

Τομέας Κατασκευών  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών  
Πανεπιστημίου Πατρών

ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ  
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

**Ανελαστική Δυναμική Αλληλεπίδραση  
Εδάφους-Κατασκευής**

ΥΠΟ  
Δημητρίου Ε. Μπέσκου  
Καθηγητού & Επιστημονικού Υπευθύνου  
&  
Δημητρίου Μ. Κωτσοβού  
Φοιτητού/Ερευνητού

Πάτρα 1999

# Περιεχόμενα

## Περίληψη

### Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

### Κεφάλαιο 2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

- 2.1 Εισαγωγή
- 2.2 Πεπερασμένα στοιχεία
- 2.3 Σχέση παραμόρφωσης και επικόμβιων μετατοπίσεων
- 2.4 Σχέση τάση-παραμόρφωσης
- 2.5 Μητρώο δυσκαμψίας στοιχείου

### Κεφάλαιο 3 Καταστατική προσομοίωση υλικών

- 3.1 Γενικές έννοιες
- 3.2 Κριτήριο/επιφάνεια διαρροής και νόμος κράτυνσης
- 3.3 Ελαστική συνιστώσα παραμόρφωσης
- 3.4 Νόμος ροής
- 3.5 Συνθήκη συμβιβαστότητας
- 3.6 Γενική διατύπωση συμπεριφοράς υλικών

### Κεφάλαιο 4 Μέθοδοι χρονικής βηματικής ολοκλήρωσης

- 4.1 Εισαγωγή
- 4.2 Ρητή μέθοδος (explicit method)
- 4.3 Έμμεση μέθοδος (implicit method)

### Κεφάλαιο 5 Πρόβλημα τεχνητών συνόρων συστήματος εδάφους-κατασκευής

- 5.1 Πρόβλημα ανακλώμενων κυμάτων σε τεχνητά σύνορα
- 5.2 Διαδικασία επίλυσης

- 5.3 Διερεύνηση της αποτελεσματικότητας ιξωδοελαστικών απορροφητικών συνόρων

## Κεφάλαιο 6 Σύστημα εδάφους-κατασκευής υπό σεισμική δράση - Διαμόρφωση προβλήματος

- 6.1 Εισαγωγή
- 6.2 Προσδιορισμός εντατικών μεγεθών πλαισίου
- 6.2.1 Φορέας και λογισμικό ανάλυσης
- 6.2.2 Εισαγωγή δεδομένων
- 6.2.3 Αποτελέσματα ανάλυσης
- 6.3 Προσδιορισμός ισοδύναμου τοιχώματος
- 6.4 Σύγκριση αποκρίσεων πλαισίου και τοιχώματος
- 6.5 Χαρακτηριστικά εδάφους
- 6.6 Σεισμική φόρτιση
- 6.7 Διακριτοποίηση συστήματος εδάφους-κατασκευής

## Κεφάλαιο 7 Ανάλυση συστήματος εδάφους-κατασκευής για την περίπτωση αμμώδους εδάφους

- 7.1 Γενικά, αρχεία δεδομένων
- 7.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων ελαστικής ανάλυσης
- 7.2.1 Περίπτωση Α (δυνατότητα μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση)
- 7.2.1.1 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,1g
- 7.2.1.2 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,35g
- 7.2.1.3 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,6g
- 7.2.2 Περίπτωση Β (δυνατότητα μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος μόνο κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση)
- 7.2.2.1 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,1g
- 7.2.2.2 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,35g
- 7.2.2.3 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,6g
- 7.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων ανελαστικής ανάλυσης
- 7.3.1 Περίπτωση Α (δυνατότητα μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση)

- 7.3.1.1 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,1g
- 7.3.1.2 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,35g
- 7.3.1.3 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,6g
- 7.3.2 Περίπτωση Β (δυνατότητα μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος μόνο κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση)
  - 7.3.2.1 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,1g
  - 7.3.2.2 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,35g
  - 7.3.2.3 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,6g

## **Κεφάλαιο 8** Ανάλυση συστήματος εδάφους-κατασκευής για την περίπτωση αργιλικού εδάφους

- 8.1 Γενικά, αρχεία δεδομένων
- 8.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων ελαστικής ανάλυσης
  - 8.2.1 Περίπτωση Α (δυνατότητα μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση)
    - 8.2.1.1 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,1g
    - 8.2.1.2 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,35g
    - 8.2.1.3 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,6g
  - 8.2.2 Περίπτωση Β (δυνατότητα μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος μόνο κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση)
    - 8.2.2.1 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,1g
    - 8.2.2.2 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,35g
    - 8.2.2.3 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,6g
- 8.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων ανελαστικής ανάλυσης
  - 8.3.1 Περίπτωση Α (δυνατότητα μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση)
    - 8.3.1.1 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,1g
    - 8.3.1.2 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,35g
    - 8.3.1.3 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,6g
  - 8.3.2 Περίπτωση Β (δυνατότητα μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος μόνο κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση)

8.3.2.1 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,1g

8.3.2.2 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,35g

8.3.2.3 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,6g

## **Κεφάλαιο 9** Υπολογισμός διορθωτικού συντελεστή αλληλεπίδρασης

9.1 Μέθοδος υπολογισμού συντελεστή

9.2 Αριθμητικό παράδειγμα

## **Κεφάλαιο 10** Συμπεράσματα

## **Βιβλιογραφία**

## **Παράρτημα**

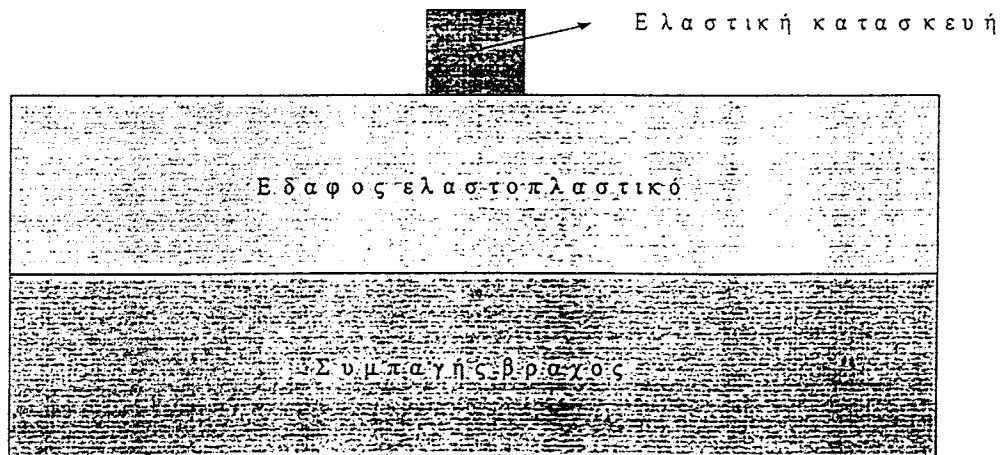
## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση της ανελαστικότητας του εδάφους στη σεισμική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης και ελαστικής συμπεριφοράς της κατασκευής. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στο πεδίο του χρόνου τόσο για την κατασκευή όσο και για τον εδαφικό χώρο. Υποθέτουμε ότι η κατασκευή συμπεριφέρεται γραμμικά ελαστικά ενώ το έδαφος ελαστοπλαστικά υπακούοντας στο καταστατικό νόμο των Drucker-Prager για εδαφικά υλικά που χαρακτηρίζονται από συνεκτικότητα και τριβή. Χρησιμοποιούνται δύο προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή τα οποία βασίζονται το πρώτο σε ρητό και το δεύτερο σε έμμεσο αλγόριθμο χρονικής ολοκλήρωσης. Τα προγράμματα αυτά αποτελούν τροποποιημένες και βελτιωμένες μορφές των αντίστοιχων προγραμμάτων των Owen & Hinton προσαρμοσμένες στο υπόψη πρόβλημα δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής. Εκτελούνται εκτενείς παραμετρικές μελέτες για διάφορες ποιότητες εδαφών και σεισμικές εντάσεις του επιταχυνσιογραφήματος El Centro και προσδιορίζονται οι αντίστοιχες σεισμικές διατμητικές δυνάμεις βάσης της κατασκευής. Έτσι εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της ανελαστικότητας του εδάφους στη σεισμική αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, η οποία συνίσταται σε μείωση της σεισμικής διατμητικής δύναμης βάσης της κατασκευής μεγαλύτερη από αυτή που συμβαίνει στη περίπτωση ελαστικού εδάφους. Από τα ανωτέρω αποτελέσματα και συμπεράσματα προσδιορίζονται οι τιμές ενός διορθωτικού συντελεστή με την βοήθεια του οποίου είναι δυνατή η χρήση των διατάξεων του Αμερικανικού Κανονισμού ATC-3 ελαστικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής και σε προβλήματα για τα οποία η συμπεριφορά του εδάφους είναι ανελαστική.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται αριθμητικά η επίδραση της ανελαστικότητας του εδάφους στην αλληλεπίδραση ενός συστήματος εδάφους-κατασκευής κατά τη διάρκεια σεισμικής δράσης. Το σύστημα που εξετάζεται απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1, από το οποίο φαίνεται ότι το σύστημα αυτό αποτελείται από μία κατασκευή (κτίριο) η οποία εδράζεται σε ένα παραμορφώσιμο στρώμα εδάφους που υποστηρίζεται από μία अपαραμόρφωτη βραχώμαζα. Η ανάλυση βασίζεται στις εξής βασικές παραδοχές: (α) Το κτίριο συμπεριφέρεται ελαστικά ενώ το έδαφος ελαστικά ή ελαστοπλαστικά σε όλη τη διάρκεια της σεισμικής δράσης, (β) υπάρχει πλήρης συνάφεια τόσο μεταξύ του παραμορφώσιμου εδαφικού στρώματος και της βραχώμαζας, όσο και μεταξύ του παραμορφώσιμου εδαφικού στρώματος και του κτιρίου στις επιφάνειες επαφής τους, (γ) η σεισμική δράση μεταφέρεται στο σύστημα εδάφους-κτιρίου μέσω της βραχώμαζας και (δ) υποθέτουμε για λόγους απλοποίησης του προβλήματος συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης.



Σχήμα 1.1 : Σύστημα εδάφους-Κατασκευής

Η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής προσδιορίζεται ποιοτικά με την βοήθεια της σεισμικής τέμνουσας βάσης του κτιρίου για τις ακόλουθες τρεις καταστάσεις του εδαφικού στρώματος:

(α) Παραμορφώσιμο εδαφικό στρώμα μηδενικού πάχους. Στην περίπτωση αυτή το κτίριο θεωρείται πακτωμένο απευθείας στην απαραμόρφωτη βραχομάζα επομένως δεν υπάρχει αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής.

(β) Ελαστικά παραμορφώσιμο εδαφικό στρώμα πεπερασμένου πάχους. Στην περίπτωση αυτή γίνεται διερεύνηση της επίδρασης των συνοριακών συνθηκών στα εγκάρσια άκρα του εδαφικού στρώματος.

(γ) Ελαστοπλαστικά παραμορφώσιμο εδαφικό στρώμα πάχους ίσου με αυτό της περίπτωσης (β). Στην περίπτωση αυτή ο υπολογισμός λαμβάνει υπόψη τα αποτελέσματα της διερεύνησης των συνοριακών συνθηκών της περίπτωσης (β).

Ο υπολογισμός της τέμνουσας βάσης γίνεται με δυναμική ανάλυση που συνδυάζει τη μέθοδο της βηματικής χρονικής ολοκλήρωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για την επίλυση του δυναμικού προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν δύο ελαφρώς τροποποιημένων λογισμικά ανάλυσης που περιγράφονται λεπτομερώς από τους Owen & Hinton [1]. Το πρώτο, το dynpak, είναι ένα λογισμικό που βασίζεται στη χρήση ενός ρητού αλγόριθμου (explicit method), ενώ το δεύτερο, το mixdyn, χρησιμοποιεί ένα έμμεσο αλγόριθμο (implicit method). Και τα δύο λογισμικά, που μετατρέπουν το δυναμικό πρόβλημα σε ισοδύναμο στατικό μέσω των προσεγγιστικών σχέσεων του Newmark [2], έχουν τη δυνατότητα γραμμικά ελαστικής και ελαστοπλαστικής ανάλυσης.

Και στα δύο λογισμικά έχει γίνει κατάλληλη τροποποίηση για την αποφυγή φαινομένων ανάκλασης του σεισμικού κύματος στα εγκάρσια άκρα του παραμορφώσιμου εδαφικού στρώματος. Η ανάκλαση του σεισμικού κύματος αλλοιώνει την εντατική κατάσταση στην περιοχή της κατασκευής λόγω της πρόσθετης επιπόνησης που προκαλεί στο έδαφος η επιστροφή των ανακλώμενων κυμάτων. Η



τροποποίηση αυτή συνίσταται στην κατασκευή ειδικών εγκάρσιων ιξωδοελαστικών απορροφητικών συνόρων.

Στόχος της εργασίας είναι ο υπολογισμός ενός συντελεστή που θα επιτρέπει τον προσδιορισμό της μέγιστης τέμνουσας της κατασκευής για την περίπτωση ανελαστικής ανάλυσης του εδάφους κάνοντας χρήση αποκλειστικά των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την ελαστική ανάλυση του συστήματος η προσδιορίζονται προσεγγιστικά από τους διάφορους κανονισμούς (π.χ. ATC-3 [2]). Συγκεκριμένα η σχέση μεταξύ των μέγιστων τιμών της τέμνουσας βάσης της ελαστικής κατασκευής για τις περιπτώσεις ελαστικής και ανελαστικής ανάλυσης του εδάφους δίνονται από μια σχέση της μορφής:

$$V_p = V - p \Delta V_e \quad (1.1)$$

$$P = \Delta V_e / \Delta V_p \quad (1.2)$$

όπου  $\Delta V_e$  και  $\Delta V_p$  είναι οι μειώσεις της τέμνουσας βάσης λόγω αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής για ελαστική και ανελαστική εδαφική συμπεριφορά, αντίστοιχα. Με  $V$  συμβολίζεται η μέγιστη τιμή της τέμνουσας βάσης της κατασκευής στην περίπτωση που η τελευταία αναλύεται θεωρώντας πως στηρίζεται σε έδαφος όταν δεν λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης.

Η μέγιστη τιμή της τέμνουσας βάσης της κατασκευής  $V$  όταν αυτή θεωρείται ότι στηρίζεται σε απαραμόρφωτο έδαφος καθώς και η επίδραση του φαινομένου της αλληλεπίδρασης στο ελαστικό σύστημα εδάφους κατασκευής μπορεί να βρεθεί με ικανοποιητική ακρίβεια κάνοντας χρήση των διατάξεων του κανονισμού του ATC-3 (Applied Technology Council)[2]. Σύμφωνα με τις διατάξεις αυτές η τιμή της  $V$  προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέσεις:

$$V = C_s W \quad (1.3)$$

Όπου  $C_s$  είναι ο συντελεστής αντισεισμικού σχεδιασμού και  $W$  το σύνολο των κατακόρυφων φορτίων που ενεργούν στην εξεταζόμενη κατασκευή.

Ο συντελεστής αντισεισμικού σχεδιασμού  $C_s$ , όταν η πρώτη (θεμελιώδης) περίοδος της κατασκευής  $T$  είναι δυνατό να προσδιοριστεί, δίνεται από την σχέση:

$$C_s = \frac{1.2C_v}{RT^{2/3}} \quad (1.4)$$

όπου  $C_v$  είναι ένας σεισμικός συντελεστής που προσδιορίζεται με βάση τα χαρακτηριστικά του εδάφους και την επιτάχυνση του σεισμού (πίνακας 9.1.4.2.4B. του ATC-3 [2]). Το  $R$  είναι ο τροποποιημένος συντελεστής απόκρισης (πίνακας 9.2.2.2. του ATC-3 [2]) ενώ  $T$  είναι η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής.

Σε περίπτωση που η ιδιοπερίοδος της κατασκευής δεν είναι γνωστή, τότε στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής  $C_s$  μπορεί να προσδιοριστεί προσεγγιστικά από σχέση:

$$C_s = \frac{2.5C_a}{R} \quad (1.5)$$

όπου  $C_a$  είναι ένας σεισμικός συντελεστής που προσδιορίζεται με βάση τα χαρακτηριστικά του εδάφους και την επιτάχυνση του σεισμού (πίνακας 9.1.4.2.4A. του ATC-3 [2])

Η θεμελιώδη ιδιοπερίοδος της κατασκευής είναι δυνατό να προσδιοριστεί προσεγγιστικά από την παρακάτω σχέση:

$$T = C_T h_h^{2/3} \quad (1.6)$$

όπου  $C_T$  είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από τον τύπο του κτιρίου που εξετάζεται ενώ  $h_h$  είναι το ύψος του κτιρίου (σε ft ή m).

Η επίδραση της σεισμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής προκαλεί μια μεταβολή στην τιμή της τέμνουσας βάσης  $V$  που προσδιορίστηκε πιο πάνω. Η τροποποιημένη τιμή της δίνεται από την πιο κάτω σχέση:

$$V_e = V - \Delta V_e \quad (1.7)$$

όπου  $\Delta V_e$  είναι η επίδραση του ελαστικού εδάφους η οποία προσδιορίζεται ως εξής:

$$\Delta V_e = \left[ C_s - \tilde{C}_s \left( \frac{0.05}{\tilde{\beta}} \right)^{0.4} \right] \bar{W} \quad (1.8)$$

Με  $\bar{W}$  ορίζεται το ενεργό φορτίο της βαρύτητας του κτιρίου που είναι ίσο με το 70% του  $W$ , ενώ με  $\tilde{\beta}$  ορίζεται ο συντελεστής κρίσιμης απόσβεσης του συστήματος εδάφους-κατασκευής ο οποίος προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tilde{\beta} = \beta_o + \frac{0.05}{\left( \frac{\tilde{T}}{T} \right)^2} \quad (1.9)$$

όπου  $\beta_o$  είναι ο συντελεστής θεμελίωσης που προσδιορίζεται από το σχήμα 9.2.5.2.1.2 του ATC-3 [2],  $\tilde{C}_s$  είναι η τιμή της  $C_s$  που προκύπτει από την σχέση (1.4) αν στην θέση της θεμελιώδους περιόδου εισάγουμε την τιμή της περιόδου  $\tilde{T}$  του συστήματος εδάφους-κατασκευής, η οποία δίνεται ως:

$$\tilde{T} = T \sqrt{1 + \frac{\bar{k}}{K_y} \left( 1 + \frac{K_y \bar{h}^2}{K_\theta} \right)} \quad (1.10)$$

όπου  $\bar{k}$  είναι η δυσκαμψία του κτιρίου όταν θεωρείται πακτωμένο στην βάση του, η οποία καθορίζεται από την σχέση:

$$\bar{k} = 4\pi^2 \frac{\bar{W}}{gT^2} \quad (1.11)$$

$\bar{h}$  ονομάζεται το δρων ύψος του κτιρίου και λαμβάνεται περίπου ίσο με το 70% του συνολικού ύψους του κτιρίου  $h_h$  ενώ  $K_y$  και  $K_\theta$  είναι η οριζόντια και η στρεπτική δυσκαμψία της θεμελιώσεως, αντίστοιχα.

Είναι λοιπόν φανερό ότι οι υπάρχοντες κανονισμοί (ATC-3 [2] ) δίνουν την επίδραση της σεισμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής ως  $\Delta V_e$  μόνο για την περίπτωση ελαστικής συμπεριφοράς του εδάφους. Στην εργασία αυτή καθορίζεται ένας διορθωτικός συντελεστής  $p$  (σχέση(1.2)) ώστε αυτή η επίδραση να υπολογίζεται και για ανελαστική εδαφική συμπεριφορά ως  $p \Delta V_e$  (σχέση (1.1)).

Η εργασία χωρίζεται σε δύο τμήματα. Στο πρώτο, που αποτελείται από έξι κεφάλαια, γίνεται μία συνοπτική περιγραφή των μεθόδων ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, ενώ στο δεύτερο, που αποτελείται από 3 κεφάλαια, περιγράφονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Ειδικότερα, στα κεφάλαια 1 έως 5 θα γίνει μια συνοπτική ανάλυση του θεωρητικού υπόβαθρου της παρούσας εργασίας και στο κεφάλαιο 6 θα διαμορφωθεί το σύστημα εδάφους-κατασκευής που στην συνέχεια θα αναλυθεί. Τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης θα παρουσιαστούν στα κεφάλαια 7 και 8 ενώ στο κεφάλαιο 9 περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού του διορθωτικού συντελεστή  $p$ . Στο τέλος υπάρχει ένα παράρτημα το οποίο περιέχει τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση καθώς και σύντομες οδηγίες για την προετοιμασία των δεδομένων των αρχείων εισαγωγής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

#### 2.1 Εισαγωγή

Για την επίλυση του ανελαστικού δυναμικού προβλήματος, το λογισμικό που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία συνδυάζει τη μέθοδο της χρονικής βηματικής ολοκλήρωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων [1],[3-5]. Το σύστημα εδάφους-κτιρίου που αναλύεται χωρίζεται αρχικά σε ένα αριθμό πεπερασμένων στοιχείων και στη συνέχεια, για κάθε χρονικό βήμα  $\Delta t$ , το δυναμικό πρόβλημά μετατρέπεται, με τον τρόπο που περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο, σε ισοδύναμο στατικό, που καταλήγει σε ένα σύστημα εξισώσεων της μορφής

$$\Delta \Psi = K^* \Delta d \quad (2.1)$$

όπου  $\Delta \Psi$  οι μεταβολές των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα χρονικό βήμα  $\Delta t$  στα σημεία (κόμβους) όπου ενώνονται τα πεπερασμένα στοιχεία από τα οποία αποτελείται το σύστημα εδάφους-κτιρίου,  $\Delta d$  οι αντίστοιχες μεταβολές των μετατοπίσεων των κόμβων και  $K^*$  το ενεργό μητρώο δυσκαμψίας το οποίο σχηματίζεται με τον τρόπο που περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο. Για τις ανάγκες της συνοπτικής περιγραφής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων που αποτελεί το αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου, θα θεωρηθεί ότι το  $K^*$  είναι το μητρώο δυσκαμψίας του συστήματος εδάφους-κτιρίου.

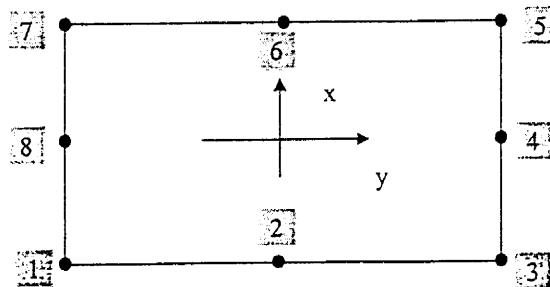
Το παραπάνω μητρώο δυσκαμψίας σχηματίζεται από τα επιμέρους μητρώα δυσκαμψίας των πεπερασμένων στοιχείων, με τον τρόπο που σχηματίζεται το μητρώο δυσκαμψίας μίας κατασκευής με ραβδωτά μέλη από τα μητρώα δυσκαμψίας των ραβδωτών μελών. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει ως ένα από τους

κύριους στόχους της την ανάπτυξη μίας γενικευμένης μεθοδολογίας με την οποία μπορεί να σχηματισθεί το μητρώο δυσκαμψίας κάθε είδους πεπερασμένων στοιχείων. Η μεθοδολογία αυτή περιγράφεται συνοπτικά στο παρόν κεφάλαιο για την περίπτωση του συστήματος εδάφους-κτιρίου που αποτελεί το αντικείμενο της παρούσης εργασίας.

## 2.2 Πεπερασμένα στοιχεία

Προκειμένου να αναλύσουμε το σύστημα εδάφους-κτιρίου πρέπει να το χωρίσουμε σε μικρότερα τμήματα. Τα τμήματα αυτά ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Ανάλογα με το πρόβλημα και το υλικό που εξετάζουμε επιλέγουμε και τον τύπο εκείνων των πεπερασμένων στοιχείων που θα μας δώσει αποτελέσματα πιο κοντά στα πειραματικά.

Τα πεπερασμένα στοιχεία με τα οποία γίνεται η ανάλυση του διδιάστατου συστήματος εδάφους-κατασκευής στην εργασία αυτή είναι τα λεγόμενα "ισοπαραμετρικά" στοιχεία με οκτώ κόμβους (Σχ. 2.1)



Σχ 2.1

Στα ισοπαραμετρικά στοιχεία οι συναρτήσεις σχήματος (shape functions) δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

- για τους γωνιακούς κόμβους

$$N_i^{(e)} = (1 + \xi \xi_i)(1 + \eta \eta_i)(\xi \xi_i + \eta \eta_i - 1)/4 \quad i = 1, 3, 5, 7 \quad (2.2)$$

- για τους μεσαίους κόμβους

$$N_i^{(e)} = \xi_i^2(1 + \xi \xi_i)(1 - \eta^2)/2 + \eta_i^2(1 + \eta \eta_i)(1 - \xi^2) \quad i = 2, 4, 6, 8 \quad (2.3)$$

Κάνοντας χρήση των συναρτήσεων σχήματος μπορούμε να βρούμε την μετατόπιση  $\mathbf{u}$  ( $\mathbf{u} = \{u, v\}$  για επίπεδη παραμόρφωση) ενός τυχαίου σημείου του πεπερασμένου στοιχείου ως συνάρτηση των επικόμβιων μετατοπίσεων  $\mathbf{d}$  μέσω των παρακάτω σχέσεων:

$$\mathbf{u} = \mathbf{N} \mathbf{d} \quad (2.4)$$

Η ίδια σχέση ισχύει για την μεταβολή της μετατόπισης

$$\Delta \mathbf{u} = \mathbf{N} \Delta \mathbf{d} \quad (2.5)$$

### 2.3 Σχέση παραμόρφωσης και επικόμβιων μετατοπίσεων

Η ανηγμένη παραμόρφωση εκφράζεται συναρτήσει της μετατόπισης  $\mathbf{u}$  από την σχέση:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{T} \mathbf{u} \quad (2.6)$$

όπου για προβλήματα επίπεδης παραμόρφωσης :

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}\} \quad (2.7)$$

Ενώ ο τελεστής  $\mathbf{T}$  δίνεται από την σχέση:

$$[T] = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Οι σχέσεις που δίνουν την ανηγμένη παραμόρφωση και την μεταβολή της ως συνάρτηση της μετατόπισης και της μεταβολής της, αντίστοιχα σε ένα τυχαίο σημείο δίνονται από τις σχέσεις:

$$\varepsilon = T u \quad (2.9)$$

$$\Delta \varepsilon = T \Delta u \quad (2.10)$$

Προκειμένου να εκφράσουμε την παραμόρφωση συνάρτηση των επικόμβιων μετατοπίσεων αντικαθιστούμε στις σχέσεις (2.9) και (2.10) τις σχέσεις (2.4) και (2.5), αντίστοιχα, οπότε και θα προκύψουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\varepsilon = T N d \quad (2.11)$$

$$\Delta \varepsilon = T N \Delta d \quad (2.12)$$

Το γινόμενο  $T N$  ορίζει το μητρώο παραμόρφωσης-μετατόπισης που συμβολίζεται με  $B$  και για προβλήματα επίπεδης παραμόρφωσης έχει την παρακάτω μορφή:

$$[B] = \begin{bmatrix} \partial N/\partial x & 0 \\ 0 & \partial N/\partial y \\ \partial N/\partial y & \partial N/\partial x \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Αντικαθιστώντας στις σχέσεις (2.11) και (2.12) το  $T N$  με  $B$  θα έχουμε



$$\varepsilon = \mathbf{B} \mathbf{d} \quad (2.14)$$

$$\Delta \varepsilon = \mathbf{B} \Delta \mathbf{d} \quad (2.14)$$

## 2.4 Σχέση τάσης-παραμόρφωσης

Η τάση με την παραμόρφωση συνδέονται μέσω ενός καταστατικού προσομοιώματος που εκφράζεται με τη σχέση

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2.15)$$

Το μητρώο  $\mathbf{D}$  για πρόβλημα επίπεδης παραμόρφωσης και ελαστική συμπεριφορά έχει την παρακάτω μορφή

$$[\mathbf{D}] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & 0 \\ \nu & (1-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

## 2.5 Μητρώο δυσκαμψίας στοιχείου

Από την αρχή των δυνατών έργων έχουμε πως το δυνατό έργο των δυνάμεων που ασκούνται εξωτερικά στο εξεταζόμενο σύστημα πρέπει να είναι ίσο με εκείνο των εσωτερικών δυνάμεων.

Το δυνατό έργο των εξωτερικών φορτίσεων είναι [1]

$$W_1 = \delta \mathbf{d}^T \cdot \mathbf{F}_p + \int_V \delta \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{f} \cdot dV + \int_S \delta \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{T} \cdot dS \quad (2.17)$$

όπου  $\mathbf{F}_p$  οι εξωτερικές επικόμβιες δυνάμεις

f οι εξωτερικές καθολικές δυνάμεις

T οι εξωτερικές επιφανειακές τάσεις

δd οι δυνατές μετατοπίσεις των κόμβων

du η δυνατή μετατόπιση τυχαίου σημείου του πεπερασμένου σημείου

Το δυνατό έργο των εσωτερικών δυνάμεων δίνεται από την σχέση[1]

$$W_2 = \int_V d\varepsilon^T \cdot \sigma \cdot dV \quad (2.18)$$

Όμως, επειδή τα δύο παραπάνω έργα πρέπει να είναι ίσα, έχουμε  $W_1 = W_2$  και βάσει των σχέσεων (2.17) και (2,18)

$$\{\delta d\} \cdot F_p + \int_V \delta u^T \cdot f \cdot dV + \int_S \delta u^T \cdot T \cdot dS = \int_V \delta \varepsilon^T \cdot \sigma \cdot dV \quad (2.19)$$

Στην συνέχεια, κάνοντας χρήση των σχέσεων (2.5), (2.14) και (2.15) για να εκφράσουμε τις μετατοπίσεις, τις παραμορφώσεις και τις τάσεις συναρτήσει των επικόμβιων μετατοπίσεων, προκύπτει

$$\delta u^T = \delta d^T N^T \quad (2.20)$$

$$\delta \varepsilon^T = \delta d^T B^T \quad (2.21)$$

$$\sigma = D B d \quad (2.22)$$

οπότε αντικαθιστώντας στην (2.19) θα έχουμε

$$\delta d^T \cdot F_p + \delta d^T \cdot \int_V N^T \cdot f \cdot dV + \delta d^T \cdot \int_S N^T \cdot T \cdot dS = \delta d^T \cdot \int_V B^T \cdot D \cdot B \cdot dV \quad (2.23)$$

Μετά την διαγραφή των επικόμβιων μετατοπίσεων από το δεξί και αριστερό μέλος της πιο πάνω εξίσωσης προκύπτει μια ισότητα μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων που δίνεται παρακάτω ως:

$$F_p + \int_V N^T \cdot f \cdot dV + \int_S N^T \cdot T \cdot dS = \left( \int_V B^T \cdot D \cdot B \cdot dV \right) d \quad (2.24)$$

Ο δεύτερος και ο τρίτος όρος της παραπάνω εξίσωσης παριστάνουν τις στατικά ισοδύναμες κομβικές δυνάμεις των  $f$  και  $T$ , αντίστοιχα, δηλαδή τις δυνάμεις που παράγουν ισοδύναμο έργο με τις καθολικές δυνάμεις  $f$  και τις επιφανειακές τάσεις  $T$ . Αν ορίσουμε ως:

$$F_f = \int_V N^T \cdot f \cdot dV \quad (2.25)$$

$$F_T = \int_S N^T \cdot T \cdot dS \quad (2.26)$$

$$K = \int_V B^T \cdot D \cdot B \cdot dV \quad (2.27)$$

από τις πιο πάνω σχέσεις θα έχουμε

$$F_p + F_f + F_T = K \cdot d \quad (2.28)$$

όπου  $K$  είναι το μητρώο δυσκαμψίας του στοιχείου.

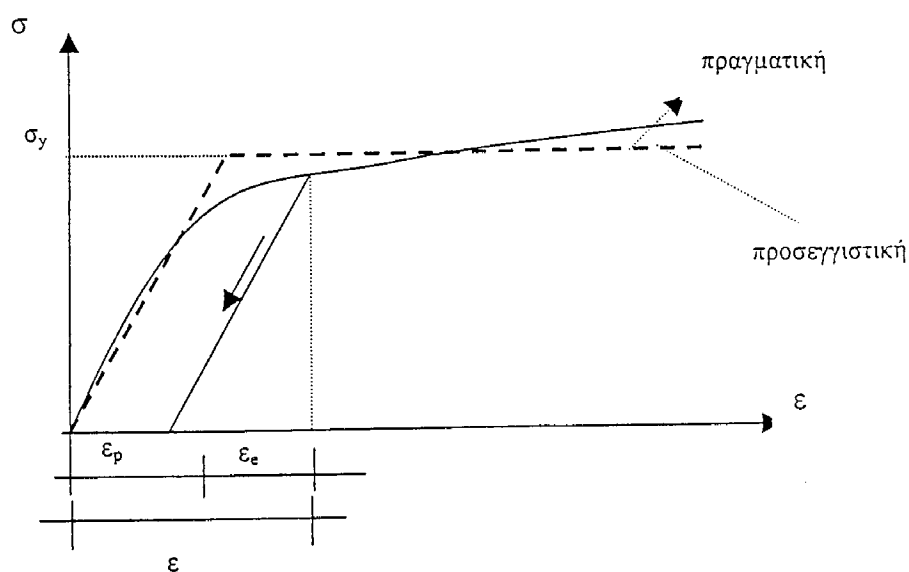
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Καταστατική προσομοίωση υλικών

#### 3.1 Γενικές έννοιες

Το αποτέλεσμα της ανάλυσης μιας κατασκευής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την συμπεριφορά των υλικών της που είναι ενσωματωμένη στην μέθοδο ανάλυσης. Συνήθως, για λόγους απλούστευσης ή λόγω έλλειψης στοιχείων, θεωρείται επαρκής η παραδοχή της γραμμικά ελαστικής συμπεριφοράς. Πράγματι, για τα φορτία που ασκούνται σε μια κατασκευή στη μεγαλύτερη διάρκεια της λειτουργίας της, τα αποτελέσματα της ανάλυσης που βασίζονται σ' αυτή την παραδοχή περιγράφουν ικανοποιητικά την συμπεριφορά της κατασκευής. Για μεγαλύτερα φορτία, όμως, εμφανίζονται σημαντικές αποκλίσεις οι οποίες αυξάνουν όταν η τιμή του φορτίου πλησιάζει την τιμή αστοχίας. Στις περιπτώσεις αυτές απαιτείται μια πλέον ρεαλιστική περιγραφή της συμπεριφοράς των υλικών.

Τα περισσότερα υλικά χαρακτηρίζονται από μία μη-γραμμικότητα στην συμπεριφορά τους, η οποία γίνεται εντονότερη όταν το φορτίο που τους ασκείται πλησιάζει την μέγιστη τιμή που μπορούν να φέρουν. Μια σχηματική παράσταση αυτής της συμπεριφοράς δίνεται από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1. Η καμπύλη δείχνει ότι η μεταβολή της ανηγμένης παραμόρφωσης  $\epsilon$  αυξάνει συνεχώς με την αύξηση της τάσης  $\sigma$ . Ένα κύριο χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς που περιγράφεται στο Σχήμα 3.1 είναι ότι ένα τμήμα  $\epsilon_e$  (= ελαστικό τμήμα) της συνολικής  $\epsilon$  είναι αναστρέψιμο, ενώ το υπόλοιπο  $\epsilon_p$  (= ανελαστικό τμήμα) είναι μη αναστρέψιμο.



Σχήμα 3.1

Μια προσεγγιστική αναπαράσταση της παραπάνω συμπεριφοράς θα μπορούσε να δοθεί από τη δι-γραμμική καμπύλη που επίσης απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1. με διακεκομμένη γραμμή. Το κεκλιμένο τμήμα της καμπύλης περιγράφει γραμμικά ελαστική συμπεριφορά, ενώ το οριζόντιο τμήμα περιγράφει ιδεατή πλαστική συμπεριφορά - αύξηση της παραμόρφωσης υπό σταθερή τάση. Η τάση που σηματοδοτεί το τέλος της ελαστικής και την έναρξη της πλαστικής συμπεριφοράς ονομάζεται τάση διαρροής  $\sigma_y$ . Στην περίπτωση αυτή μόνο μετά τη διαρροή του υλικού η παραμόρφωση  $\epsilon$  έχει ελαστική και πλαστική συνιστώσα, με την ελαστική συνιστώσα να είναι σταθερή και ίση με  $\sigma_y/E$ .

Στο λογισμικό ανάλυσης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι ενσωματωμένα διάφορα είδη συμπεριφοράς υλικών (καταστατικά προσομοιώματα) μεταξύ των οποίων και προσομοιώματα γραμμικά-ελαστικής και ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς. Σε ότι αφορά την ελαστική συμπεριφορά αυτή, περιγράφεται από το νόμο του Hooke αρκεί να οριστούν οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας  $E$  και του λόγου του Poisson  $\nu$  στη σχέση (2.16) (βλ. Κεφ. 2). Αντίθετα, η περιγραφή της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς είναι πολύπλοκη[6]. Το καταστατατικό προσομοίωμα ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς που είναι ενσωματωμένο στο λογισμικό ορίζεται από τα ακόλουθα στοιχεία[1]:

- (α) ελαστική συνιστώσα των παραμορφώσεων
- (β) κριτήριο/επιφάνεια διαρροής (yield surface) και νόμο κράτνσης (hardening rule)
- (γ) νόμο ροής (flow rule) που διέπει τις πλαστικές παραμορφώσεις
- (δ) συνθήκη συμβιβαστότητας (consistency condition) για πλαστικές παραμορφώσεις
- (στ) γενική διατύπωση των καταστατικών εξισώσεων (constitutive equations)

Εις τα επόμενα θα γίνει μία συνοπτική περιγραφή των παραπάνω στοιχείων.

### 3.2 Κριτήριο/επιφάνεια διαρροής και νόμος κράτνσης

Ένα κριτήριο διαρροής περιγράφει τη συνθήκη η οποία οριοθετεί την αλλαγή συμπεριφοράς ενός υλικού από ελαστική σε πλαστική. Η γραφική παράσταση της συνθήκης αυτής στο χώρο των τάσεων έχει τη μορφή μίας επιφάνειας, της επιφάνειας διαρροής.

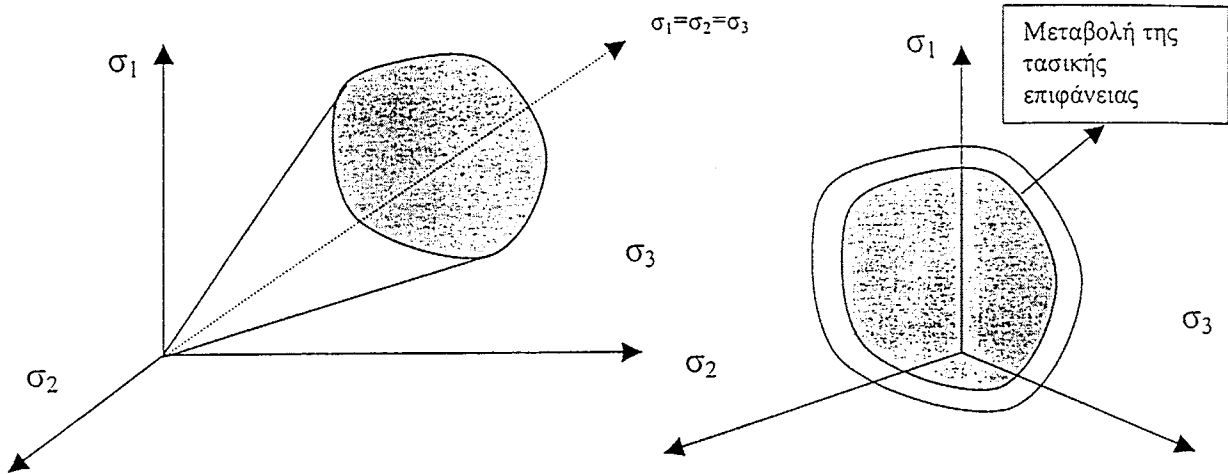
Η επιλογή του κριτηρίου δεν μπορεί να είναι τυχαία αλλά εξαρτάται από τον τύπο του υλικού και τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητές του. Κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί διάφορα κριτήρια διαρροής τα οποία ικανοποιούσαν ορισμένες κατηγορίες υλικών. Παραδείγματα τέτοιων κριτηρίων αποτελούν τα κριτήρια του Tresca και του Von Mises που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της πλαστικής συμπεριφοράς μετάλλων καθώς και τα κριτήρια των Mohr-Coulomb και Drucker-Prager που θεωρούνται καταλληλότερα για την πλαστική συμπεριφορά ψαθυρών υλικών όπως το σκυρόδεμα, οι βράχοι και γενικά τα εδάφη [1]. Και τα τέσσερα αυτά κριτήρια είναι ενσωματωμένα στο λογισμικό που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

Ένα κριτήριο διαρροής εκφράζεται συνήθως με μία εξίσωση της μορφής

$$f(\sigma)=K(\kappa) \quad (3.1)$$

όπου  $f(\sigma)$  είναι συνάρτηση της εντατικής κατάστασης του υλικού που αναπτύσσεται λόγω των εξωτερικών φορτίων, ενώ η συνάρτηση  $K(\kappa)$  (με  $\kappa$  συμβολίζεται η κράτνση) αποτελεί ιδιότητα του υλικού που προσδιορίζεται πειραματικά. Όταν η συνάρτηση  $f(\sigma)$  γίνει ίση με την  $K(\kappa)$  τότε το υλικό παύει να χαρακτηρίζεται από ελαστική συμπεριφορά (κατά την οποία οι παραμορφώσεις είναι αναστρέψιμες) και συμπεριφέρεται μη-γραμμικά χαρακτηριζόμενο από παραμόρφωση με δύο συνιστώσες: αναστρέψιμες (ελαστικές) και μη-αναστρέψιμες (πλαστικές).

