

Πρακτικά		3ου Συνεδρίου		Μάιος 1986	
Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ.	Τομ.	σελ.	Αθήνα		
	XX/3	335-354	1988		
Bull. Geol. Soc. Greece	Vol.	pag.	Athens		

ΕΔΑΦΟΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ — ΕΔΑΦΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΡΟΣ II. ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΔΑΦΩΝ*

Γ.Α. ΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΣ**

ΣΥΝΟΨΗ Η ανάλυση της σεισμικής συμπεριφοράς συστημάτων έδαφος-κατασκευή απαιτεί τη γνώση των τερών των δυναμικών ιδιοτήτων του εδαφικού υλικού. Πρόσφατες εξελίξεις των επί-τόπου μεθόδων επιτρέπουν τον προσδιορισμό των ταχυτήτων διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, των χαρακτηριστικών απόδοσης του εδαφικού υλικού και στην περίπτωση των κορεσμένων αμμοένων εδαφών, της επικινδυνότητας ρευστοποίησης. Αντίστοιχες εξελίξεις των εργαστηριακών μεθόδων επιτρέπουν τον προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων ή και της πλήρους σχέσης των τάσεων-παραμορφώσεων καθώς και των χαρακτηριστικών ρευστοποίησης αδιατάρακτων εδαφικών δειγμάτων. Αν και οι εμπειρικές σχέσεις για τον προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων του εδάφους πρέπει να αντιμετωπίζονται με επιφύλαξη, μπορεί να γίνουν χρήσιμες αν η αξιοπιστία τους τεκμηριωθεί κατάλληλα για ορισμένη τοποθεσία.

SUMMARY The analysis of seismic behavior of soil-structure systems requires the evaluation of dynamic properties of soils. Recent advances in in-situ methods of measurement allow determination of seismic wave velocities, of damping characteristics of soils and of liquefaction potential of saturated sandy soils. Pertinent advances in laboratory methods allow determination of dynamic soil properties or of the complete stress-strain relation and of liquefaction characteristics of undisturbed soil samples. Although, empirical equations for determining the dynamic soil properties should be viewed with scepticism they can become useful if their reliability is ascertained for a particular location.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το έδαφος (ή ο βράχος) αποτελεί το μέσον πάνω ή μέσα στο οποίο και από το οποίο κατασκευάζονται τα έργα του Πολιτικού Μηχανικού. Κατά την εκδήλωση του φαινομένου "σεισμός", το έδαφος αποτελεί, επιπλέον, το μέσον στο οποίο η σεισμική ενέργεια: παράγεται-διαδίδεται-και δια του οποίου τελικά μεταβιβάζεται στη συγκεκριμένη κατασκευή. Η Γεωτεχνική Αντισεισμική Μηχανική μελετά διεξοδικά όλα τα θέματα Αντισεισμικής Μηχανικής στα οποία υπεισέρχεται και ο παράγοντας "έδαφος", όπως το Μηχανισμό Γένεσης του Σεισμού, τη Διάδοση των Σεισμικών Κυμάτων στο Έδαφος, τη Σεισμική Απόκριση των Εδαφικών Σχηματισμών, τη Ρευστοποίηση των Εδαφών, και τη Δυναμική Αλληλεπίδραση Εδάφους-Κατασκευής (18). Η Γεωτεχνική Αντισεισμική Μηχανική αποτελεί τμήμα της Εδαφοδυναμικής (ή Δυναμικής του Εδάφους) η οποία καλύπτει και μελετά το ευρύτερο φάσμα της συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών κάτω από συνθήκες δυναμικών φορτίσεων, δηλαδή φορτίσεων που είναι συνάρτηση του χρόνου (1,2).

Η πλήρης επίλυση των προβλημάτων που δημιουργούνται από τις σεισμικές φορτίσεις απαιτεί την ανάπτυξη μιας γενικευμένης σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων-χρόνου ή καταστατικής εξίσωσης όπως συχνά αποκαλείται, για το εδαφικό υλικό. Προς την κατεύθυνση αυτή καταβάλλεται σημαντική προσπάθεια κατά την τελευταία εικοσαετία, τόσο με πειραματική όσο και θεωρητική έρευνα (20). Επειδή μια τέ-

* GEOTECHNICAL CONDITIONS - SOIL DYNAMICS

PART II; DYNAMIC PROPERTIES OF SOILS

** Γ.Α. Αθανασόπουλος, Ph.D. Επίκ. Καθηγ. Παν. Πατρών

τοια γενικευμένη σχέση δεν είναι διαθέσιμη προς το παρόν, η μηχανική συμπεριφορά των εδαφών κάτω από συνθήκες δυναμικών φορτίσεων αναλύεται χρησιμοποιώντας απλοποιημένες σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων που χαρακτηρίζονται από ορισμένες μηχανικές παραμέτρους του εδαφικού υλικού που ονομάζονται Δυναμικές Ιδιότητες του Εδάφους {1,2}. Οι δυναμικές ιδιότητες που χρησιμοποιούνται συνήθως σε τέτοιες αναλύσεις είναι:

- Ελαστικά Μέτρα (μέτρο διάτμησης G ή μέτρο Young E)
- Λόγος Απόσβεσης, D (ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης εδαφικού υλικού)
- Δείκτης Poisson
- Κυκλική Αντοχή (διατμητική αντοχή κάτω από συνθήκες κυκλικής φόρτισης)

Ο προσδιορισμός των δυναμικών αυτών ιδιοτήτων γίνεται με ειδικές επί-τόπου και εργαστηριακές δοκιμές και με χρήση εμπειρικών σχέσεων κα συσχετίσεων, κριτική ανασκόπηση των οποίων παρουσιάστηκε πρόσφατα {!}.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται ορισμένες εντελώς πρόσφατες εξελίξεις στο θέμα του προσδιορισμού των δυναμικών ιδιοτήτων του εδάφους. Περιγράφονται επίσης μέθοδοι προσδιορισμού που έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα και είναι πρόσφορες τόσο από άποψη κόστους όσο και από άποψη χρησιμότητας και αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Σημειώνεται, τελικά, ότι ορισμένες από τις μεθόδους προσδιορισμού των δυναμικών ιδιοτήτων του εδάφους προσφέρονται ιδιαίτερα κατά τη σύνταξη Μικροζωνικών Μελετών στη χώρα μας γιατί επιτρέπουν την απόκτηση φάσματος πληροφοριών, σχετικά με τη σεισμική συμπεριφορά των εδαφών, με μικρό σχετικά κόστος.

ΕΠΙ-ΤΟΠΟΥ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ

Το κύριο πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι ότι δεν απαιτούν δειγματοληψία η οποία συνοδεύεται από το γνωστό πρόβλημα της διαταραχής των εδαφικών δειγμάτων. Οι μέθοδοι αυτές επιτρέπουν τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των διαμηκών και εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων, V_p και V_s , αντίστοιχα, από τις οποίες υπολογίζονται τα ελαστικά μέτρα G, και E και ο δείκτης του Poisson, ν , από τις σχέσεις:

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (1)$$

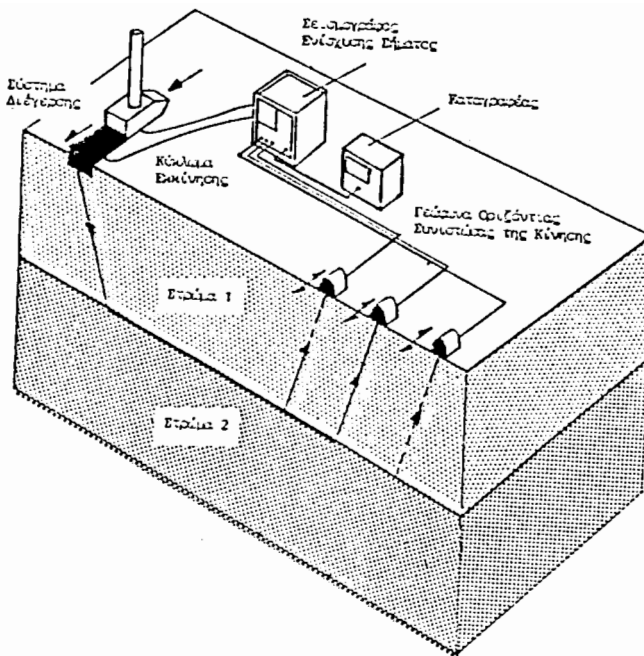
$$E = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)} \cdot \rho \cdot V_p^2 \quad (2)$$

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} (V_p/V_s)^2 - 1}{(V_p/V_s)^2 - 1} \quad (3)$$

όπου: ρ = πυκνότητα του εδάφους

1. Μέθοδος Σεισμικής Διάθλασης

Η μέθοδος είναι επιφανειακή, δηλαδή δεν απαιτεί τη διάνοιξη γεωτρήσεων. Η αρχή της μεθόδου φαίνεται στο Σχ.1 {1,2,16,17}. Σε σημείο της επιφάνειας του εδάφους με κατάλληλη εδιαταραχή δημιουργούνται σεισμικά κύματα που διαδίδονται στο εσωτερικό του εδάφους και επιστρέφουν στην επιφάνεια όπου καταγράφονται με τη βοήθεια γεωφώνων (οργάνων ευαίσθητων στην κίνηση) και καταγραφικών ορ-

