

Συσχέτιση του Δείκτη Δευτερογενούς Συμπίεσης (Ca) με το Λόγο Υπερφόρτισης του Εδάφους

Correlation of the Secondary Compression Index (Ca) to the Surcharge Ratio of the Ground

ΠΛΑΤΗΣ, Α.Δ. Πολιτικός Μηχανικός, M.Eng., ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε.
ΠΑΓΟΥΛΑΤΟΥ, Μ.Ν. Γεωλόγος, ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε.
ΑΝΔΡΕΑΔΗΣ, Γ.Ι. Γεωλόγος, ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε.
ΖΑΒΙΤΣΑΝΟΣ, Ν.Α. Γεωλόγος, ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Διερευνάται η συσχέτιση του δείκτη δευτερογενούς συμπίεσης (Ca) με το λόγο υπερφόρτισης αργιλικών εδαφών. Η διερεύνηση αυτή γίνεται με τη βοήθεια μεγάλης διάρκειας εργαστηριακών δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης σε αργιλικά δείγματα διαφορετικής προέλευσης. Σκοπός της διερεύνησης αυτής είναι να διατυπωθούν προτάσεις για τη μείωση των μακροχρόνιων καθιζήσεων από δευτερογενή συμπίεση μέσω της επιλογής κατάλληλου ύψους προφόρτισης του εδάφους.

ABSTRACT: The correlation between the secondary compression index (Ca) and the surcharge ratio of fine grained soils is investigated with the assistance of very long duration one dimensional consolidation tests on specimens of clays of different origin. The scope of this investigation is to make recommendations for the reduction of long term secondary compression settlements by pre-loading the ground with a surcharge of appropriate height.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες όλο και περισσότερες υποβαθμισμένες από πλευράς εδαφικών χαρακτηριστικών περιοχές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή έργων, είτε λόγω έλλειψης χώρων (περιαστικές περιοχές) είτε λόγω αύξησης των απαιτήσεων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μεγάλων έργων υποδομής (οδοποιία, λιμένες, αεροδρόμια, εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, κλπ.). Αποτέλεσμα αυτού είναι μία παρατηρούμενη αύξηση στη χρήση μεθόδων βελτίωσης των χαρακτηριστικών του υπεδάφους προκειμένου να αυξηθεί η φέρουσα ικανότητά του και να μειωθεί η συμπιεστότητά του.

Μεταξύ των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη μείωση της συμπιεστότητας του υπεδάφους και κατ' επέκταση των καθιζήσεων κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής ενός έργου, είναι και η προφόρτιση, κυρίως αργιλικών εδαφών, με σκοπό την ολοκλήρωση του μεγαλύτερου μέρους των καθιζήσεων από στερεο-

ποίηση πριν από την κατασκευή του έργου. Η διαδικασία της προφόρτισης συχνά επιταχύνεται με τη χρήση κατακόρυφων στραγγιστηρίων ή/και αύξηση του ύψους της προφόρτισης, εφ' όσον η φέρουσα ικανότητα του εδάφους το επιτρέπει. Παρ' όλα αυτά, παρατηρείται πολλές φορές ότι οι καθιζήσεις συνεχίζονται και μετά την κατασκευή του έργου, παρ' όλων ότων οι καθιζήσεις από στερεοποίηση έχουν ολοκληρωθεί κατά τη διάρκεια της προφόρτισης.

Το φαινόμενο αυτό λέγεται δευτερογενής συμπίεση, και προκαλεί ερπυστικού τύπου παραμορφώσεις καθώς και περαιτέρω μείωση του λόγου κενών του εδάφους υπό σταθερό φορτίο, παρά την πλήρη εκτόνωση των υπερπίεσεων πόρων που έχει προκαλέσει κατ' αρχήν το φορτίο αυτό. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο στις κανονικά στερεοποιημένες αργίλους υψηλής πλαστικότητας και στα οργανικά εδάφη. Τέτοια εδάφη απαντώνται συχνά σε πρόσφατες λιμναίες αποθέσεις (π.χ. αποξηρανοί λίμνες και έλη), πρόσφατα θαλάσσια ιζήματα (π.χ. θαλάσσια έργα), κλπ.

Η δευτερογενής συμπίεση θεωρείται ότι αρχίζει μετά το πέρας της πρωτογενούς στερεοποίησης (αν και υπάρχουν ενδείξεις ότι αρχίζει κάπως νωρίτερα και εξελίσσεται εν μέρει παράλληλα με αυτήν) και φθίνει εκθετικά με το χρόνο. Αριθμητικά εκφράζεται από το δείκτη δευτερογενούς συμπίεσης C_a , ο οποίος ορίζεται ως:

$$C_a = \Delta e / \Delta \log t \quad (1)$$

είναι δηλαδή η κλίση του διαγράμματος $e - \log t$ (λόγου κενών – χρόνου) μετά το πέρας της πρωτογενούς στερεοποίησης.

Έχει παρατηρηθεί ότι το C_a αυξάνει με την πλαστικότητα και το ποσοστό οργανικών του εδάφους (Mesri et al, 1987), ενώ αντίθετα μειώνεται με το βαθμό προστεροποίησης και το βαθμό διαγένεσης του εδάφους (Mesri et al, 1997, Tanaka, 2005). Επιπλέον το C_a μεταβάλλεται γενικά με το λογάριθμο του χρόνου υπό σταθερό φορτίο, ανάλογα με το πεδίο τάσεων (αυξάνεται για τάσεις κοντά στην πίεση προστεροποίησης ενώ μειώνεται για τάσεις αρκετά μεγαλύτερες από αυτήν – Mesri & Castro, 1987).

