

Η ΜΕΘΟΔΟΣ CROSS-HOLE ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ  
ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Γεώργιος Α. Αθανασόπουλος, Ph.D.

Αν. Καθηγητής Τμ. Πολιτικών Μηχανικών Παν. Πατρών

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Κατά την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας συγκεκριμένων θέσεων ή ευρύτερων περιοχών της επιφάνειας του εδάφους σημαντικό στοιχείο αποτελεί η γνώση της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων στο έδαφος. Μία από τις πλέον αξιόπιστες γεωφυσικές μεθόδους για τον επί-τόπου προσδιορισμό αυτής της ταχύτητας, ως συνάρτησης του βάθους, είναι η σεισμική μέθοδος Cross-Hole που επιτρέπει τον άμεσο προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης τεχνικά παραγόμενων σεισμικών κυμάτων κατά την οριζόντια διαδρομή τους μεταξύ παρακείμενων κατοκάρφων γεωτρήσεων. Η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί προσοχή κατά την προετοιμασία των γεωτρήσεων, την εκλογή της σεισμικής πηγής, την εκλογή του κατάλληλου συστήματος λήψης και καταγραφής των σεισμικών κυμάτων και τη μέθοδο υπολογισμού των χρόνων διαδρομής. Η μέθοδος Cross-Hole έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία σε αρκετές περιοχές της Ελλάδος με χρήση μιας ή δύο γεωτρήσεων λήψης, σε αποστάσεις  $4\text{m} \pm 6\text{m}$  από τη γεώτρηση εκπομπής και μέχρι βάθος 50m από την επιφάνεια του εδάφους. Για την παραγωγή κατοκάρφων πολυμένων εγκάρσιων κυμάτων χρησιμοποιείται η διεύθυνση του δειγματολήπτη της Πρότυπης Δοκιμής Διείσδυσης (SPT) και η καταγραφή των σημάτων άφιξης των κυμάτων γίνεται με χρήση κατοκάρφου γεωφώνου και ομοιογενούς ενίσχυσης σήματος. Έχει διαπιστωθεί ότι η ποιότητα των σημάτων άφιξης εξαρτάται από το είδος του εδάφους και είναι πολύ καλή για το συνεκτικό έδαφος ενώ είναι μέτριο έως κακή για αμμοχλοκίδη έδαφη.

**ABSTRACT:** In seismic risk evaluations of specific sites or broad areas of ground surface the knowledge of shear wave velocity of soil formations is of paramount importance. The Cross-Hole method is considered as the most reliable in-situ seismic method for evaluation of shear wave velocity of soils as a function of depth. In this method the wave velocity is evaluated directly by measuring the travel time of artificially generated seismic waves propagating horizontally between adjacent vertical boreholes. The elements of the method which require particular attention are borehole preparation, seismic source and receiver selection and method of estimation of travel time. The Cross-Hole method has been used in several sites in Greece by utilizing the penetration of split spoon sampler of Standard Penetration Test (SPT) for generation of vertically polarized shear waves. One or two receiving boreholes, reaching depths of up to 50m, have been used spaced at horizontal distances of 4 m to 6 m from the emitting borehole. The shear wave arrivals are monitored and recorded by vertical geophones and signal enhancement seismographs. It has been found that the quality of wave arrival signals depends on soil type, being very good for cohesive soils and poor for sand-gravel mixtures.

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας συγκεκριμένης θέσης της επιφάνειας του εδάφους και ο αντισεισμικός σχεδιασμός των έργων του Πολιτικού Μηχανικού απαιτούν αναλύσεις για την επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην κίνηση της επιφάνειας του εδάφους, για τη δυνατότητα ρευστοποίησης χαλαρών επιφανειακών σχηματισμών και για τη δυναμική αλληλεπίδραση κατα-

σκευής-εδάφους [1,5,13]. Η διεξαγωγή των πιο πάνω αναλύσεων απαιτεί τη γνώση των δυναμικών ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών σαν συνάρτηση του βάθους από την επιφάνεια του εδάφους στη θέση κατασκευής του έργου. Οι δυναμικές ιδιότητες που χρησιμοποιούνται συνήθως σε τέτοιου είδους αναλύσεις είναι το δυναμικό μέτρο διάτμησης,  $G$ , ο λόγος απόσβεσης,  $D$ , και η κυκλική αντοχή των εδαφικών υλικών [2,5,20]. Στην περίπτωση που η φέρτιση προκαλεί μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις στο εδαφικό υλικό είναι επίσης απαραίτητη η απόκτηση πληροφοριών για την εξάρτηση του  $G$  και  $D$  από την τιμή της ανηγμένης διατμητικής παραμόρφωσης,  $\gamma$  [5,13,20].

