

Επίδραση της Χρήσης Υδρασβέστου και Ιπτάμενης Τέφρας στη Διόγκωση Εδαφικού Υλικού

Α. Δ. ΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΥ

Λέκτορας Δ.Π.Θ.

Περίληψη

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σταθεροποίησης διογκούμενου αργιλικού εδάφους με υδράσβεστο ή ιπτάμενη τέφρα επί της συμπεριφοράς διόγκωσής του. Το εδαφικό δείγμα λήφθηκε από περιοχή εκτελούμενων έργων συντήρησης σε οδό με βεβαρημένο ιστορικό φθορών του οδοστρώματος λόγω φαινομένων διόγκωσης και συρρίκνωσης. Χρησιμοποιήθηκαν εργαστηριακές μέθοδοι προσδιορισμού της συρρίκνωσης, της ελεύθερης διόγκωσης και της πίεσης διόγκωσης των μινμάτων εδάφους-προσθέτου. Διαπιστώθηκε η δυνατότητα βελτίωσης των χαρακτηριστικών διόγκωσης με τη χρήση χημικών προσθέτων. Η υδράσβεστος και η ιπτάμενη τέφρα αποτελούν πολύ καλούς σταθεροποιητές, ενεργώντας ενεργητικά όχι μόνο επί των χαρακτηριστικών αντοχής αλλά και επί του δυναμικού διόγκωσης.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα διογκούμενα εδάφη προκαλούν αστοχίες στα τεχνικά έργα λόγω των μέτριων χαρακτηριστικών αντοχής που παρουσιάζουν, όπως επίσης και εξαιτίας των πίεσεων διόγκωσης, οι οποίες αναπτύσσονται στις κατασκευές. Πολλά γεωτεχνικά προβλήματα κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή αποδίδονται κυρίως στη διόγκωση και διαστολή [1, 2]. Όταν εξετάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διόγκωση, πρέπει να γίνεται διάκριση ανάμεσα στο «δυναμικό διόγκωσης», το οποίο εκφράζει την ικανότητα ενός αργιλικού εδάφους να υφίσταται σημαντική μεταβολή του όγκου του μετά από κάποια αλλαγή της υγρασίας ή του εξωτερικού φορτίου, και στο «μέγεθος της διόγκωσης», δηλαδή την έκταση στην οποία θα ενεργοποιηθεί το δυναμικό διόγκωσης για τις επί τόπου συνθήκες. Ποιοτικά, το δυναμικό διόγκωσης θα μπορούσε να οριστεί ως το ποσοστό μεταβολής του όγκου ενός πλευρικά παρεμποδιζομένου δείγματος, το οποίο υφίσταται κορεσμό υπό κατακόρυφη πίεση 1 kg/cm^2 μετά τη συμπύκνωσή του σε συσκευή Proctor στη βέλτιστη υγρασία και τη μέγιστη ξηρή πυκνότητα. Οι κυριότερες αιτίες εκδήλωσης της διαστολής και διόγκωσης αργιλικών εδαφών είναι:

- (α) η μηχανική διαστολή από προσρόφηση ύδατος,
- (β) η μεταβολή της ικανότητας συγκράτησης ύδατος στη διεπιφάνεια των αργιλικών ορυκτών,
- (γ) η αλλαγή της υφής λόγω προσρόφησης ύδατος,
- (δ) η μεταβολή της κρυσταλλικής δομής ως συνέπεια της μεταβολής των τιμών της θερμοκρασίας και της πίεσης,
- (ε) πλαστικές παραμορφώσεις από τεκτονικές κινήσεις,
- (στ) η ψύξη του ύδατος των πόρων.

Από τους παραπάνω παράγοντες η μεταβολή της ικανότητας συγκράτησης ύδατος στη διεπιφάνεια των κόκκων των αργιλικών ορυκτών είναι η επικρατέστερη αιτία να εμφανιστεί συμπεριφορά διόγκωσης [3, 4, 5]. Τα φαινόμενα διόγκωσης σχετίζονται κυρίως με το νερό και επηρεάζονται από συνθήκες, όπως:

- (α) το είδος και η ποσότητα των αργιλικών ορυκτών,
- (β) η αρχική περιεκτικότητα ύδατος και ο βαθμός κορεσμού,
- (γ) οι υποπίεσεις του ύδατος πόρων,
- (δ) η ποιότητα και η ποσότητα του ύδατος των πόρων,
- (ε) ο βαθμός στερεοποίησης,
- (στ) η διάταξη των εδαφικών κόκκων και η εδαφική δομή,
- (ζ) το μέγεθος της πίεσης και η εντατική κατάσταση,
- (η) η θερμοκρασία,
- (θ) ο απαιτούμενος για τη διόγκωση χρόνος,
- (ι) η παρουσία οργανικών ουσιών,
- (ια) τα ανταλλάξιμα ιόντα που υπάρχουν στο έδαφος,
- (ιβ) ο περιεχόμενος ηλεκτρολύτης της υδατικής φάσης.

Σε οδοστρώματα κατασκευασμένα πάνω σε ενεργές αργίλους εμφανίζονται συνήθως φθορές με τις εξής μορφές [6, 7]:

- (α) διαμήκεις ρωγμές παράλληλα προς τον κεντρικό άξονα της οδού ή κοντά στα ερείσματα,
- (β) τοπικές παραμορφώσεις, π.χ. κοντά σε αγωγούς ή σε δεντροφυτεμένες περιοχές κοντά στο άκρο του οδοστρώματος, συνοδευόμενες από πλευρική ρηγμάτωση,

Πίνακας 1: Χημική σύσταση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές.
Table 1: Chemical composition of the materials used in the tests.

Ιδιότητες - Συστατικά (%)	Άργιλος	Υδράσβεστος	Ιπτάμενη τέφρα
Απώλεια πυρώσεως	11,12	33,25	13,90
SiO ₂	64,18	0,01	29,95
Al ₂ O ₃	13,50	0,01	10,85
Fe ₂ O ₃	4,57	0,11	4,57
CaO	1,40	65,25	20,00
MgO	1,16	0,50	1,90
K ₂ O	2,30	0,01	0,95
Na ₂ O	1,35	0,01	0,32
Θείο, S (1000 ⁰ C)	0,02	0,13	2,92
Ανθρακας, C	0,90	4,50	3,80

- (γ) τοπικές αστοχίες του οδοστρώματος, σχετιζόμενες με την αποδιαβάθμιση της επιφάνειας της οδού λόγω ανεπαρκούς φέρουσας ικανότητας,
- (δ) ανωμαλίες σε σημαντικό μήκος της επιφάνειας της οδού χωρίς εμφανή φθορά ή οποιουδήποτε τύπου ρηγμάτωση.

Τα προβλήματα, που προκαλούνται από τις μεταβολές του όγκου των διογκούμενων εδαφών, εκφράζονται με το μέγεθος των τάσεων και μετατοπίσεων εξαιτίας της συρρίκνωσης και της διόγκωσης. Η επιλογή μιας τεχνικής λύσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες [8].