Σε ένα Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων όπου ο κάθε άξονας αντιστοιχεί σε μια από τις κύριες τάσεις  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  (όπου  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ), το κριτήριο αστοχίας (που εκφράζεται από την σχέση (3.1)) περιγράφει μία επιφάνεια, το σχήμα της οποίας εξαρτάται από το κριτήριο διαρροής και το υλικό που χρησιμοποιούμε (βλ. Σχήμα (3.2)). Όταν οι τάσεις που αναπτύσσονται στο υλικό ορίζουν ένα σημείο που βρίσκεται μέσα στην επιφάνεια διαρροής τότε το υλικό μας συμπεριφέρεται ελαστικά. Όταν οι τάσεις που αναπτύσσονται στο υλικό αντιστοιχούν σε ένα σημείο που βρίσκεται επάνω στην επιφάνεια που ορίζει το κριτήριο διαρροής (επιφάνεια διαρροής, yield surface), οπότε και επαληθεύεται η σχέση (3.1), τότε το υλικό ευρίσκεται σε κατάσταση διαρροής. Περαιτέρω αύξηση της τάσης οδηγεί σε διόγκωση της επιφάνειας διαρροής με ένα τρόπο που ορίζεται από τον νόμο της κράτνσης (hardening rule). Στα πλαίσια αυτής της εργασίας θεωρούμε πως η διόγκωση περιγράφεται με ένα ισότροπο νόμο κράτνσης (isotropic hardening). Θεωρούμε, δηλαδή, πως καθώς η τάση αυξάνεται, η επιφάνεια διαρροής διογκώνεται ομοιόμορφα στον χώρο (βλ. Σχήμα 3.3).

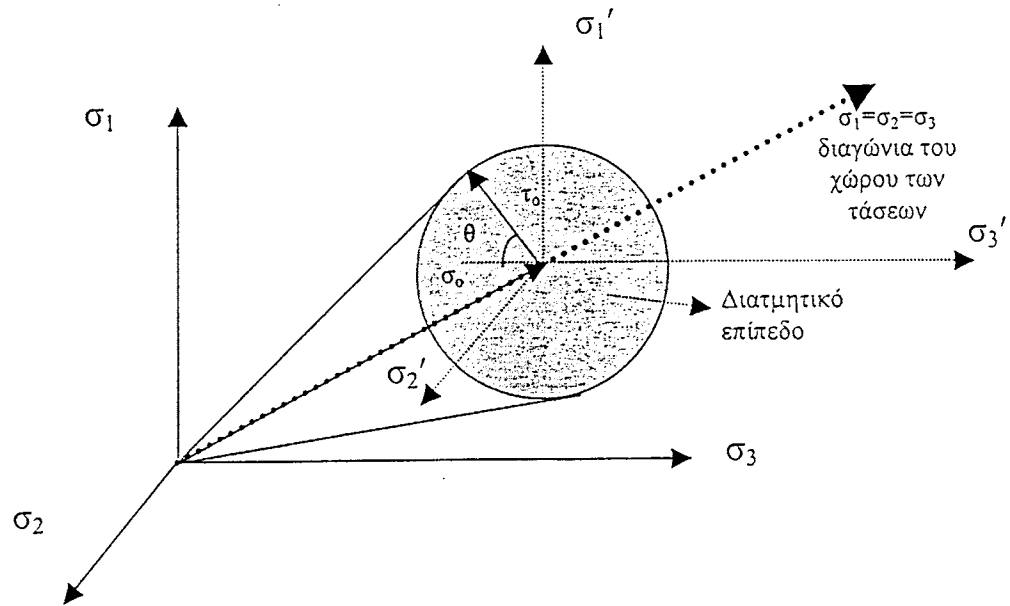


Σχήμα 3.2

Σχήμα 3.3

Η παραπάνω επιφάνειες θα μπορούσαν να οριστούν και σε άλλα συστήματα συντεταγμένων εκτός από το Καρτεσιανό. Ένα τέτοιο σύστημα απεικονίζεται στο σχήμα 3.4. Το σύστημα αυτό καθορίζεται από τις εξής παραμέτρους: (α) Την υδροστατική ή ορθή οκταεδρική τάση (hydrostatic or direct octahedral stress)  $\sigma_o$  που ορίζει το διατμητικό ή οκταεδρικό επίπεδο (deviatoric or octahedral plane). Η διεύθυνση της υδροστατικής τάσης συμπίπτει με τη διαγώνιο  $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$  του Καρτεσιανού χώρου  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  και το διατμητικό επίπεδο είναι κάθετο σ'αυτή. (β) Τη διατμητική ή οκταεδρική διατμητική τάση (deviatoric or shear octahedral stress)  $\tau_o$ , που ορίζει (στο διατμητικό επίπεδο) την απόσταση του σημείου διαρροής από το σημείο τομής της διαγώνιας του χώρου των τάσεων και του διατμητικού επιπέδου. (γ) Από τη γωνία  $\theta$  που ορίζει τη διεύθυνση της διατμητικής τάσης στο διατμητικό επίπεδο. Η υδροστατική τάση που έχει μέτρο ίσο με το μέσο όρο των κυρίων τάσεων, δηλ.  $\sigma_o = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ , έχει διεύθυνση που συμπίπτει με την διαγώνιο του χώρου των τάσεων. Η διατμητική τάση, που ευρίσκεται στο διατμητικό επίπεδο και συνεπώς έχει διεύθυνση κάθετη σε αυτή της υδροστατικής τάσης, δίνεται από την σχέση  $\tau_o = (1/3) \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ . (Σε τανυστική διατύπωση η διατμητική τάση δίνεται από τη σχέση  $\sigma_{ij}' = \sigma_{ij} - (1/3)\delta_{ij} \sigma_{kk}$ , όπου  $\delta_{ij}=1$  για  $i = j$  και  $\delta_{ij}=0$  για  $i \neq j$ . Τέλος η γωνία  $\varphi$  δίδεται από τη σχέση  $\cos\theta = (1/\sqrt{2}\tau_o)(\sigma_o - \sigma_3)$





(Σχ 3.4)

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι επιφάνειες διαρροής είναι ανεξάρτητες από το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται, δεδομένου ότι οι παράμετροι  $\sigma_o$ ,  $\tau_o$  και  $\theta$  είναι συναρτήσεις των τριών αναλλοίωτων των τάσεων (stress invariants)  $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ,  $I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1$  και  $I_3 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3$  ή  $J_3 = (\sigma_{ij} \sigma_{jk} \sigma_{ki})/2$  και μπορούν να εκφραστούν από τις ακόλουθες σχέσεις  $\sigma_o = I_1/3$ ,  $\tau_o = \sqrt{(2\sigma_o^2 - 2I_2/3)}$  και  $\cos 3\theta = -\sqrt{2}J_3/\tau_o^3$ .

Στην παρούσα εργασία, τα υλικά του συστήματος που αναλύουμε είναι κυρίως εδαφικό υλικό και οπλισμένο σκυρόδεμα της κατασκευής. Δοθέντος ότι υποθέτουμε την κατασκευή γραμμικά-ελαστική και το έδαφος ανελαστικό το καταλληλότερο από τα κριτήρια που είναι ενσωματωμένα στο παρόν λογισμικό για ανελαστική συμπεριφορά του εδάφους είναι το κριτήριο διαρροής των Drucker-Prager.

Το κριτήριο των Drucker-Prager (του οποίου η τομή με το διατμητικό επίπεδο είναι κυκλική) περιγράφεται από μια σχέση της μορφής

$$a \cdot J_1 + (J_2')^{0.5} = k' \quad (3.2)$$

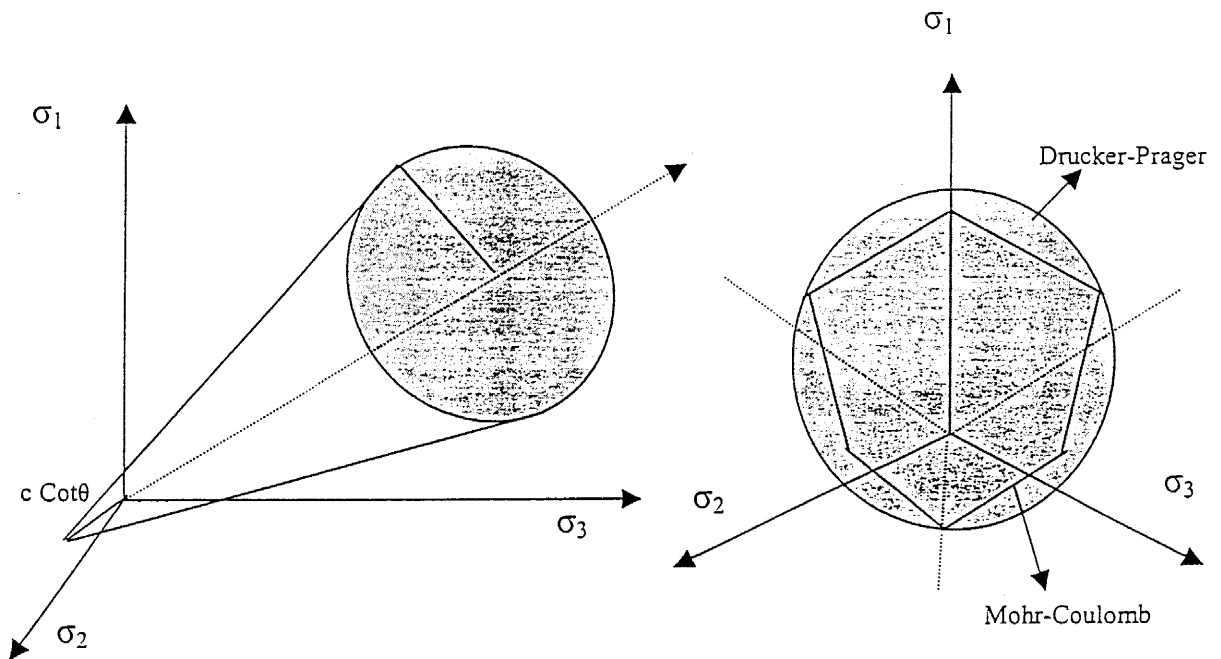
Όπου οι παράμετροι  $a$  και  $k'$  εκφράζονται ως συναρτήσεις της γωνίας τριβής  $\phi$  και της συνεκτικότητας  $c$  του υλικού από τις σχέσεις:

$$a = \frac{2 \cdot \sin \phi}{\sqrt{3} \cdot (3 - \sin \phi)} \quad , \quad k' = \frac{6 \cdot c \cdot \sin \phi}{\sqrt{3} \cdot (3 - \sin \phi)} \quad (3.3)$$

για την περίπτωση που η επιφάνεια διαρροής περιλαμβάνει τις εξωτερικές ακμές του εξαγώνου των Mohr-Coulomb και από τις σχέσεις

$$a = \frac{2 \cdot \sin \phi}{\sqrt{3} \cdot (3 + \sin \phi)} \quad , \quad k' = \frac{6 \cdot c \cdot \sin \phi}{\sqrt{3} \cdot (3 + \sin \phi)} \quad (3.4)$$

για την περίπτωση που η επιφάνεια διαρροής που εκφράζει το κριτήριο περιλαμβάνει τις εσωτερικές ακμές του εξαγώνου των Mohr-Coulomb.



(Σχ 3.4)

### 3.3 Ελαστική συνιστώσα παραμόρφωσης

Η ελαστική συνιστώσα  $d\varepsilon_{ij}^e$  της μεταβολής της παραμόρφωσης  $d\varepsilon_{ij}$  που αντιστοιχεί σε μεταβολή της τάσης  $d\sigma_{ij}$  δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$d\varepsilon_{ij}^e = \frac{d\sigma_{ij}'}{2\mu} + \frac{(1-2\nu)}{E} \delta_{ij} \cdot d\sigma_{kk} \quad (3.5)$$

όπου  $d\sigma_{ij}'$  και  $d\sigma_{kk}$  η διατμητική και η ορθή συνιστώσα της  $d\sigma_{ij}$

$E$  το μέτρο ελαστικότητας

$\nu$  ο λόγος του Poisson και

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

### 3.4 Νόμος ροής

Η σχέση μεταξύ της πλαστικής συνιστώσας της μεταβολής της παραμόρφωσης και της μεταβολής της τάσης ορίζεται από την παραδοχή ότι η μεταβολή της πλαστικής παραμόρφωσης δίνεται από μια σχέση της μορφής

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \cdot \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3.6)$$

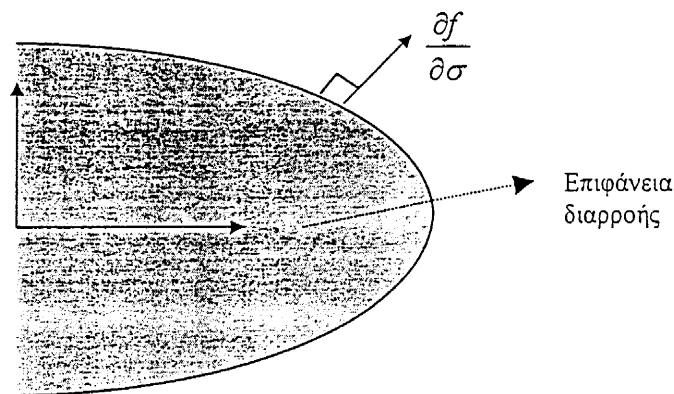
όπου  $d\lambda$  είναι μια σταθερά που ονομάζεται (plastic multiplier) ενώ το  $Q$  είναι το πλαστικό δυναμικό (plastic potential), τανυστής δευτέρας τάξης που δίνει την διεύθυνση των πλαστικών παραμορφώσεων. Η σχέση αυτή ονομάζεται και νόμος ροής και καθορίζει το σχετικό μέγεθος των πλαστικών παραμορφώσεων.

### 3.5 Συνθήκη συμβιβαστότητας

Υποθέτοντας ότι στην εξίσωση (3.6)  $Q=f(\sigma)$ , προκύπτει:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \cdot \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3.7)$$

Η σχέση αυτή ονομάζεται συνθήκη ορθογωνικότητας (normality condition) διότι καθορίζει ότι η φορά της πλαστικής συνιστώσας των παραμορφώσεων είναι κάθετη στην επιφάνεια διαρροής (που περιγράφεται από την συνάρτηση  $f$ ) αφού είναι συγγραμμική με το διάνυσμα  $\partial f(\sigma)/\partial \sigma_{ij}$  που είναι κάθετο στην επιφάνεια διαρροής (σχ 3.5)



Σχήμα 3.5

### 3.6 Γενική διατύπωση συμπεριφοράς υλικών

Η συνολική παραμόρφωση  $d\varepsilon_{ij}$  δίνεται από το άθροισμα της ελαστικής (αντιστρεπτής)  $d\varepsilon_{ij}^e$  και της πλαστικής (μη αντιστρεπτής)  $d\varepsilon_{ij}^p$  συνιστώσας της, δηλαδή:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (3.8)$$

Αντικαθιστώντας στην (3.8) τις  $d\varepsilon_{ij}^e$  και  $d\varepsilon_{ij}^p$  με τις σχέσεις τους από τις εξισώσεις (3.5) και (3.7) αντίστοιχα, προκύπτει η παρακάτω σχέση που εκφράζει τη συνολική μεταβολή της παραμόρφωσης συναρτήσει της μεταβολής της τάσης  $d\sigma_{ij}$

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{d\sigma_{ij}}{2\mu} + \frac{(1-2\nu)}{E} \delta_{ij} d\sigma_{kk} + d\lambda \cdot \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3.9)$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Μέθοδοι χρονικής βηματικής ολοκλήρωσης

#### 4.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε, το λογισμικό που χρησιμοποιούμε στην παρούσα εργασία επλύει το δυναμικό πρόβλημα κάνοντας χρήση βηματικών μεθόδων χρονικής ολοκλήρωσης. Η διάρκεια της σεισμικής δράσης στην οποία υπόκειται το σύστημα εδάφους-κτιρίου χωρίζεται σε στοιχειώδη χρονικά διαστήματα  $\Delta t$ . Για κάθε ένα από τα στοιχειώδη αυτά χρονικά διαστήματα μετατρέπουμε το πρόβλημα που εξετάζουμε από δυναμικό σε ισοδύναμο στατικό.

Το δυναμικό πρόβλημα περιγράφεται από ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων δευτέρας τάξης της μορφής.

$$M\ddot{d} + C\dot{d} + p(d, v) = f(t) \quad (4.1)$$

όπου  $\mathbf{d}$  είναι το διάνυσμα των μετατοπίσεων,  $\mathbf{M}$  το μητρώο μάζας,  $\mathbf{C}$  το μητρώο απόσβεσης,  $p(\mathbf{d}, v)$  το διάνυσμα εσωτερικών δυνάμεων που για ελαστική συμπεριφορά του υλικού παίρνει την μορφή  $\mathbf{Kd}$ , όπου  $\mathbf{K}$  μητρώο δυσκαμψίας, ενώ γενικά είναι συναρτήση της μετατόπισης  $\mathbf{d}$  και ταχύτητα  $v$ , και  $f(t)$  το διάνυσμα των εξωτερικών δυνάμεων. Οι τελείες άνω των συμβόλων δηλώνουν χρονική διαφορίση.

Οι παραπάνω εξισώσεις μετατρέπονται σε γραμμικές αλγεβρικές χρησιμοποιώντας τις προσεγγιστικές σχέσεις πεπερασμένων διαφορών (συνήθως τύπου Newmark)[3,4], που εκφράζουν την μετατόπιση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση στην αρχή ενός χρονικού βήματος συναρτήσεως των μεγεθών αυτών κατά

το προηγούμενο χρονικό βήμα. Η μετατροπή αυτή των εξισώσεων (4.1) μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικές μεθόδους, τη ρητή μέθοδο (explicit method) και την έμμεση μέθοδο (implicit method). Εις τα επόμενα περιγράφονται οι μέθοδοι αυτές με τον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζονται από το λογισμικό που χρησιμοποιούμε στην παρούσα εργασία[1].

## 4.2 Ρητή μέθοδος (explicit method)

Για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα η ρητή μέθοδος επιλύει το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων (4.1) ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία

1. Γίνεται μια πρώτη προσέγγιση των τιμών της μετατόπισης  $d_{n+1}$ , της ταχύτητας  $v_{n+1}$  και της επιτάχυνσης  $a_{n+1}$  του  $n+1$  χρονικού βήματος κάνοντας χρήση των παρακάτω σχέσεων,

$$d_{n+1}^{[0]} = \tilde{d}_{n+1} = d_n + \Delta t \cdot v_n + \frac{\Delta t^2 (1 - 2\beta) a_n}{2} \quad (4.2)$$

$$v_{n+1}^{[0]} = \tilde{v}_{n+1} = v_n + \Delta t (1 - \gamma) a_n \quad (4.3)$$

$$a_{n+1}^{[0]} = 0 \quad (4.4)$$

όπου  $\Delta t$  είναι η διάρκεια κάθε χρονικού βήματος και ο εκθέτης [0] δείχνει τον αριθμό των κύκλων επανάληψης (iteration) που απαιτούνται σε μη γραμμικά προβλήματα. Στις ανώτερες σχέσεις συνήθως επιλέγουμε  $\beta=0,5$  και  $\gamma=0,25$  για λόγους ευστάθειας.

2. Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στις σχέσεις (4.1) το αριστερό μέλος της γίνεται ίσο με  $p(\tilde{d}_{n+1}, \tilde{v}_{n+1})$  και διαφέρει από το δεξιό κατά

$$\psi^{[0]} = f_{n+1} - p(\tilde{d}_{n+1}, \tilde{v}_{n+1}) \quad (4.5)$$

3. Κατασκευάζεται ένα γενικευμένο μητρώο δυσκαμψίας της μορφής

$$K^* = \frac{M}{\Delta t^2 \beta} \quad (4.6)$$

Το μητρώο αυτό εξαρτάται μόνο από την μάζα και άρα ο σχηματισμός του γίνεται μόνο μία φορά.

4. Χρησιμοποιώντας το μητρώο δυσκαμψίας  $K^*$  υπολογίζονται οι μετατοπίσεις που αντιστοιχούν στις μη ισορροπούμενες δυνάμεις  $\psi^{[0]}$  από την ακόλουθη σχέση

$$K^* \cdot \Delta d^{[0]} = \psi^{[0]} \quad (4.6)$$

Η επίλυση της παρακάτω εξίσωσης γίνεται με αναστροφή του γενικευμένου μητρώου ακαμψίας (όπως ο σχηματισμός έτσι και η αναστροφή του μητρώου γίνεται μία μόνο φορά)

$$\Delta d^{[0]} = K^{*-1} \cdot \psi^{[0]} \quad (4.7)$$

5. Τα αποτελέσματα της επίλυσης της εξίσωσης (4.7) χρησιμοποιούνται για να διορθωθούν οι προσεγγιστικές τιμές των μεγεθών (μετατόπιση, ταχύτητα και επιτάχυνση) με τις οποίες ξεκίνησε η διαδικασία στο πρώτο βήμα. Οι διορθώσεις γίνονται με τις ακόλουθες σχέσεις.

$$d_{n+1}^{[1]} = d_{n+1}^{[0]} + \Delta d^{[0]} \quad (4.8)$$

$$a_{n+1}^{[1]} = \frac{(d_{n+1}^{[1]} - \tilde{d}_{n+1})}{\Delta t^2 \beta} \quad (4.9)$$

$$v_{n+1}^{[1]} = v_{n+1}^{[0]} + \Delta t \cdot \gamma \cdot a_{n+1}^{[1]} \quad (4.10)$$



6. Έτσι στο τέλος του χρονικού διαστήματος  $\Delta t$  οι επικόμβιες μεταθέσεις, ταχύτητες και επιταχύνσεις είναι

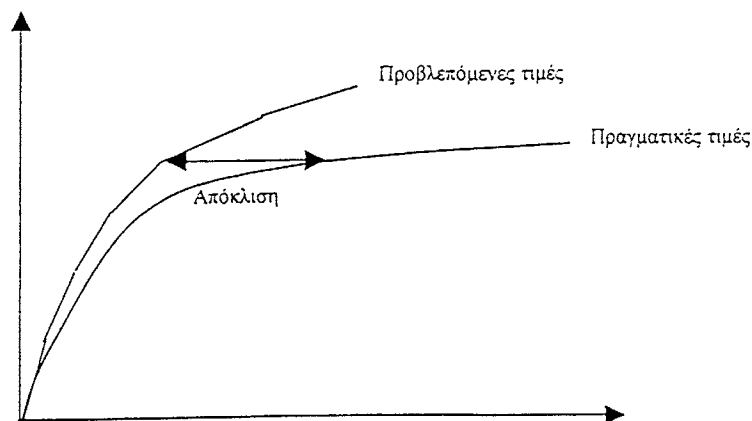
$$d_{n+1} = d_{n+1}^{[1]} \quad (4.11)$$

$$a_{n+1} = a_{n+1}^{[1]} \quad (4.12)$$

$$v_{n+1} = v_{n+1}^{[1]} \quad (4.13)$$

7. Οι παραπάνω τιμές αποτελούν την τιμή εκκίνησης για την επανάληψη της διαδικασίας για την επίλυση του προβλήματος στο επόμενο χρονικό βήμα.

Το κύριο πλεονέκτημα της ρητής μεθόδου είναι ότι το γενικευμένο μητρώο δυσκαμψίας σχηματίζεται και αναστρέφεται μόνο μια φορά. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών όμως αποκλίνουν από τις πραγματικές τιμές με τρόπο που περιγράφεται στο Σχήμα 4.1. Για την μείωση της απόκλισης, απαιτείται η διαίρεση της διάρκειας της σεισμικής δράσης σε πολύ μικρά διαστήματα  $\Delta t$ , γεγονός που αποτελεί και το μειονέκτημα της μεθόδου, λόγω της αύξησης του κόστους της ανάλυσης. Ένα πρόσθετο μειονέκτημα είναι η συνεχής αύξηση των αποκλίσεων η οποία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, είναι συνεχής και ενδέχεται να οδηγήσει σε απαράδεκτα μεγάλες τιμές.



Σχήμα 4.1

### 4.3 Έμμεση μέθοδος (implicit method)

Σε αντίθεση με την ρητή, η έμμεση μέθοδος ακολουθεί μια επαναληπτική διαδικασία για την επίλυση της εξίσωσης (4.1) σ' ένα τυχαίο χρονικό βήμα  $\Delta t$ . Η διαδικασία αυτή είναι η ακόλουθη

1. Γίνεται μηδενισμός του δείκτη των επαναλήψεων ( $i = 0$ ).
2. Όπως και στην περίπτωση της ρητής μεθόδου, γίνεται μια πρώτη προσέγγιση των τιμών της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης του  $n+1$  βήματος κάνοντας χρήση των παρακάτω σχέσεων,

$$d_{n+1}^{[i]} = \tilde{d}_{n+1} = d_n + \Delta t \cdot v_n + \frac{\Delta t^2 (1 - 2\beta) a_n}{2} \quad (4.14)$$

$$v_{n+1}^{[i]} = \tilde{v}_{n+1} = v_n + \Delta t (1 - \gamma) a_n \quad (4.15)$$

$$a_{n+1}^{[i]} = 0 \quad (4.16)$$

Όπως και για την ρητή μέθοδο, θέτουμε  $\beta = 0,5$  και  $\gamma = 0,25$ .

3. Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στις σχέσεις (4.1) προκύπτει μια διαφορά μεταξύ του δεξιού και αριστερού σκέλους της που εκφράζεται από την παρακάτω σχέση,

$$\psi^{[i]} = f_{n+1} - M a_{n+1}^{[i]} - p(d_{n+1}, v_{n+1}) \quad (4.14)$$

4. Κατασκευάζεται ένα γενικευμένο μητρώο δυσκαμψίας της μορφής

$$K^* = \frac{M}{dt^2 \beta} + \gamma \frac{C}{dt \beta} + K_T(d_{n+1}^{[i]}) \quad (4.15)$$

Όπως φαίνεται από τη σχέση αυτή, για την κατασκευή του μητρώου  $K^*$  χρησιμοποιούνται τα μητρώα εφαπτομενικής δυσκαμψίας  $K_T$ , μάζας  $M$  και απόσβεσης  $C$ . Ανάλογα με την επαναληπτική διαδικασία που υιοθετείται για την επίλυση του προβλήματος, το μητρώο  $K^*$  θα μπορούσε να παραμείνει αμετάβλητο ή να μεταβάλλεται με κάθε επανάληψη ή μετά από ένα αριθμό επαναλήψεων της διαδικασίας που περιγράφεται.

5. Το μητρώο  $K^*$  χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων που αντιστοιχούν στις δυνάμεις  $\psi^{[i]}$ . Οι μετατοπίσεις αυτές προκύπτουν από την σχέση

$$K^* \cdot \Delta d^{[i]} = \psi^{[i]} \quad (4.16)$$

η επίλυση της οποίας γίνεται με αντιστροφή του γενικευμένου μητρώου δυσκαμψίας, δηλαδή

$$\Delta d^{[0]} = K^{*-1} \cdot \psi^{[0]} \quad (4.17)$$

6. Τα αποτελέσματα των εξισώσεων (4.17) προστίθενται στις προσεγγιστικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο πρώτο βήμα

$$d_{n+1}^{[i+1]} = d_{n+1}^{[i]} + \Delta d^{[i]} \quad (4.18)$$

$$a_{n+1}^{[i+1]} = \frac{\left( d_{n+1}^{[i+1]} - \tilde{d}_{n+1} \right)}{\Delta t^2 \beta} \quad (4.19)$$

$$v_{n+1}^{[i+1]} = v_{n+1}^{[i]} + \Delta t \cdot \gamma \cdot a_{n+1}^{[i+1]} \quad (4.20)$$

7. Χρησιμοποιώντας ως κριτήριο σύγκλισης μια σχέση από την οποία προκύπτει ένα μέτρο της διαφοράς των μετατοπίσεων της παρούσας και της προηγούμενης επανάληψης της διαδικασίας, ελέγχεται εάν η διαφορά είναι μικρότερη από μία επιτρεπόμενη τιμή. Εάν το κριτήριο δεν ικανοποιείται τα

μεγέθη που προκύπτουν από τις σχέσεις (4.18) έως (4.20) χρησιμοποιούνται για να επαναληφθεί η διαδικασία από το βήμα 3 και μετά. Εάν το κριτήριο σύγκλισης ικανοποιείται, τα παραπάνω μεγέθη αποτελούν την λύση του προβλήματος και αποτελούν τα μεγέθη εκκίνησης για την επίλυση του προβλήματος για το επόμενο χρονικό διάστημα.

Το κύριο πλεονέκτημα της έμμεσης μεθόδου είναι ότι η απόκλιση για κάθε χρονικό διάστημα ελέγχεται από το κριτήριο σύγκλισης και σε αντίθεση με την ρητή μέθοδο δεν αυξάνεται με τον αριθμό των χρονικών διαστημάτων στα οποία έχει διαιρεθεί η διάρκεια της σεισμικής δράσης. Συνεπώς η μέθοδος δεν απαιτεί το μέγεθος των χρονικών διαστημάτων να είναι τόσο μικρό όπως στην περίπτωση της ρητής μεθόδου. Σε αντίθεση όμως με την μέθοδο αυτή, το υπολογιστικό κόστος αυξάνεται λόγω της ανάγκης σχηματισμού και αναστροφής του μητρώου δυσκαμψίας τουλάχιστον μια φορά για κάθε χρονικό διάστημα και συνήθως αρκετές φορές κατά την διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Πρόβλημα τεχνητών συνόρων συστήματος εδάφους-κτιρίου

#### 5.1 Πρόβλημα ανακλώμενων κυμάτων σε τεχνητά σύνορα

Για πρακτικούς λόγους που πηγάζουν από την φύση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, το εδαφικό στρώμα του συστήματος εδάφους-κτιρίου δεν μπορεί παρά να έχει περιορισμένο μήκος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το κύμα που δημιουργεί η σεισμική διέγερση της βραχόμαζας να ανακλάται στα εγκάρσια άκρο-σύνορα του εδαφικού στρώματος και να δημιουργεί πρόσθετη επιπόνηση στο στρώμα αυτό. Το φαινόμενο αυτό, που δε θα συνέβαινε εάν δεν υπήρχε ο περιορισμός μήκους που επιβάλλουν οι ανάγκες της ανάλυσης, επηρεάζει τη λύση του δυναμικού προβλήματος. Στην παρούσα εργασία έγινε μία προσπάθεια να αναιρεθεί κατά το δυνατό η επίδραση αυτή των ανακυκλώμενων κυμάτων.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εργασίας των Valliappan & Lee [7], που αναφέρεται στη χρήση ιξωδοελαστικών απορροφητικών συνόρων (viscous absorbing boundaries), η επίδραση της ανάκλασης του κύματος μπορεί να αναιρεθεί με την άσκηση στα εγκάρσια άκρα του εδαφικού στρώματος δυνάμεων ικανών να προκαλέσουν μία εντατική επιπόνηση ίση και αντίθετη με αυτή που προκαλεί η ανάκλαση του κύματος.

Οι παραπάνω δυνάμεις εκφράζονται ως συναρτήσεις της ταχύτητας  $\{U\}$  των εγκάρσιων άκρων, με τη μορφή συνοριακών ορθών και διατμητικών τάσεων  $\{\sigma\}$  που δίνονται από τις σχέσεις:

$$\{\sigma\} = [C^*] \cdot \{\dot{U}\} \quad (5.1)$$

$$[C^*] = \begin{bmatrix} apV_p & 0 \\ 0 & bpV_s \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

όπου  $V_p$  και  $V_s$  είναι οι ταχύτητες των κύριων (primary waves) και διατμητικών (shear waves) κυμάτων, αντίστοιχα, ενώ  $\rho$  είναι η πυκνότητα του εδαφικού στρώματος και  $a, b$  είναι παράμετροι που δίνονται συναρτήσει του πίνακα 5.1 [7].

Οι ταχύτητες  $V_p$  και  $V_s$  υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad , \quad V_p = \frac{V_s}{S} \quad (5.3)$$

Όπου  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  ,  $S = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}}$  ενώ  $E$  και  $\nu$  είναι το μέτρο ελαστικότητας και

ο λόγος του Poisson, αντίστοιχα

Λόγος Poisson ( $\nu$ )	$a$	$b$
0	0,959	0,769
0,05	0,967	0,761
0,10	0,975	0,756
0,15	0,982	0,751
0,20	0,986	0,747
0,25	0,986	0,744
0,30	0,986	0,742
0,35	0,992	0,740
0,40	1,007	0,746
0,45	1,011	0,773

Τιμές παραμέτρων  $a, b$  για διάφορες τιμές του λόγου του Poisson

Πίνακας 5.1

Εκτός από τον πιο πάνω πίνακα οι τιμές των  $a$  και  $b$  δίνονται και από τις παρακάτω σχέσεις [7]

$$a = \frac{8}{15\pi}(5 + 2S - 2S^2) \quad (5.4)$$

$$b = \frac{8}{15\pi}(3 + 2S) \quad (5.5)$$

## 5.2 Διαδικασία επίλυσης

Η εκτίμηση της επίδρασης της ανάκλασης των κυμάτων στη εντατική κατάσταση του συστήματος εδάφους-κτιρίου βασίζεται στον υπολογισμό των επικόμβιων δυνάμεων που αντιστοιχούν στις συνοριακές δράσεις  $\sigma$  που προκύπτουν από τη σχέση (5.1). Αντικαθιστώντας την έκφραση αυτών των δράσεων στη σχέση (2.26) (στην οποία  $T \equiv \sigma$ ) προκύπτει η ακόλουθη έκφραση των επικόμβιων δυνάμεων,

$$F = - \int_s N^T \cdot C \cdot \dot{U} \cdot dS \quad (5.6)$$

Θέτοντας  $\dot{U} = N \cdot \dot{d}$ , η σχέση (5.6) γίνεται

$$F = - \int_s N^T \cdot C \cdot N \cdot \dot{d} \cdot dS \quad (5.7)$$

όπου  $\dot{d}$  το μητρώο των επικόμβιων ταχυτήτων.

Η σχέση (5.7) συνυπολογίζεται στις σχέσεις (4.5) και (4.14) της ρητής και έμμεσης μεθόδου, αντίστοιχα, και οι λύσεις που προκύπτουν από τις διαδικασίες που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4 είναι κατά μεγάλο ποσοστό απαλλαγμένες από την επίδραση της ανάκλασης του σεισμικού κύματος στα εγκάρσια άκρα του εδαφικού στρώματος.

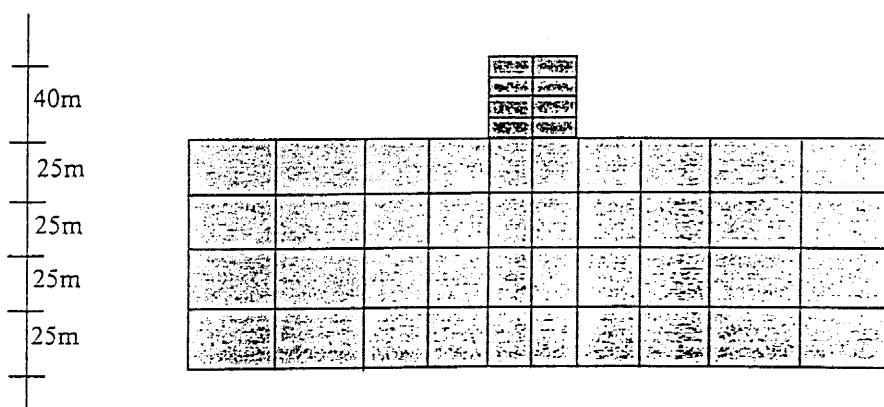
### 5.3 Διερεύνηση της αποτελεσματικότητας ιξωδοελαστικών απορροφητικών συνόρων

Παρακάτω θα γίνει διερεύνηση της επίδρασης της εισαγωγής των παραπάνω συνοριακών συνθηκών στην απόκριση του συστήματος εδάφους-κατασκευής και το πως αυτή αντικατοπτρίζεται στα διαγράμματα της τέμνουσα βάσης και της οριζόντιας μετατόπισης στην κορυφή της κατασκευής (τοίχωμα). Το σύστημα που αρχικά επιλέγουμε για την διερεύνηση έχει ήδη αναλυθεί σε προηγούμενη εργασία []. Στα εγκάρσια όρια του εδάφους οι κόμβοι των πεπερασμένων στοιχείων στη περιοχή αυτή έχουν δυνατότητα μετατόπισης μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση και όχι κατά την κατακόρυφη

Τα χαρακτηριστικά του συστήματος του οποίου γίνεται χρήση παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 5.2 και στο Σχήμα 5.1

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ		ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	ΕΔΑΦΟΣ
Μέτρο ελαστικότητας	E	$1,438 \cdot 10^7 \text{ KN/m}^2$	$1.26 \cdot 10^6 \text{ KN/m}^2$
Λόγος Poisson	$\nu$	0.17	0.40
Πυκνότητα	$\rho$	$2400 \text{ Kg/ m}^3$	$1800 \text{ Kg/ m}^3$
Συνεκτικότητα	c	-	$180 \text{ KN/m}^2$
Γωνία τριβής	$\phi$	-	$30^\circ$

Πίνακας 5.2  
Φυσικά χαρακτηριστικά εδάφους και κατασκευής

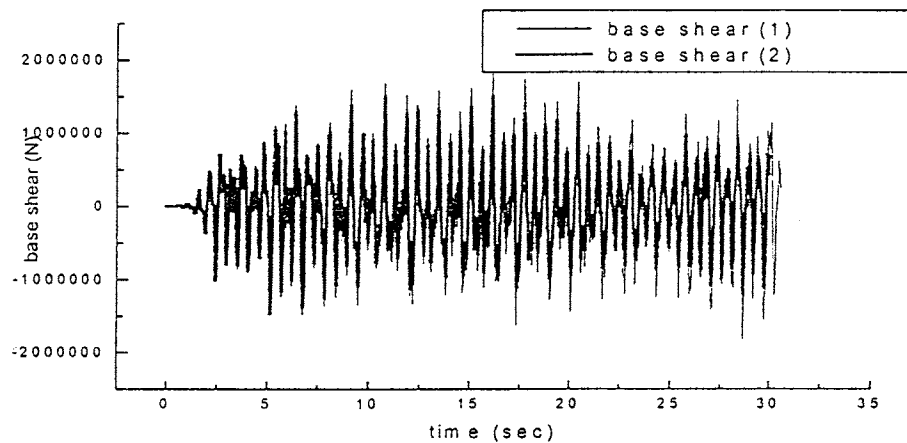


Σχήμα 5.1  
Σύστημα εδάφους-κατασκευής

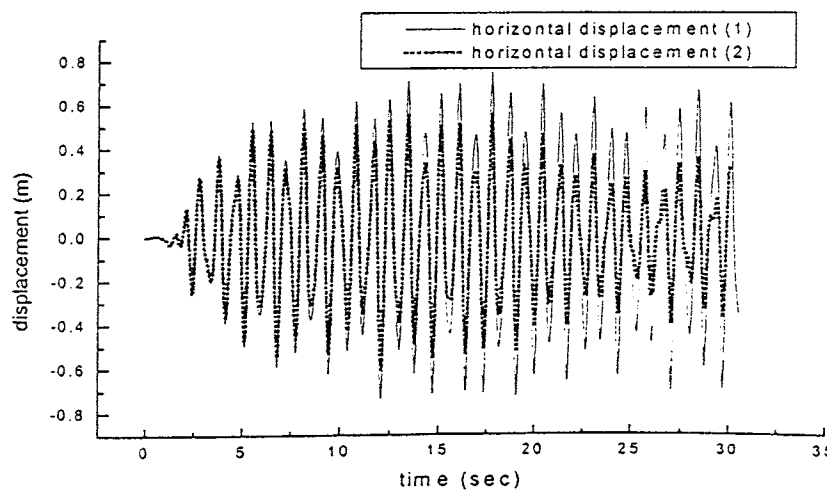


Η ανάλυση του παραπάνω συστήματος γίνεται κάνοντας χρήση του επιταχυνσιογραφήματος του El Centro με μέγιστη επιτάχυνση το 35% της επιτάχυνσης της βαρύτητας της γής  $g$  και επαναλαμβάνεται δύο φορές, την μια φορά λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία ιξωδοελαστικών απορροφητικών συνόρων (viscous absorbing boundaries) στα εγκάρσια όρια του εδαφικού στρώματος που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο (περίπτωση 2) και την άλλη αγνοώντας τα (περίπτωση 1).