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνά στην πράξη για τη μείωση της δευτερογενούς συμπίεσης είναι η προφόρτιση του εδάφους με φορτίο μεγαλύτερο από το επιβαλλόμενο από την κατασκευή (υπερφόρτιση - Mesri et al, 1991, 1997, Alonso et al, 2000). Το μέγεθος

της υπερφόρτισης του εδάφους εκφράζεται από το λόγο υπερφόρτισης $\Delta r_{prel} / \Delta r$ όπου:

Δr_{prel} = μέγιστη ενεργός τάση που έχει επιτευχθεί πριν την αφαίρεση του φορτίου της προφόρτισης και

Δr = τελική ενεργός τάση που επιβάλλεται από την κατασκευή.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται εργαστηριακά, με δοκιμές συμπίεστότητας μεγάλης διάρκειας (5-11 μήνες περίπου) σε αργίλους διαφορετικής προέλευσης, η επίδραση του μεγέθους και της διάρκειας της προφόρτισης στη μείωση του C_a και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για το βέλτιστο μέγεθος του λόγου $\Delta r_{prel} / \Delta r$ που θα πρέπει να επιδιώκεται για την αποτελεσματική μείωση της δευτερογενούς συμπίεσης.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα εργαστηριακή διερεύνηση ήταν άργιλοι ποικίλης πλαστικότητας (CL-CH) και ποικίλου βαθμού προστεροποίησης, προερχόμενες από 3 διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας (Ασπρόπυργος, Κέρκυρα, Καρδίτσα).

Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων που εξετάστηκαν. Η εργαστηριακή διαδικασία που ακολουθήθηκε για κάθε μία περιοχή χωριστά περιγράφεται στη συνέχεια.

Πίνακας 1. Φυσικά χαρακτηριστικά εξετασθεισών αργίλων

Table 1. Physical properties of tested clays

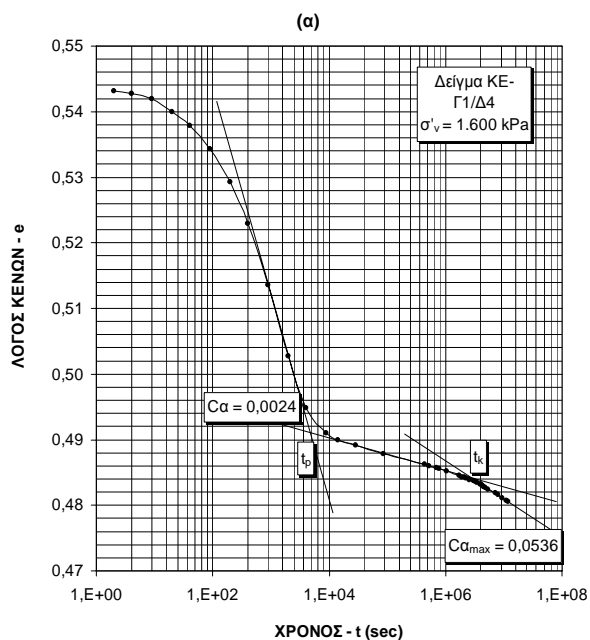
Προέλευση	Δείγμα	Βάθος (m)	Λεπτόκοκκα (%)	LL (%)	PI (%)	Ταξινόμηση AUSCS	w_o (%)	e_o	σ'_p (kPa)
ΑΕΝ Ασπρόπυργου	ΑΣ-Γ1/Δ8	6,50-7,20	99	39,9	17,9	CL2a	44,2	1,194	110
	ΑΣ-Γ2/Δ4	4,90-5,60	98	31,7	13,2	CL2a	44,0	1,178	100
	ΑΣ-Γ3/Δ8	5,30-6,00	94	32,6	15,8	CL2a	44,1	1,186	125
Πλάντραφος Κέρκυρας	ΚΕ-Γ1/Δ4	3,00-3,70	95	51,8	35,0	CH	41,7	1,102	85
	ΚΕ-Γ1/Δ8	6,10-8,00	99	48,0	31,7	CL2b	31,0	0,819	160
	ΚΕ-Γ1/Δ12	9,15-11,00	93	32,8	17,0	CL2a	35,0	0,913	160
Οδός Καρδίτσας - Αγιοπηγής	ΚΕ-Γ1/Δ15	11,45-13,50	94	36,3	21,8	CL2a	29,2	0,775	180
	ΚΑ-Γ1/Δ9	4,55-5,00	90	31,3	14,8	CL2a	23,3	0,611	>800
	ΚΑ-Γ1/Δ24	18,00-19,70	98	39,4	19,2	CL2a	28,5	0,760	>800
	ΚΑ-Γ2/Δ14	9,05-10,80	87	28,9	14,2	CL1	19,8	0,520	>800
	ΚΑ-Γ2/Δ21	13,35-15,00	91	26,1	11,1	CL1	22,8	0,604	>800
	ΚΑ-Γ2/Δ33	23,65-25,20	86	32,4	16,7	CL2a	19,0	0,499	>800

Οι δοκιμές μονοδιάστατης στερεοποίησης εκτελέστηκαν σε δοκίμια διαμέτρου 63,5 mm και ύψους 25,4 mm σύμφωνα με την Ελληνική προδιαγραφή Ε105-86/13 καθώς και την Αμερικανική ASTM D2435, με ορισμένες τροποποιήσεις.

