λειοτριβημένη ιπτάμενη τέφρα υπερέχει σαφώς έναντι του κοινού τσιμέντου Portland, υστερεί όμως έναντι των τριών πιο γνωστών λεπτόκοκκων τσιμέντων για ενέσεις εμποτισμού.

Για την παρασκευή όλων των αιωρημάτων, χρησιμοποιήθηκε πόσιμο νερό βρύσης που θεωρείται κατάλληλο για το σκοπό αυτό. Για τη βελτίωση ορισμένων ιδιοτήτων των αιωρημάτων λειοτριβημένης ιπτάμενης τέφρας (ΛΙΤ) χρησιμοποιήθηκε ο υπερρευστοποιητής με την εμπορική ονομασία Rheobuild 2000 (για μείωση του ιξώδους και βελτίωση των ρεολογικών ιδιοτήτων) και το υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) ως επιταχυντής πήξης (για μείωση του χρόνου πήξης και βελτίωση του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής). Το υδροξείδιο του νατρίου έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την επιτάχυνση της πήξης του υλικού για ενέσεις, MC-100, που είναι μια πολύ



Σχήμα 1. Κοκκομετρικές Καμπύλες Ιπτάμενης Τέφρας και Τσιμέντων

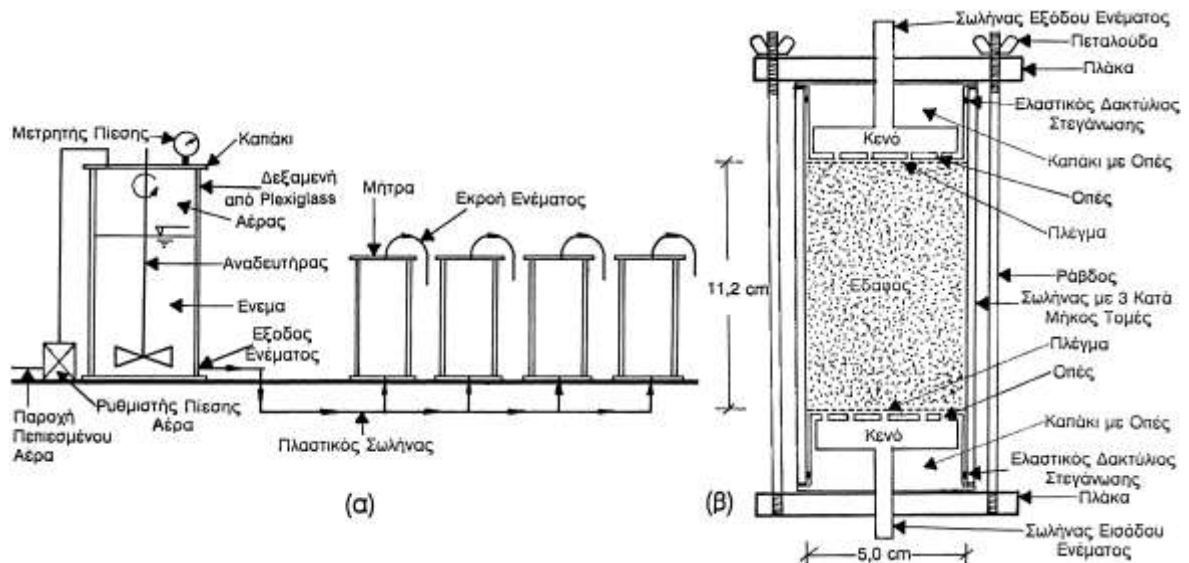
λεπτόκοκκη σκωρία (Schwarz & Krizek 1992, Weaver et al. 1990). Τα αιωρήματα ΛΙΤ που χρησιμοποιήθηκαν στους εμποτισμούς εδαφικών δοκιμών είχαν λόγο νερού προς στερεά (Ν/Σ) 1,5:1 κατά βάρος και περιείχαν 6 lt υπερρευστοποιητή και 2,5 kg επιταχυντή πήξης ανά 100 kg στερεών. Στον Πίνακα 1 συγκρίνονται οι ιδιότητες των συγκεκριμένων αιωρημάτων με αυτές αντίστοιχων αιωρημάτων τσιμέντου Portland II/35 και τριών λεπτόκοκκων τσιμέντων για ενέσεις εμποτισμού (Schwarz & Krizek 1992). Παρατηρείται ότι τα αιωρήματα ΛΙΤ παρουσιάζουν συγκρίσιμη ή και καλύτερη συμπεριφορά από τα αιωρήματα τσιμέντων και, επομένως, είναι κατάλληλα για ενέσεις εμποτισμού. Οι δύο άμμοι που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των δοκιμών προέρχονταν από ποτάμιες αποθέσεις, ήταν καθαρές, με υπογωνιώδεις κόκκους και κοκκομετρικές διαβαθμίσεις που περιορίζονται μεταξύ των κοσκίνων (κατά ASTM) #4 ως #10 και #10 ως #16, αντίστοιχα. Οι γωνίες εσωτερικής τριβής, ϕ , των άμμων 4-10 και 10-16 σε πυκνή και ξηρή κατάσταση, είναι ίσες με $44,5^\circ$ και $46,5^\circ$, αντίστοιχα, και οι συντελεστές διαπερατότητάς τους σε πυκνή κατάσταση είναι ίσοι με 1,02 cm/s και 0,52 cm/s, αντίστοιχα.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