Το δυναμικό μέτρο διάτμησης,  $G$ , αποτελεί τη σημαντικότερη δυναμική ιδιότητα του εδάφους και η γνώση των τιμών του είναι απαραίτητη για κάθε είδος δυναμικής ανάλυσης. Η τιμή του  $G$  μπορεί να υπολογιστεί όταν είναι γνωστή η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων,  $V_s$ , από την Εξ. 1 [2,5,15]:

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

όπου:  $\rho$  = πυκνότητα του εδαφικού υλικού. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της Εξ.1 είναι αξιόπιστα τόσο για ξηρά όσο και για κορεσμένα εδάφη γιατί είναι γνωστό ότι η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων στο έδαφος δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη του νερού των πόρων [5,15]. Θεωρητικά η τιμή του μέτρου διάτμησης μπορεί να υπολογιστεί όταν είναι γνωστή η τιμή του μέτρου ελαστικότητας,  $E$ , και του δείκτη Poisson,  $\nu$ , από την Εξ.2:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

ενώ η τιμή του  $E$  μπορεί να υπολογιστεί όταν είναι γνωστή η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων,  $V_p$ , και ο δείκτης Poisson από την Εξ.3 [2]:

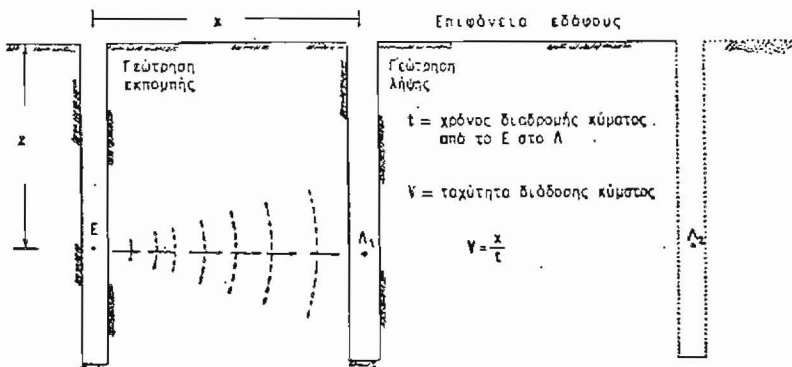
$$E = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{(1-\nu)} \cdot \rho \cdot V_p^2 \quad (3)$$

Είναι όμως γνωστό ότι η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων στο έδαφος επηρεάζεται τόσο έντονα από την ύπαρξη του νερού των πόρων, ώστε στην περίπτωση των κορεσμένων εδαφών να αντανakλά τις ιδιότητες του νερού μάλλον παρά του εδαφικού σκελετού [5,15]. Για το λόγο αυτό προτιμώνται πάντοτε σεισμικές μέθοδοι που χρησιμοποιούν εγκάρσια κύματα, όταν πρόκειται για την επίλυση προβλημάτων της Δυναμικής του Εδάφους. Η διαπίστωση αυτή άλλωστε οδήγησε στην κατάλληλη τροποποίηση ορισμένων κλασικών μεθόδων σεισμικής διασκόπησης που θεωρούντο, και συνεχίζουν να θεωρούνται, ως απόλυτα ικανοποιητικές για τις ανάγκες της στατικής Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων [20]. Μία από τις πλέον αξιόπιστες σεισμικές μεθόδους για τον επί-τόπου προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων (αλλά και διαμήκων) κυμάτων στο έδαφος είναι η μέθοδος Cross-Hole που περιγράφεται στα επόμενα.

Η μέθοδος Cross-Hole είναι μια σεισμική μέθοδος που εμφανίστηκε στην αρχή της δεκαετίας του 1950 για την άμεση μέτρηση της ταχύτητας των σεισμικών κυμάτων μεταξύ σημείων μικρού βάθους από την επιφάνεια του εδάφους [19]. Η μέθοδος αναπτύχθηκε παραπέρα και προσαρμόστηκε στις ανάγκες για τον προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων του εδάφους κατά τη δεκαετία του 1970 [9, 15, 16, 11, 10, 14, 17, 20]. Ο βαθμός ανάπτυξης της μεθόδου έχει ήδη επιτρέψει την επίσημη προτυποποίησή της από την Αμερικανική Ένωση Δοκιμών και Υλικών (ASTM) με κωδικό αριθμό ASTM D4428/D4428M-84 [6]. Η μέθοδος απαιτεί τη διάνοιξη δύο τουλάχιστον κατακόρυφων γεωτρήσεων, Σχ.1, σε απόσταση μερικών μέτρων η μία από την άλλη. Μέσα στη μία από τις γεωτρήσεις, που ονομάζεται γεώτρηση εκπομπής, και στο επιθυμητό βάθος,  $z$ , προκαλείται διαταραχή με κατάλληλη σεισμική πηγή που δημιουργεί σεισμικά κύματα τα οποία διαδίδονται προς όλες τις διευθύνσεις. Στη δεύτερη γεώτρηση που ονομάζεται γεώτρηση λήψης, και στο ίδιο βάθος,  $z$ , ανιχνεύεται η άφιξη των σεισμικών κυμάτων με κατάλληλο σύστημα που επιτρέπει και 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 την Εξ. 4:

$$v = \frac{x}{t} \quad (4)$$

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιούνται κυρίως εγκάρσια κύματα, μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν και διαμήκη κύματα για μετρήσεις πάνω από το φρεάτιο ορίζοντα. Η μέθοδος έχει εφαρμοσθεί αρκετές φορές από το συγγραφέα σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας [3, 4, 7, 8]. Τα τέσσερα κύρια στοιχεία της μεθόδου είναι: οι γεωτρήσεις, η σεισμική πηγή, το σύστημα λήψης και καταγραφής και ο υπολογισμός των χρόνων διαδρομής: Τα στοιχεία αυτά αναπτύσσονται λεπτομερέστερα στα επόμενα.



Σχ.1 Αρχή της Μεθόδου Cross-Hole με Χρήση Μιας ή Δύο Γεωτρήσεων Λήψης

## 1. Γεωτρήσεις

Κατά τη διάνοιξη των γεωτρήσεων καταβάλλεται ιδιαίτερη προσπάθεια για την επίτευξη κατακορυφότητας. Για βάθη μεγαλύτερα των 12 m ± 15 m συνιστάται ο έλεγχος κατακορυφότητας με κατάλληλο όργανο (κλισιόμετρο) [6,20,21]. Επίσης, εφόσον οι συνθήκες του χώρου και ο προϋπολογισμός του έργου το επιτρέπουν, συνιστάται η χρήση και δεύτερης γεώτρησης λήψης στην προέκταση της ευθείας που ορίζουν η γεώτρηση εκπομπής και η πρώτη γεώτρηση λήψης, όπως φαίνεται στο Σχ.1. Για λόγους που αναφέρονται στα επόμενα, ο υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων κατά τη διαδρομή τους μεταξύ 1ης και 2ης γεώτρησης λήψης είναι πιο αξιόπιστος σε σχέση με τη διαδρομή μεταξύ γεώτρησης εκπομπής και γεώτρησης λήψης [5,6,20].

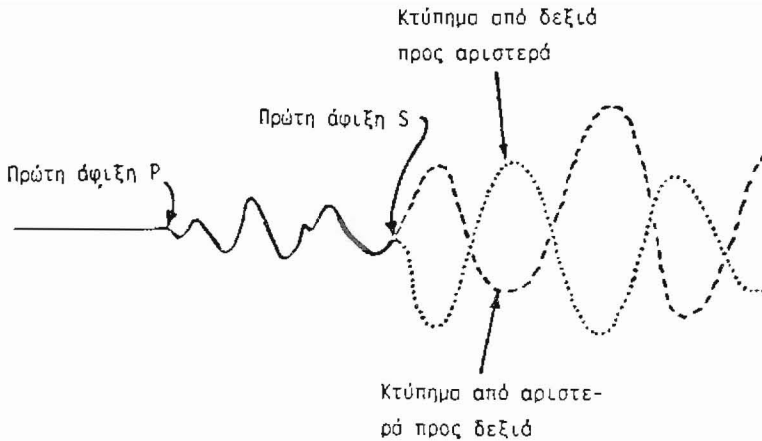
Η οριζόντια απόσταση των γεωτρήσεων εκπομπής και λήψης καθώς και η απόσταση μεταξύ των δύο γεωτρήσεων λήψης δεν πρέπει να είναι πολύ μικρή γιατί στην περίπτωση αυτή δεν θα επαρκεί η ακρίβεια του συστήματος χρονομέτρησης. Δεν πρέπει όμως να είναι και πολύ μεγάλη γιατί στην περίπτωση αυτή είναι δυνατό να προηγηθεί της άμεσης άφιξης, η άφιξη κυμάτων λόγω διάθλασης σε πιθανή διαχωριστική επιφάνεια στο εσωτερικό του εδάφους. Επίσης, η μεγάλη απόσταση δημιουργεί σημαντική εξασθένηση του πλάτους των σεισμικών κυμάτων και δυσχεραίνει την ακριβή αναγνώριση της άφιξης [5]. Ο συγγραφέας έχει διαπιστώσει ότι όταν χρησιμοποιούνται μηχανικές πηγές σεισμικών κυμάτων, αποστάσεις γεωτρήσεων από 3 m έως 6 m πληρούν τις πιο πάνω απαιτήσεις για ποικιλία εδαφικών συνθηκών.