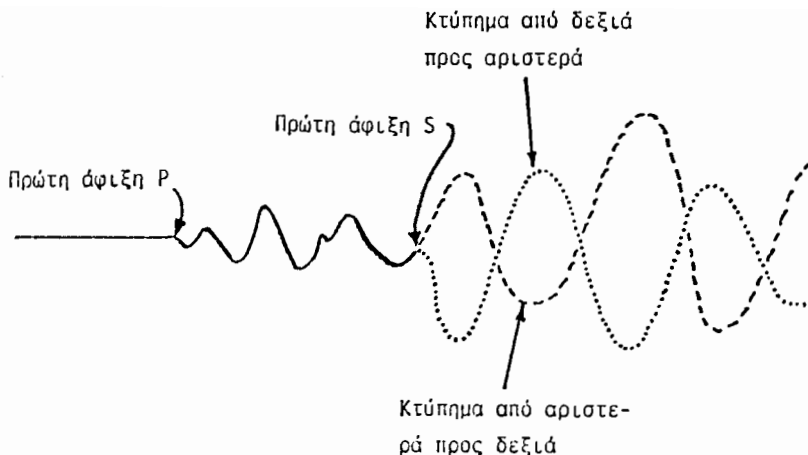


Σχήμα 1. Μέθοδος Σεισμικής Διάθλασης με Χρήση Εγκάρσιων Κυμάτων

Figure 1. Refraction Survey Using Horizontally Polarized Shear-Waves

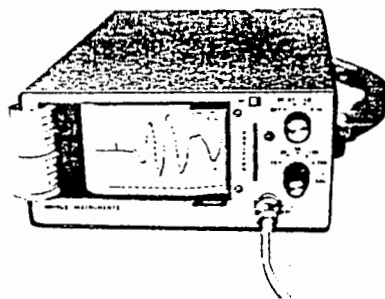
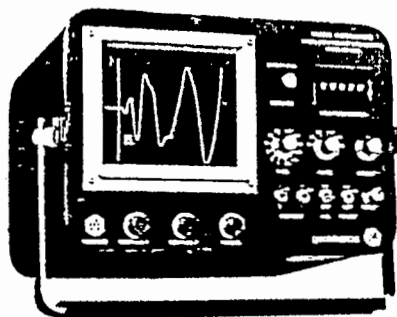
γώνων. Με δεδομένα τις αποστάσεις των γεωφώνων από την πηγή της διαταραχής και τους αντίστοιχους χρόνους άφιξης των κυμάτων είναι δυνατός ο υπολογισμός του πάχους των εδαφικών στρωμάτων και της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων σε κάθε στρώμα.

Για την απόκτηση αποτελεσμάτων αξιοποιήσιμων για εδαφοδυναμικές αναλύσεις θεωρείται απαραίτητη η χρήση μηχανικών πηγών διέγερσης και η χρήση εγκάρσιων κυμάτων, Σχ.1 (2,5). Τα πλέον ακριβή αποτελέσματα προκύπτουν με τη χρήση μηχανικών διατάξεων που επιτρέπουν αντιστροφή της φοράς της κρούσης. Οι πιο πάνω τεχνικές βασίζονται στις εξής παρατηρήσεις, (1,2): 1) η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων στο έδαφος δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη νερού και επομένως αντανακλά τις ιδιότητες του εδαφικού σκελετού, 2) η πολικότητα των εγκάρσιων κυμάτων αντιστρέφεται όταν αντιστραφεί η φορά της διέγερσης, πράγμα που δεν συμβαίνει στα διαμήκη κύματα. Έτσι η αναγνώριση της άφιξης των εγκάρσιων κυμάτων διευκολύνεται σημαντικά, Σχ.2. Η αναγνώριση αυτή διευκολύνεται επίσης με τη χρήση σειсмоγράφων ενίσχυσης σήματος οι οποίοι εκτός από τη βελτίωση της ποιότητας του σήματος άφιξης, επιτρέπουν τη διερεύνηση μεγαλύτερου βάθους εδάφους για δεδομένη ενέργεια διέγερσης, (2). Στο Σχ. 3 φαίνεται σειсмоγράφος ενίσχυσης σήματος ενός καναλιού και το αντίστοιχο καταγραφικό όργανο συνολικού κόστους 1.300.000 δρχ. περίπου, ενώ στο Σχ.4 όργανο του ίδιου τύπου αλλά με 24 κανάλια και ενσωματωμένο καταγραφέα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος σεισμικής διάθλασης μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε εδαφικές τομές που η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων αυξάνει με το βάθος.



Σχήμα 2. Ακριβής Αναγνώριση Άφιξης Εγκάρσιων Κυμάτων με Αντιστροφή της Φοράς της Διέγερσης

Figure 2. Identification of Shear-Wave Arrival by Reversing the Direction of Blow

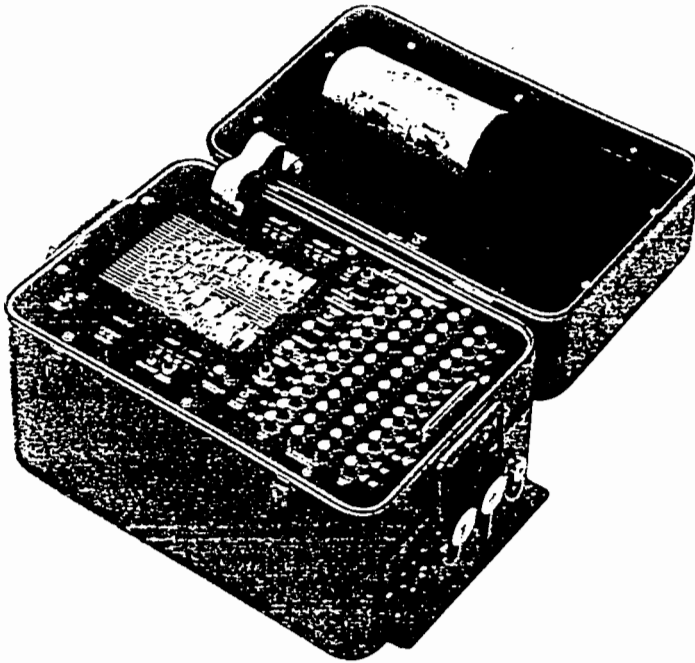


Σχήμα 3. Σεισμογράφος Ενίσχυσης Σήματος, ES-125, και Καταγραφέας, ESR-100, του Οίκου EG & G GEOMETRICS

Figure 3. Signal Enhancement Seismograph and Recorder (ES-125 and ESR-100, EG & G Geometrics)

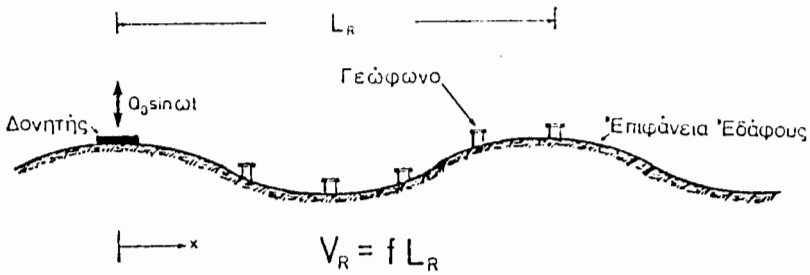
2. Μέθοδος Επιφανειακών Κυμάτων

Η αρχή της μεθόδου αυτής, που είναι επιφανειακή, φαίνεται στο Σχ.5, (1,2,16,17). Σημείο της επιφάνειας του εδάφους τίθεται σε μόνιμη αρμονική κατακόρυφη ταλάντωση με τη βοήθεια, ηλεκτρομαγνητικού ή μηχανικού δονητή. Η διέγερση αυτή δημιουργεί επιφανειακά κύματα Rayleigh, των οποίων το μήκος κύματος L_R προσδιορίζεται με τη βοήθεια γεωφώνων πακτωμένων στο έδαφος. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων Rayleigh, V_R , υπολογίζεται από τη σχέση:



Σχήμα 4. Σεισμογράφος Ενίσχυσης Σήματος 24 Καναλιών με Ενσωματωμένο Καταγραφέα, του Οίκου EG & G GEOMETRICS

Figure 4. Twenty-four Channel Signal Enhancement Seismograph With Build-in Recorder (ES-2415 F, EG & G Geometrics)



Σχήμα 5. Αρχή της Μεθόδου Επιφανειακών Κυμάτων για τον Προσδιορισμό της Ταχύτητας Διάδοσης Εγκάρσιων Κυμάτων

Figure 5. Steady-State Surface Vibration Method (Principle)