Η προετοιμασία των αιωρημάτων γινόταν με ανάμιξη σε ταχύστροφο αναμικτήρα (10,000 rpm χωρίς φορτίο) που διαρκούσε 10 min. Η ειδική διάταξη που κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε

Πίνακας 1. Ιδιότητες Αιωρημάτων Λειοτριβημένης Ιπτάμενης Τέφρας Πτολεμαΐδας και Τσιμέντων

Υλικό	Λόγος Νερού / Στερεά	Φαινόμενο Ιξώδες (mPa's)	Τελικός Ανηγμένος Όγκος Νερού Εξίδρωσης	Χρόνοι Πήξης (ώρες)	
				Αρχικός	Τελικός
ΛΙΤ	1,5:1	9	0,10	16	33
Portland II/35	1,5:1	51	0,38	11	19
	2:1	21	0,47	12	20
MC-100	1:1	35	0,08	18	21
	2:1	4	0,12	56	---
MC-300	1:1	140	0,01	6	9
	2:1	40	0,03	13	27
MC-500	1:1	175	0,02	15	26
	2:1	6	0,15	24	49



Σχήμα 2. Διάταξη Εμποτισμού Δοκιμίων Άμμου

για τον εμποτισμό δοκιμίων άμμου, φαίνεται στο Σχήμα 2. Κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή της ακολουθήθηκαν οι οδηγίες του πρότυπου ASTM D4320-84. Η κυλινδρική επιφάνεια κάθε μήτρας έχει τρεις κατά μήκος τομές, ώστε να διευκολύνεται η εξαγωγή του εμποτισμένου δοκιμίου χωρίς κοπή, απόξεση ή άλλη ενέργεια. Τα δοκίμια είχαν ύψος 11,2 cm και διάμετρο 5 cm. Οι άμμοι εμποτίστηκαν σε πυκνή κατάσταση (σχετική πυκνότητα, D_r , ίση με 97% ως 98%) και σε κορεσμένη (βαθμός κορεσμού, $S_r=100\%$) ή ξηρή ($S_r=0\%$) κατάσταση. Η ροή ενέματος γινόταν υπό πίεση που δεν ξεπερνούσε τα 200 kPa και συνεχιζόταν μέχρι να περάσει μέσα από τα κενά του δοκιμίου ένεμα με όγκο ίσο με το διπλάσιο του όγκου κενών του δοκιμίου. Τα εμποτισμένα δοκίμια έμειναν μέσα στις κλειστές μήτρες για 2 ημέρες, στη συνέχεια εξάγονταν από τις μήτρες, τοποθετούνταν σε πλαστικές σακούλες και βυθίζονταν σε νερό ως την ημερομηνία εργαστηριακού ελέγχου τους. Μετά από περίοδο συντήρησης ίση με 28 ημέρες, τα εμποτισμένα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμές τριαξονικής φόρτισης “χωρίς στερεοποίηση – χωρίς στράγγιση” (UU) και “με στερεοποίηση – χωρίς στράγγιση και με μετρήσεις της πίεσης νερού πόρων” (CU-PP) καθώς και σε δοκιμές διαπερατότητας. Μετά από συντήρηση 70 μηνών, τα εμποτισμένα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμές τριαξονικής φόρτισης “πολλαπλών σταδίων” (M-UU).