Εκτός από ελάχιστες εξαιρέσεις οι γεωτρήσεις απαιτούν σωλήνωση. Συνιστάται η αποφυγή μεταλλικών σωλήνων και η χρήση πλαστικών σωλήνων PVC εσωτερικής διαμέτρου 75 mm ή 100 mm. Συνιστάται επίσης η προσεκτική πλήρωση (από τον πυθμένα προς την επιφάνεια) του δακτυλιοειδούς διακένου μεταξύ των τοιχωμάτων της γεώτρησης και της εξωτερικής επιφάνειας του πλαστικού σωλήνα με υδαρές μίγμα τσιμέντου-μπεντονίτη-νερού με αναλογίες 1:1:6.3 [6].

## 2. Σεισμική Πηγή

Η σεισμική πηγή πρέπει να ικανοποιεί, κατά το δυνατό, τις εξής απαιτήσεις: 1) παραγωγή μόνο των κατά περίπτωση επιθυμητών (διαμήκων ή εγκάρσιων) σεισμικών κυμάτων, 2) επαναληψιμότητα τόσο ως προς το επίπεδο της παραγόμενης ενέργειας όσο και ως προς τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου κύματος, 3) δυνατότητα αντιστροφής της φοράς της διέγερσης [5,6,17,20,21]. Η τελευταία απαίτηση αποσκοπεί στην εκμετάλλευση του γινώστου φαινομένου της αντιστροφής της πολικότητας των εγκάρσιων κυμάτων (όχι όμως και των διαμήκων) όταν αντιστρέφεται η φορά της διέγερσης, Σχ.2, και διευκολύνει σημαντικά την ακριβή αναγνώριση της άφιξης των εγκάρσιων κυμάτων.

Είναι σήμερα διαθέσιμη στο εμπόριο σφύρα εγκάρσιων κυμάτων αντιστρεφόμενης φοράς κρούσης που αγκυρώνεται στο επιθυμητό βάθος, στο εσωτερικό της γεώτρησης εκπομπής (Bison Model 1465) [2,5]. Έχουν αναπτυχθεί επίσης και πυθμενικές πηγές παραγω-

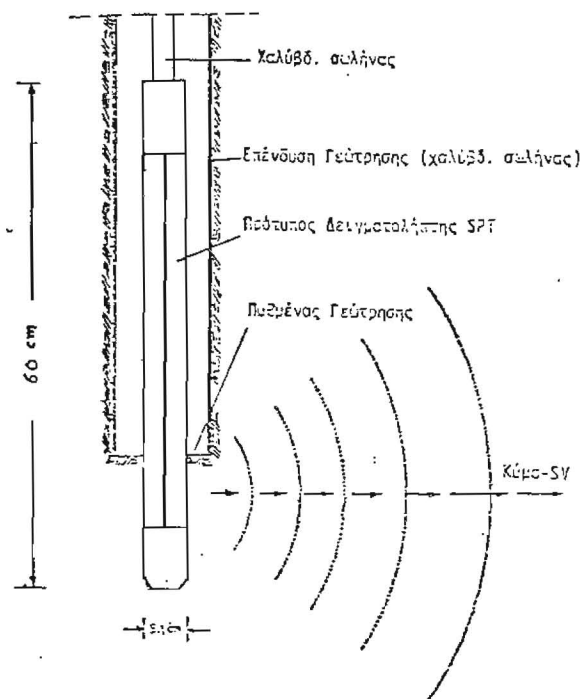


Σχ.2 Ακριβής Αναγνώριση της Άφιξης των Εγκάρσιων Κυμάτων με Αναστροφή της Φοράς της Διέγερσης

γής κατακόρυφα και οριζόντια πολωμένων εγκάρσιων κυμάτων (SV ή SH) για τις οποίες απαιτείται η πάκτωσή τους στον πυθμένα της γεώτρησης εκπομπής [20]. Στην κατηγορία αυτή κατατάσσεται και η χρήση της διεϊσδύσης του δειγματολήπτη της Πρότυπης Δοκιμής Διεϊσδύσης (SPT) για την παραγωγή κατακόρυφα πολωμένων εγκάρσιων κυμάτων (SV) όπως φαίνεται στο Σχ.3, [5,8, 18]. Η τεχνική αυτή έχει χρησιμοποιηθεί από το συγγραφέα σε όλες τις εφαρμογές της μεθόδου στον Ελληνικό χώρο, κατά τα τελευταία χρόνια, μέχρι βάθη 50 m περίπου με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όταν χρησιμοποιούνται πυθμενικές διατάξεις σεισμικών πηγών η διεξαγωγή των μετρήσεων γίνεται αναγκαστικά κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της γεώτρησης εκπομπής ανά προκαθορισμένα διαστήματα βάθους. Σημειώνεται επίσης ότι στη βιβλιογραφία [14] έχει αναφερθεί η ανάπτυξη σφύρας εγκάρσιων κυμάτων που αγκυρώνεται στο εσωτερικό της γεώτρησης και επιτρέπει την ανάπτυξη διατημητικών παραμορφώσεων  $\gamma \approx 10^{-3}$  στο εδαφικό υλικό (1000 περίπου φορές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες παραμορφώσεις που προκαλούν οι συνηθισμένες μηχανικές διατάξεις). Οι παραμορφώσεις αυτές είναι της τάξης μεγέθους που αντιστοιχεί σε ισχυρές σεισμικές κινήσεις.