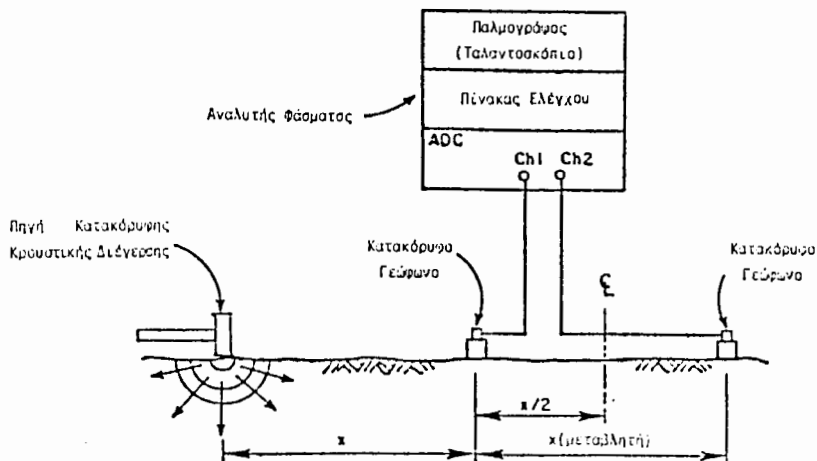
$$V_R = f \cdot L_R$$

(4)

όπου: f = συχνότητα λειτουργίας του δονητή

Η τιμή της V_R που προκύπτει θεωρείται συνήθως ότι αντιστοιχεί σε μέσο βάθος εδάφους ίσο με $L_R/2$. Έχει όμως υποστηριχτεί ότι το βάθος αυτό πρέπει να παίρνεται ίσο με $L_R/3$ ή ακόμα και $L_R/10$ (1,23). Η ταχύτητα V_R διαφέρει πολύ λίγο σε σχέση με την ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων, V_S , και σε πολλές περιπτώσεις γίνεται δεκτό ότι $V_S = V_R$.

Εντελώς πρόσφατα άρχισε να εφαρμόζεται τροποποιημένη μέθοδος επιφανειακών κυμάτων που ονομάζεται Φασματική Ανάλυση Επιφανειακών Κυμάτων (12,23,23). Η αρχή της μεθόδου φαίνεται στο Σχ.6. Σημείο της επιφάνειας του εδάφους υποβάλλε-



Σχήμα 6. Αρχή της Μεθόδου Φασματικής Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων

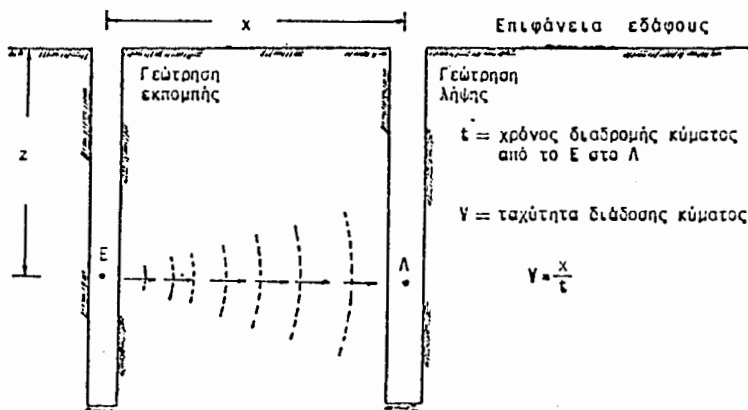
Figure 6. Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method (Principle)

ται σε κρουστικό κατακόρυφο φορτίο (με πτώση σφύρας) το οποίο δημιουργεί κυματό επιφανειακών κυμάτων Rayleigh. Η διάδοση των κυμάτων αυτών ανιχνεύεται με ζεύγος γεωφώνων πακτωμένων στην επιφάνεια του εδάφους και σε γνωστές αποστάσεις από το σημείο κρούσης. Τα σήματα άφιξης των κυμάτων καταγράφονται σε Αναλυτή Φάσματος όπου ψηφιοποιούνται και αποθηκεύονται στη μνήμη του ηλεκτρονικού υπολογιστή του οργάνου. Με κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων αυτών, που γίνεται από το ίδιο όργανο, γίνεται μεταφορά από το χρονικό πεδίο στο πεδίο συχνοτήτων με χρήση της μεθόδου του ταχέως μετασχηματισμού Fourier. Ακολουθεί φασματική ανάλυση των αποτελεσμάτων από την οποία προκύπτει συσχέτιση μεταξύ των ταχυτήτων διάδοσης και της συχνότητας των κυμάτων που εκφράζεται μαθηματικά με την εξίσωση διασποράς και γραφικά με την καμπύλη διασποράς. Τελικά με αναστροφή προκύπτει η κατανομή της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων ως συνάρτηση του βάθους. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η σχεδόν πλήρης αυτοματοποίηση της διεξαγωγής της (οπότε δεν απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό) και η μεγάλη ακρίβειά της σε σχέση με την παλαιότερη έκδοσή της. Ας σημειωθεί ότι ο αναλυτής φάσματος που απαιτείται για τη διεξαγωγή της στοιχίζει σήμερα περί τα 4.500.000 δρχ..

3. Μέθοδος Cross-Hole

Η μέθοδος αυτή απαιτεί τη διάνοιξη δύο τουλάχιστον κατακόρυφων γεωτρήσεων

και η αρχή της φαίνεται στο Σχ.7, {1,2,3,13,16,17,28}. Στο επιθυμητό βάθος μέσα στη γεώτρηση εκπομπής προκαλείται διαταραχή που δημιουργεί σεισμικά κύματα που διαδίδονται προς όλες τις διευθύνσεις. Μέσα στη γεώτρηση λήψης, και στο ίδιο βάθος, πακτώνεται κατάλληλο σύστημα ανίχνευσης των σεισμικών κυμάτων



Σχήμα 7. Αρχή της Μεθόδου Cross-hole

Figure 7. Cross-hole Method (Principle)

συνδεδεμένο με καταγραφικό σύστημα για την καταγραφή του σήματος άφιξης των κυμάτων. Εφόσον η απόσταση των σημείων εκπομπής και λήψης, x , και ο χρόνος διαδρομής, t , είναι γνωστά, η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων υπολογίζεται από τη σχέση:

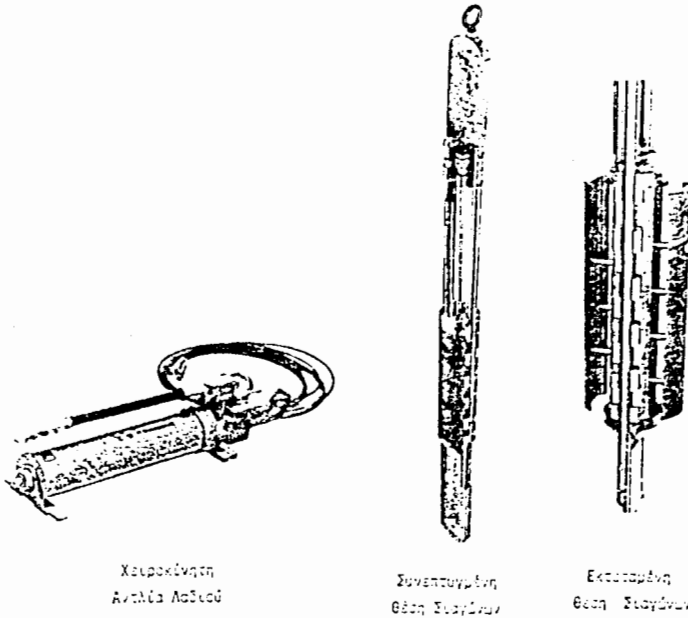
$$v = \frac{x}{t} \quad (5)$$

Η τιμή του χρόνου διαδρομής, t , είναι περισσότερη αξιόπιστη όταν προσδιορίζεται μεταξύ δύο γεωτρήσεων λήψης σε σχέση με την τιμή που προσδιορίζεται μεταξύ γεώτρησης εκπομπής και γεώτρησης λήψης γιατί η τελευταία μπορεί να επηρεασθεί από το μη ακριβή προσδιορισμό του χρόνου εκκίνησης του σεισμικού κύματος {2}. Για βάθη γεωτρήσεων μεγαλύτερα των 12m, πρέπει να ελέγχεται η κατακορυφότητα των γεωτρήσεων ώστε η απόσταση x να μπορεί να υπολογίζεται με αξιοπιστία.

Η εφαρμογή της μεθόδου γίνεται συνήθως με χρήση κατακόρυφα πολωμένων εγκάρσιων κυμάτων. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν μηχανικές πηγές που έχουν τη δυνατότητα πάκτωσης στο επιθυμητό βάθος ήδη διανοιγμένης γεώτρησης και τη δυνατότητα αντιστροφής της φοράς της κρούσης, Σχ.8 και Σχ.9 {2}. Υπάρχουν όμως και παραδείγματα χρήσης εκρηκτικών για τη δημιουργία των σεισμικών κυμάτων {13}. Έχει δείχθει ότι η διεύθυνση του δειγματολήπτη του Terzaghi στον πυθμένα της γεώτρησης εκπομπής, κατά τη διάρκεια της προτίπισης Δοκιμής Διεύθυνσης (SP1), Σχ.10, αποτελεί πολύ καλή πηγή εγκάρσιων κυμάτων για την εφαρμογή της μεθόδου {1,2,26}. Η τεχνική αυτή σε συνδυασμό με τη χρήση του συστήματος λήψης του Σχ.11 που έχει σχεδιασθεί από το συγγραφέα, έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην Ελλάδα, Σχ.12, {1,2,25}.