Οι διαδικασίες κατεργασίας του υπεδάφους και σχεδιασμού οδοστρώματος έχουν αρκετά τυποποιηθεί στις μεθόδους κατασκευής αυτοκινητοδρόμων. Εκτός από την κλασική λύση απομάκρυνσης των προβληματικών υλικών και την αντικατάστασή τους με μη διογκώσιμα εδάφη, η κατεργασία με πρόσθετα έχει προσελκύσει το επιστημονικό ενδιαφέρον. Τα διογκούμενα εδάφη μπορούν να σταθεροποιηθούν με την προσθήκη μικρής ποσότητας ασβέστου, η οποία μπορεί να τροποποιήσει τις φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες και να βελτιώσει την όλη τεχνική τους συμπεριφορά [9, 10]. Γενικά, αναλογίες υδρασβέστου, που συνιστώνται για να βελτιωθούν τα φυσικά χαρακτηριστικά, κυμαίνονται από 1% έως 3%. Μεγαλύτερες αναλογίες από 3% έως 8% βελτιώνουν τη μηχανική αντοχή του εδάφους [11]. Αυτή η βελτίωση της αντοχής του μίγματος έχει κατ' αρχήν αποδοθεί σε χημικές αντιδράσεις γύρω από το αργιλικό ορυκτό. Η μακροπρόθεσμη ανάπτυξη τους οφείλεται σε βαθμιαία κρυστάλλωση των προϊόντων αντίδρασης ανάμεσα στην άργιλο και την υδράσβεστο [12, 13].

Η ιπτάμενη τέφρα αποδεδειγμένα [13, 14, 15] βελτιώνει τα χαρακτηριστικά αντοχής εδαφικών υλικών με μεγάλο δυναμικό μεταβολής του όγκου τους, δεν έχει εξεταστεί όμως εκτεταμένα η επιρροή της στα χαρακτηριστικά διόγκωσης και συρρίκνωσης τέτοιων εδαφών.

Η ανάγκη αναγνώρισης και κατάταξης των διογκούμενων αργιλικών εδαφών οδήγησε σε εκτεταμένες έρευνες των ιδιοτήτων τους - μεταξύ αυτών και των χαρακτηριστικών διόγκωσης - δεν είναι όμως ευρύτερα γνωστή η επίδραση της χημικής σταθεροποίησης στο δυναμικό διόγκωσης τέτοιων εδαφών. Εξετάστηκε εργαστηριακά ένα εδαφικό υλικό από περιοχή, όπου εκτελούνταν έργα οδοποιίας, για να διαπιστωθεί η διογκωσιμότητά του, και αναζητήθηκε η επίδραση της προσθήκης υδρασβέστου αλλά και ιπτάμενης τέφρας στο δυναμικό διόγκωσης αυτού του εδάφους. Για το σκοπό αυτό, εκτός των δοκιμών κατάταξης, πραγματοποιήθηκε σειρά δοκιμών διόγκωσης-συρρίκνωσης.

2. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

- L αρχικό μήκος δοκιμίου
ΔL διαφορά μήκους
LS γραμμική συρρίκνωση

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Το εδαφικό υλικό, που χρησιμοποιήθηκε για την εργαστηριακή έρευνα, λήφθηκε από την περιοχή Ορεστιάδας του νομού Έβρου. Οι δειγματοληψίες έγιναν σε βάθος ενός μέτρου. Πρόκειται για σκοτεινόχρωμη άργιλο, η οποία εμπίπτει στην ομάδα A-7-5 σύμφωνα με τη μέθοδο κατάταξης εδαφών της AASHTO, ενώ κατά το ενοποιημένο σύστημα εδαφών ανήκει στην κατηγορία CH.

Η άσβεστος, που χρησιμοποιήθηκε σε διάφορα ποσοστά ως πρόσθετο για τη σταθεροποίηση των εδαφικών δειγμάτων, είναι μια τυπική εμπορική υδράσβεστος με υψηλή περιεκτικότητα σε οξείδιο του ασβεστίου (65,25% CaO), ενώ το εναπομένον είναι ένας συνδυασμός αλκαλικών οξειδίων και οξειδίων άλλων μετάλλων, όπως ο σίδηρος, το πυρίτιο και το αργίλιο (πίνακας 1).

Η ιπτάμενη τέφρα προέρχεται από το σταθμό ηλεκτροπαραγωγής της Πτολεμαΐδας. Η μονάδα αυτή χρησιμοποιεί λιγνίτη που σχηματίστηκε κατά την κρητιδική περίοδο και είναι πλούσιος σε ασβέστιο με τη μορφή CaCO_3 . Το ειδικό βάρος της τέφρας βρέθηκε ότι είναι 2,5. Αποτελείται από πολύ λεπτά σωματίδια (περίπου 79% διέρχεται από το κόσκινο No 200). Αξίζει να σημειωθεί ότι η κονιοποιημένη ιπτάμενη τέφρα είναι ένα μη πλαστικό υλικό, το οποίο, όταν αναμιχθεί με το έδαφος, μειώνει το όριο υδαρότητας και το δείκτη πλαστικότητας [8, 15]. Όταν αναμιχθεί η ιπτάμενη τέφρα με έδαφος, μπορεί να αναπτύξει τσιμεντικούς δεσμούς είτε λόγω της ποζολανικής επίδρασης [14] ή εξαιτίας μιας σύμφυτης ιδιότητας να αυτοσκληρύνεται κάτω από ευνοϊκές συνθήκες υγρασίας και συμπίκνωσης.

4. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ

Βρέθηκε η φυσική υγρασία του εδαφικού δείγματος και προσδιορίστηκε η κοκκομετρική του διαβάθμιση με τη χρήση πρότυπων κοσκίων τετραγωνικής οπής και για την κατανομή των μεγεθών εδαφικών κόκκων από τα 0,075 mm (κόσκιο No 200) μέχρι τα 0,001 mm περίπου εφαρμόστηκε η μέθοδος του πυκνομέτρου. Η κοκκομετρική ανάλυση του εδαφικού δείγματος και της ιπτάμενης τέφρας παρουσιάζεται στα σχήματα 1 και 2 αντίστοιχα. Στη συνέχεια, προσδιορίστηκαν τα όρια Atterberg του εδαφικού υλικού. Στον πίνακα 2 δίδονται οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους.

4.1. Γραμμική συρρίκνωση

Η γραμμική συρρίκνωση είναι η ανηγμένη ελάττωση μίας από τις διαστάσεις ενός εδαφικού δοκιμίου, όταν η υγρασία του μειούμενη από μια συγκεκριμένη τιμή φθάσει στη μέγιστη τιμή υγρασίας του εδάφους, όπου περαιτέρω μείωση της δεν προκαλεί άλλη μείωση του όγκου του εδαφικού δείγματος. Η γραμμική συρρίκνωση υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας μήτρες ημικυκλικής διατομής, μήκους 14 cm και ακτίνας 2,5 cm, στις οποίες τοποθετήθηκαν δείγματα εδαφικού υλικού αναμεμειγμένα με νερό μέχρι την τιμή του ορίου υδαρότητάς τους, σύμφωνα με τη διαδικασία της προδιαγραφής BS 1377-75, και εκφράζεται ως η επί τοις εκατό μεταβολή του γραμμικού όγκου του δοκιμίου: $LS(\%) = \frac{\Delta L}{L} \times 100$.