Οι δοκιμές τριαξονικής φόρτισης UU εκτελέστηκαν χωρίς κορεσμό των δοκιμίων, με πλευρικές πιέσεις ίσες με 100, 200 και 400 kPa και με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης ίσο με 0,05 mm/min. Για την εκτέλεση των δοκιμών τριαξονικής φόρτισης CU-PP, εφαρμόστηκαν οι διαδικασίες που περιγράφονται από τον Head (1986). Αφού επιβεβαιωνόταν ο κορεσμός, τα δοκίμια υποβάλλονταν σε στερεοποίηση υπό ενεργές πλευρικές πιέσεις, σ_3' , ίσες με 100, 200 και 400 kPa και κατόπιν σε φόρτιση με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης ίσο με 0,05 mm/min. Οι δοκιμές διαπερατότητας εκτελέστηκαν σε συνδυασμό με τις δοκιμές τριαξονικής φόρτισης CU-PP, με χρήση δύο συστημάτων εσωτερικής πίεσης, σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφονται από τον Head (1986). Οι δοκιμές αυτές παρεμβάλλονταν μεταξύ των σταδίων στερεοποίησης και φόρτισης των δοκιμών τριαξονικής φόρτισης CU-PP. Τέλος, οι δοκιμές τριαξονικής φόρτισης M-UU εκτελέστηκαν χωρίς κορεσμό των δοκιμίων, σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφονται από τον Head (1982), σε τρία διαδοχικά στάδια με αντίστοιχες πλευρικές πιέσεις ίσες με 100, 200 και 400 kPa και με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης ίσο με 0,05 mm/min.

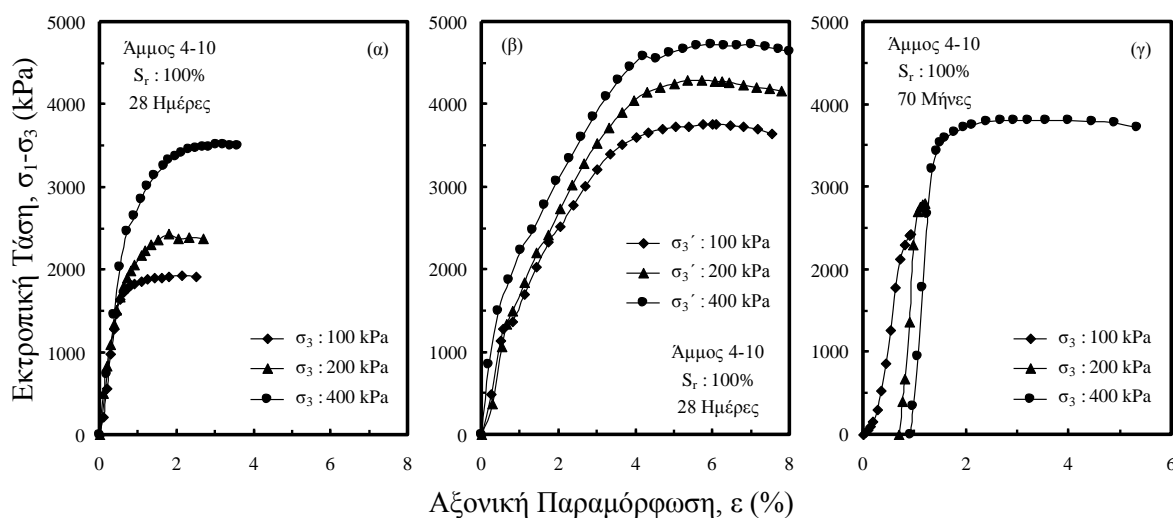
Πίνακας 2. Διαπερατότητα Εμποτισμένων Άμμων με Ενέματα Λειοτριβημένης Ιπτάμενης Τέφρας

