

## Σεισμική Συμπεριφορά Κεκλιμένων Πασσάλων: Επιζήμιος ή Ευνοϊκός ο Ρόλος τους ; Seismic Behaviour of Inclined Piles: Role Beneficial or Detrimental ?

Αμαλία ΓΙΑΝΝΑΚΟΥ<sup>1</sup>, Νίκος ΓΕΡΟΛΥΜΟΣ<sup>2</sup>, Γιάννης Αναστασόπουλος<sup>3</sup>,  
Γιώργος ΓΚΑΖΕΤΑΣ<sup>4</sup>

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ** : Η χρήση των κεκλιμένων πασσάλων εθεωρείτο μέχρι πρότινος σεισμικώς επιζήμια. Πολλοί δε κανονισμοί ακόμη και σήμερα συνιστούν την αποφυγή της χρήσης τους (π.χ. EC8 / Part 5, ΕΑΚ 2000]. Σκοπός του άρθρου είναι η συστηματική διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς θεμελιώσεων με κεκλιμένους πασσάλους, και η αποσαφήνιση της συμβολής τους στην απόκριση τόσο της ίδιας της θεμελίωσης όσο και της υποστηριζόμενης κατασκευής. Διεξάγονται τριδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, (i) της κινηματικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κεκλιμένου πασσάλου, και (ii) της *αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής*. Διερευνούνται (α) ο αριθμός και η διάταξη της πασσαλο-ομάδας, (β) ο τύπος σύνδεσης πασσάλου-κεφαλόδεσμου (άρθρωση ή πάκτωση), (γ) η φύση του εδάφους, (δ) η σεισμική διέγερση, και (ε) τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ανωδομής (χθαμαλή ή υψίκορμη). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων καταδεικνύουν τις περιπτώσεις όπου η σεισμική απόκριση των κεκλιμένων πασσάλων είναι ικανοποιητική εντοπίζοντας ταυτόχρονα αδυναμίες τους.

**ABSTRACT** : For many years, the seismic behaviour of inclined piles has been considered detrimental, and many codes require that such piles be avoided (e.g. EC8 / Part 5, EAK 2000]. The goal of the paper is to parametrically investigate the seismic response of foundations with inclined piles, and to shed light on the beneficial or detrimental role of inclined piles on both the superstructure and the foundation itself. 3D finite element analysis is conducted, of (i) the kinematic soil–pile interaction, and (ii) the response of soil–piles–superstructure systems to seismic loading. The parameters are: (a) the number of piles and pile configuration, (b) the type of pile-to-cap connection (hinged or fixed conditions), (c) the type of soil, (d) the seismic excitation, and (e) the geometrical characteristics of the superstructure. The results of the analyses highlight cases of satisfactory performance of the inclined piles, emphasizing at the same time on their deficiencies.

<sup>1</sup> Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, email: [amagian@gmail.com](mailto:amagian@gmail.com)

<sup>2</sup> Λέκτορας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: [gerolymos@gmail.com](mailto:gerolymos@gmail.com)

<sup>3</sup> Λέκτορας ΠΔ407/80, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: [ianast@civil.ntua.gr](mailto:ianast@civil.ntua.gr)

<sup>4</sup> Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: [gazetas@ath.forthnet.gr](mailto:gazetas@ath.forthnet.gr)

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΣΚΟΠΟΣ ΤΟΥ ΑΡΘΡΟΥ

Η διερεύνηση της συμπεριφοράς των κεκλιμένων πασσάλων δεν έχει λάβει αρκετή προσοχή, οι δε δημοσιεύσεις στο αντικείμενο αυτό είναι σχετικά λίγες. Οι κεκλιμένοι πάσσαλοι χρησιμοποιούνται συχνά όταν απαιτείται πρόσθετη εγκάρσια δυσκαμψία για την παραλαβή οριζοντίων φορτίων (π.χ. φόρτιση λόγω ωθήσεως γαιών ή ύδατος). Παρ' όλα αυτά, η χρήση των κεκλιμένων πασσάλων θεωρούνταν μέχρι πρότινος επιβλαβής, και πολλοί κανονισμοί ακόμα και σήμερα συνιστούν την αποφυγή της χρήσης τους [π.χ. Ευρωπαϊκός Κανονισμός (EC8 / Part 5), ΕΑΚ (2000)].

Τα κυριότερα επιχειρήματα που έχουν διατυπωθεί από διάφορους ερευνητές εναντίον της χρήσης των κεκλιμένων πασσάλων είναι τα ακόλουθα:

- καταπόνηση σε “παρασιτική” κάμψη λόγω συνίζησης ή στερεοποίησης του εδάφους
- επιβολή στον κεφαλόδεσμο ασύμμετρων δυνάμεων μεγάλου μεγέθους και εναλλασσομένου προσήμου
- απομείωση του θλιπτικού φορτίου στους κεκλιμένους πασσάλους, με αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής τους σε κάμψη
- παραμένουσα στροφή της θεμελίωσης στην περίπτωση ασύμμετρης κλίσης των πασσάλων.

Πρόσφατα όμως, η μελέτη ιστορικών περιστατικών έδειξε ότι η χρήση καταλλήλως σχεδιασμένων κεκλιμένων πασσάλων μπορεί να είναι ευεργετική τόσο για την σεισμική συμπεριφορά της ανωδομής, όσο και των ιδίων των πασσάλων (Gazetas & Mylonakis 1998). Παραδείγματα τέτοιων περιστατικών, όπου δηλαδή οι κεκλιμένοι πάσσαλοι έδρασαν ευεργετικά, αποτελούν η αποβάθρα Maya Wharf (σεισμός Kobe, 1995), η γέφυρα Oha-Ohashi στην Ιαπωνία (1984), και η γέφυρα Landing Road στην Νέα Ζηλανδία (σεισμός Edgcumbe, 1987). Τα περιστατικά αυτά αποτέλεσαν το κίνητρο για την αριθμητική διερεύνηση (με 3Δ προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων) της σεισμικής συμπεριφοράς ομάδων με κεκλιμένους πασσάλους.

Το παρόν άρθρο συνοψίζει αποτελέσματα εκτενών παραμετρικών αναλύσεων με την μέθοδο των ΠΣ. Η έμφαση δίδεται στην σεισμική απόκριση απλών διατάξεων με κεκλιμένους πασσάλους σε πλήθος εξιδανικευμένων εδαφικών προφίλ (**Σχήμα 1**), καταδεικνύουν δε τις περιπτώσεις όπου η σεισμική απόκριση των κεκλιμένων πασσάλων είναι ικανοποιητική, εντοπίζοντας ταυτόχρονα πιθανές αδυναμίες τους.

## ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟΥ ΠΑΣΣΑΛΟΥ

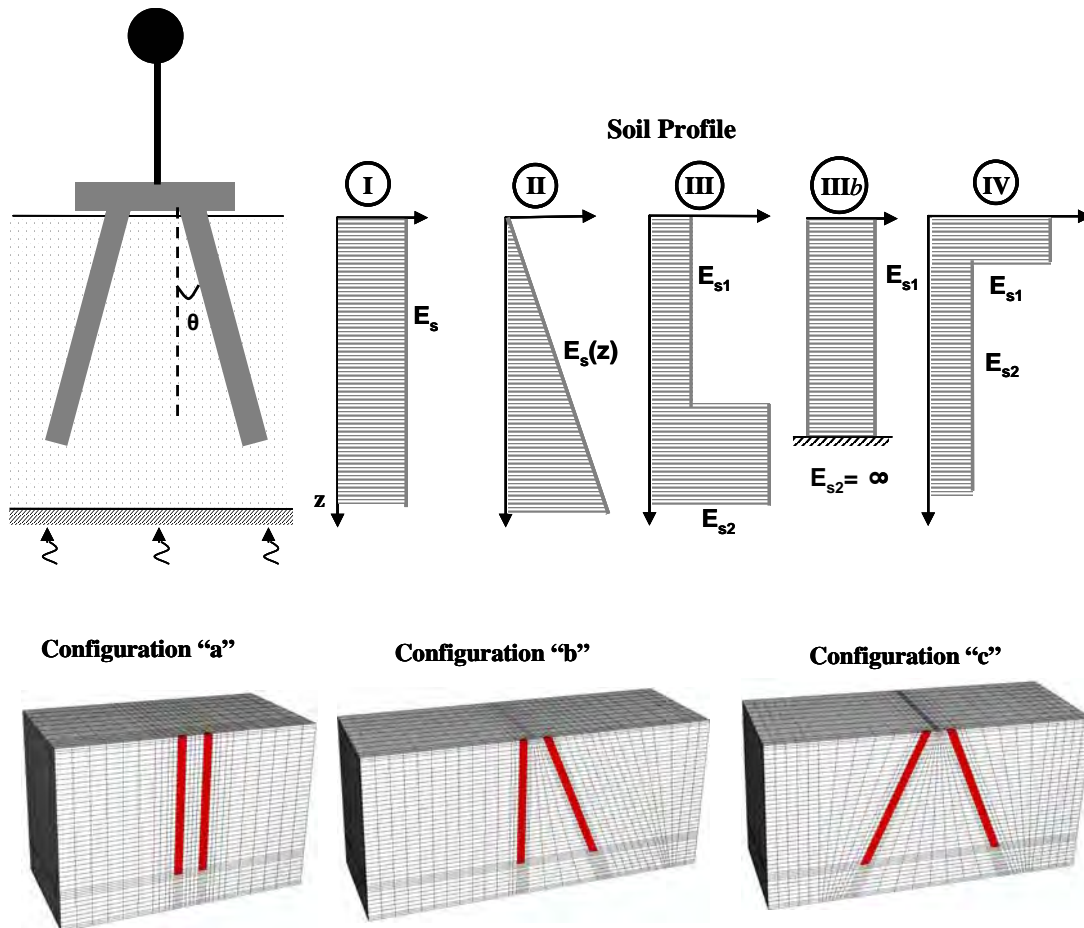
Αν καί η δυναμική συμπεριφορά μεμονωμένου κατακορύφου πασσάλου έχει μελετηθεί εκτενώς, δεν έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην συμπεριφορά κεκλιμένων πασσάλων. Για την κάλυψη του εν λόγω κενού, πραγματοποιούνται καταρχάς 3Δ αναλύσεις με ΠΣ για την μελέτη της απόκρισης μεμονωμένου πασσάλου υπό στατική και δυναμική φόρτιση στην κεφαλή. Αυτό το είδος φόρτισης προκύπτει από τις αδρανειακές δυνάμεις της ανωδομής. Το έδαφος

και ο πάσσαλος προσομοιώνονται με οκτακομβικά εξαεδρικά στοιχεία με ελαστικές ιδιότητες. Τα εξιδανικευμένα εδαφικά προφίλ που μελετώνται είναι τα ακόλουθα: (α) ομοιογενές έδαφος, (β) ανομοιογενές έδαφος, "Gibson", όπου το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους αυξάνεται γραμμικά με το βάθος, και (γ) δίστρωτοι εδαφικοί σχηματισμοί. Παράγονται οι ακόλουθες νέες εκφράσεις για τον υπολογισμό της οριζόντιας στατικής δυσκαμψίας μεμονωμένου πασσάλου,  $K_{HH}$ , όπου λαμβάνεται υπόψιν η γωνία κλίσης  $\theta$ , για πασσάλους σε ομοιογενές (Εξίσωση 1) και ανομοιογενές (Εξίσωση 2) εδαφικό προφίλ:

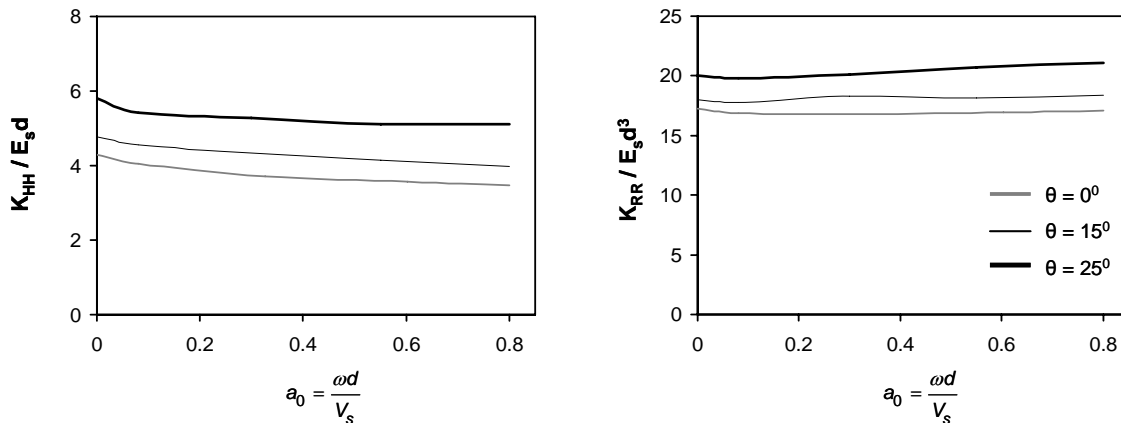
$$K_{HH} \approx 1.08 E_s d (1 + 4 \tan^2 \theta) \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{0.21 \cos^2 \theta} \quad (1)$$

$$K_{HH} \approx 0.6 d E_o (1 + \tan \theta) \left( \frac{E_p}{E_o} \right)^{0.35(1+0.5 \tan^2 \theta)} \quad (2)$$

όπου  $d$  η διάμετρος του πασσάλου,  $E_p$  το μέτρο ελαστικότητας του πασσάλου,  $E_s$  το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους,  $E_o$  το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους σε βάθος  $z = d$  για το έδαφος Gibson. Η λικνιστική δυσκαμψία και η συζευγμένη παλινδική-λικνιστική δυσκαμψία βρέθηκαν ότι δεν επηρεάζονται από την γωνία  $\theta$ . Για τον λόγο αυτόν, οι διαθέσιμες στην βιβλιογραφία εκφράσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανεξαρτήτως γωνίας  $\theta$  (π.χ. Gazetas 1984, Mylonakis & Gazetas 1999).