Πιο συγκεκριμένα, στα δείγματα από τον Ασπρόπυργο και την Κέρκυρα έγινε κατ' αρχήν η δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης μέχρι του φορτίου των 800 kPa σύμφωνα με τις προαναφερθείσες προδιαγραφές, με διάρκεια κάθε βαθμίδας 24 ώρες. Μετά την αποφόρτιση μέχρι τα 12,5 kPa, ακολούθησε δεύτερος κύκλος παρατεταμένης αυτή τη φορά φόρτισης μέχρι του φορτίου των 800 kPa για τα δείγματα από τον Ασπρόπυργο και των 1.600 kPa για τα δείγματα από την Κέρκυρα. Στο δεύτερο κύκλο φόρτισης η κάθε βαθμίδα είχε διάρκεια πλέον του συνήθους των 24 ωρών και μέχρι 45 ημέρες για τον Ασπρόπυργο και 136 ημέρες για την Κέρκυρα.

Αντίθετα στα δείγματα από την περιοχή Καρδίτσας έγινε η δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης μέχρι του φορτίου των 800 kPa με διάρκεια φόρτισης κάθε βαθμίδας εξαρχής πλέον των 24 ωρών και μέχρι 53 ημέρες, ακολούθησε αποφόρτιση μέχρι τα 12,5 kPa και τέλος έγινε επαναφόρτιση μέχρι του φορτίου των 800 kPa με διάρκεια φόρτισης κάθε βαθμίδας πλέον των 24 ωρών και μέχρι 51 ημέρες.

Προκειμένου να υπολογιστεί το C_a από την Εξίσωση 1, χαράχθηκε σε κάθε καμπύλη



λόγου κενών – λογαρίθμου χρόνου η εφαπτομένη στο τμήμα αμέσως μετά την ολοκλήρωση της πρωτογενούς στερεοποίησης και υπολογίστηκε η μεταβολή του λόγου κενών σε ένα λογαριθμικό κύκλο (βλ. Σχήμα 1α).

Παράλληλα υπολογίστηκε η αντίστοιχη τιμή του δείκτη πρωτογενούς στερεοποίησης C_c από την εξίσωση:

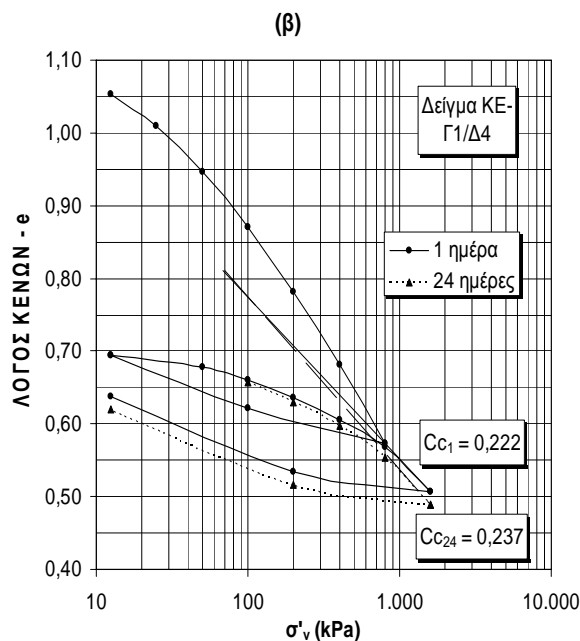
$$C_c = \Delta e / \Delta \log \sigma'_v \quad (2)$$

για κάθε βαθμίδα φόρτισης, λαμβάνοντας ως C_c για κάθε φορτίο την κλίση της εφαπτομένης εκείνου του διαγράμματος $e - \log \sigma'_v$, που αντιστοιχεί στο χρόνο των 24 ωρών (κατά παραδοχή χρόνος ολοκλήρωσης πρωτογενούς στερεοποίησης), στη θέση του συγκεκριμένου φορτίου (βλ. Σχήμα 1β).

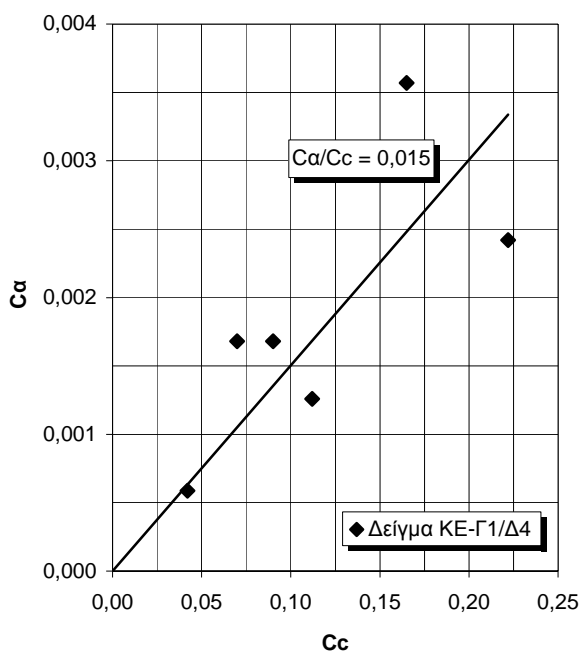
Επίσης υπολογίστηκε ο λόγος C_a/C_c για κάθε δείγμα χωριστά ως η κλίση του διαγράμματος $C_a - C_c$ (βλ. Σχήμα 2).