Κατά τα τελευταία χρόνια καταβάλλεται προσπάθεια για τη δυνατότητα προσδιορισμού της τιμής του λόγου απόσβεσης, D , κατά την εφαρμογή της μεθόδου Cross-hole. Πιρόσφατες εξελίξεις προς την κατεύθυνση αυτή επιτρέπουν τον προσδιορι-

Μηχανικό Σύστημα Παραγωγής
Εγκάρσιων Κυμάτων
Μέσα σε Γεώτρηση



Χειροκίνητη
Ανάλια Ασβέστου

Συνεπόμενη
θέση Σταγόνων

Εκστραπέυση
θέση Σταγόνων

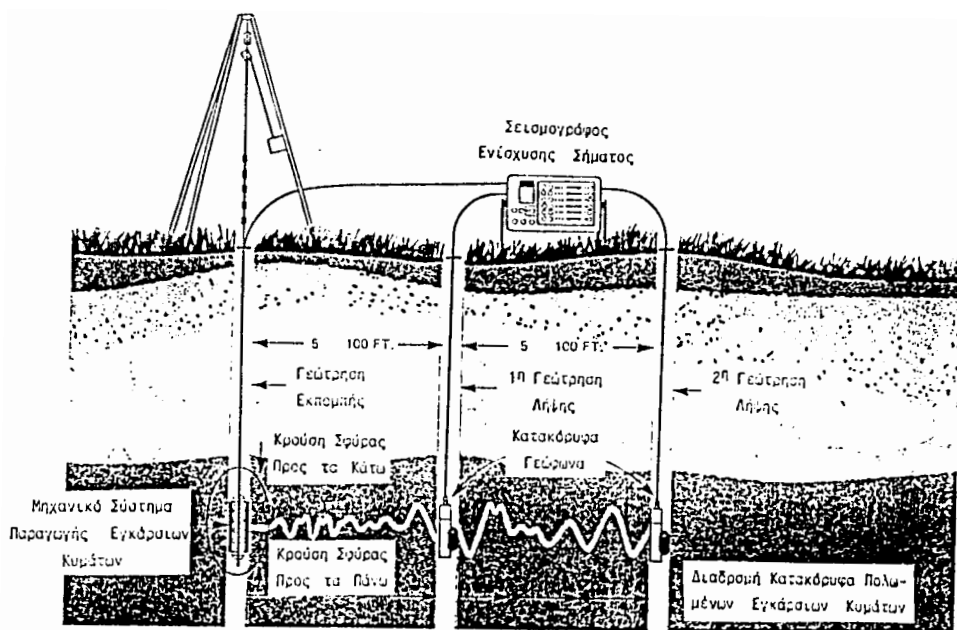
Σχήμα 8. Μηχανικό Σύστημα Παραγωγής Εγκάρσιων Κυμάτων-SV, Αντιστρατεύμενης Πολικότητας, Μέσα σε Γεώτρηση, Model 1465 του Οίκου BISON

Figure 8. Borehole Shear-Wave Hammer With Capability of Reversing the Direction of Blow (Model 1465 Bison)

από της σημαντικής αυτής δυναμικής ιδιότητας του εδάφους με σύγκριση και επεξεργασία των σημάτων άφιξης των σεισμικών κυμάτων σε δύο γεωτρήσεις λήξης (9). Οι εξελίξεις αυτές έχουν ιδιαίτερη αξία γιατί μέχρι πρόσφατα γινόταν δεκτό ότι δεν υπήρχαν επί-τόπου μέθοδοι για τον προσδιορισμό του λόγου απόσβεσης των εδαφικών υλικών [16].

Οι επί-τόπου μέθοδοι που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα επιτρέπουν γενικά τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων, V_S , σαν συνάρτησης του βάθους τόσο για συνεκτικά όσο και για αμμώδη εδάφη. Πρόσφατες εξελίξεις στη μελέτη του φαινομένου της ρευστοποίησης χαλαρών κορεσμένων αμμωδών εδαφών δείχνουν ότι η τιμή της V_S μπορεί να αποτελέσει δείκτη της επικινδυνότητας ρευστοποίησης των εδαφών αυτών κάτω από συνθήκες σεισμικής φόρτισης [21,23,27]. Ορισμένες πρόσφατες συσχετίσεις αυτού του είδους έχουν δώσει τα εξής αποτελέσματα [23]:

- $V_S \geq 170 \frac{m}{sec}$: Δεν συμβαίνει ρευστοποίηση
- $170 > V_S > 140$: Ρευστοποίηση είναι πιθανή
- $140 \geq V_S$: Άμεσος κίνδυνος ρευστοποίησης



Σχήμα 9. Εφαρμογή της μεθόδου Cross-hole με Χρήση Μηχανικού Συστήματος Παραγωγής Εγκάρσιων Κυμάτων και Δύο Γεωτρήσεων Λήψης

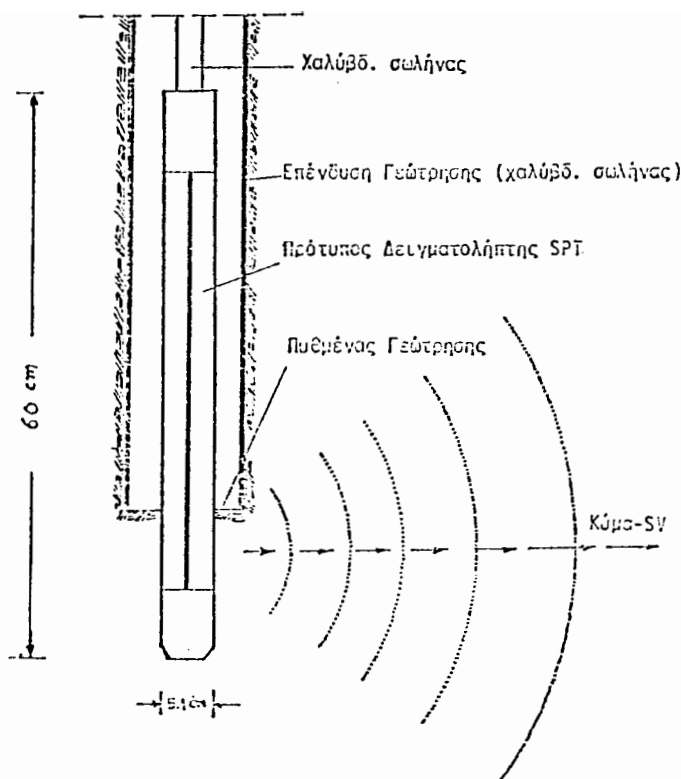
Figure 9. Cross-hole Method Using Shear-Wave Hammer and Two Receiving Boreholes

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συσχετίσεις αυτές δεν είναι απλά εμπειρικές αλλά υποστηρίζονται θεωρητικά από εξελίξεις σχετικά με την ύπαρξη μιας κρίσιμης κυκλικής παραμόρφωσης πέρα από την οποία εμφανίζεται το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Έχει δείχθει, συγκεκριμένα, ότι για δεδομένο σεισμό η τιμή των αναπτυσσόμενων κυκλικών παραμορφώσεων, από την οποία εξαρτάται το αν θα συμβεί ρευστοποίηση, είναι συνάρτηση της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων, V_s (7). Πάντως, ας σημειωθεί ότι οι εξελίξεις αυτές είναι πολύ πρόσφατες και ο βαθμός εξέλιξής τους δεν δικαιολογεί το χαρακτηρισμό τους ως "αποδεδειγμένης τεχνικής" (11).