Σχήμα 1. Το πρόβλημα που αναλύεται στο άρθρο



Σχήμα 2. Μεταβολή των δυναμικών παλινδικών και λικνιστικών δυσκαμψιών για γωνίες κλίσης  $\theta = 0^\circ$ ,  $15^\circ$ , και  $25^\circ$  ως συναρτήσεις του  $a_0$  ( $L / d = 15$ ,  $E_p / E_s = 500$ , ομοιογενές έδαφος)

Επίσης προέκυψε ότι οι δυναμικές δυσκαμψίες δεν μεταβάλλονται σημαντικά με την συχνότητα (Σχήμα 2). Έτσι, κατά τον σχεδιασμό μπορεί να γίνει θεώρηση σταθερών (ανεξαρτήτων από την συχνότητα) δυναμικών δυσκαμψιών χωρίς σημαντικό σφάλμα, οι δε ανωτέρω σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της δυσκαμψίας κεκλιμένου πασσάλου σε ομοιογενές και ανομοιογενές έδαφος.

## ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΟΜΑΔΑΣ ΜΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟΥΣ ΠΑΣΣΑΛΟΥΣ

Εξετάζονται οι σύνθετες δυσκαμψίες ομάδας πασσάλων με ένα ή δύο κεκλιμένους πασσάλους. Μελετώνται δύο τύποι σύνδεσης πασσάλου-κεφαλοδέσμου: άρθρωση και πάκτωση.

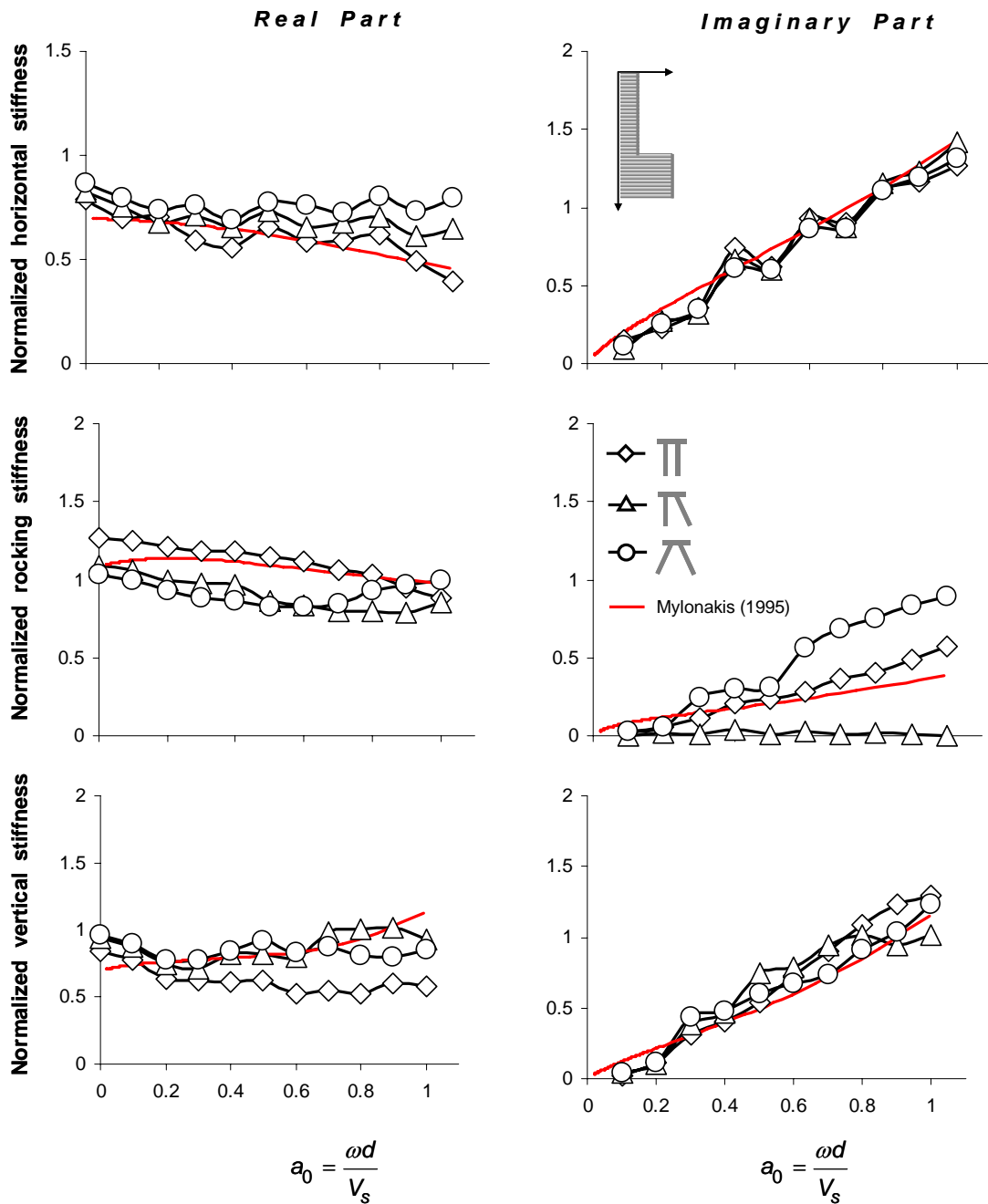
Η κανονικοποίηση των σύνθετων δυσκαμψιών της πασσαλομάδας γίνεται με το άθροισμα των δυσκαμψιών των μεμονωμένων πασσάλων, αγνοώντας την μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Με τον τρόπο αυτόν, παράγονται οι λόγοι αποδοτικότητας της πασσαλομάδας, οι οποίοι αποτελούν έναν έμμεσο τρόπο μέτρησης της αλληλεπίδρασης μεταξύ των πασσάλων της κάθε διάταξης. Αγνοώντας την αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων οι δυσκαμψίες στην κεφαλή της πασσαλομάδας εκφράζονται μέσω των ακόλουθων σχέσεων:

$$\tilde{K}_{HH}^G = nK^{S(\theta)}_{HH} \quad (3)$$

$$\tilde{K}_{RR}^G = nK^{S(\theta)}_{RR} + K^{S(\theta)}_{VV} \sum_{i=1}^n x_i^2 + 2K^{S(0)}_{HR} \sin \theta \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

$$\tilde{K}_{VV}^G = nK^{S(\theta)}_{VV} \quad (5)$$

όπου  $\tilde{K}_{HH}^G$ ,  $\tilde{K}_{RR}^G$ , και  $\tilde{K}_{VV}^G$  η παλινδική, λικνιστική και κατακόρυφη δυσκαμψία της πασσαλομάδας, αντίστοιχα,  $K^{S(\theta)}_{HH}$ ,  $K^{S(\theta)}_{RR}$ , και  $K^{S(\theta)}_{VV}$  παλινδική, λικνιστική και κατακόρυφη δυσκαμψία του μεμονωμένου πασσάλου (κατακορύφου ή κεκλιμένου ανάλογα με την διάταξη),  $K^{S(0)}_{HR}$  η συζευγμένη παλινδική-λικνιστική δυσκαμψία κατακορύφου πασσάλου,  $n$  ο αριθμός των πασσάλων,  $\theta$  η γωνία κλίσης του πασσάλου, και  $x$  το  $1/2$  της απόστασης μεταξύ διαδοχικών πασσάλων. Αντικαθιστώντας  $\theta = 0$  στην Εξίσωση (4), καταλήγουμε στην έκφραση της λικνιστικής δυσκαμψίας για την κατακόρυφη πασσαλομάδα. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων διαιρούνται με τις Εξισώσεις (3-5) για την δημιουργία των λόγων αποδοτικότητας (**Σχήμα 3**).



**Σχήμα 3.** Κανονικοποιημένες σύνθετες δυσκαμψίες απλών διατάξεων με κεκλιμένους πασσάλους σε δίστρωτο σχηματισμό. ( $E_p / E_{s1} = 1000$ ,  $V_{s1} / V_{s2} = 1 / 2$ ,  $h1 / d = 9.5$ ,  $L / d = 15$ ,  $s / d = 3$ ,  $\theta = 25^\circ$ )

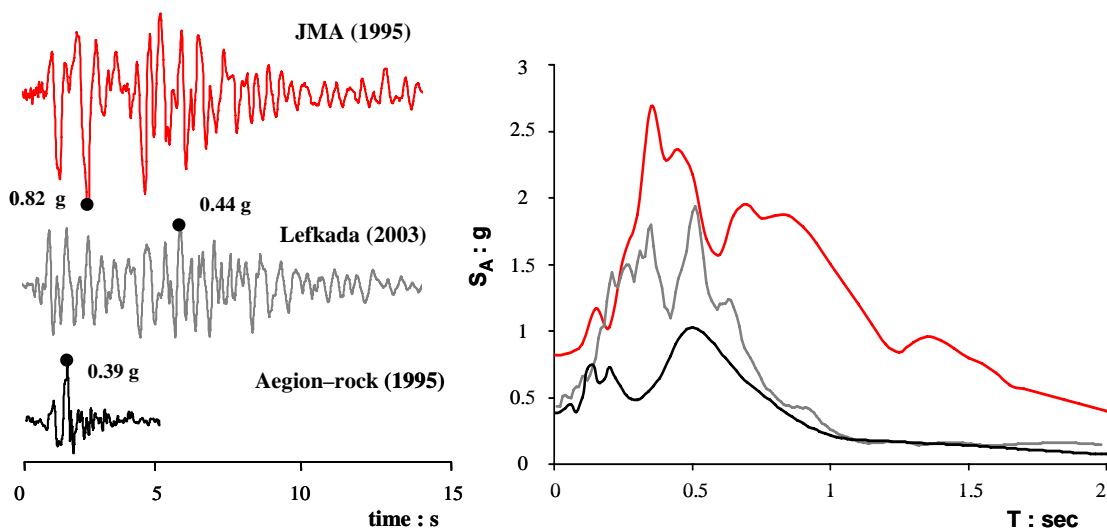
Παρόλο ότι το πλήθος των παραμέτρων που εξετάστηκαν είναι σχετικά περιορισμένο για την εξαγωγή γενικευμένων συμπερασμάτων σε ότι αφορά τις σύνθετες δυσκαμψίες διατάξεων με κεκλιμένους πασσάλους, η έρευνα οδήγησε στις ακόλουθες ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις:

- (i) Λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ των πασσάλων ( $s / d = 3$ ) η δυσκαμψία και η απόσβεση μεταβάλλονται ομαλά με την συχνότητα

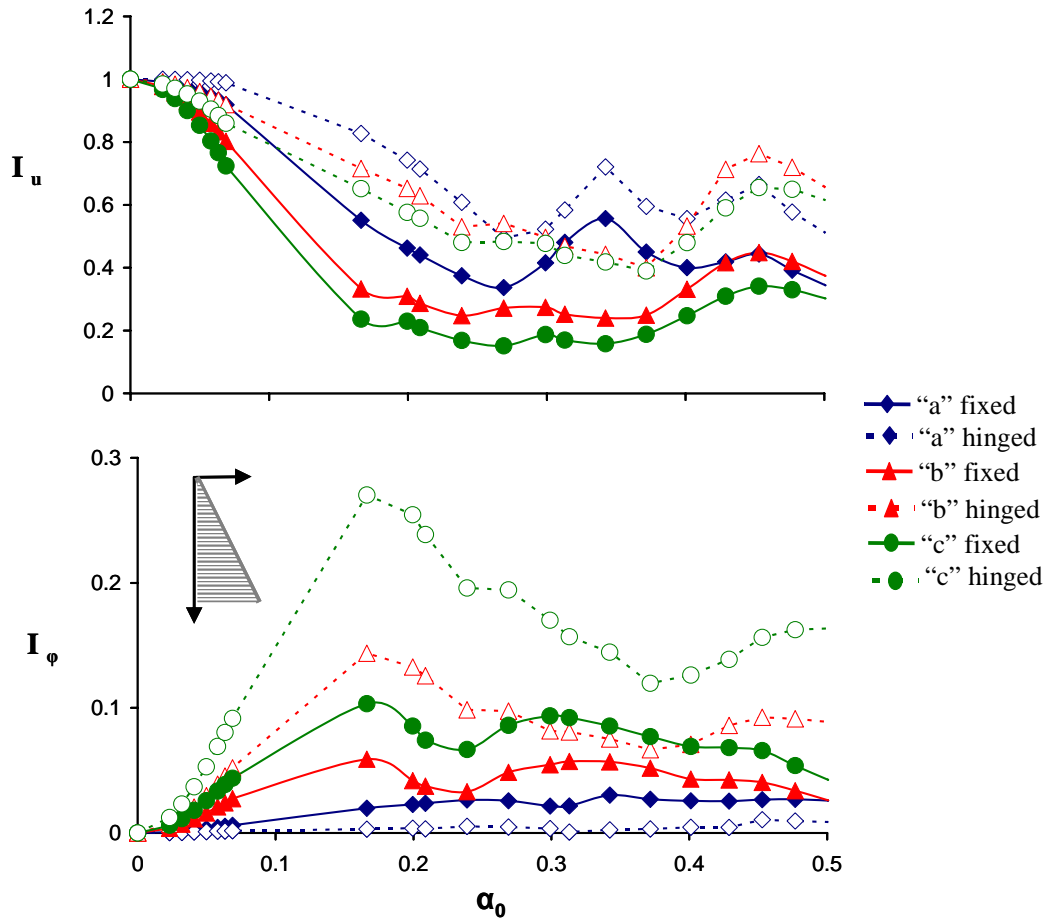
- (ii) Οι ομάδες με κεκλιμένους πασσάλους αναπτύσσουν μεγαλύτερη παλινδική δυσκαμψία από την κατακόρυφη πασσαλομάδα. Επιπλέον, η άρθρωση στην κεφαλή επιφέρει περαιτέρω αύξηση της εν λόγω διαφοράς.
- (iii) Η αλληλεπίδραση μεταξύ των πασσάλων στις διατάξεις με κεκλιμένους πασσάλους είναι πιο περιορισμένη γεγονός που φαίνεται από τους μεγαλύτερους λόγους απόδοσης *καί* για την οριζόντια *καί* για την κατακόρυφη δυσκαμψία. Αυτό οφείλεται πιθανότατα στην αύξηση της απόστασης των πασσάλων με το βάθος στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν κεκλιμένοι πάσσαλοι.

### ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΜΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟΥΣ ΠΑΣΣΑΛΟΥΣ

Διερευνάται η *κινηματική* απόκριση απλών διατάξεων με έναν ή δύο κεκλιμένους πασσάλους στα προαναφερθέντα εξιδανικευμένα εδαφικά προφίλ. Δίνεται έμφαση στην επίδραση της σύνδεσης πασσάλου–κεφαλοδέσμου με την μελέτη δύο ακραίων τύπων: πάκτωσης και άρθρωσης. Στα σύνορα του προσομοιώματος επιβάλλονται κατάλληλοι κινηματικοί περιορισμοί ώστε να προσομοιώνεται η κίνηση ελευθέρου πεδίου. Ως διέγερση στη βάση χρησιμοποιούνται 3 πραγματικές καταγραφές σεισμικών κραδασμών που καλύπτουν μεγάλο εύρος συχνοτήτων (**Σχήμα 4**).



**Σχήμα 4.** Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης που χρησιμοποιήθηκαν ως διέγερση και τα αντίστοιχα φάσματα απόκρισης.



**Σχήμα 5.** Επίδραση της διάταξης των πασσάλων και του τρόπου σύνδεσης πασσάλου-κεφαλοδέσμου στην κινηματική απόκριση πασσαλομάδων σε ανομοιογενές εδαφικό προφίλ ( $T_s = 0.29$  s,  $E_p / E_s(d) = 1000$ ,  $L / d = 15$ ,  $\theta = 25^\circ$ )

Αναλύονται οι πλιό σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν την κινηματική απόκριση ομάδων με κεκλιμένους πασσάλους, όπως: (α) η φύση του εδαφικού προφίλ, (β) η γωνία κλίσης των πασσάλων, και (γ) η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του εδάφους σε σχέση με το εύρος των δεσποζουσών περιόδων της διέγερσης.

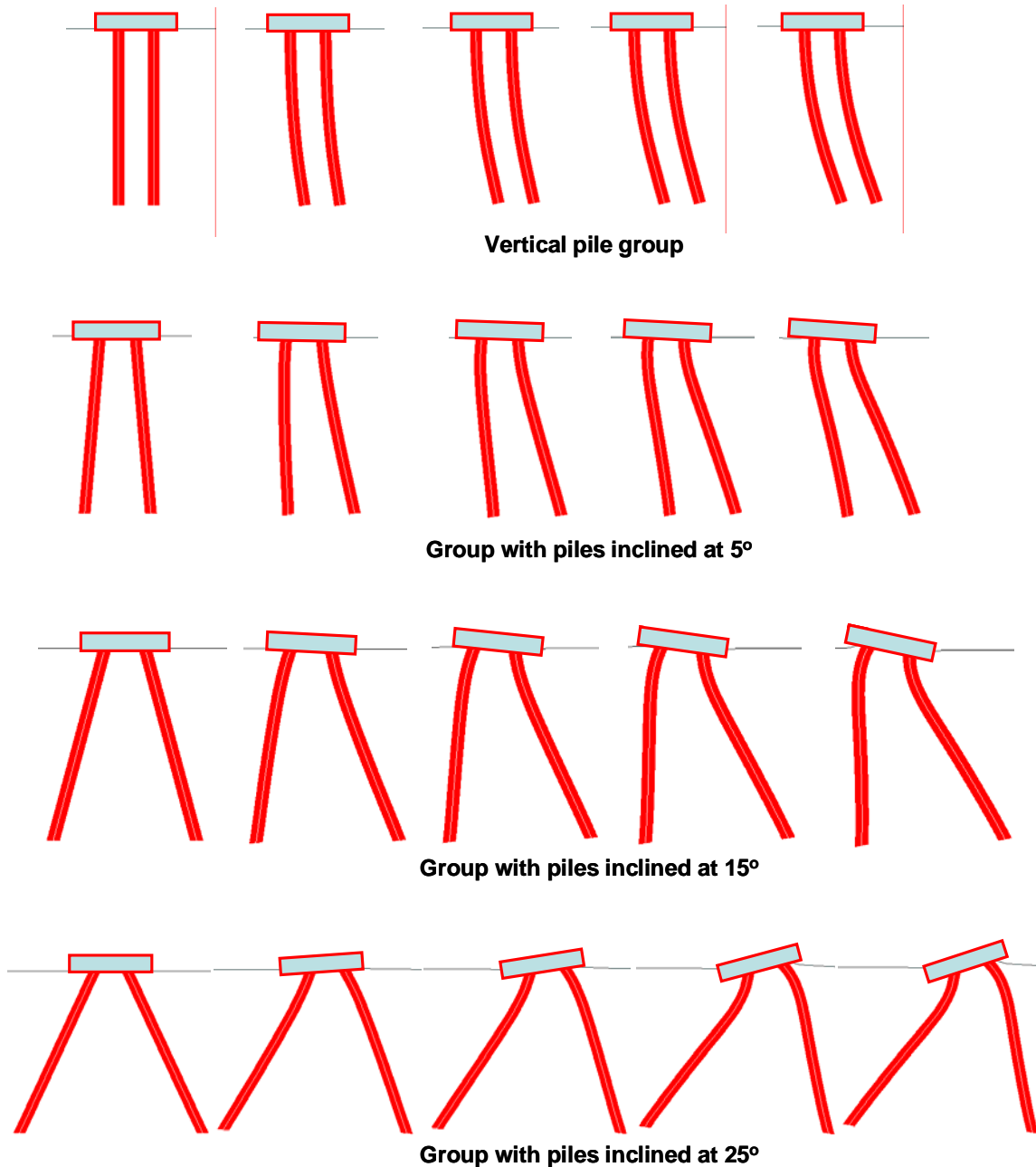
Αρχικά μελετάται η κινηματική απόκριση των τριών πασσαλομάδων σε κατακορύφως διαδιδόμενα αρμονικά κύματα. Τα αποτελέσματα της κινηματικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κεκλιμένου πασσάλου απεικονίζονται με την μορφή των εξής λόγων:

$$I_u = \frac{|U_p|}{U_{ff}} \quad \text{και} \quad I_\phi = \frac{|\Phi_p|d}{U_{ff}} \quad (6)$$

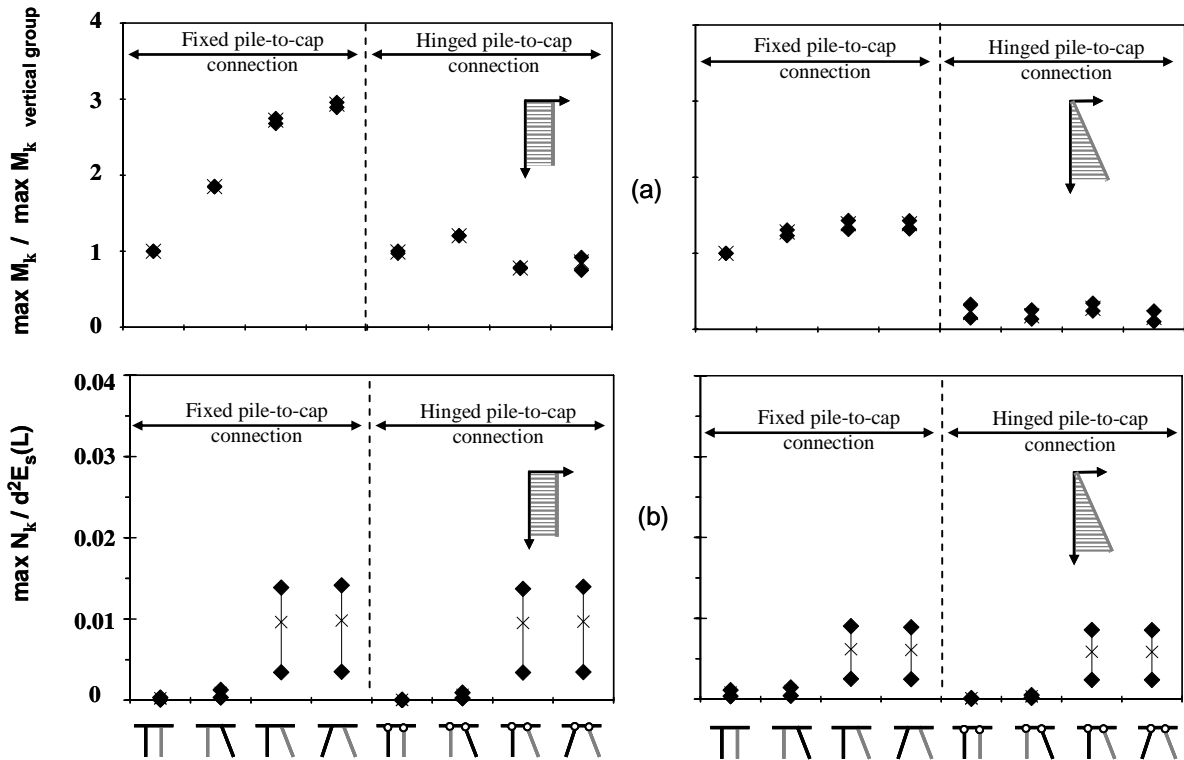
όπου  $U_p$  το πλάτος της οριζόντιας μετατόπισης του κεφαλοδέσμου,  $\Phi_p$  το πλάτος της στροφής του κεφαλοδέσμου, και  $U_{ff}$  το πλάτος της μετακίνησης του ελευθέρου πεδίου. Μιά τυπική μεταβολή των δύο αυτών λόγων με την αδιάστατη συχνοτική παράμετρο  $\alpha_0$  δείχνεται στο **Σχήμα 5** για κάθε μια από τις τρεις πασσαλομάδες, σε έδαφος τύπου Gibson, για τους δύο τύπους σύνδεσης πασσάλου-κεφαλοδέσμου. Παρατηρείται ότι οι ομάδες με κεκλιμένους



πασσάλους (διατάξεις “b” και “c”) φιλτράρουν τις υψίσυχνες συνιστώσες της κίνησης του ελεύθερου πεδίου περισσότερο από ότι η κατακόρυφη πασσαλομάδα, λόγω της αυξημένης ασυμβατότητας μεταξύ των μετακινήσεων κεκλιμένου πασσάλου και ελεύθερου πεδίου. Επιπλέον, η στροφή του κεφαλοδέσμου είναι πίο σημαντική σε ομάδες με κεκλιμένους πασσάλους, ιδιαιτέρως στην περίπτωση άρθρωσης μεταξύ πασσάλου-κεφαλοδέσμου.



**Σχήμα 6.** Παραμορφωμένο σχήμα πασσαλομάδων πακτωμένων στην κεφαλή με πασσάλους σε διάφορες γωνίες κλίσης.



**Σχήμα 7.** Μέγιστη κανονικοποιημένη : (a) καμπτική ροπή, και (b) αξονική δύναμη κατά μήκος του πασσάλου (μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές από τα τρία επιταχυνσιογραφήματα [Λευκάδα, Αίγιο, JMA]). Τα αποτελέσματα αναφέρονται σε κάθε διάταξη και πάσσαλο (που δείχνεται με γκρι χρώμα) στο κάτω μέρος του σχήματος. ( $T_s = 0.29$  s)

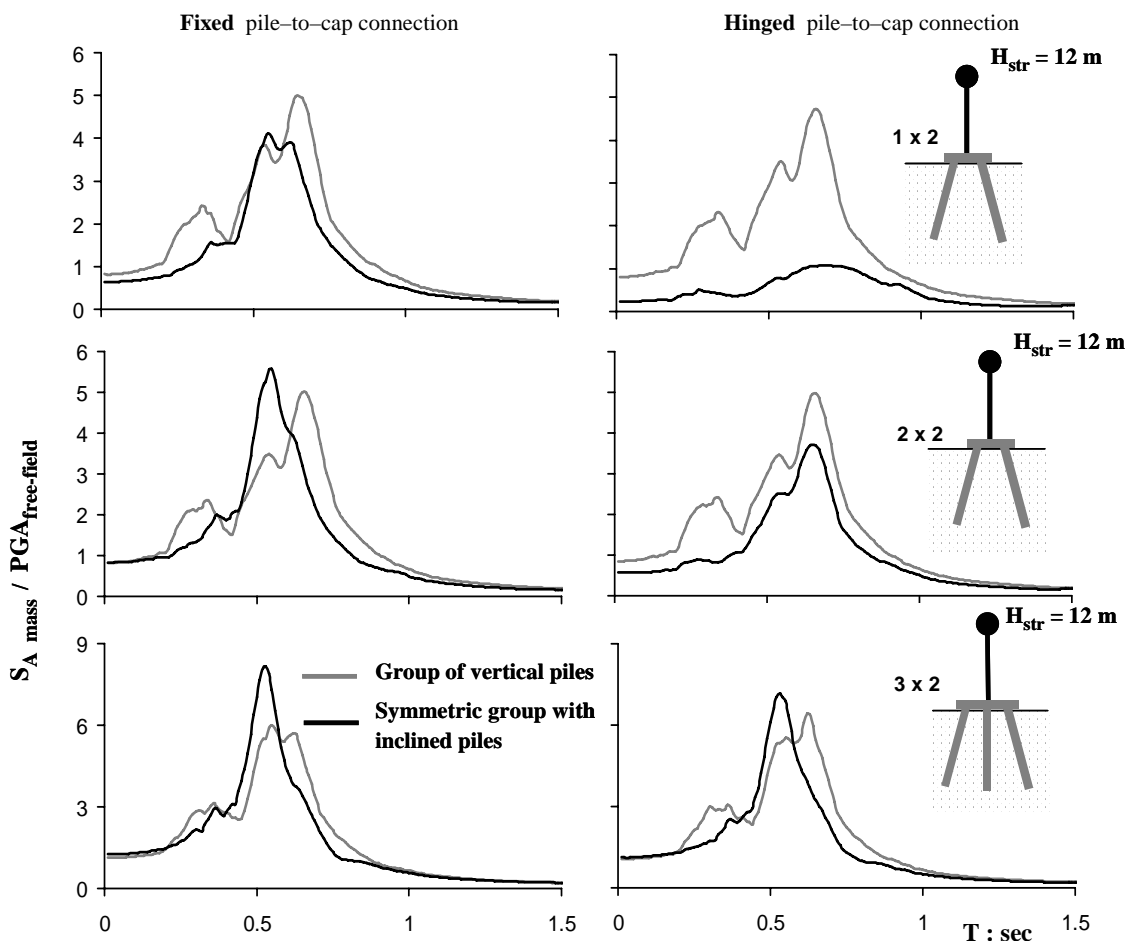
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων με τα τρία επιταχυνσιογραφήματα οδηγούν σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα, εκ των οποίων τα πιο σημαντικά συνοψίζονται ως ακολούθως:

- (i) Η ασυμβατότητα των μετακινήσεων κεκλιμένου πασσάλου και ελευθέρου πεδίου γίνεται πιο έντονη με την αύξηση της γωνίας κλίσης. Αποτέλεσμα: μείωση των μετακινήσεων στους κεκλιμένους πασσάλους κατά την σεισμική φόρτιση. Αυτό είναι επιθυμητό όπου υπάρχουν αυστηροί περιορισμοί στις μετατοπίσεις και είναι σε συμφωνία με την συχνά παρατηρηθείσα συμπεριφορά των κεκλιμένων πασσάλων υπό συνθήκες εκτεταμένων εδαφικών μετακινήσεων (όπως ρευστοποίηση και οριζόντια εξάπλωση). Οι οριζόντιες μετατοπίσεις μειώνονται σημαντικά με την αύξηση της γωνίας κλίσης του πασσάλου, ταυτόχρονα όμως αυξάνεται η στροφή του κεφαλοδέσμου (**Σχήμα 6**)
- (ii) Οι κεκλιμένοι πάσσαλοι αναπτύσσουν μεγαλύτερη καμπτική ροπή στην κεφαλή από την ομάδα κατακορύφων πασσάλων με πάκτωση στην κεφαλή σε όλα τα εξιδανικευμένα προφίλ που μελετήθηκαν. Μάλιστα δε, η καμπτική ροπή αυξάνει με την γωνία κλίσης. Η άρθρωση στην κεφαλή επιφέρει σημαντική μείωση της καμπτικής ροπής σε όλες τις διατάξεις (**Σχήμα 7a**).
- (iii) Η σύνδεση πασσάλου-κεφαλοδέσμου επηρεάζει σημαντικά την συμπεριφορά της θεμελίωσης. Η άρθρωση στην κεφαλή έχει ως αποτέλεσμα την μικρότερη καταπόνηση του πασσάλου αλλά ταυτόχρονα οδηγεί σε μεγαλύτερη μετατόπιση και στροφή του κεφαλοδέσμου.

(iv) Οι κεκλιμένοι πάσσαλοι αναπτύσσουν μεγαλύτερη αξονική δύναμη από τους κατακόρυφους λόγω της οριζόντιας ταλάντωσης του εδάφους, η οποία στην περίπτωση των κεκλιμένων πασσάλων έχει και κατακόρυφη συνιστώσα. Μάλιστα δε, τα αξονικά φορτία αυξάνονται με την αύξηση της γωνίας κλίσης του πασσάλου (Σχήμα 7b).

### ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ–ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ–ΑΝΩΔΟΜΗΣ (Κινηματική και Αδρανειακή Δράση)

Δύο νέες παράμετροι προστίθενται τώρα σε αυτές που επηρεάζουν την κινηματική συμπεριφορά: (i) τα χαρακτηριστικά της ανωδομής, δηλαδή το ύψος και η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της πακτωμένης (αένδοτης) ανωδομής, και (ii) ο αριθμός των πασσάλων. Μελετώνται δύο τύποι κατασκευών, οι οποίοι προσομοιώνονται ως μονοβάθμιοι ταλαντωτές, με τρεις ιδιοπεριόδους: (a) μια υψίκορμη ανωδομή με κρίσιμο μηχανισμό φόρτισης των πασσάλων την ροπή ανατροπής, και (b) μια κοντή ανωδομή με κρίσιμο μηχανισμό φόρτισης την τέμνουσα. Διερευνάται επίσης η απόκριση διατάξεων με 2, 4, 6 πασσάλους.



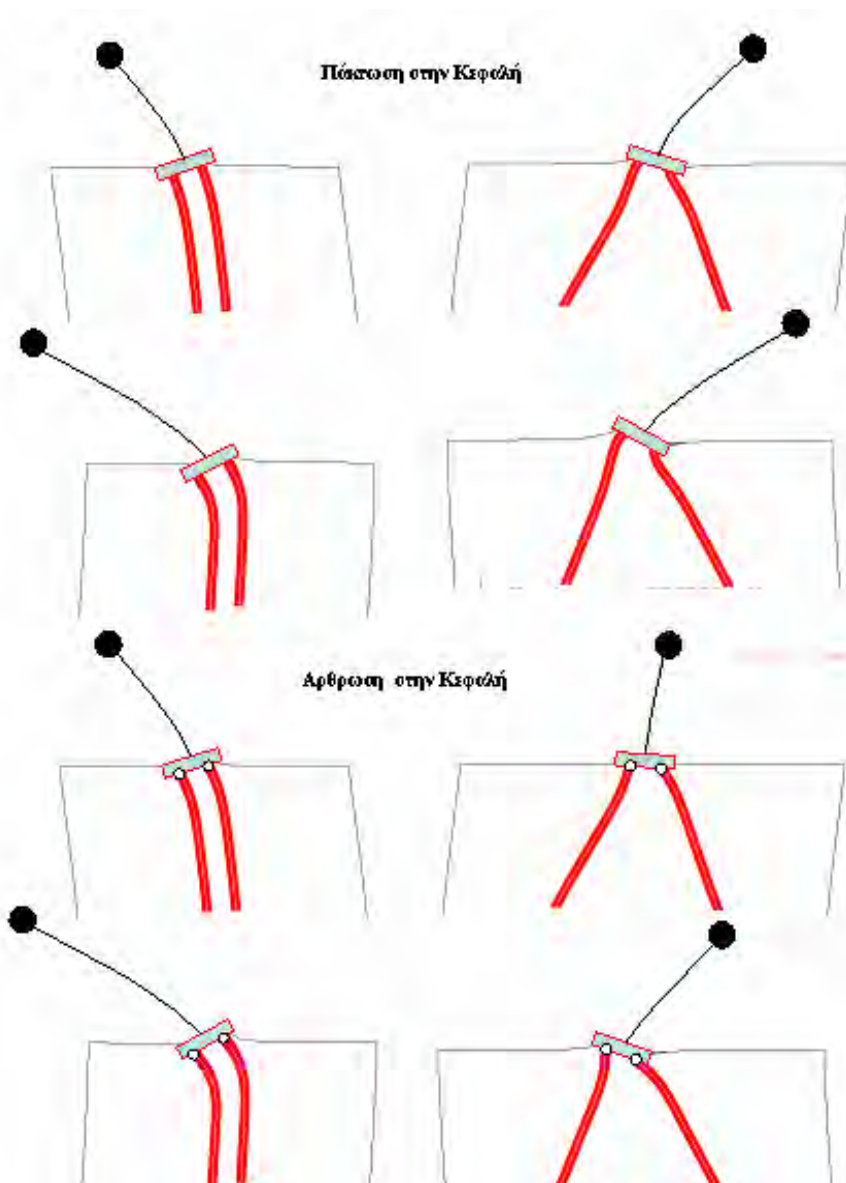
**Σχήμα 8.** Κανονικοποιημένα φάσματα αποκρίσεως της κίνησης της μάζας (“floor” response spectra) για διάφορες διατάξεις. Κανονικοποίηση ως προς την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση του ελευθέρου πεδίου. (Ανομοιογενές εδαφικό προφίλ, διέγερση: Λευκάδα,  $H_{str} = 12$  m,  $T_s = 0.29$  s,  $E_p / E_s(L) = 67$ ,  $T_{str} = 0.44$  s,  $\theta = 25^\circ$ ).

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα για ομάδες κεκλιμένων πασσάλων σε συνδυασμό με υψίκορμες κατασκευές περιγράφονται ως ακολούθως:

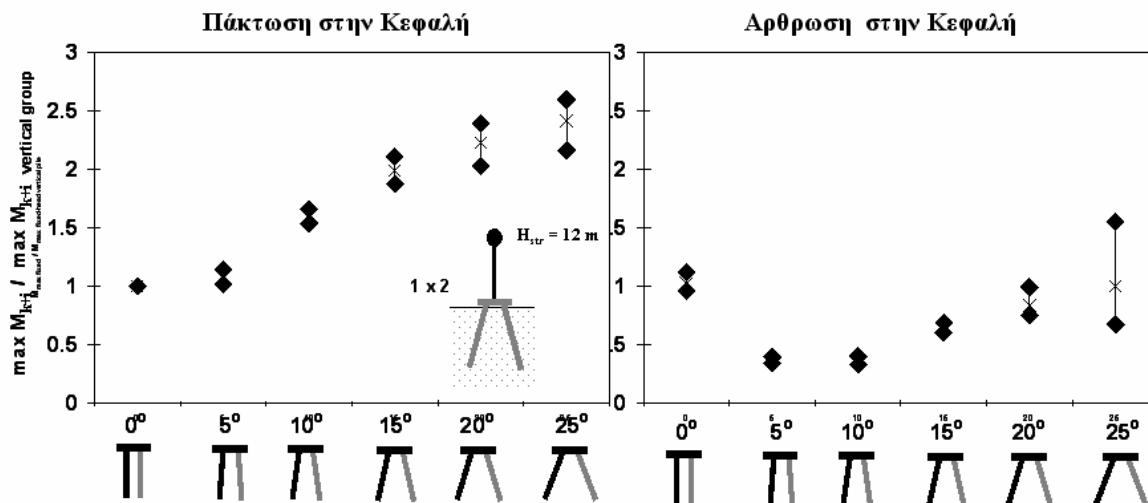
- (i) Οι κατασκευές που θεμελιώνονται σε απλές διατάξεις με έναν ή δύο κεκλιμένους πασσάλους έχουν μεγαλύτερες ιδιοπεριόδους λόγω της μικρότερης καμπτικής δυσκαμψίας των εν λόγω πασσαλομάδων, ειδικά στην περίπτωση άρθρωσης μεταξύ πασσάλου-κεφαλοδέσμου. Η εν λόγω σύνδεση σε συνδυασμό με τους κεκλιμένους πασσάλους οδηγεί στην πιο ικανοποιητική απόκριση *καί* της κατασκευής *καί* της θεμελίωσης αφού έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των επιταχύνσεων στη μάζα και μικρότερη καταπόνηση των πασσάλων και της ανωδομής. Παρόλα αυτά, η ευμενής επίδραση της άρθρωσης στην μείωση των μεγίστων επιταχύνσεων της ανωδομής περιορίζεται με την αύξηση του αριθμού των πασσάλων στην διάταξη, λόγω της μείωσης της ιδιοπεριόδου της ανωδομής. Ειδικά στην περίπτωση συνύπαρξης κατακορύφων και κεκλιμένων πασσάλων στην ίδια διάταξη, η άρθρωση δεν επιφέρει μείωση των επιταχύνσεων (**Σχήμα 8**).
- (ii) Η οριζόντια σχετική μετατόπιση (drift) της κατασκευής, όταν αυτή είναι θεμελιωμένη σε ομάδα με κεκλιμένους πασσάλους, είναι σημαντικά μικρότερη από την περίπτωση κατακόρυφης πασσαλομάδας *καί* για τους δύο τύπους σύνδεσης πασσάλου-κεφαλοδέσμου. Η μείωση αυτή αποδίδεται στην μικρότερη οριζόντια μετακίνηση του κεφαλοδέσμου και την μεγαλύτερη περιστροφή της κατασκευής. Η αύξηση της γωνίας κλίσης οδηγεί σε μικρότερη καταπόνηση της κατασκευής και μειωμένες οριζόντιες μετακινήσεις της μάζας, με μόνο μειονέκτημα την μεγαλύτερη στροφή του κεφαλοδέσμου.
- (iii) Στο **Σχήμα 9** απεικονίζεται το παραμορφωμένο σύστημα εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής για διατάξεις με κατακορύφους και κεκλιμένους πασσάλους. Διακρίνονται οι δύο τύποι σύνδεσης πασσάλου-κεφαλοδέσμου. Είναι εμφανές ότι οι ομάδες με κεκλιμένους πασσάλους αναπτύσσουν μεγαλύτερη στροφή στον κεφαλόδεσμο. Η άρθρωση οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση της στροφής όταν υπάρχουν κεκλιμένοι πάσσαλοι. Οι εν λόγω πάσσαλοι αναπτύσσουν μικρότερες μετατοπίσεις από την κατακόρυφη πασσαλομάδα, πλεονέκτημα που περιορίζεται όταν υπάρχει άρθρωση στην κεφαλή.
- (iv) Η καμπτική ροπή που αναπτύσσεται στην κεφαλή των κεκλιμένων πασσάλων είναι μεγαλύτερη από των κατακορύφων ανεξαρτήτως της φύσεως του εδαφικού προφίλ (**Σχήμα 10**). Μάλιστα δε, η ροπή αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας κλίσης. Αυτό το συμπέρασμα ισχύει *καί* για κατασκευές με μεγάλη ιδιοπερίοδο, όπου η αδρανειακή αλληλεπίδραση είναι περιορισμένη. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν στον σχεδιασμό του κεφαλοδέσμου.
- (v) Η συμμετρική διάταξη με κεκλιμένους πασσάλους αναπτύσσει μικρότερες αξονικές δυνάμεις από την ομάδα κατακορύφων πασσάλων (**Σχήμα 11**) ! Το εκ πρώτης όψεως παράδοξο αυτό γεγονός αποδίδεται στην δυσανάλογα μεγάλη ροπή ανατροπής που ασκείται στον κεφαλόδεσμο, την οποία η κατακόρυφη πασσαλομάδα αναλαμβάνει

κυρίως με αξονική λειτουργία. Επόμενο είναι λοιπόν, η σύνδεση στον κεφαλόδεσμο να μην επηρεάζει σημαντικά το μέγεθος της αναπτυσσόμενης αξονικής δύναμης, ειδικά σε διατάξεις αποτελούμενες αποκλειστικά από κατακόρυφους πάσσλους. Παρόλα αυτά, κεκλιμένοι πάσσαλοι εντός σχετικώς στιφρού εδάφους σε συνδυασμό με ανωδομές μεγάλης ιδιοπεριόδου δύνανται να αναπτύξουν μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις από ό,τι οι κατακόρυφοι πάσσαλοι. Τούτο δε λόγω της μεγάλης συμβολής της κινηματικής φόρτισης στην σεισμική απόκριση των κεκλιμένων πάσσλων.