Η μεταβολή της τιμής της γραμμικής συρρίκνωσης μετά την προσθήκη υδρασβέστου ή ιπτάμενης τέφρας στην άργιλο δείχνεται στο σχήμα 3.

4.2. Ελεύθερη διόγκωση

Προσδιορίστηκε η ελεύθερη διόγκωση σε ογκομετρικό σωλήνα και σε οιδήμετρο. Χρησιμοποιήθηκε προς τούτο η συσκευή μονοδιάστατης στερεοποίησης Geonor h-200 και

Πίνακας 2: Φυσικές ιδιότητες του εξετασθέντος εδαφικού υλικού.
Table 2: Natural properties of the soil tested.

Φυσική υγρασία	(%)	37,80
Περιεκτικότητα σε άργιλο (υλικό <2μ)	(%)	52
Ποσοστό διερχόμενο από το κόσκινο No 200	(%)	95,44
Όριο υδαρότητας	(%)	77
Όριο πλαστικότητας	(%)	33
Δείκτης πλαστικότητας	(%)	44
Ενεργότητα (κατά Skempton)		0,85
Γραμμική συρρίκνωση	(%)	16,7
Ειδικό βάρος		2,72
Ελεύθερη διόγκωση σε ογκομετρικό σωλήνα	(%)	90
Ελεύθερη διόγκωση στο οιδήμετρο	(%)	28,10
Πίεση διόγκωσης	(t/m ²)	37,5

εφαρμόστηκε η διαδικασία της προδιαγραφής ASTM D 4546, μέθοδος A, με αρχική τάση 1 kPa.

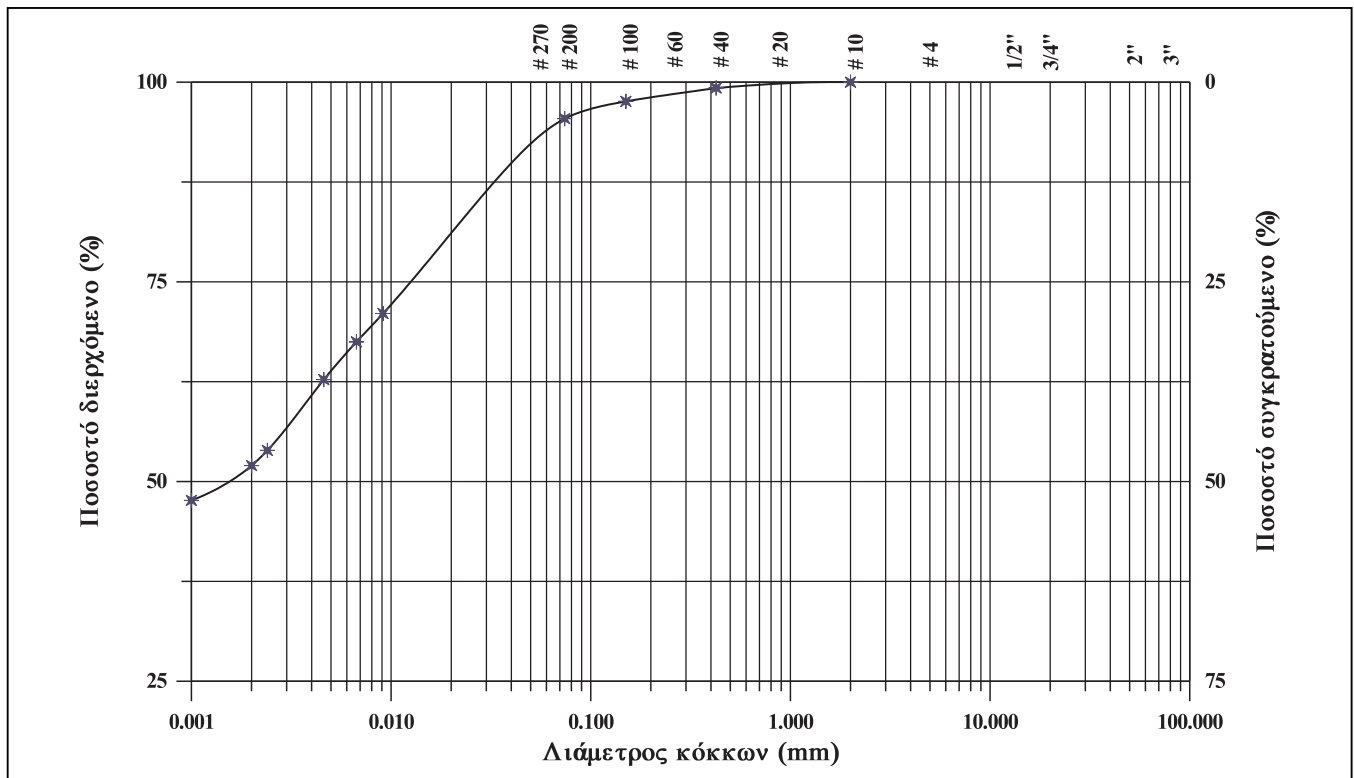
Οι τιμές της ελεύθερης διόγκωσης προσδιορίστηκαν από διάγραμμα των ενδείξεων διαφοράς ύψους (διόγκωσης) έναντι του λογαρίθμου του χρόνου. Το εδαφικό δείγμα παρουσίασε υψηλές τιμές ελεύθερης διόγκωσης και είναι ακατάλληλο για χρήση σε βάσεις και υποβάσεις οδοστρώματος.

4.3. Πίεση διόγκωσης

Οι δοκιμές πίεσης διόγκωσης έγιναν σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM D 4546, μέθοδος A, στο οιδήμετρο. Μετά το πέρας του φαινομένου της διόγκωσης ασκήθηκε σταδιακά πίεση στο δοκίμιο της τάξης των 5, 10, 20, 40 και 80 kPa, μέχρις ότου συμπιεστεί εκ νέου στο αρχικό του ύψος h_0 . Με τα δεδομένα αυτά χαράχθηκε καμπύλη πίεσης-διαφοράς ύψους και το σημείο τομής της με την ευθεία, που διέρχεται από το σημείο h_0 και είναι παράλληλη στον άξονα της πίεσης, ορίστηκε ως πίεση διόγκωσης (πίνακας 2).

