

**ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ  
ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΑΣΒΕΣΤΟΥΧΟ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ  
ΜΕ Η ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟ  
α) Αντοχή σε θλίψη, διάρρηξη και CBR**

**Σ. Κόλιας, Α. Καραχάλιος**

*Εργαστήριο Οδοποιίας, Σχολή πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 15773,  
Ζωγράφου, Αθήνα*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Εξετάστηκε η δυνατότητα σταθεροποίησης τριών ειδών αργιλικών εδαφικών υλικών (CL,CH,OL) με διάφορα ποσοστά ιπταμένης τέφρας ή και τσιμέντου. Οι παράμετροι που διερευνήθηκαν ήταν (α) τα Όρια Atterberg (β) τα αποτελέσματα της δοκιμή συμπίκνωσης Proctor (γ) η αντοχή σε (ανεμπόδιστη) θλίψη σε 7, 28 και 90 ημέρες (δ) αντοχή σε εφελκυσμό (ε) η τιμή CBR σε 90 ημέρες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται πολύ ενθαρρυντικά για ορισμένα είδη αργίλων. Συγκεκριμένα, ανάλογα με το ποσοστό του σταθεροποιητή παρουσιάσθηκε μείωση του ορίου υδαρότητας (LL) και αύξηση του ορίου πλαστικότητας (PL), αύξηση της βέλτιστης υγρασίας για συμπίκνωση, μείωση της μέγιστης ξηρής πυκνότητας, αύξηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, αύξηση της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη και αύξηση της τιμής CBR.

*Λέξεις κλειδιά: ασβεστόυχος ιπτάμενη τέφρα (ακατέργαστη), σταθεροποίηση αργιλωδών εδαφών, τσιμέντο, αντοχή σε θλίψη, εφελκυσμός σταθεροποιημένων αργιλωδών εδαφών, CBR σταθεροποιημένων εδαφών*

# **STABILIZATION OF FINE CLAY SOILS WITH HIGH CALCIUM FLY ASH AND WITH OR WITHOUT CEMENT**

## **a) compressive and tensile strength and CBR**

**S. Kolias, A. Karahalios**

*Highway Engineering Laboratory, School of Civil Engineering, NTUA 5 Iroon Polytechniou str.  
15773 Athens*

**ABSTRACT:** In this study the effectiveness of using high calcium fly ash (with or without cement) as a chemical stabilizer for three different fine-grained clay soils (CL, CH, OL) was investigated. The parameters, which were examined, were Atterberg limits, optimum moisture content and maximum dry density for standard compaction test, compressive strength, cylinder splitting strength and CBR. The results of this research are promising since considerable upgrading of soils may be achieved enabling the use of the stabilized soils as improved sub-grades/capping layers or subbases for pavements. More specifically the results show that with increased percentages of fly ash a) plastic limit increases and liquid limit decreases, b) optimum moisture content increases and maximum dry density decreases c) uniaxial compressive strength at 7,28 and 90 as well as cylinder splitting strength and CBR increase.

*Keywords: high calcium fly ash, stabilization of fine-grained soils, cement compressive, tensile strength of stabilized soils, CBR of stabilized soils*

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην ανακοίνωση αυτή παρουσιάζεται μέρος των αποτελεσμάτων ευρύτερης εργαστηριακής έρευνας [Καραχάλιος 2000] που αφορά τις δυνατότητες σταθεροποίησης με ιπτάμενη τέφρα.

## ΥΛΙΚΑ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης αυτής είναι:

### *Εδαφικά υλικά*

Χρησιμοποιήθηκαν τρία εδαφικά υλικά τα οποία χάριν συντομίας ονομάστηκαν Άργιλος I, Άργιλος II και Άργιλος III με τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά εδαφικών υλικών

Εδαφικό υλικό	LL	PI	% < 75μ	AASHTO	UCS
Άργιλος I	38	18	51	A-6	CL
Άργιλος II	53	30	83	A-7-6	CH
Άργιλος III	43	25	90	A-7-6	OH