Άμμος	Συντελεστής Διαπερατότητας Άμμου k (cm/s)	Ενεργός Πλευρική Πίεση σ_3' (kPa)	Συντελεστής Διαπερατότητας Εμποτισμένης Άμμου k (cm/s)
4-10 $S_r=0\%$ *	1	100	$5 \cdot 10^{-7}$
		200	$3 \cdot 10^{-5}$
		400	$3 \cdot 10^{-7}$
10-16 $S_r=0\%$	$5 \cdot 10^{-1}$	100	$6 \cdot 10^{-6}$
		200	$5 \cdot 10^{-6}$
		400	$1 \cdot 10^{-6}$
4-10 $S_r=100\%$	1	100	$2 \cdot 10^{-6}$
		200	$1 \cdot 10^{-6}$
		400	$8 \cdot 10^{-7}$
10-16 $S_r=100\%$	$5 \cdot 10^{-1}$	100	$3 \cdot 10^{-5}$
		200	$6 \cdot 10^{-6}$
		400	$1 \cdot 10^{-6}$

*Βαθμός κορεσμού δοκιμών άμμου πριν τον εμποτισμό.

ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Τα αποτελέσματα των δοκιμών διαπερατότητας παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι εμποτισμένες άμμοι με αιωρήματα ΛΙΤ έχουν συντελεστές διαπερατότητας με τιμές που κυμαίνονται από $3 \cdot 10^{-5}$ cm/s ως $3 \cdot 10^{-7}$ cm/s. Η βελτίωση των συντελεστών διαπερατότητας των άμμων λόγω του εμποτισμού κυμαίνεται από 4 ως 7 τάξεις μεγέθους. Δημοσιευμένες τιμές της διαπερατότητας σταθεροποιημένων εδαφών με διάφορες ιπτάμενες τέφρες με ιδιότητες αυτοσιμεντώσης (Parker et al. 1977, Vesperman et al. 1984, Edil et al. 1987) δείχνουν ότι η διαπερατότητα των άμμων μπορεί να μειωθεί από 3 ως 4 τάξεις μεγέθους και ο συντελεστής διαπερατότητας μπορεί να πάρει τιμές που φθάνουν μέχρι και τα $2 \cdot 10^{-8}$ cm/s.



Σχήμα 3. Τυπικές Καμπύλες Τάσεων – Παραμορφώσεων από Δοκιμές Τριαξονικής Φόρτισης (α) Δοκιμές UU, (β) Δοκιμές CU-PP και (γ) Δοκιμές M-UU