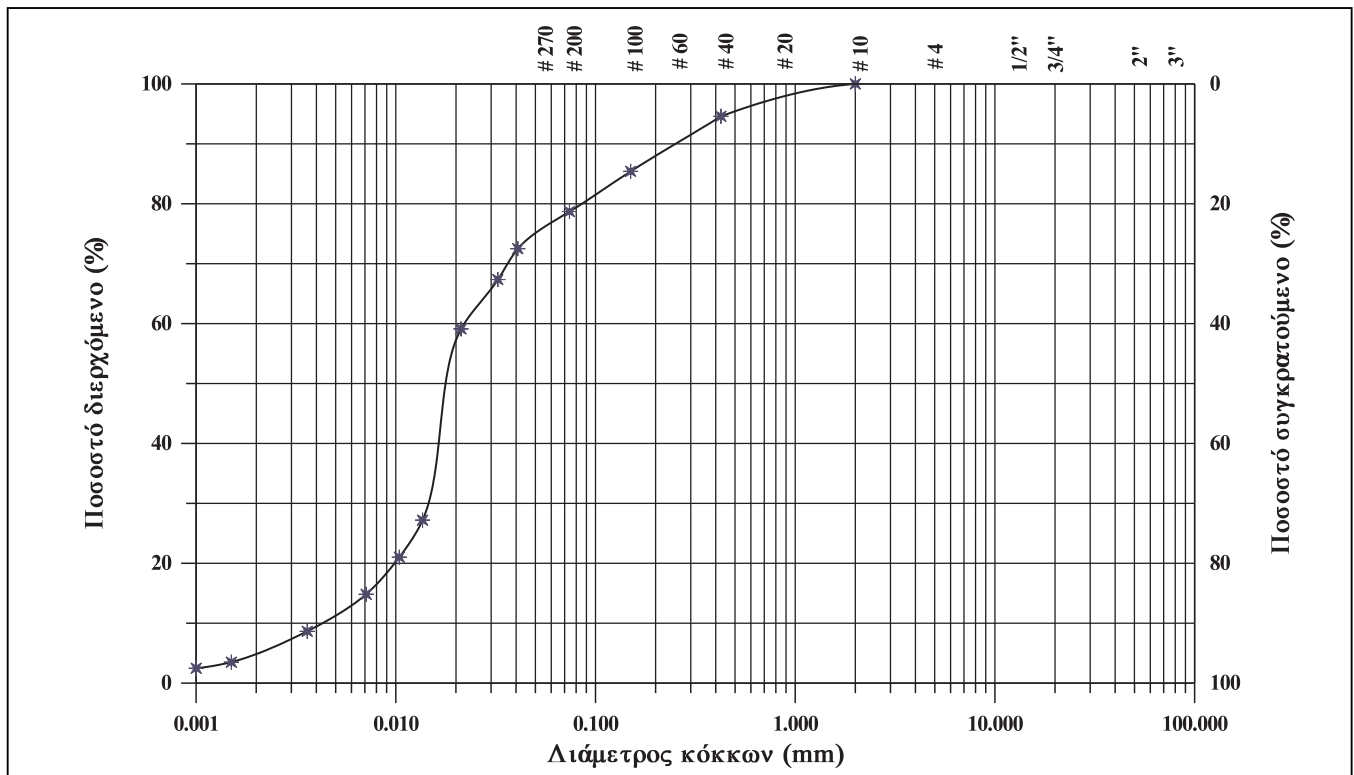
Η διαδικασία για την ελεύθερη διόγκωση και την πίεση διόγκωσης επαναλήφθηκε για τα δείγματα που σχηματίστηκαν μετά την προσθήκη στο εδαφικό υλικό των χημικών προσθέτων σε διάφορες αναλογίες. Για την υδράσβεστο χρησιμοποιήθηκαν ποσοστά 3%, 6%, 9% και 12%, ενώ για την ιπτάμενη τέφρα 4%, 8%, 12% και 16% κατά βάρος.

Στον πίνακα 3 δείχνονται οι τιμές ελεύθερης διόγκωσης και πίεσης διόγκωσης που αποκτήθηκαν με την προσθήκη διαφόρων ποσοστών υδρασβέστου ή ιπτάμενης τέφρας. Οι τιμές πίεσης διόγκωσης αναφέρονται στην αντίσταση που προβάλλει το ήδη διογκωμένο υλικό στην προσπάθεια επαναφοράς του στο αρχικό του ύψος.



Σχήμα 1: Κοκκομετρική ανάλυση του εξετασθέντος εδαφικού υλικού.

Figure 1: Grain size analysis of the soil tested.



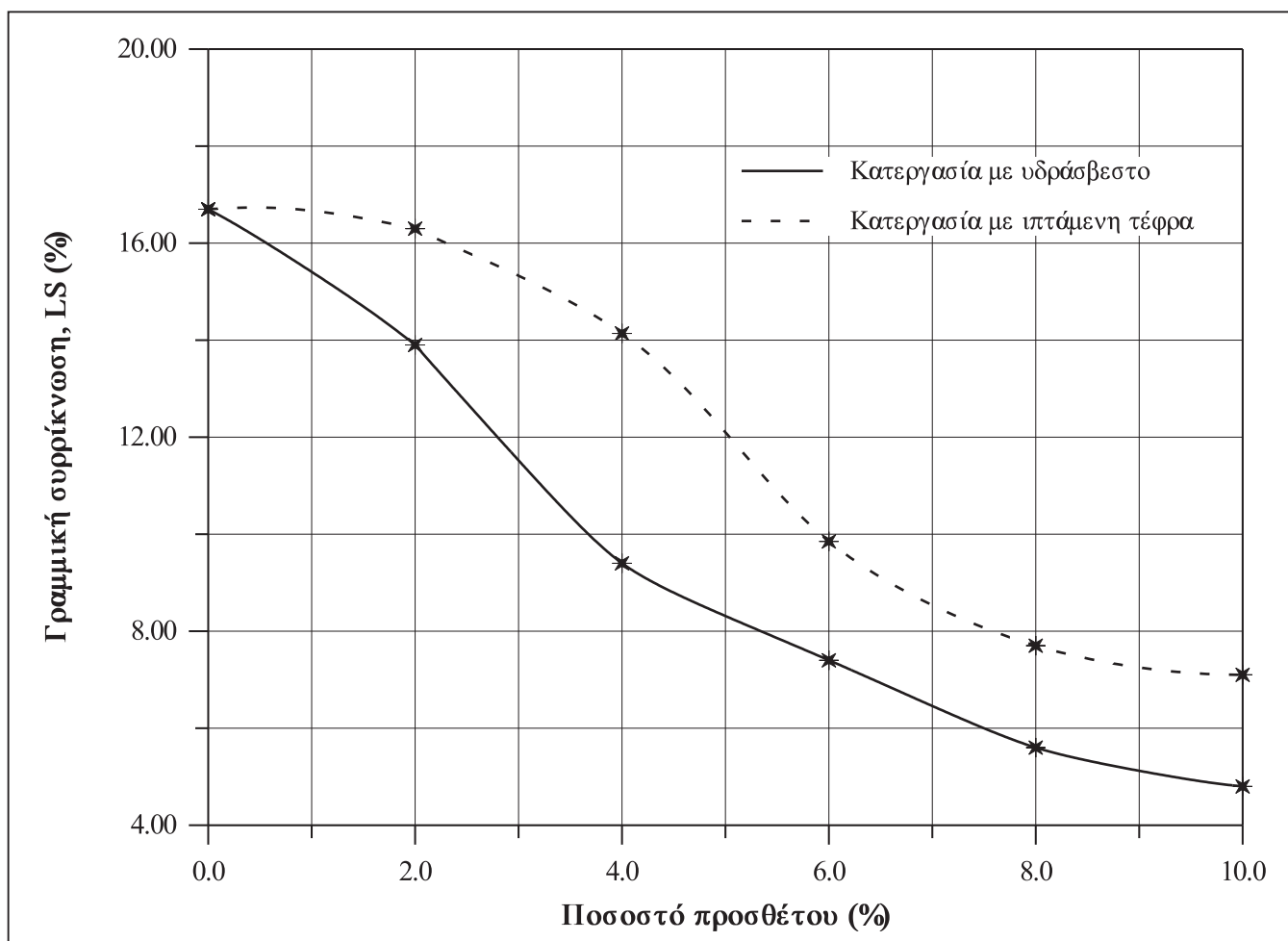
Σχήμα 2: Κοκκομετρική ανάλυση της ιπτάμενης τέφρας.