Τέλος υπολογίστηκαν ο χρόνος ολοκλήρωσης της πρωτογενούς στερεοποίησης t_p , ο χρόνος έναρξης της τριτογενούς συμπίεσης t_k και ο συντελεστής τριτογενούς συμπίεσης $C_{a_{max}}$ (βλ. Σχήμα 1α), τα οποία σχολιάζονται στη συνέχεια.

Στα Σχήματα 1 και 2 φαίνεται μία τυπική περίπτωση προσδιορισμού των C_a , C_c , C_a/C_c , t_p , t_k και $C_{a_{max}}$.



Σχήμα 1. Διαδικασία προσδιορισμού των C_a και C_c για το δείγμα KE-Γ1/Δ4, για $\sigma'_v = 1.600$ kPa. Figure 1. C_a and C_c determination procedure for sample KE-Γ1/Δ4 under $\sigma'_v = 1.600$ kPa.



Σχήμα 2. Εκτίμηση του Ca/Cc.
Figure 2. Estimation of Ca/Cc.

3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα αποτελέσματα των δοκιμών συμπίεσότητας μεγάλης διάρκειας που εκτελέστηκαν συνοψίζονται στον Πίνακα 2, ενώ στα Σχήματα 1 και 2 παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα μίας τυπικής περίπτωσης.

Από το Σχήμα 1(α) παρατηρείται ότι μετά από αρκετά μεγάλο χρόνο (t_k) μετά το χρόνο ολοκλήρωσης της πρωτογενούς στερεοποίησης (t_p), η κλίση της καμπύλης $e\text{-}\log t$ αυξάνει και παίρνει μία νέα μεγαλύτερη τιμή ($C_{a_{max}}$). Αυτή η φάση συμπίεσης καλείται τριτογενής συμπίεση (Fox et al, 1992) και παρατηρήθηκε κυρίως στις μεγαλύτερης διάρκειας βαθμίδες φόρτισης της παρούσας έρευνας. Ο χρόνος εμφάνισης της τριτογενούς συμπίεσης ως προς το χρόνο εμφάνισης της πρωτογενούς στερεοποίησης (t_k/t_p) ποικίλει σημαντικά όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, αλλά γενικά είναι αρκετά μεγάλος (μέση τιμή 700 περίπου). Επίσης παρατηρήθηκε, σε ορισμένες από τις μεγαλύτερης διάρκειας βαθμίδες φόρτισης, ότι μακροχρόνια το Ca μειώνεται και πάλι.

Στο Σχήμα 3 που ακολουθεί παρουσιάζεται γραφικά η μεταβολή του Ca συναρτήσει του λόγου υπερφόρτισης $\Delta p_{prel}/\Delta p$ τόσο για κάθε δείγμα χωριστά όσο και για το σύνολο των δειγμάτων. Υπενθυμίζεται ότι για φορτίο προφόρτισης ίσο με το τελικό επιβαλλόμενο από την κατασκευή είναι $\Delta p_{prel}/\Delta p = 1$. Επίσης σημειώνεται ότι το $(\Delta p_{prel}/\Delta p - 1) \times 100$ δίνει την % υπερφόρτιση που έχει επιβληθεί κατά

την προφόρτιση εν σχέσει προς το τελικό φορτίο της κατασκευής.

Η εξίσωση που προκύπτει, μετά από μη γραμμική παλινδρόμηση, για το σύνολο των δειγμάτων, έχει τη μορφή:

$$Ca = 0,0021 \cdot (\Delta p_{prel}/\Delta p)^{-0,6172} \quad (3)$$

με συντελεστή συσχέτισης $R^2 = 0,6119$, που είναι σχετικά χαμηλός λόγω της διαφορετικής προέλευσης των δειγμάτων.

Προκειμένου να περιοριστεί η επιρροή της διαφορετικής προέλευσης των δειγμάτων στην απόλυτη τιμή του Ca, γίνεται κανονικοποίηση του Ca ως προς την τιμή που αντιστοιχεί σε μηδενική υπερφόρτιση ($\Delta p_{prel}/\Delta p = 1$), την οποία συμβολίζουμε με Ca_1 . Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η σχέση $Ca/Ca_1 - \Delta p_{prel}/\Delta p$ για το σύνολο των δειγμάτων. Η εξίσωση που προκύπτει, μετά από μη γραμμική παλινδρόμηση έχει τη μορφή:

$$Ca/Ca_1 = 1,0787 \cdot (\Delta p_{prel}/\Delta p)^{-0,7291} \quad (4)$$

με συντελεστή συσχέτισης $R^2 = 0,8324$, που είναι αρκετά καλύτερος από αυτόν της Εξίσωσης 3. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται για λόγους σύγκρισης τα αποτελέσματα αντίστοιχων δοκιμών, διάρκειας της τάξης των 2-10 ημερών για κάθε βαθμίδα φόρτισης, τα οποία έχουν δημοσιευτεί (Alonso et al, 2000) για ανόργανες αργιλοϊλύες χαμηλής ως μέσης πλαστικότητας (CL) από μία περιοχή.