Κατά τη σύνταξη Μικροζωνικών μελετών η εφαρμογή των διαφόρων επί-τόπου μεθόδων που περιγράφηκαν στα προηγούμενα μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποδοτική. Κι' αυτό γιατί οι τιμές των ταχυτήτων διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων και του λόγου απόσβεσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για τον προσδιορισμό των θεμελιωδών ιδιοπεριόδων των εδαφικών τομών και του κινδύνου ρευστοποίησης. Στη συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για περισσότερο σύνθετες αναλύσεις σεισμικής απόκρισης και αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ

Στις μεθόδους αυτές, εδαφικό δοκίμιο μικρών διαστάσεων τοποθετείται σε κατάλληλη εργαστηριακή συσκευή και υποβάλλεται σε σύστημα τάσεων (δηλ. φόρτιση) κατά το δυνατόν όμοιο με αυτό που γίνεται δεκτό ότι αναπτύσσεται σ' ένα εδαφικό στοιχείο κατά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων. Ένα τέτοιο απλοποιημένο σύστημα τάσεων που αναπτύσσεται κατά την κατακόρυφη διάδοση οριζόντια



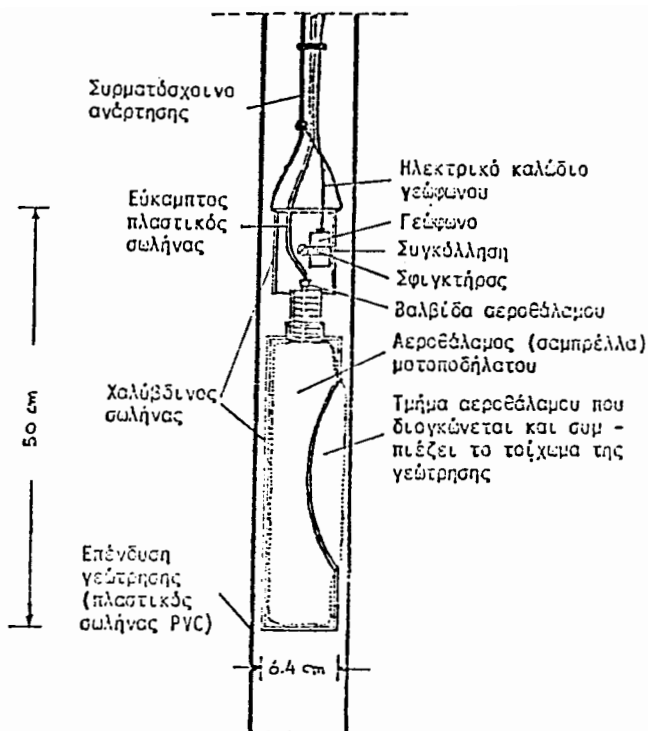
Σχ. 10. Διευκρίνιση Χωρικών Κυμάτων-SV κατά την Πρόσθιση του Δειγματολήπτη της Πρότυπης Δοκιμής Διείσδυσης (SPT) στον Πυθμένα Γεώτρησης

Figure 10. Generation of Vertically Polarized Shear Waves During Penetration of the SPT Standard Split Spoon Sampler

πολυμένων εγκάρσιων κυμάτων φαίνεται στο Σχ.13. Από την απόκριση του εδαφικού δοκιμίου στη συγκεκριμένη φόρτιση αποκτώνται πληροφορίες είτε για την πλήρη καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων είτε για τις τιμές των βασικών δυναμικών ιδιοτήτων του συγκεκριμένου εδαφικού υλικού. Το κύριο πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι ότι επιτρέπουν τη μελέτη της επιρροής σημαντικών παραμέτρων (όπως το μέγεθος της κυκλικής διατηρητικής παραμόρφωσης, η περιβάλλουσα τάση, είδος φόρτισης) πάνω στη δυναμική συμπεριφορά του εδαφικού υλικού.

1. Μέθοδος Συντονισμού

Η αρχή της μεθόδου φαίνεται στο Σχ.14. Κυλινδρικό εδαφικό δοκίμιο πλήρους ή δακτυλιοειδούς διατομής, τοποθετείται σε συσκευή που ονομάζεται Συσκευή Συντονισμού (Resonant Column Apparatus) και υποβάλλεται σε στρεπτικές ή διαμήκειες μόνιμες αρμονικές ταλαντώσεις. Μεταβάλλοντας τη συχνότητα διέγερσης εντοπίζεται η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα (συχνότητα συντονισμού) του δοκιμίου, f_n , που μαζί με το βάρος και τις διαστάσεις του δοκιμίου, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων ή διαμήκων κυμάτων και των αντίστοιχων δυναμικών μέτρων {1,2}. Με την καταγραφή των ελεύθερων φθίνουσών ταλαντώσεων του δοκιμίου είναι επίσης δυνατός ο προσδιορισμός του



Σχήμα 11. Σύστημα για την Βάκωση Κατακόρυφου Γεώφωνου στα Τοιχώματα Γεώτρησης

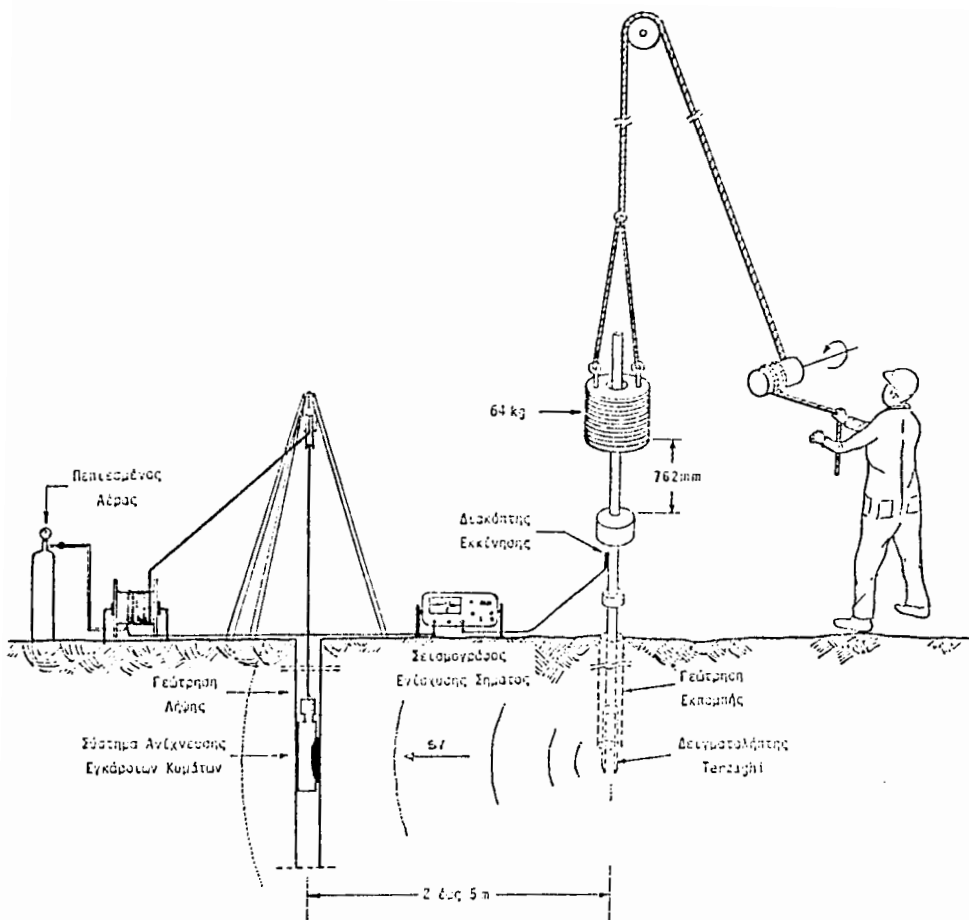
Figure 11. System for Fixing the Geophone on the Walls of Receiving Borehole

λόγου απόσβεσης, D , του εδαφικού υλικού. Για τη λειτουργία της συσκευής συντονισμού είναι απαραίτητος ηλεκτρονικός εξοπλισμός που περιγράφεται σχηματικά στο Σχ.15. Το κόστος του εξοπλισμού αυτού κυμαίνεται περί τις 900.000 δραχ.

Το κύριο χαρακτηριστικό της δοκιμής συντονισμού είναι ότι η συχνότητα διέγερσης του εδαφικού δοκιμίου είναι σχετικά υψηλή (40 ± 200 Hz ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη συσκευή) και γι' αυτό η δοκιμή αυτή χαρακτηρίζεται μερικές φορές ως ταχεία κυκλική δοκιμή [19]. Το γεγονός αυτό κάνει αδύνατη τη μελέτη της συμπεριφοράς του εδαφικού υλικού κατά τη διάρκεια των πρώτων κύκλων φόρτισης. Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι η δοκιμή συντονισμού, 1) επιτρέπει τον υπολογισμό των δύο θεμελιωδών δυναμικών ιδιοτήτων, G και D , Σχ.16, όχι όμως και την πλήρη καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του εδαφικού υλικού, 2) δεν επιτρέπει την ανάπτυξη διατμητικών παραμορφώσεων μεγαλύτερων του 1%.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εντελώς πρόσφατη τροποποίηση της μεθόδου συντονισμού [22], κατά την οποία η διέγερση του εδαφικού δοκιμίου έχει τη μορφή βαθμίδας πολύ μικρής διάρκειας που προκαλεί ελεύθερες φθίνουσες ταλαντώσεις. Η κατάλληλη καταγραφή και επεξεργασία των ταλαντώσεων αυτών επιτρέπει τον υπολογισμό του μέτρου διάτμησης και του λόγου απόσβεσης του εδαφικού υλικού ως συναρτήσεων του μεγέθους της διατμητικής παραμόρφωσης. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι καταργεί σημαντικό μέρος του απαιτούμενου ηλεκτρονικού εξοπλισμού και είναι πλήρως αυτοματοποιημένη ώστε να διεξάγεται από συνηθισμένο μικροϋπολογιστή.