Πίνακας 3. Παράμετροι Παραμορφωσιμότητας Υλικών

Υλικό	Τύπος Δοκιμής	Πλευρική Πίεση σ_3 (kPa)	Μέτρα Ελαστικότητας		Παραμόρφωση Αστοχίας ϵ_a (%)
			Εφαπτομενικό $E_{εφ}$ (MPa)	Χορδής E_{50} (MPa)	
Αιώρημα ΛΙΤ N/Σ=1,5:1	UU	100	167	226	1,8
		200	256	338	1,4
		400	210	356	1,6
Άμμος 4-10 Καθαρή $S_r=0\%$	UU	100	118	103	3,7
		200	160	122	6,3
		400	182	135	6,9
Άμμος 10-16 Καθαρή $S_r=0\%$	UU	100	114	88	4,6
		200	179	99	4,6
		400	250	135	6,2
Άμμος 4-10 Εμποτισμένη N/Σ=1,5:1 $S_r=100\%$	UU	100	615	357	2,1
		200	444	451	1,8
		400	400	391	3,0
	CU-PP	500	286	146	6,0
		600	238	172	5,7
		800	455	197	6,0
Άμμος 4-10 Εμποτισμένη N/Σ=1,5:1 $S_r=0\%$	UU	100	595	414	1,1
		200	610	477	1,8
		400	649	516	2,9
	CU-PP	500	333	218	5,3
		600	333	241	5,3
		800	455	321	5,6
Άμμος 10-16 Εμποτισμένη N/Σ=1,5:1 $S_r=100\%$	UU	100	408	297	1,1
		200	417	361	2,0
		400	435	401	3,8
	CU-PP	500	357	178	6,0
		600	278	165	6,2
		800	500	192	6,3
Άμμος 10-16 Εμποτισμένη N/Σ=1,5:1 $S_r=0\%$	UU	100	544	442	0,7
		200	510	507	1,5
		400	633	601	2,2
	CU-PP	500	333	226	5,4
		600	333	221	6,8
		800	333	242	6,5

Δημοσιευμένες τιμές της διαπερατότητας που προέκυψαν για άμμους εμποτισμένες με διάφορα αιωρήματα λεπτόκοκκων τσιμέντων (Legendre et al. 1987, Zebovitz et al. 1989, De Paoli et al. 1992) δείχνουν ότι η διαπερατότητα πιο λεπτόκοκκων άμμων από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα αυτή, βελτιώθηκε κατά 3 ως 5 τάξεις μεγέθους. Συνεπώς, ο εμποτισμός με αιωρήματα ΛΙΤ οδήγησε σε αποτελέσματα που είναι συγκρίσιμα ή ακόμα και καλύτερα από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάμιξη ή τον εμποτισμό άμμων με άλλους τύπους ιπτάμενων τεφρών ή ενεμάτων τύπου αιωρήματος.

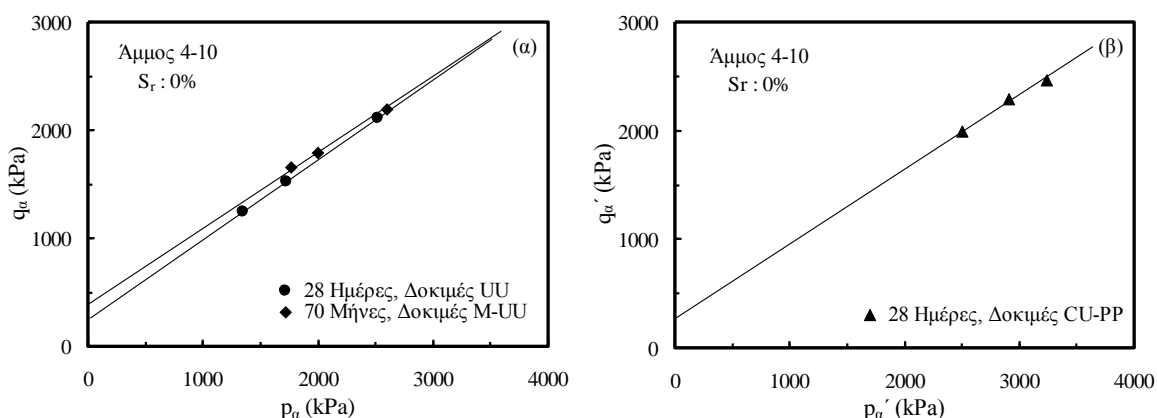
ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΕΩΝ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων που προέκυψαν από τις δοκιμές τριαξονικής φόρτισης που εκτελέστηκαν στα πλαίσια αυτής της έρευνας. Η μορφή των καμπυλών του Σχήματος 3γ υποδηλώνει ότι η συμπεριφορά των δοκιμών εμποτισμένης άμμου κατά τις δοκιμές M-UU ήταν ομαλή και, επομένως, τα αποτελέσματά των δοκιμών αυτών πρέπει να θεωρούνται αξιόπιστα. Οι τιμές των τριών παραμέτρων παραμορφωσιμότητας του αιωρήματος ΛΙΤ και των άμμων πριν και μετά τον εμποτισμό που προέκυψαν από τις καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων των δοκιμών UU και CU-PP, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Παρατηρείται ότι,