Από τα Σχήματα 3 και 4 παρατηρούμε ότι υπάρχει μία μείωση του Ca της τάξης του 35%-50% για τιμές του λόγου υπερφόρτισης $\Delta p_{prel}/\Delta p$ μέχρι περίπου 2-3 (δηλ. για υπερφόρτιση 100%-200%), ενώ η μείωση αυτή φαίνεται να φθίνει εκθετικά και με πολύ πιο αργό ρυθμό για μεγαλύτερες τιμές του $\Delta p_{prel}/\Delta p$. Αντίθετα για λόγους προφόρτισης μικρότερους του 1 (προφόρτιση με φορτίο μικρότερο από αυτό της κατασκευής) παρατηρείται δραματική αύξηση του Ca (π.χ. της τάξης του 100% για φόρτιση με το 50% του φορτίου της κατασκευής ή για ποσοστό στερεοποίησης 50% υπό πλήρες φορτίο).

Επίσης από τον Πίνακα 2 παρατηρούμε ότι οι τιμές του λόγου Ca/Cc κυμαίνονται μεταξύ $Ca/Cc = 0,010\text{-}0,028$ για τις εξετασθείσες αργίλους με μέση τιμή $(Ca/Cc)_{avg} = 0,02$, που είναι ελαφρά χαμηλότερη από την προτεινόμενη από τους Mesri & Ajlouni (1997) για ανόργανες αργιλοϊλύες ($Ca/Cc = 0,04 \pm 0,01$).

Πίνακας 2. Αποτελέσματα δοκιμών συμπίεστικότητας μεγάλης διάρκειας
 Table 2. Results of long duration consolidation tests $\Delta p_{prel}/\Delta p$

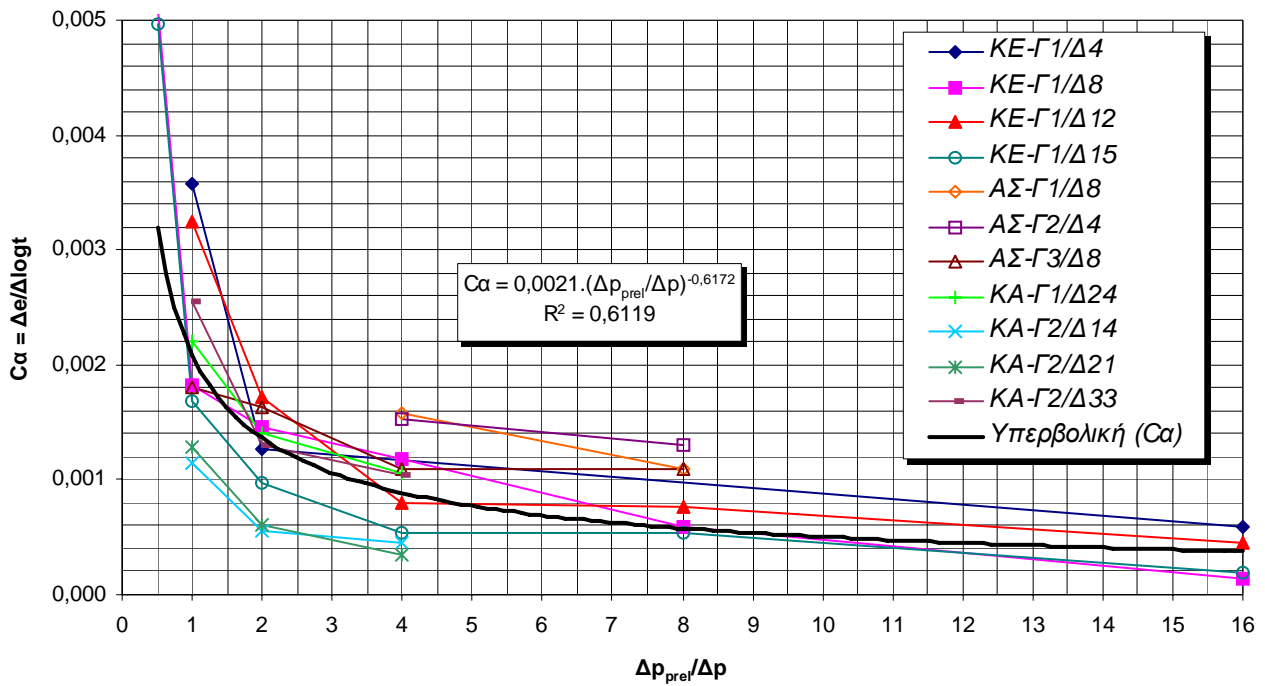
Δείγμα	Κύκλος φόρτισης	Δp_{prel} (kPa)	Δp (kPa)	$\frac{\Delta p_{prel}}{\Delta p}$	t_p (hrs)	t_k (hrs)	t_k/t_p	C_a	$C_{a_{max}}$	C_c	C_a/C_c
ΑΣ-Γ1/Δ8	2 ^{ος}	800	100	8	0,3	83,3	273	0,00110	0,00187	0,041	0,0277
			200	4	0,2	55,6	256	0,00158	0,00263	0,056	
			400	2	-	-	-	-	-	-	
			800	1	-	-	-	-	-	-	
ΑΣ-Γ2/Δ4	2 ^{ος}	800	100	8	0,2	555,6	2.778	0,00131	0,00174	0,053	0,0228
			200	4	0,2	125,0	692	0,00152	0,00283	0,070	
			400	2	0,2	24,0	142	0,00044	0,00087	0,059	
			800	1	0,1	192,0	2.033	0,00087	0,00131	0,042	
ΑΣ-Γ3/Δ8	2 ^{ος}	800	100	8	0,2	336,0	2.016	0,00109	0,00197	0,046	0,0221
			200	4	0,1	138,9	1.250	0,00109	0,00262	0,061	
			400	2	0,1	24,0	332	0,00164	0,00230	0,066	
			800	1	0,05	120,8	2.559	0,00066	0,00181	0,064	
ΚΕ-Γ1/Δ4	2 ^{ος}	800	50	16	1,7	120,0	72	0,00059	-	0,042	0,0150
			100	8	2,3	384,0	171	0,00168	-	0,070	
			200	4	1,5	186,1	126	0,00168	0,00441	0,090	
			400	2	3,9	277,8	71	0,00126	0,00263	0,112	
			800	1	1,4	144,4	102	0,00357	0,00631	0,165	
ΚΕ-Γ1/Δ8	2 ^{ος}	800	1.600	0,5	1,3	833,3	625	0,00242	0,00536	0,222	0,0160
			50	16	1,7	216,0	130	0,00015	-	0,021	
			100	8	4,4	384,0	86	0,00058	-	0,041	
			200	4	1,7	120,0	72	0,00118	0,00236	0,065	
			400	2	2,0	720,0	360	0,00145	0,00364	0,092	
ΚΕ-Γ1/Δ12	2 ^{ος}	800	800	1	2,5	127,8	51	0,00182	0,00509	0,187	0,0217
			1.600	0,5	3,3	222,2	67	0,00509	0,00773	0,268	
			50	16	2,2	216,0	185	0,00046	-	0,028	
			100	8	2,2	384,0	173	0,00077	-	0,046	
			200	4	1,4	72,0	53	0,00080	0,00172	0,061	
ΚΕ-Γ1/Δ15	2 ^{ος}	800	400	2	0,6	888,0	1.453	0,00172	-	0,086	0,0245
			800	1	0,7	136,1	204	0,00325	0,00899	0,118	
			1.600	0,5	0,2	694,4	3.012	0,00268	0,00612	0,132	
			50	16	0,4	216,0	555	0,00020	-	0,015	
			100	8	0,4	384,0	864	0,00053	-	0,023	
ΚΑ-Γ1/Δ9	1 ^{ος}	-	200	-	0,3	133,3	480	0,00053	0,00204	0,031	0,0096
			400	-	0,1	277,8	2.000	0,00098	0,00174	0,043	
			800	-	0,1	111,1	784	0,00169	0,00497	0,111	
			1.600	0,5	0,4	475,0	1.069	0,00497	0,01150	0,172	
			50	-	0,6	24,0	41	0,00048	0,00066	0,051	
ΚΑ-Γ1/Δ9	1 ^{ος}	-	100	-	0,4	72,0	162	0,00081	-	0,103	0,0096
			200	-	0,9	288,0	334	0,00161	-	0,165	
			400	-	0,7	277,8	400	0,00161	0,00451	0,157	
			800	-	0,5	816,0	1.632	0,00065	-	0,120	