Παρακάτω παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις πιο πάνω αναλύσεις για την τέμνουσα βάσης και την οριζόντια μετατόπιση της κατασκευής (τοιχώματος) στα Σχήματα 5.2 και 5.3



Σχήμα 5.2



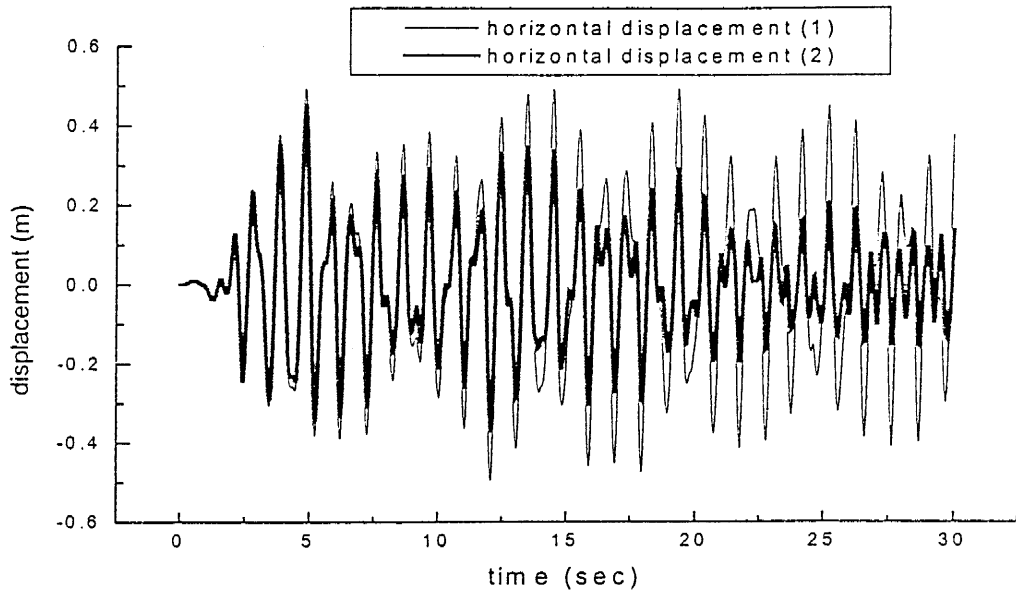
Σχήμα 5.3

Από την σύγκριση των γραφικών παραστάσεων των παραπάνω σχημάτων παρατηρούμε ότι οι τιμές της μετατόπισης και της τέμνουσας βάσης στην περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη τα απορροφητικά σύνορα που αναφέρθηκαν προηγουμένως (περίπτωση 2) αν και αρχικά ίδιες στην συνέχεια προοδευτικά παρουσιάζονται μειωμένες σε σχέση με τις τιμές των αντίστοιχων αποτελεσμάτων που προκύπτουν για την περίπτωση που αυτά αγνοήθηκαν (περίπτωση 1).

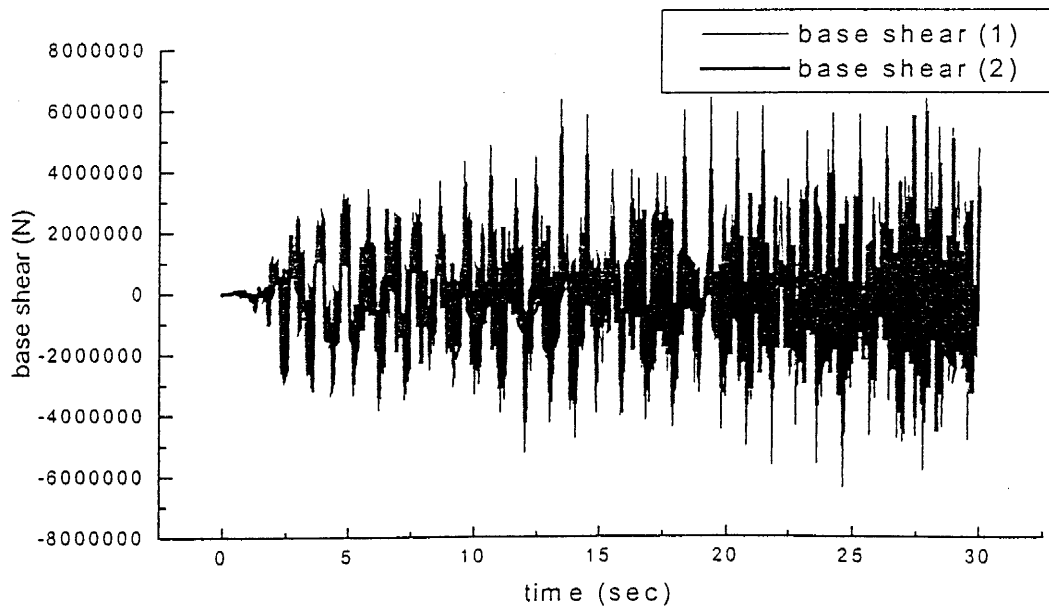
Στην αρχή τα αποτελέσματα του φαινομένου της ανάκλασης των κυμάτων στα εγκάρσια όρια του εδάφους στο οποίο δεν έχει γίνει χρήση των ιξωδοελαστικών απορροφητικών συνόρων δεν γίνονται αμέσως αντιληπτά έτσι από την ανάλυση προκύπτει ότι οι τιμές της τέμνουσας βάσης και της μετατόπισης της κορυφής της κατασκευής και για της δύο πιο πάνω περιπτώσεις (1 και 2) είναι σχεδόν ίδιες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι τάσεις που αναπτύσσονται στα εγκάρσια σύνορα του εδάφους και προκαλούν την απορρόφηση της ενέργειας του κύματος που φτάνει στην περιοχή αυτή είναι αρχικά πολύ μικρές, αφού η τιμή τους είναι ανάλογη της ταχύτητας των κόμβων που εφάπτονται πάνω στα εγκάρσια όρια και οι οποίες και αυτές αρχικά είναι πολύ μικρές. Καθώς όμως η ανάλυση συνεχίζεται, οι παραπάνω ταχύτητες αυξάνονται προκαλώντας ταυτόχρονα και μία αύξηση στην τιμή των συνοριακών τάσεων η οποία οδηγεί στις διαφορές που παρατηρούνται στις γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 5.2 και 5.3 μεταξύ των περιπτώσεων 1 και 2.

Η ανάλυση του παραπάνω συστήματος δεν επιτρέπει την πλήρη αναίρεση του φαινομένου της ανάκλασης των κυμάτων πάνω στα εγκάρσια όρια του εδαφικού στρώματος. Αυτό συμβαίνει γιατί στους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων στον χώρο αυτό δεν επιτρέπεται η κατακόρυφη μετατόπιση με αποτέλεσμα η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας να είναι συνεχώς μηδενική και άρα να μην μπορούν να αναπτυχθούν οι τάσεις εκείνες (σχέση (5.1)) που θα οδηγήσουν στην απορρόφηση της ενέργειας του κύματος κατά την διεύθυνση των συνόρων του εδαφικού στρώματος. Επαναλαμβάνουμε, λοιπόν, την παραπάνω ανάλυση δίνοντας δυνατότητα μετατόπισης στα παραπάνω σημεία και κατά τον κατακόρυφο άξονα έτσι ώστε να υπάρχει πλήρης αναίρεση του φαινομένου της ανάκλασης. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις πιο πάνω ανάλυσης για την τέμνουσα βάσης

της και την οριζόντια μετατόπιση της κατασκευής (τοιχώματος) φαίνονται στα Σχήματα 5.4 και 5.5



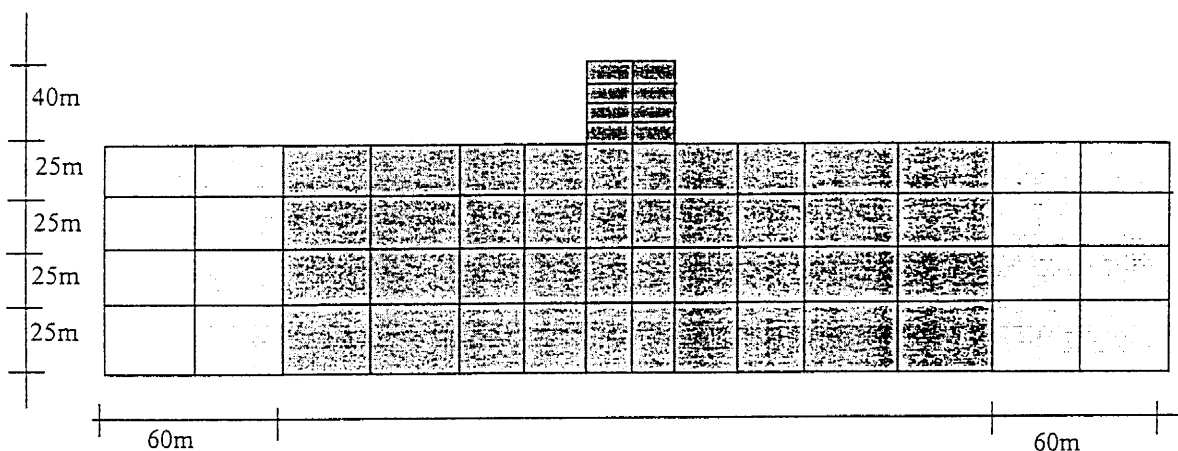
Σχήμα 5.4



Σχήμα 5.5

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά (Σχήμα 5.4 και 5.5) με τα προηγούμενα (Σχήμα 5.2 και 5.3) θα παρατηρήσουμε πως η μείωση των τιμών των αποτελεσμάτων της ανάλυσης λόγω της αποτελεσματικότερης αναίρεσης του φαινομένου της ανάκλασης των κυμάτων στα εγκάρσια σύνορα του εδαφικού στρώματος είναι στην περίπτωση αυτή πιο έντονη.

Στην συνέχεια αυξάνουμε το μήκος του εδαφικού στρώματος που λαμβάνει μέρος στην ανάλυση συνολικά κατά 120 μέτρα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.6:



Σχήμα 5.6

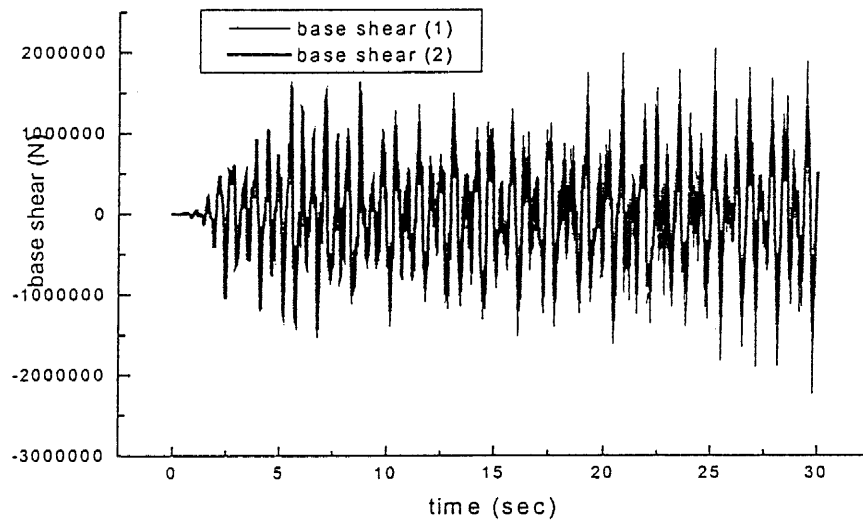
Στην συνέχεια το παραπάνω σύστημα εδάφους-κατασκευής αναλύεται όπως ακριβώς και προηγημένως για της πιο κάτω περιπτώσεις:

- 1) Περίπτωση εδαφικού στρώματος του οποίου οι κόμβοι των πεπερασμένων στοιχείων στα εγκάρσια συνόρων του εδαφικού στρώματος έχουν δυνατότητα μετατόπισης μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση (Σχήματα 5.7 και 5.8)
  - 1.α) λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των ιξωδοελαστικών απορροφητικών συνόρων (περίπτωση 2)
  - 1.β) μη λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των ιξωδοελαστικών απορροφητικών συνόρων (περίπτωση 1)
- 2) Περίπτωση εδαφικού στρώματος του οποίου οι κόμβοι των πεπερασμένων στοιχείων στα εγκάρσια όρια του εδαφικού στρώματος έχουν δυνατότητα

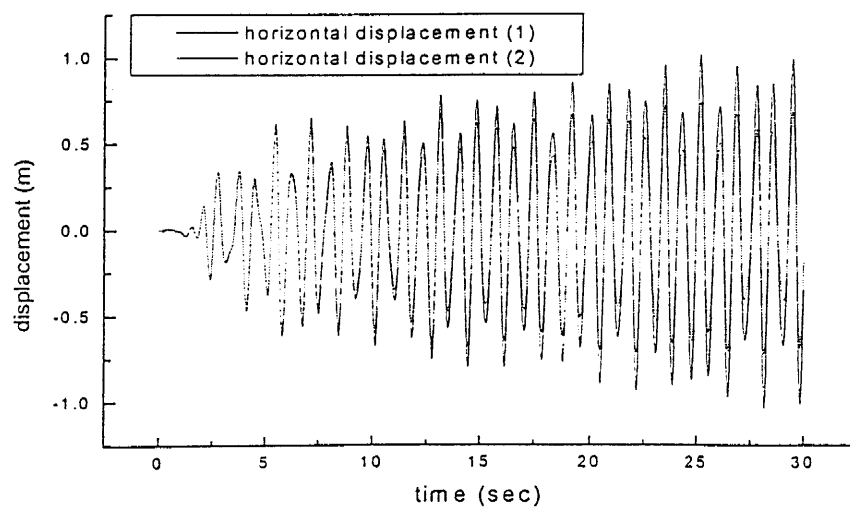
μετατόπισης κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση (σχήματα 5.8 και 5.10)

2.α) λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των ιξωδοελαστικών απορροφητικών συνόρων (περίπτωση 2)

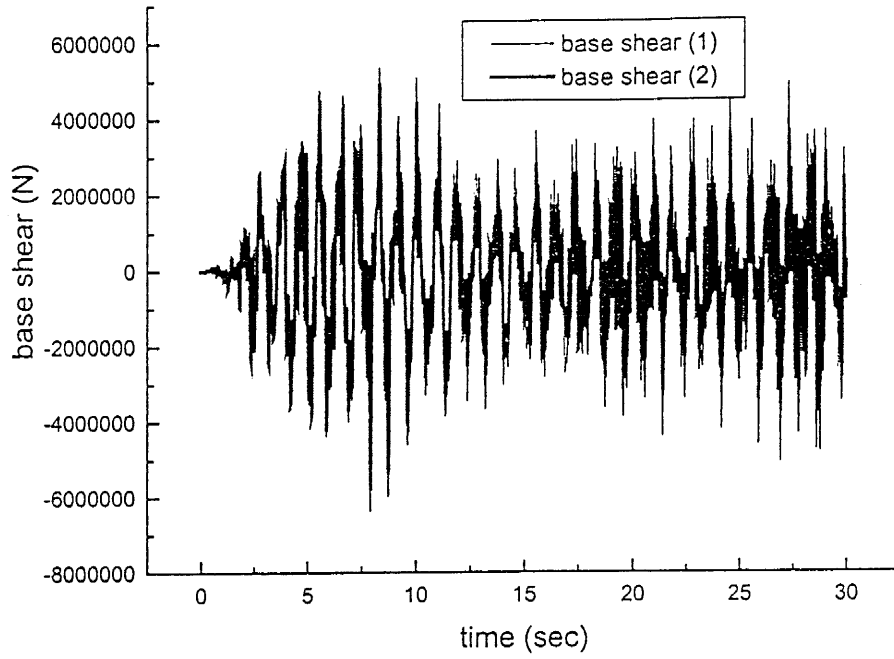
2.β) μη λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των ιξωδοελαστικών απορροφητικών συνόρων (περίπτωση 1)



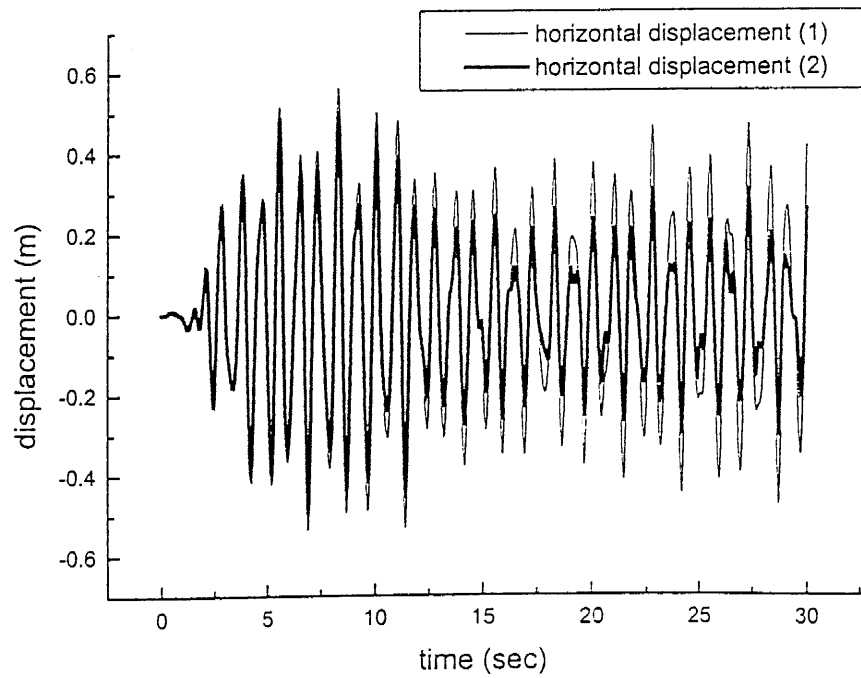
Σχήμα 5.7



Σχήμα 5.8



Σχήμα 5.9



Σχήμα 5.10

Αν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της τελευταίας ανάλυσης (Σχήματα 5.7 έως 5.10) με τα αποτελέσματα της προηγούμενης (Σχήματα 5.2 έως 5.5) θα παρατηρήσουμε αρχικά πως οι διαφορές στα αποτελέσματα λόγω της απορρόφησης ή όχι της ενέργειας των κυμάτων στα εγκάρσια σύνορα του εδαφικού στρώματος εμφανίζονται αργότερα. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγαλύτερης απόστασης που πρέπει να διανύσουν τα κύματα προκειμένου να επιστρέψουν στον χώρο των κόμβων εκείνων που παρατηρούμε.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Σύστημα εδάφους-κατασκευής υπό σεισμική δράση Διαμόρφωση προβλήματος

#### 6.1 Εισαγωγή

Το κτίριο του συστήματος εδάφους-κατασκευής που αναλύεται υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain condition) στην παρούσα εργασία είναι ένας πλαισιακός φορέας από οπλισμένο σκυρόδεμα. Όμως, το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται για την ανάλυση δεν παρέχει την δυνατότητα χρήσης ραβδόμορφων πεπερασμένων στοιχείων παρά μόνο επιφανειακών. Για τον λόγο αυτό ο πλαισιακός φορέας αντικαθίσταται με ένα ισοδύναμο, από άποψη απόκρισης, τοίχωμα του οποίου η ανάλυση γίνεται χρησιμοποιώντας επιφανειακά ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία με οκτώ κόμβους. Η επιλογή του τοιχώματος γίνεται έτσι ώστε να έχει την ίδια (προσεγγιστικά) μέγιστη τέμνουσα βάση με το αντίστοιχο πλαίσιο, ενώ η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση στην κορυφή του είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την αντίστοιχη μετατόπιση του πλαισιακού κτιρίου όταν και οι δύο φορείς υπόκεινται στον ίδιο σεισμό (που περιγράφεται στην ενότητα 6.6). Δίνεται δηλαδή έμφαση στην τέμνουσα βάση αφού αυτό το μέγεθος είναι το πλέον βασικό στους σεισμικούς κανονισμούς.

Στις επόμενες ενότητες αρχικά περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού της τέμνουσας βάσης και της μετατόπισης της άνω στάθμης του πλαισίου και, στην συνέχεια, ο τρόπος προσδιορισμού του ισοδύναμου τοιχώματος. Παρουσιάζονται επίσης τα χαρακτηριστικά του εδάφους και η διακριτοποίηση του συστήματος

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Σύστημα εδάφους-κατασκευής υπό σεισμική δράση

#### Διαμόρφωση προβλήματος

##### 6.1 Εισαγωγή

Το κτίριο του συστήματος εδάφους-κατασκευής που αναλύεται υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plain strain condition) στην παρούσα εργασία είναι ένας πλαισιακός φορέας από οπλισμένο σκυρόδεμα. Όμως, το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται για την ανάλυση δεν παρέχει την δυνατότητα χρήσης ραβδόμορφων πεπερασμένων στοιχείων παρά μόνο επιφανειακών. Για τον λόγο αυτό ο πλαισιακός φορέας αντικαθίσταται με ένα ισοδύναμο, από άποψη απόκρισης, τοίχωμα του οποίου η ανάλυση γίνεται χρησιμοποιώντας επιφανειακά ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία με οκτώ κόμβους. Η επιλογή του τοιχώματος γίνεται έτσι ώστε να έχει την ίδια (προσεγγιστικά) μέγιστη τέμνουσα βάση με το αντίστοιχο πλαίσιο, ενώ η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση στην κορυφή του είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την αντίστοιχη μετατόπιση του πλαισιακού κτιρίου όταν και οι δύο φορείς υπόκεινται στον ίδιο σεισμό (που περιγράφεται στην ενότητα 6.6). Δίνεται δηλαδή έμφαση στην τέμνουσα βάση αφού αυτό το μέγεθος είναι το πλέον βασικό στους σεισμικούς κανονισμούς.

Στις επόμενες ενότητες αρχικά περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού της τέμνουσας βάσης και της μετατόπισης της άνω στάθμης του πλαισίου και, στην συνέχεια, ο τρόπος προσδιορισμού του ισοδύναμου τοιχώματος. Παρουσιάζονται επίσης τα χαρακτηριστικά του εδάφους και η διακριτοποίηση του συστήματος

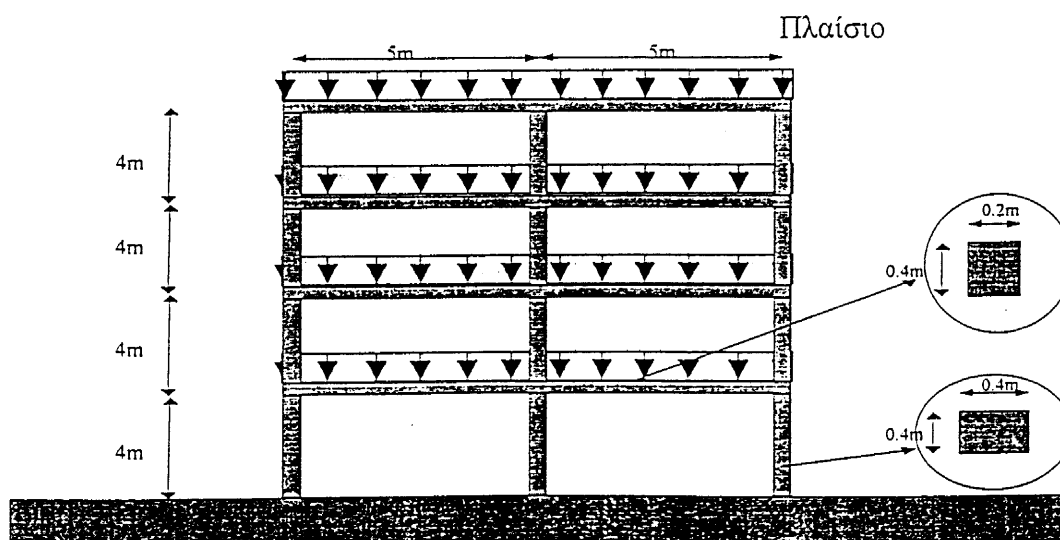
εδάφους-κατασκευής, καθώς και τα χαρακτηριστικά της σεισμικής φόρτισης στην οποία υποβάλλεται το σύστημα αυτό.

## 6.2 Προσδιορισμός εντατικών μεγεθών πλαισίου

### 6.2.1 Φορέας και λογισμικό ανάλυσης

Ο προσδιορισμός των εντατικών μεγεθών του φορέα φορέα γίνεται με την χρήση ενός άλλου λογισμικού, του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, STRUDL [ ] που έχει την ικανότητα να εκτελεί δυναμική γραμμική ανάλυση πλαισίων κάνοντας χρήση ραβδόμορφων πεπερασμένων στοιχείων. Η οριζόντια σεισμική δράση που περιγράφεται στην ενότητα 6.7 ασκείται κατ'ευθείαν στην βάση του πλαισίου χωρίς την παρεμβολή εδαφικού στρώματος. Το Σχήμα 6.1 παρουσιάζει αναλυτικά όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλαισιακού φορέα από οπλισμένο σκυρόδεμα που πρόκειται να αναλυθεί. Το πλαίσιο αυτό υπόκειται εκτός του σεισμού και σε κατακόρυφη φόρτιση από ίδιο βάρος και κινητά φορτία (7.48 t/m).

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας E	Λόγος Poisson $\nu$	Ειδικό βάρος $\rho$
Σκυρόδεμα	3000000 t/m	0,17	2,4 t/m



Σχήμα 6.1

Γεωμετρία και φόρτιση πλαισιακού κτιρίου

## 6.2.2 Εισαγωγή δεδομένων

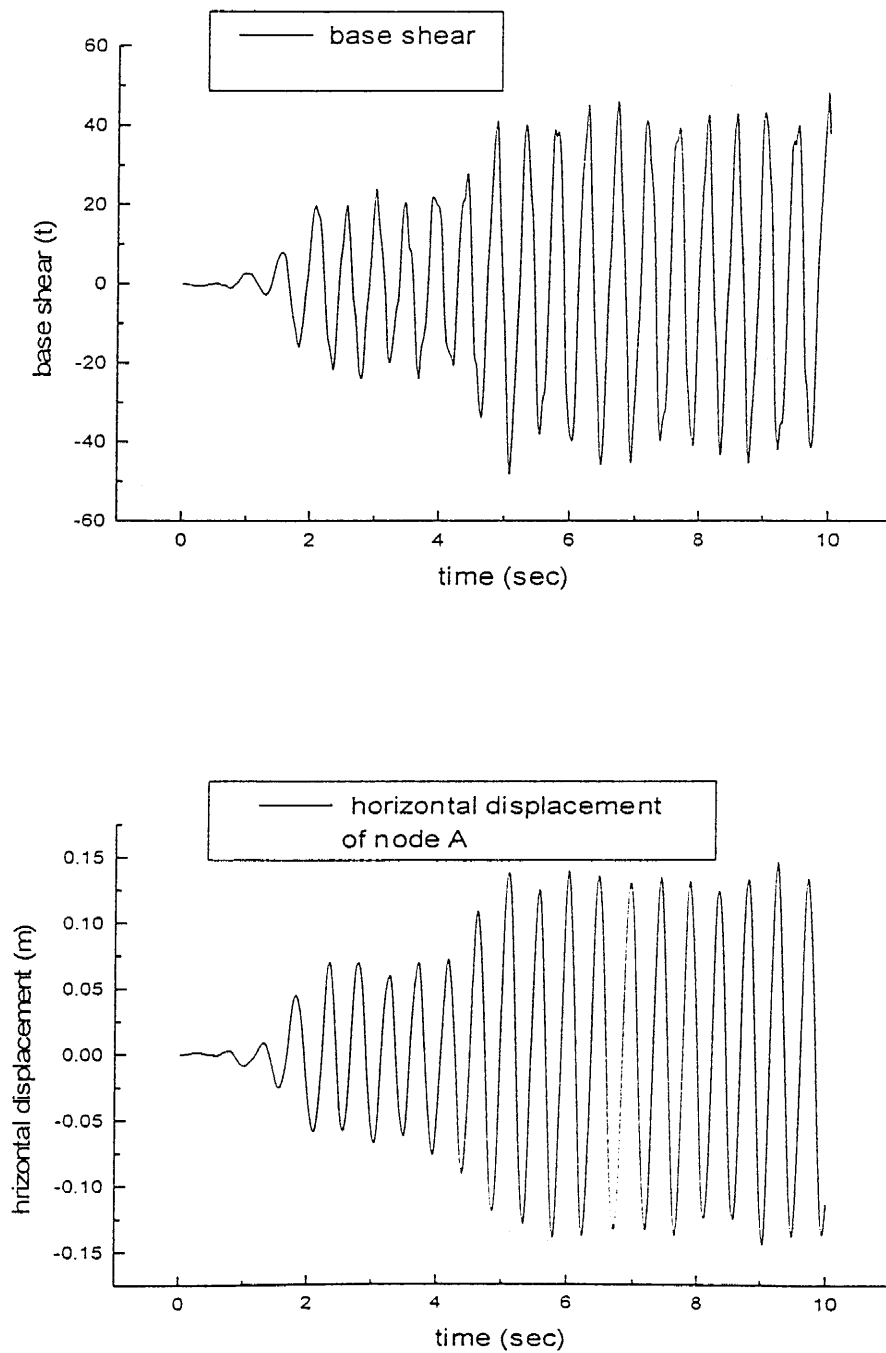
Τα στοιχεία που περιέχονται στο Σχήμα 6.1 χρησιμοποιούνται στην ανάλυση με την μορφή που περιγράφεται στο παρακάτω αρχείο

```
STRU DL 'QAKENEW3'
TYPE PLANE FRAME
$TYPE SPACE FRAME
MATERIAL CONCRETE
UNITS M TONS RAD
$CONSTANTS
$E 3.E6 ALL
$G 1.2E7 ALL
$POISSON 0.25 ALL
$DENSITY 2.4 ALL
*****GRID*****
GRID DEFINITION X 2 AT 5 Y 4 AT 4 Z 1 AT 1
*****YPOSTILOMATA*****
GRID MEMBERS X 1 2 3 Z 1 BOUNDS 1 2 DIM RECT 0.4 0.4 sw 2.5
GRID MEMBERS X 1 2 3 Z 1 BOUNDS 2 3 DIM RECT 0.4 0.4 sw 2.5
GRID MEMBERS X 1 2 3 Z 1 BOUNDS 3 4 DIM RECT 0.4 0.4 sw 2.5
GRID MEMBERS X 1 2 3 Z 1 BOUNDS 4 5 DIM RECT 0.4 0.4 sw 2.5
*****DOKARIA*****
GRID MEMBERS Z 1 Y 2 3 4 5 BOUNDS 1 2 DIM RECT B 0.2 H 0.4 sw 37.4
GRID MEMBERS Z 1 Y 2 3 4 5 BOUNDS 2 3 DIM RECT B 0.2 H 0.4 sw 37.4
$*****DYNAMIC DEGREES OF FREEDOM*****
end of definition
status support joint 1 6 11
TRANSIENT LOADING 1 'EL CENTRO ACCLELERATIONS'
SUPORT ACCELERATION
TRANSLATION X FILE 'ELCENTRO' FACTOR 1.00
INTEGRATE FROM 0. TO 10. AT 0.01
END
dynamic degrees of freedom
joints 1 to 15 displ x
joints 1 to 15 displ y
INERTIA OF JOINTS LUMPED
$inertia of joints consistant
STIFFNESS ANALYSIS REDUCE BAND
$CHECK CONSISTENCY
DYNAMIC ANALYSIS MODAL
$dynamic analysis physical newmark 0.25
```

```
consistency check
$UNITS METERS newtons kg RAD SEC CENTIGRADE
units meters t rad sec centigrade
LIST DYNAMIC modal PART FAC
$LIST DYNAMIC EIGENVALUES EIGENVECTORS MASS PART FAC
$PRINT DYNAMIC MATRIX
$PRINT DYNAMIC DATA
COMPUTE TRANSIENT FORCES TIMES FROM 0. TO 10. 0.01
COMPUTE TRANSIENT DISPLACEMENTS TIMES FROM 0. TO 10. 0.01
COMPUTE TRANSIENT REACTIONS TIMES FROM 0. TO 10. 0.01
LIST TRANSIENT REACTIONS TIME FROM 0. TO 10. 0.05
$LIST TRANSIENT FORCES TIMES FROM 0. TO 10. 0.02 NODES 1 members 1
$LIST TRANSIENT FORCES TIMES FROM 0. TO 10. 0.02 NODES 6 members 5
$LIST TRANSIENT FORCES TIMES FROM 0. TO 10. 0.02 NODES 11 members 9
LIST TRANSIENT DISPLACEMENTS TIMES FROM 0. TO 10. 0.05 NODES 5
SAVE 'dip'
finish
```

### 6.2.3 Αποτελέσματα ανάλυσης

Η χρονική μεταβολή της τέμνουσας βάσης και αυτή της μετατόπισης του σημείου A (βλ. Σχήμα 6.1) περιγράφονται στο Σχήμα 6.2



Σχήμα 6.2

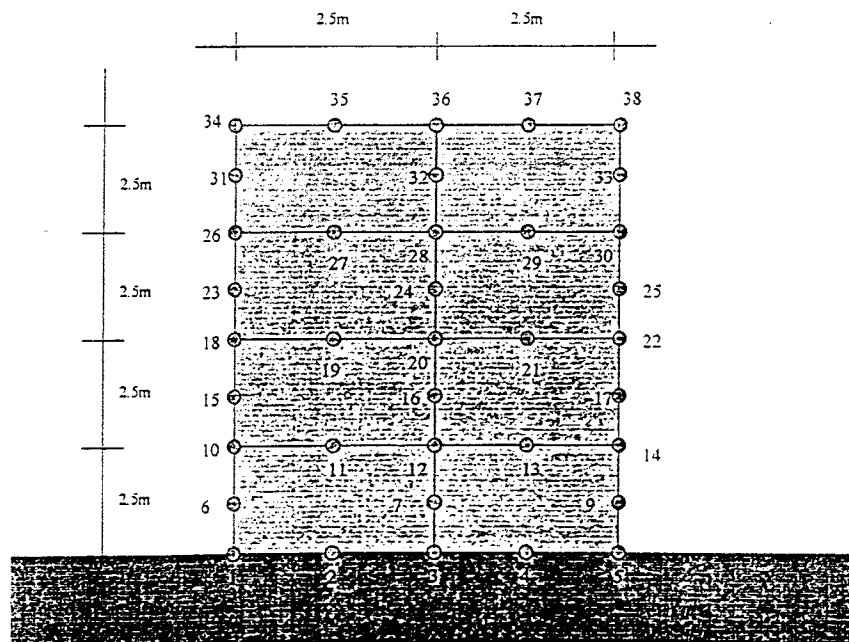
### 6.3 Προσδιορισμός ισοδύναμου τοιχώματος

Επιλέχθηκε ένα τοίχωμα ύψους 10 μέτρων, πλάτους 5 μέτρων και πάχους 1 μέτρου. Χρησιμοποιήθηκε μια επαναληπτική διαδικασία για να προσδιοριστεί το μέτρο ελαστικότητας και η πυκνότητα του υλικού του τοιχώματος έτσι ώστε το τοίχωμα να έχει απόκριση παρόμοια με αυτή του πλαισίου που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2. Ο υπολογισμός της δυναμικής απόκρισης του τοιχώματος έγινε με γραμμική ελαστική ανάλυση χρησιμοποιώντας το λογισμικό Mixdyp [1].

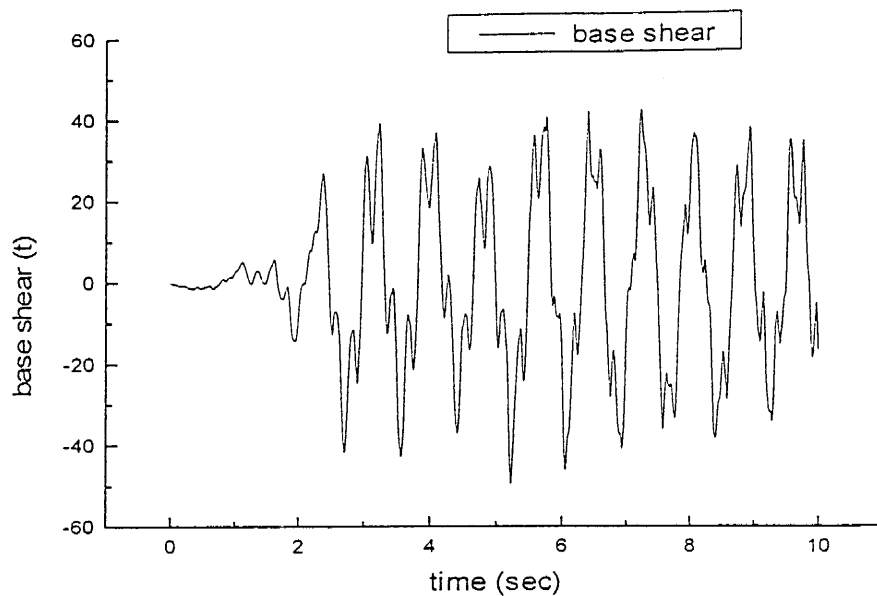
Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας, δηλαδή οι ιδιότητες του υλικού, οι διαστάσεις του τοιχώματος καθώς και η μεταβολή με το χρόνο της τέμνουσας βάσης και της μετατόπισης του φαίνονται στον πίνακα 6.1 και στα Σχήματα 6.3 και 6.4 αντίστοιχα.

Μέτρο ελαστικότητας $E$	Λόγος Poisson $\nu$	Πυκνότητα $\rho$
4300 KN/m <sup>2</sup>	0.2	1350Kg/m <sup>3</sup>

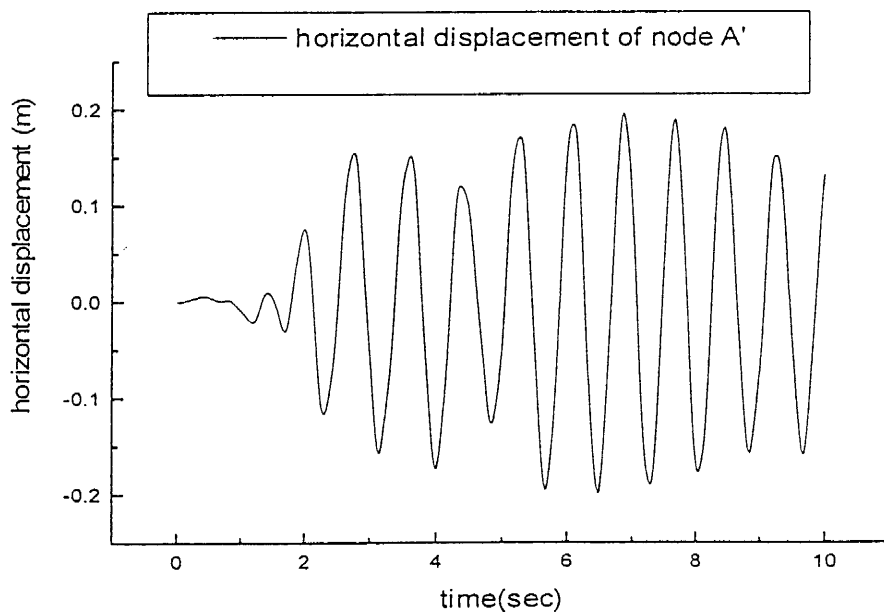
Πίνακας 6.1



Σχήμα 6.3



Σχήμα 6.4α



Σχήμα 6.4β

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη γραμμική ανάλυση του τοιχώματος εισήχθησαν στο πρόγραμμα με τη μορφή που φαίνεται στο παρακάτω αρχείο.



```

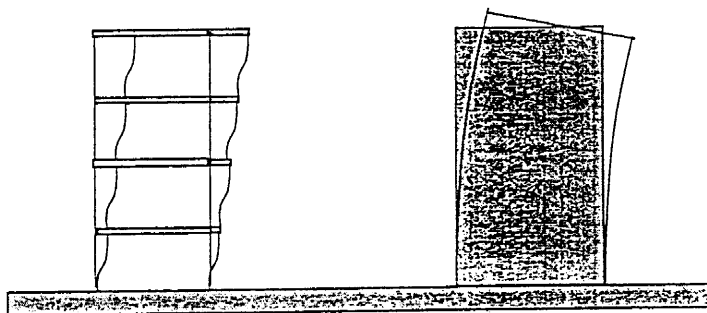
37,8,2,1
5,2,8,11,2,2,3,4,0,0,0,2,0
1 1 1 2 3 7 11 10 9 6
2 1 3 4 5 8 13 12 11 7
3 1 9 10 11 15 19 18 17 14
4 1 11 12 13 16 21 20 19 15
5 1 17 18 19 23 27 26 25 22
6 1 19 20 21 24 29 28 27 23
7 1 25 26 27 31 35 34 33 30
8 1 27 28 29 32 37 36 35 31
1 0.0 0.0
2 1.25 0.0
3 2.5 0.0
4 3.75 0.0
5 5.0 0.0
6 0.0 1.25
7 2.5 1.25
8 5.0 1.25
9 0.0 2.5
10 1.25 2.5
11 2.5 2.5
12 3.75 2.5
13 5.0 2.5
14 0.0 3.75
15 2.5 3.75
16 5.0 3.75
17 0.0 5.0
18 1.25 5.0
19 2.5 5.0
20 3.75 5.0
21 5.0 5.0
22 0.0 6.25
23 2.5 6.25
24 5.0 6.25
25 0.0 7.5
26 1.25 7.5
27 2.5 7.5
28 3.75 7.5
29 5.0 7.5
30 0.0 8.75
31 2.5 8.75
32 5.0 8.75
33 0.0 10.0
34 1.25 10.0
35 2.5 10.0
36 3.75 10.0
37 5.0 10.0
1 1 1
2 1 1
3 1 1
4 1 1
5 1 1
1
4300,0.2,10.0,0.135,0.0,40000000.0,0.0,0.0
10000,1,1
10000,10,500,1,0,2668,0,2,0,0,1
0.001,53.36,0.02,0.0,0,0,0,0,0,0
0,0,0
37
2
2
2
2
2
2
2
2

```

```
2
2
37 0.0 0.0
37 0.0 0.0
jimmy
0,0,0,0
0.0,1.0
```

#### 6.4 Σύγκριση αποκρίσεων πλαισίου και τοιχώματος

Από την παραπάνω παραμετρική μελέτη δεν θα ήταν δυνατό να προκύψει ένα τοίχωμα με απόκριση όμοια με αυτή του πλαισίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι παραπάνω κατασκευές (πλαισιακό κτίριο και τοίχωμα) συμπεριφέρονται με διαφορετικό τρόπο κάτω από την επίδραση σεισμικής φόρτισης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.5.



