

Μηχανική Συμπεριφορά του Γεωαφρού Διογκωμένης Πολυστερίνης (ΓΔΠ) υπό Συνθήκες Στατικής και Δυναμικής / Κυκλικής Φόρτισης

Mechanical Behavior of Expanded Polystyrene (EPS) Geofom Under Static and Dynamic / Cyclic Loading

ΞΕΝΑΚΗ, Β. Κ.

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, ΜΔΕ, ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΤΕ, Αθήνα

ΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΣ, Γ. Α.

Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πατρών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Διερευνάται πειραματικά η συμπεριφορά του Γεωαφρού Διογκωμένης Πολυστερίνης (ΓΔΠ) υπό συνθήκες στατικής και δυναμικής/κυκλικής φόρτισης με τη διεξαγωγή δοκιμών μονοτονικής (μονοαξονικής και τριαξονικής) φόρτισης, δοκιμών κυκλικής τριαξονικής φόρτισης, δοκιμών συντονισμού και δοκιμών πιεζοκεραμικών στοιχείων. Από τη σύνθεση των αποτελεσμάτων προσδιορίζονται τα ελαστικά μέτρα (E , G), ο λόγος απόσβεσης, D , και ο λόγος Poisson, ν , για παραμορφώσεις κυμαινόμενες από 10^{-6} έως 10^{-1} . Για μικρές παραμορφώσεις (έως 3×10^{-4}) προτείνονται εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού των E_0 , G_0 και ν_0 , ενώ για μεγαλύτερες παραμορφώσεις προτείνονται καμπύλες $E/E_0-\epsilon_a$ εξαρτώμενες από την πυκνότητα του ΓΔΠ.

ABSTRACT: The results of an experimental investigation of the mechanical behavior of expanded polystyrene (EPS) geofom under static and dynamic/cyclic loading are presented, based on uniaxial and triaxial monotonic loading tests, cyclic triaxial tests, resonant column tests and wave propagation tests using bender elements. By combining the experimental results of all types of tests, elastic moduli (E , G), damping ratio, D , and Poisson's ratio, ν , values of EPS geofom are estimated for strain amplitudes ranging from 10^{-6} to 10^{-1} . For low-strain values empirical relationships for estimating E_0 , G_0 and ν_0 values are proposed, whereas for higher strain values $E/E_0-\epsilon_a$ curves are provided for different material densities.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Γεωαφρός Διογκωμένης Πολυστερίνης (ΓΔΠ) είναι συνθετικό πλαστικό υλικό με κυψελώδη δομή που παράγεται βιομηχανικά με πρώτη ύλη το πολυστυρένιο (Horvath 1995). Το υλικό αυτό διατίθεται στην αγορά με τη μορφή πρισμάτων (ή φύλλων) μεγάλων διαστάσεων και από τη δεκαετία του 1990 θεωρείται ότι ανήκει στην κατηγορία των γεωσυνθετικών υλικών (Horvath 1991). Οι γεωτεχνικές εφαρμογές του ΓΔΠ περιλαμβάνουν τη χρήση του ως θερμομονωτικού παρεμβλήματος, ως ελαφρού επιχώματος, ως συμπιεστού παρεμβλήματος και ως υλικού μόνωσης έναντι ανθρωπογενών εδαφικών ταλαντώσεων (Horvath 1995, 1997, Negussey 1998). Οι γεωαφροί χρησιμοποιούνται, επίσης, για τη βελτίωση της ευστάθειας πρανών (Negussey and Srirajan 2001), την προστασία

από καταπτώσεις βράχων (Konno et al. 2001), ενώ πρόσφατα έχει προταθεί η χρήση τους και για την προστασία έναντι διάδοσης της διάρρηξης σεισμικών ρηγμάτων του υποβάθρου προς την επιφάνεια του εδάφους (Tani 2003). Μια ενδιαφέρουσα νέα εφαρμογή του ΓΔΠ αποτελεί η χρήση του ως συμπιεστού παρεμβλήματος για τη σεισμική μόνωση κατασκευών εδαφικής αντιστήριξης (Inglis et al. 1996, Bathurst and Alfaro 1996, Pelekis et al. 2000, Ξενάκη κ.α. 2001, Hazarika et al. 2001, Σταθοπούλου 2005), Σχήμα 1.

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της μηχανικής συμπεριφοράς του ΓΔΠ, το οποίο και αξιοποιείται σε όλες σχεδόν τις γεωτεχνικές εφαρμογές, είναι το εξαιρετικά μικρό ειδικό βάρος του (0.1 έως 0.5 kN/m^3)-συγκρινόμενο με αυτό των εδαφικών υλικών—σε συνδυασμό με τη σχετικά υψηλή σιφρότητα και αντοχή του (Horvath 1995). Τα αποτελέσματα όλων

των ερευνών υποδεικνύουν ότι η θλιπτική αντοχή του ΓΔΠ, σ_{c10} , (υπό συνθήκες ανεμπόδιστης θλίψης και παραμόρφωση ίση με 10%) αυξάνεται με την πυκνότητα του υλικού και το ρυθμό φόρτισης (Horvath 1995, Zou and Leo 1998, O' Brien 2001, Negussey and Sun 1996), ενώ δεν επηρεάζεται από το μέγεθος και το σχήμα του δοκιμίου (Atmatzidis et al. 2001, O' Brien 2001). Αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς του ΓΔΠ υπό συνθήκες τριαξονικής φόρτισης είναι η μείωση της θλιπτικής αντοχής όσο αυξάνεται η μέση περιβάλλουσα τάση, σ_0 , ή σ_3 , (και κατά συνέπεια το βάθος τοποθέτησης του υλικού) (Athanasopoulos et al. 1999, Anasthas et al. 2001, Chun et al. 2004).