Figure 2: Grain size analysis of the fly ash.

Πίνακας 3: Μεταβολή ελεύθερης διόγκωσης και πίεσης διόγκωσης με την προσθήκη υδρασβέστου ή ιπτάμενης τέφρας.

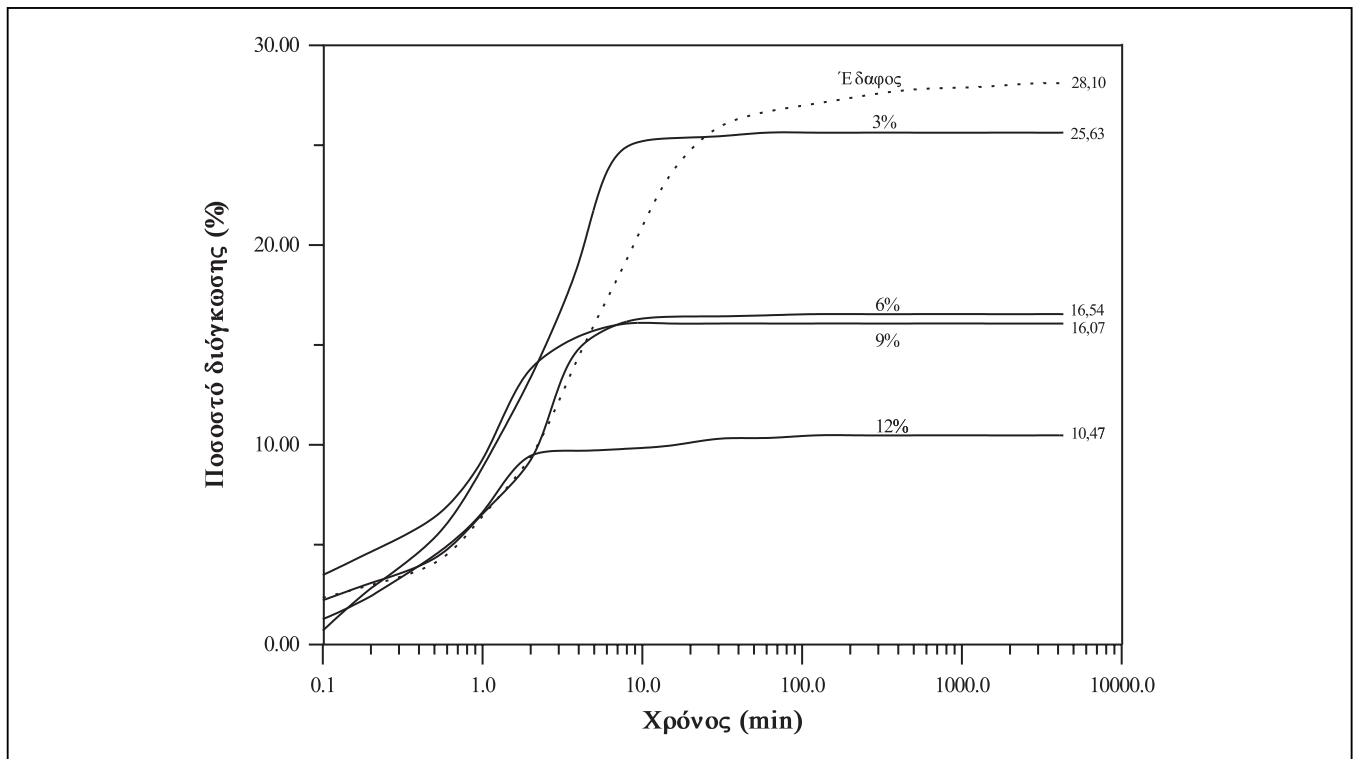
Table 3: Free swell and swelling pressure variation with the addition of lime or fly ash.

Ποσοστό υδρασβέστου (%)	Ελεύθερη διόγκωση (%)	Πίεση διόγκωσης (t/m ²)	Ποσοστό ιπτάμενης τέφρας (%)	Ελεύθερη διόγκωση (%)	Πίεση διόγκωσης (t/m ²)
0	28,10	37,30	0	28,10	37,30
3	25,63	66,25	4	18,44	71,25
6	16,54	105,00	8	16,04	116,25
9	16,07	175,00	12	14,96	121,25
12	10,47	206,25	16	13,14	162,50



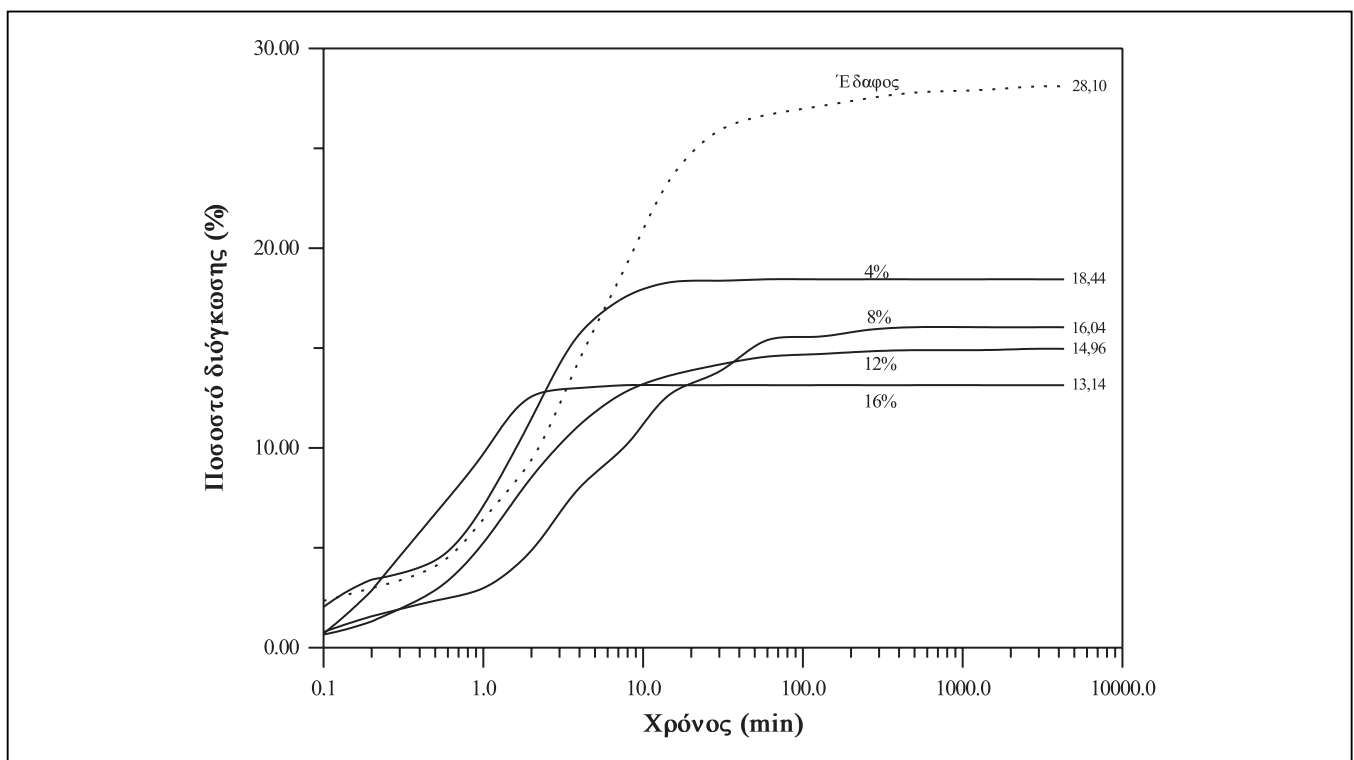
Σχήμα 3: Μεταβολή της γραμμικής συρρίκνωσης του εδαφικού δείγματος μετά την προσθήκη διαφόρων ποσοστών υδρασβέστου ή ιπτάμενης τέφρας.