Σχήμα 6.5

Αυτό που τελικά επιτεύχθηκε είναι οι κατασκευές να έχουν περίπου ίδιες μέγιστες τιμές της τέμνουσας βάσης και παραπλήσιες μέγιστες τιμές μετατόπισης της άνω στάθμης τους κάτω από την επίδραση της σεισμικής φόρτισης.

#### 6.5 Χαρακτηριστικά εδάφους

Τα εδάφη που επιλέχθηκαν για να χρησιμοποιηθούν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι ένα μέσο αμμώδες έδαφος (μη συνεκτικό) και ένα μέσο

αργιλικό έδαφος (συνεκτικό). Τα χαρακτηριστικά των εδαφών αυτών δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

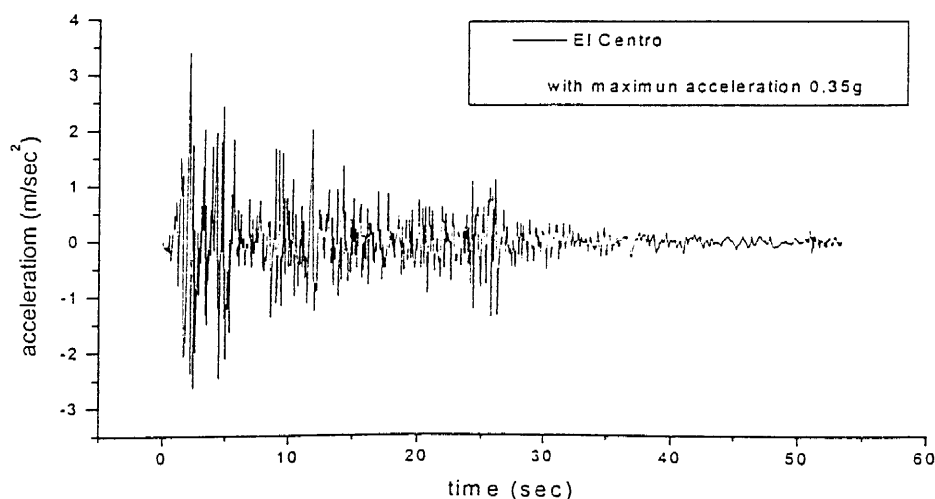
Έδαφος		Αμμώδες	Αργιλικό
Μέτρο ελαστικότητας	E	14000 t/m <sup>2</sup>	14500 t/m <sup>2</sup>
Λόγος Poisson	$\nu$	0.25	0.45
Γωνία τριβής	$\phi$	36°	0°
Συνεκτικότητα	c	0	10 t/m <sup>2</sup>
Ειδικό βάρος	$\gamma$	1.7 t/m <sup>3</sup>	1.9 t/m <sup>3</sup>

Πίνακας 6.3

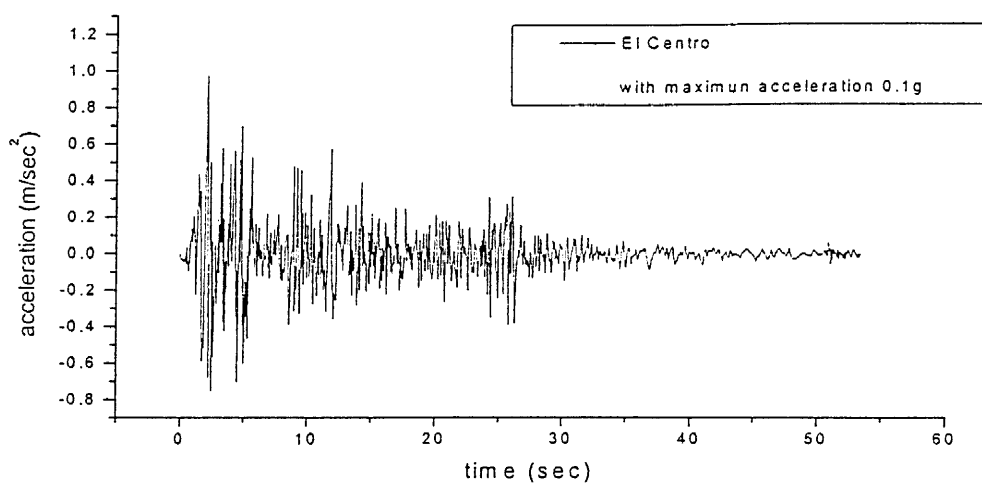
### 6.6 Σεισμική φόρτιση

Η σεισμική φόρτιση που χρησιμοποιείται στην ανάλυση είναι αυτή του El Centro και εισάγεται στο σύστημα εδάφους-κατασκευής με την μορφή επιτάχυνσιογραφήματος. Η ανάλυση επαναλαμβάνεται για τρεις τιμές της μέγιστης επιτάχυνσης του σεισμού δηλαδή για 0,1g, 0,35g, και 0,6g.

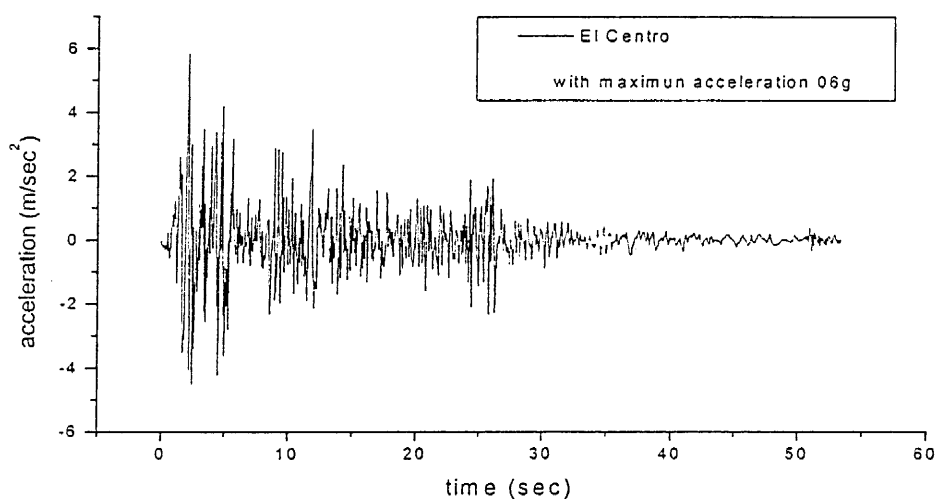
Τα επιταχυνσιογραφήματα των παραπάνω φορτίσεων φαίνονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήματα 6.6):



Σχήμα 6.6 α



Σχήμα 6.6 β

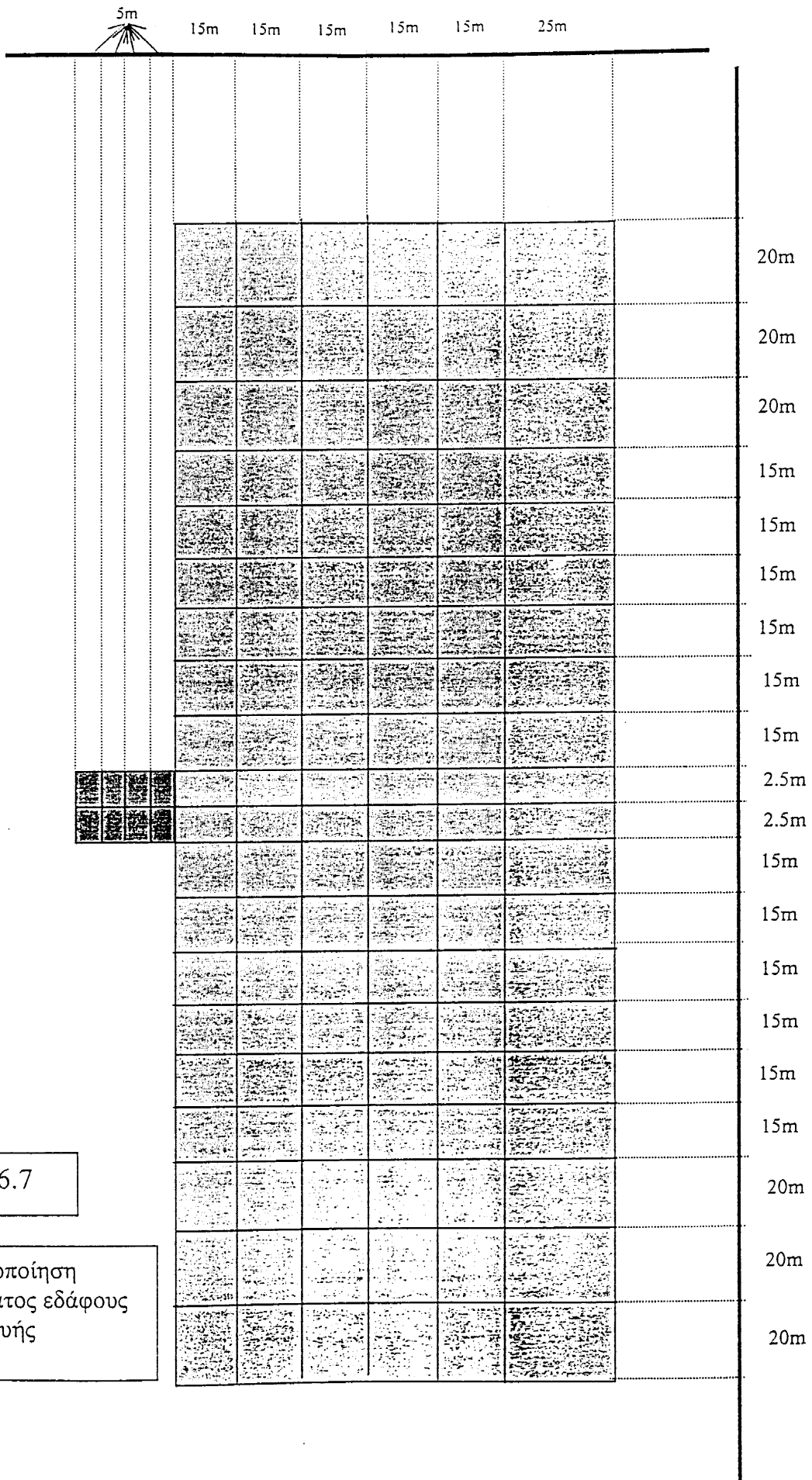


Σχήμα 6.6 γ

## 6.7 Διακριτοποίηση συστήματος εδάφους-κατασκευής

Προκειμένου να γίνει ανάλυση του συστήματος εδάφους-κατασκευής πρέπει αυτό να χωριστεί σε μικρότερα τμήματα, που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Η επιλογή των διαστάσεων αυτών γίνεται με στόχο την οικονομία της ανάλυσης και την καλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η επιλογή πολύ μικρών διαστάσεων οδηγεί

στη χρήση ενός μεγάλου αριθμού πεπερασμένων στοιχείων και ενός πολύ μικρού χρονικού βήματος, κάνοντας έτσι την ανάλυσή ακριβή και χρονοβόρα. Η επιλογή, όμως, μεγάλων διαστάσεων δεν επιτρέπει στα πεπερασμένα στοιχεία να περιγράψουν με ικανοποιητική ακρίβεια τη συμπεριφορά του εδαφικού υλικού υπό τη δράση του σεισμικού κύματος. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παρατηρήσεις το εξεταζόμενο σύστημα διακριτοποιείται (δηλαδή χωρίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία) όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7.



Σχήμα 6.7

Διακριτοποίηση  
 συστήματος εδάφους  
 κατασκευής

Ο υπολογισμός των διαστάσεων των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται με βάση την ταχύτητα διάδοσης του κύματος μέσα στο εδαφικό υλικό και τα χαρακτηριστικά της σεισμικής φορτίσεως.

Ο υπολογισμός της ταχύτητας του κύματος εξαρτάται από της ιδιότητες του εδαφικού υλικού που αποτελεί και το μέσο διάδοσης και γίνεται με βάση την σχέση:

$$Cp = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (6.1)$$

όπου

$$\lambda = \frac{E \cdot \nu}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} \quad (6.2)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (6.3)$$

με E να είναι το μέτρο ελαστικότητας, ν ο λόγος Poisson και ρ η πυκνότητα του εδάφους

Για την περίπτωση ενός μέσου αμμώδους εδάφους (πίνακας 6.3) οι παραπάνω σχέσεις (6.1)-(6.3) δίνουν:

$$\lambda = \frac{140000000(N/m^2) \cdot 0.25}{(1 + 0.25)(1 - 2 \cdot 0.25)} = 56000000N/m^2 \quad (6.4)$$

$$\mu = \frac{140000000(N/m^2)}{2(1 + 0.25)} = 56000000N/m^2 \quad (6.5)$$

$$Cp = \sqrt{\frac{56000000(N/m^2) + 2 \cdot 56000000(N/m^2)}{1733(Kg/m^3)}} = 311.36m/sec \quad (6.6)$$

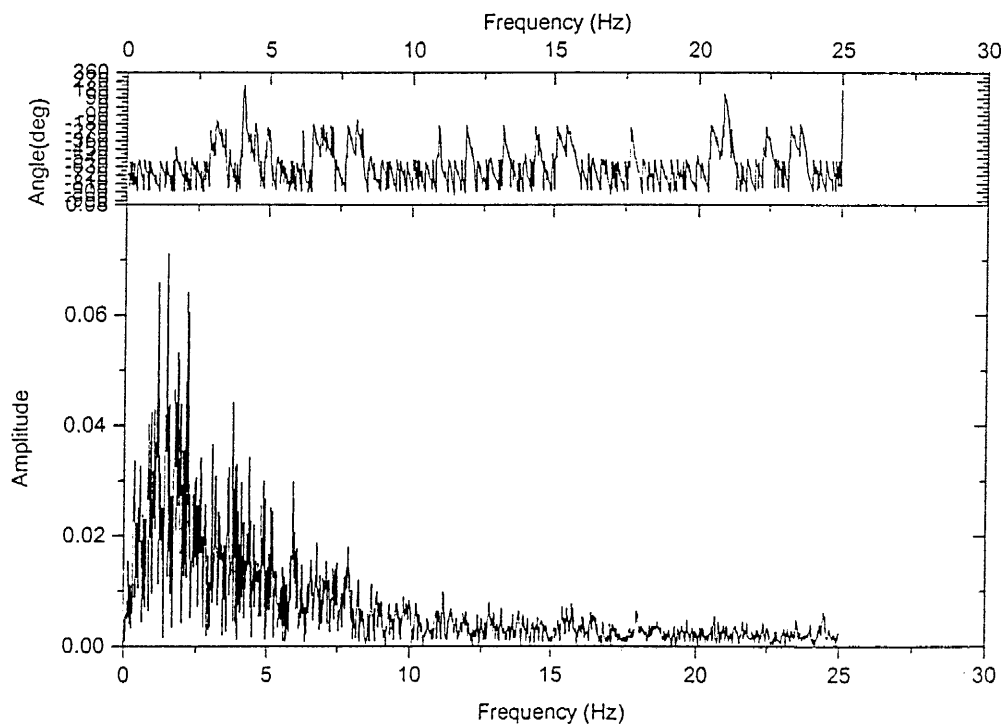
Για την περίπτωση ενός μέσου αργιλικού εδάφους (πίνακας 6.3) οι παραπάνω σχέσεις (6.1)-(6.3)δίνουν:

$$\lambda = \frac{145000000(N/m^2) \cdot 0.45}{(1 + 0.45)(1 - 2 \cdot 0.45)} = 450000000N/m^2 \quad (6.7)$$

$$\mu = \frac{145000000(N/m^2)}{2(1 + 0.45)} = 50000000N/m^2 \quad (6.8)$$

$$Cp = \sqrt{\frac{450000000(N/m^2) + 2 \cdot 50000000(N/m^2)}{1936.8(Kg/m^3)}} = 532.89m/sec \quad (6.9)$$

Στην συνέχεια κάνοντας χρήση του μετασχηματισμού Fourier στο επιταχυνσιογράφημα του σεισμού (El-Centro) προκύπτει το πιο κάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.8):



Σχήμα 6.8

Εύρος της συχνότητας για το επιταχυνσιογράφημα του El Centro



Από το διάγραμμα του Σχήματος 6.8 είναι δυνατό χονδρικά να βρεθεί η μέγιστη κυκλική συχνότητα του σεισμικού κύματος η οποία επηρεάζει το σύστημα εδάφους-κατασκευής (cut off frequency  $\omega_{co}$ ). Κύματα με μεγαλύτερη συχνότητα από αυτή υποτίθεται πως δεν επηρεάζουν σημαντικά την συμπεριφορά του συστήματος λόγω της απόσβεσης του υλικού. Ο προσδιορισμός της  $\omega_{co}$  γίνεται ακολουθώντας ορισμένους πρακτικούς κανόνες [3]. Έτσι, αρχικά γίνεται προσδιορισμός της συχνότητας εκείνης για την οποία έχουμε μέγιστη επιτάχυνση  $\omega_{\mu}$  (από το Σχήμα 6.8  $\omega_{\mu} = 1,75 \text{ rad/sec}$ ). Στην συνέχεια βρίσκουμε προσεγγιστικά την τιμή της  $\omega_{co}$  από την ακόλουθη σχέση:

$$\omega_{co} = 4 \cdot \omega_{\mu} \quad (6.10)$$

Από την σχέση (6.10) προκύπτει ότι  $\omega_{co} = 7 \text{ rad/sec}$

Για να γίνει στη συνέχεια προσδιορισμός των διαστάσεων των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει πρώτα να υπολογιστεί το μήκος του κύματος. Το μήκος αυτό δίνεται προσεγγιστικά από την παρακάτω σχέση

$$L_w = \frac{2 \cdot \pi \cdot Cp}{\omega_{co}} \quad (6.11)$$

Κάνοντας χρήση της παραπάνω τιμής  $L_w$  είναι δυνατό να γίνει προσδιορισμός του μεγέθους του πεπερασμένου στοιχείου που θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση από τη σχέση [3]:

$$L_e = \frac{L_w}{a} \quad (6.12)$$

όπου  $a$  είναι μια σταθερά της οποίας η τιμή κυμαίνεται από 6 μέχρι 12.

Για την περίπτωση ενός μέσου αμμώδους εδάφους προκύπτει:

$$L_w = \frac{2 \cdot \pi \cdot 311.36}{7} = 279.3344m$$

(6.13)

$$L_e = \frac{279.3344}{a} \approx 28m$$

Για την περίπτωση ενός μέσου αργίλικού εδάφους προκύπτει:

$$L_w = \frac{2 \cdot \pi \cdot 532.89}{7} = 478.1m$$

(6.14)

$$L_e = \frac{478.1}{a} \approx 47m$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### Ανάλυση συστήματος εδάφους-κατασκευής για την περίπτωση αμμώδους εδάφους

#### 7.1 Γενικά, αρχεία δεδομένων

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του συστήματος εδάφους-κατασκευής για την περίπτωση που η ελαστική κατασκευή εδράζεται πάνω σε ένα μέσο αμμώδες έδαφος. Όλα τα χαρακτηριστικά του εδαφικού στρώματος και της κατασκευής έχουν παρουσιαστεί αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ελαστικής ανάλυσης του εξεταζόμενου συστήματος και στην συνέχεια αυτών που προκύπτουν από την ανελαστική ανάλυση του εδάφους. Το παραπάνω σύστημα αναλύεται μία φορά θεωρώντας πως οι κόμβοι που βρίσκονται πάνω στα εγκάρσια όρια του εδάφους έχουν δυνατότητα μετατόπισης μόνο κατά τον οριζόντιο άξονα και μια δεύτερη θεωρώντας πως έχουν δυνατότητα μετατόπισης και κατά τον οριζόντιο και κατά τον κατακόρυφο άξονα.

Στην ανάλυση γίνεται χρήση του επιταχσιογραφήματος του El Centro του οποίου οι τιμές πολλαπλασιάζονται με ορισμένους συντελεστές ώστε η μέγιστη επιτάχυνση να γίνει 10%, 35% και 60% της επιτάχυνσης της βαρύτητας της γης. Ταυτόχρονα γίνεται και χρήση των ιξωδοελαστικών απορροφητικών συνόρων που παρουσιάστηκαν στο πέμπτο κεφάλαιο.

Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες είναι αυτά της τέμνουσας βάσης και της μετατόπισης της κορυφής της ελαστικής κατασκευής.

Πριν όμως γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται τα δύο αρχεία δεδομένων με τα οποία τροφοδοτούμε το λογισμικό προκειμένου να εκτελεστεί η ανάλυση του συστήματος αμμώδους εδάφους και ελαστικής κατασκευής.

A) Περίπτωση δυνατότητας μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση

445,128,2,2  
65,2,8,11,3,2,3,4,0,0,1,3,0  
1 1 1 2 3 43 65 64 63 42  
2 1 3 4 5 44 67 66 65 43  
3 1 5 6 7 45 69 68 67 44  
4 1 7 8 9 46 71 70 69 45  
5 1 9 10 11 47 73 72 71 46  
6 1 11 12 13 48 75 74 73 47  
7 1 13 14 15 49 77 76 75 48  
8 1 15 16 17 50 79 78 77 49  
9 1 17 18 19 51 81 80 79 50  
10 1 19 20 21 52 83 82 81 51  
11 1 21 22 23 53 85 84 83 52  
12 1 23 24 25 54 87 86 85 53  
13 1 25 26 27 55 89 88 87 54  
14 1 27 28 29 56 91 90 89 55  
15 1 29 30 31 57 93 92 91 56  
16 1 31 32 33 58 95 94 93 57  
17 1 33 34 35 59 97 96 95 58  
18 1 35 36 37 60 99 98 97 59  
19 1 37 38 39 61 101 100 99 60  
20 1 39 40 41 62 103 102 100 61  
21 1 63 64 65 105 127 126 125 104  
22 1 65 66 67 106 129 128 127 105  
23 1 67 68 69 107 131 130 129 106  
24 1 69 70 71 108 133 132 131 107  
25 1 71 72 73 109 135 134 133 108  
26 1 73 74 75 110 137 136 135 109  
27 1 75 76 77 111 139 138 137 110  
28 1 77 78 79 112 141 140 139 111  
29 1 79 80 81 113 143 142 141 112  
30 1 81 82 83 114 145 144 143 113  
31 1 83 84 85 115 147 146 145 114  
32 1 85 86 87 116 149 148 147 115  
33 1 87 88 89 117 151 150 149 116  
34 1 89 90 91 118 153 152 151 117  
35 1 91 92 93 119 155 154 153 118  
36 1 93 94 95 120 157 156 155 119  
37 1 95 96 97 121 159 158 157 120  
38 1 97 98 99 122 161 160 159 121  
39 1 99 100 101 123 163 162 161 122  
40 1 101 102 103 124 165 164 163 123  
41 1 125 126 127 167 189 188 187 166  
42 1 127 128 129 168 191 190 189 167  
43 1 129 130 131 169 193 192 191 168  
44 1 131 132 135 170 195 194 193 169  
45 1 133 134 135 171 197 196 195 170  
46 1 135 136 137 172 199 198 197 171

47 1 137 138 139 173 201 200 199 172  
48 1 139 140 141 174 203 202 201 173  
49 1 141 142 143 175 205 204 203 174  
50 1 143 144 145 176 207 206 205 175  
51 1 145 146 147 177 209 208 207 176  
52 1 147 148 149 178 211 210 209 177  
53 1 149 150 151 179 213 212 211 178  
54 1 151 152 153 180 215 214 213 179  
55 1 153 154 155 181 217 216 215 180  
56 1 155 156 157 182 219 218 217 181  
57 1 157 158 159 183 221 220 219 182  
58 1 159 160 161 184 223 222 221 183  
59 1 161 162 163 185 225 224 223 184  
60 1 163 164 165 186 227 226 225 185  
61 1 187 188 189 229 251 250 249 228  
62 1 189 190 191 230 253 252 251 229  
63 1 191 192 193 231 255 254 253 230  
64 1 193 194 195 232 257 256 255 231  
65 1 195 196 197 233 259 258 257 232  
66 1 197 198 199 234 261 260 259 233  
67 1 199 200 201 235 263 262 261 234  
68 1 201 202 203 236 265 264 263 235  
69 1 203 204 205 237 267 266 265 236  
70 1 205 206 207 238 269 268 267 237  
71 1 207 208 209 239 271 270 269 238  
72 1 209 210 211 240 273 272 271 239  
73 1 211 212 213 241 275 274 273 240  
74 1 213 214 215 242 277 276 275 241  
75 1 215 216 217 243 279 278 277 242  
76 1 217 218 219 244 281 280 279 243  
77 1 219 220 221 245 283 282 281 244  
78 1 221 222 223 246 285 284 283 245  
79 1 223 224 225 247 287 286 285 246  
80 1 225 226 227 248 289 288 287 247  
81 1 249 250 251 291 313 312 311 290  
82 1 251 252 253 292 315 314 313 291  
83 1 253 254 255 293 317 316 315 292  
84 1 255 256 257 294 319 318 317 293  
85 1 257 258 259 295 321 320 319 294  
86 1 259 260 261 269 323 322 321 295  
87 1 261 262 263 297 325 324 323 296  
88 1 263 264 265 298 327 326 325 297  
89 1 265 266 267 299 329 328 327 298  
90 1 267 268 269 300 331 330 329 299  
91 1 269 270 271 301 333 332 331 300  
92 1 271 272 273 302 335 334 333 301  
93 1 273 274 275 303 337 336 335 302  
94 1 275 276 277 304 339 338 337 303  
95 1 277 278 279 305 341 340 339 304  
96 1 279 280 281 306 343 342 341 305  
97 1 281 282 283 307 345 344 343 306  
98 1 283 284 285 308 347 346 345 307  
99 1 285 286 287 309 349 348 347 308  
100 1 287 288 289 310 351 350 349 309  
101 1 311 312 313 353 375 374 373 352  
102 1 313 314 315 354 377 376 375 353  
103 1 315 316 317 355 379 378 377 354  
104 1 317 318 319 356 381 380 379 355  
105 1 319 320 321 357 383 382 381 356  
106 1 321 322 323 358 385 384 383 357  
107 1 323 324 325 359 387 386 385 358  
108 1 325 326 327 360 389 388 387 359

109 1 327 328 329 361 391 390 389 360  
 110 1 329 330 331 362 393 392 391 361  
 111 1 331 332 333 363 395 394 393 362  
 112 1 333 334 335 364 397 396 395 363  
 113 1 335 336 337 365 399 398 397 364  
 114 1 337 338 339 366 401 400 399 365  
 115 1 339 340 341 367 403 402 401 366  
 116 1 341 342 343 368 405 404 403 367  
 117 1 343 344 345 369 407 406 405 368  
 118 1 345 346 347 370 409 408 407 369  
 119 1 347 348 349 371 411 410 409 370  
 120 1 349 350 351 372 413 412 411 371  
 121 2 391 392 393 415 419 418 417 414  
 122 2 393 394 395 416 421 420 419 415  
 123 2 417 418 419 423 427 426 425 422  
 124 2 419 420 421 424 429 428 427 423  
 125 2 425 426 427 431 435 434 433 430  
 126 2 427 428 429 432 437 436 435 431  
 127 2 433 434 435 439 443 442 441 438  
 128 2 435 436 437 440 445 444 443 439  
 1 0. 0.  
 2 10. 0.  
 3 20. 0.  
 4 30. 0.  
 5 40. 0.  
 6 50. 0.  
 7 60. 0.  
 8 67.5 0.  
 9 75. 0.  
 10 82.5 0.  
 11 90. 0.  
 12 97.5 0.  
 13 105. 0.  
 14 112.5 0.  
 15 120. 0.  
 16 127.5 0.  
 17 135. 0.  
 18 142.5 0.  
 19 150. 0.  
 20 151.25 0.  
 21 152.5 0.  
 22 153.75 0.  
 23 155. 0.  
 24 162.5 0.  
 25 170. 0.  
 26 177.5 0.  
 27 185. 0.  
 28 192.5 0.  
 29 200. 0.  
 30 207.5 0.  
 31 215. 0.  
 32 222.5 0.  
 33 230. 0.  
 34 237.5 0.  
 35 245. 0.  
 36 255. 0.  
 37 265. 0.  
 38 275.0 0.  
 39 285. 0.  
 40 295. 0.  
 41 305. 0.  
 42 0. 12.5

43	20.	12.5
44	40.	12.5
45	60.	12.5
46	75.	12.5
47	90.	12.5
48	105.	12.5
49	120.	12.5
50	135.	12.5
51	150.	12.5
52	152.5	12.5
53	155.	12.5
54	170.	12.5
55	185.	12.5
56	200.	12.5
57	215.	12.5
58	230.	12.5
59	245.	12.5
60	265.	12.5
61	285.	12.5
62	305.	12.5
63	0.	25.
64	10.	25.
65	20.	25.
66	30.	25.
67	40.	25.
68	50.	25.
69	60.	25.
70	67.5	25.
71	75.	25.
72	82.5	25.
73	90.	25.
74	97.5	25.
75	105.	25.
76	112.5	25.
77	120.	25.
78	127.5	25.
79	135.	25.
80	142.5	25.
81	150.	25.
82	151.25	25.
83	152.5	25.
84	153.75	25.
85	155.	25.
86	162.5	25.
87	170.	25.
88	177.5	25.
89	185.	25.
90	192.5	25.
91	200.	25.
92	207.5	25.
93	215.	25.
94	222.5	25.
95	230.	25.
96	237.5	25.
97	245.	25.
98	255.	25.
99	265.	25.
100	275.0	25.
101	285.	25.
102	295.	25.
103	305.	25.
104	0.	32.5

105	20.	32.5
106	40.	32.5
107	60.	32.5
108	75.	32.5
109	90.	32.5
110	105.	32.5
111	120.	32.5
112	135.	32.5
113	150.	32.5
114	152.5	32.5
115	155.	32.5
116	170.	32.5
117	185.	32.5
118	200.	32.5
119	215.	32.5
120	230.	32.5
121	245.	32.5
122	265.	32.5
123	285.	32.5
124	305.	32.5
125	0.	40.
126	10.	40.
127	20.	40.
128	30.	40.
129	40.	40.
130	50.	40.
131	60.	40.
132	67.5	40.
133	75.	40.
134	82.5	40.
135	90.	40.
136	97.5	40.
137	105.	40.
138	112.5	40.
139	120.	40.
140	127.5	40.
141	135.	40.
142	142.5	40.
143	150.	40.
144	151.25	40.
145	152.5	40.
146	153.75	40.
147	155.	40.
148	162.5	40.
149	170.	40.
150	177.5	40.
151	185.	40.
152	192.5	40.
153	200.	40.
154	207.5	40.
155	215.	40.
156	222.5	40.
157	230.	40.
158	237.5	40.
159	245.	40.
160	255.	40.
161	265.	40.
162	275.0	40.
163	285.	40.
164	295.	40.
165	305.	40.
166	0.	47.5



167	20.	47.5
168	40.	47.5
169	60.	47.5
170	75.	47.5
171	90.	47.5
172	105.	47.5
173	120.	47.5
174	135.	47.5
175	150.	47.5
176	152.5	47.5
177	155.	47.5
178	170.	47.5
179	185.	47.5
180	200.	47.5
181	215.	47.5
182	230.	47.5
183	245.	47.5
184	265.	47.5
185	285.	47.5
186	305.	47.5
187	0.	55.
188	10.	55.
189	20.	55.
190	30.	55.
191	40.	55.
192	50.	55.
193	60.	55.
194	67.5	55.
195	75.	55.
196	82.5	55.
197	90.	55.
198	97.5	55.
199	105.	55.
200	112.5	55.
201	120.	55.
202	127.5	55.
203	135.	55.
204	142.5	55.
205	150.	55.
206	151.25	55.
207	152.5	55.
208	153.75	55.
209	155.	55.
210	162.5	55.
211	170.	55.
212	177.5	55.
213	185.	55.
214	192.5	55.
215	200.	55.
216	207.5	55.
217	215.	55.
218	222.5	55.
219	230.	55.
220	237.5	55.
221	245.	55.
222	255.	55.
223	265.	55.
224	275.0	55.
225	285.	55.
226	295.	55.
227	305.	55.
228	0.	62.5

229	20.	62.5
230	40.	62.5
231	60.	62.5
232	75.	62.5
233	90.	62.5
234	105.	62.5
235	120.	62.5
236	135.	62.5
237	150.	62.5
238	152.5	62.5
239	155.	62.5
240	170.	62.5
241	185.	62.5
242	200.	62.5
243	215.	62.5
244	230.	62.5
245	245.	62.5
246	265.	62.5
247	285.	62.5
248	305.	62.5
249	0.	70.
250	10.	70.
251	20.	70.
252	30.	70.
253	40.	70.
254	50.	70.
255	60.	70.
256	67.5	70.
257	75.	70.
258	82.5	70.
259	90.	70.
260	97.5	70.
261	105.	70.
262	112.5	70.
263	120.	70.
264	127.5	70.
265	135.	70.
266	142.5	70.
267	150.	70.
268	151.25	70.
269	152.5	70.
270	153.75	70.
271	155.	70.
272	162.5	70.
273	170.	70.
274	177.5	70.
275	185.	70.
276	192.5	70.
277	200.	70.
278	207.5	70.
279	215.	70.
280	222.5	70.
281	230.	70.
282	237.5	70.
283	245.	70.
284	255.	70.
285	265.	70.
286	275.0	70.
287	285.	70.
288	295.	70.
289	305.	70.
290	0.	77.5

291	20.	77.5
292	40.	77.5
293	60.	77.5
294	75.	77.5
295	90.	77.5
296	105.	77.5
297	120.	77.5
298	135.	77.5
299	150.	77.5
300	152.5	77.5
301	155.	77.5
302	170.	77.5
303	185.	77.5
304	200.	77.5
305	215.	77.5
306	230.	77.5
307	245.	77.5
308	265.	77.5
309	285.	77.5
310	305.	77.5
311	0.	85.
312	10.	85.
313	20.	85.
314	30.	85.
315	40.	85.
316	50.	85.
317	60.	85.
318	67.5	85.
319	75.	85.
320	82.5	85.
321	90.	85.
322	97.5	85.
323	105.	85.
324	112.5	85.
325	120.	85.
326	127.5	85.
327	135.	85.
328	142.5	85.
329	150.	85.
330	151.25	85.
331	152.5	85.
332	153.75	85.
333	155.	85.
334	162.5	85.
335	170.	85.
336	177.5	85.
337	185.	85.
338	192.5	85.
339	200.	85.
340	207.5	85.
341	215.	85.
342	222.5	85.
343	230.	85.
344	237.5	85.
345	245.	85.
346	255.	85.
347	265.	85.
348	275.0	85.
349	285.	85.
350	295.	85.
351	305.	85 0.
352	0.	92.5

353	20.	92.5
354	40.	92.5
355	60.	92.5
356	75.	92.5
357	90.	92.5
358	105.	92.5
359	120.	92.5
360	135.	92.5
361	150.	92.5
362	152.5	92.5
363	155.	92.5
364	170.	92.5
365	185.	92.5
366	200.	92.5
367	215.	92.5
368	230.	92.5
369	245.	92.5
370	265.	92.5
371	285.	92.5
372	305.	92.5
373	0.	100.
374	10.	100.
375	20.	100.
376	30.	100.
377	40.	100.
378	50.	100.
379	60.	100.
380	67.5	100.
381	75.	100.
382	82.5	100.
383	90.	100.
384	97.5	100.
385	105.	100.
386	112.5	100.
387	120.	100.
388	127.5	100.
389	135.	100.
390	142.5	100.
391	150.	100.
392	151.25	100.
393	152.5	100.
394	153.75	100.
395	155.	100.
396	162.5	100.
397	170.	100.
398	177.5	100.
399	185.	100.
400	192.5	100.
401	200.	100.
402	207.5	100.
403	215.	100.
404	222.5	100.
405	230.	100.
406	237.5	100.
407	245.	100.
408	255.	100.
409	265.	100.
410	275.0	100.
411	285.	100.
412	295.	100.
413	305.	100.
414	150.	101.25

415	152.5	101.25
416	155.	101.25
417	150.	102.5
418	151.25	102.5
419	152.5	102.5
420	153.75	102.5
421	155.	102.5
422	150.	103.75
423	152.5	103.75
424	155.	103.75
425	150.	105.
426	151.25	105.
427	152.5	105.
428	153.75	105.
429	155.	105.
430	150.	106.25
431	152.5	106.25
432	155.	106.25
433	150.	107.5
434	151.25	107.5
435	152.5	107.5
436	153.75	107.5
437	155.	107.5
438	150.	108.75
439	152.5	108.75
440	155.	108.75
441	150.	110.
442	151.25	110.
443	152.5	110.
444	153.75	110.
445	155.	110.
1	1	1
2	1	1
3	1	1
4	1	1
5	1	1
6	1	1
7	1	1
8	1	1
9	1	1
10	1	1
11	1	1
12	1	1
13	1	1
14	1	1
15	1	1
16	1	1
17	1	1
18	1	1
19	1	1
20	1	1
21	1	1
22	1	1
23	1	1
24	1	1
25	1	1
26	1	1
27	1	1
28	1	1
29	1	1
30	1	1
31	1	1

32 1 1  
 33 1 1  
 34 1 1  
 35 1 1  
 36 1 1  
 37 1 1  
 38 1 1  
 39 1 1  
 40 1 1  
 41 1 1  
 42 0 1  
 65 0 1  
 104 0 1  
 125 0 1  
 166 0 1  
 187 0 1  
 228 0 1  
 249 0 1  
 290 0 1  
 311 0 1  
 352 0 1  
 373 0 1  
 62 0 1  
 103 0 1  
 124 0 1  
 165 0 1  
 186 0 1  
 277 0 1  
 248 0 1  
 289 0 1  
 310 0 1  
 351 0 1  
 372 0 1  
 413 0 1

1  
 140000000.0,0.25,10.0,1732.9,0.0,0.00001,0.0,36.0  
 10000,1,1  
 2  
 43000000.0,0.2,10.0,1350,0.0,1000000000000000.0,0.0,0.0  
 0,1,1  
 4000,10,500,1,0,2668,0,2,1000000,1000,2  
 0.005,53.36,0.02,0.0,0,0.25,0.5,0  
 0,0,0.0001  
 379  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1  
 1







B) Περίπτωση δυνατότητας μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση

445,128,2,2

41,2,8,11,3,2,3,4,0,0,1,3,0

1 1 1 2 3 43 65 64 63 42  
2 1 3 4 5 44 67 66 65 43  
3 1 5 6 7 45 69 68 67 44  
4 1 7 8 9 46 71 70 69 45  
5 1 9 10 11 47 73 72 71 46  
6 1 11 12 13 48 75 74 73 47  
7 1 13 14 15 49 77 76 75 48  
8 1 15 16 17 50 79 78 77 49  
9 1 17 18 19 51 81 80 79 50  
10 1 19 20 21 52 83 82 81 51  
11 1 21 22 23 53 85 84 83 52  
12 1 23 24 25 54 87 86 85 53  
13 1 25 26 27 55 89 88 87 54  
14 1 27 28 29 56 91 90 89 55  
15 1 29 30 31 57 93 92 91 56  
16 1 31 32 33 58 95 94 93 57  
17 1 33 34 35 59 97 96 95 58  
18 1 35 36 37 60 99 98 97 59  
19 1 37 38 39 61 101 100 99 60  
20 1 39 40 41 62 103 102 100 61  
21 1 63 64 65 105 127 126 125 104  
22 1 65 66 67 106 129 128 127 105  
23 1 67 68 69 107 131 130 129 106  
24 1 69 70 71 108 133 132 131 107  
25 1 71 72 73 109 135 134 133 108  
26 1 73 74 75 110 137 136 135 109  
27 1 75 76 77 111 139 138 137 110  
28 1 77 78 79 112 141 140 139 111  
29 1 79 80 81 113 143 142 141 112  
30 1 81 82 83 114 145 144 143 113  
31 1 83 84 85 115 147 146 145 114  
32 1 85 86 87 116 149 148 147 115  
33 1 87 88 89 117 151 150 149 116  
34 1 89 90 91 118 153 152 151 117  
35 1 91 92 93 119 155 154 153 118  
36 1 93 94 95 120 157 156 155 119  
37 1 95 96 97 121 159 158 157 120  
38 1 97 98 99 122 161 160 159 121  
39 1 99 100 101 123 163 162 161 122  
40 1 101 102 103 124 165 164 163 123  
41 1 125 126 127 167 189 188 187 166  
42 1 127 128 129 168 191 190 189 167  
43 1 129 130 131 169 193 192 191 168  
44 1 131 132 135 170 195 194 193 169  
45 1 133 134 135 171 197 196 195 170  
46 1 135 136 137 172 199 198 197 171  
47 1 137 138 139 173 201 200 199 172  
48 1 139 140 141 174 203 202 201 173  
49 1 141 142 143 175 205 204 203 174  
50 1 143 144 145 176 207 206 205 175  
51 1 145 146 147 177 209 208 207 176  
52 1 147 148 149 178 211 210 209 177  
53 1 149 150 151 179 213 212 211 178  
54 1 151 152 153 180 215 214 213 179