Η παραμορφωσιμότητα του ΓΔΠ εκφράζεται συνήθως με το μέτρο ελαστικότητας (μέτρο χορδής) E , του υλικού, το οποίο σύμφωνα με δημοσιευμένα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών αυξάνεται με την πυκνότητα του υλικού και το ρυθμό φόρτισης, ενώ αντίθετα μειώνεται με την αύξηση της θλιπτικής παραμόρφωσης και της περιβάλλουσας τάσης (Horvath 1995, Duškon 1997, Anasthas et al. 2001). Σύμφωνα με πρόσφατα δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα η τιμή του μέτρου ελαστικότητας, E , του ΓΔΠ εξαρτάται από το μέγεθος των εξεταζόμενων δοκιμίων ειδικά στην περίπτωση υλικού υψηλής πυκνότητας (Negussey and Anasthas 2001). Η ανωτέρω εξάρτηση οφείλεται στον τρόπο μέτρησης των αναπτυσσόμενων θλιπτικών παραμορφώσεων του δοκιμίου και είναι δυνατόν να οδηγήσει σε μείωση της τιμής του E μέχρι και 50% όταν μετράται η συνολική παραμόρφωση του δοκιμίου αντί της "τοπικής" παραμόρφωσης στο μεσαίο καθ' ύψος τμήμα του (Elragi et al. 2000, O' Brien 2001). Σύμφωνα με τους Atmatzidis et al. (2005) η εξάρτηση της τιμής του E από το μέγεθος του δοκιμίου οφείλεται επίσης στην επίδραση του θερμικά

διαταραγμένου επιφανειακού στρώματος υλικού όταν η μόρφωση του δοκιμίου πραγματοποιείται με χρήση κοπής θερμινόμενου σύρματος.

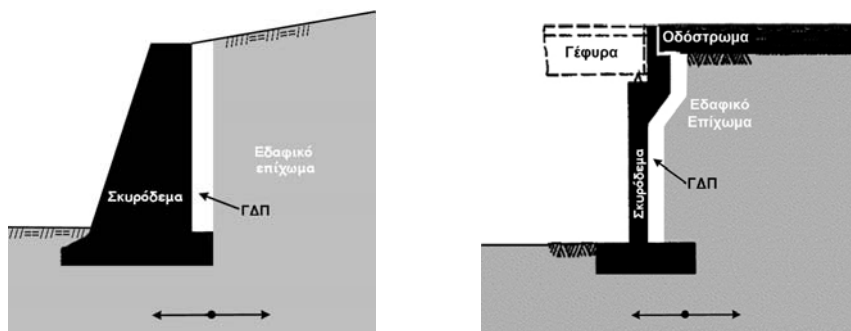
Σχετικά με το λόγο Poisson, ν , πρόσφατα δημοσιευμένα αποτελέσματα δοκιμών (Elgari et al. 2000) υποδεικνύουν ότι οι μετρούμενες τιμές προκύπτουν σημαντικά μικρότερες των πραγματικών (μέχρι και 50%) όταν χρησιμοποιούνται μετρήσεις της συνολικής αντί της τοπικής παραμόρφωσης του δοκιμίου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαπίστωση ότι η τιμή του λόγου Poisson μειώνεται όσο αυξάνεται η εφαρμοζόμενη περιβάλλουσα τάση και η παραμόρφωση του υλικού και είναι δυνατόν να γίνει έντονα αρνητική (Preber et al. 1994, Zou and Leo 1998, Chun et al. 2004, Atmatzidis et al. 2005).

Τα πολύ περιορισμένα διαθέσιμα αποτελέσματα που αφορούν τη μηχανική συμπεριφορά του ΓΔΠ υπό δυναμική/κυκλική φόρτιση υποδεικνύουν ότι το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας του υλικού και μειώνεται με την αύξηση του πλάτους της κυκλικής παραμόρφωσης και της περιβάλλουσας τάσης (Athanasopoulos et al. 1999, O' Brien 2001, Sivathayalan et al. 2001). Για τον προσδιορισμό του κανονικοποιημένου μέτρου ελαστικότητας E/E_0 οι Athanasopoulos et al. (1999) έχουν προτείνει την Εξ. 1:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{\infty}}} \quad (1)$$

όπου: E_0 =μέτρο ελαστικότητας του ΓΔΠ για πολύ μικρές παραμορφώσεις (<0.01%), ϵ_c =πλάτος της κυκλικής αξονικής παραμόρφωσης, (%) και ϵ_{∞} =σταθερά η τιμή της οποίας εξαρτάται από την πυκνότητα του υλικού.

Αντίστοιχη σχέση έχει προταθεί και από τον O' Brien (2001), Εξ. 2:



Σχήμα 1. Σεισμική μόνωση κατασκευών εδαφικής αντιστήριξης με χρήση παρεμβλήματος ΓΔΠ (Pelekis et al. 2000)

Figure 1. Seismic isolation of earth retaining structures using EPS inclusion (Pelekis et al. 2000)

$$\frac{E}{E_0} = 1 - 0.57 \left[\ln \left(1 + \frac{\epsilon_c}{0.65} \right) \right]^{0.6} \quad (2)$$

όπου E_0 =μέτρο ελαστικότητας του ΓΔΠ για μικρές παραμορφώσεις (<0.05%).

Σύμφωνα με τους Athanasopoulos et al. (1999) η επίδραση της πυκνότητας στις τιμές του λόγου απόσβεσης είναι αμελητέα. Οι τιμές που προέκυψαν από δοκιμές στρεπτικού συντονισμού κάτω από μηδενική περιβάλλουσα τάση παραμένουν χαμηλές (~1.5%), ενώ οι αντίστοιχες τιμές από δοκιμές κυκλικής μονοαξονικής φόρτισης για παραμορφώσεις μεγαλύτερες από 10^{-2} ξεπερνούν το 15%.