### *Ιπτάμενη Τέφρα*

Χρησιμοποιήθηκε Ιπτάμενη Τέφρα (IT) από τον Α/Σ Καρδιάς και αντιπροσωπεύει την παραγωγή τέφρας του σταθμού κατά την διάρκεια μίας τυπικής εβδομάδας για τα δύο δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν. Τα δείγματα που συλλέχθηκαν ανά ημέρα αναμίχθηκαν καλά και στο τέλος δημιουργήθηκαν δυο ομογενή υλικά που στο εξής θα καλούνται ιπτάμενη τέφρα I και ιπτάμενη τέφρα II. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των δύο δειγμάτων της τέφρας είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε άσβεστο ( 45-49%). Η χημική σύσταση της ιπτάμενης τέφρας παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 2 : Χημική ανάλυση δειγμάτων IT Καρδιάς

IT	SiO <sub>2</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MgO %	CaO %	Na <sub>2</sub> O %	K <sub>2</sub> O %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SO <sub>3</sub> %	Απώλεια πύρωσης	Ελεύθερη άσβεστος
I	19,9	5,72	3,65	48,97	0,6	0,45	9,26	7,,25	3,01	18,31
II	25,24	5,08	4,23	44,77	0,28	0,69	10,20	6,49	-	-

### *Τσιμέντο*

Χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου II 35.

## ΟΡΙΑ ATTERBERG

Εκτός των δοκιμών προσδιορισμού των ορίων Attemberg στα εδαφικά υλικά στην φυσική τους κατάσταση, έγιναν δοκιμές προσδιορισμού των ορίων Attemberg σε μίγματα εδαφικού υλικού και ιπταμένης τέφρας, με περιεχόμενα ποσοστά 5,10 και 20% κατά ξηρό βάρος εδαφικού υλικού. Η προσθήκη ιπταμένης τέφρας στα συγκεκριμένα εδαφικά υλικά τα μετέτρεψε σε μη πλαστικά σε χρονικό διάστημα 24 ωρών (αύξηση ορίου πλαστικότητας, μείωση ορίου υδαρρότητας). Το χρονικό διάστημα των 24 ωρών είναι πρακτικά ο απαιτούμενος εκείνος χρόνος για την ομογενή κατανομή του νερού στην μάζα του εδαφικού υλικού και για την εκκίνηση όλων των χημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την ενυδάτωση της ιπταμένης τέφρας (σβέση της ασβέστου, ποζολανική αντίδραση κ.λ.π.) και για την ανταλλαγή ιόντων για τον μετασχηματισμό του εδάφους.

## ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η διαδικασία της παρασκευής δοκιμίων περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια: α) Ξήρανση του εδαφικού υλικού με την χρήση κλιβάνου σε θερμοκρασία μέχρι 70 °C. β) Θρυμματισμό των συσσωματωμάτων. γ) Κοσκίνισμα του θραυσθέντος εδαφικού υλικού με την χρήση του κόσκινου Νο 4. δ) Καθορισμό των αναγκαίων ποσοτήτων των υλικών για την δημιουργία των σωστών μιγμάτων και ανάμιξη αυτών. Σε μία προσπάθεια επίτευξης ομοιογενέστερης ανάμιξης η Ι.Τ. προαναμίχθηκε με το νερό και στη συνέχεια το μίγμα αναμίχθηκε με το εδαφικό υλικό όπως εφαρμόζεται συχνά στις σύγχρονες μεθόδους επιτόπου αναμίξεως σταθεροποιητών σε μορφή σκόνης για περιβαλλοντικούς λόγους. ε) Αναμονή 24-ωρών για την ανάπτυξη της αρχικής δράσης της ιπταμένης τέφρας καθώς και για την ομοιόμορφη κατανομή της υγρασίας σε όλη τη μάζα του εδαφικού υλικού. στ) Τελική ανάμιξη του μίγματος και σύνθλιψη (με τα χέρια) των συσσωματωμάτων έτσι ώστε τα δοκίμια που θα κατασκευαστούν να έχουν την ίδια περίπου σύσταση και πυκνότητα. Κατά την φάση αυτή αναμιγνύεται το τσιμέντο σε περίπτωση παρασκευής μίγματος με συνδυασμό Ι.Τ. και τσιμέντου. ζ) Ζύγιση των αναγκαίας ποσότητας εδαφικού μίγματος. η) εισαγωγή του μίγματος μέσα στο τύπο, συμπύκνωση και εξόλκωση του δοκιμίου. θ) Συντήρηση των δοκιμίων.