55 1 153 154 155 181 217 216 215 180  
56 1 155 156 157 182 219 218 217 181  
57 1 157 158 159 183 221 220 219 182  
58 1 159 160 161 184 223 222 221 183  
59 1 161 162 163 185 225 224 223 184  
60 1 163 164 165 186 227 226 225 185  
61 1 187 188 189 229 251 250 249 228  
62 1 189 190 191 230 253 252 251 229  
63 1 191 192 193 231 255 254 253 230  
64 1 193 194 195 232 257 256 255 231  
65 1 195 196 197 233 259 258 257 232  
66 1 197 198 199 234 261 260 259 233  
67 1 199 200 201 235 263 262 261 234  
68 1 201 202 203 236 265 264 263 235  
69 1 203 204 205 237 267 266 265 236  
70 1 205 206 207 238 269 268 267 237  
71 1 207 208 209 239 271 270 269 238  
72 1 209 210 211 240 273 272 271 239  
73 1 211 212 213 241 275 274 273 240  
74 1 213 214 215 242 277 276 275 241  
75 1 215 216 217 243 279 278 277 242  
76 1 217 218 219 244 281 280 279 243  
77 1 219 220 221 245 283 282 281 244  
78 1 221 222 223 246 285 284 283 245  
79 1 223 224 225 247 287 286 285 246  
80 1 225 226 227 248 289 288 287 247  
81 1 249 250 251 291 313 312 311 290  
82 1 251 252 253 292 315 314 313 291  
83 1 253 254 255 293 317 316 315 292  
84 1 255 256 257 294 319 318 317 293  
85 1 257 258 259 295 321 320 319 294  
86 1 259 260 261 269 323 322 321 295  
87 1 261 262 263 297 325 324 323 296  
88 1 263 264 265 298 327 326 325 297  
89 1 265 266 267 299 329 328 327 298  
90 1 267 268 269 300 331 330 329 299  
91 1 269 270 271 301 333 332 331 300  
92 1 271 272 273 302 335 334 333 301  
93 1 273 274 275 303 337 336 335 302  
94 1 275 276 277 304 339 338 337 303  
95 1 277 278 279 305 341 340 339 304  
96 1 279 280 281 306 343 342 341 305  
97 1 281 282 283 307 345 344 343 306  
98 1 283 284 285 308 347 346 345 307  
99 1 285 286 287 309 349 348 347 308  
100 1 287 288 289 310 351 350 349 309  
101 1 311 312 313 353 375 374 373 352  
102 1 313 314 315 354 377 376 375 353  
103 1 315 316 317 355 379 378 377 354  
104 1 317 318 319 356 381 380 379 355  
105 1 319 320 321 357 383 382 381 356  
106 1 321 322 323 358 385 384 383 357  
107 1 323 324 325 359 387 386 385 358  
108 1 325 326 327 360 389 388 387 359  
109 1 327 328 329 361 391 390 389 360  
110 1 329 330 331 362 393 392 391 361  
111 1 331 332 333 363 395 394 393 362  
112 1 333 334 335 364 397 396 395 363  
113 1 335 336 337 365 399 398 397 364  
114 1 337 338 339 366 401 400 399 365  
115 1 339 340 341 367 403 402 401 366  
116 1 341 342 343 368 405 404 403 367

117 1 343 344 345 369 407 406 405 368  
 118 1 345 346 347 370 409 408 407 369  
 119 1 347 348 349 371 411 410 409 370  
 120 1 349 350 351 372 413 412 411 371  
 121 2 391 392 393 415 419 418 417 414  
 122 2 393 394 395 416 421 420 419 415  
 123 2 417 418 419 423 427 426 425 422  
 124 2 419 420 421 424 429 428 427 423  
 125 2 425 426 427 431 435 434 433 430  
 126 2 427 428 429 432 437 436 435 431  
 127 2 433 434 435 439 443 442 441 438  
 128 2 435 436 437 440 445 444 443 439  
 1 0. 0.  
 2 10. 0.  
 3 20. 0.  
 4 30. 0.  
 5 40. 0.  
 6 50. 0.  
 7 60. 0.  
 8 67.5 0.  
 9 75. 0.  
 10 82.5 0.  
 11 90. 0.  
 12 97.5 0.  
 13 105. 0.  
 14 112.5 0.  
 15 120. 0.  
 16 127.5 0.  
 17 135. 0.  
 18 142.5 0.  
 19 150. 0.  
 20 151.25 0.  
 21 152.5 0.  
 22 153.75 0.  
 23 155. 0.  
 24 162.5 0.  
 25 170. 0.  
 26 177.5 0.  
 27 185. 0.  
 28 192.5 0.  
 29 200. 0.  
 30 207.5 0.  
 31 215. 0.  
 32 222.5 0.  
 33 230. 0.  
 34 237.5 0.  
 35 245. 0.  
 36 255. 0.  
 37 265. 0.  
 38 275.0 0.  
 39 285. 0.  
 40 295. 0.  
 41 305. 0.  
 42 0. 12.5  
 43 20. 12.5  
 44 40. 12.5  
 45 60. 12.5  
 46 75. 12.5  
 47 90. 12.5  
 48 105. 12.5  
 49 120. 12.5  
 50 135. 12.5

51	150.	12.5
52	152.5	12.5
53	155.	12.5
54	170.	12.5
55	185.	12.5
56	200.	12.5
57	215.	12.5
58	230.	12.5
59	245.	12.5
60	265.	12.5
61	285.	12.5
62	305.	12.5
63	0.	25.
64	10.	25.
65	20.	25.
66	30.	25.
67	40.	25.
68	50.	25.
69	60.	25.
70	67.5	25.
71	75.	25.
72	82.5	25.
73	90.	25.
74	97.5	25.
75	105.	25.
76	112.5	25.
77	120.	25.
78	127.5	25.
79	135.	25.
80	142.5	25.
81	150.	25.
82	151.25	25.
83	152.5	25.
84	153.75	25.
85	155.	25.
86	162.5	25.
87	170.	25.
88	177.5	25.
89	185.	25.
90	192.5	25.
91	200.	25.
92	207.5	25.
93	215.	25.
94	222.5	25.
95	230.	25.
96	237.5	25.
97	245.	25.
98	255.	25.
99	265.	25.
100	275.0	25.
101	285.	25.
102	295.	25.
103	305.	25.
104	0.	32.5
105	20.	32.5
106	40.	32.5
107	60.	32.5
108	75.	32.5
109	90.	32.5
110	105.	32.5
111	120.	32.5
112	135.	32.5

113	150.	32.5
114	152.5	32.5
115	155.	32.5
116	170.	32.5
117	185.	32.5
118	200.	32.5
119	215.	32.5
120	230.	32.5
121	245.	32.5
122	265.	32.5
123	285.	32.5
124	305.	32.5
125	0.	40.
126	10.	40.
127	20.	40.
128	30.	40.
129	40.	40.
130	50.	40.
131	60.	40.
132	67.5	40.
133	75.	40.
134	82.5	40.
135	90.	40.
136	97.5	40.
137	105.	40.
138	112.5	40.
139	120.	40.
140	127.5	40.
141	135.	40.
142	142.5	40.
143	150.	40.
144	151.25	40.
145	152.5	40.
146	153.75	40.
147	155.	40.
148	162.5	40.
149	170.	40.
150	177.5	40.
151	185.	40.
152	192.5	40.
153	200.	40.
154	207.5	40.
155	215.	40.
156	222.5	40.
157	230.	40.
158	237.5	40.
159	245.	40.
160	255.	40.
161	265.	40.
162	275.0	40.
163	285.	40.
164	295.	40.
165	305.	40.
166	0.	47.5
167	20.	47.5
168	40.	47.5
169	60.	47.5
170	75.	47.5
171	90.	47.5
172	105.	47.5
173	120.	47.5
174	135.	47.5

175	150.	47.5
176	152.5	47.5
177	155.	47.5
178	170.	47.5
179	185.	47.5
180	200.	47.5
181	215.	47.5
182	230.	47.5
183	245.	47.5
184	265.	47.5
185	285.	47.5
186	305.	47.5
187	0.	55.
188	10.	55.
189	20.	55.
190	30.	55.
191	40.	55.
192	50.	55.
193	60.	55.
194	67.5	55.
195	75.	55.
196	82.5	55.
197	90.	55.
198	97.5	55.
199	105.	55.
200	112.5	55.
201	120.	55.
202	127.5	55.
203	135.	55.
204	142.5	55.
205	150.	55.
206	151.25	55.
207	152.5	55.
208	153.75	55.
209	155.	55.
210	162.5	55.
211	170.	55.
212	177.5	55.
213	185.	55.
214	192.5	55.
215	200.	55.
216	207.5	55.
217	215.	55.
218	222.5	55.
219	230.	55.
220	237.5	55.
221	245.	55.
222	255.	55.
223	265.	55.
224	275.0	55.
225	285.	55.
226	295.	55.
227	305.	55.
228	0.	62.5
229	20.	62.5
230	40.	62.5
231	60.	62.5
232	75.	62.5
233	90.	62.5
234	105.	62.5
235	120.	62.5
236	135.	62.5

237	150.	62.5
238	152.5	62.5
239	155.	62.5
240	170.	62.5
241	185.	62.5
242	200.	62.5
243	215.	62.5
244	230.	62.5
245	245.	62.5
246	265.	62.5
247	285.	62.5
248	305.	62.5
249	0.	70.
250	10.	70.
251	20.	70.
252	30.	70.
253	40.	70.
254	50.	70.
255	60.	70.
256	67.5	70.
257	75.	70.
258	82.5	70.
259	90.	70.
260	97.5	70.
261	105.	70.
262	112.5	70.
263	120.	70.
264	127.5	70.
265	135.	70.
266	142.5	70.
267	150.	70.
268	151.25	70.
269	152.5	70.
270	153.75	70.
271	155.	70.
272	162.5	70.
273	170.	70.
274	177.5	70.
275	185.	70.
276	192.5	70.
277	200.	70.
278	207.5	70.
279	215.	70.
280	222.5	70.
281	230.	70.
282	237.5	70.
283	245.	70.
284	255.	70.
285	265.	70.
286	275.0	70.
287	285.	70.
288	295.	70.
289	305.	70.
290	0.	77.5
291	20.	77.5
292	40.	77.5
293	60.	77.5
294	75.	77.5
295	90.	77.5
296	105.	77.5
297	120.	77.5
298	135.	77.5

299	150.	77.5
300	152.5	77.5
301	155.	77.5
302	170.	77.5
303	185.	77.5
304	200.	77.5
305	215.	77.5
306	230.	77.5
307	245.	77.5
308	265.	77.5
309	285.	77.5
310	305.	77.5
311	0.	85.
312	10.	85.
313	20.	85.
314	30.	85.
315	40.	85.
316	50.	85.
317	60.	85.
318	67.5	85.
319	75.	85.
320	82.5	85.
321	90.	85.
322	97.5	85.
323	105.	85.
324	112.5	85.
325	120.	85.
326	127.5	85.
327	135.	85.
328	142.5	85.
329	150.	85.
330	151.25	85.
331	152.5	85.
332	153.75	85.
333	155.	85.
334	162.5	85.
335	170.	85.
336	177.5	85.
337	185.	85.
338	192.5	85.
339	200.	85.
340	207.5	85.
341	215.	85.
342	222.5	85.
343	230.	85.
344	237.5	85.
345	245.	85.
346	255.	85.
347	265.	85.
348	275.0	85.
349	285.	85.
350	295.	85.
351	305.	85.0
352	0.	92.5
353	20.	92.5
354	40.	92.5
355	60.	92.5
356	75.	92.5
357	90.	92.5
358	105.	92.5
359	120.	92.5
360	135.	92.5



361	150.	92.5
362	152.5	92.5
363	155.	92.5
364	170.	92.5
365	185.	92.5
366	200.	92.5
367	215.	92.5
368	230.	92.5
369	245.	92.5
370	265.	92.5
371	285.	92.5
372	305.	92.5
373	0.	100.
374	10.	100.
375	20.	100.
376	30.	100.
377	40.	100.
378	50.	100.
379	60.	100.
380	67.5	100.
381	75.	100.
382	82.5	100.
383	90.	100.
384	97.5	100.
385	105.	100.
386	112.5	100.
387	120.	100.
388	127.5	100.
389	135.	100.
390	142.5	100.
391	150.	100.
392	151.25	100.
393	152.5	100.
394	153.75	100.
395	155.	100.
396	162.5	100.
397	170.	100.
398	177.5	100.
399	185.	100.
400	192.5	100.
401	200.	100.
402	207.5	100.
403	215.	100.
404	222.5	100.
405	230.	100.
406	237.5	100.
407	245.	100.
408	255.	100.
409	265.	100.
410	275.0	100.
411	285.	100.
412	295.	100.
413	305.	100.
414	150.	101.25
415	152.5	101.25
416	155.	101.25
417	150.	102.5
418	151.25	102.5
419	152.5	102.5
420	153.75	102.5
421	155.	102.5
422	150.	103.75

423	152.5	103.75
424	155.	103.75
425	150.	105.
426	151.25	105.
427	152.5	105.
428	153.75	105.
429	155.	105.
430	150.	106.25
431	152.5	106.25
432	155.	106.25
433	150.	107.5
434	151.25	107.5
435	152.5	107.5
436	153.75	107.5
437	155.	107.5
438	150.	108.75
439	152.5	108.75
440	155.	108.75
441	150.	110.
442	151.25	110.
443	152.5	110.
444	153.75	110.
445	155.	110.
1	1	1
2	1	1
3	1	1
4	1	1
5	1	1
6	1	1
7	1	1
8	1	1
9	1	1
10	1	1
11	1	1
12	1	1
13	1	1
14	1	1
15	1	1
16	1	1
17	1	1
18	1	1
19	1	1
20	1	1
21	1	1
22	1	1
23	1	1
24	1	1
25	1	1
26	1	1
27	1	1
28	1	1
29	1	1
30	1	1
31	1	1
32	1	1
33	1	1
34	1	1
35	1	1
36	1	1
37	1	1
38	1	1
39	1	1





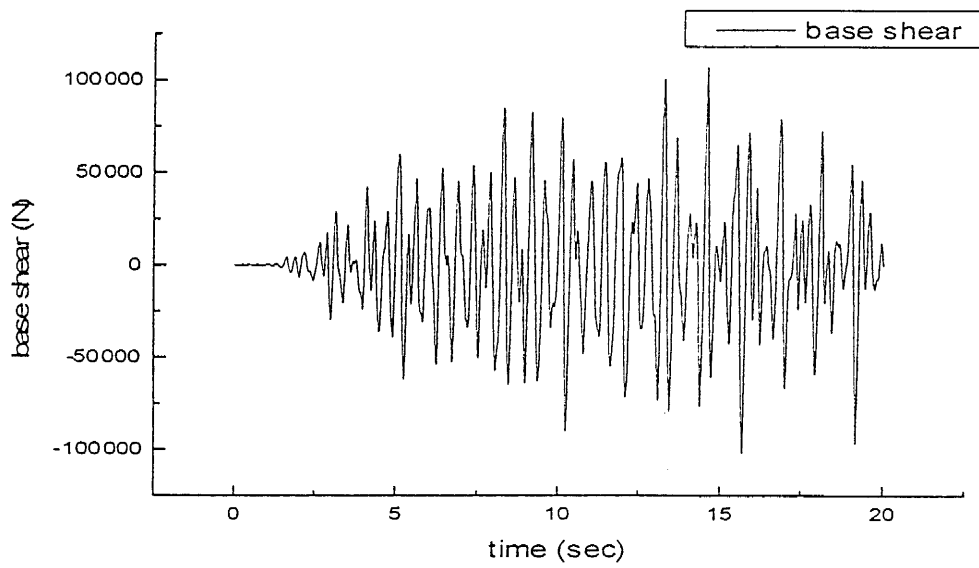
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1

445 0.0 0.0  
445 0.0 0.0  
jimmy  
0,0,0,0

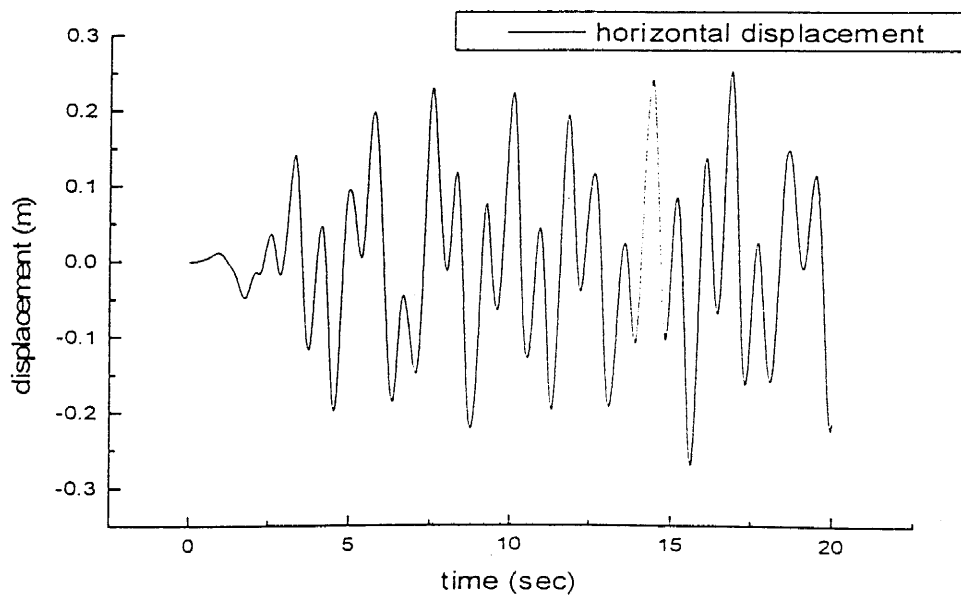
## 7.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων ελαστικής ανάλυσης

7.2.1 Περίπτωση Α (δυνατότητα μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση)

7.2.1.1 Για μέγιστη επιτάχυνση  $0,1g$

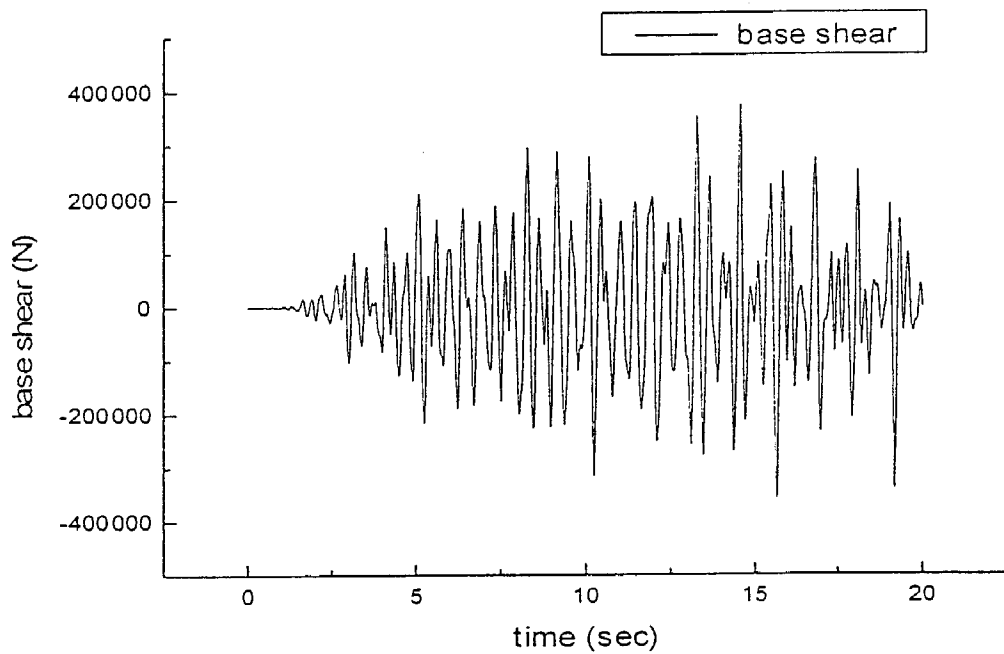


Σχήμα 7.1

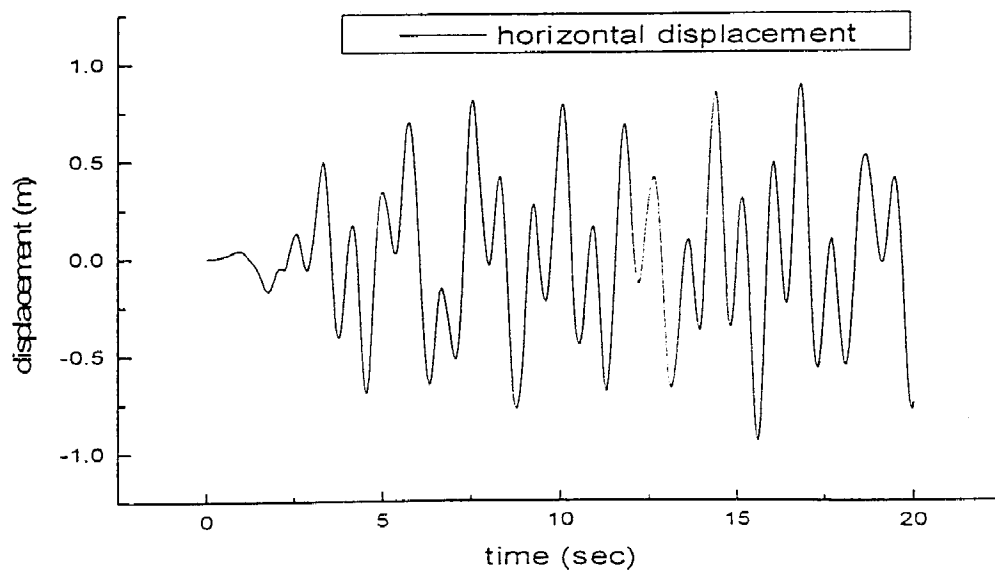


Σχήμα 7.2

7.2.1.2 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,35g

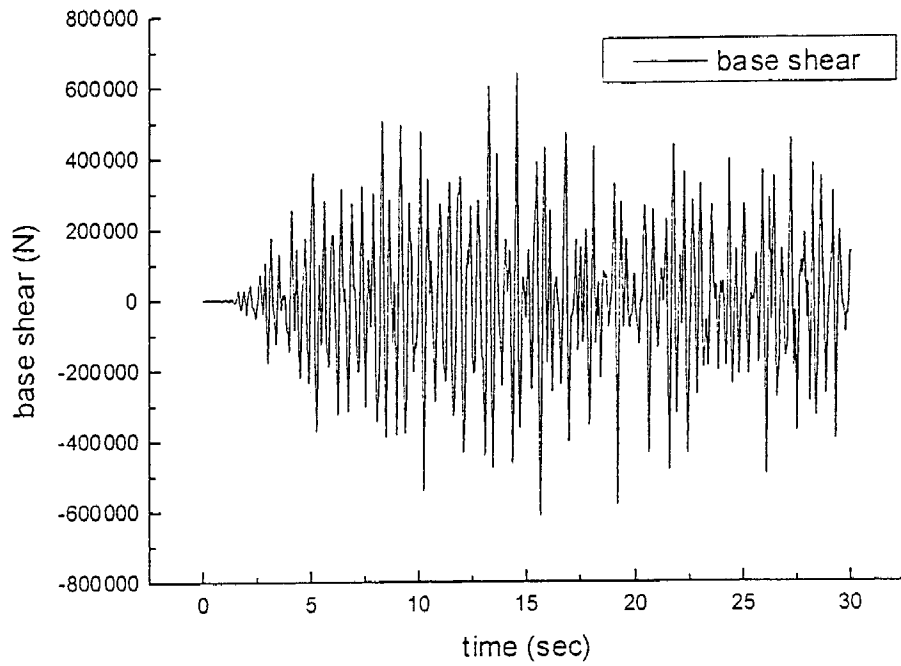


Σχήμα 7.3

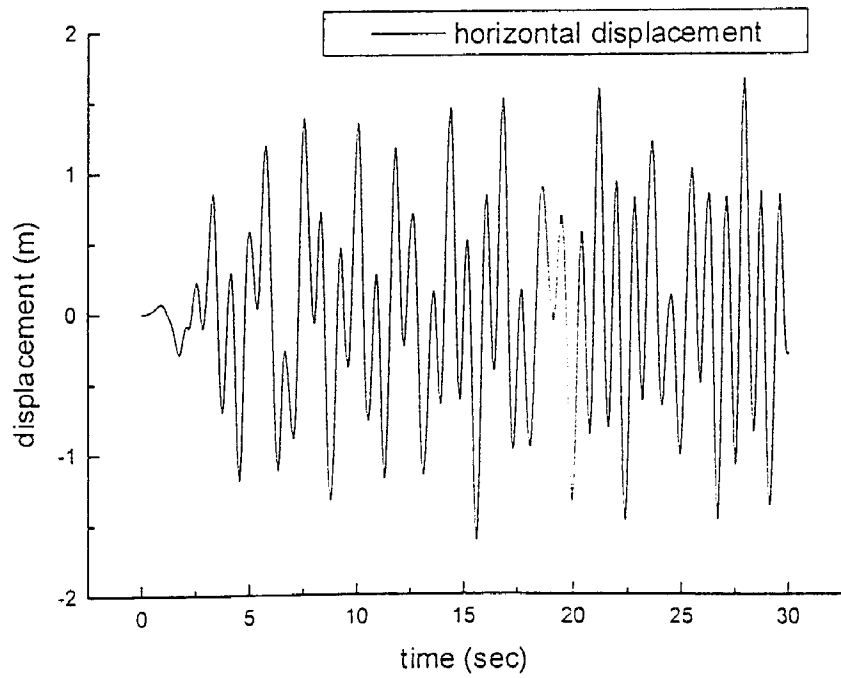


Σχήμα 7.4

7.2.1.3 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,6g



Σχήμα 7.5

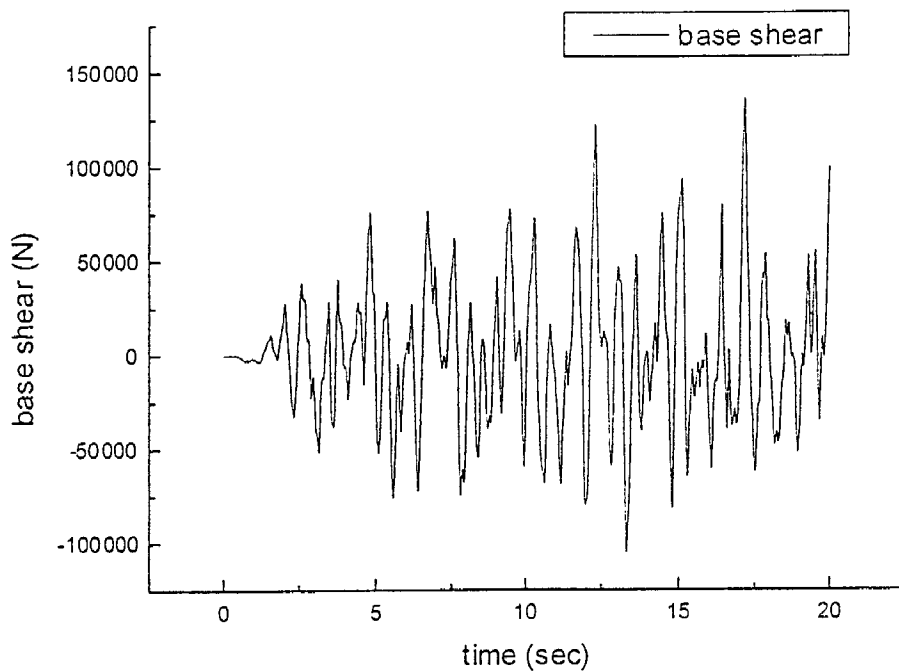


Σχήμα 7.6

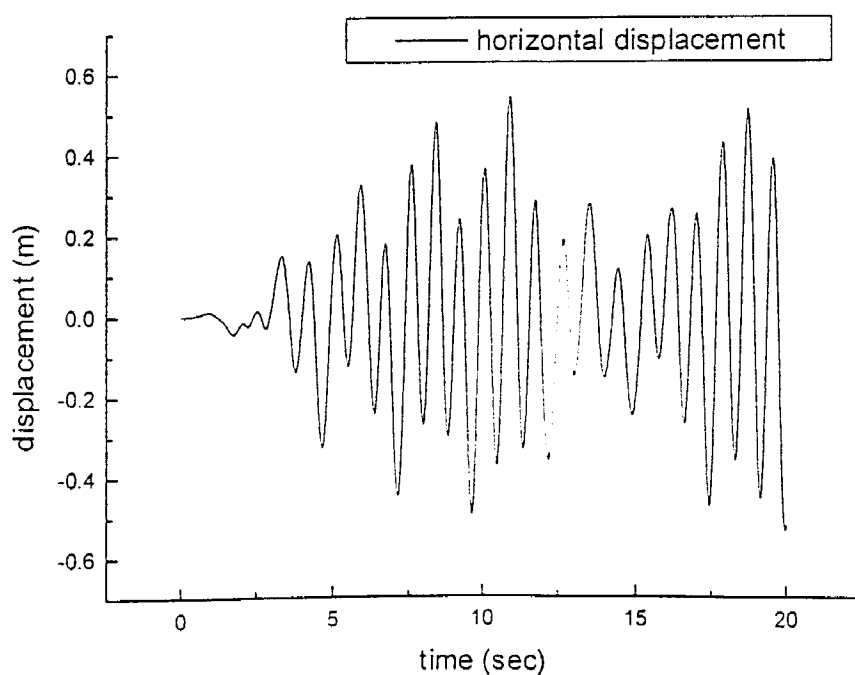


7.2.2 Περίπτωση Β (δυνατότητα μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση)

7.2.2.1 Για μέγιστη επιτάχυνση  $0,1g$

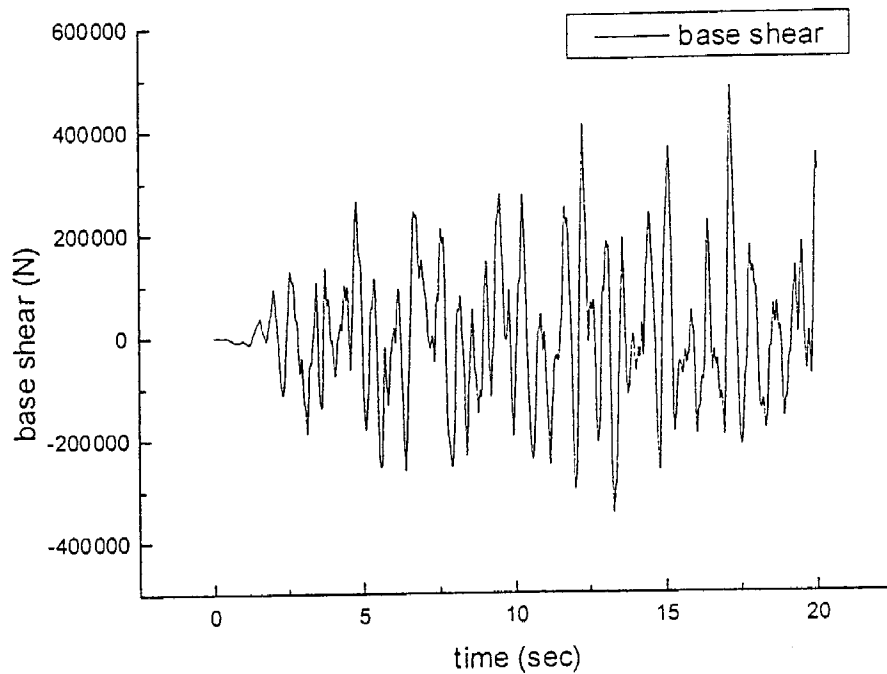


Σχήμα 7.7

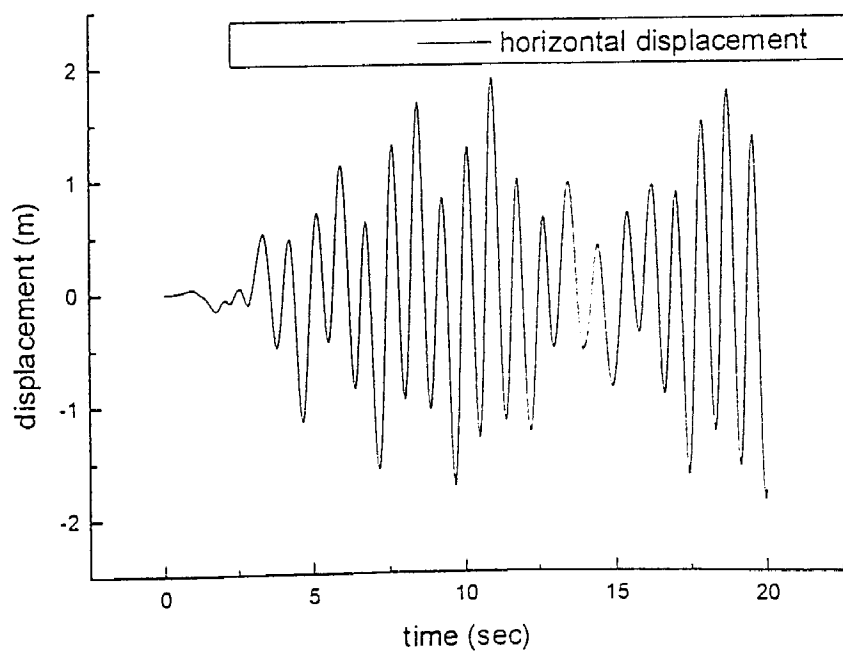


Σχήμα 7.8

7.2.2.2 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,35g

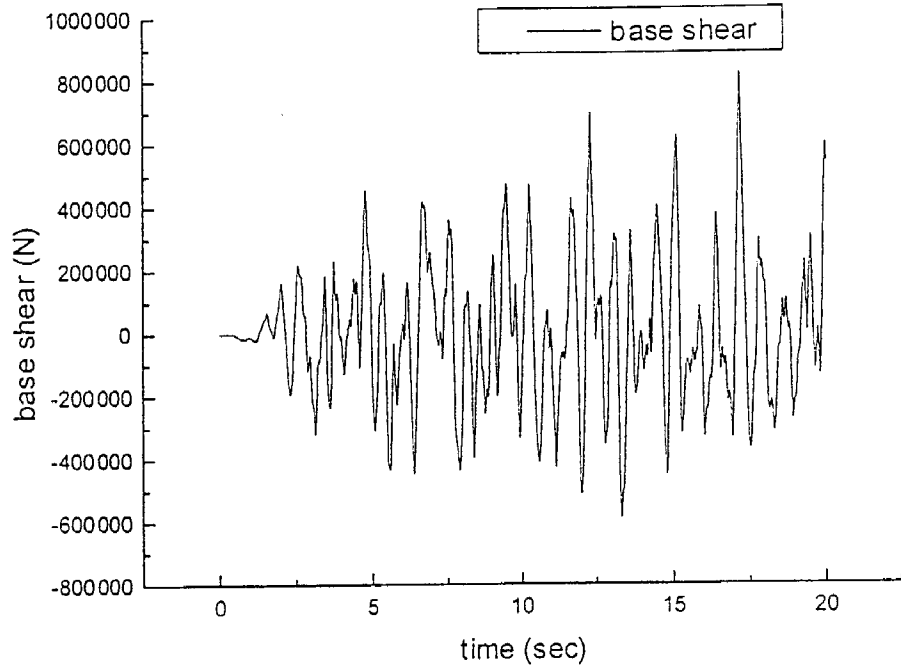


Σχήμα 7.9

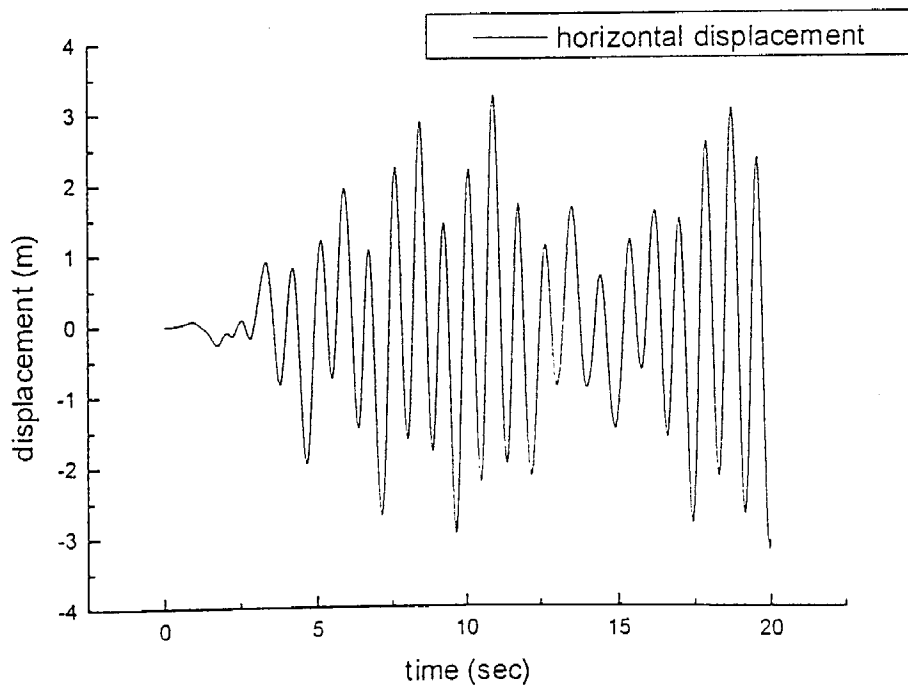


Σχήμα 7.10

7.2.2.3 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,6g



Σχήμα 7.11

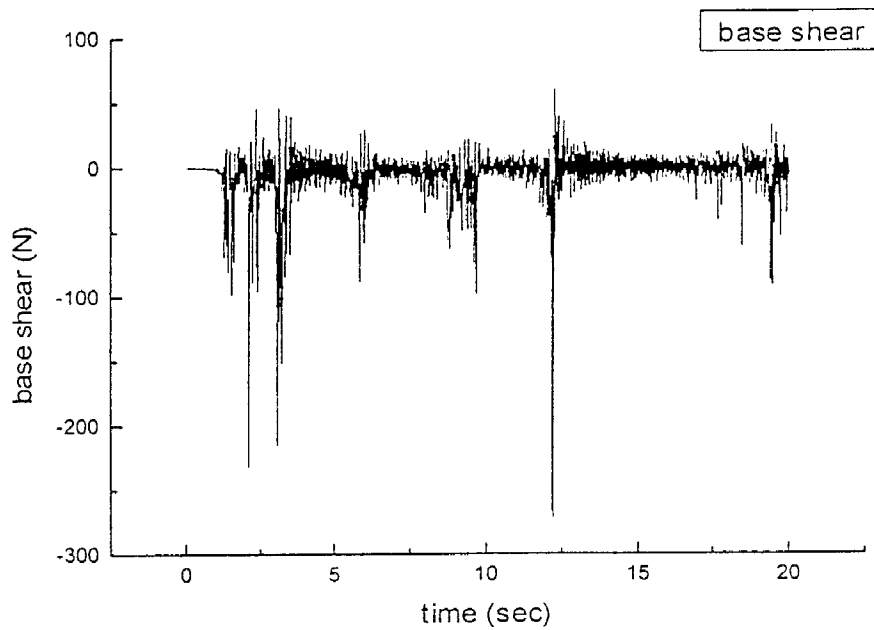


Σχήμα 7.12

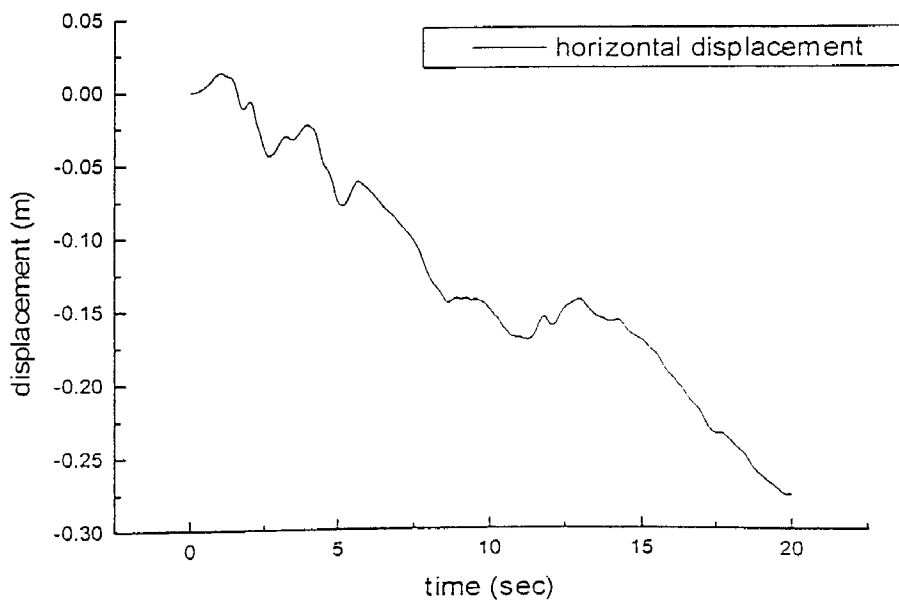
### 7.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων ανελαστικής ανάλυσης εδάφους