Τέλος, σημειώνεται ότι τιμές των ελαστικών μέτρων του ΓΔΠ υπό συνθήκες δυναμικής φόρτισης και μικρό πλάτος ταλαντώσεων είναι δυνατόν να προσδιορισθούν προκαλώντας τη διάδοση κυμάτων στη μάζα του υλικού (με μηχανική κρούση ή χρήση πιεζοκεραμικών στοιχείων) και μετρώντας τους χρόνους διαδρομής γνωστής απόστασης (Duškov 1997, Sivathayalan et al. 2001).

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης αποτελεί η συστηματική πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της πυκνότητας του ΓΔΠ, της περιβάλλουσας τάσης και του μεγέθους της παραμόρφωσης στην τιμή της θλιπτικής αντοχής, του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson του ΓΔΠ. Λεπτομερή στοιχεία για το συγκεκριμένο ερευνητικό πρόγραμμα παρουσιάζονται από την Ξενάκη (2005).

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Το εργαστηριακό πρόγραμμα περιέλαβε τέσσερα είδη δοκιμών: α) Δοκιμές Μονοτονικής (μονοαξονικής και τριαξονικής) Φόρτισης. Στις δοκιμές αυτές ο ρυθμός φόρτισης κυμάνθηκε από 1%/min έως 2.5%/min ενώ η περιβάλλουσα τάση παρέμεινε μικρότερη του 60% της θλιπτικής αντοχής. Για την ακριβή μέτρηση των τοπικών παραμορφώσεων του δοκιμίου (κατά την αξονική και τη διαμετρική διεύθυνση) χρησιμοποιήθηκαν "αισθητήρες Hall" (Clayton et al. 1989) προσαρμοζόμενοι στην κεντρική, κατά την έννοια του ύψους, περιοχή του. β) Δοκιμές Κυκλικής (τριαξονικής) Φόρτισης υπό συνθήκες ελεγχόμενων τάσεων. Στις δοκιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν "αισθητήρες Hall" για την ακριβή μέτρηση της αξονικής παραμόρφωσης του δοκιμίου, ενώ η συχνότητα φόρτισης κυμάνθηκε από 0.005Hz έως 1.0 Hz, έτσι ώστε να προκύπτει ρυθμός παραμόρφωσης περίπου ίσος με 1%/min. γ) Δοκιμές (στρεπτικού) Συντονισμού. Οι δοκιμές αυτές διεξήχθη-

σαν υπό μηδενική περιβάλλουσα τάση και η συχνότητα φόρτισης κυμάνθηκε από 35Hz έως 70Hz, με αντίστοιχη μέση τιμή του ρυθμού παραμόρφωσης ίση με 6%/min. δ) Δοκιμές Πιεζοκεραμικών Στοιχείων. Χρησιμοποιήθηκαν καμπτόμενα/εκτεινόμενα πιεζοκεραμικά στοιχεία προσαρμοζόμενα στα άκρα των δοκιμών με συχνότητα διέγερσης κυμαινόμενη από 6.5kHz έως 10kHz (αντίστοιχος ρυθμός παραμόρφωσης 200%/min). Σημειώνεται ότι στις δοκιμές αυτές η εκτίμηση του χρόνου άφιξης των κυμάτων-S αποδείχθηκε ιδιαίτερα δυσχερής.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές μορφώθηκαν από πρίσματα ΓΔΠ, όμοια με αυτά που διατίθενται στο εμπόριο, με ονομαστικές τιμές πυκνότητας 12, 15, 20, 25 και 30kg/m³. Η διαμόρφωση των δοκιμών έγινε με χρήση σφυριδόπανου (και όχι κοπής θερμαινόμενου σύρματος), ώστε να αποφευχθούν ενδεχόμενες επιδράσεις θερμικά διαταραγμένου επιφανειακού στρώματος υλικού.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ-ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

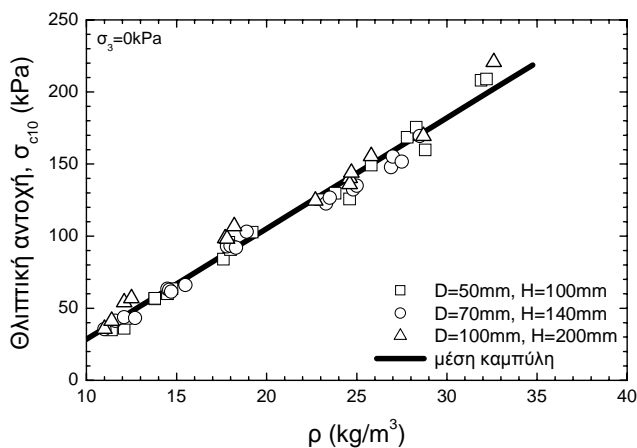
Στην ενότητα αυτή συνοψίζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από όλες τις ομάδες δοκιμών που διεξήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας έρευνας και αφορούν τη θλιπτική αντοχή, το λόγο Poisson, τα ελαστικά μέτρα και το λόγο απόσβεσης του ΓΔΠ.