Τα κυλινδρικά δοκίμια (λόγος ύψους προς διάμετρο 1:2) παρασκευάστηκαν έτσι ώστε να έχουν προκαθορισμένη πυκνότητα ίση προς τη μέγιστη της αντίστοιχης δοκιμής συμπύκνωσης. Η παρασκευή έγινε σύμφωνα με το πρότυπο BS 1924 § 5.12 με την διαφορά ότι χρησιμοποιήθηκαν απολύτως κυλινδρικά δοκίμια αντί των ελαφρώς κωνικών δοκιμίων που προβλέπονται στο BS. Η συντήρηση των δοκιμίων έγινε με την περιτύλιξη τους σε πλαστική μεμβράνη (μαγειρική) και με την εισαγωγή τους μέσα σε θάλαμο συντηρήσεως όπου οι συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας είναι σταθερές (RH=91-95%, T=20-25°C).

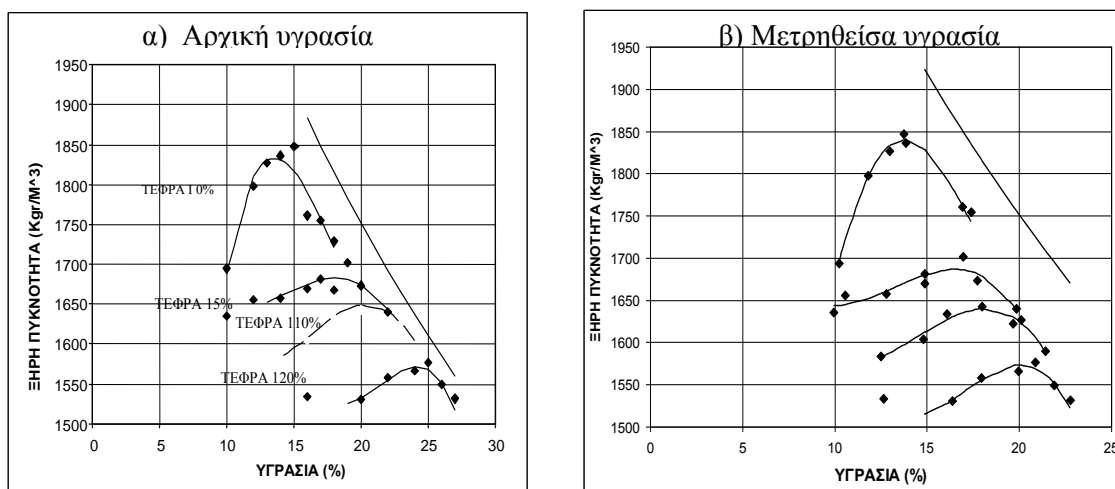
Οι δοκιμές έγιναν σε ηλικίες 7,28 και 90 ημερών. Το άνω όριο των 90 ημερών επιλέχθηκε διότι στο χρόνο αυτό αναμένεται να έχει συντελεστεί στο μεγαλύτερο ποσοστό η χημική δραστηριότητα που αναπτύσσεται μέσα στο μίγμα λόγω της δράσεως της Ι.Τ.. Τα παραπάνω χρονικά όρια αρχίζουν ευθύς αμέσως μετά την ανάμιξη του μίγματος εδαφικού υλικού, ιπταμένης τέφρας και νερού.

## ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ –ΠΡΟΤΥΠΗ

Τα αποτελέσματα της δοκιμής συμπίκνωσης για το πρώτο υλικό (άργιλος Ι ) παρουσιάζονται στα σχήματα 1(α,β). Ανάλογα αποτελέσματα παρουσίασαν και τα άλλα εδαφικά υλικά.

Για τις δοκιμές αυτές γίνονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- παρατηρείται διαφορά μεταξύ της αρχικής υγρασίας που προστέθηκε στο εδαφικό μίγμα και στην υγρασία που μετρήθηκε στο εδαφικό μίγμα μετά το πέρας της δοκιμής, όπως ακριβώς ορίζει και το αντίστοιχο πρότυπο (ASTM D 698-78). Δεδομένου ότι είχαν ληφθεί όλα τα αναγκαία μέτρα για την αποφυγή της εξατμίσεως (ανάμιξη και παραμονή σε πλαστική σακούλα για 24 ώρες κ.λ.π.) η μεταβολή αυτή θα μπορούσε να αποδοθεί στη χημική δέσμευση νερού λόγω της δράσης της ιπταμένης τέφρας
- Παρατηρείται αύξηση της βέλτιστης υγρασίας και μείωση της μέγιστης ξηρής πυκνότητας σε σχέση με το περιεχόμενο ποσοστό ιπτάμενης τέφρας. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα με τα αντίστοιχα διαγράμματα υγρασίας πυκνότητας σε περίπτωση σταθεροποιήσεως με υδράσβεστο και είναι ενδεικτικά της ανάλογης προς την υδράσβεστο δράσης της Ι.Τ. λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας της σε άσβεστο