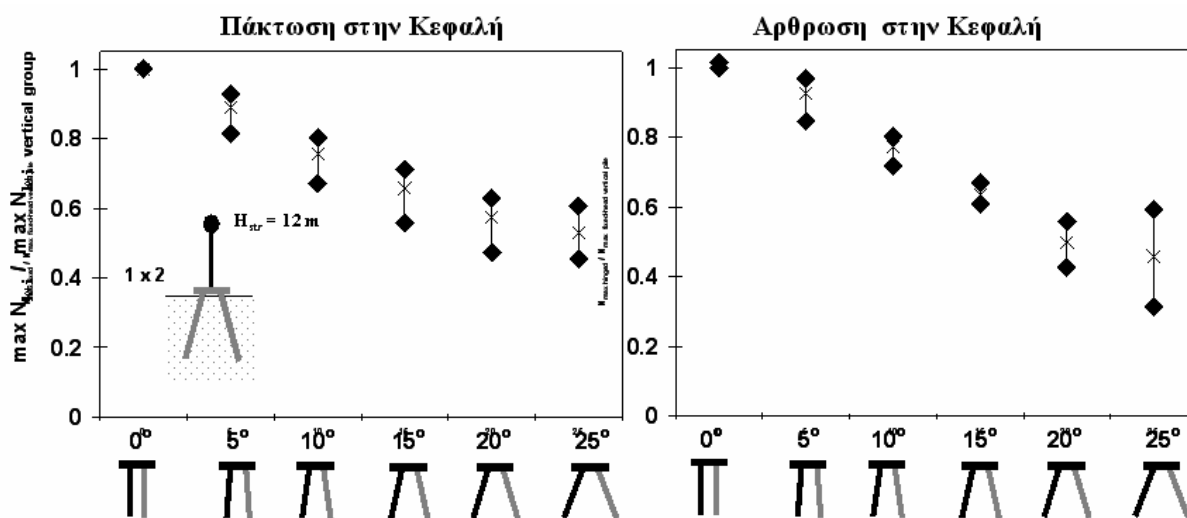
- (vi) Στην περίπτωση όπου οι κεκλιμένοι πάσσαλοι βρίσκονται σε μαλακές εδαφικές στρώσεις, ο λόγος των εντατικών μεγεθών (καμπτική ροπή και αξονική δύναμη) που αναπτύσσονται στον κεκλιμένο πάσσαλο προς τα αντίστοιχα μεγέθη του κατακόρυφου πάσσалу πακτωμένης κεφαλής μειώνεται σημαντικά.



**Σχήμα 9.** Παραμορφωμένο σύστημα εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής (συντελεστής μεγέθυνσης: 200) σε 2 στιγμιότυπα για πάκτωση και άρθρωση στην κεφαλή (διέγερση: Αίγιο, ανομοιογενές εδαφικό προφίλ,  $T_s = 0.29$  s,  $E_p / E_s (L) = 67$ ,  $T_{str} = 0.44$  s,  $H_{str} = 12$  m,  $\theta = 25^\circ$ )



**Σχήμα 10.** Μέγιστη κανονικοποιημένη καμπτική ροπή σε πασσάλους με διάφορες γωνίες κλίσης. Κανονικοποίηση ως προς την απόκριση της κατακόρυφης πασσαλομάδας με πάκτωση στην κεφαλή (μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές από τα τρία επιταχυνσιογραφήματα [Λευκάδα, Αίγιο, JMA]). Τα αποτελέσματα αναφέρονται σε κάθε διάταξη και πάσσαλο (που δείχνεται με γκρι χρώμα) στο κάτω μέρος του σχήματος. (Ανομοιογενές εδαφικό προφίλ,  $T_s = 0.29$  s,  $E_p / E_s(L) = 67$ ,  $T_{str} = 0.44$  s,  $H_{str} = 12$  m)



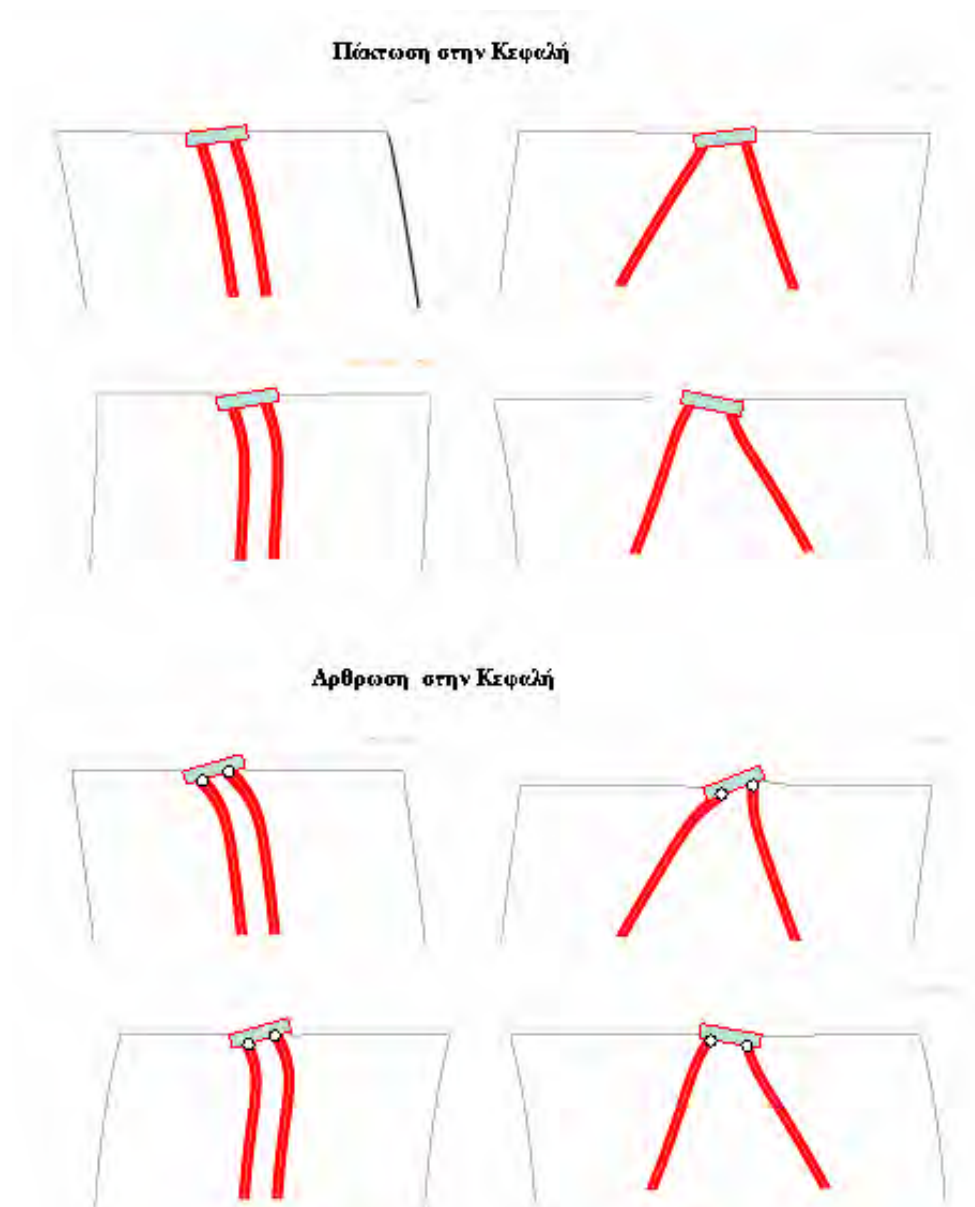
**Σχήμα 11.** Μέγιστη κανονικοποιημένη αξονική δύναμη σε πασσάλους με διάφορες γωνίες κλίσης. Κανονικοποίηση ως προς την απόκριση της κατακόρυφης πασσαλομάδας με πάκτωση στην κεφαλή (μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές από τα τρία επιταχυνσιογραφήματα [Λευκάδα, Αίγιο, JMA]). Τα αποτελέσματα αναφέρονται σε κάθε διάταξη και πάσσαλο (που δείχνεται με γκρι χρώμα) στο κάτω μέρος του σχήματος. (Ανομοιογενές εδαφικό προφίλ,  $T_s = 0.29$  s,  $E_p / E_s(L) = 67$ ,  $T_{str} = 0.44$  s,  $H_{str} = 12$  m)

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα για ομάδες κεκλιμένων πασσάλων σε συνδυασμό με χθαμαλή ανωδομή είναι τα εξής:

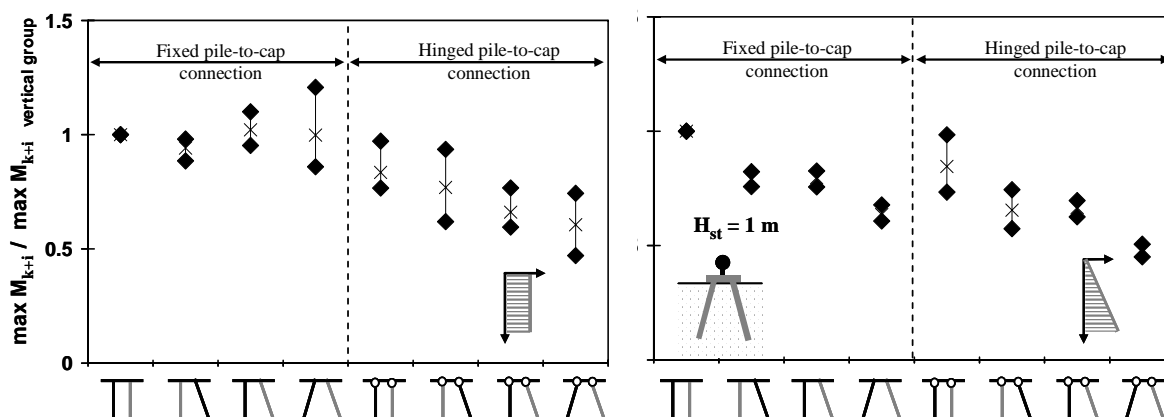
- (i) Η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της ανωδομής λαμβάνοντας υπόψη την σημαντική ενδοσιμότητα της θεμελίωσης, είναι περίπου ίση με την ιδιοπερίοδο της ή ανένδοτα στηριζόμενης ανωδομής ανεξαρτήτως της διάταξης των πασσάλων. Η σύνδεση

πασσάλου-κεφαλοδέσμου δεν επηρεάζει την απόκριση της ανωδομής, σε αντίθεση με την περίπτωση της υψίκορμης κατασκευής όπου η άρθρωση στην κεφαλή των πασσάλων μειώνει σημαντικά τις επιταχύνσεις στην ανωδομή. Στο **Σχήμα 12** απεικονίζεται η παραμόρφωση των διατάξεων με κατακόρυφους και κεκλιμένους πασσάλους σε συνδυασμό με χθαμηλή ανωδομή. Διακρίνονται οι δύο τύποι σύνδεσης πασσάλου-κεφαλοδέσμου.

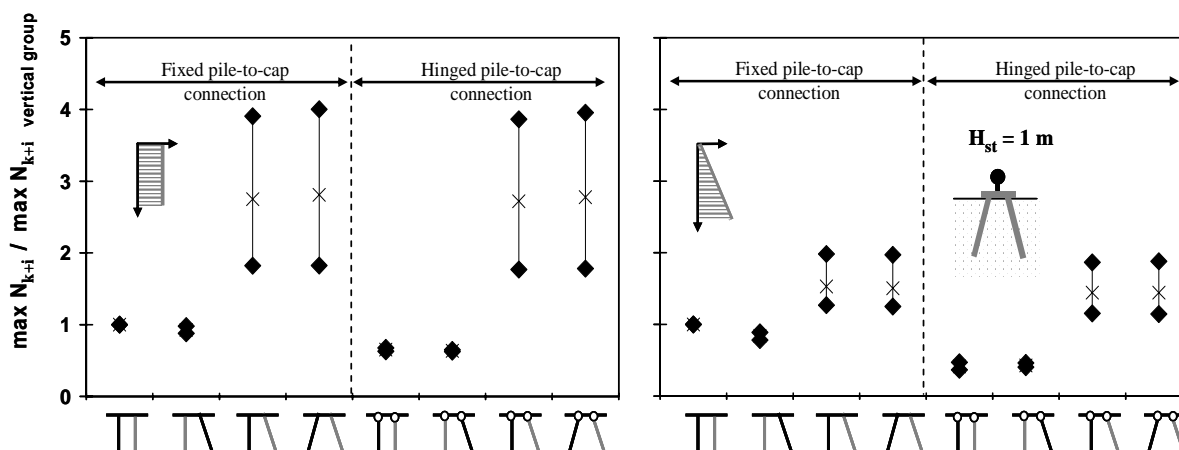
- (ii) Η οριζόντια σχετική “μετατόπιση” (“drift”) της ανωδομής δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την διάταξη των πασσάλων και την σύνδεση πασσάλου-κεφαλοδέσμου.