3.1 Θλιπτική Αντοχή

Τα αποτελέσματα των δοκιμών ανεμπόδισης θλίψης συνοψίζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 2. Παρατηρείται ότι η θλιπτική αντοχή του ΓΔΠ, σ_{c10} , αυξάνεται γραμμικά με την πυκνότητα του υλικού χωρίς να επηρεάζεται από το μέγεθος των χρησιμοποιηθέντων δοκιμών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονικής φόρτισης υποδεικνύουν περαιτέρω ότι η θλιπτική αντοχή μειώνεται όσο αυξάνεται η περιβάλλουσα τάση, σ_3 . Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 3, η κανονικοποιημένη (ως προς τις συνθήκες ανεμπόδισης θλίψης) θλιπτική αντοχή μειώνεται γραμμικά με την κανονικοποιημένη περιβάλλουσα τάση. Οι μέσες καμπύλες των διαγραμμάτων των Σχημάτων 2 και 3 περιγράφονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

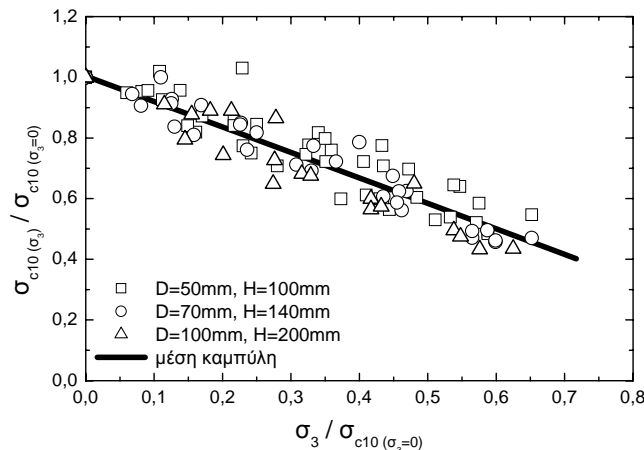
$$\sigma_{c10} = 7.68\rho - 48.3 \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_{c10(\sigma_3)}}{\sigma_{c10(\sigma_3=0)}} = 1.0 - 0.84 \frac{\sigma_3}{\sigma_{c10}} \quad (4)$$



Σχήμα 2. Αποτελέσματα δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης σε δοκίμια ΓΔΠ διαφορετικών πυκνοτήτων

Figure 2. Results of unconfined compression tests on EPS geofam specimens of different densities



Σχήμα 3. Επίδραση της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας τάσης στην κανονικοποιημένη θλιπτική αντοχή δοκιμίων ΓΔΠ διαφορετικών πυκνοτήτων

Figure 3. Effect of the normalized confining stress on the normalized compressive strength of EPS specimens of different densities

όπου: σ_{c10} =θλιπτική αντοχή του ΓΔΠ για παραμόρφωση ίση με 10% (kPa), ρ =πυκνότητα του ΓΔΠ (kg/m^3), $\sigma_{c10(\sigma_3)}$ =θλιπτική αντοχή του ΓΔΠ για παραμόρφωση ίση με 10% και συγκεκριμένη τιμή περιβάλλουσας τάσης (kPa).

3.2 Λόγος Poisson

Τιμές του λόγου Poisson, ν_0 για μικρές παραμορφώσεις ($\approx 10^{-6}$) προσδιορίστηκαν με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών πιεζοκεραμικών στοιχείων. Για μηδενική τιμή της περιβάλλουσας τάσης ($\sigma_3=0$) η τιμή του ν_0 προκύπτει ίση με:

$$\nu_{0(\sigma_3=0)} = 0.22 + 0.0033\rho \quad (5)$$

όπου: ρ η πυκνότητα του ΓΔΠ (kg/m^3), ενώ για τιμές $\sigma_3 > 0$, ανεξάρτητα από την τιμή της πυκνότητας ρ , ισχύει η Εξ. (6):

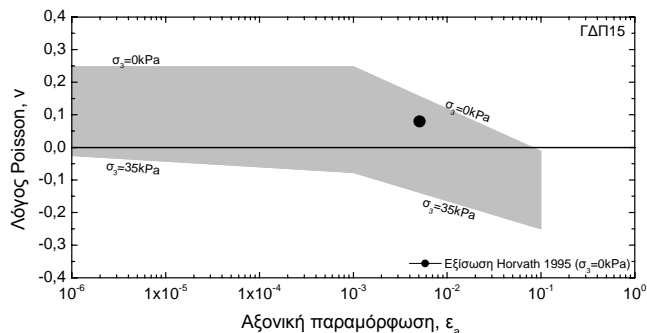
$$\nu_{0(\sigma_3)} = 0.25 - 0.33 \frac{\sigma_3}{\sigma_{c10}} \quad (6)$$

όπου: σ_3 = περιβάλλουσα τάση (kPa) και σ_{c10} =θλιπτική αντοχή του ΓΔΠ (kPa).

Για μεγαλύτερες παραμορφώσεις η τιμή του λόγου Poisson προσδιορίστηκε από τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοτονικής φόρτισης τα οποία υποδεικνύουν ότι η τιμή του ν μειώνεται όσο αυξάνεται η παραμόρφωση και η περιβάλλουσα τάση. Αντίθετα, η πυκνότητα του υλικού, ρ , φαίνεται ότι δεν επηρεάζει σημαντικά την τιμή του ν . Τα αποτελέσματα των δοκιμών για ΓΔΠ15 συνοψίζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 4, από το οποίο συνάγεται ότι για μεγάλες παραμορφώσεις και υψηλές τιμές περιβάλλουσας τάσης η τιμή του λόγου Poisson μπορεί να γίνει έντονα αρνητική.