7.3.1 Περίπτωση Α (δυνατότητα μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση)

7.3.1.1 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,1g

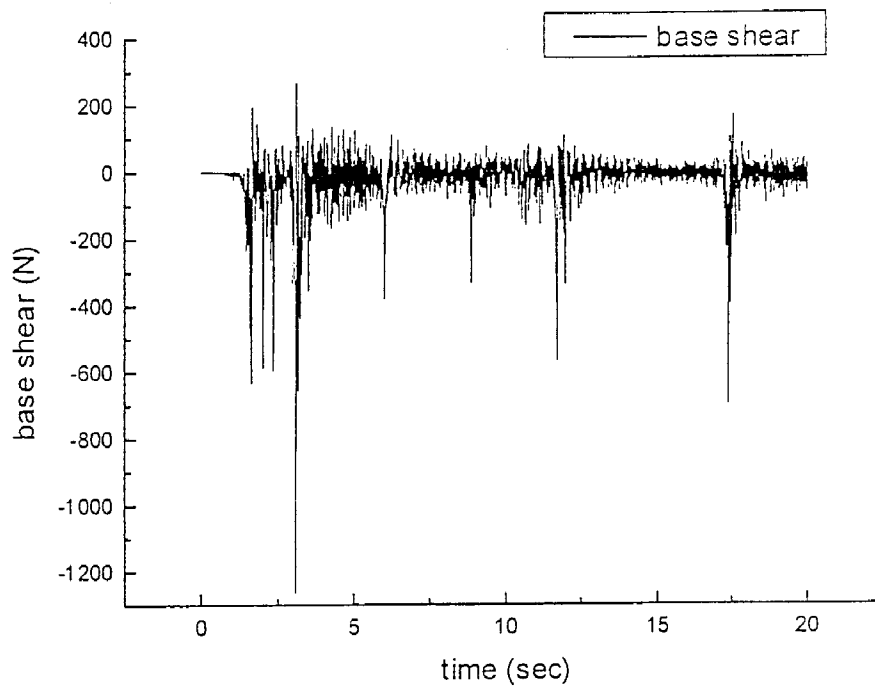


Σχήμα 7.13

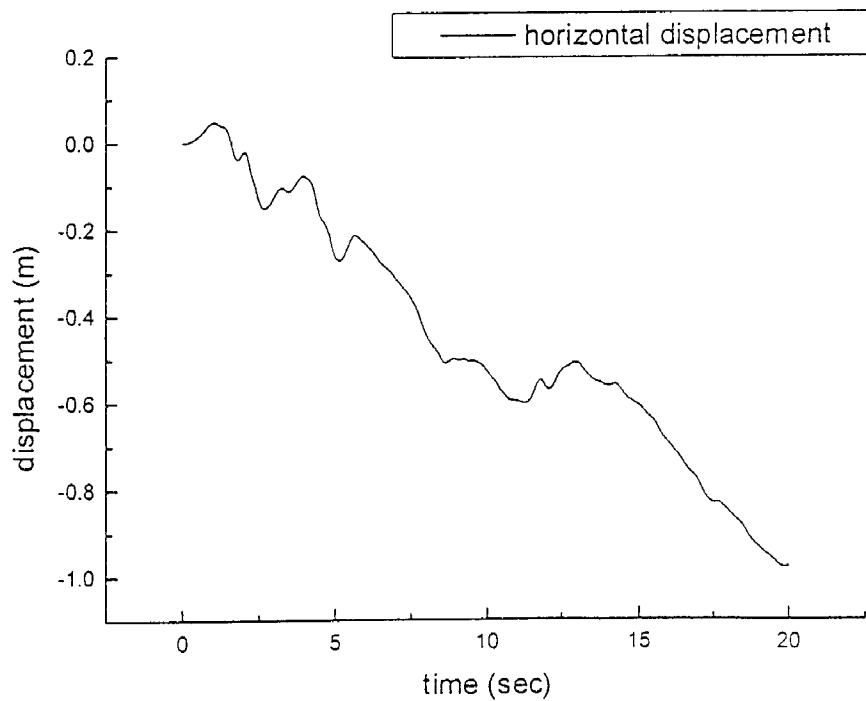


Σχήμα 7.14

7.3.1.2 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,35g

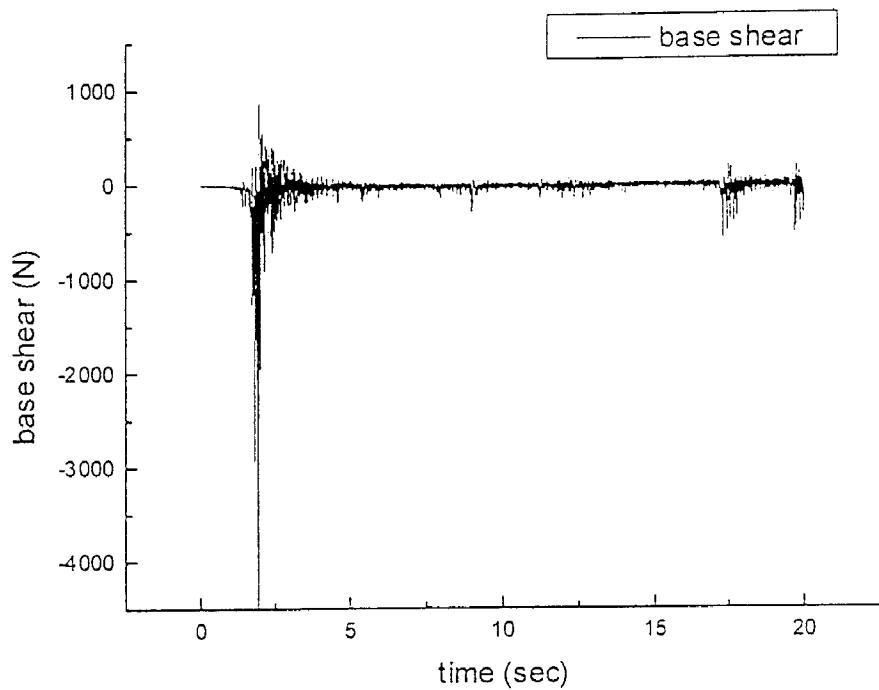


Σχήμα 7.15

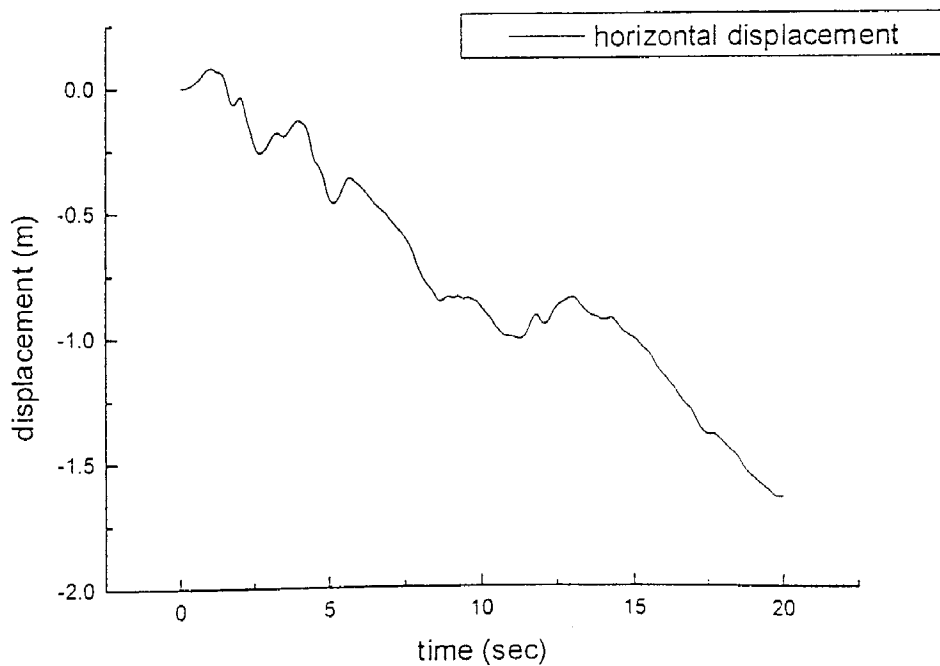


Σχήμα 7.16

7.3.1.3 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,6g



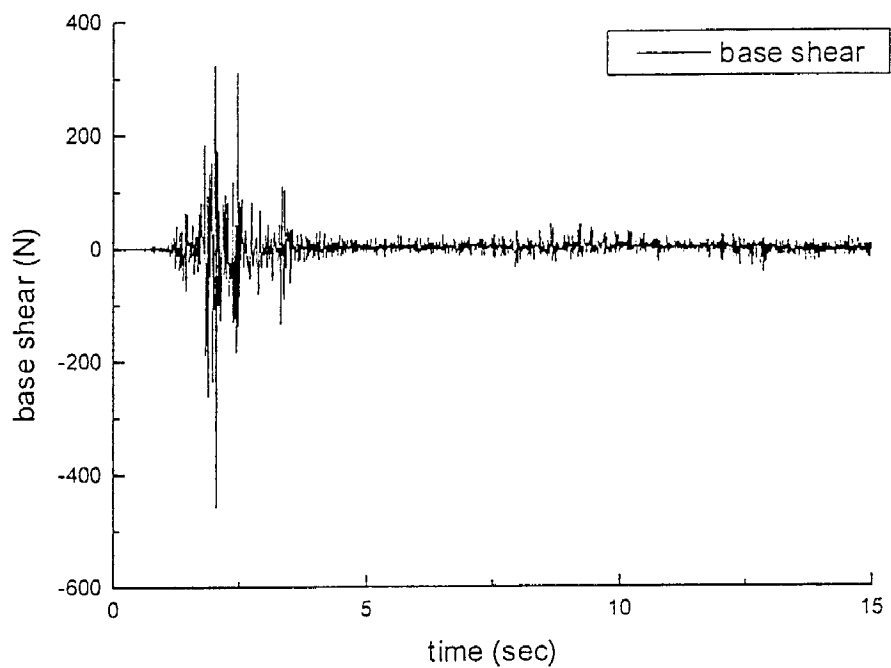
Σχήμα 7.17



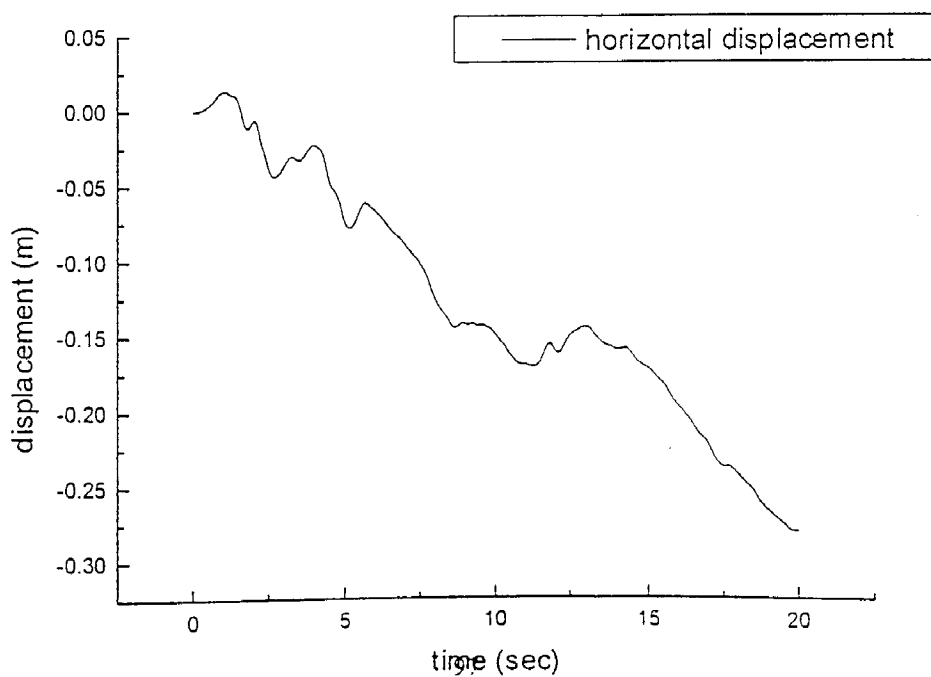
Σχήμα 7.18

7.3.2 Περίπτωση Β (δυνατότητα μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση)

7.3.2.1 Για μέγιστη επιτάχυνση  $0,1g$

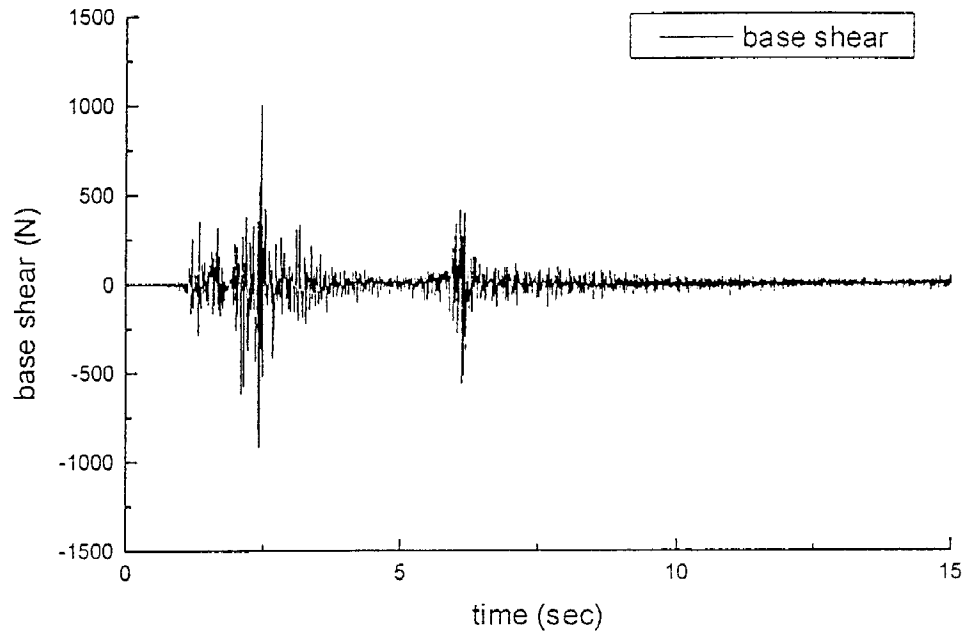


Σχήμα 7.19



Σχήμα 7.20

7.3.2.2 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,35g



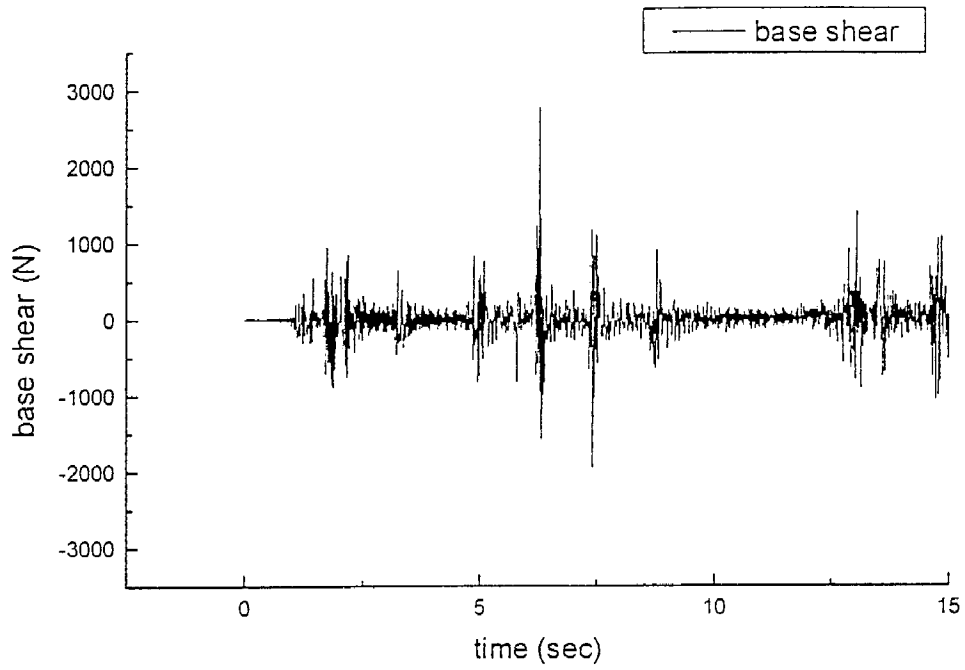
Σχήμα 7.21



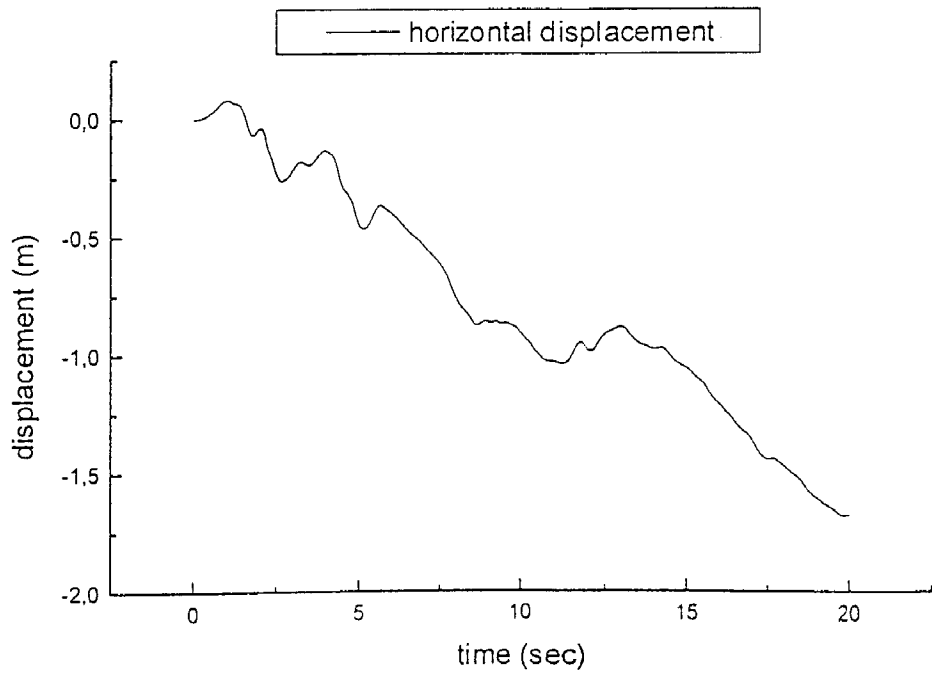
Σχήμα 7.22



7.3.2.3 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,6g



Σχήμα 7.23



Σχήμα 7.24

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### Ανάλυση συστήματος εδάφους-κατασκευής για την περίπτωση αργιλικού εδάφους

#### 8.1 Γενικά, αρχεία δεδομένων

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του εξεταζόμενου συστήματος εδάφους-κατασκευής για την περίπτωση έδρασης του ελαστικού κτιρίου πάνω σε ένα μέσο αργιλικό έδαφος. Ο τρόπος παρουσίασης γίνεται ακριβώς όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα δύο αρχεία δεδομένων με τα οποία τροφοδοτούμε το λογισμικό μας προκειμένου να εκτελεστεί η ανάλυση του συστήματος του αργιλικού εδάφους και της ελαστικής κατασκευής

A) Για την περίπτωση δυνατότητας μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση

```
445,128,2,2
65,2,8,11,3,2,3,4,0,0,0,3,0
1 1 1 2 3 43 65 64 63 42
2 1 3 4 5 44 67 66 65 43
3 1 5 6 7 45 69 68 67 44
4 1 7 8 9 46 71 70 69 45
5 1 9 10 11 47 73 72 71 46
6 1 11 12 13 48 75 74 73 47
7 1 13 14 15 49 77 76 75 48
8 1 15 16 17 50 79 78 77 49
9 1 17 18 19 51 81 80 79 50
10 1 19 20 21 52 83 82 81 51
11 1 21 22 23 53 85 84 83 52
12 1 23 24 25 54 87 86 85 53
13 1 25 26 27 55 89 88 87 54
14 1 27 28 29 56 91 90 89 55
```

15 1 29 30 31 57 93 92 91 56  
16 1 31 32 33 58 95 94 93 57  
17 1 33 34 35 59 97 96 95 58  
18 1 35 36 37 60 99 98 97 59  
19 1 37 38 39 61 101 100 99 60  
20 1 39 40 41 62 103 102 100 61  
21 1 63 64 65 105 127 126 125 104  
22 1 65 66 67 106 129 128 127 105  
23 1 67 68 69 107 131 130 129 106  
24 1 69 70 71 108 133 132 131 107  
25 1 71 72 73 109 135 134 133 108  
26 1 73 74 75 110 137 136 135 109  
27 1 75 76 77 111 139 138 137 110  
28 1 77 78 79 112 141 140 139 111  
29 1 79 80 81 113 143 142 141 112  
30 1 81 82 83 114 145 144 143 113  
31 1 83 84 85 115 147 146 145 114  
32 1 85 86 87 116 149 148 147 115  
33 1 87 88 89 117 151 150 149 116  
34 1 89 90 91 118 153 152 151 117  
35 1 91 92 93 119 155 154 153 118  
36 1 93 94 95 120 157 156 155 119  
37 1 95 96 97 121 159 158 157 120  
38 1 97 98 99 122 161 160 159 121  
39 1 99 100 101 123 163 162 161 122  
40 1 101 102 103 124 165 164 163 123  
41 1 125 126 127 167 189 188 187 166  
42 1 127 128 129 168 191 190 189 167  
43 1 129 130 131 169 193 192 191 168  
44 1 131 132 135 170 195 194 193 169  
45 1 133 134 135 171 197 196 195 170  
46 1 135 136 137 172 199 198 197 171  
47 1 137 138 139 173 201 200 199 172  
48 1 139 140 141 174 203 202 201 173  
49 1 141 142 143 175 205 204 203 174  
50 1 143 144 145 176 207 206 205 175  
51 1 145 146 147 177 209 208 207 176  
52 1 147 148 149 178 211 210 209 177  
53 1 149 150 151 179 213 212 211 178  
54 1 151 152 153 180 215 214 213 179  
55 1 153 154 155 181 217 216 215 180  
56 1 155 156 157 182 219 218 217 181  
57 1 157 158 159 183 221 220 219 182  
58 1 159 160 161 184 223 222 221 183  
59 1 161 162 163 185 225 224 223 184  
60 1 163 164 165 186 227 226 225 185  
61 1 187 188 189 229 251 250 249 228  
62 1 189 190 191 230 253 252 251 229  
63 1 191 192 193 231 255 254 253 230  
64 1 193 194 195 232 257 256 255 231  
65 1 195 196 197 233 259 258 257 232  
66 1 197 198 199 234 261 260 259 233  
67 1 199 200 201 235 263 262 261 234  
68 1 201 202 203 236 265 264 263 235  
69 1 203 204 205 237 267 266 265 236  
70 1 205 206 207 238 269 268 267 237  
71 1 207 208 209 239 271 270 269 238  
72 1 209 210 211 240 273 272 271 239  
73 1 211 212 213 241 275 274 273 240  
74 1 213 214 215 242 277 276 275 241  
75 1 215 216 217 243 279 278 277 242  
76 1 217 218 219 244 281 280 279 243

77 1 219 220 221 245 283 282 281 244  
78 1 221 222 223 246 285 284 283 245  
79 1 223 224 225 247 287 286 285 246  
80 1 225 226 227 248 289 288 287 247  
81 1 249 250 251 291 313 312 311 290  
82 1 251 252 253 292 315 314 313 291  
83 1 253 254 255 293 317 316 315 292  
84 1 255 256 257 294 319 318 317 293  
85 1 257 258 259 295 321 320 319 294  
86 1 259 260 261 269 323 322 321 295  
87 1 261 262 263 297 325 324 323 296  
88 1 263 264 265 298 327 326 325 297  
89 1 265 266 267 299 329 328 327 298  
90 1 267 268 269 300 331 330 329 299  
91 1 269 270 271 301 333 332 331 300  
92 1 271 272 273 302 335 334 333 301  
93 1 273 274 275 303 337 336 335 302  
94 1 275 276 277 304 339 338 337 303  
95 1 277 278 279 305 341 340 339 304  
96 1 279 280 281 306 343 342 341 305  
97 1 281 282 283 307 345 344 343 306  
98 1 283 284 285 308 347 346 345 307  
99 1 285 286 287 309 349 348 347 308  
100 1 287 288 289 310 351 350 349 309  
101 1 311 312 313 353 375 374 373 352  
102 1 313 314 315 354 377 376 375 353  
103 1 315 316 317 355 379 378 377 354  
104 1 317 318 319 356 381 380 379 355  
105 1 319 320 321 357 383 382 381 356  
106 1 321 322 323 358 385 384 383 357  
107 1 323 324 325 359 387 386 385 358  
108 1 325 326 327 360 389 388 387 359  
109 1 327 328 329 361 391 390 389 360  
110 1 329 330 331 362 393 392 391 361  
111 1 331 332 333 363 395 394 393 362  
112 1 333 334 335 364 397 396 395 363  
113 1 335 336 337 365 399 398 397 364  
114 1 337 338 339 366 401 400 399 365  
115 1 339 340 341 367 403 402 401 366  
116 1 341 342 343 368 405 404 403 367  
117 1 343 344 345 369 407 406 405 368  
118 1 345 346 347 370 409 408 407 369  
119 1 347 348 349 371 411 410 409 370  
120 1 349 350 351 372 413 412 411 371  
121 2 391 392 393 415 419 418 417 414  
122 2 393 394 395 416 421 420 419 415  
123 2 417 418 419 423 427 426 425 422  
124 2 419 420 421 424 429 428 427 423  
125 2 425 426 427 431 435 434 433 430  
126 2 427 428 429 432 437 436 435 431  
127 2 433 434 435 439 443 442 441 438  
128 2 435 436 437 440 445 444 443 439  
1 0. 0.  
2 10. 0.  
3 20. 0.  
4 30. 0.  
5 40. 0.  
6 50. 0.  
7 60. 0.  
8 67.5 0.  
9 75. 0.  
10 82.5 0.

11	90.	0.
12	97.5	0.
13	105.	0.
14	112.5	0.
15	120.	0.
16	127.5	0.
17	135.	0.
18	142.5	0.
19	150.	0.
20	151.25	0.
21	152.5	0.
22	153.75	0.
23	155.	0.
24	162.5	0.
25	170.	0.
26	177.5	0.
27	185.	0.
28	192.5	0.
29	200.	0.
30	207.5	0.
31	215.	0.
32	222.5	0.
33	230.	0.
34	237.5	0.
35	245.	0.
36	255.	0.
37	265.	0.
38	275.0	0.
39	285.	0.
40	295.	0.
41	305.	0.
42	0.	12.5
43	20.	12.5
44	40.	12.5
45	60.	12.5
46	75.	12.5
47	90.	12.5
48	105.	12.5
49	120.	12.5
50	135.	12.5
51	150.	12.5
52	152.5	12.5
53	155.	12.5
54	170.	12.5
55	185.	12.5
56	200.	12.5
57	215.	12.5
58	230.	12.5
59	245.	12.5
60	265.	12.5
61	285.	12.5
62	305.	12.5
63	0.	25.
64	10.	25.
65	20.	25.
66	30.	25.
67	40.	25.
68	50.	25.
69	60.	25.
70	67.5	25.
71	75.	25.
72	82.5	25.

73	90.	25.
74	97.5	25.
75	105.	25.
76	112.5	25.
77	120.	25.
78	127.5	25.
79	135.	25.
80	142.5	25.
81	150.	25.
82	151.25	25.
83	152.5	25.
84	153.75	25.
85	155.	25.
86	162.5	25.
87	170.	25.
88	177.5	25.
89	185.	25.
90	192.5	25.
91	200.	25.
92	207.5	25.
93	215.	25.
94	222.5	25.
95	230.	25.
96	237.5	25.
97	245.	25.
98	255.	25.
99	265.	25.
100	275.0	25.
101	285.	25.
102	295.	25.
103	305.	25.
104	0.	32.5
105	20.	32.5
106	40.	32.5
107	60.	32.5
108	75.	32.5
109	90.	32.5
110	105.	32.5
111	120.	32.5
112	135.	32.5
113	150.	32.5
114	152.5	32.5
115	155.	32.5
116	170.	32.5
117	185.	32.5
118	200.	32.5
119	215.	32.5
120	230.	32.5
121	245.	32.5
122	265.	32.5
123	285.	32.5
124	305.	32.5
125	0.	40.
126	10.	40.
127	20.	40.
128	30.	40.
129	40.	40.
130	50.	40.
131	60.	40.
132	67.5	40.
133	75.	40.
134	82.5	40.

135	90.	40.
136	97.5	40.
137	105.	40.
138	112.5	40.
139	120.	40.
140	127.5	40.
141	135.	40.
142	142.5	40.
143	150.	40.
144	151.25	40.
145	152.5	40.
146	153.75	40.
147	155.	40.
148	162.5	40.
149	170.	40.
150	177.5	40.
151	185.	40.
152	192.5	40.
153	200.	40.
154	207.5	40.
155	215.	40.
156	222.5	40.
157	230.	40.
158	237.5	40.
159	245.	40.
160	255.	40.
161	265.	40.
162	275.0	40.
163	285.	40.
164	295.	40.
165	305.	40.
166	0.	47.5
167	20.	47.5
168	40.	47.5
169	60.	47.5
170	75.	47.5
171	90.	47.5
172	105.	47.5
173	120.	47.5
174	135.	47.5
175	150.	47.5
176	152.5	47.5
177	155.	47.5
178	170.	47.5
179	185.	47.5
180	200.	47.5
181	215.	47.5
182	230.	47.5
183	245.	47.5
184	265.	47.5
185	285.	47.5
186	305.	47.5
187	0.	55.
188	10.	55.
189	20.	55.
190	30.	55.
191	40.	55.
192	50.	55.
193	60.	55.
194	67.5	55.
195	75.	55.
196	82.5	55.

197	90.	55.
198	97.5	55.
199	105.	55.
200	112.5	55.
201	120.	55.
202	127.5	55.
203	135.	55.
204	142.5	55.
205	150.	55.
206	151.25	55.
207	152.5	55.
208	153.75	55.
209	155.	55.
210	162.5	55.
211	170.	55.
212	177.5	55.
213	185.	55.
214	192.5	55.
215	200.	55.
216	207.5	55.
217	215.	55.
218	222.5	55.
219	230.	55.
220	237.5	55.
221	245.	55.
222	255.	55.
223	265.	55.
224	275.0	55.
225	285.	55.
226	295.	55.
227	305.	55.
228	0.	62.5
229	20.	62.5
230	40.	62.5
231	60.	62.5
232	75.	62.5
233	90.	62.5
234	105.	62.5
235	120.	62.5
236	135.	62.5
237	150.	62.5
238	152.5	62.5
239	155.	62.5
240	170.	62.5
241	185.	62.5
242	200.	62.5
243	215.	62.5
244	230.	62.5
245	245.	62.5
246	265.	62.5
247	285.	62.5
248	305.	62.5
249	0.	70.
250	10.	70.
251	20.	70.
252	30.	70.
253	40.	70.
254	50.	70.
255	60.	70.
256	67.5	70.
257	75.	70.
258	82.5	70.



259	90.	70.
260	97.5	70.
261	105.	70.
262	112.5	70.
263	120.	70.
264	127.5	70.
265	135.	70.
266	142.5	70.
267	150.	70.
268	151.25	70.
269	152.5	70.
270	153.75	70.
271	155.	70.
272	162.5	70.
273	170.	70.
274	177.5	70.
275	185.	70.
276	192.5	70.
277	200.	70.
278	207.5	70.
279	215.	70.
280	222.5	70.
281	230.	70.
282	237.5	70.
283	245.	70.
284	255.	70.
285	265.	70.
286	275.0	70.
287	285.	70.
288	295.	70.
289	305.	70.
290	0.	77.5
291	20.	77.5
292	40.	77.5
293	60.	77.5
294	75.	77.5
295	90.	77.5
296	105.	77.5
297	120.	77.5
298	135.	77.5
299	150.	77.5
300	152.5	77.5
301	155.	77.5
302	170.	77.5
303	185.	77.5
304	200.	77.5
305	215.	77.5
306	230.	77.5
307	245.	77.5
308	265.	77.5
309	285.	77.5
310	305.	77.5
311	0.	85.
312	10.	85.
313	20.	85.
314	30.	85.
315	40.	85.
316	50.	85.
317	60.	85.
318	67.5	85.
319	75.	85.
320	82.5	85.

321 90. 85.  
322 97.5 85.  
323 105. 85.  
324 112.5 85.  
325 120. 85.  
326 127.5 85.  
327 135. 85.  
328 142.5 85.  
329 150. 85.  
330 151.25 85.  
331 152.5 85.  
332 153.75 85.  
333 155. 85.  
334 162.5 85.  
335 170. 85.  
336 177.5 85.  
337 185. 85.  
338 192.5 85.  
339 200. 85.  
340 207.5 85.  
341 215. 85.  
342 222.5 85.  
343 230. 85.  
344 237.5 85.  
345 245. 85.  
346 255. 85.  
347 265. 85.  
348 275.0 85.  
349 285. 85.  
350 295. 85.  
351 305. 85 0.  
352 0. 92.5  
353 20. 92.5  
354 40. 92.5  
355 60. 92.5  
356 75. 92.5  
357 90. 92.5  
358 105. 92.5  
359 120. 92.5  
360 135. 92.5  
361 150. 92.5  
362 152.5 92.5  
363 155. 92.5  
364 170. 92.5  
365 185. 92.5  
366 200. 92.5  
367 215. 92.5  
368 230. 92.5  
369 245. 92.5  
370 265. 92.5  
371 285. 92.5  
372 305. 92.5  
373 0. 100.  
374 10. 100.  
375 20. 100.  
376 30. 100.  
377 40. 100.  
378 50. 100.  
379 60. 100.  
380 67.5 100.  
381 75. 100.  
382 82.5 100.

383 90. 100.  
384 97.5 100.  
385 105. 100.  
386 112.5 100.  
387 120. 100.  
388 127.5 100.  
389 135. 100.  
390 142.5 100.  
391 150. 100.  
392 151.25 100.  
393 152.5 100.  
394 153.75 100.  
395 155. 100.  
396 162.5 100.  
397 170. 100.  
398 177.5 100.  
399 185. 100.  
400 192.5 100.  
401 200. 100.  
402 207.5 100.  
403 215. 100.  
404 222.5 100.  
405 230. 100.  
406 237.5 100.  
407 245. 100.  
408 255. 100.  
409 265. 100.  
410 275.0 100.  
411 285. 100.  
412 295. 100.  
413 305. 100.  
414 150. 101.25  
415 152.5 101.25  
416 155. 101.25  
417 150. 102.5  
418 151.25 102.5  
419 152.5 102.5  
420 153.75 102.5  
421 155. 102.5  
422 150. 103.75  
423 152.5 103.75  
424 155. 103.75  
425 150. 105.  
426 151.25 105.  
427 152.5 105.  
428 153.75 105.  
429 155. 105.  
430 150. 106.25  
431 152.5 106.25  
432 155. 106.25  
433 150. 107.5  
434 151.25 107.5  
435 152.5 107.5  
436 153.75 107.5  
437 155. 107.5  
438 150. 108.75  
439 152.5 108.75  
440 155. 108.75  
441 150. 110.  
442 151.25 110.  
443 152.5 110.  
444 153.75 110.

445 155. 110.