**Σχήμα 12.** Παραμορφωμένο σχήμα του συστήματος εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής (συντελεστής μεγέθυνσης: 200) σε δύο στιγμιότυπα (διέγερση: Αίγιο, ανομοιογενές εδαφικό προφίλ,  $T_s = 0.29$  s,  $E_p / E_s (L) = 67$ ,  $T_{str} = 0.44$  s,  $H_{str} = 1$  m,  $\theta = 25^\circ$ )



**Σχήμα 13.** Μέγιστη κανονικοποιημένη καμπτική ροπή στους πασσάλους. Κανονικοποίηση ως προς την απόκριση της κατακόρυφης πασσαλομάδας με πάκτωση στην κεφαλή (μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές από τα τρία επιταχυνσιογραφήματα [Λευκάδα, Αίγιο, JMA]). Τα αποτελέσματα αναφέρονται σε κάθε διάταξη και πάσσαλο (που δείχνεται με γκρί χρώμα) στο κάτω μέρος του σχήματος. ( $T_s = 0.29$  s,  $T_{str} = 0.44$  s,  $H_{str} = 1$  m,  $\theta = 25^\circ$ )



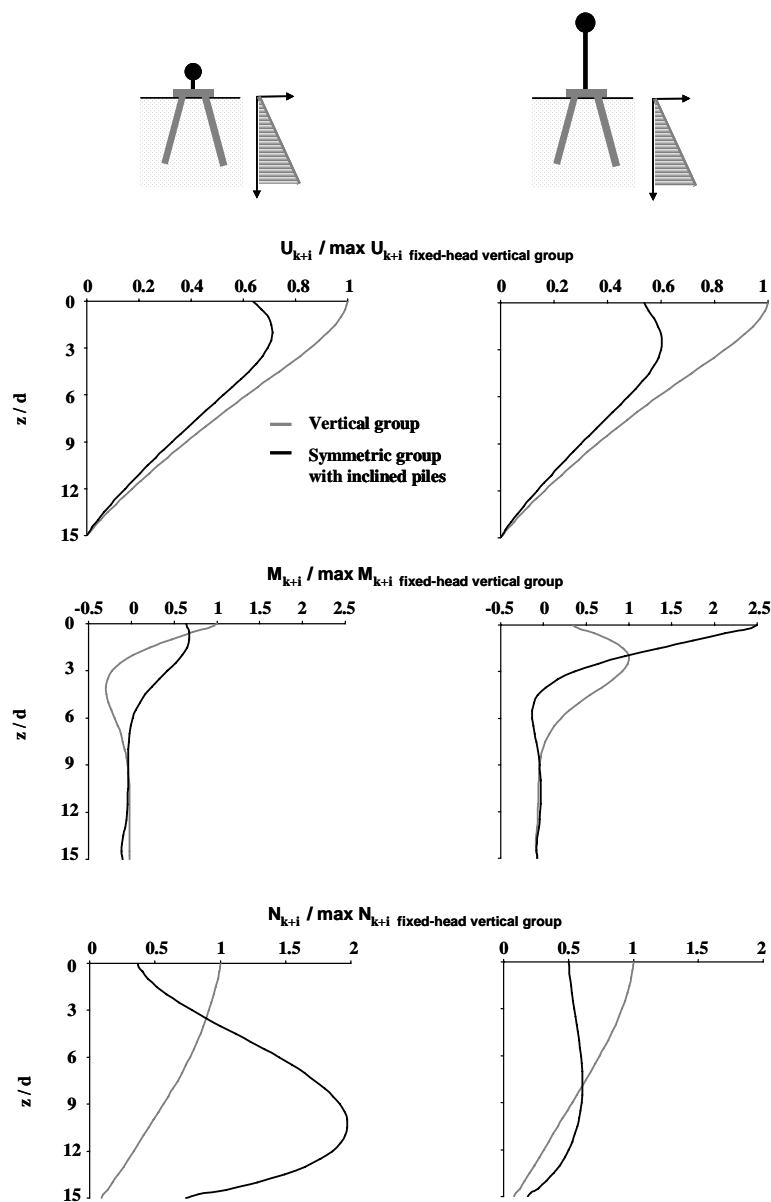
**Σχήμα 14.** Μέγιστη κανονικοποιημένη αξονική δύναμη στους πασσάλους. Κανονικοποίηση ως προς την απόκριση της κατακόρυφης πασσαλομάδας με πάκτωση στην κεφαλή (μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές από τα τρία επιταχυνσιογραφήματα [Λευκάδα, Αίγιο, JMA]). Τα αποτελέσματα αναφέρονται σε κάθε διάταξη και πάσσαλο (που δείχνεται με γκρί χρώμα) στο κάτω μέρος του σχήματος. ( $T_s = 0.29$  s,  $T_{str} = 0.44$  s,  $H_{str} = 1$  m,  $\theta = 25^\circ$ )

- (iii) Η καμπτική ροπή στους κεκλιμένους πασσάλους εξαρτάται από την φύση του εδαφικού προφίλ και την ιδιοπερίοδο της ανωδομής. Οι κεκλιμένοι πάσσαλοι σε έδαφος Gibson αναπτύσσουν μικρότερες καμπτικές ροπές από τους κατακόρυφους, όταν οι αδρανειακές δυνάμεις που προέρχονται από την ανωδομή είναι σημαντικές (όταν δηλαδή η ιδιοπερίοδος της κατασκευής είναι κοντά στην δεσπτόζουσα ιδιοπερίοδο της διέγερσης). Στην περίπτωση ομοιογενούς εδαφικού προφίλ η μείωση αυτή δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική (**Σχήμα 13**).
- (iv) Οι ομάδες με κεκλιμένους πασσάλους αναπτύσσουν μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις από την αποκλειστικώς κατακόρυφη πασσαλομάδα, επειδή στην περίπτωση χθαμηλής ανωδομής η κινηματική φόρτιση αποτελεί σημαντικό μέρος της συνολικής (κινηματικής



+ αδρανειακής) φόρτισης των πασσάλων (Σχήμα 14). Η διαφορά μεταξύ της αξονικής δύναμης που αναπτύσσεται στους κεκλιμένους και κατακόρυφους πασσάλους εξαρτάται πρωτίστως από την φύση του εδαφικού προφίλ και την ιδιοπερίοδο της κατασκευής. Στο Σχήμα 15 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές κατανομές μετατοπίσεων και εντατικών μεγεθών (καμπτικής ροπής και αξονικής δύναμης) για την συμμετρική ομάδα κεκλιμένων πασσάλων και την κατακόρυφη πασσαλομάδα.

- (v) Όταν η ιδιοπερίοδος της κατασκευής είναι μεγάλη (σε σχέση πάντα με το εύρος των δεσποζουσών περιόδων της διέγερσης), η κινηματική αλληλεπίδραση εδάφους-θεμελίωσης παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόκριση των κεκλιμένων πασσάλων, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερων ροπών και αξονικών δυνάμεων.

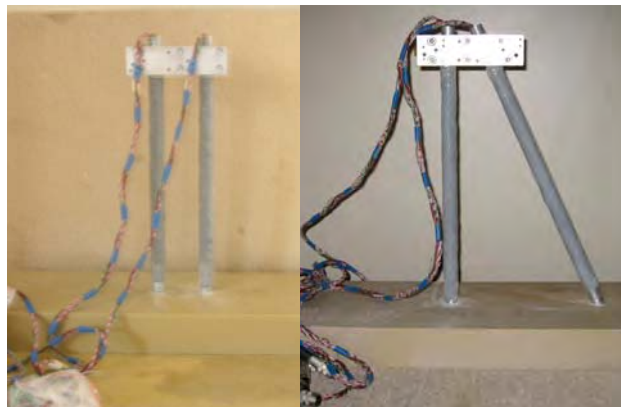


**Σχήμα 15.** Κανονικοποιημένες κατανομές: (α) οριζόντιας μετατόπισης, (β) καμπτικής ροπής, και (γ) αξονικών δυνάμεων κατά μήκος πασσάλου πακτωμένης κεφαλής. Χαμηλή (αριστερή στήλη) και υψίκορμη (δεξιά στήλη) ανωδομή. Κανονικοποίηση με την απόκριση κατακόρυφης πασσαλομάδας πακτωμένης κεφαλής. (Διέγερση: Λευκάδα, ανομοιογενές εδαφικό προφίλ,  $T_{str} = 0.44$  s,  $\theta = 25^\circ$ )

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΟΜΑΔΩΝ ΜΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟΥΣ ΠΑΣΣΑΛΟΥΣ ΣΤΟΝ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΣΤΗ

Η έλλειψη καταγραφών της σεισμικής απόκρισης κεκλιμένων πασσάλων είτε σε ιστορικά περιστατικά είτε σε πειράματα, οδήγησε στη διεξαγωγή πειραμάτων σε φυγοκεντριστή στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Προγράμματος QUAKER, στο Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) στην Νάντη. Η κύρια συγγραφέας (Α.Γ) συμμετείχε σε μεγάλο μέρος των εν λόγω πειραμάτων, τα οποία αποσκοπούσαν στην μελέτη της σεισμικής απόκρισης απλών διατάξεων πασσάλων (1 x 2) (**Σχήμα 16**). Οι πασσαλομάδες και η περιβάλλουσα εδαφική στρώση ξηρής άμμου τύπου Fontainebleau τοποθετούνται σε εύκαμπτο διατμητικώς παραμορφούμενο κιβώτιο (Equivalent Shear Beam Box).

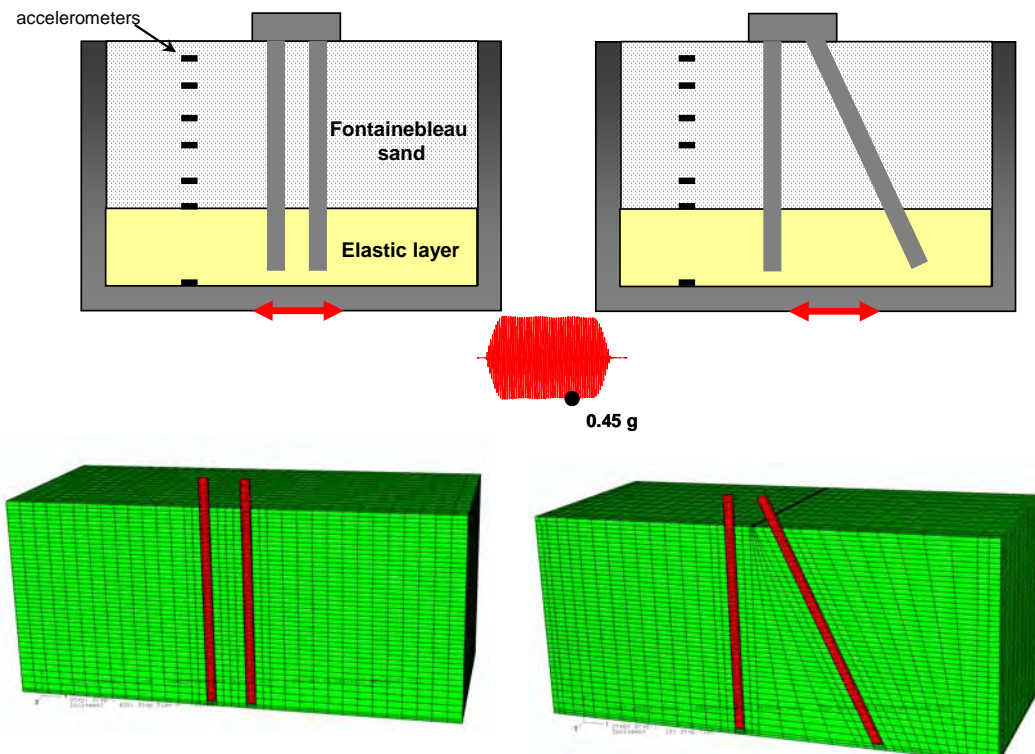
Η διέγερση στη βάση του κιβωτίου είναι ημίτονο πολλών κύκλων, πλάτους 0.45 g. Οι δοκιμές έγιναν σε δύο συχνότητες, 3Hz και 4 Hz (σε πραγματική φυσική κλίμακα). Σε κάθε έναν πάσσαλο τοποθετήθηκαν παραμορφωσιόμετρα για την καταγραφή των καθ' ύψος καμπτικών ροπών.