στις εμποτισμένες άμμους, ο τύπος δοκιμής επηρεάζει τις παραμέτρους αυτές, αφού οι δοκιμές UU δίδουν κατά μέσο όρο: (α) 3 φορές χαμηλότερες παραμορφώσεις αστοχίας, (β) 1,5 φορά υψηλότερα εφαπτομενικά μέτρα ελαστικότητας, και (γ) 2 φορές υψηλότερα μέτρα ελαστικότητας χορδής από τις δοκιμές CU-PP. Από τη σύγκριση των παραμέτρων παραμορφωσιμότητας των εμποτισμένων άμμων, που προέκυψαν από δοκιμές UU, με αυτές του αιωρήματος ΛΙΤ και των καθαρών άμμων (Πιν. 3), παρατηρείται ότι: (α) η παραμόρφωση αστοχίας των εμποτισμένων άμμων είναι παρόμοια με αυτή του αιωρήματος ΛΙΤ και 3 φορές χαμηλότερη από αυτή των καθαρών άμμων, (β) το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας των εμποτισμένων άμμων είναι υψηλότερο από αυτά των καθαρών άμμων και του αιωρήματος ΛΙΤ κατά 3–4 και 2–3 φορές, αντίστοιχα, και (γ) το μέτρο ελαστικότητας χορδής των εμποτισμένων άμμων είναι υψηλότερο από αυτά των καθαρών άμμων και του αιωρήματος ΛΙΤ κατά 4 φορές και 1,5 φορά, αντίστοιχα. Επομένως, φαίνεται ότι ο εμποτισμός με αιωρήματα ΛΙΤ οδηγεί σε αύξηση της ακαμψίας και σε μείωση της παραμορφωσιμότητας των άμμων. Η συμπεριφορά αυτή έχει επίσης διαπιστωθεί για άμμους εμποτισμένες με ενέματα άλλων τύπων (Krizek et al. 1982, 1986, 1992).

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται τυπικές περιβάλλουσες αστοχίας (γραμμές K_a) που προέκυψαν για το ίδιο εμποτισμένο έδαφος από δοκιμές UU και M-UU (ολικές τάσεις) (Σχ. 4α) και από δοκιμές CU-PP (ενεργές τάσεις) (Σχ. 4β). Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb αντιπροσωπεύει επαρκώς τη συμπεριφορά της εμποτισμένης άμμου με αιωρήματα ΛΙΤ. Το ίδιο συμπέρασμα προέκυψε και για άλλα ενέματα (Krizek et al. 1982, 1986, 1992). Οι τιμές των παραμέτρων διατμητικής αντοχής που προέκυψαν από όλες τις δοκιμές τριαξονικής φόρτισης σε δοκίμια άμμου εμποτισμένης με αιωρήματα ΛΙΤ, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Παρατηρείται ότι η βελτίωση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής των εμποτισμένων άμμων με αιωρήματα ΛΙΤ, συνίσταται κυρίως στην ανάπτυξη συνοχής και όχι σε σημαντική αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής τους. Οι τιμές της συνοχής σε δοκίμια ηλικίας 28 ημερών, κυμαίνονται από 283 kPa ως 446 kPa (ανάλυση ολικών τάσεων) και από 285 kPa ως 385 kPa (ανάλυση ενεργών τάσεων). Αυτές οι τιμές της συνοχής είναι υψηλότερες από τις τιμές που προέκυψαν από τον εμποτισμό με το λεπτόκοκκο τσιμέντο MC-500, $c' \leq 150$ kPa, (Krizek et al. 1986) και με πυριτικό νάτριο, $c' = 226-294$ kPa, (Krizek et al. 1982) και είναι συγκρίσιμες με τις τιμές που προέκυψαν από τον εμποτισμό με μίγματα MC-500 – πυριτικού νατρίου, $c' = 139-456$ kPa, (Krizek et al. 1992). Σε δοκίμια ηλικίας 28 ημερών, η γωνία εσωτερικής τριβής που προέκυψε από τις δοκιμές UU είναι μεγαλύτερη κατά 5° , περίπου, από αυτή της άμμου, ενώ στις δοκιμές CU-PP, η γωνία εσωτερικής τριβής της εμποτισμένης άμμου έχει περίπου ίδιες τιμές με αυτή της καθαρής άμμου.