Σχ. 1: Αποτελέσματα της πρότυπης δοκιμής συμπίκνωσης Άργιλος Ι α) αρχική υγρασία β) μετρηθείσα υγρασία

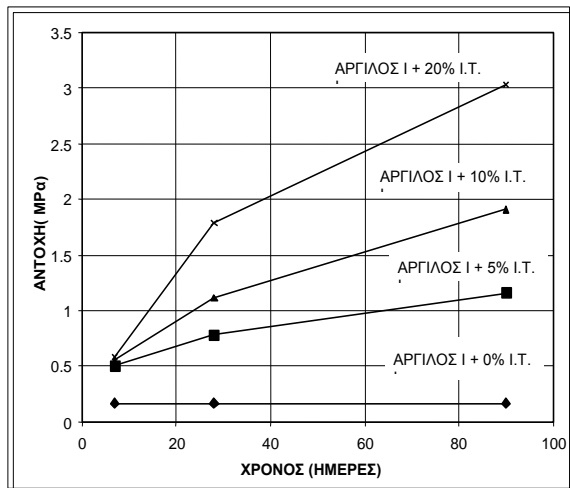
## ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

### Μονοαξονική θλίψη

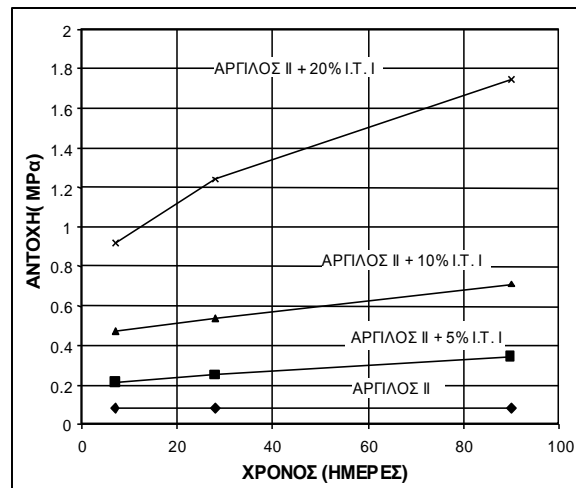
Η δοκιμή σε θλίψη έγινε σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 50mm και ύψους 100mm με ποσοστά ΙΤ 5, 10 και 20% κ.β. ξηρού υλικού σε ηλικία 7, 28 και 90 ημερών. Τα αποτελέσματα

παρουσιάζονται στα Σχήματα 2, 3 και 4. Εξετάστηκε επίσης και η επίδραση της χρησιμοποίησης τσιμέντου είτε ως μοναδικού σταθεροποιητικού μέσου (Αργίλος III) είτε σε συνδυασμό με Ι.Τ. και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 5, 6 και 7 .

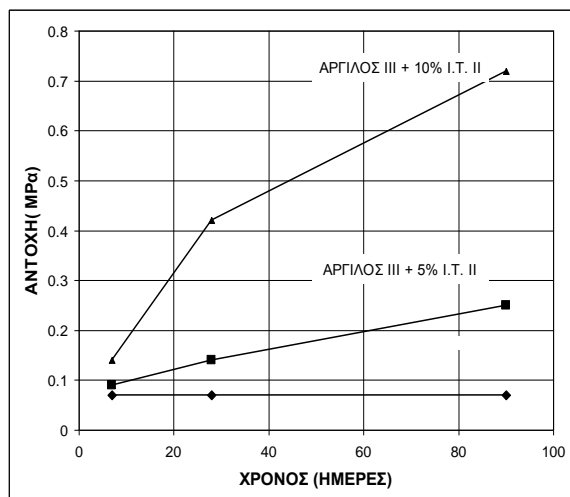
Παρατηρείται γενικά ότι τα τρία είδη εδαφικών υλικών παρουσιάζουν αξιοσημειώτες διαφορές στην αντοχή σε θλίψη τόσο για την περίπτωση χρήσης ΙΤ όσο και για χρήση συνδυασμού ΙΤ και τσιμέντου.