Η δοκιμή συντονισμού περιλήφθηκε το 1981 στις επίσημες προδιαγραφές των γεω-



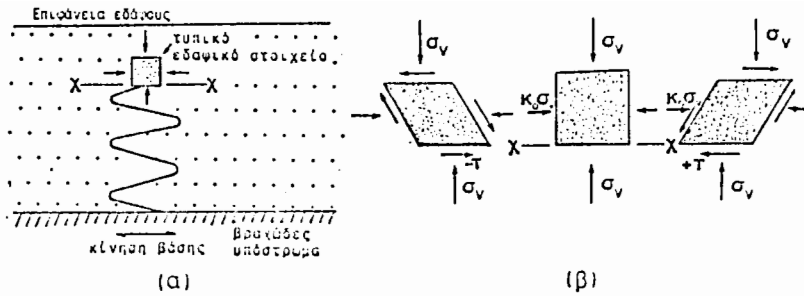
Σχήμα 12. Εφαρμογή της Μεθόδου Cross-hole με Χρήση της Διεξόδου του Δειγματολήπτη Terzaghi ως Πηγής Διέγερσης και Μιας Γεώτρησης Λήψης

Figure 12. Cross-hole Method Using Penetration of SPT Sampler and One Re-ceiving Borehole

τεχνικών δοκιμών της Αμερικανικής Ένωσης Δοκιμών και Υλικών (ASTM) με κωδικό αριθμό D 4015-81. Στο Σχ.17 φαίνεται τομή της συσκευής ΣΣΕΔ (Συσκευή Συντονισμού Εδαφικών Δοκιμών) του Εργαστηρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Πατρών, που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από το συγγραφέα (Αριθμ. Διπλ. Ευρεσιτεχνίας του Υπουργείου Έρευνας και Τεχνολογίας, 72233/3-10-1983).

2. Μέθοδος Κυκλικής Φόρτισης

Στη μέθοδο αυτή, όπως και στην προηγούμενη, κυλινδρικό εδαφικό δοκίμιο πλήρους ή δακτυλιοειδούς διατομής, υποβάλλεται σε ειδική εργαστηριακή συσκευή και υποβάλλεται σε κυκλική φόρτιση τετραγωνικής ή τριγωνικής μορφής (1,2). Η διαφορά, σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο, έγκειται στο ότι η συχνότητα της κυκλικής φόρτισης είναι χαμηλή (από 0.5 έως 2 Hz) και γι' αυτό δοκιμές αυτού του είδους χαρακτηρίζονται ως βραδείες κυκλικές δοκιμές, (19). Με τη χρη-

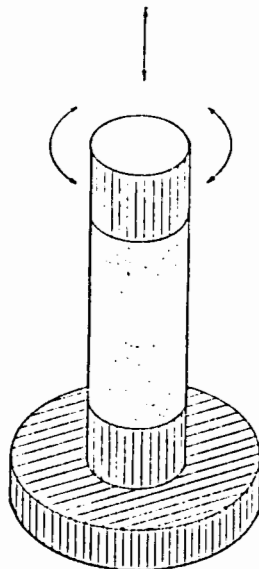


(α) Διάδοση μετασχηματισμένου κύματος από το βραχώδες υπόστρωμα σε εδαφικό στρώμα
 (β) Σύστημα τάσεων που αναπτύσσεται σε τυπικό εδαφικό δοκίμιο

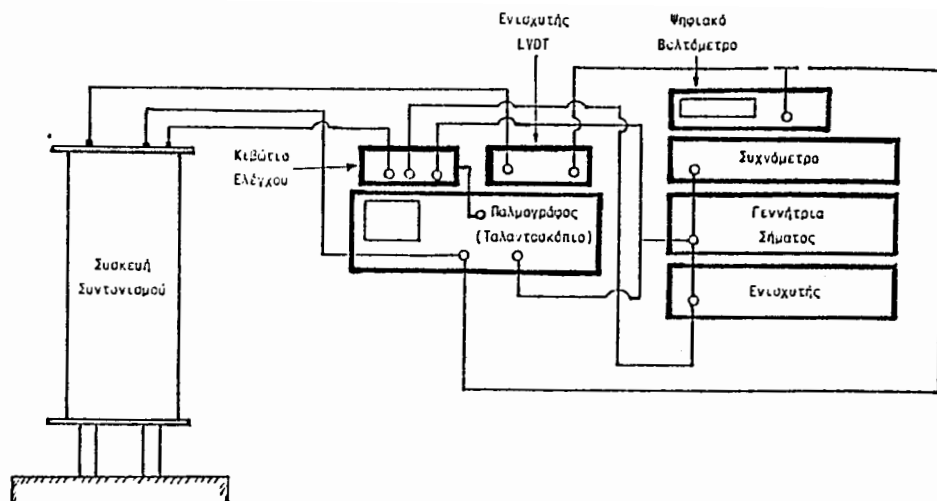
Σχήμα 13. Απλοποιημένη Προσομοίωση Σεισμικής Φόρτισης Εδαφικού Στοιχείου
 Figure 13. Simplified Modelling of Seismic Loading on a Soil Element

σιμποίηση κατάλληλου ηλεκτρονικού εξοπλισμού, τόσο οι τάσεις όσο και οι παραμορφώσεις του εδαφικού δοκιμίου, παρακολουθούνται και καταγράφονται καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει η πλήρης καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων του εδαφικού υλικού για τη συγκεκριμένη κυκλική φόρτιση.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου βραδείας κυκλικής φόρτισης είναι ότι



Σχήμα 14. Αρχή της Μεθόδου Συντονισμού
 Figure 14. Resonant Column Method (Principle)



Σχήμα 15. Ηλεκτρονικός Εξοπλισμός Απαραίτητος για τη Λειτουργία της Συσκευής Συντονισμού

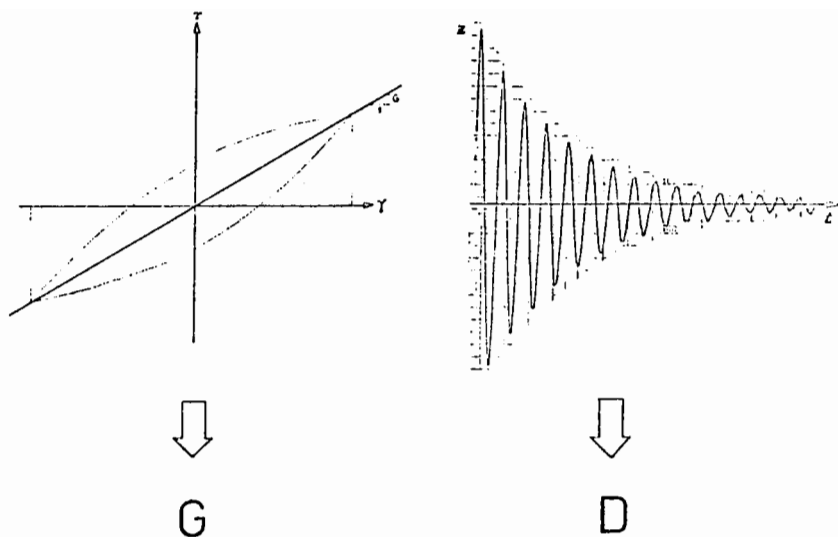
Figure 15. Electronic Equipment Necessary for the Operation of the Resonant Column Apparatus

1) επιτρέπει την ανάπτυξη διατμητικών παραμορφώσεων μεγάλου πλάτους (μέχρι 10%), επιτρέποντας έτσι τη μελέτη της κυκλικής αντοχής και των χαρακτηριστικών ρευστοποίησης των εδαφικών δοκιμών και 2) επιτρέπει τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς του εδαφικού υλικού κατά τη διάρκεια των πρώτων κύκλων φόρτισης (αρχίζοντας από τον 1^ο κύκλο), γεγονός που έχει ιδιαίτερη σημασία στην περίπτωση των σεισμικών φορτίσεων. Ανάλογα με το είδος της κυκλικής φόρτισης που επιβάλλεται στο εδαφικό δοκίμιο, διακρίνουμε τρία είδη κυκλικών δοκιμών {1} (βλ. Σχ. 18):

- Δοκιμή Κυκλικής Τριαξονικής Φόρτισης, Σχ. 18(α)
- Δοκιμή Κυκλικής Απλής Διάτμησης, Σχ. 18(β)
- Δοκιμή Κυκλικής Στρεπτικής Απλής Διάτμησης, Σχ. 18(γ)

Αξίζει να σημειωθεί ότι εντελώς πρόσφατα σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και διατίθεται στο εμπόριο από τον καθηγητή του University of Kentucky στις ΗΠΑ, V. Dinevich, συσκευή που συνδυάζει τα χαρακτηριστικά τόσο της συσκευής συντονισμού όσο και της συσκευής βραδείας κυκλικής δοκιμής {8}. Με τη συσκευή αυτή είναι δυνατόν να διεξάγονται ταυτόχρονα και οι δύο δοκιμές πάνω σε κυλινδρικό εδαφικό δοκίμιο πλήρους ή δακτυλιοειδούς διατομής. Θα πρέπει τέλος να τονισθεί ότι οι δοκιμές κυκλικών φορτίσεων απαιτούν ηλεκτρονικό εξοπλισμό ψηλού σχετικά κόστους καθώς και εξειδικευμένο προσωπικό. Η πιο διαδεδομένη από αυτές, σήμερα, είναι η δοκιμή κυκλικής τριαξονικής φόρτισης που συμβαίνει να είναι απλούστερη σε σχέση με τις άλλες.