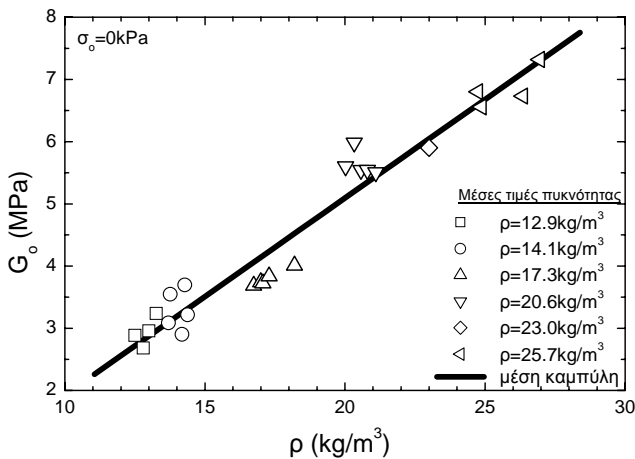
3.3 Ελαστικά Μέτρα Μικρών Παραμορφώσεων

Τιμές για τα ελαστικά μέτρα (E_0 , G_0) του ΓΔΠ κάτω από συνθήκες πολύ μικρών έως μικρών παραμορφώσεων (0.001% έως 0.01%) προσδιορίστηκαν από τις δοκιμές συντονισμού και τις δοκιμές πιεζοκεραμικών στοιχείων. Στο διάγραμμα του Σχήματος 5 συνοψίζονται τα αποτελέσματα του προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου διάτμησης, G_0 , από τις στρεπτικές δοκιμές συντονισμού της παρούσας έρευνας, κάτω από συνθήκες μηδενικής περιβάλλουσας τάσης. Αντίστοιχα διαγράμματα για τα δυναμικά ελαστικά μέτρα E_0 και G_0 , κάτω από αυξανόμενες τιμές της περιβάλλουσας τάσης προκύπτουν με βάση τα



Σχήμα 4. Λόγος Poisson του ΓΔΠ15 ως συνάρτηση της ορθής παραμόρφωσης και της περιβάλλουσας τάσης

Figure 4. Poisson's ratio of EPS15 geofam as a function of normal strain and confining stress



Σχήμα 5. Δυναμικό μέτρο διάτμησης του ΓΔΠ για μικρές παραμορφώσεις, G_0 , ως συνάρτηση της πυκνότητας του υλικού (δοκιμές συντονισμού)

Figure 5. Low-amplitude dynamic shear modulus, G_0 , of EPS geof foam as a function of material density (resonant column tests)

αποτελέσματα των δοκιμών πιεζοκεραμικών στοιχείων. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι τα δυναμικά ελαστικά μέτρα αυξάνονται γραμμικά με την πυκνότητα του υλικού και μειώνονται όσο αυξάνεται η περιβάλλουσα τάση. Για τον υπολογισμό της τιμής του G_0 ως συνάρτηση του ρ και μηδενική περιβάλλουσα τάση, $G_{0(\sigma_3=0)}$, προτείνεται η Εξ. (7):

$$G_{0(\sigma_3=0)} = -1.4 + 0.32\rho \quad (7)$$

όπου: ρ = πυκνότητα του ΓΔΠ (kg/m^3).

Τα αποτελέσματα των δοκιμών πιεζοκεραμικών στοιχείων υποδεικνύουν επίσης, ότι οι τιμές των δυναμικών ελαστικών μέτρων, E_0 , G_0 , μειώνονται γενικά για αυξανόμενες τιμές της περιβάλλουσας τάσης, σ_3 , (για όλες τις τιμές της πυκνότητας). Για την περίπτωση του G_0 , προτείνεται η χρήση της ακόλουθης σχέσης:

$$\frac{G_{0(\sigma_3)}}{G_{0(\sigma_3=0)}} = 1.02 + 0.599 \frac{\sigma_3}{\sigma_{c10}} - 1.41 \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{c10}} \right)^2 \quad (8)$$

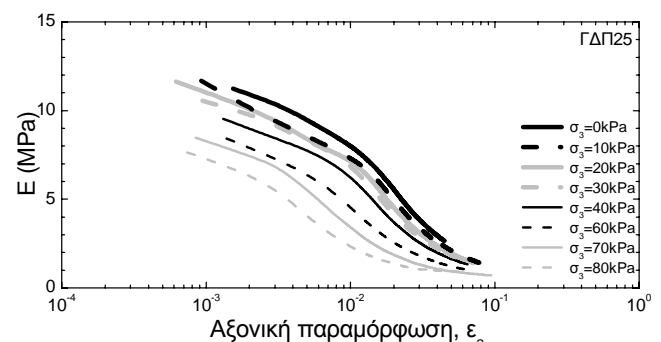
όπου: $G_{0(\sigma_3)}$ = μέτρο διάτμησης του ΓΔΠ για μικρές παραμορφώσεις και για συγκεκριμένη τιμή περιβάλλουσας τάσης (MPa), $G_{0(\sigma_3=0)}$ = μέτρο διάτμησης του ΓΔΠ για μικρές παραμορφώσεις και μηδενική περιβάλλουσα τάση (MPa), σ_3 = η περιβάλλουσα τάση (kPa) και σ_{c10} = θλιπτική αντοχή του ΓΔΠ (kPa).

3.4 Μέτρο Ελαστικότητας Μεγάλων Παραμορφώσεων

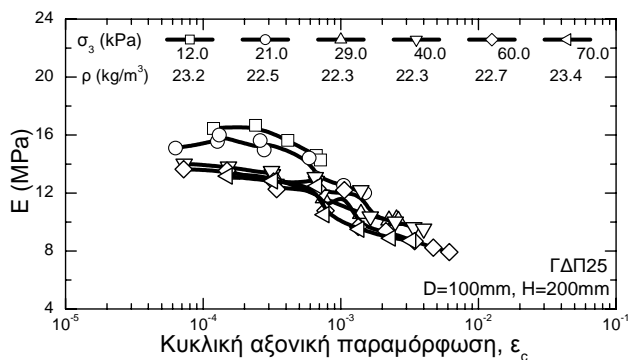
Το μέτρο ελαστικότητας του ΓΔΠ για μεγαλύτερες παραμορφώσεις ($>0.01\%$) προσδιορίστηκε από τις δοκιμές μονοτονικής φόρτισης και κυκλικής τριαξονικής φόρτισης. Ένα τυπικό παράδειγμα αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 6 από το οποίο συνάγεται ότι η τιμή του E μειώνεται όσο αυξάνεται η παραμόρφωση και η περιβάλλουσα τάση. Επίσης, από τη σύγκριση διαγραμμάτων παρόμοιων με αυτό του Σχήματος 6, αλλά για διαφορετικές τιμές πυκνότητας υλικού, προκύπτει ότι το μέτρο ελαστικότητας, υπό συνθήκες μονοτονικής φόρτισης, αυξάνεται γενικά με την αύξηση της πυκνότητας του υλικού.