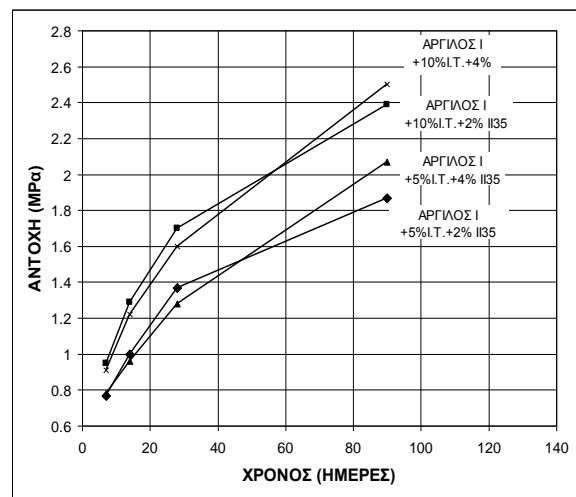
Σχ. 2: Θλιπτική αντοχή μιγμάτων Αργίλου I



Σχ. 3: Θλιπτική αντοχή μιγμάτων Αργίλου II



Σχ. 4: Θλιπτική αντοχή μιγμάτων Αργίλου III



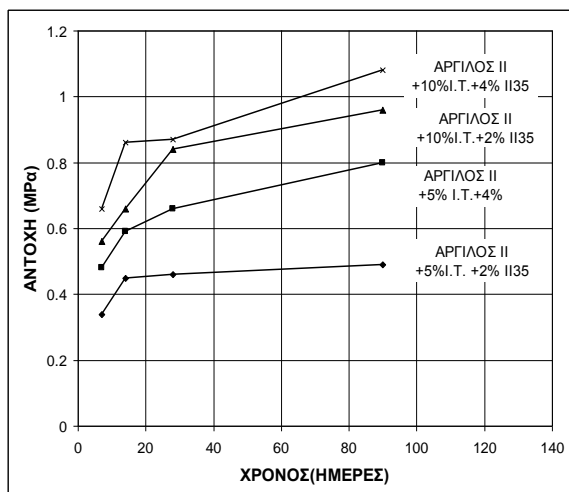
Σχ. 5: Θλιπτική αντοχή σε μίγματα Αργίλου I, ΙΤ και τσιμέντου

Για την περίπτωση χρήσης μόνον Ι.Τ. η κατάταξη των εδαφών από απόψεως αντοχής (αντίδρασης με την ΙΤ) είναι: Αργίλος I, Αργίλος II, Αργίλος III. Η άργιλος I αποκτά αντοχές που υπερβαίνουν το συνήθως εφαρμοζόμενο όριο των 1.7 MPa [PCA] με ποσοστά από 10% ΙΤ και άνω ενώ η

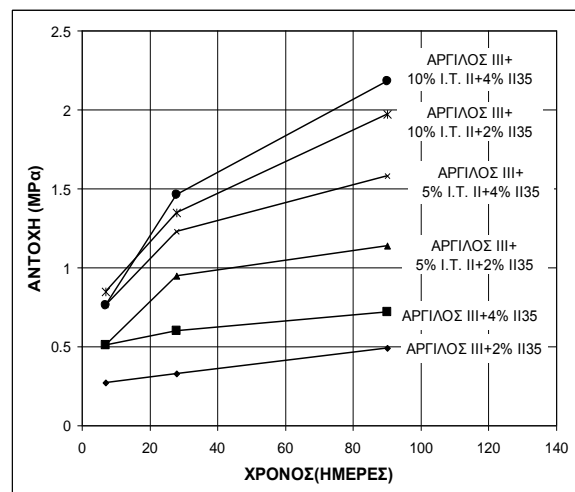
Άργιλος II χρειάζεται 20% ΙΤ και η Άργιλος III δεν ικανοποιεί την απαίτηση αυτή ούτε με 20% Ι.Τ. Σημειώνεται ότι η Άργιλος I με 20% ΙΤ ικανοποιεί το κριτήριο της κυβικής αντοχής των 3,0 ΜΡα των Βρετανικής πρακτικής [TRL-road note 31, Sherwood] για σταθεροποιημένες βάσεις με τσιμέντο. Για σταθεροποιημένες υποβάσεις οι απαιτήσεις σε αντοχή [Dallas] 0.7ΜΡα σε 28 ημέρες ικανοποιούνται από την Άργιλο I για 10% Ι.Τ. και για την Άργιλο II για εκτιμώμενο ποσοστό 15% Ι.Τ.