Κατά την τελευταία δεκαεπενταετία έχει γίνει εκτεταμένη εφαρμογή των εργαστηριακών μεθόδων που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα πάνω σε δοκίμια πολλών ειδών εδαφών. Η συστηματική μελέτη των αποτελεσμάτων των δοκιμών αυτών έχει δείξει ότι η μηχανική συμπεριφορά των εδαφών κατά τη διάρκεια σεισμικών φορτίσεων μπορεί να περιγραφεί κατά προσέγγιση και για τρέχουσες εφαρμογές είτε από μια υπερβολική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων είτε από την εξίσωση των Ramberg-Osgood {16,17}. Έχουν προταθεί επίσης και εμπειρικές σχέσεις που επιτρέπουν



Σχήμα 16. Δυναμικές Ιδιότητες του Εδάφους που Προσδιορίζονται κατά τη Διεξαγωγή της Δοκιμής Συντονισμού

Figure 16. Dynamic Soil Properties Determined from the Resonant Column Test

τον υπολογισμό των παραμέτρων των αναγκαίων για τον καθορισμό των καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για διάφορα είδη εδαφών (2). Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι έχει αναπτυχθεί και ένας μεγάλος αριθμός πιο πολύπλοκων "μοντέλων εδάφους", βασισμένων στη θεωρία πλαστικότητας, στην εδαφομηχανική της κρίσιμης κατάστασης, στην ενδοχρονική θεωρία και στην έννοια της οριακής επιφάνειας (4,6,15). Τέτοια μοντέλα εδάφους δεν έχουν όμως ενσωματωθεί σε μεγάλα εμπορικά προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αναλύσεις σεισμικής απόκρισης.

ΕΜΠΕΣΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ

Σε πολλές περιπτώσεις η εφαρμογή των επί-τόπου ή εργαστηριακών μεθόδων που περιγράφηκαν στα προηγούμενα δεν είναι δυνατή για λόγους οικονομικούς ή έλλειψης ειδικευμένου προσωπικού. Στις περιπτώσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ορισμένες εμπειρικές σχέσεις και συσχετίσεις που αναφέρονται στα επόμενα.

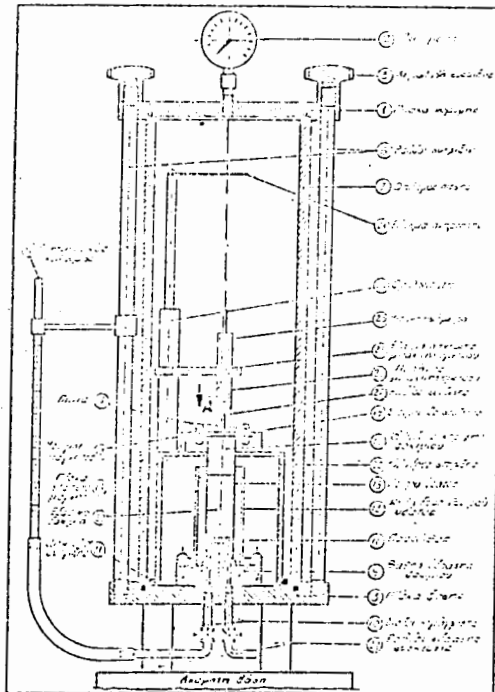
1. Εξίσωση Hardin

Η Εξ. 6, που είναι γνωστή ως "Εξίσωση Hardin",

$$G_0 = \frac{625(OCR)^k}{0.3+0.7e^2} \sqrt{Pa \bar{\sigma}_0} \quad (6)$$

όπου: $\bar{\sigma}_o$ = ενεργός ορθή οκταεδρική τάση,
 OCR = λόγος προστερεοποίησης,
 e = δείκτης κενών ($0.40 < e < 1.20$),
 k = συντελεστής εξαρτώμενος από τον
 δείκτη πλαστικότητα, PI , τιμές
 του οποίου δίνονται στον Πίν. 1,
 P_a = ατμοσφαιρική πίεση.

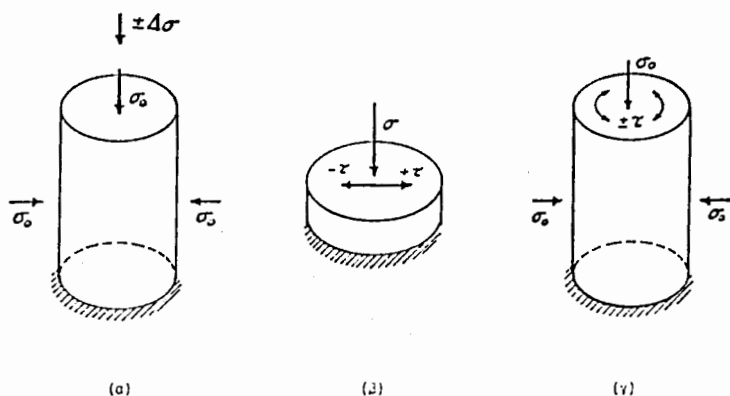
ΠΙΝ.1 Τιμές του k	
PI	k
0	0.00
20	0.18
40	0.30
60	0.41
80	0.48
>100	0.50



Σχήμα 17. Συσκευή Συντονισμού Εδαφικών Δοκιμών (ΣΣΕΔ)

Figure 17. Resonant Column Apparatus (Cross-Section)

επιτρέπει τον υπολογισμό του μέτρου διάτμησης χαμηλού πλάτους, G_o , όταν είναι γνωστές ορισμένες συμβατικές εδαφικές ιδιότητες που κατά κανόνα είναι διαθέσιμες από τις συνηθισμένες γεωτεχνικές έρευνες {1,2}. Η ατμοσφαιρική πίεση έχει εισαχθεί στην Εξ. 6 μόνο για τη διευκόλυνση της χρήσης των μονάδων. Δηλαδή, η Εξ. 6 μπορεί να χρησιμοποιηθεί με οποιαδήποτε μονάδα τάσης για το $\bar{\sigma}_o$, αρκεί η τιμή του P_a να εισαχθεί εκφρασμένη στην ίδια μονάδα, οπότε και η τιμή του G_o προκύπτει επίσης εκφρασμένη στην ίδια μονάδα. Ας σημειωθεί ότι η Εξ. 6 ισχύει για όλα τα εδάφη (συνεκτικά ή ψαθυρά). Πρέπει τέλος να επισημανθεί ο περιορισμός ισχύος της Εξ. 6, για τιμές του δείκτη κενών από 0.40 μέχρι 1.20.



Σχήμα 10. Είδη Κυκλικών Φορτίσεων Εδαφικού Δοκιμίου

Figure 10. Types of Cyclic Loading of Soil Specimens

2. Συσχέτιση G_0 και τ_{max}

Αν και έχουν γίνει πολλές απόπειρες συσχέτισης της τιμής του μέτρου διάτμησης (ή μέτρου ελαστικότητας) και της στατικής διατμητικής αντοχής των εδαφών, έχει δειχτεί αρκετές φορές ότι ο λόγος G_0/τ_{max} κυμαίνεται σε πλατιά όρια ακόμα και για το ίδιο έδαφος ανάλογα με την τιμή της τάσης, σ_0 , και του λόγου προστερεοποίησης, OCR {3}. Για εδαφοδυναμικές αναλύσεις έχουν χρησιμοποιηθεί πρόσφατα οι συσχετίσεις: $G_0/\tau_{max} = 600$ για αργιλικά εδάφη και $G_0/\tau_{max} = 1100$ για αμμώδη εδάφη {24}. Πρέπει να επισημανθεί ότι χρήση τέτοιων εμπειρικών συσχετίσεων μπορεί να οδηγήσει γενικά σε σφάλματα της τάξης του 50%, στον υπολογισμό της τιμής του δυναμικού μέτρου διάτμησης {3}.

3. Συσχέτιση G_0 και N_{SPT}

Πολλές φορές τόσο στο παρελθόν {1} όσο και πρόσφατα {10} έχουν γίνει απόπειρες συσχέτισης της τιμής του μέτρου διάτμησης χαμηλού πλάτους, G_0 , και του αριθμού κτύπων, N_{SPT} , της πρότυπης δοκιμής διεύθυνσης (SPT). Θα μπορούσε, μάλιστα, να υποστηριχθεί κανείς ότι τέτοιες προσπάθειες ξεκινούν από σωστή βάση αφού η δοκιμή SPT είναι μια δυναμική δοκιμή και συσχετίζεται με μια δυναμική ιδιότητα του εδάφους. Αρκετα δημοφιλής φαίνεται να είναι η σχέση:

$$G_0 (\text{t/m}^2) = 1200 N_{SPT}^{0.3} \quad (7)$$

που έχει προκύψει από συσχέτιση μεγάλου αριθμού δεδομένων ιαπωνικών εδαφών {14}.