Ένα τυπικό παράδειγμα από τις δοκιμές κυκλικής τριαξονικής φόρτισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 7. Παρατηρείται ότι για αντίστοιχες τιμές παραμόρφωσης οι προκύπτουσες τιμές του μέτρου ελαστικότητας κάτω από συνθήκες κυκλικής φόρτισης είναι μεγαλύτερες, κατά 20% περίπου, σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν από τις δοκιμές μονοτονικής φόρτισης. Η ανωτέρω διαφοροποίηση συμπεριφοράς παρουσιάζει αξιοσημείωτη ομοιότητα με τη συμπεριφορά εδαφικών υλικών (συνεκτικών και μη -συνεκτικών) κάτω από συνθήκες μονοτονικής και κυκλικής τριαξονικής φόρτισης.

Η κανονικοποίηση των διαγραμμάτων των Σχημάτων 6 και 7, χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες τιμές των μέτρων ελαστικότητας μικρών παραμορφώσεων έδειξε ότι δεν παρατηρείται διαφοροποίηση σε σχέση με το είδος της φόρτισης (μονοτονική ή κυκλική) και την τιμή της περιβάλλουσας τάσης, οπότε η



Σχήμα 6. Μέτρο ελαστικότητας του ΓΔΠ-25 ως συνάρτηση της μονοτονικής αξονικής παραμόρφωσης και της περιβάλλουσας τάσης
Figure 6. Modulus of elasticity of EPS-25 geof foam as a function of monotonic axial strain and confining stress

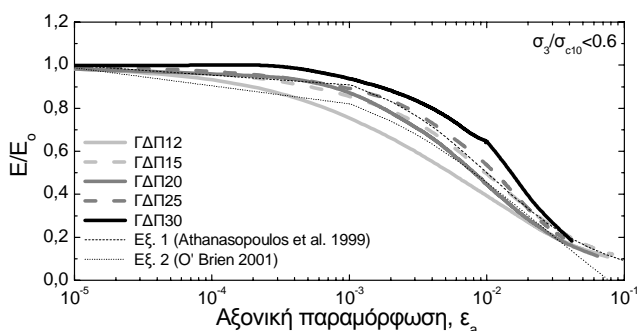


Σχήμα 7. Μέτρο ελαστικότητας του ΓΔΠ-25 ως συνάρτηση της κυκλικής αξονικής παραμόρφωσης και της περιβάλλουσας τάσης
Figure 7. Modulus of elasticity of EPS-25 geofoam as a function of cyclic axial strain and confining stress

συμπεριφορά του υλικού μπορεί να περιγραφεί από τις μέσες καμπύλες του διαγράμματος του Σχήματος 8. Σύμφωνα με το ανωτέρω διάγραμμα το κανονικοποιημένο μέτρο ελαστικότητας μειώνεται με την αύξηση της παραμόρφωσης και τη μείωση της πυκνότητας του υλικού. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η παρατήρηση ότι η μετρηθείσα συμπεριφορά του υλικού περιγράφεται ικανοποιητικά τόσο από την Εξ. (1) (Athanasopoulos et al. 1999) θέτοντας $\varepsilon_{c0}=0.01$ όσο και από την Εξ. (2) (O' Brien 2001).

3.5 Λόγος Απόσβεσης

Τιμές του λόγου απόσβεσης υπό συνθήκες διατμητικής φόρτισης προσδιορίστηκαν για μικρές και μεσαίες παραμορφώσεις από τα αποτελέσματα των δοκιμών συντονισμού (για μηδενική περιβάλλουσα τάση). Για μεγαλύ-



Σχήμα 8 Κανονικοποιημένο μέτρο ελαστικότητας του ΓΔΠ ως συνάρτηση της αξονικής παραμόρφωσης και της πυκνότητας υλικού
Figure 8. Normalised elastic modulus of EPS geofoam as a function of axial strain and material density

τερες παραμορφώσεις ο λόγος απόσβεσης προσδιορίστηκε από τα αποτελέσματα δοκιμών κυκλικής τριαξονικής φόρτισης (υπό συνθήκες θλιπτικής φόρτισης).

Τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών υποδεικνύουν ότι ο λόγος απόσβεσης αυξάνεται γενικά με το μέγεθος της παραμόρφωσης και την αύξηση της περιβάλλουσας τάσης, ενώ αντίθετα, μειώνεται με την αύξηση της πυκνότητας του υλικού. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαπίστωση ότι ο λόγος απόσβεσης προκύπτει υψηλότερος για την περίπτωση των συνθηκών θλιπτικής φόρτισης σε σχέση με την περίπτωση στρεπτικής φόρτισης του δοκιμίου. Η διαφοροποίηση αυτή, εντούτοις, δεν οδηγεί σε σημαντική διαφοροποίηση της τιμής του λόγου απόσβεσης για την περιοχή των μικρών παραμορφώσεων για την οποία μπορεί να χρησιμοποιούνται τιμές κυμαινόμενες από 0.5% (διατμητική φόρτιση) έως 3% (θλιπτική φόρτιση). Για μεγαλύτερες τιμές παραμορφώσεων η τιμή του λόγου απόσβεσης του ΓΔΠ, υπό συνθήκες θλιπτικής φόρτισης, κυμαίνεται από 3% έως 8%.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας έρευνας οδηγούν στα ακόλουθα συμπεράσματα (ισχύουν για $\sigma_3 \leq 0.6\sigma_{c10}$):

α) Η θλιπτική αντοχή του ΓΔΠ, σ_{c10} , αυξάνεται γραμμικά με την πυκνότητα του υλικού και μειώνεται, επίσης γραμμικά, με την αύξηση της μέσης περιβάλλουσας τάσης, σ_3 . Προτείνεται η χρήση των Εξ. (3) και Εξ. (4).