Figure 3: Variation of the soil's linear shrinkage value after the addition of lime or fly ash in various percentages.



Σχήμα 4: Μεταβολή της ελεύθερης διόγκωσης του εδαφικού δείγματος με την προσθήκη διαφόρων ποσοστών υδρασβέστου.

Figure 4: Free swelling variation following the addition of lime in various percentages.



Σχήμα 5: Μεταβολή της ελεύθερης διόγκωσης του εδαφικού δείγματος με διάφορες αναλογίες ιπτάμενης τέφρας.

Figure 5: Free swelling variation following the addition of fly ash in various percentages.

Στα σχήματα 4 και 5 παρουσιάζονται διαγράμματα μεταβολής της ελεύθερης διόγκωσης του εδαφικού δείγματος με το χρόνο, μετά την προσθήκη σε αυτό των διαφόρων ποσοστών υδρασβέστου ή ιπτάμενης τέφρας. Είναι εμφανές και στα δύο διαγράμματα η επίδραση της σταθεροποίησης.

5. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η κοκκομετρική διαβάθμιση του εδάφους έδειξε ότι αυτό συντίθεται κυρίως από λεπτόκοκκα σωματίδια, αφού ολόκληρο το δείγμα διήλθε από το κόσκινο Νο 4. Με το χάρτη του Cassagrande το έδαφος κατατάσσεται ως ανόργανη άργιλος με υψηλή πλαστικότητα. Ο υψηλός δείκτης πλαστικότητας του εδάφους ($PI=44$), σε συνδυασμό με το υψηλό ποσοστό αργίλου, δείχνει ότι πρόκειται για πολύ διογκούμενο έδαφος ακατάλληλο για βάσεις ή υποβάσεις και με μέτρια έως κακή καταλληλότητα για θεμελίωση, με την προϋπόθεση ότι δεν υπόκειται σε δράση παγετού. Το έδαφος αυτό στη φυσική του κατάσταση είναι πρακτικά αδιαπέραστο.

Η τεχνική ελέγχου των ιδιοτήτων διόγκωσης του εδάφους με την πρόσμιξη διαφόρων ποσοστών ιπτάμενης τέφρας ή υδρασβέστου αποδείχθηκε αποτελεσματική, αφού η συμπεριφορά διόγκωσης βελτιώθηκε σε ικανοποιητικό βαθμό.

Η γραμμική συρρίκνωση των δοκιμών, που σχηματίστηκαν με προσθήκη υδρασβέστου στο εδαφικό δείγμα, μειώθηκε με γρήγορους ρυθμούς, γεγονός που μπορεί να ερμηνευθεί, εάν θεωρηθεί ότι επέρχεται μεταβολή στην υφή και την πλαστικότητα του εδάφους, όταν σε αυτό αναπτυχθούν ποζολανικές αντιδράσεις.

Η μεταβολή της γραμμικής συρρίκνωσης, όταν προστέθηκε στο έδαφος ιπτάμενη τέφρα σε διάφορα ποσοστά, επιταχύνθηκε, όταν οι αναλογίες του προσθέτου στο μίγμα υπερέβαιναν το 4% κατά βάρος. Η μεταβολή μπορεί να αποδοθεί στις αντιδράσεις συσσωμάτωσης και στο σχηματισμό θρόμβων από την ανταλλαγή κατιόντων, κυρίως ασβεστίου, από το περιεχόμενο στην ιπτάμενη τέφρα σε αρκετή ποσότητα (20%) ελεύθερο CaO .

Η προσθήκη υδρασβέστου επηρέασε τη διόγκωση του εξετασθέντος αργιλικού εδάφους. Με την προσθήκη υδρασβέστου σε ποσοστό 3% κατά βάρος, η ελεύθερη διόγκωση μειώθηκε κατά 9% σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του ακατέργαστου εδάφους. Στο αμέσως επόμενο ποσοστό προσθέτου στο μίγμα (6% υδράσβεστος) η αρχική ελεύθερη διόγκωση μειώθηκε κατά 41%.

Αντίστοιχη έντονη επίδραση στην ελεύθερη διόγκωση παρουσιάστηκε με την προσθήκη ιπτάμενης τέφρας στο εδαφικό δείγμα. Με την πρόσμιξη 4% ιπτάμενης τέφρας, η ελεύθερη διόγκωση του μίγματος ήταν κατά 34% μικρότερη από αυτήν του ακατέργαστου εδάφους. Στο αμέσως επόμενο ποσοστό προσθέτου στο μίγμα (8% ιπτάμενη τέφρα) η αρχική ελεύθερη διόγκωση μειώθηκε κατά 43%.

Η πρόσμιξη 6% υδρασβέστου είναι συγκρίσιμη, όσον

αφορά στο αποτέλεσμα επί της διόγκωσης με την πρόσμιξη 8% ιπτάμενης τέφρας, αφού τόσο η τιμή της ελεύθερης διόγκωσης όσο και αυτή της πίεσης διόγκωσης είναι παραπλήσιες για τα συγκεκριμένα ποσοστά προσθέτων.

Με την προσθήκη υδρασβέστου ή ιπτάμενης τέφρας τα δοκίμια αντιστέκονταν στην επαναφορά στο αρχικό τους ύψος. Η αντίσταση αυτή μεγάλωνε με την αύξηση του ποσοστού του προσθέτου. Έτσι, οι τιμές της πίεσης διόγκωσης μπορούν να εξηγηθούν με την ανάπτυξη αντιδράσεων μεταξύ της αργίλου και της υδρασβέστου ή του ελεύθερου οξειδίου του ασβεστίου στην ιπτάμενη τέφρα, οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα από την ανάμιξη των υλικών και την προσθήκη ύδατος. Η δομή της αργίλου μεταβάλλεται με τη δημιουργία συσσωματωμάτων και η διάταξη των μορίων της παύει να είναι κανονική, όπως συμβαίνει στο φυσικό υλικό. Ακόμη, οι πόροι μικραίνουν, αν και ο συνολικός όγκος των κενών στο μίγμα παραμένει αμετάβλητος. Η αντίσταση στην πίεση επαναφοράς στο αρχικό ύψος μπορεί, επίσης, να αποδοθεί στην ανάπτυξη ποζολανικών αντιδράσεων.