Θα πρέπει να επισημανθεί κατ'αρχήν το γεγονός ότι τέτοιου είδους εμπειρικές συσχετίσεις θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με επιφύλαξη {1}. Η καθιέρωση όμως κάποιας αντιστοιχίας $G_0 - N_{SPT}$ για συγκεκριμένη τοποθεσία με την εκτέλεση μικρού σχετικά αριθμού επί-τόπου δυναμικών δοκιμών μπορεί να αποβεί πολύ χρήσιμη γιατί επιτρέπει την απόκτηση τιμών του G_0 για όλα τα σημεία της τοποθεσίας που χρειάζεται να ληφθούν υπόψη στις εδαφοδυναμικές αναλύσεις.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Η γνώση των τιμών των δυναμικών ιδιοτήτων του εδάφους είναι απαραίτητη για την ορθή αντιμετώπιση των εδαφοδυναμικών προβλημάτων που αναφέρονται στη διάδοση των σεισμικών κυμάτων στο έδαφος, στη σεισμική απόκριση εδαφικών σχηματισμών, στη ρευστοποίηση των εδαφών και στη δυναμική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής.
2. Είναι διαθέσιμες σήμερα επί-τόπου μέθοδοι για τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων και διαμήκων σεισμικών κυμάτων και των χαρακτηριστικών απόσβεσης εδαφικών σχηματισμών, για μικρές τιμές των κυκλικών παραμορφώσεων.
3. Με κατάλληλες εργαστηριακές δοκιμές είναι δυνατός ο προσδιορισμός της σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων και των χαρακτηριστικών ρευστοποίησης εδαφικών δοκιμών κάτω από συνθήκες φόρτισης παρόμοιες με εκείνες που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια του σεισμού.
4. Πρόσφατες εξελίξεις επιτρέπουν την πρόβλεψη του κινδύνου ρευστοποίησης αμμοδών εδαφών με βάση την ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων που προσδιορίζεται με επί-τόπου δοκιμές.
5. Οι έμμεσες μέθοδοι προσδιορισμού των δυναμικών ιδιοτήτων του εδάφους πρέπει να αντιμετωπίζονται με επιφύλαξη. Μπορούν όμως να αποβούν χρήσιμες μετά από τεκμηριωμένα αξιολόγησή της αξιοπιστίας τους για συγκεκριμένη περιοχή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αθανασόπουλος, Γ.Α. (1984), "Δυναμικές Ιδιότητες του Εδάφους: Μέθοδοι και Προβλήματα Προσδιορισμού", Πρακτικά Συνεδρίου Σεισμοί και Κατασκευές, ΣΠΜΕ, Φεβρ. 1984, Τόμος Β', σελ. 846-862.
2. Αθανασόπουλος, Γ.Α. (1984), "Μαθήματα Δυναμικής του Εδάφους", Πανεπιστήμιο Πατρών.
3. Athanasopoulos, G.A. and Richart, F.E., Jr, (1983), "Correlation Between G_0 and τ_{max} for a Kaolinite Clay", J. of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 109, No 5, May 1983, pp. 719-723.
4. Banerjee, P.K. and Butterfield R., Ed. (1985), "Developments in Soil Mechanics and Foundation Engineering - 2: Stress-Strain Modelling of Soils", Elsevier Applied Science Publishers, Ltd, 281 p.
5. Borm, G.W. (1977), "Methods From Exploration Seismology: Reflection, Refraction and Borehole Prospecting, Proc., Dynamical Methods in Soil and Rock Mechanics, Karlsruhe, Sept. 1977, Vol.3, pp. 87-114.
6. Desai, C.S. and Siriwardane, H., J. (1984), "Constitutive Laws for Engineering Materials", with Emphasis on Geologic Materials, Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, NJ, 468 p.
7. Dobry, R., Stokoe, K.H. II, Ladd, R.S. and Youd, T.L. (1981), "Liquefaction Susceptibility from S-wave Velocity", Proc., In-situ Testing to Evaluate Liquefaction Susceptibility Session No. 24, ASCE National Convention, St. Louis, Missouri, Oct. 1981.
8. Drnevich, V.P. (1985), Προσωπική Επικοινωνία.
9. Hoar, R.J. and Stokoe, K.H. II, (1984), "Field and Laboratory Measurements of Material Damping of Soil in Shear", Proc., 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. III, pp. 47-54.

10. Maugeri, M. and Carrubba, P. (1985), "Microzoning Using SPT Data", Proc., XI ICSMFE, San Francisco, 12-16 Aug. 1985, Vol. 4, pp. 1831-1836.
11. National Research Council (1985), "Liquefaction of Soils During Earthquakes", Committee on Earthquake Engineering, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., 240 p.
12. Nazarian, S. and Stokoe, K.H.II; (1984), "In-Situ Shear Wave Velocities from Spectral Analysis of Surface Waves", Proc., 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. III, San Francisco, pp. 31-38.
13. Ντάντος, Α.Θ. (1984), "Δυναμικά Χαρακτηριστικά του Αθηναϊκού Υπεδάφους", Πρακτικά Συνεδρίου "Σεισμοί και Κατασκευές", ΣΠΜΕ, Φεβρ. 1984, Τόμος Β, σελ. 945-974.
14. Ohsaki, Y. and Iwasaki, R. (1973), "On Dynamic Shear Moduli and Poisson's Ratios of Soil Deposits", *Soils and Foundations*, Vol. 13, No. 4, Dec. 1973, pp. 61-73.
15. Pande, G.N. and Zienkiewicz, O.C., Ed. (1982), "Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads", John Wiley & Sons, 627 p.
16. Richart, F.E., Jr. (1977), "Field and Laboratory Measurements of Dynamic Soil Properties", Proc., Dynamical Methods in Soil and Rock Mechanics, Karlsruhe, Sept. 1977, Vol.1, pp. 3-26.
17. Richart, F.E., Jr. (1975), "Some Effects of Dynamic Soil Properties on Soil-Structure Interaction", J. of Geotechnical Engineering Division, Proc. ASCE, Vol.101, No.6T12, Dec., pp. 1193-1240.
18. Rosenblueth, E. (1977), "Soil and Rock Mechanics in Earthquake Engineering", Proc., Dynamical Methods in Soil and Rock Mechanics, Karlsruhe, Sept. 1977, Vol.3, pp. 3-52.
19. Saada, A.S.(1985), "On Cyclic Testing With Thin Long Hollow Cylinders", Proc., Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions, ASCE Convention, Detroit Mi, Oct. 24, 1985, pp. 1-28.
20. Scott, R.F.(1985), "Plasticity and Constitutive Relations in Soil Mechanics", J. of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.111, No.5, May 1985, pp. 563-605.
21. Seed, B.H., Idriss, I.M. and Arango, I.(1983), "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data", J. of Geotechnical Engineering Division of ASCE, Vol.109, No.3, March, pp. 458-482.
22. Shen, C.K., Li, X.S. and Gu, Y.Z.(1985), "Microcomputer Based Free Torsional Vibration Test", J. of Geotechnical Engineering, Vol.111, No.8, August, pp. 971-986.
23. Stokoe, H.K., II and Nazarian, S.,(1985), "Use of Rayleigh Waves in Liquefaction Studies", Proc., Measurement and Use of Shear Wave Velocity, Ed. by R.D. Woods, ASCE Convention, Denver Co., May 1985, pp. 1-17.
24. Sugimura, Y. and Ohkawa, I.,(1984), "Seismic Microzonation of Tokyo Area", Proc., 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, San Francisco, June 1984, pp. 721-728.
25. Σωτηρόπουλος Η.,(1984), "Ρευστοποίηση Εδαφών: Γεωτεχνική Πρόκληση ή Άμεσος Κίνδυνος;" Πρακτικά Συνεδρίου "Σεισμοί και Κατασκευές", ΣΠΜΕ, Φεβρ. 1984, Τόμος Β, σελ. 821-833.
26. Troncoso, J.H.(1982), "Wave Propagation Effects Induced by Standard Penetration Tests", Proc., 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, 24-27, May 1982, pp. 165-168.

27. Woods, R.D.(1983), "Measurements and Applications of Shear Wave Velocity in Soil-Structure Interaction", Proc., Intern. Workshop on Soil-Structure Interaction, Univ. of Roorkee India, Dec., Vol. II, pp. 67-80.
28. Woods, R.D. and Stokoe, K.H.,II,(1985), "Shallow Seismic Exploration in Soil Dynamics", Proc., Richart Commemorative Lectures, ASCE Convention, Oct. 23, 1985 Detroit, Ed. by R.D. Woods, pp. 120-156.