Εντούτοις, η βελτίωση ως προς την αντοχή σε θλίψη και των τριών εδαφικών υλικών είναι φανερή γεγονός που καθιστά την χρήση των σταθεροποιημένων εδαφών ως υλικών στρώσης έδρασης οδοστρωμάτων (βελτιωμένο υπέδαφος οδοστρωμάτων) όχι μόνο εφικτή αλλά ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα οικονομικά λόγω της συνεπαγόμενης μείωσης του απαιτούμενου πάχους οδοστρώματος υπό την προϋπόθεση ότι θα ικανοποιούνται και μερικές πρόσθετες απαιτήσεις (απομένουσα αντοχή σε θλίψη μετά από υδρεμποτισμό, τιμή CBR).

Παρατηρείται επίσης ότι σε αντίθεση με τις περιπτώσεις σταθεροποίησης με υδράσβεστο στις οποίες η αντοχή πέραν ενός ορίου παύει να αυξάνει στην περίπτωση της ιπτάμενης τέφρας τέτοιο όριο δεν παρατηρήθηκε τουλάχιστον μέχρι 20% Ι.Τ.



Σχ. 6: Θλιπτική αντοχή για συνδυασμό ΙΤ και τσιμέντου. Άργιλος II



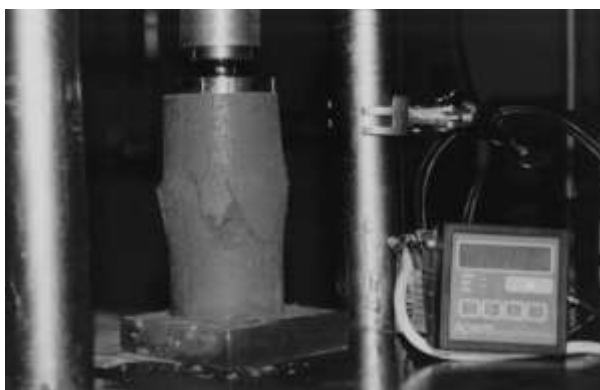
Σχ. 7: Θλιπτική αντοχή για συνδυασμό ΙΤ και τσιμέντου. Άργιλος III

Για την περίπτωση συνδυασμού Ι.Τ. και τσιμέντου παρατηρείται σημαντική αύξηση της αντοχής τόσο σε μικρή ηλικία (όπως θα έπρεπε να αναμένεται) όσο και σε μεγάλη ηλικία. Η αύξηση αυτή κυμαίνεται περίπου: για την Άργιλο I από 25% έως 60 %, για την Άργιλο II από 28% έως 128% και για την Άργιλο III από 160% έως 500%. Επισημαίνεται ότι η μεγαλύτερη ποσοστιαία βελτίωση παρατηρείται στην Άργιλο III, εδαφικό υλικό με την μικρότερη αντίδραση σε σταθεροποίηση με Ι.Τ. Είναι φανερό ότι με κατάλληλο συνδυασμό ποσοστών τέφρας και τσιμέντου τόσο η Άργιλος II όσο η Άργιλος III μπορούν να σταθεροποιηθούν σε ικανοποιητικό βαθμό για χρήσεις σε στρώσεις υποβάσης. Η εργασία αυτή περιελάμβανε επίσης την εξέταση της επίδρασης του τσιμέντου στην Άργιλο III, καίτοι πρακτικά η σταθεροποίηση με τσιμέντο δεν μπορεί επιτευχθεί λόγω αδυναμίας ομογενούς αναμίξεως του τσιμέντου μέσα στο πλαστικό εδαφικό υλικό.

Από το Σχ. 7 φαίνεται πράγματι ότι παρ' όλη την επιμελημένη εργαστηριακή ανάμιξη οι αντοχές με 2% ή 4% τσιμέντο είναι πολύ μικρές. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζεται η επίδραση του υδρεμποτισμού στην αντοχή σε θλίψη για τις Αργίλους I και II, δεδομένου ότι ανάλογα με την θέση που θα καταλάβει η σταθεροποιημένη στρώση και τις υδρολογικές συνθήκες της περιοχής θα πρέπει να εξετάζεται και η επίδραση του υδρεμποτισμού.