Σχήμα 4. Τυπικές Περιβάλλουσες Αστοχίας Εμποτισμένων Άμμων με Αιώρημα ΛΙΤ

Πίνακας 4. Παράμετροι Διατμητικής Αντοχής Εμποτισμένων Άμμων

Άμμος	Βαθμός Κορεσμού S_r (%)	Δοκίμια 28 Ημερών		Δοκίμια 28 Ημερών		Δοκίμια 70 Μηνών	
		Δοκιμές CU-PP		Δοκιμές UU		Δοκιμές M-UU	
		c' (kPa)	ϕ' ($^\circ$)	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)
4-10	0	385	44,5	380	49,0	561 (48%)*	44,5
10-16	0	321	45,5	446	48,0	463 (4%)*	44,5
4-10	100	285	45,5	283	48,0	407 (44%)*	44,5
10-16	100	321	45,5	291	46,5	363 (25%)*	46,5

*Αύξηση συνοχής σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή από δοκιμές UU σε δοκίμια 28 ημερών.

Παρόμοιες σχετικά χαμηλές ενεργητικές επιδράσεις του εμποτισμού στη γωνία εσωτερικής τριβής των άμμων έχουν παρατηρηθεί και για άλλους τύπους ενεμάτων (Krizek et al. 1982, 1986, 1992) και μπορούν να αποδοθούν στην παρουσία του ενέματος που παρεμποδίζει την κίνηση των κόκκων της άμμου. Σε δοκίμια ηλικίας 70 μηνών (δοκιμές M-UU), οι τιμές της συνοχής κυμαίνονται από 363 kPa ως 561 kPa, ενώ οι τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής είναι και πάλι περίπου ίσες με αυτές των καθαρών άμμων. Η αύξηση της συνοχής των εμποτισμένων άμμων στο διάστημα από τις 28 ημέρες ως τους 70 μήνες, θεωρείται ικανοποιητική αφού κυμαίνεται από 4% ως 48% (Πιν. 4) και είναι κατά μέσο όρο ίση με 30%. Από όλα τα παραπάνω φαίνεται ότι η βελτίωση που προκαλεί ο εμποτισμός με αιωρήματα ΛΙΤ στις παραμέτρους διατμητικής αντοχής της άμμου μπορεί να χαρακτηριστεί ως σημαντική συγκριτικά και με άλλα γνωστά ενέματα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν και τις παρατηρήσεις που έγιναν στα πλαίσια αυτής της εργαστηριακής έρευνας, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η βελτίωση της διαπερατότητας της άμμου που προκαλείται από τον εμποτισμό με αιωρήματα ΛΙΤ κυμαίνεται από 4 ως 7 τάξεις μεγέθους και είναι συγκρίσιμη ή και καλύτερη από αυτή που προκύπτει από τον εμποτισμό άμμων με άλλους τύπους ενεμάτων τύπου αιωρήματος.
- Ο εμποτισμός με αιωρήματα ΛΙΤ οδηγεί σε αύξηση της ακαμψίας και σε μείωση της παραμορφωσιμότητας των άμμων.
- Το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά της εμποτισμένης άμμου με αιωρήματα ΛΙΤ και δίδει τιμές συνοχής που κυμαίνονται από 280 kPa ως 560 kPa και είναι συγκρίσιμες ή και υψηλότερες από αυτές που προέκυψαν από άμμους εμποτισμένες με άλλα ενέματα. Η γωνία εσωτερικής τριβής είναι περίπου ίση με αυτή των καθαρών άμμων.
- Στο χρονικό διάστημα μεταξύ 28 ημερών και 70 μηνών, παρατηρείται ικανοποιητική (4% ως 48% ή 30% κατά μέσο όρο) αύξηση της συνοχής της εμποτισμένης άμμου με αιωρήματα ΛΙΤ.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. De Paoli, B. Bosco, B. Granata, R. & Bruce, D.A. 1992. Fundamental observations on cement based grouts (2): Microfine cements and the Cemill^R process. *Proc., Grouting, Soil Improvement & Geosynthetics*, New Orleans, ASCE, Vol. 1: 486-499.
2. Edil, T.B. Berthouex, P.M. & Vesperman, K.D. 1987. Fly ash as a potential waste liner. *Proc., Geotechnical Practice for Waste Disposal '87*, Ann Arbor, ASCE, 447-461.
3. Head, K.H. 1982. *Manual of soil laboratory testing*. Vol. 2, London: Pentech Press Ltd.