### 3. Σύστημα Λήψης και Καταγραφής

Για την ανίχνευση της άφιξης των σεισμικών κυμάτων στη γεώτρηση λήψης χρησιμοποιούνται κυρίως γεωφώνω (δέκτες ευαίσθητοι στην ταχύτητα της ταλάντωσης) μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν και επιταχυνσιόμετρα (δέκτες ευαίσθητοι στην επιτάχυνση της ταλάντωσης [5,20]). Όταν οι εφαρμογές περιλαμβάνουν κύματα-SV μπορούν να χρησιμοποιηθούν μονοαξονικά κατακόρυφα γεωφώνω. Στην περίπτωση όμως απαιτείται αξιόπιστη καταγραφή των οριζόντιων συνιστωσών της ταλάντωσης (κύματα-P, κύματα-SH) επιβάλλεται η χρήση τριαξονικών γεωφώνων. Η ιδιοσυχνότητα των γεωφώνων αυτών κυμαίνεται μεταξύ 5 Hz και

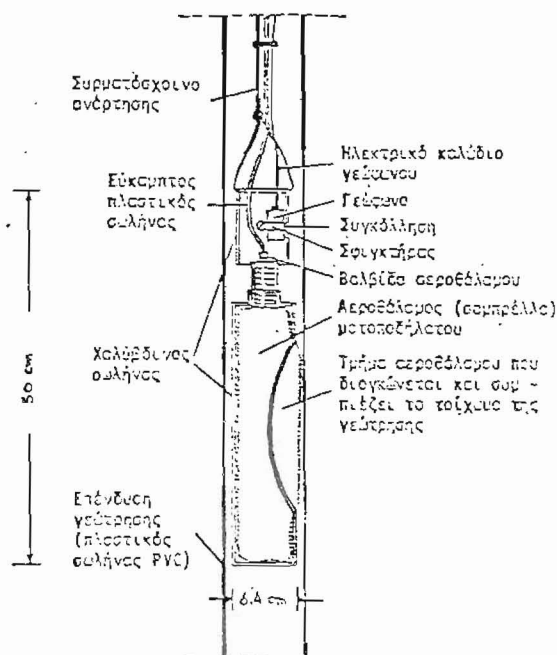


Σχ.3 Δημιουργία Εγκάρσιων Κυμάτων SV Κατά την Προώθηση του Δειγματολήπτη της Πρότυπης Δοκιμής Διείσδυσης (SPT) στον Πυθμένα Γεώτρησης

15 Hz και είναι, τουλάχιστον κατά μία τάξη μεγέθους, μικρότερη από τη συχνότητα των κυμάτων που διαδίδονται στο έδαφος κατά την εφαρμογή της μεθόδου Cross-Hole.

Σημαντικό ρόλο στην ποιότητα των σημάτων άφιξης παίζει ο τρόπος πάκτωσης του γεωφώνου στα τοιχώματα των γεωτρήσεων λήψης. Χρησιμοποιούνται συνήθως συστήματα που περιλαμβάνουν ελασματοειδές ελατήριο καθώς και συστήματα με αεροθάλαμο που δι-ογκούται με διοχέτευση πεπιεσμένου αέρα ή νερού και πίεζα τα τοιχώματα της γεώτρησης [20,21]. Ένα τέτοιο σύστημα λήψης (βολίδα) με εύσωματωμένο κατακόρυφο γεώφωνο ιδιοσυχνότητας 14 Hz, έχει σχεδιασθεί και κατασκευασθεί από το συγγραφέα, Σχ.4, και έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας.

Για την καταγραφή των σημάτων άφιξης εχρησιμοποιούνται παλαιότερα παλμογράφοι μνήμης των οποίων η οθόνη φωτογραφίζεται με ειδική φωτογραφική μηχανή Polaroid για την απόκτηση μονίμου αρχείου των κυματομορφών [20]. Τελευταία χρησιμοποιούνται σειμογράφοι ενίσχυσης σήματος οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα αλγεβρικής άθροισης των σημάτων που προκύπτουν από την επαναληπτική εφαρμογή της διέγερσης. Με τον τρόπο αυτό το σήμα άφιξης αφενός μεν ενισχύεται, αφετέρου δε, καθαρίζεται από ανεπιθύμητο θόρυβο. Κατά τις εφαρμογές της μεθόδου