1	1	1
2	1	1
3	1	1
4	1	1
5	1	1
6	1	1
7	1	1
8	1	1
9	1	1
10	1	1
11	1	1
12	1	1
13	1	1
14	1	1
15	1	1
16	1	1
17	1	1
18	1	1
19	1	1
20	1	1
21	1	1
22	1	1
23	1	1
24	1	1
25	1	1
26	1	1
27	1	1
28	1	1
29	1	1
30	1	1
31	1	1
32	1	1
33	1	1
34	1	1
35	1	1
36	1	1
37	1	1
38	1	1
39	1	1
40	1	1
41	1	1
42	0	1
65	0	1
104	0	1
125	0	1
166	0	1
187	0	1
228	0	1
249	0	1
290	0	1
311	0	1
352	0	1
373	0	1
62	0	1
103	0	1
124	0	1
165	0	1
186	0	1
277	0	1
248	0	1
289	0	1





1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
445 0.0 0.0  
445 0.0 0.0  
jimmy  
0,0,0,0

Β) Για την περίπτωση δυνατότητας μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος κατά οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση

445,128,2,2

41,2,8,11,3,2,3,4,0,0,0,3,0

1 1 1 2 3 43 65 64 63 42  
2 1 3 4 5 44 67 66 65 43  
3 1 5 6 7 45 69 68 67 44  
4 1 7 8 9 46 71 70 69 45  
5 1 9 10 11 47 73 72 71 46  
6 1 11 12 13 48 75 74 73 47  
7 1 13 14 15 49 77 76 75 48  
8 1 15 16 17 50 79 78 77 49  
9 1 17 18 19 51 81 80 79 50  
10 1 19 20 21 52 83 82 81 51  
11 1 21 22 23 53 85 84 83 52  
12 1 23 24 25 54 87 86 85 53  
13 1 25 26 27 55 89 88 87 54  
14 1 27 28 29 56 91 90 89 55  
15 1 29 30 31 57 93 92 91 56  
16 1 31 32 33 58 95 94 93 57  
17 1 33 34 35 59 97 96 95 58  
18 1 35 36 37 60 99 98 97 59  
19 1 37 38 39 61 101 100 99 60  
20 1 39 40 41 62 103 102 100 61  
21 1 63 64 65 105 127 126 125 104  
22 1 65 66 67 106 129 128 127 105  
23 1 67 68 69 107 131 130 129 106  
24 1 69 70 71 108 133 132 131 107  
25 1 71 72 73 109 135 134 133 108  
26 1 73 74 75 110 137 136 135 109  
27 1 75 76 77 111 139 138 137 110  
28 1 77 78 79 112 141 140 139 111  
29 1 79 80 81 113 143 142 141 112  
30 1 81 82 83 114 145 144 143 113  
31 1 83 84 85 115 147 146 145 114  
32 1 85 86 87 116 149 148 147 115  
33 1 87 88 89 117 151 150 149 116  
34 1 89 90 91 118 153 152 151 117  
35 1 91 92 93 119 155 154 153 118  
36 1 93 94 95 120 157 156 155 119  
37 1 95 96 97 121 159 158 157 120  
38 1 97 98 99 122 161 160 159 121  
39 1 99 100 101 123 163 162 161 122  
40 1 101 102 103 124 165 164 163 123  
41 1 125 126 127 167 189 188 187 166  
42 1 127 128 129 168 191 190 189 167  
43 1 129 130 131 169 193 192 191 168  
44 1 131 132 133 170 195 194 193 169  
45 1 133 134 135 171 197 196 195 170  
46 1 135 136 137 172 199 198 197 171  
47 1 137 138 139 173 201 200 199 172  
48 1 139 140 141 174 203 202 201 173  
49 1 141 142 143 175 205 204 203 174  
50 1 143 144 145 176 207 206 205 175  
51 1 145 146 147 177 209 208 207 176  
52 1 147 148 149 178 211 210 209 177  
53 1 149 150 151 179 213 212 211 178  
54 1 151 152 153 180 215 214 213 179  
55 1 153 154 155 181 217 216 215 180



56 1 155 156 157 182 219 218 217 181  
57 1 157 158 159 183 221 220 219 182  
58 1 159 160 161 184 223 222 221 183  
59 1 161 162 163 185 225 224 223 184  
60 1 163 164 165 186 227 226 225 185  
61 1 187 188 189 229 251 250 249 228  
62 1 189 190 191 230 253 252 251 229  
63 1 191 192 193 231 255 254 253 230  
64 1 193 194 195 232 257 256 255 231  
65 1 195 196 197 233 259 258 257 232  
66 1 197 198 199 234 261 260 259 233  
67 1 199 200 201 235 263 262 261 234  
68 1 201 202 203 236 265 264 263 235  
69 1 203 204 205 237 267 266 265 236  
70 1 205 206 207 238 269 268 267 237  
71 1 207 208 209 239 271 270 269 238  
72 1 209 210 211 240 273 272 271 239  
73 1 211 212 213 241 275 274 273 240  
74 1 213 214 215 242 277 276 275 241  
75 1 215 216 217 243 279 278 277 242  
76 1 217 218 219 244 281 280 279 243  
77 1 219 220 221 245 283 282 281 244  
78 1 221 222 223 246 285 284 283 245  
79 1 223 224 225 247 287 286 285 246  
80 1 225 226 227 248 289 288 287 247  
81 1 249 250 251 291 313 312 311 290  
82 1 251 252 253 292 315 314 313 291  
83 1 253 254 255 293 317 316 315 292  
84 1 255 256 257 294 319 318 317 293  
85 1 257 258 259 295 321 320 319 294  
86 1 259 260 261 269 323 322 321 295  
87 1 261 262 263 297 325 324 323 296  
88 1 263 264 265 298 327 326 325 297  
89 1 265 266 267 299 329 328 327 298  
90 1 267 268 269 300 331 330 329 299  
91 1 269 270 271 301 333 332 331 300  
92 1 271 272 273 302 335 334 333 301  
93 1 273 274 275 303 337 336 335 302  
94 1 275 276 277 304 339 338 337 303  
95 1 277 278 279 305 341 340 339 304  
96 1 279 280 281 306 343 342 341 305  
97 1 281 282 283 307 345 344 343 306  
98 1 283 284 285 308 347 346 345 307  
99 1 285 286 287 309 349 348 347 308  
100 1 287 288 289 310 351 350 349 309  
101 1 311 312 313 353 375 374 373 352  
102 1 313 314 315 354 377 376 375 353  
103 1 315 316 317 355 379 378 377 354  
104 1 317 318 319 356 381 380 379 355  
105 1 319 320 321 357 383 382 381 356  
106 1 321 322 323 358 385 384 383 357  
107 1 323 324 325 359 387 386 385 358  
108 1 325 326 327 360 389 388 387 359  
109 1 327 328 329 361 391 390 389 360  
110 1 329 330 331 362 393 392 391 361  
111 1 331 332 333 363 395 394 393 362  
112 1 333 334 335 364 397 396 395 363  
113 1 335 336 337 365 399 398 397 364  
114 1 337 338 339 366 401 400 399 365  
115 1 339 340 341 367 403 402 401 366  
116 1 341 342 343 368 405 404 403 367  
117 1 343 344 345 369 407 406 405 368

118 1 345 346 347 370 409 408 407 369  
 119 1 347 348 349 371 411 410 409 370  
 120 1 349 350 351 372 413 412 411 371  
 121 2 391 392 393 415 419 418 417 414  
 122 2 393 394 395 416 421 420 419 415  
 123 2 417 418 419 423 427 426 425 422  
 124 2 419 420 421 424 429 428 427 423  
 125 2 425 426 427 431 435 434 433 430  
 126 2 427 428 429 432 437 436 435 431  
 127 2 433 434 435 439 443 442 441 438  
 128 2 435 436 437 440 445 444 443 439  
 1 0. 0.  
 2 10. 0.  
 3 20. 0.  
 4 30. 0.  
 5 40. 0.  
 6 50. 0.  
 7 60. 0.  
 8 67.5 0.  
 9 75. 0.  
 10 82.5 0.  
 11 90. 0.  
 12 97.5 0.  
 13 105. 0.  
 14 112.5 0.  
 15 120. 0.  
 16 127.5 0.  
 17 135. 0.  
 18 142.5 0.  
 19 150. 0.  
 20 151.25 0.  
 21 152.5 0.  
 22 153.75 0.  
 23 155. 0.  
 24 162.5 0.  
 25 170. 0.  
 26 177.5 0.  
 27 185. 0.  
 28 192.5 0.  
 29 200. 0.  
 30 207.5 0.  
 31 215. 0.  
 32 222.5 0.  
 33 230. 0.  
 34 237.5 0.  
 35 245. 0.  
 36 255. 0.  
 37 265. 0.  
 38 275.0 0.  
 39 285. 0.  
 40 295. 0.  
 41 305. 0.  
 42 0. 12.5  
 43 20. 12.5  
 44 40. 12.5  
 45 60. 12.5  
 46 75. 12.5  
 47 90. 12.5  
 48 105. 12.5  
 49 120. 12.5  
 50 135. 12.5  
 51 150. 12.5

52	152.5	12.5
53	155.	12.5
54	170.	12.5
55	185.	12.5
56	200.	12.5
57	215.	12.5
58	230.	12.5
59	245.	12.5
60	265.	12.5
61	285.	12.5
62	305.	12.5
63	0.	25.
64	10.	25.
65	20.	25.
66	30.	25.
67	40.	25.
68	50.	25.
69	60.	25.
70	67.5	25.
71	75.	25.
72	82.5	25.
73	90.	25.
74	97.5	25.
75	105.	25.
76	112.5	25.
77	120.	25.
78	127.5	25.
79	135.	25.
80	142.5	25.
81	150.	25.
82	151.25	25.
83	152.5	25.
84	153.75	25.
85	155.	25.
86	162.5	25.
87	170.	25.
88	177.5	25.
89	185.	25.
90	192.5	25.
91	200.	25.
92	207.5	25.
93	215.	25.
94	222.5	25.
95	230.	25.
96	237.5	25.
97	245.	25.
98	255.	25.
99	265.	25.
100	275.0	25.
101	285.	25.
102	295.	25.
103	305.	25.
104	0.	32.5
105	20.	32.5
106	40.	32.5
107	60.	32.5
108	75.	32.5
109	90.	32.5
110	105.	32.5
111	120.	32.5
112	135.	32.5
113	150.	32.5

114	152.5	32.5
115	155.	32.5
116	170.	32.5
117	185.	32.5
118	200.	32.5
119	215.	32.5
120	230.	32.5
121	245.	32.5
122	265.	32.5
123	285.	32.5
124	305.	32.5
125	0.	40.
126	10.	40.
127	20.	40.
128	30.	40.
129	40.	40.
130	50.	40.
131	60.	40.
132	67.5	40.
133	75.	40.
134	82.5	40.
135	90.	40.
136	97.5	40.
137	105.	40.
138	112.5	40.
139	120.	40.
140	127.5	40.
141	135.	40.
142	142.5	40.
143	150.	40.
144	151.25	40.
145	152.5	40.
146	153.75	40.
147	155.	40.
148	162.5	40.
149	170.	40.
150	177.5	40.
151	185.	40.
152	192.5	40.
153	200.	40.
154	207.5	40.
155	215.	40.
156	222.5	40.
157	230.	40.
158	237.5	40.
159	245.	40.
160	255.	40.
161	265.	40.
162	275.0	40.
163	285.	40.
164	295.	40.
165	305.	40.
166	0.	47.5
167	20.	47.5
168	40.	47.5
169	60.	47.5
170	75.	47.5
171	90.	47.5
172	105.	47.5
173	120.	47.5
174	135.	47.5
175	150.	47.5

176	152.5	47.5
177	155.	47.5
178	170.	47.5
179	185.	47.5
180	200.	47.5
181	215.	47.5
182	230.	47.5
183	245.	47.5
184	265.	47.5
185	285.	47.5
186	305.	47.5
187	0.	55.
188	10.	55.
189	20.	55.
190	30.	55.
191	40.	55.
192	50.	55.
193	60.	55.
194	67.5	55.
195	75.	55.
196	82.5	55.
197	90.	55.
198	97.5	55.
199	105.	55.
200	112.5	55.
201	120.	55.
202	127.5	55.
203	135.	55.
204	142.5	55.
205	150.	55.
206	151.25	55.
207	152.5	55.
208	153.75	55.
209	155.	55.
210	162.5	55.
211	170.	55.
212	177.5	55.
213	185.	55.
214	192.5	55.
215	200.	55.
216	207.5	55.
217	215.	55.
218	222.5	55.
219	230.	55.
220	237.5	55.
221	245.	55.
222	255.	55.
223	265.	55.
224	275.0	55.
225	285.	55.
226	295.	55.
227	305.	55.
228	0.	62.5
229	20.	62.5
230	40.	62.5
231	60.	62.5
232	75.	62.5
233	90.	62.5
234	105.	62.5
235	120.	62.5
236	135.	62.5
237	150.	62.5

238	152.5	62.5
239	155.	62.5
240	170.	62.5
241	185.	62.5
242	200.	62.5
243	215.	62.5
244	230.	62.5
245	245.	62.5
246	265.	62.5
247	285.	62.5
248	305.	62.5
249	0.	70.
250	10.	70.
251	20.	70.
252	30.	70.
253	40.	70.
254	50.	70.
255	60.	70.
256	67.5	70.
257	75.	70.
258	82.5	70.
259	90.	70.
260	97.5	70.
261	105.	70.
262	112.5	70.
263	120.	70.
264	127.5	70.
265	135.	70.
266	142.5	70.
267	150.	70.
268	151.25	70.
269	152.5	70.
270	153.75	70.
271	155.	70.
272	162.5	70.
273	170.	70.
274	177.5	70.
275	185.	70.
276	192.5	70.
277	200.	70.
278	207.5	70.
279	215.	70.
280	222.5	70.
281	230.	70.
282	237.5	70.
283	245.	70.
284	255.	70.
285	265.	70.
286	275.0	70.
287	285.	70.
288	295.	70.
289	305.	70.
290	0.	77.5
291	20.	77.5
292	40.	77.5
293	60.	77.5
294	75.	77.5
295	90.	77.5
296	105.	77.5
297	120.	77.5
298	135.	77.5
299	150.	77.5

300	152.5	77.5
301	155.	77.5
302	170.	77.5
303	185.	77.5
304	200.	77.5
305	215.	77.5
306	230.	77.5
307	245.	77.5
308	265.	77.5
309	285.	77.5
310	305.	77.5
311	0.	85.
312	10.	85.
313	20.	85.
314	30.	85.
315	40.	85.
316	50.	85.
317	60.	85.
318	67.5	85.
319	75.	85.
320	82.5	85.
321	90.	85.
322	97.5	85.
323	105.	85.
324	112.5	85.
325	120.	85.
326	127.5	85.
327	135.	85.
328	142.5	85.
329	150.	85.
330	151.25	85.
331	152.5	85.
332	153.75	85.
333	155.	85.
334	162.5	85.
335	170.	85.
336	177.5	85.
337	185.	85.
338	192.5	85.
339	200.	85.
340	207.5	85.
341	215.	85.
342	222.5	85.
343	230.	85.
344	237.5	85.
345	245.	85.
346	255.	85.
347	265.	85.
348	275.0	85.
349	285.	85.
350	295.	85.
351	305.	85 0.
352	0.	92.5
353	20.	92.5
354	40.	92.5
355	60.	92.5
356	75.	92.5
357	90.	92.5
358	105.	92.5
359	120.	92.5
360	135.	92.5
361	150.	92.5

362	152.5	92.5
363	155.	92.5
364	170.	92.5
365	185.	92.5
366	200.	92.5
367	215.	92.5
368	230.	92.5
369	245.	92.5
370	265.	92.5
371	285.	92.5
372	305.	92.5
373	0.	100.
374	10.	100.
375	20.	100.
376	30.	100.
377	40.	100.
378	50.	100.
379	60.	100.
380	67.5	100.
381	75.	100.
382	82.5	100.
383	90.	100.
384	97.5	100.
385	105.	100.
386	112.5	100.
387	120.	100.
388	127.5	100.
389	135.	100.
390	142.5	100.
391	150.	100.
392	151.25	100.
393	152.5	100.
394	153.75	100.
395	155.	100.
396	162.5	100.
397	170.	100.
398	177.5	100.
399	185.	100.
400	192.5	100.
401	200.	100.
402	207.5	100.
403	215.	100.
404	222.5	100.
405	230.	100.
406	237.5	100.
407	245.	100.
408	255.	100.
409	265.	100.
410	275.0	100.
411	285.	100.
412	295.	100.
413	305.	100.
414	150.	101.25
415	152.5	101.25
416	155.	101.25
417	150.	102.5
418	151.25	102.5
419	152.5	102.5
420	153.75	102.5
421	155.	102.5
422	150.	103.75
423	152.5	103.75



424	155.	103.75
425	150.	105.
426	151.25	105.
427	152.5	105.
428	153.75	105.
429	155.	105.
430	150.	106.25
431	152.5	106.25
432	155.	106.25
433	150.	107.5
434	151.25	107.5
435	152.5	107.5
436	153.75	107.5
437	155.	107.5
438	150.	108.75
439	152.5	108.75
440	155.	108.75
441	150.	110.
442	151.25	110.
443	152.5	110.
444	153.75	110.
445	155.	110.
1	1	1
2	1	1
3	1	1
4	1	1
5	1	1
6	1	1
7	1	1
8	1	1
9	1	1
10	1	1
11	1	1
12	1	1
13	1	1
14	1	1
15	1	1
16	1	1
17	1	1
18	1	1
19	1	1
20	1	1
21	1	1
22	1	1
23	1	1
24	1	1
25	1	1
26	1	1
27	1	1
28	1	1
29	1	1
30	1	1
31	1	1
32	1	1
33	1	1
34	1	1
35	1	1
36	1	1
37	1	1
38	1	1
39	1	1
40	1	1



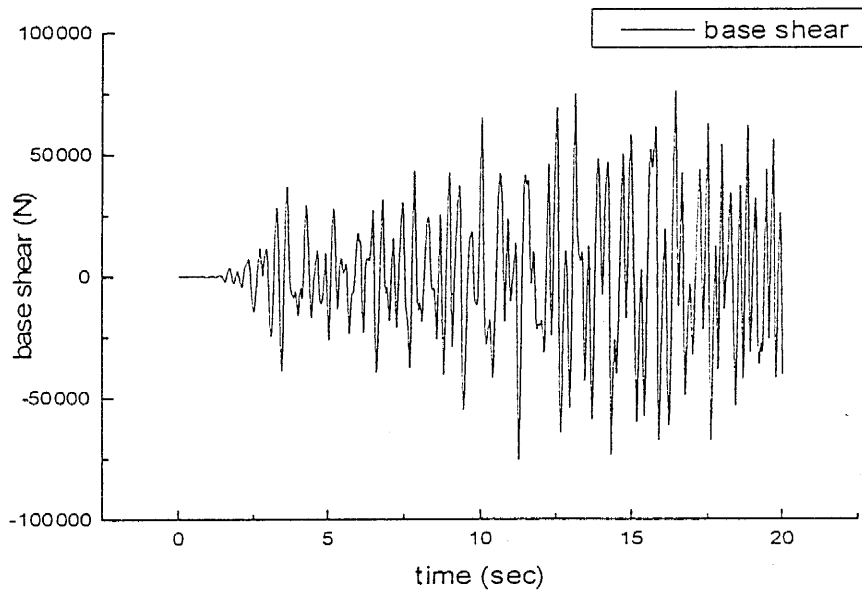


1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
1  
445 0.0 0.0  
445 0.0 0.0  
jimmy  
0,0,0,0

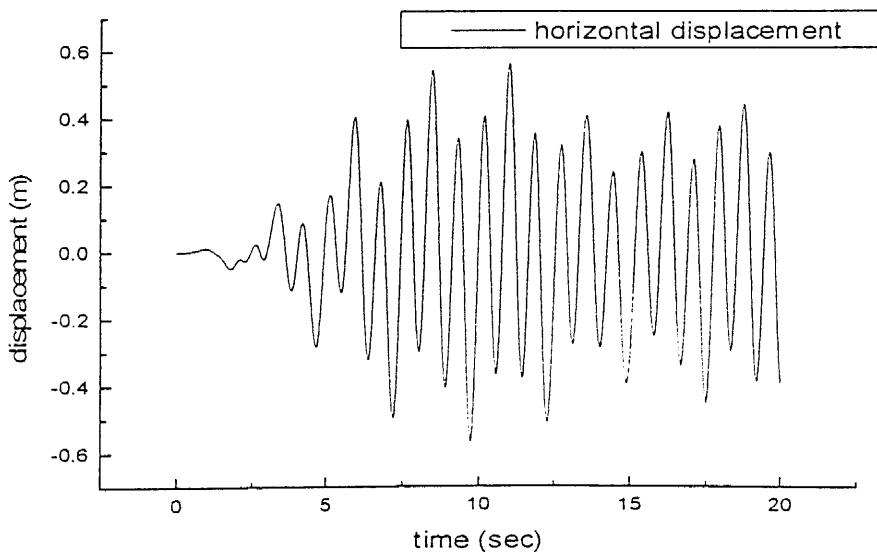
## 8.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων ελαστικής ανάλυσης

8.2.1 Πέριπτωση A (δυνατότητα μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων εδαφικού στρώματος μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση)

8.2.1.1 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,1g

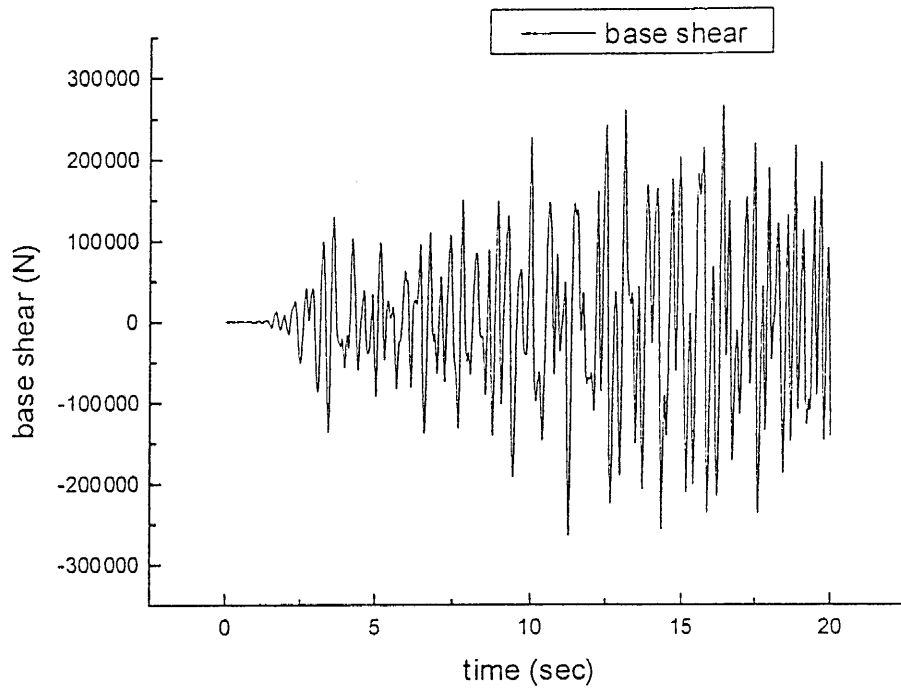


Σχήμα 8.1

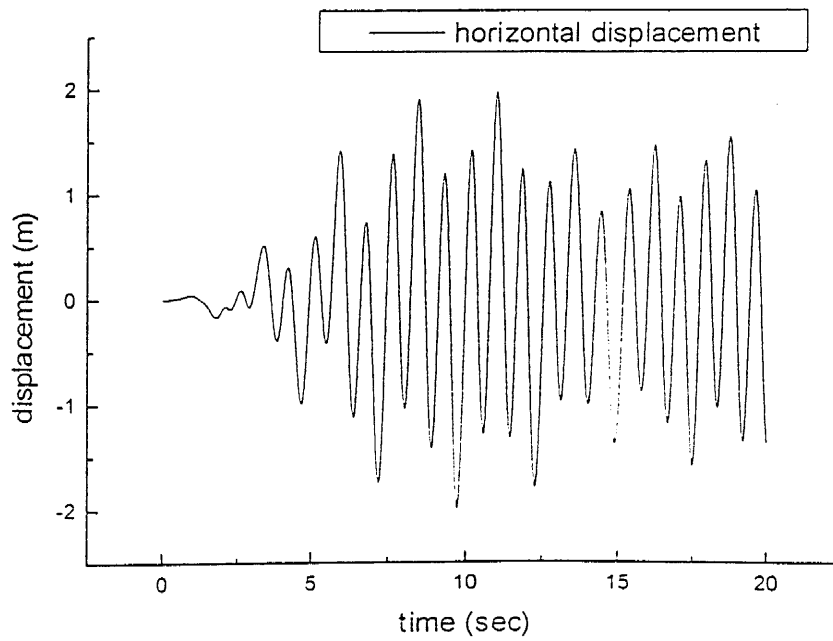


Σχήμα 8.2

8.2.1.2 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,35g

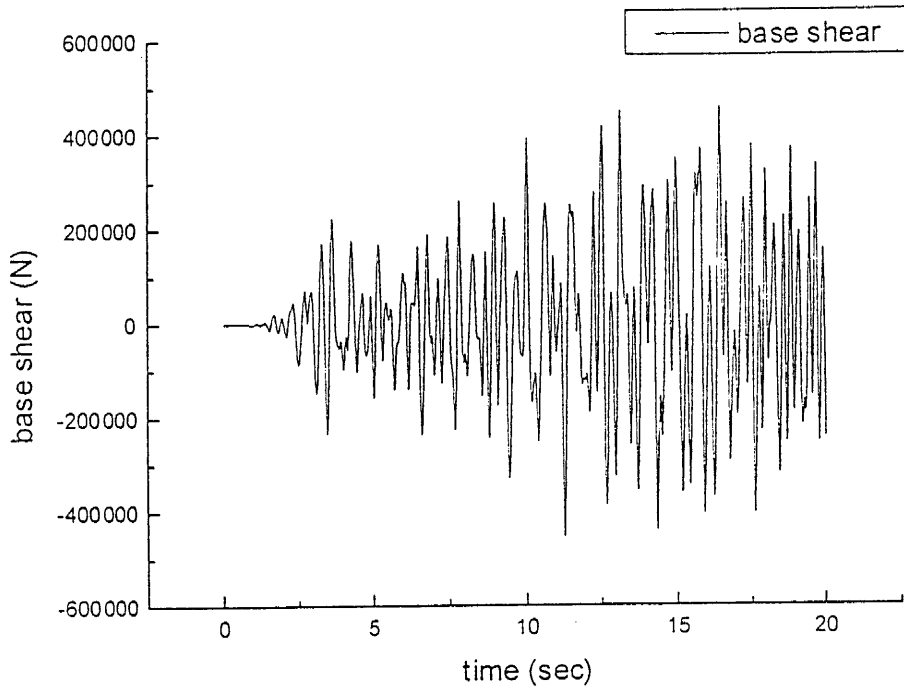


Σχήμα 8.3

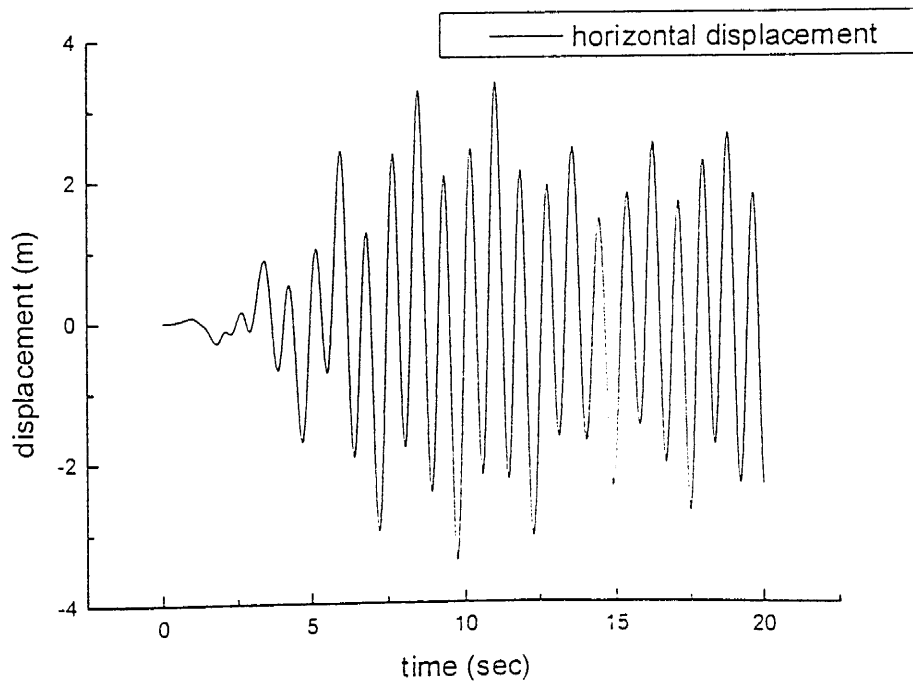


Σχήμα 8.4

8.2.1.3 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,6g



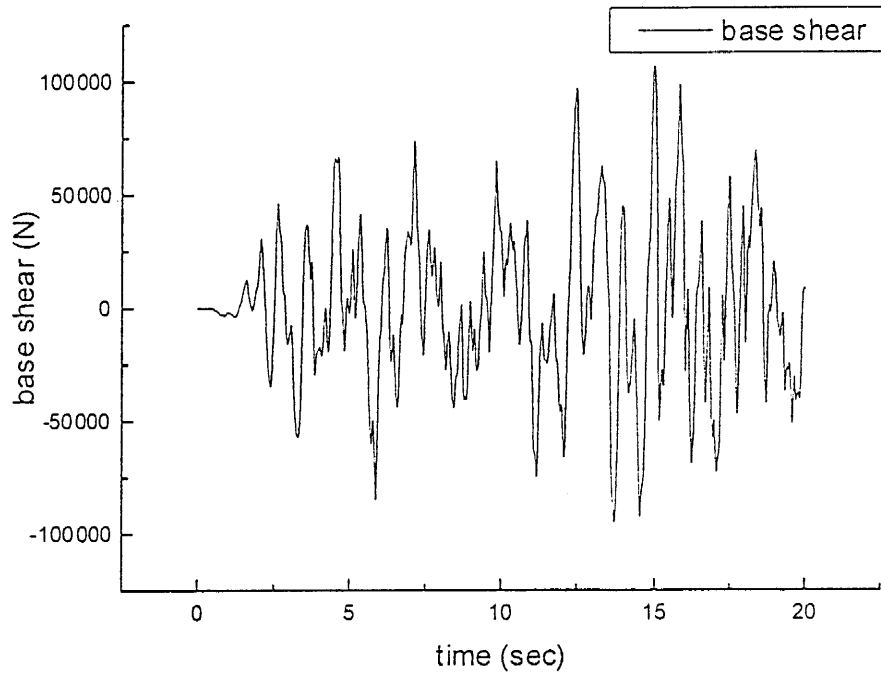
Σχήμα 8.5



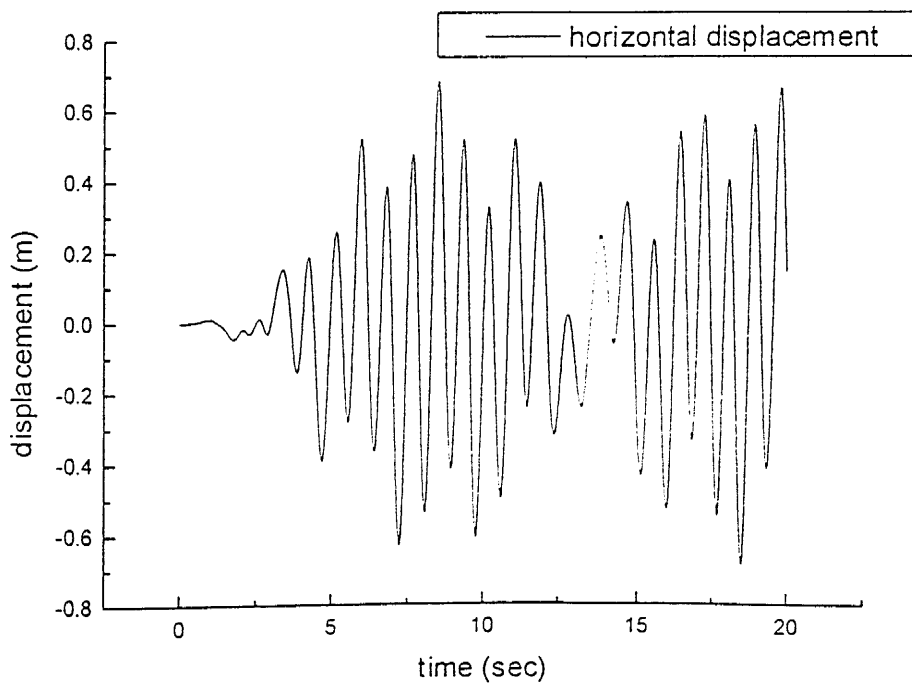
Σχήμα 8.6

8.2.1 Περίπτωση Β (δυνατότητα μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος κατά οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση)

8.2.1.4 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,1g



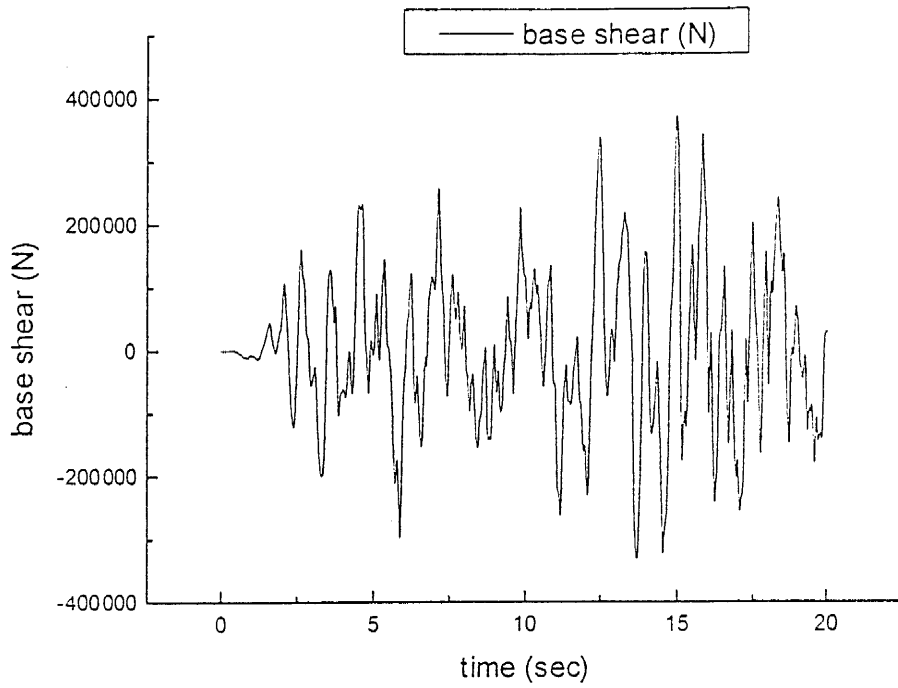
Σχήμα 8.7



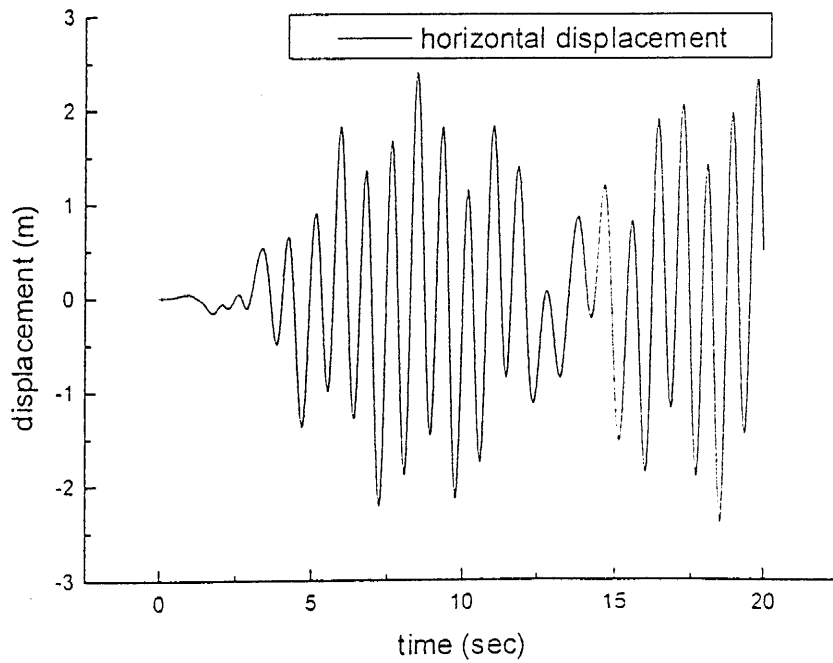
Σχήμα 8.8



8.2.1.5 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,35g

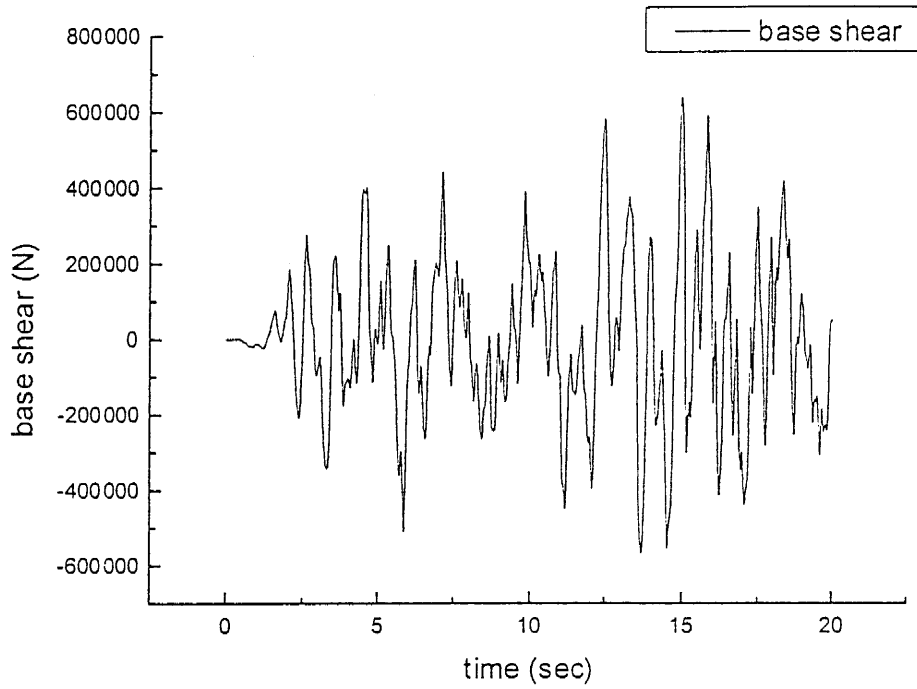


Σχήμα 8.9

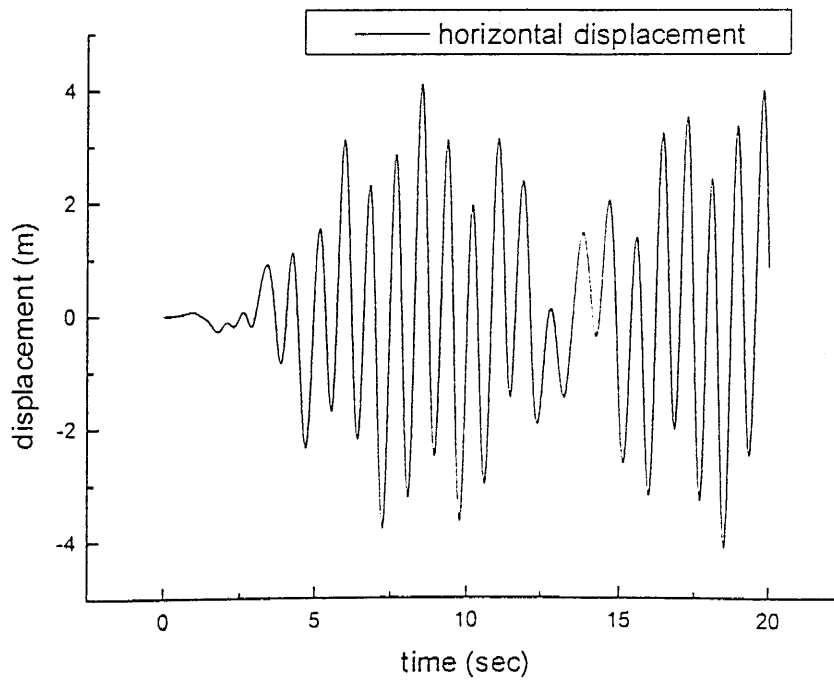


Σχήμα 8.10

8.2.1.6 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,6g



Σχήμα 8.11

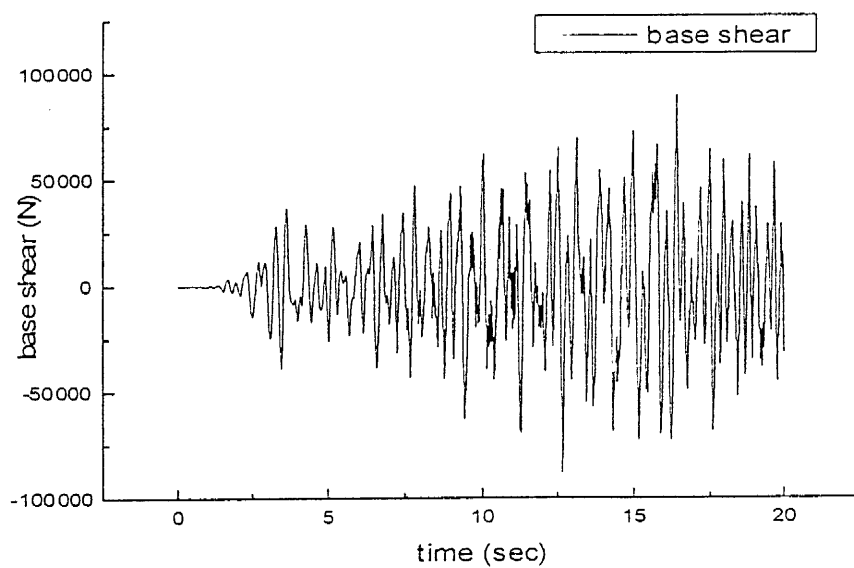


Σχήμα 8.12

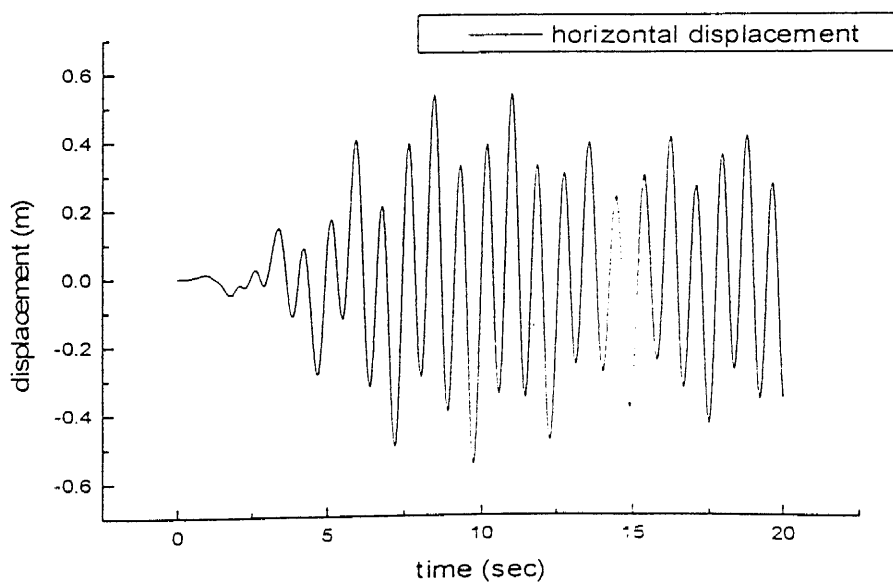
### 8.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων ανελαστικής ανάλυσης εδάφους

8.2.1 Περίπτωση Α (δυνατότητα μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση)