β) Ο λόγος Poisson, ν , του ΓΔΠ, ανεξάρτητα από το είδος της φόρτισης, μειώνεται γενικά όσο αυξάνεται η παραμόρφωση και η περιβάλλουσα τάση (λαμβάνοντας και αρνητικές τιμές), ενώ η επίδραση της πυκνότητας του υλικού είναι σχετικά αμελητέα. Για μικρές παραμορφώσεις προτείνεται η χρήση των Εξ. (5) και Εξ. (6) ενώ για μεγαλύτερες παραμορφώσεις του διαγράμματος του Σχήματος 4.

γ) Η τιμή των ελαστικών μέτρων χορδής του ΓΔΠ (G_0 , E_0) για μικρές παραμορφώσεις (<0.01%) αυξάνεται με την πυκνότητα του υλικού, ενώ μειώνεται με την αύξηση της μέσης περιβάλλουσας τάσης, σ_3 . Για τον υπολογισμό της τιμής του G_0 , προτείνεται η χρήση των Εξ.(6) και Εξ. (7).

δ) Η τιμή των ελαστικών μέτρων χορδής του ΓΔΠ για παραμορφώσεις μεγαλύτερες του 0.01% μειώνεται όσο αυξάνεται η παραμόρφωση, εξαρτώμενη από την πυκνότητα του υλικού και την περιβάλλουσα τάση. Στην περίπτωση της κυκλικής φόρτισης (και για την περιοχή παραμορφώσεων 0.01% έως 0.1%) η τιμή του E προκύπτει κατά 20%, περίπου, μεγαλύτερη σε σχέση με την περίπτωση της μονοτονικής φόρτισης. Οι κανονικοποιημένες τιμές $E/E_0 - \epsilon_a$ προκύπτουν ανεξάρτητες του είδους της φόρτισης και της περιβάλλουσας τάσης και μπορούν να προσδιορίζονται από το διάγραμμα του Σχήματος 9 ή προσεγγιστικά από την Εξ. (1) ή Εξ. (2).

ε) Η τιμή του λόγου απόσβεσης του ΓΔΠ εξαρτάται από το είδος της φόρτισης και αυξάνεται με την αύξηση της παραμόρφωσης και της περιβάλλουσας τάσης ενώ για μεγάλες παραμορφώσεις μειώνεται με την αύξηση της πυκνότητας του υλικού. Για παραμορφώσεις μέχρι 0.01% προτείνεται η χρήση τιμών από 0.5% έως 3%, ανεξάρτητα από το είδος της φόρτισης και της πυκνότητας του υλικού. Για μεγαλύτερες παραμορφώσεις ο λόγος απόσβεσης παραμένει χαμηλός για την περίπτωση της κυκλικής διατμητικής φόρτισης, ενώ υπερβαίνει την τιμή 14% για θλιπτικές κυκλικές φορτίσεις πλάτους 0.4%.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς εκφράζουν τις ευχαριστίες τους προς την Επιτροπή Ερευνών του Πανεπιστημίου Πατρών για τη χρηματοδότηση της παρούσας έρευνας στα πλαίσια του προγράμματος "Κ. ΚΑΡΑΘΕΟΔΩΡΗ". Ευχαριστίες εκφράζονται, επίσης, προς τους παραγωγούς διογκωμένης πολυστερίνης "ΠΑΤΡΑΪΚΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ, Α. & Κ. Ανδριόπουλος", "UNISOL Η. Ανδριόπουλος" της περιοχής Πατρών και "Ριζάκος Γ. Κ. ΑΒΕΤΕ" της περιοχής Λαμίας, για τη διάθεση των δειγμάτων του υλικού που χρησιμοποιήθηκαν στις εργαστηριακές δοκιμές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Anasthas, N., Negusse, D. and Srirajan, S., (2001), "Effect of Confining Stress on Compressive Strength of EPS Geofoam", Proceedings of the 3rd International Conference on EPS Geofoam 2001, Salt Lake City, Utah, December 2001, 14p.

Athanasopoulos, G. A., Pelekis, P. C. and Xenaki, V. C., (1999), "Dynamic Properties of EPS Geofoam: An Experimental Investigation", Geosynthetics International, Vol. 6, No. 3, pp.171-194

Atmatzidis, D. K., Missirlis, E. G. and Chryssikos, D. A., (2001), "An Investigation of EPS Geofoam Behavior in Compression", Proceedings of the 3rd International Conference on EPS Geofoam 2001, Salt Lake City, Utah, December 2001, 11p.