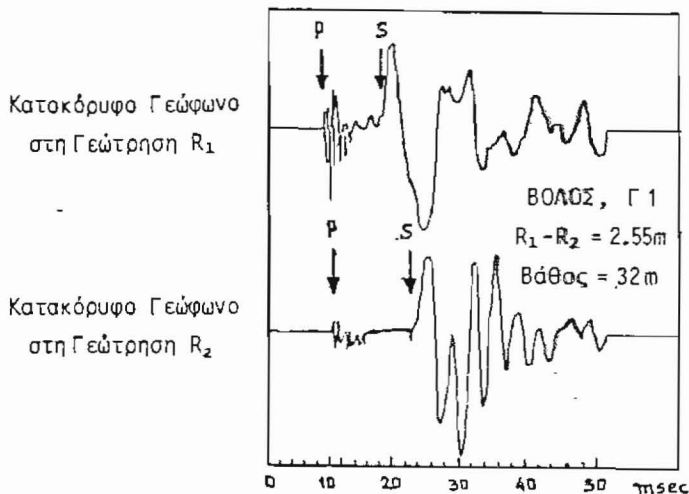


Σχ.4 Σύστημα Λήψης (Βολίδα) Εγκάρσιων Κυμάτων SV Μέσα σε Γεώτρηση Λήψης

στον Ελληνικό χώρο έχουν χρησιμοποιηθεί σεισμογράφοι ενίσχυσης σήματος διαφόρων εταιρειών που επιτρέπουν την επιλογή της χρονικής κλίμακας και τη μεγέθυνση του σήματος άφιξης. Με τον τρόπο αυτό έχουν αποκτηθεί σήματα άφιξης πολύ καλής ποιότητας στα οποία η άφιξη των εγκάρσιων κυμάτων μπορεί να αναγνωριστεί με βεβαιότητα. Σε πολλές μέγιστα περιπτώσεις είναι δυνατό να αναγνωριστεί και η άφιξη των διαμήκων κυμάτων (που δημιουργούνται και αυτά κατά τη διείδυση του δειγματολήπτη) όπως φαίνεται στο Σχ.5. Έχει διαπιστωθεί ότι η ποιότητα των σημάτων άφιξης εξαρτάται από το είδος του εδάφους (βλ. και [12]). Στο Σχ.6 φαίνονται σήματα άφιξης που αποκτήθηκαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου Cross-Hole στην καλαμάτα [3]. Το σχήμα υποδεικνύει ότι η ποιότητα των σημάτων σε συνεκτικά εδάφη είναι καλύτερη σε σχέση με τα αμμοχαλικώδη εδάφη.

#### 4. Χρονομέτρηση - Υπολογισμός Χρόνων Διαδρομής

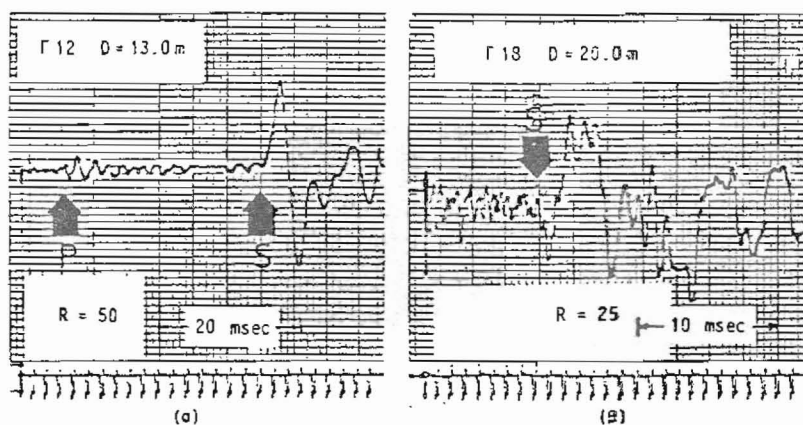
Τόσο οι παλμογράφοι όσο και οι σεισμογράφοι ενίσχυσης σήματος διαθέτουν ακριβέστατο σύστημα χρονομέτρησης και η καταγραφή των σημάτων άφιξης συνοδεύεται πάντοτε από την καταγραφή της χρονομέτρησης. Η εκκίνηση του χρονομετρικού συστήματος γίνεται ταυτόχρονα(;) με την αναχώρηση των σεισμικών κυμάτων από τη γεώτρηση εκπομπής με τη βοήθεια ειδικού διακόπτη εκκίνησης (trigger switch) που περιέχει επιταχυνόμετρο και προσαρμόζεται συνήθως σε κατάλληλο σημείο της σεισμικής πηγής. Είναι φανερό ότι ο χρόνος διαδρομής που υπολογίζεται



Σχ.5 Καταγραφή της Άφιξης Σεισμικών Κυμάτων σε Δύο Γεωτρήσεις Λήψης Κατά την Εφαρμογή της Μεθόδου Cross-Hole

μεταξύ της γεώτρησης εκπομπής και της γεώτρησης λήψης εξαρτάται από πιθανή "αδράνεια" του διακόπτη εκκίνησης, πράγμα που δεν συμβαίνει για τον αντίστοιχο χρόνο μεταξύ δύο γεωτρήσεων λήψης. Αυτό αποτελεί ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης δύο γεωτρήσεων λήψης, Σχ.5.