Πίνακας 3: Επίδραση υδρεμποτισμού στη θλιπτική αντοχή

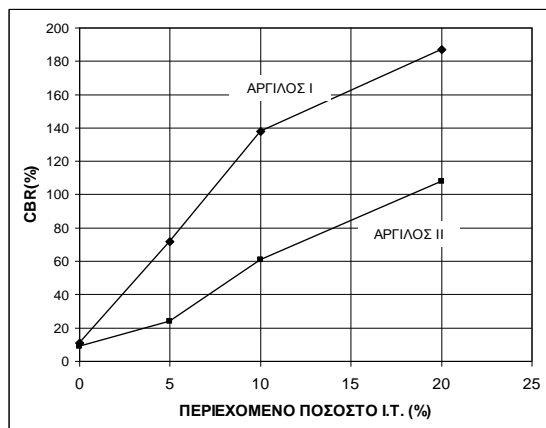
Εδαφικό υλικό	Ι.Τ. (%)	Απομένουσα Αντοχή (MPa)	Ποσοστό (%)
Αργίλος I	5	0,95	81,9
	10	1,79	93,7
	20	2,79	92,1
Αργίλος II	5	0,16	47,1
	10	0,54	76,1
	20	1,42	83,0



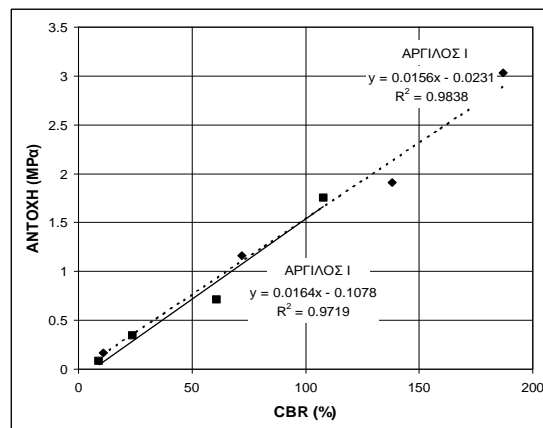
Σχ. 8: Θραύση δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη

#### Καλιφορνιακός λόγος φέρουσας ικανότητας CBR

Το CBR προσδιορίστηκε για τα εδαφικά υλικά Αργίλος I και Αργίλος II, για ποσοστά ιπταμένης τέφρας 5%,10% και 20% και ηλικία δοκιμών 90 ημερών και μετά από υδρεμποτισμό 7 ημερών. Τα αποτελέσματα του CBR παρουσιάζονται στο Σχήμα 9. Είναι φανερό ότι οι τιμές του CBR παρουσιάζουν μία αξιοσημείωτη αύξηση ήδη από ποσοστά Ι.Τ. που υπερβαίνουν το 5% γεγονός που επιβεβαιώνει την δυνατότητα σημαντικής μείωσης του απαιτούμενου πάχους οδοστρώματος.



Σχ. 9: Τιμές CBR για μίγματα 90 ημερών



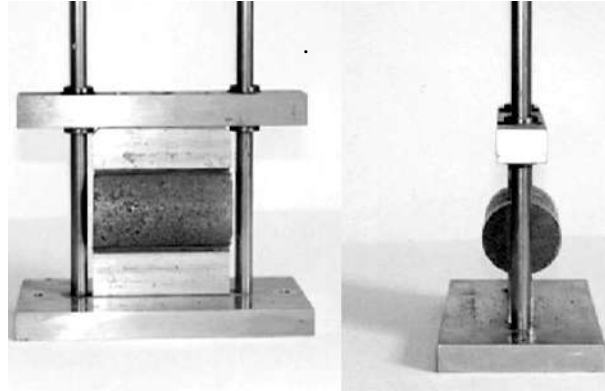
Σχ. 10: Συσχέτιση αντοχής σε θλίψη και CBR

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η συσχέτιση της αντοχής σε θλίψη και της τιμής CBR που βρέθηκε για τα εξετασθέντα εδαφικά υλικά Αργίλος I και Αργίλος II.