Το μεγαλύτερο μέρος της μεταβολής του ποσοστού διόγκωσης στα δοκίμια με την υδράσβεστο λαμβάνει χώρα στα πρώτα δέκα περίπου λεπτά της ώρας από την έναρξη της δοκιμής. Ο χρόνος αυτός ήταν μικρότερος για τα μεγαλύτερα ποσοστά υδρασβέστου, ιδιαίτερα δε για το ποσοστό 12% κατά βάρος.

Για ένα χρονικό διάστημα από την έναρξη της δοκιμής, με εξαίρεση το μίγμα εδάφους +12% υδρασβέστου, τα ποσοστά διόγκωσης των μιγμάτων ήταν μεγαλύτερα από αυτά του φυσικού εδάφους, δείχνοντας ότι ο ρυθμός μεταβολής της διόγκωσης με την προσθήκη υδρασβέστου ποικίλλει.

Στο πρώτο δεκάλεπτο από την έναρξη της δοκιμής, το μίγμα εδάφους +6% υδρασβέστου εμφάνισε ποσοστά διόγκωσης μικρότερα από εκείνα του μίγματος εδάφους +9% υδρασβέστου και κατόπιν οριακά μεγαλύτερα. Αυτό δείχνει ότι υπάρχει ένα κρίσιμο ποσοστό υδρασβέστου στην περιοχή του 6% κατά βάρος, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ευνοϊκή τροποποίηση του εδαφικού υλικού, όσον αφορά στη συμπεριφορά διόγκωσης. Αντίστοιχο κρίσιμο ποσοστό για τη χρησιμοποιηθείσα ιπτάμενη τέφρα βρίσκεται στην περιοχή του 8%-10% κατά βάρος.

Για τα διάφορα ποσοστά ιπτάμενης τέφρας, το διάστημα μεταβολής του ποσοστού διόγκωσης μετά από τρεις ημέρες (από 18,44% έως 13,14%) είναι μικρότερο από το αντίστοιχο διάστημα για τα μίγματα με διάφορα ποσοστά υδρασβέστου (από 25,63% έως 10,47%).

Το μεγαλύτερο μέρος της μεταβολής του ποσοστού διόγκωσης των μιγμάτων εδάφους-ιπτάμενης τέφρας πραγματοποιήθηκε στην πρώτη μία περίπου ώρα από την έναρξη της δοκιμής. Σε αυτό το διάστημα ο ρυθμός μεταβολής του ποσοστού διόγκωσης δεν ήταν σταθερός.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αθανασοπούλου, Δ.Α. και Κολλάρος, Α.Γ., “Προβληματικά για Οδικά Έργα Εδαφικά Υλικά Νομού Έβρου. Αναγνώριση-Κατάταξη”, **Τελική Έκθεση** Ερευνητικού Προγράμματος, 1997, Ξάνθη.
2. Basma, A.A. and Al-Sharif, M., “Treatment of Expansive Soils to Control Swelling”, **Geotechnical Testing Journal**, 1993, vol. **16**, no **3**, pp. 3-19.
3. Chen, F.H., “Foundations on Expansive Soils”, 1988, American Elsevier Science Publications, New York.
4. Green-Kelly, R., “Shrinkage of Clay Soils; A Statistical Correlation with Other Soil Properties”, **Geoderma**, 1974, No **11**, pp. 243-257.
5. Komornik, A. and D. David, “Prediction of Swelling Pressure of Clays”, Proceedings **ASCE, Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division**, 1969, New York, vol. **25**, no **SM1**, pp. 209-225.
6. Kollaros, A.G. and Athanasopoulou, A.D., “The Character and Identification of Swelling Soils in Road Construction Projects”, Proceedings International Symposium on **Engineering Geology and the Environment**, 1997, Athens, vol. **1**, pp. 187-192.
7. Krazynski, L.M., “Expansive Soils in Highway Construction - Some Problems and Solutions”, **4th International Road Fed. African Highways Conference**, 1980, Nairobi, Kenya.
8. Mowafy, Y.M. and Bauer, G.E. “Prediction of Swelling Pressure of Clays and Factors Affecting the Swell Behavior of an Expansive Soil”, **Transportation Research Record**, **1032**, National Research Council, Washington D.C., 1985, pp. 1-7.
9. Bell, F.G., “Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils”, **Engineering Geology**, 1996, vol. **42**, pp. 223-237.
10. Derriche, Z. and Lazzali, F., “Analyse des Mécanismes de Stabilisation d’ un Sol Gonflant Par Rapport de Chaux sous Différentes Formes”, Proceedings International Symposium on **Engineering Geology and the Environment**, 1997, Athens, vol. **1**, pp. 79-84.
11. Bell, F.G., “Engineering Treatment of Soils”, **E&F Spon**, 1993, 302 p.
12. Arabi, M. and Wild, S., “Microstructural Development in Cured Soil-Lime Composites”, **Journal of Materials Science**, 1986, vol. **21**, pp. 497-503.
13. Αθανασοπούλου, Δ.Α., “Βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων υλικών που χρησιμοποιούνται σε χωματουργικές εργασίες και οδοστρώματα. Εφαρμογή σε εδάφη που απαντώνται στο χώρο της Θράκης”, **διδακτορική διατριβή**, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 1995, Ξάνθη.
14. Joshi, R.C. and Nagaraj, T.S., “Fly Ash Utilization for Soil Improvement, Environmental Geotechnics and Problematic Soils and Rocks”, 1987, ed. Balkema, Rotterdam, pp. 15-24.
15. Μαρσέλλος, Ν., Χριστούλας, Σ. και Κόλλιας, Σ. “Χρήση της Ιπτάμενης Τέφρας στην Οδοποιία”, **Δελτίο ΚΕΔΕ**, 1986, τεύχος **3-4**, Αθήνα.

Α. Δ. Αθανασοπούλου,

Λέκτορας, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Συγκοινωνιακών Έργων και Μεταφορών, Εργαστήριο Α΄ Συγκοινωνιακής Τεχνικής, Βασ. Σοφίας 1, 671 00 Ξάνθη.

Extended summary

The Effect of Lime and Fly Ash Utilisation on the Swelling of a Soil Material

A. D. ATHANASOPOULOU

Lecturer D.U.TH.

Abstract

The effects of the lime and fly ash soil-stabilisation process on the swelling behaviour of a clayey soil are presented. The soil sample was taken from a region where roadwork maintenance had been in progress. The pavement had experienced heavy damage because of swell and shrinkage phenomena. Laboratory methods were used for the determination of shrinkage, free swell and swelling pressure values of soil-additive mixtures. Strong evidence exists that it is possible to improve the swelling characteristics through the use of chemical additives. Lime and fly ash proved to be good stabilisers acting beneficially not only on the strength characteristics of a soil, but on its swelling potential as well.

1. INTRODUCTION

The major causes of structural failures due to swelling and expansion of soils are presented, with emphasis on the variation of water content and its capability to be retained on the clay mineral's interface. The phenomena related to the swelling behaviour are affected by various conditions such as the kind and quantity of the clay mineral, the water content, the soil structure and the pressures activated by the structure.