Ο υπολογισμός των χρόνων διαδρομής γίνεται συνήθως με άμεσο τρόπο. Ο τρόπος αυτός απαιτεί την ακριβή αναγνώριση της άφιξης των κυμάτων στη μία ή δύο γεωτρήσεις λήψης και την εκτίμηση του χρόνου με βάση την καταγραφή της χρονόμετρησης που συνοδεύει τα σήματα άφιξης. Τελευταία έχει αρχίσει να χρησι-



Σχ.6 Ποιότητα Σημάτων Άφιξης Κατά την Εφαρμογή της Μεθόδου Cross-Hole (α) Καλή Ποιότητα (Άργιλος- (β) Κακή Ποιότητα (Αμμοχάλικο)

μπορείται έμμεσος τρόπος υπολογισμού των χρόνων διαδρομής [21]. Για τον έμμεσο υπολογισμό απαιτούνται δύο γεωτρήσεις λήψης και η χρήση αναλυτή φάσματος. Με το όργανο αυτό πραγματοποιείται επί-τόπου επεξεργασία των δύο ψηφιακών καταγραφών των σημάτων άφιξης στις δύο γεωτρήσεις λήψης. Η επεξεργασία περιλαμβάνει την εξαγωγή της συνάρτησης συσχέτισης (cross correlation) των δύο χρονικών σημάτων της οποίας η μέγιστη τιμή αντιστοιχεί στο χρόνο διαδρομής μεταξύ των δύο γεωτρήσεων λήψης. Εναλλακτικά είναι επίσης δυνατή η εξαγωγή της συνάρτησης συσχέτισης των φασμάτων Fourier (Cross-Spectrum) των δύο σημάτων, από την οποία προκύπτει και πάλι ο χρόνος διαδρομής. Από πρόσφατες συγκρίσεις προκύπτει ότι οι δύο τρόποι υπολογισμού των χρόνων διαδρομής δεν διαφέρουν από πλευράς ακριβείας υπολογισμού [21]. Ο έμμεσος τρόπος επιταχύνει και αυτοματοποιεί τον υπολογισμό των ταχυτήτων διάδοσης, απαιτεί όμως εξοπλισμό υψηλού κόστους. Ας σημειωθεί ότι ο υπολογισμός των χρόνων διαδρομής σε όλες τις εφαρμογές της μεθόδου Cross-Hole στον Ελληνικό χώρο έχει γίνει με τον άμεσο τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω.

#### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος Cross-Hole αποτελεί μια επίσημα πλέον προτυποποιημένη μέθοδο για τον επί-τόπου προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων (και διαμήκων) κυμάτων σαν συνάρτηση του βάθους από την επιφάνεια του εδάφους. Έχει εφαρμοσθεί αρκετές φορές στον Ελληνικό χώρο σε ποικιλία ξηρών και κορεσμένων εδαφών, με χρήση της διείσδυσης του δειγματολήπτη της Πρότυπης Δοκιμής Διείσδυσης για την παραγωγή εγκάρσιων κυμάτων και σειсмоγράφου ενίσχυσης σήματος για την καταγραφή των σημάτων άφιξης. Η ποιότητα των σημάτων άφιξης είναι γενικά καλή, εξαρτάται όμως από το είδος του εδάφους. Όταν δοθεί προσοχή στην κατακορυφότητα των γεωτρήσεων και στην ακριβή αναγνώριση της άφιξης των κυμάτων, αξιόπιστα αποτελέσματα αποκτώνται με χρήση μιας μόνο γεώτρησης λήψης.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο συγγραφέας εκφράζει τις ευχαριστίες του προς τη ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΗ Ε.Π.Ε. για την υποστήριξη που του παρέσχε κατά την πρώτη εφαρμογή της μεθόδου Cross-Hole στον Ελληνικό χώρο το 1983, προς το Κέντρο Ερευνών Δημοσίων Έργων (ΚΕΔΕ) του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. για την παροχή εξοπλισμού και προσωπικού κατά την εφαρμογή της μεθόδου στην πόλη της Καλαμάτας και προς τον Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) για την οικονομική υποστήριξη ερευνητικών προγραμμάτων σχετικών με την εφαρμογή της μεθόδου. Ευχαριστίες εκφράζονται επίσης προς τον Επιστημονικό Συνεργάτη του Εργαστηρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, κ. Δημήτριο Χρυσικό για την πολύπλευρη συμβολή και συμμετοχή του στην εφαρμογή της μεθόδου Cross-Hole στον Ελληνικό χώρο. Τέλος, ευχαριστίες εκφράζονται και προς το μέλος ΕΔΤΠ του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, κ. Αγγελική Κουβαρά για την επιμελημένη δακτυλογράφηση του κειμένου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αθανασόπουλος, Γ.Α.(1984), "Δυναμικές Ιδιότητες του Εδάφους: Μέθοδοι και Προβλήματα Προσδιορισμού", Πρακτικά Συνεδρίου Σεισμοί και Κατασκευές, ΣΠΜΕ, Αθήνα, Φεβρ., Τόμος Β, σελ. 846-862.
2. Αθανασόπουλος, Γ.Α.(1986), "Εδαφοτεχνικές Συνθήκες-Εδαφοδυναμική, Μέρος ΙΙ: Δυναμικές Ιδιότητες Εδαφών", Πρακτικά 3ου Επιστημονικού Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Ειδική Επιστημονική Συνεδρία: Γεωλογικές Συνθήκες-Αντισεισμικές Κατασκευές, Αθήνα, Μάιος, 20 σελ.
3. Αθανασόπουλος, Γ.Α.(1987α), "Μικροζωνική Μελέτη Καλαμάτας: Εκτέλεση Ειδικών Δοκιμών" Τεχνική Έκθεση προς τον ΟΑΣΠ, Ιούνιος, 105 σελ.
4. Αθανασόπουλος, Γ.Α.(1987β), "Μικροζωνική Μελέτη Καλαμάτας: Εκτέλεση Πρόσθετων Ειδικών Δοκιμών σε Τάσσορα Σημεία", Τεχνική Έκθεση προς τον ΟΑΣΠ, Δεκέμβριος, 65 σελ.
5. Αθανασόπουλος, Γ.Α.(1988), "Μαθήματα Δυναμικής του Εδάφους", Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, 255 σελ.
6. Annual Book of ASTM Standards (1988), "Standard Test Methods for Cross-Hole Seismic Testing, Section 4, Vol. 04.08, pp. 655-664.
7. Athanasopoulos, G.A., Chryssikos, D.A. and Bousias, P.Z. (1988), "Cross-Hole Measurements for Microzoning Kalamata, Greece", Proc. International Seminar on Earthquake Prognostics, Ankara, Turkey, May 2-5, Vieweg Publishing House, Berlin, 11p.
8. Athanasopoulos, G.A., Chryssikos, D.A. and Bousias, P.Z.,(1988), "Utilization of Standard Penetration Test for Cross-Hole Measurements", Proceedings, International Symposium on Earthquake Countermeasures, May 10-13, Beijing, China.
9. Auld, B.(1977), "Cross-Hole and Down-Hole Vs by Mechanical Impulse", Journal of GED, Proc. ASCE, Vol. 103, No GT12, Dec. pp. 1381-1398.
10. Auld, B.,(1980), Closure on "Cross-Hole and Down-Hole Vs by Mechanical Impulse", Journal of GED, ASCE, Sept. 1980, pp. 1061-1062.
11. Ballard, R.F., Jr.,(1976), "Method for Cross-Hole Seismic Testing", Journal of GED, Proc. ASCE, Vol. 102, No GT12, Dec., pp. 1251-1273.
12. Bosscher, P.J. and Showers, D.R.,(1987), "Effect of Soil Type on Standard Penetration Test Input Energy", Journal of Geotechnical Engineering, Technical Note, ASCE, Vol.113, No. 4, April, pp. 385-389.
13. Gazetas, G.(1987), "Soil Dynamics. An Overview", Chapter 1, in Dynamic Behaviour of Foundations and Buried Structures, Eds P.K. Banerjee and R. Butterfield, Developments in Soil Mechanics and Foundation Engineering-3, Elsevier, pp. 1-43.
14. Miller, R.P., Troncoso, J.H. and Brown, F.R., Jr.,(1975), "In-Situ Impulse Test for Dynamic Shear Modulus of Soils", Proc., Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties, GED, ASCE, Specialty Conference, Raleigh, N.C., June 1-4, Vol.1, pp. 319-335.
15. Richart, F.E. Jr., Hall, J.R., Jr. and Woods, R.D.(1970), "Vibrations of Soils and Foundations", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 414 p.
16. Stokoe, K.H., II and Woods, R.D.,(1972), "In-Situ Shear Wave Velocity by Cross-Hole Method", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Proc. ASCE, Vol. 98, No SM5, May, pp. 443-460.
17. Stokoe, K.H., II and Koar, R.J.,(1978), "Variables Affecting In-Situ Seismic Measurements", Proc. ASCE, GED Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Pasadena, Ca., June, Vol. 3, pp. 919-939.
18. Troncoso, J.H.,(1982), "Wave Propagation Effects by Standard Penetration Tests", Proc. of 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, 24-27, May, pp.165-168.
19. White, J.E. and Sengbush, R.L., (1953), "Velocity Measurements in Near-Surface Formations", Geophysics, Vol. 18, No 1, Jan., pp. 54-61.
20. Woods, R.D.,(1978), "Measurement of Dynamic Soil Properties", Proc. ASCE, GED Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Pasadena, Cal., June, Vol. 1, 91-178.
21. 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, pp. 120-156.