8.3.1.1 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,1g

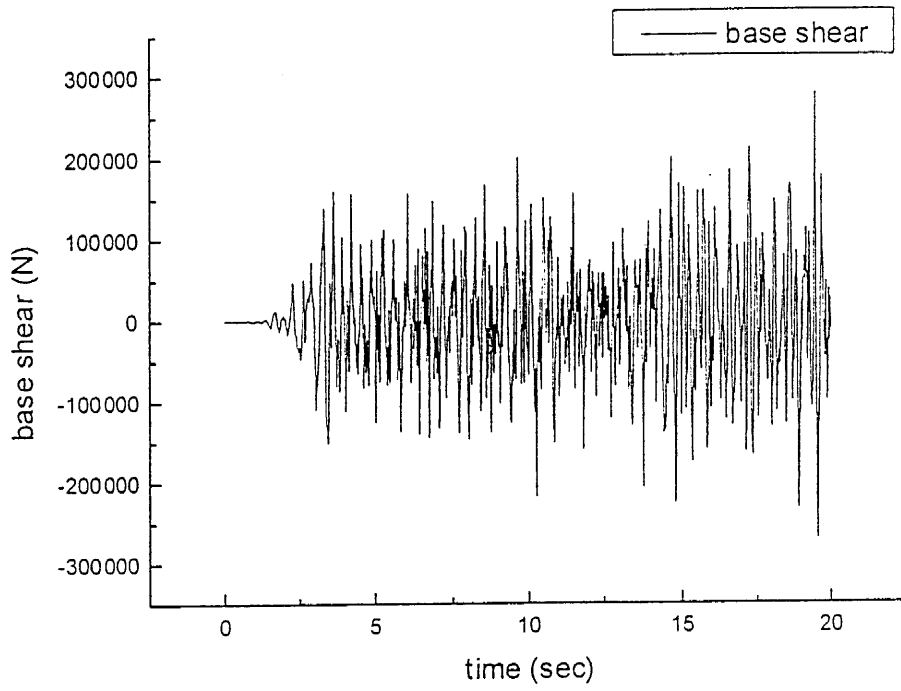


Σχήμα 8.13

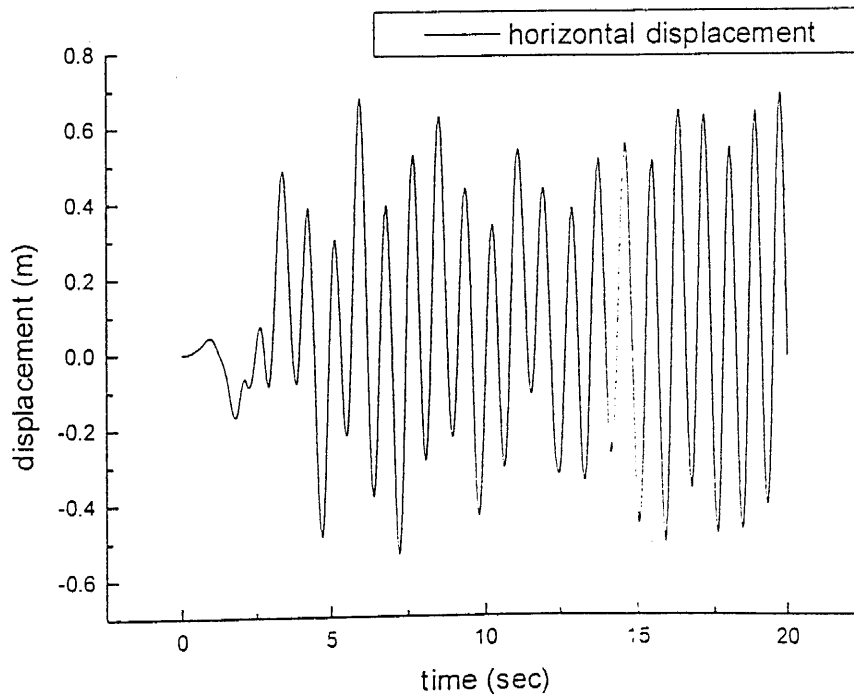


Σχήμα 8.14

8.3.1.2 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,35g

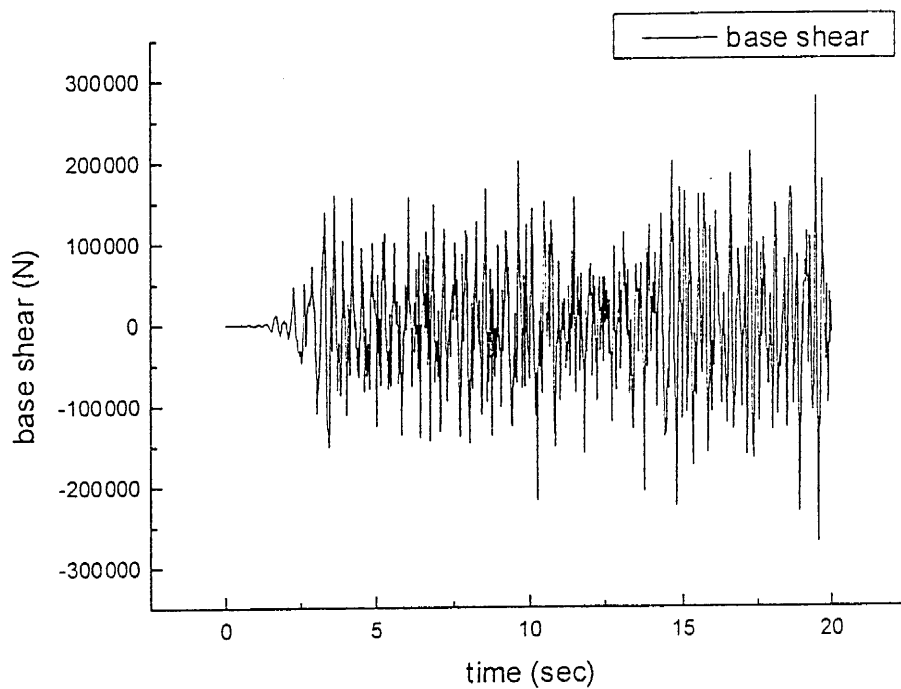


Σχήμα 8.15

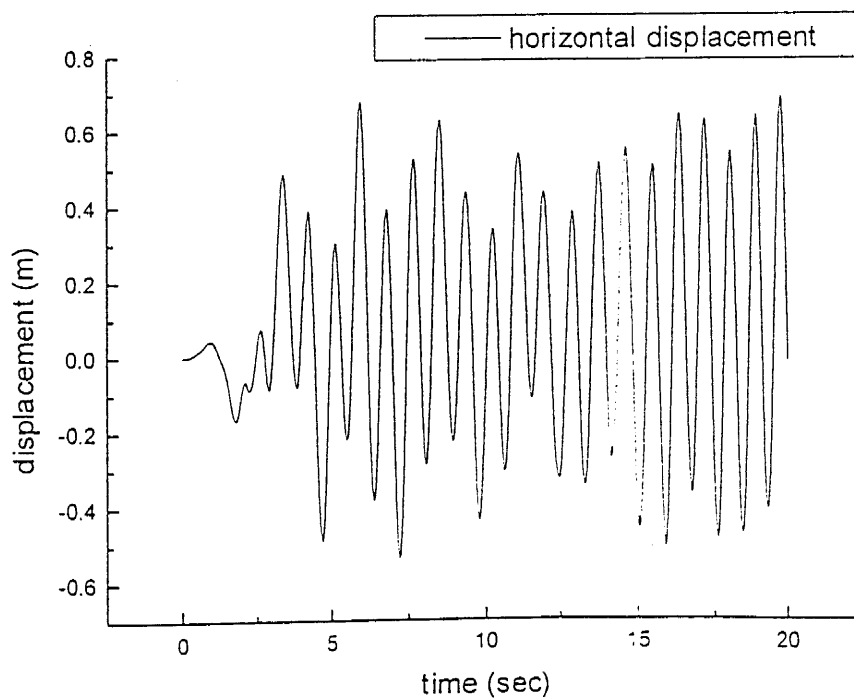


Σχήμα 8.16

8.3.1.2 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,35g

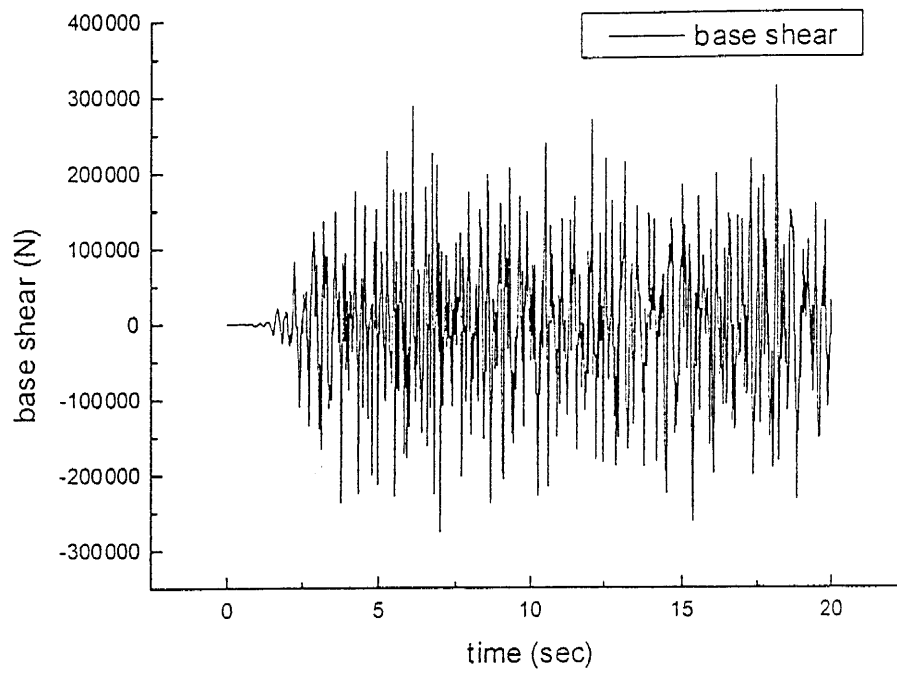


Σχήμα 8.15

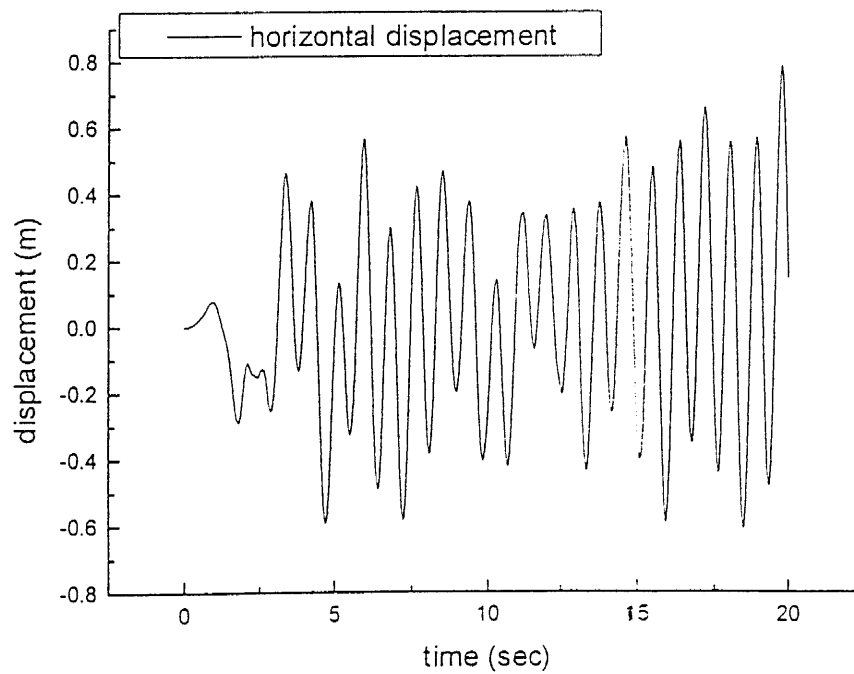


Σχήμα 8.16

8.3.1.3 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,6g



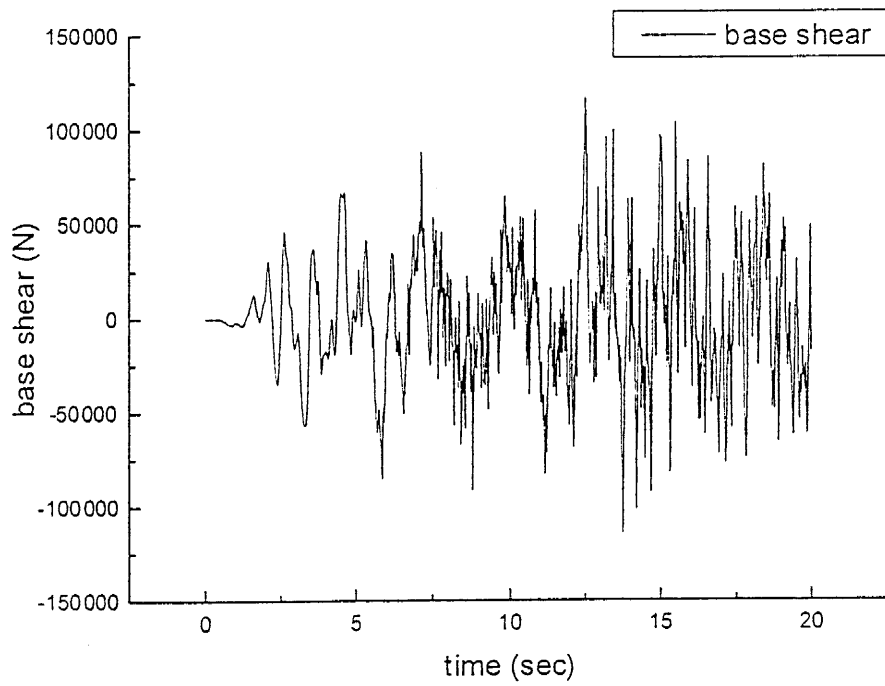
Σχήμα 8.17



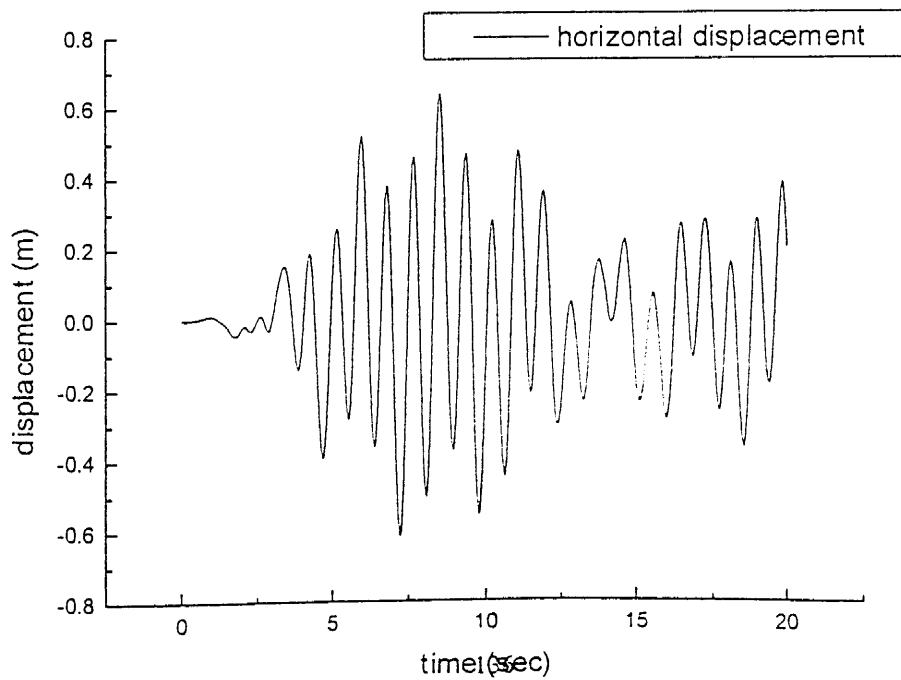
Σχήμα 8.18

8.2.1 Περίπτωση Β (δυνατότητα μετατόπισης των κόμβων των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος κατά οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση)

8.3.1.4 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,1g

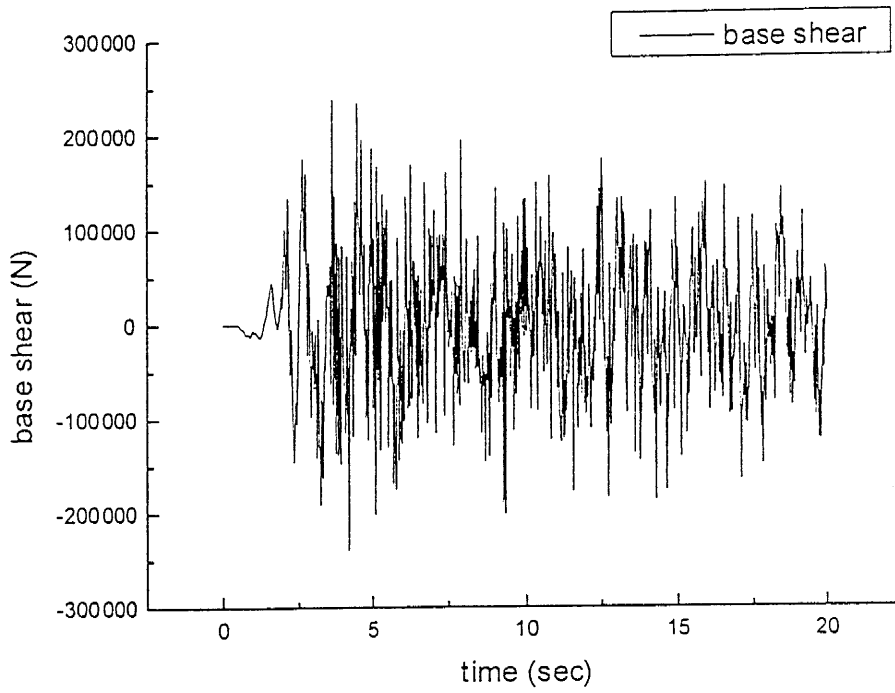


Σχήμα 8.19

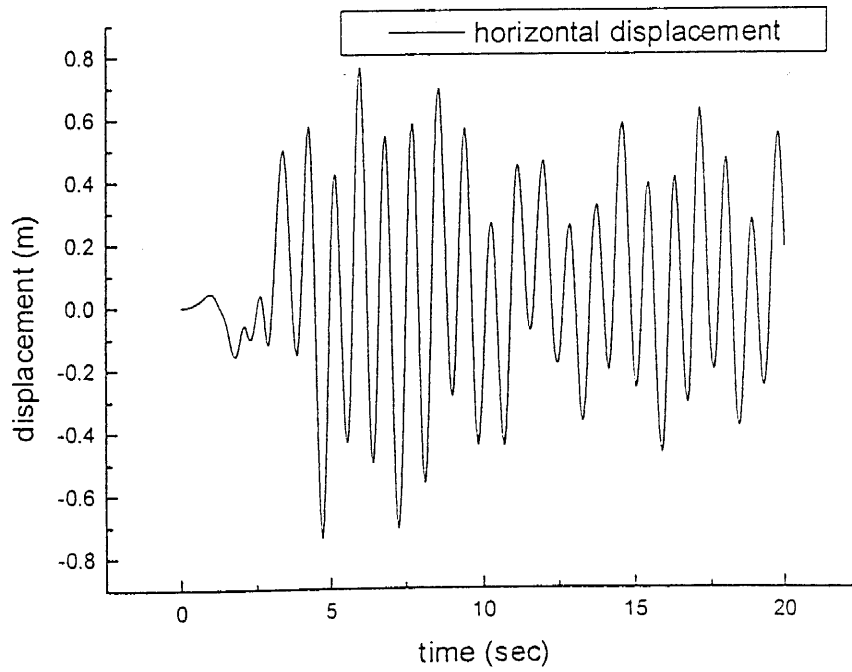


Σχήμα 8.20

8.3.1.5 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,35g



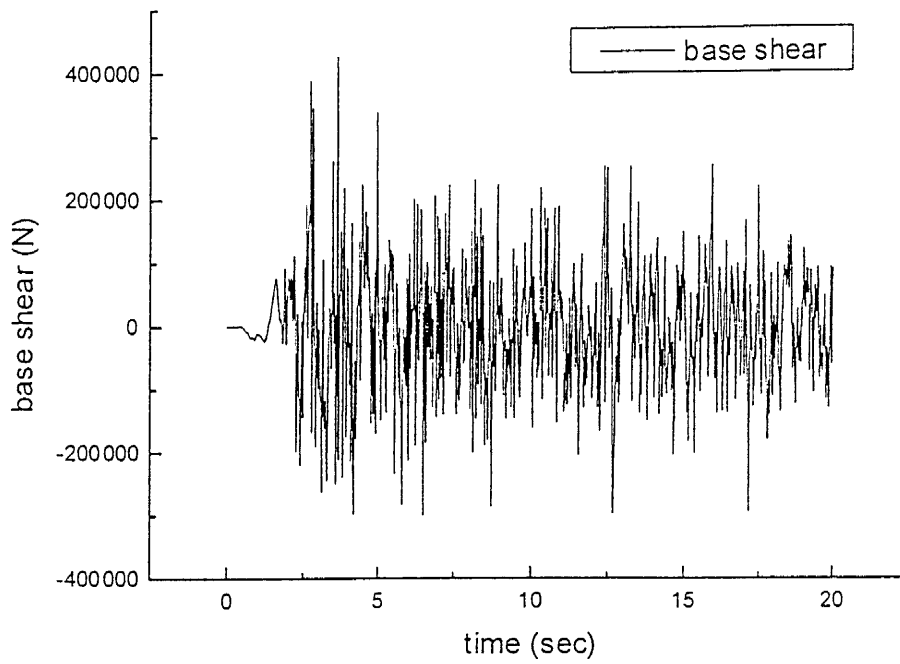
Σχήμα 8.21



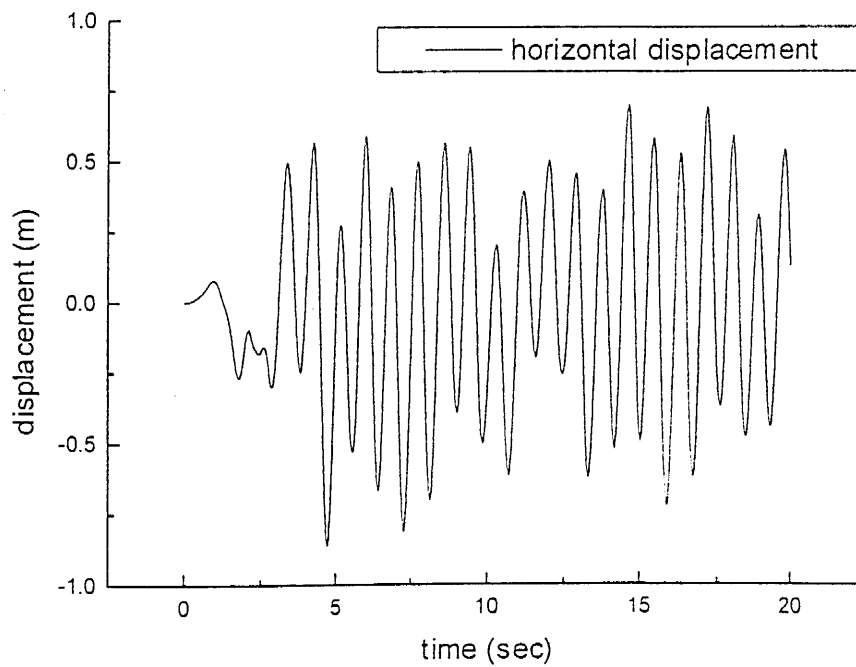
Σχήμα 8.21



8.3.1.6 Για μέγιστη επιτάχυνση 0,6g



Σχήμα 8.22



Σχήμα 8.23



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

#### 9.1 Μέθοδος υπολογισμού συντελεστή

Όπως έχει αναφερθεί και στο πρώτο κεφάλαιο στόχος της εργασίας είναι ο υπολογισμός ενός συντελεστή που θα επιτρέπει τον προσδιορισμό της μέγιστης τέμνουσας βάσης της κατασκευής για την περίπτωση ανελαστικής συμπεριφοράς του εδάφους μέσα στα πλαίσια των Αμερικάνικων Κανονισμών ATC-3[2]. Συγκεκριμένα η μέγιστη τιμή της τέμνουσας βάσης της κατασκευής για την περίπτωση ανελαστικής συμπεριφορά  $V_p$  δίνεται από μια σχέση της μορφής:

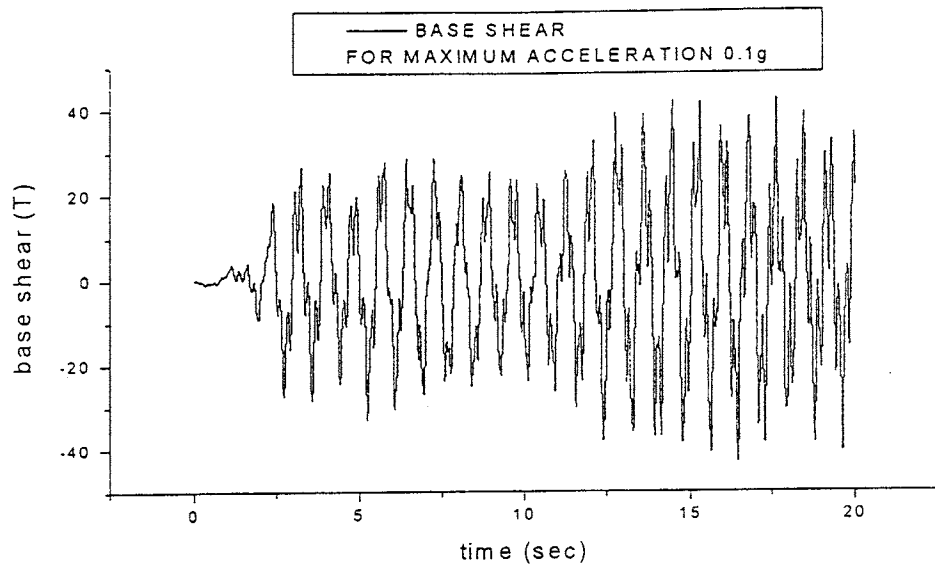
$$V_p = V - p \Delta V_e \quad (9.1)$$

$$p = \Delta V_p / \Delta V_e \quad (9.2)$$

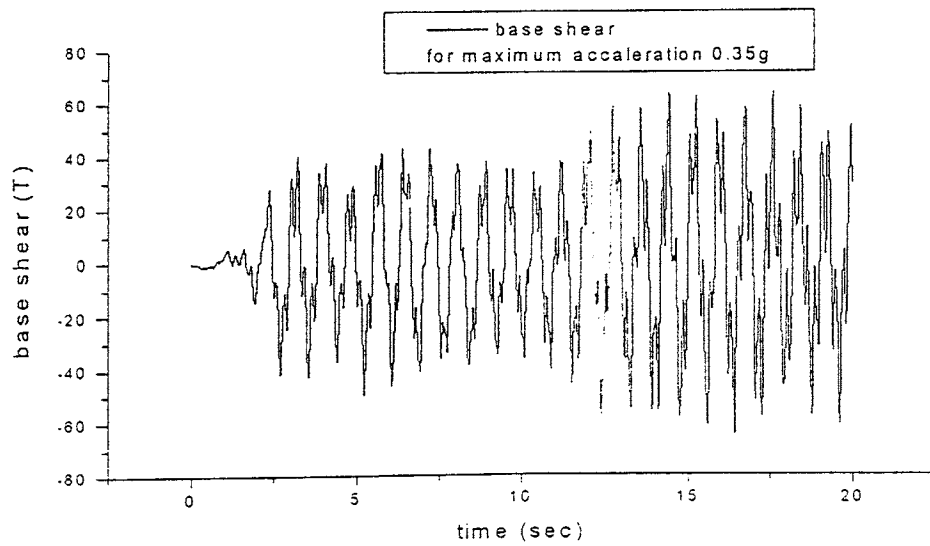
όπου  $V$  είναι η μέγιστη τιμή της τέμνουσας βάσης της κατασκευής σε απαραμόρφωτο έδαφος (που δίνεται από τον ATC-3 [2])  $\Delta V_p$  και  $\Delta V_e$  είναι οι μειώσεις της τέμνουσας βάσης της κατασκευής για τις περιπτώσεις ανελαστικής και **ελαστικής** συμπεριφοράς του εδάφους, αντίστοιχα.

Η μέγιστη τιμή της τέμνουσας βάσης της κατασκευής όταν αυτή θεωρείται πακτωμένη, δηλαδή η  $V$ , προσδιορίστηκε εδώ με τρόπο κάνοντας χρήση των δεδομένων του ισοδύναμου τοιχώματος που καθορίστηκε στο κεφάλαιο 6 αυξάνοντας τον χρόνο ανάλυσης από 10 δευτερόλεπτα σε 20. Από την πιο πάνω

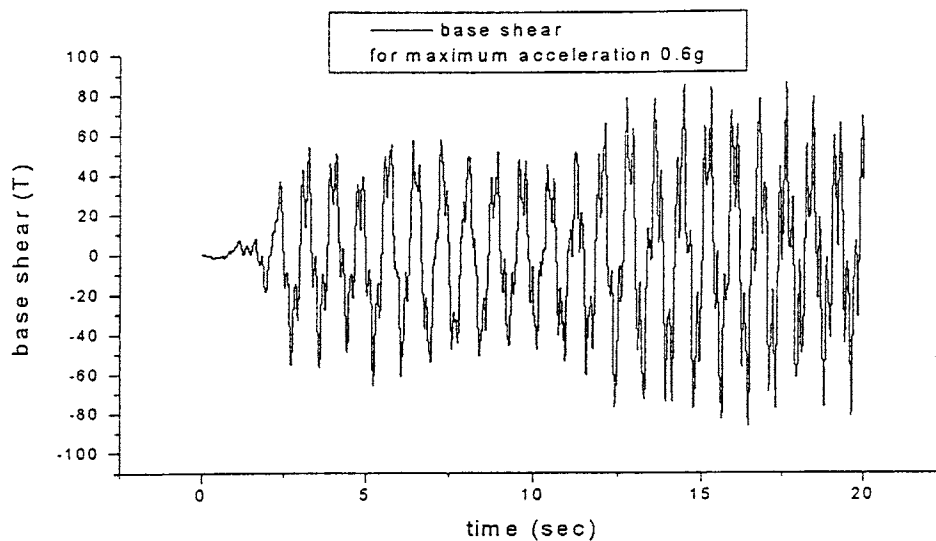
ανάλυση για περιπτώσεις μέγιστης επιτάχυνσης 0.1g, 0.35g και 0.6g προέκυψαν τα πιο κάτω αποτελέσματα που φαίνονται στις γραφικές παραστάσεις των σχημάτων:



Σχήμα 9.1



Σχήμα 9.2



Σχήμα 9.3

Η μέγιστη τιμή της τέμνουσας βάσης  $V$  της ελαστικής κατασκευής όπως προκύπτει από τα παραπάνω σχήματα είναι ίση με 40 t, 60 t και 83 t για τις περιπτώσεις μέγιστης επιτάχυνσης 0.1g, 0.35 g και 0.6g αντίστοιχα .

Για τις περιπτώσεις αμμώδους και αργιλικού εδάφους, που χαρακτηρίζονται από ανελαστική συμπεριφορά του υλικού, οι μέγιστες τιμές της τέμνουσας βάσης της κατασκευής που προκύπτουν παρουσιάζονται στους πιο κάτω πίνακες 9.1 και 9.2, αντίστοιχα:

Αμμώδες έδαφος	Μέγιστη επιτάχυνση επιταχυνσιογραφήματος El Centro	Μέγιστη τέμνουσα βάσης για ελαστική ανάλυση συστήματος εδάφους-κατασκευής	Μέγιστη τέμνουσα βάσης για ανελαστική ανάλυση του εδάφους και ελαστική της κατασκευής
		$V_e$	$V_p$
Περίπτωση A	0.1g	10t	0.028t
Περίπτωση A	0.35g	38t	0.125t

Περίπτωση A	0.6g	65t	0.45t
Περίπτωση B	0.1g	14t	0.043t
Περίπτωση B	0.35g	50t	0,11t
Περίπτωση B	0.6g	79t	0.3t

Πίνακας 9.1

Μέγιστη τέμνουσας βάσης σε σύστημα εδάφους-κατασκευής για αμμώδες έδαφος και διάφορες σεισμικές εντάσεις

Αργιλικό έδαφος	Μέγιστη επιτάχυνση επιταχυνσιογραφήματος El Centro	Μέγιστη τέμνουσα βάσης για ελαστική ανάλυση συστήματος εδάφους-κατασκευής	Μέγιστη τέμνουσα βάσης για ανελαστική ανάλυση του εδάφους και ελαστική της κατασκευής
		$V_e$	$V_p$
Περίπτωση A	0.1g	7,5t	7.5t
Περίπτωση A	0.35g	30t	20t
Περίπτωση A	0.6g	45t	30t
Περίπτωση B	0.1g	10t	10t
Περίπτωση B	0.35g	35t	24t
Περίπτωση B	0.6g	60t	40t

Πίνακας 9.2

Μέγιστη τέμνουσας βάσης σε σύστημα εδάφους-κατασκευής για αργιλικό έδαφος και διάφορες σεισμικές εντάσεις

Οι περιπτώσεις A και B αναφέρονται στο ίδιο σύστημα εδάφους-κατασκευής με την διαφορά ότι στην πρώτη περίπτωση οι κόμβοι των εγκάρσιων ορίων του εδαφικού στρώματος έχουν δυνατότητα κίνησης μόνο κατά την οριζόντια διεύθυνση ενώ στην δεύτερη κατά την οριζόντια και την κατακόρυφη. Οι πιο πάνω περιπτώσεις έχουν ήδη παρουσιαστεί και αναλυθεί στα κεφάλαια 7,8 και 9 και εδώ γίνεται μιά συντομή παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πιο πάνω ανάλυσης που θα μας χρησιμεύσουν στον υπολογισμό του διορθωτικού συντελεστή αλληλεπίδρασης.

Έχοντας υπολογίσει τις μέγιστες τιμές της τέμνουσας βάσης για τις πιο πάνω περιπτώσεις ανάλυσης είναι δυνατό να προσδιοριστούν οι τιμές των συντελεστών για τις αντίστοιχες περιπτώσεις μέσω της σχέσης (9.2). Προκειμένου να γίνει αυτό πρώτα πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές των διαφορών:

$$\Delta V_e = V - V_e \qquad \Delta V_p = V - V_p \qquad (9.3)$$

Οι τιμές των παραπάνω διαφορών καθώς και του συντελεστή  $p$  προσδιορίζονται και παρουσιάζονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες:

Αμμώδες έδαφος	Μέγιστη επιτάχυνση επιταχυσιογραφήματος El Centro	$\Delta V_e$	$\Delta V_p$	$p = \frac{\Delta V_p}{\Delta V_e}$
Περίπτωση A	0.1g	30t	39,972t	1.3324
Περίπτωση A	0.35g	22t	59.875t	2.2716
Περίπτωση A	0.6g	15	82.55t	5.503
Περίπτωση B	0.1g	26	39.957t	1.537
Περίπτωση B	0.35g	10	59.89t	5.989
Περίπτωση B	0.6g	5	78.7	15.74

Πίνακας 9.3

Τιμές διορθωτικού συντελεστή  $p$  για περίπτωση αλληλεπίδρασης με ανελαστικό έδαφος (αμμώδες)

Αργιλικό έδαφος	Μέγιστη επιτάχυνση επιταχυσιογραφήματος	$\Delta V_e$	$\Delta V_p$	$p = \frac{\Delta V_p}{\Delta V_e}$
Περίπτωση A	0.1g	32.5t	32.5t	1
Περίπτωση A	0.35g	30t	40t	1.333
Περίπτωση A	0.6g	35t	53t	1.514
Περίπτωση B	0.1g	30t	30t	1

Περίπτωση Β	0.35g	25t	36t	1.44
Περίπτωση Β	0.6g	20t	43t	2.15

Πίνακας 9.4

Τιμές διορθωτικού συντελεστή  $\rho$  για περίπτωση αλληλεπίδρασης με ανελαστικό έδαφος (αργίλικό)



## 9.2 Αριθμητικό παράδειγμα

Δίνεται μονώροφο μεταλλικό πλαίσιο ύψους  $h=3.6$  m, βάσης με διάμετρο  $2r=3.6$  m, μάζας  $m=14600$  Kg, απόσβεσης  $\beta=0.05$  και δυσκαμψίας  $k=7300$  kN/m θεμελιωμένο σε μέσο αργιλικό έδαφος με στροφική δυσκαμψία  $K_{\theta}=165 \cdot 10^6$  Nm/rad. Για το σύστημα αυτό εδάφους-κατασκευής να υπολογισθούν κατά ATC-3 οι ποσότητες  $\tilde{T}$  και  $\tilde{\beta}$  (ιδιοπερίοδος και απόσβεση συστήματος) και ακολούθως η διατμητική δύναμη βάσης για ελαστικό και ελαστοπλαστικό έδαφος καθώς και οι αντίστοιχες μετατοπίσεις. Υποθέτουμε ότι η κατασκευή συμπεριφέρεται ελαστικά και ότι ο σεισμός είναι ζώνης IV με  $A_v=0.20$ .

Υπολογίζουμε πρώτα την ιδιοπερίοδο  $T$  της μονοβάθμιας αυτής κατασκευής  $T=2\pi (m/k)^{0.5}=0.281$  sec. Ακολούθως, επειδή εδώ είναι  $K_x=0$  και  $K_{\theta}=165 \cdot 10^6$  Nm/rad, από τις σχέσεις (1.10) και (1.9) έχουμε ότι

$$\tilde{T}=T(1+(kh^2/K_{\theta}))^{0.5}=1.254T=0.352 \text{ sec}$$

$$\tilde{\beta}=\beta_0+(\beta/(\tilde{T}/T)^3)=0.14$$

Απο τις σχέσεις (1.4) και (1.3) υπολογίζουμε τους σεισμικούς συντελεστές  $C_s$ ,  $\tilde{C}_s$  και την διατμητική δύναμη βάσης σε απαραμόρφωτο έδαφος  $V$ , αντίστοιχα.

$$C_s=1.2A_vS/RT^{2/3}=1.2 \cdot 0.20 \cdot 1.2/1 \cdot 0.281^{2/3}=0.674$$

$$\tilde{C}_s=1.2A_vS/R\tilde{T}^{2/3}=1.2 \cdot 0.20 \cdot 1.2/1 \cdot 0.352^{2/3}=0.579$$

$$V=C_s mg=96534.32 \text{ N}$$

Απο τη σχέση (1.8) υπολογίζουμε τώρα την μείωση  $\Delta V_e$  της διατμητικής δύναμης βάσης για ελαστικό έδαφος

$$\Delta V_e=(C_s - \tilde{C}_s(0.05/\tilde{\beta})^{0.4})mg = 41535.54 \text{ N}$$

Απο τον πίνακα 9.4 της παρούσας εργασίας για ένταση σεισμού 0.35g (που αντιστοιχεί σε ζώνη IV με  $A_v=0.20$ , όπως φαίνεται από ΝΕΑΚ όπου για ζώνη IV έχουμε 0.36g) και λαμβάνοντας τον μέσο όρο των περιπτώσεων Α και Β για μέσο αργιλικό έδαφος, έχουμε βάσει της (1.2) ότι

$$P=\Delta V_p/\Delta V_e=1.38, \text{ οπότε}$$

$$\Delta V_p=P\Delta V_e=1.38*41535.54=57319.04 \text{ N}$$

Έτσι από τις σχέσεις (1.7) και (1.1) έχουμε ότι οι διατμητικές δυνάμεις βάσης για έδαφος ελαστικό και ελαστοπλαστικό είναι αντίστοιχα

$$V_e=V-\Delta V_e=96534.32 - 41535.54 = 54998.78 \text{ N}$$

$$V_p=V-\Delta V_p=96534.32 - 57319.04 = 39215.28 \text{ N}$$

Τέλος οι μέγιστες ως προς το έδαφος μετατοπίσεις του πλαισίου  $u$ ,  $u_e$ ,  $u_p$ , σε απαραμόρφωτο, ελαστικό και ελαστοπλαστικό έδαφος, αντίστοιχα, υπολογίζονται ως εξής.

$$u = V/k = 0.013 \text{ m} = 1.3 \text{ cm}$$

$$u_e = V_e/k + V_e h^2/K_\theta = 0.012 \text{ m} = 1.2 \text{ cm}$$

$$u_p = V_p/k + V_p h^2/K_\theta = 0.0085 \text{ m} = 0.85 \text{ cm}$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα όσα αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της εργασίας αυτής, μπορεί κανείς να καταλήξει στα παρακάτω βασικά συμπεράσματα:

1. Μελετήθηκε το πρόβλημα της σεισμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης και υποθέτοντας ανελαστική συμπεριφορά του εδάφους.
2. Χρησιμοποιώντας τις μεθόδους των πεπερασμένων στοιχείων στο πεδίο του χρόνου μέσα στα πλαίσια των δύο υαρχόντων προγραμμάτων Η/Υ, τα οποία τροποποιήθηκαν κατάλληλα, έγινε πλήθος παραμετρικών μελετών για να προσδιοριστεί η επίδραση της ανελαστικότητας του εδάφους στο φαινόμενο της σεισμικής αλληλεπίδρασης.
3. Προσδιορίστηκε έτσι αριθμητικά ένας συντελεστής σαν συνάρτηση των εδαφικών χαρακτηριστικών και της έντασης του σεισμού El Centro, ο οποίος πολλαπλασιαζόμενος με την μείωση της διατμητικής δύναμης βάσης λόγω αλληλεπίδρασης κατασκευής-ελαστικού εδάφους δίνει την αντίστοιχη μείωση για την περίπτωση ανελαστικού εδάφους. Έτσι μπορεί κανείς να προσδιορίσει αναλυτικά την διατμητική σεισμική δύναμη βάσης μιας κατασκευής σε ανελαστικό υπέδαφος συνδυάζοντας τους τύπους των Αμερικάνικων Κανονισμών ATC-3 του 1984 με τις πινακοποιημένες μορφές τιμές του ανώτερου συντελεστή που προσδιορίστηκαν στην εργασία αυτή.

4. Γενικά ευρέθηκε, όπως θα περίμενε κανείς, ότι:
- A) Η ανελαστική συμπεριφορά του εδάφους οδηγεί σε μικρότερες τιμές της διατμητικής δύναμης βάσης
  - B) Αύξηση της χαλαρότητας του ανελαστικού εδάφους μειώνει την διατμητική δύναμη βάσης.
  - Γ) Αύξηση της έντασης του σεισμού επίσης μειώνει την διατμητική δύναμη βάσης(λιγότερο στα αργιλώδη, περισσότερο στα αμμώδη).

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Owen D.R.J. and Hinton E. "Finite elements in plasticity" : Theory and Practice" Pineridge Press, Swansea 1980
2. ATC-3, Applied Technology Council, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, Published by the American Society of Civil Engineers, 345 EAST 47<sup>th</sup> Street, New York
3. Karabalis D.L. and Beskos D. "Numerical methods in earthquake engineering" in Computer Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures : A Handbook, D.E.Beskos and S.A.Anagnvstopoulos, Editors, CMP, Southampton pp 1-104
4. Zienkiewicz O.C. "The finite element method in Engineering Science" Mc Graw-Hill, London 1971
4. Desai C.S. and Abel J.F. "Introduction to the finite element method " A numerical method for engineering analysis" Von Nostrand Reinhold Company,
5. Mendelson A. "Plasticity : Theory and Application" Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.
6. White W., Valliappan S., and Lee I.K. "Unified boundary for finite dynamic models" Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1977.