Damage caused to pavements built on active clays is characterised by four major forms, namely the appearance of longitudinal cracking, parallel to the road centreline or close to the shoulders, localised deformations generally accompanied by lateral cracking, localised failures of the pavement associated with disintegration of the road surface, due to insufficient bearing capacity and unevenness along a significant length of the road surface without any cracking or visible damage.

Small quantities of lime could stabilise expansive soils, altering the physical properties and the technical behaviour of these soils. In general, chemical reactions taking place around the clay mineral improve the strength characteristics of soil-lime mixtures. Fly ash has also been proved a good stabilising agent for problematic soils under road infra-

structures. However, the effect of these additives on the swelling characteristics of soils has not yet been studied.

A soil material from a road-project site was tested in the laboratory in order to investigate its expandability. A search followed, dealing with the impact of the addition of lime and fly ash on the swelling characteristics of these soils.

2. DESCRIPTION OF MATERIALS

The soil material used was sampled from the Orestiada area in Evros county. The sampling was made at a depth of one meter. The soil is a dark-coloured clay which is classified in group A-7-5 according to the AASHTO classification method, while in the Unified Soil Classification System it is characterised as CH.

The lime used in different ratios for the preparation of soil-additive specimens was a typical commercial lime with high calcium oxide content, while the rest is a combination of alkali and other metal oxides.

The fly ash added to soil samples was taken from the power plant in Ptolemaida, which uses lignite rich in calcium in the form of CaCO_3 . Its specific weight was 2.5, while about 80% of the material passed the No 200 sieve. It is worth noting that fly ash is a non-plastic material, which in admixture with the soil reduces its liquid limit and plasticity index. When the fly ash is added to a clayey soil, cement bonds could be developed either due to the pozzolanic effect or because of an inherent self-hardening property under favourable moisture and compaction conditions.

3. LABORATORY TESTING

The natural moisture of the soil sample was found. The grain size analysis of the clay was performed using standard sieves and the pycnometer (Stokes method). The Atterberg

limits of the soil were determined and the evaluation of the swelling characteristics was made through linear shrinkage, free swell and swelling pressure tests.

3.1. Linear shrinkage

Linear shrinkage is the reduction in dimension of a soil sample, occurring when the moisture reaches the highest soil moisture whereby no volume reduction exists, i.e. the shrinkage limit. The linear shrinkage is calculated using semicircular molds 14 cm in length and 2.5 cm in diameter. Soil samples with moisture content equal to the liquid limit were tested according to BS 1377-75. The linear shrinkage is expressed as the percent change of the sample's linear volume, $LS(\%) = (\Delta L/L) \times 100$.

3.2. Free swell

The free swell of the soil sample was determined in volumetric tube and in oedometer. The one dimensional device Geonor h-200 was used and the procedure described in ASTM D 4546-85, method A, with initial stress of 1 kPa, was applied.

The free swell values were determined from the swell (difference in height readings) versus log time diagram. The soil sample presented high free swell values. This characteristic makes these soils improper for pavement bases or sub-bases.

3.3. Swelling pressure

The swelling pressure tests were performed according to the ASTM D 4546, method A, in the oedometer. After the swell phenomenon had ended, pressures of 5, 10, 20, 40 and 80 kPa were applied to the sample until it was compressed to its initial height h_0 . Using these data, a pressure-height difference curve was drawn. The intersection point of this curve with the straight line passing through h_0 and parallel to the pressure axis, is defined as swelling pressure.

The procedure for the free swell and the swelling pressure was repeated for the samples formed with the soil material and lime or fly ash as additives. Percentages of 3%, 6%, 9% and 12% were used for lime, while for the fly ash the percentages added were 4%, 8%, 12% and 16% by weight. The swelling pressure values refer to the resistance presented by the swelled material to the effort for the restoration of its initial height.

4. COMMENTS-CONCLUSIONS

The soil's grain-size distribution showed that it mainly consists of fine-grained particles, since the whole sample passed through the No 4 sieve. Using Cassagrande's chart the

soil is classified as an inorganic clay with high plasticity. The soil's high plasticity index and its high clay percentage show that it is a very expandable soil inappropriate for use in road bases or subbases and with moderate to poor suitability as a subgrade material. The soil in its natural state is practically impermeable.

The technique for the control of the swelling properties through the admixture of lime or fly ash in various percentages proved to be effective, since the swelling behaviour of the soil was satisfactorily improved.

The linear shrinkage of specimens formed with the addition of lime to the soil sample was reduced at fast rates. This could be explained if one considers that a change in plasticity and texture of the soil is brought about when pozzolanic reactions are developed in the soil.

The variation of linear shrinkage in soil-fly ash mixtures was accelerated when the additive's ratios were in excess of 4% by weight. This variation could be attributed to flocculation reactions and to formation of aggregates caused by the cation exchange, mainly calcium, whose content is relatively high in the fly ash.

The addition of lime affected the swelling of the clayey soil. When 3% lime was added the free swell reduced by 9% compared to that of the untreated soil. When the next amount of lime was added the initial free swell was reduced by 41%. A similar effect on the free swell was evident when fly ash was added to the soil sample. The percentages of free swell's reduction were 34% and 43% for the mixtures with 4% and 8% fly ash respectively.

In respect of the swelling, the addition of 6% lime is comparable to the addition of 8% fly ash, since both the free swell and the swell pressure values were very similar for these admixtures.

When lime or fly ash was added to the soil, the specimens resisted the restoration of their original height. This resistance increased with higher percentages of additive. Thus, the values of swell pressure could be explained in terms of the development of reactions between the clay and the lime or the free calcium oxide encountered in the fly ash. These reactions take place in a very short time interval after the mixing of the materials and the addition of water to the mix. The clay's structure alters with the production of aggregates and the arrangement of its molecules ceases to be regular as in the natural material. Furthermore, the pores decrease in size, though the total void-volume remains the same. The resistance to the pressure for the restoration of the original height, could also be attributed to the development of pozzolanic reactions.

The greater part of the swell percentage variation in soil-lime specimens was developed during the first ten minutes

after the test had started. This time was less for the greater percentages, especially for the 12% lime by weight ratio.

For some time after the test was started, with the exception of the soil +12% lime mixture, the swell percentages exhibited by the mixtures were higher than those of the natural soil, showing that the swell's variation rate varies when lime is added to the soil.

During the first ten minutes after the beginning of testing, the mixture "soil +6% lime" presented swell percentages lower than those presented by the "soil +9% lime" mixture and later on slightly higher. It can be concluded that a critical percentage of lime in the region of 6% exists which could be

used for the favourable alteration of the soil's swelling behaviour. A respectively critical percentage for the fly ash used in the laboratory experiments lies in the region of 8% to 10% by weight.

After three days of testing, the range of variation in swell percentage was smaller for the different fly ash percentages in the specimens in comparison with the same range for the different lime percentages.

The greater part of the swell percentage variation in soil-fly ash specimens was developed during the first hour after the test had started. During that time the swell's percentage variation rate varied.

A. D. Athanasopoulou,

Lecturer, Democritus University of Thrace, Polytechnic School, Dept. of Civil Engineering, Highway Construction and Transportation Division, Laboratory A' of Transportation Engineering, Vas. Sofias 1, 671 00 Xanthi.