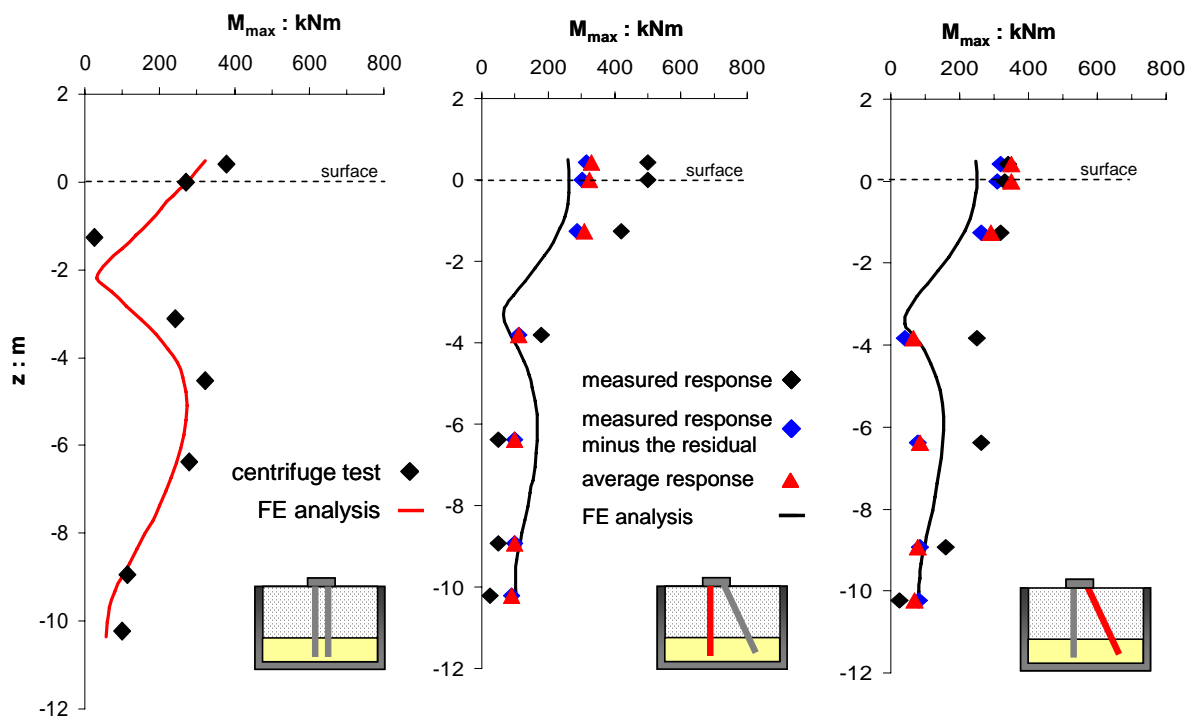
**Σχήμα 16.** Διατάξεις πασσάλων που μελετήθηκαν πειραματικά

Η προσομοίωση των πειραμάτων έγινε με τριδιάστατες αναλύσεις ΠΣ (**Σχήμα 17**). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων συγκρίνονται ικανοποιητικά με την καταγραφείσα απόκριση των πασσάλων σε όρους καμπτικών ροπών (**Σχήμα 18**). Με τις αναλύσεις ΠΣ επετεύχθη η αναπαραγωγή των παρατηρηθέντων φαινομένων στις δοκιμές φυγοκεντριστή. Τονίζεται ότι και τα πειράματα φυγοκεντριστή και οι αναλύσεις Π.Σ. δείχνουν ότι η ασύμμετρη πασσαλομάδα αναπτύσσει μικρότερη τιμή μέγιστης καμπτικής ροπής από την κατακόρυφη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην παρουσία του μεγάλης μάζας κεφαλοδέσμου, η οποία προκαλεί αδρανειακή φόρτιση στους πασσάλους. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι κεκλιμένοι πάσσαλοι δύνανται να αναπτύξουν μικρότερες καμπτικές ροπές από τους κατακόρυφους όταν η ανωδομή είναι κοντή (στην περίπτωση αυτήν ανωδομή είναι μόνον ο κεφαλόδεσμος) και όταν η σχετική δυσκαμψία πασσάλου-εδάφους είναι μεγάλη. Στην περίπτωση όπου η μάζα του κεφαλοδέσμου ήταν αμελητέα (μια μάλλον ανεδαφική περίπτωση, δεδομένου ότι είναι αδύνατον να δημιουργηθεί πάκτωση στην κεφαλή των πασσάλων σε φυγοκεντριστή

χωρίς κεφαλόδεσμο μεγάλης μάζας) η καμπτική ροπή στην κεφαλή των κεκλιμένων πασσάλων θα ήταν μεγαλύτερη από τους κατακόρυφους.



**Σχήμα 17.** Σχηματική απεικόνιση των διατάξεων που μελετήθηκαν στα πειράματα με το φυγοκεντριστή και προσομοιώματα Π.Σ. που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις.



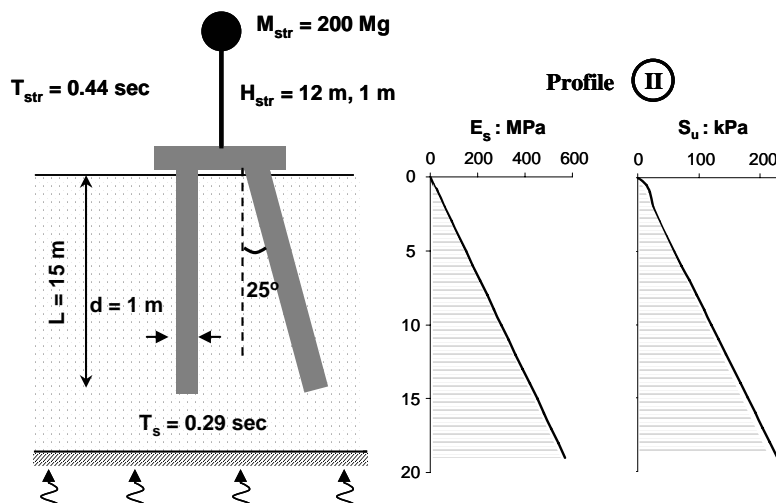
**Σχήμα 18.** Κατανομή μεγίστων καμπτικής ροπής από τα αποτελέσματα αναλύσεων Π.Σ. και τις δοκιμές φυγοκεντριστή για κατακόρυφη και ασύμμετρη διάταξη πασσάλων. Συχνότητα διέγερσης: 4

## ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΕΚΛΙΜΕΝΩΝ ΠΑΣΣΑΛΩΝ

Ένδειξη για την επίδραση της μή-γραμμικότητας του εδάφους στην σεισμική συμπεριφορά ομάδων με κεκλιμένους πασσάλους παρουσιάζεται εδώ μέσω παραμετρικών αναλύσεων.

Σκοπός μας είναι ο έλεγχος της ορθότητας μερικών εκ των βασικότερων συμπερασμάτων της μέχρι τώρα μελέτης, όταν το έδαφος παύει να είναι γραμμικώς ελαστικό. Αναφερόμαστε σε δύο πασσαλομάδες, αποτελούμενες από δύο κατακόρυφους και δύο κεκλιμένους πασσάλους, σε ανομοιογενές *συνεκτικό* έδαφος. Καί εδώ μελετάται η επίδραση του ύψους της ανωδομής, με ελαστική δομητική συμπεριφορά πασσάλων και ανωδομής. Η συμπεριφορά του εδάφους προσομοιώνεται με κριτήριο διαρροής Von-Mises, με μή-γραμμικό *κινηματικό* νόμο κράτυνσης, και συσχετισμένη πλαστική ροή.

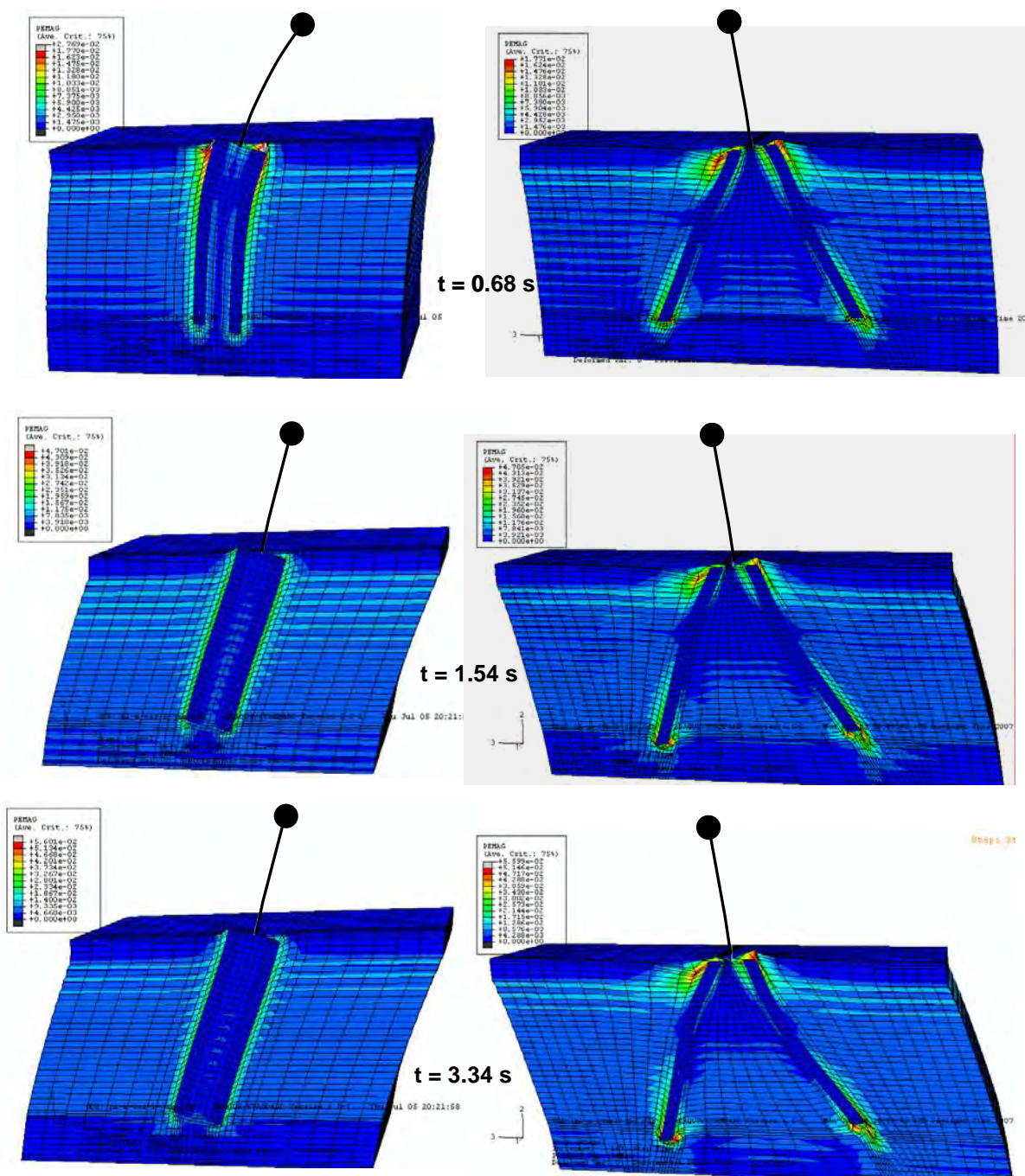
Η εξέλιξη της διαρροής του εδάφους γύρω από τις δύο ομάδες πασσάλων, στην περίπτωση υψίκορμης ανωδομής απεικονίζεται στο **Σχήμα 20**.



**Σχήμα 19.** Εδαφικές παράμετροι και γεωμετρία του υπό μελέτη προβλήματος.

Είναι προφανές ότι γύρω από την κεκλιμένη πασσαλομάδα αναπτύσσονται μεγαλύτερες πλαστικές παραμορφώσεις από ότι στην κατακόρυφη πασσαλομάδα. Οι αναλύσεις έδειξαν ότι στην περίπτωση υψίκορμης ανωδομής (π.χ. βάρθρο γέφυρας) οι κεκλιμένοι πάσσαλοι με άρθρωση στην κεφαλή έχουν την πιά ικανοποιητική απόδοση σε όρους καταπόνησης πασσάλου και ανωδομής. Επιπλέον, οι κεκλιμένοι πάσσαλοι αναπτύσσουν, αφενός μεν μικρότερες καμπτικές ροπές και μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις από τους κατακόρυφους στην περίπτωση *χαμηλής* ανωδομής, αφετέρου δε μεγαλύτερες καμπτικές ροπές και μικρότερες αξονικές δυνάμεις στην περίπτωση *υψίκορμης* ανωδομής.

Οι εν λόγω παρατηρήσεις συμφωνούν με προηγούμενα συμπεράσματα που προέκυψαν από την απλοποιητική ελαστική θεώρηση συμπεριφοράς του εδάφους. Σημειώνεται ότι όλα τα αποτελέσματα των γραμμικών αναλύσεων κανονικοποιήθηκαν με την απόκριση της κατακόρυφης πασσαλομάδας πακτωμένης κεφαλής δημιουργώντας με τον τρόπο αυτόν αδιάστατους λόγους απόκρισης. Η επίδραση της μή-γραμμικότητας του εδάφους στους αδιαστατοποιημένους λόγους απόκρισης δέν αλλάζει τα βασικά συμπεράσματα που έχουμε συνάγει μέχρι τώρα.



**Σχήμα 20.** Ισοϋψείς πλαστικών παραμορφώσεων σε διαφορετικά στιγμιότυπα (συντελεστής μεγέθυνσης: 30). Οι πλαστικές παραμορφώσεις της κατακόρυφης και κεκλιμένης πασσαλομάδας πακτωμένης κεφαλής απεικονίζονται στην ίδια κλίμακα σε κάθε χρονική στιγμή (Διέγερση: JMA,  $H_{str} = 12$  m).