Atmatzidis, D. K., Chryssikos, D. A. and Missirlis, E. G. (2005), "Laboratory Testing and Modelling of EPS Geofoam in Compression", Proceedings of the 11th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Torino, Italy, June 2005, pp. 11-18

Bathurst, R. J. and Alfaro, M.C., (1996), "Review of Seismic Design, Analysis and Performance of Geosynthetic Reinforced Walls, Slopes and Embankments", Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement, Fukuoka, Kyushu, Japan, November 1996, H. Ochiai, N. Yasufuku and K. Omine Eds. Balkema, 1997, Vol.2, pp. 887-915

Chun, B. S., Lim, H.-S., Sagong, M. and Kim, K., (2004), "Development of a Hyperbolic Constitutive Model for Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam under Triaxial Compression Tests", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 22, pp. 223-237

Clayton, C. R. I., Khatrush, S. A., Bica, A. V. D. and Siddique, A., (1989), "The Use of Hall Effect Semiconductors in Geotechnical Instrumentation", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, March 1989, Vol. 12, No. 1, pp. 69-76

Duškov, M., (1997), "Materials Research on EPS-20 and EPS15 Under Representative Conditions in Pavement Structures", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 15, Nos. 1-3, pp. 147-181

Elragi, A., Negusse, D. and Kyanka, G., (2000), "Sample Size Effects on the Behavior of EPS Geofoam", Soft Ground Technology, ASCE Geotechnical Special Publication No. 112, Proceedings of the United Engineering Foundation/ASCE Geotechnical Institute Soft Ground Technology Conference, Noordwijkerhout, Netherlands, May-June 2000, J. L. Hanson and R. J. Termaat Eds., pp. 280-291

- Horvath, J. S., (1991), "The Case of an Additional Function", IGS News, International Geosynthetic Society, Vol. 7, No. 3, Nov., pp. 17-18
- Horvath, J. S., (1995), "Geofoam Geosynthetic", Horvath Engineering, P.C. Scarsdale, N.Y. U.S.A, 217p.
- Horvath J. S., (1997), "The Compressible Inclusion Function of EPS Geofoam", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 15, Nos. 1-3, pp. 77-119
- Inglis, D., Macleod, G., Naesgaard, E. and Zergoun, M., (1996), "Basement Wall with Seismic Earth Pressure and Novel Expanded Polystyrene Foam Buffer Layer", Proceedings of 10th Annual Symposium of the Vancouver Geotechnical Society, Vancouver, B.C., 18p.
- Konno, H., Nakano, O., Kishi, N., Gotoh, Y. and Ishikawa, Y., (2001), "A Practical Design Method of Three-Layered Absorbing System", Proceedings of the 3rd International Conference on EPS Geofoam 2001, Salt Lake City, Utah, December 2001, 11p.
- Negussey, D., (1998), "Putting Polystyrene to Work", Civil Engineering, ASCE, March 1998, pp. 65-67
- Negussey, D. and Anasthas, N., (2001), "Young's Modulus of EPS Geofoam by Simple Bending Test", Proceedings of the 3rd International Conference on EPS Geofoam 2001, Salt Lake City, Utah, December 2001, 14p.
- Negussey, D. and Srirajan, S., (2001), "Slope Stabilization Using EPS Geofoam", Proceedings of the 3rd International Conference on EPS Geofoam 2001, Salt Lake City, Utah, December 2001, 12p.
- Negussey, D. and Sun, M. C., (1996), "Reducing Lateral Pressure by Geofoam (EPS) Substitution", EPS Tokyo '96, Proceedings of International Symposium on EPS Construction Method, Japan, October 1996, pp. 202-211
- O' Brien, A. S., (2001), "EPS Behavior During Static and Cyclic Loading from 0.05% Strain to Failure", Proceedings of the 3rd International Conference on EPS Geofoam 2001, Salt Lake City, Utah, December 2001, 11p.
- Pelekis, P. C., Xenaki, V. C. and Athanopoulos, G. A., (2000), "Use of EPS Geofoam for Seismic Isolation of Earth Retaining Structures: Results of a FEM Study", Proceedings of the 2nd European Geosynthetic Conference, EuroGeo 2000, Bologna, Italy, October 2000, A. Cancelli, D. Cazzuffi and C. Soccodato Eds., Vol. 2, pp. 843-846
- Preber, T., Bang, S., Chung, Y. and Cho, Y., (1994), "Behavior of Expanded Polystyrene Blocks", Transportation Research Record 1462, pp. 36-46
- Sivathayalan, S., Negussey, D. and Vaid, Y. P., (2001), "Simple Shear and Bender Element Testing of Geofoam", Proceedings of the 3rd International Conference on EPS Geofoam 2001, Salt Lake City, Utah, December 2001, 18p.
- Tani, K., (2003), "Proposal of Ground Improvement Method to Prevent Fault Rupture Hazard", Proceedings of the 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, University of California, Berkeley, USA, 7-9 January 2004, D. Doolin, A. Kammerer, T. Nogami, R. B. Seed, I. Towhata Eds., Vol. 1, pp. 590-597
- Zou, Y. and Leo, C. J., (1998), "Laboratory Studies on the Engineering Properties of Expanded Polystyrene (EPS) Material for Geotechnical Applications", Proceedings of the 2nd International Conference on Ground Improvement Techniques, Singapore, 8-9 October 1998, pp. 581-588
- Ξενάκη, Β. Κ., Πελέκης, Π. Κ. και Αθανασόπουλος, Γ. Α., (2001), "Χρήση του Γεωαφρού Διογκωμένης Πολυστερίνης για τη Σεισμική Μόνωση Τοίχων Αντιστήριξης: Ανάλυση με τη ΜΠΣ", Πρακτικά 4^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Αθήνα, Μάιος 2001, Τόμος 1, σελ. 475-482
- Ξενάκη, Β. Κ., (2005), "Πειραματική Διερεύνηση της Μηχανικής Συμπεριφοράς Γεωαφρών Διογκωμένης Πολυστερίνης υπό Συνθήκες Στατικής και Δυναμικής/Κυκλικής Φόρτισης", Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Μάρτιος 2005
- Σταθοπούλου, Β. Δ., (2005), "Σεισμική Μόνωση Τοίχων Εδαφικής Αντιστήριξης με Γεωαφρό Διογκωμένης Πολυστερίνης-Παραμετρική Αριθμητική Ανάλυση", Διατριβή για Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ιούλιος 2005