(συνεχίζεται)

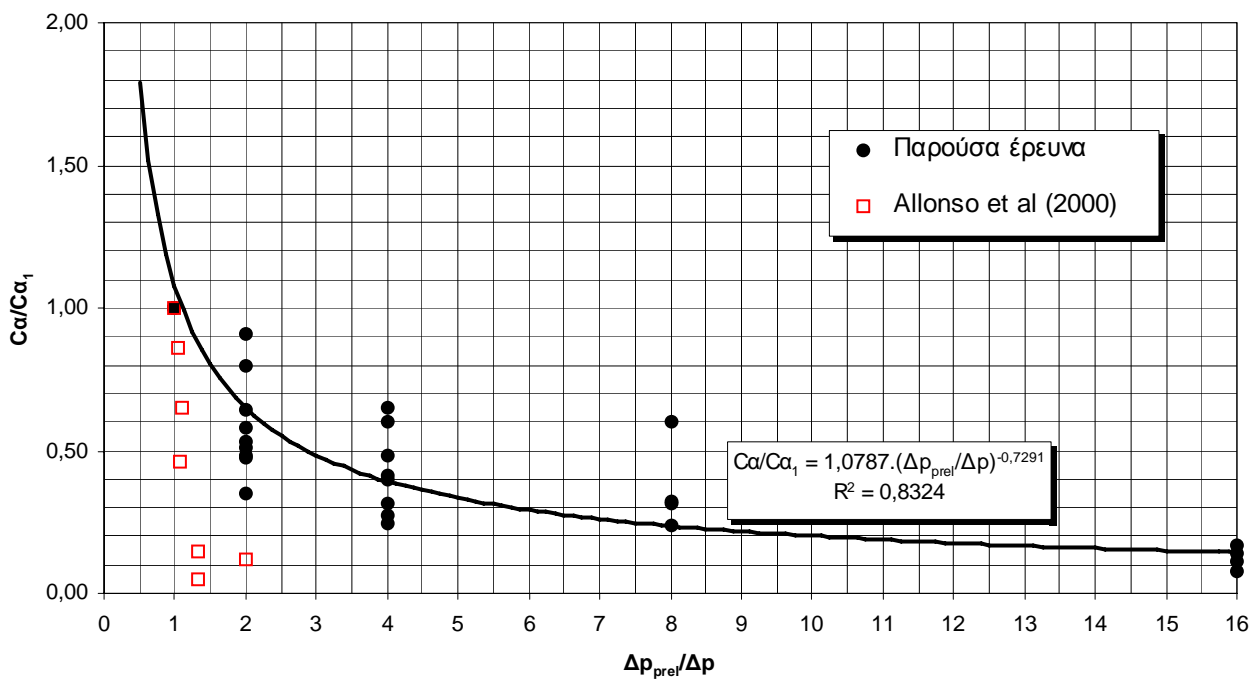
Πίνακας 2. (Συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα)