## ΕΠΙΛΟΓΟΣ : ΚΕΚΛΙΜΕΝΟΙ ΠΑΣΣΑΛΟΙ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση των κεκλιμένων πασσάλων εθεωρείτο μέχρι πρότινος επιζήμια για την σεισμική απόκριση των κατασκευών, πολλοί δε κανονισμοί ακόμη και σήμερα συνιστούν την αποφυγή της χρήσης τους. Για παράδειγμα, ο Γαλλικός Αντισεισμικός Κανονισμός (AFPS 90) αναφέρει ξεκάθαρα ότι *“Κεκλιμένοι πάσσαλοι δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται για την παραλαβή σεισμικών φορτίων”*. Ο Ευρωπαϊκός Κανονισμός (Eurocode EC8 / Part 5) και ο ΕΑΚ (2000), αν και με μιά λιγότερο περιοριστική διατύπωση, συνιστούν εν γένει την αποφυγή της χρήσης κεκλιμένων πασσάλων για την παραλαβή εγκαρσίων φορτίων, στην δε περίπτωση χρησιμοποίησής τους απαιτούν κατάλληλον σχεδιασμό για την ασφαλή παραλαβή αξονικών και καμπτικών δυνάμεων. Η έρευνα που σκιαγραφήθηκε στο παρόν άρθρο συμβάλλει στην βαθύτερη κατανόηση της σεισμικής συμπεριφοράς των κεκλιμένων πασσάλων, οι οποίοι δύνανται υπό προϋποθέσεις να συμβάλουν θετικά στην απόκριση τόσο της θεμελίωσης όσο και της ανωδομής. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν μπορούν να αποτελέσουν το πρώτο βήμα για την μελλοντική εξέλιξη των σχετικών κανονιστικών διατάξεων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- AFPS (1990) Association française de Génie Parasismique. Recommandations AFPS 90. Presses des Ponts et Chaussées.
- Angelides, D.C. and Roesset, J.M. (1981). “Non-linear lateral dynamic stiffness of piles”, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 107, No GT11, pp 1443-1460
- Blaney G. W., Kausel E., and Roesset J.M. (1976). “Dynamic stiffness of piles”, Proc., 2<sup>nd</sup> Int Conf. Num. Methods Geomech., Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksbourg, VA., 1010-1012.
- Berril J. B., Christensen S.A., Keenan R. P., Okada W. and Pettinga J. R. (2001), “Case study of lateral spreading forces on a piled foundation”, Geotechnique 51, No 6, 501-517
- Brown, D.A., and Shie, C.F. (1990). “Three dimensional finite element model of laterally loaded piles.” Computers and Geotechnics, v 10, n 1, 1990, pp. 59-79.
- Cai Y.X., Gould P.L., and Desai C.S. (2000). “Nonlinear analysis of 3D seismic interaction of soil-pile-structure systems and application”, Engineering structures (22), 191-199.
- Comodromos E.M. and Pitilakis K. (2005). “Response evaluation for horizontally loaded fixed-head pile groups using 3-D nonlinear analysis”, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. (29)
- Deng N, Kulesza R., and Ostadan Farhang. "Seismic soil-pile group interaction analysis of a battered pile group", 4<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, June 25-28, 2007
- Derx F, Thorel L, Chazelas JL, Escoffier S, Rault G, Buttigieg S, Cottineau LM and Garnier J. (2006). "Dynamic tests and simulation of earthquakes in the the LCPC's centrifuge", 6th ICPMG Int. conf. on physical modelling in geotechnics, august 4-6 2006, Hong Kong, Ng Zhang & Wang (eds), 181-186
- Dobry R. and Gazetas G. (1988). “Simple method for dynamic stiffness and damping of floating pile groups”, Geotechnique (38), 557-574.
- Escoffier S. (2005) “Quaker Program Topic B1: Inclined piles subjected to seismic loads”, Report RMS/MS : 2004-0-01-1/1-a, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France

- Escoffier S. (2006) "QUAKER Topic B1: Effect of inclined piles on pile group response", Report RMS/MS : 2006-4-01-1/1-a, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France
- Escoffier S., Chenaf N., Chazelas J., and Garnier J. (2007). "Effect of inclined piles on the dynamic performances of an end-bearing pile group", 4<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece, Paper No. 1438.
- Eurocode EC8 (1994) Structures in seismic regions, Part 5: Foundations, retaining structures, and geotechnical aspects.
- Fan K., Gazetas G., Kaynia A., Kausel E. and Ahmad S. (1991) "Kinematic seismic response of single piles and pile groups," *Journal of Geotechnical Engineering*, 117, 1860-1879.
- Garnier J. (2002) "Properties of soil samples used in centrifuge models", *Invited Keynote Lecture*, International Conference on Physical Modelling in Geotechnics – ICPMG '02, R. Phillips et al. (Eds), published by A.A. Balkema, Rotterdam, 1, 5-19.
- Gazetas, G. (1984). "Seismic response of end-bearing piles", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 3, pp 89–93.
- Gazetas, G., Fan, K., Tazoh, T., and Shimizu, K. (1993). "Seismic Response of the Pile Foundation of Ohba-Ohashi Bridge," *Proc. 3rd Intl. Conf. on Case Histories in Geotech. Eng.*, St. Louis, Vol. 3, 1803-1809.
- Gazetas G. and Mylonakis G. (1998) "Seismic soil-structure interaction: new evidence and emerging issues", *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III*, ASCE, 2, Geotechnical Special Publication, 75, 1119-1174.
- Gazetas G., Anastasopoulos I., Gerolymos N., Mylonakis G., & Syngros C. (2005), "The Collapse of the Hanshin Expressway (Fukae) Bridge, Kobe 1995 : Soil–Foundation–Structure Interaction, Reconstruction, Seismic Isolation", *Entwicklungen in der Bodenmechanik, Bodendynamik und Geotechnik, Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Professor Dr.-Ing.habil. Stavros A. Savidis (Honorary Volume for the 60<sup>th</sup> Birthday of Professor Savidis)*, Frabk Rackwitz, Springer, pp. 93–120.
- Gerolymos N., Giannakou A., Gazetas G. (2007), "On a Possible Beneficial Effect of Inclined Piles: Field Observations and Numerical Modelling", *Bulletin of Earthquake Engineering (online available)*.
- Gerolymos N., Gazetas G., Mylonakis G. (1998), "Fundamental Period and Effective Damping of Pile–Supported Bridge Piers", *11<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering*, Paris (in cd–rom).
- Gerolymos N., Gazetas G., Mylonakis G. (1999), "Natural Period and Damping of Bridge–Piers on Piles", *2<sup>nd</sup> International Conference in Geotechnical Earthquake Engineering*, Lisbon, pp. 291- 296.
- Gerolymos N. and Gazetas G. (2005). "Phenomenological model applied to inelastic response of soil-pile interaction systems" *Soils and Foundations* (45)
- Gerolymos N. Gazetas G, and Tazoh T. (2005) "Static and dynamic response of yielding pile in nonlinear soil", *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Greece–Japan Workshop on Seismic Design, Observation, and Retrofit of Foundations*, Athens
- Gerolymos N., Drosos V., Escoffier S., Gazetas G., and Garnier J. (2007). "Numerical modeling of centrifuge cyclic lateral pile load experiments", *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Japan-Greece Workshop on Seismic Design, Observation, and Retrofit of Foundations*, Tokyo
- Guin J. "Advances in soil-pile-structure interaction and non-linear pile behavior," PhD thesis, State University of New York at Buffalo, 1997
- Juran I., Benslimane A., and Hanna S (2001). "Engineering Analysis of dynamic behavior of micropile systems". *Transportation Research Record No. 1772*, 91-106
- Kastranta G. & Gazetas G, Tazoh T. (1998), "Performance of three quay walls in Maya Wharf: Kobe 1995", *11<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering*
- Lam, I and Martin, G.R. (1986) "Seismic design of highway bridge foundations", Vol. II, *Design procedures and guidelines*. Report No. FHWA/RD-86/102, Federal Highway Administration, Virginia.

- Lee Y. J., Han J. T., Kwon O. S., Kim M. M. (2004), "Development and Application of New Connecting Methods for Batter Pile Head", The 3<sup>rd</sup> International Conference on Earthquake Engineering (3<sup>rd</sup> ICEGE), Berkeley.
- Maheshwari B.K., Truman K.Z., El Naggar M.H., and Gould P.L. (2004). "Three dimensional finite element nonlinear dynamic analysis of groups for lateral transient and seismic excitations", Canadian Geotechnical Journal (41),. 118-133.
- Makris, N., and Gazetas, G. (1992). "Dynamic pile-soil-pile interaction. Part II: Lateral and seismic response", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 21, pp 145-162
- Mc Vay M., Shang T., and Casper R. (1996). "Centrifuge testing of fixed-head laterally loaded battered and plumb pile groups in sand", Geotechnical Testing Journal (19), 41-50.
- Meyerhof G.G. and Ranjan G. (1972). "The bearing capacity of rigid piles under inclined loads in sand II: Batter piles", Canadian Geotechnical Journal (10), 71-85.
- Meyerhof G.G. and Yalcin A.S. (1993). "Behavior of flexible batter piles under inclined loads in layered soil", Canadian Geotechnical Journal (30), 247-256.
- Mindlin, R. D., 1936. "Force at a point in the interior of a semi-infinite solid", Physics 7: 195.
- Mitchell, D., Tinawi, R., and Sexsmith, R.G. (1991). "Performance of bridges in the 1989 Loma Prieta earthquake, Lessons for Canadian designers." Canadian Journal of Civil Engineering, 18 (4), 711-734.
- Mylonakis G. (1995). "Contributions to static and seismic analysis of piles and pile-supported bridge piers", PhD Thesis, State University of New York at Buffalo.
- Mylonakis, G. and Gazetas, G. (1999). "Lateral vibration and internal forces of grouped piles in layered soil", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 125, N<sup>o</sup> 1, pp 16-25.
- Mylonakis G. and Gazetas G. (2000) "Seismic soil-structure interaction: Beneficial or detrimental ?" Journal of earthquake Engineering (4), 277-301
- Mylonakis G., Gazetas G., Gerolymos N., and Anastasopoulos I. (2000), "Detrimental Role of Soil-Structure Interaction and the Collapse of the 18-Pier Fukae Bridge in Kobe", *Recent Advances in Applied Mechanics*, Honorary Volume for Professor A.N.Kounadis, N.T.U.A., 2000, pp.145–159.
- Nakai T. (1989) "An isotropic hardening elasto-plastic model for sand considering the stress path dependency in three-dimensional stresses", Soils and Foundations (29), 119-137
- Nikolaou S. and Gazetas G. (1997). "Seismic design procedure for kinematically loaded piles", Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng, hamburg, Special Volume, ISSMFE TC\$ Earthquake geotechnical engineering, 253-260.
- Nikolaou S., Mylonakis G., Gazetas G., and Tazoh T. (2001). "Kinematic pile bending during earthquakes: analysis and field measurements", Geotechnique (51), 425-440.
- Ohira A., Tazoh T, Dewa K., Shimizu K., and Shimada M. (1984). "Observations of Earthquake Response Behaviors of Foundation Piles for Road Bridge," *Proc. 8th World Conf. Earthquake Eng.*, San Francisco, Vol. 3, 577-584.
- Okawa K., Kamei H., Zhang F., and Kimura M. (2005) "Seismic performance of group-pile foundation with inclined steel piles", Proceedings of the 1<sup>st</sup> Greece–Japan Workshop on Seismic Design, Observation, and Retrofit of Foundations, Athens
- Priestly, N., Singh, J., Youd, T., and Rollins, K. (1991). "Costa Rica Earthquake of April 22, 1991 Reconnaissance Report," Pub. 91-02, Earthquake Eng. Research Inst., 59-91.
- Poulos, H. (1971a). "Behaviour of Laterally Loaded Piles: Part 1 - Single Piles," J. Soil Mechanics and Foundation Div., ASCE, 97(5), 711-731.
- Poulos H. G. (2006). "Raked piles – Virtues and drawbacks" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (132), 795-803.
- Ravazi S.A, Fahker A., and Mirghaderi S.R. (2007) "An insight into the bad reputation of batter piles in seismic performance of wharves" ", 4<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, June 25-28, 2007
- Randolph, M.F. (1981). "The response of flexible piles to lateral loading" Geotechnique, Vol 31, pp 247-259



- Roeder C., Graff R., Soderstorm J., and Yoo J.H. (2001). "Seismic performance of pile-wharf connections", PEER Report No. 2002/07.
- Sadek M. & Shahrour I. (2004) "Three-dimensional finite element analysis of the seismic behavior of inclined micropiles" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 473-485.
- Sadek M. & Shahrour I. (2006) "Influence of the head and tip connection on the seismic performance of micropiles," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 461-468.
- Schnabel, P. B., J. Lysmer and H. B. Seed (1972). "SHAKE- A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites", EERC 72-12, Univ. of Calif., Berkeley, 1972
- Schofield A. N. (1980) "Cambridge geotechnical centrifuge operations" *Geotechnique* (30), 227-268
- Seed, R.B., Dickenson, S.E., Riemer, M.F., Bray, J.D., Sitar, N., Mitchell, J.K., Idriss, I.M., Kayen, R.E., Kropp, A.K., Harder, L.F., and Power, M.S. (1990). "Preliminary report on the principle geotechnical aspects of the October 17, 1989 Loma Prieta earthquake", Report No. UCB/EERC-90/05, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Structural Engineers Association of California SEAOC (1991). "Reflections on the October 17,1989 Loma Prieta Earthquake," Ad Hoc Earthquake Reconnaissance Committee, Sacramento.
- UCB/EERC-95/01 (1995) "Geotechnical reconnaissance of the effects of the January 17, 1995, Hyogoken-Nanbu earthquake, Japan" Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Wakai A., Gose S., and Ugai K. (1999). "3-D elasto-plastic finite element analyses of pile foundations subjected to lateral loading", *Soils and Foundations* (39) 97-111.
- Wong (2004). "Seismic behavior of micropiles" MSc thesis, Washington State University.
- Yasuda, S. and Berrill, J. (2000) "Observation of the earthquake response of foundations in soil profiles containing saturated sands", 1st International Conference on Geotechnical and Geological Engineering –GeoEng2000, Issue Lecture, pp.1441-1470.
- Zhang L.M., Mc Vay M.C., and Lai P. (1999). "Centrifuge modeling of laterally loaded single battered piles in sands", *Canadian Geotechnical Journal* (36), 1074-1084.