4. Head, K.H. 1986. *Manual of soil laboratory testing*. Vol. 3, London: Pentech Press Ltd.
5. Krizek, R.J. Benltayf, M.A. & Atmatzidis, D.K. 1982. Effective stress – strain – strength behavior of si-licate-grouted sand. *Proc., Grouting in Geotech. Engineering*, New Orleans, ASCE, Vol.1: 482-497.
6. Krizek, R.J. Atmatzidis, D.K. & Wu, Z.H. 1986. *Behavior of grouted Erksak sand*. Northwestern Univ.
7. Krizek, R.J. Liao, H.-J. & Borden, R.H. 1992. Mechanical properties of microfine cement / sodium silicate grouted sand. *Proc., Grouting, Soil Improvement & Geosynthetics*, New Orleans, ASCE, Vol. 1: 688-699.
8. Legendre, Y. Hery, P. & Vattelement, H. 1987. Microsol grouting, a method for grouting fine allu-vium. *Proc., 6th Int. Offshore Mech. & Arctic Engrg. Symp.*, Houston, ASME, Vol. 1: 433-440.
9. Papayianni, J. 1986. Strength & bond data for Greek high-lime fly ash concrete. *Proc., Fly Ash, Si-lica Fume, Slag & Natural Pozzolans in Concrete, 2nd Int. Conf.*, Madrid, ACI, Vol.1: 367-386.
10. Papayianni, J. 1987. An investigation of the pozzolanicity and hydraulic reactivity of a high-lime fly ash. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 39, No. 138: 19-27.
11. Parker, D.G. Thornton, S.I. & Cheng, C.W. 1977. Permeability of fly ash stabilized soils. *Proc., Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials*, Ann Arbor, ASCE, 63-70.
12. Schwarz, L.G. & Krizek, R.J. 1992. Effects of mixing on rheological properties of microfine ce-ment grout. *Proc., Grouting, Soil Impr. & Geosynthetics*, New Orleans, ASCE, Vol. 1: 512-525.
13. Vesperman, K.D. Edil, T.B. & Berthouex, P.M. 1984. Permeability of fly ash and fly ash – sand mixtures. *Proc., Symposium of Hydraulic Barriers in Soil and Rock*, Denver, ASTM, 289-298.
14. Weaver, K.D. Evans, J.C. & Pancoski, S.E. 1990. Grout testing for a hazardous waste application. *Concrete International*, Vol. 12, No. 7: 45-47.
15. Zebovitz, S. Krizek, R.J. & Atmatzidis, D.K. 1989. Injection of fine sands with very fine cement grout. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, No. 12: 1717-1733.