Table 2. (Continued from previous page)

Δείγμα	Κύκλος φόρτισης	Δp_{prel} (kPa)	Δp (kPa)	$\frac{\Delta p_{prel}}{\Delta p}$	t_p (hrs)	t_k (hrs)	t_k/t_p	C_a	$C_{a_{max}}$	C_c	C_a/C_c
KA-Γ1/Δ9	1 ^{ος}	-	50	-	0,6	24,0	41	0,00048	0,00066	0,051	0,0096
			100	-	0,4	72,0	162	0,00081	-	0,103	
			200	-	0,9	288,0	334	0,00161	-	0,165	
			400	-	0,7	277,8	400	0,00161	0,00451	0,157	
			800	-	0,5	816,0	1.632	0,00065	-	0,120	
KA-Γ1/Δ24	1 ^{ος}	-	50	-	1,3	24,0	18	0,00053	-	0,044	0,0167
			100	-	1,7	48,0	29	0,00053	-	0,098	
			200	-	1,1	72,0	68	0,00211	-	0,148	
			400	-	0,8	120,0	144	0,00326	0,00449	0,172	
			800	-	0,8	611,1	733	0,00317	0,00493	0,188	
	2 ^{ος}	800	200	4	0,4	696,0	1.566	0,00106	-	0,040	
			400	2	0,3	1104,0	3.456	0,00141	-	0,069	
			800	1	0,3	1224,0	4.406	0,00220	-	0,082	
KA-Γ2/Δ14	1 ^{ος}	-	25	-	1,5	24,0	16	0,00046	-	-	0,0212
			50	-	1,5	48,0	31	0,00088	-	0,037	
			100	-	0,7	72,0	108	0,00106	-	0,055	
			200	-	0,9	120,0	131	0,00160	0,00243	0,079	
			400	-	0,9	555,6	606	0,00205	0,00342	0,107	
	2 ^{ος}	800	800	-	0,7	264,0	366	0,00274	0,00395	0,122	
			200	4	0,3	72,0	259	0,00046	0,00084	0,016	
			400	2	0,2	13,9	56	0,00055	0,00076	0,029	
KA-Γ2/Δ21	1 ^{ος}	-	800	1	0,3	194,4	636	0,00114	0,00152	0,038	0,0170
			25	-	1,3	48,0	38	0,00112	-	-	
			50	-	1,6	72,0	45	0,00100	-	0,059	
			100	-	1,5	72,0	47	0,00080	-	0,079	
			200	-	0,8	250,0	300	0,00144	0,00225	0,095	
	2 ^{ος}	800	400	-	0,9	250,0	290	0,00168	0,00305	0,111	
			800	-	0,5	166,7	353	0,00249	0,00321	0,119	
			200	4	0,2	48,0	196	0,00035	0,00083	0,018	
KA-Γ2/Δ33	1 ^{ος}	-	400	2	0,2	192,0	1.080	0,00061	-	0,032	0,0229
			800	1	0,2	144,0	741	0,00128	-	0,042	
			100	-	0,5	48,0	93	0,00027	-	0,030	
			200	-	0,9	96,0	102	0,00093	0,00225	0,054	
			400	-	0,5	555,6	1.026	0,00150	0,00330	0,079	
	2 ^{ος}	800	800	-	0,9	336,0	390	0,00255	0,00780	0,093	
			200	4	0,9	528,0	594	0,00105	0,00637	0,027	
			400	2	0,8	277,8	345	0,00130	0,00297	0,046	
800	1	0,6	333,3	558	0,00112	0,00277	0,056				



Σχήμα 3. Μεταβολή του Ca συναρτήσει του $\Delta\rho_{pre}/\Delta\rho$.
Figure 3. Ca vs. $\Delta\rho_{pre}/\Delta\rho$.



Σχήμα 4. Μεταβολή του Ca/Ca_1 συναρτήσει του $\Delta\rho_{pre}/\Delta\rho$.
Figure 4. Ca/Ca_1 vs. $\Delta\rho_{pre}/\Delta\rho$.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας και από τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

α) Ο λόγος Ca/Cc μπορεί γενικά να θεωρηθεί σταθερός για ένα συγκεκριμένο έδαφος ανεξάρτητα από το βαθμό υπερστερεοποίησης, τη διάρκεια της φόρτισης ή το πεδίο τάσεων, με την προϋπόθεση ότι το Cc προσ-

διορίζεται ως η τοπική εφαπτομένη του διαγράμματος $e-\log \sigma'_v$ που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο χρόνο και πεδίο τάσεων.

β) Ο λόγος C_a/C_c για ανόργανες αργιλοϊλύες κυμαίνεται εντός σχετικά στενών ορίων. Βιβλιογραφικά αυτά τα όρια είναι $C_a/C_c = 0,04 \pm 0,01$. Αντίστοιχα τα όρια που προκύπτουν από 12 δείγματα ανόργανων αργίλων ποικίλης πλαστικότητας (CL-CH) από 3 περιοχές της Ελλάδας, είναι $C_a/C_c = 0,02 \pm 0,01$.