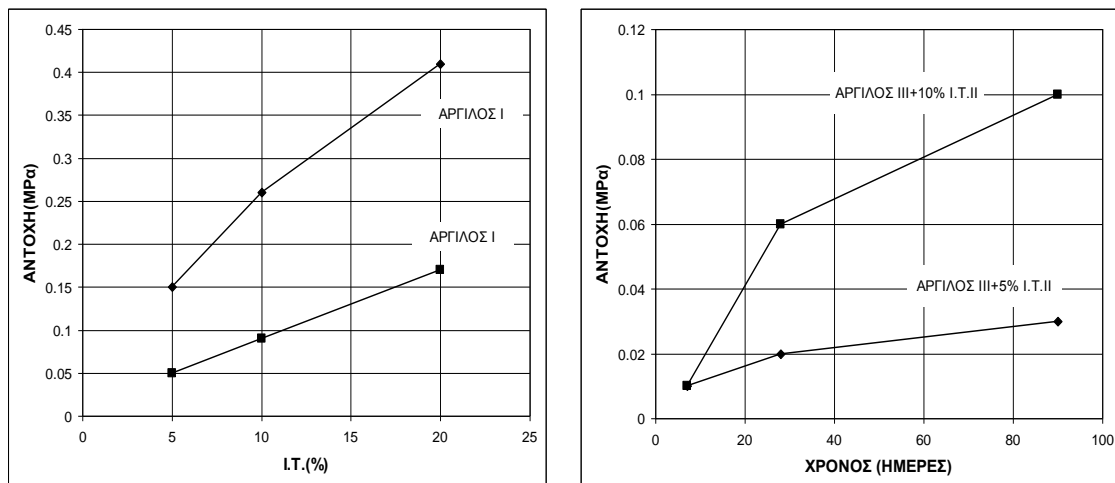


### Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό

Η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (διάρρηξη) προσδιορίστηκε επίσης με κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 50mm και ύψους 100mm με τη διάταξη φόρτισης του Σχήματος 11 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 12.



Σχ. 11: Διάταξη φόρτισης σε διάρρηξη



Σχ. 12: Αντοχές σε εφελκυσμό (διάρρηξη) για τα εδαφικά υλικά Άργιλος Ι και Άργιλος ΙΙΙ

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση ασβεστούχου Ι.Τ. ως σταθεροποιητή αργλικών εδαφικών υλικών παρέχει την δυνατότητα βελτίωσης των ιδιοτήτων των υλικών αυτών ως προς:

1. Τα όρια Atterberg (ελαχιστοποίηση ή και μηδενισμός του δείκτη πλαστικότητας).
2. Την δυνατότητα επεξεργασίας τους (θρυμματισμός, συμπύκνωση υπό συνθήκες υψηλής υγρασίας, ανάμιξη με άλλα υλικά).
3. Την αύξηση της αντοχής σε θλίψη και εφελκυσμό.

#### 4. Την αύξηση της τιμής C.B.R.

Από την εργασία αυτή γίνεται φανερό ότι η χρησιμοποίηση Ι.Τ. υψηλής περιεκτικότητας σε CaO παρέχει σημαντικές δυνατότητες σταθεροποίησης αργιλικών εδαφικών υλικών και χρησιμοποίηση τους, ανάλογα με το είδος του οδοστρώματος, ως βελτιωμένων στρώσεων έδρασης, υποβάσης ή και βάσης. Ιδιαίτερα επισημαίνεται η οικονομική ωφέλεια που μπορεί να έχει η χρησιμοποίηση σταθεροποιημένων με Ι.Τ. στρώσεων έδρασης οδοστρωμάτων αυτοκινητοδρόμων.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. BS-1924.
2. Dallas N Little, Handbook for Stabilization of Pavement Sub grades and Base Courses with Lime Kendal Hund Publishing Company 1995.
3. Καραγάλιος Αναστάσιος, Σταθεροποίηση αργιλικών εδαφών με ιπτάμενη τέφρα υψηλής περιεκτικότητας σε Άσβεστο: Μηχανικές ιδιότητες, διερεύνηση των δυνατοτήτων χρήσεως σε στρώσεις έδρασης οδοστρωμάτων, Μεταπτυχιακή Εργασία - ΔΠΜΕ Δομοστατικός σχεδιασμός και ανάλυση κατασκευών.
4. Sherwood Philip,TRL,State of the Art Review, Soil Soil Stabilization with cement and lime, HMSO1993.