γ) Το C_a δεν είναι σταθερό, αλλά αντίθετα μετά πάροδο αρκετού χρόνου (που στην παρούσα έρευνα κυμάνθηκε μεταξύ 20-5.000. t_p περίπου, με μέσο όρο 700. t_p περίπου, όπου t_p ο χρόνος ολοκλήρωσης της πρωτογενούς στερεοποίησης) αυξάνεται και παίρνει μία νέα μεγαλύτερη τιμή $C_{a_{max}}$ (τριτογενής συμπίεση), η οποία μειώνεται και πάλι σε μεγάλο βάθος χρόνου.

δ) Οι καθιζήσεις από δευτερογενή συμπίεση μπορεί να είναι σχετικά μεγάλες σε μαλακά αργιλικά εδάφη, ιδιαίτερα στα υψηλής πλαστικότητας και οργανικά, ακόμα και μετά από προφόρτισή τους αν αυτή είναι μικρότερη ή ίση από τα τελικά φορτία της κατασκευής.

ε) Η προφόρτιση των αργιλικών εδαφών με φορτίο μεγαλύτερο από αυτό της τελικής κατασκευής (υπερφόρτιση) είναι μία ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος μείωσης των καθιζήσεων από δευτερογενή συμπίεση.

στ) Η διάρκεια της προφόρτισης, πέραν του χρόνου ολοκλήρωσης της πρωτογενούς στερεοποίησης, δρα ευνοϊκά στη μείωση των καθιζήσεων από δευτερογενή συμπίεση, αλλά σε σημαντικά μικρότερο βαθμό από την υπερφόρτιση.

ζ) Για λόγους υπερφόρτισης μέχρι περίπου $\Delta p_{prel}/\Delta p = 2-3$, παρατηρείται μείωση των καθιζήσεων από δευτερογενή συμπίεση κατά 35%-50% περίπου. Αντίθετα για λόγους προφόρτισης μικρότερους του 1 (προφόρτιση με φορτίο μικρότερο από αυτό της κατασκευής ή αφαίρεση της προφόρτισης πολύ πριν από την ολοκλήρωση της πρωτογενούς στερεοποίησης) παρατηρείται δραματική αύξηση των καθιζήσεων από δευτερογενή συμπίεση (π.χ. για $\Delta p_{prel}/\Delta p = 0,5$ οι καθιζήσεις αυτές αυξάνουν 100% περίπου).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω προτείνονται τα εξής για την αντιμετώπιση των καθιζήσεων από δευτερογενή συμπίεση έργων που θεμελιώνονται σε μαλακά αργιλικά εδάφη:

α) Θα πρέπει απαραίτητως να γίνεται εκτίμηση των καθιζήσεων από δευτερογενή συμπίεση λαμβάνοντας υπόψη τη λειτουργική

ζωή του έργου. Εφ' όσον δεν υπάρχουν εργαστηριακές μετρήσεις επαρκούς διάρκειας, το C_a μπορεί να εκτιμάται βάσει του C_c που αντιστοιχεί στα φορτία της κατασκευής με τη βοήθεια δημοσιευμένων σχέσεων του λόγου C_a/C_c .

β) Προκειμένου να μειωθούν αποτελεσματικά οι καθιζήσεις από δευτερογενή συμπίεση μπορεί να γίνει προφόρτιση του εδάφους με φορτίο που θα προκαλέσει αύξηση των ενεργών τάσεων στο έδαφος τουλάχιστον 50% μεγαλύτερες (και αν αυτό είναι εφικτό 100% μεγαλύτερες) από αυτές της κατασκευής.

γ) Η προφόρτιση προτείνεται να παρατείνεται και πέραν του χρόνου ολοκλήρωσης της πρωτογενούς στερεοποίησης, εφ' όσον το χρονοδιάγραμμα του έργου το επιτρέπει.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alonso, E.E., Gens, A. and Lloret A. (2000), "Precompression Design for Secondary Settlement Reduction", *Geotechnique*, Vol. 50, No. 6, pp. 645-656.
- Fox, P.J., Edil, T.B. and Li-Tus Lan (1992), "Ca/Cc Concept Applied to Compression of Peat", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 118, No. 8, pp. 1256-1263.
- Mesri, G. and Castro, A. (1987), "Ca/Cc Concept and Ko during Secondary Compression", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 113, No. 3, pp. 230-247.
- Mesri, G. and Feng, T.W. (1991), "Surcharging to Reduce Secondary Settlement", *Proc. Intern. Confer. Geotech. Engineering for Coastal Development – Theory to Practice*, The Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, Vol. 1, pp. 359-364.
- Mesri, G., Stark, T.D., Ajlouni, M.A. and Chen, C.S. (1997), "Secondary Compression of Peat with or without Surcharging", *Journal of Geotech. & Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123, No. 5, pp. 411-421.
- Mesri, G. and Ajlouni, M.A. (1997), "Viscous Behaviour of Soil under Oedometric Conditions: Discussion", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 34, pp. 159-161.
- Tanaka, H. (2005), "Consolidation Behavior of Natural Soils around p_c Value – Long Term Consolidation Test", *Soils and Foundations*, Vol. 45, No. 3, pp. 83-95.