

Χρήση πειραματικών βρόχων p-y για την προσομοίωση σεισμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-πασσάλου

Experimental p-y loops for estimating seismic soil-pile interaction

ΡΟΒΙΘΗΣ, EMM.N. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
ΠΙΤΙΛΑΚΗΣ, Κ. Δ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Α.Π.Θ.
ΚΙΡΤΑΣ, EMM.A. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η σεισμική αλληλεπίδραση εδάφους-πασσάλου εκτιμάται μέσω ανάστροφα υπολογισμένων βρόχων p-y, βασικές ιδιότητες των οποίων χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ελατηρίων και αποσβεστήρων προσομοίωσης του εδάφους, στα πλαίσια της θεωρίας Winkler. Η διαδικασία βαθμονομείται μέσω πειραμάτων σε φυγοκεντριστή υπό σεισμική διέγερση και οι εξαγόμενοι βρόχοι p-y συγκρίνονται με διαθέσιμες από την βιβλιογραφία αναλυτικές καμπύλες p-y υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η σύγκλιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τις πειραματικές καταγραφές καταδεικνύει την επάρκεια του προτεινόμενου προσομοιώματος Winkler. Εξετάζεται η επιρροή της έντασης της σεισμικής κίνησης στην μορφή των βρόχων και αναδεικνύεται, στην περίπτωση ισχυρής σεισμικής διέγερσης, η υπερεκτίμηση της εδαφικής δυσκαμψίας με την χρήση συνηθισμένων στην πράξη αναλυτικών καμπυλών p-y.

ABSTRACT: Seismic soil-pile interaction is evaluated in this study based on back-calculated p-y loops. Fundamental properties of the computed p-y loops are implemented to derive distributed springs and dashpots, thereby quantifying soil-pile interaction in the realm of the Winkler theory. The procedure is validated by means of centrifuge tests under seismic excitation and the generated seismic p-y loops are compared to established p-y curves under cyclic loading. Typical sets of recorded and computed response denote the ability of the proposed BDWF model in reproducing adequately seismic soil-pile interaction. The results demonstrate the strong influence of intensity of the input motion on seismic p-y loops while cyclic p-y curves commonly used in pile design practice tend to overestimate soil stiffness under strong excitation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σχεδιασμός πασσάλων έναντι οριζόντιων σεισμικών φορτίων απαιτεί την συνεκτίμηση της αλληλεπίδρασης που λαμβάνει χώρα μεταξύ εδάφους και πασσάλου. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ευρύτατα η μέθοδος Winkler, όπου το έδαφος προσομοιώνεται με μια σειρά κατανομημένων ελατηρίων κατά μήκος του πασσάλου. Η δυσκαμψία των ελατηρίων σε κάθε βάθος λαμβάνεται συνήθως από πειραματικές καμπύλες "p-y" οι οποίες περιγράφουν την μη γραμμική σχέση εδαφικής αντίδρασης και μετακίνησης του πασσάλου, υπό μονότονη ή ανακυκλιζόμενη φόρτιση, και διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο του εδάφους (Matlock, 1970, Reese et al., 1974).

Υπό σεισμικές συνθήκες φόρτισης, οι καμπύλες αυτές αδυνατούν να αποδώσουν μια σειρά δυναμικών φαινομένων που αφορούν στην μείωση της εδαφικής δυσκαμψίας με την αύξηση του πλάτους της κίνησης, την αδρανειακή ταλάντωση του περιβάλλοντος εδάφους καθώς και τους μηχανισμούς απόσβεσης (υλικού και ακτινοβολίας), οι οποίοι ενεργοποιούνται κατά την ταλάντωση του πασσάλου επηρεάζοντας σημαντικά την σχέση "p-y" (Angelides and Roesset, 1981). Έτσι ο λόγος της εδαφικής αντίδρασης p προς την μετακίνηση y ορίζει πλέον την σύνθετη δυναμική δυσκαμψία του εδάφους ως συνάρτηση της κυκλικής συχνότητας ω της διέγερσης σύμφωνα με την σχέση (Novak, 1974, Kavvadas and Gazetas 1993):

$$S_x = \frac{p}{y} = k_x(\omega) + i\omega c_x(\omega) \quad (1)$$

όπου το πραγματικό μέρος $k_x(\omega)$ εκφράζει την δυναμική δυσκαμψία και το φανταστικό μέρος $\omega c_x(\omega)$ το άθροισμα της υστερητικής απόσβεσης του εδάφους και της απόσβεσης ακτινοβολίας. Για τον υπολογισμό των επιμέρους όρων της σχέσης 1 έχουν προταθεί απλοποιημένες σχέσεις για ελαστική απόκριση του συστήματος (Roesset 1980, Dobry et al. 1982, Kavvadas and Gazetas 1993, Syngros, 2004). Αναλυτικότερα μακροσκοπικά προσομοιώματα p-y (Badoni and Makris 1996, Boulanger et al. 1999) παρέχουν την δυνατότητα μη γραμμικής συμπεριφοράς εδάφους και πασσάλου, υιοθετώντας όμως συχνά πολύπλοκους καταστατικούς νόμους, η εφαρμογή των οποίων προϋποθέτει την βαθμονόμηση των παραμέτρων τους με βάση αποτελέσματα πειραματικών διατάξεων ή αναλύσεων 3D αριθμητικών προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων.

Στα πλαίσια της θεωρίας Winkler υπό δυναμική φόρτιση, επιχειρείται στην εργασία αυτή η μελέτη της σεισμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-πασσάλου μέσω πειραματικών βρόχων p-y. Για τον υπολογισμό των κατανεμημένων ελατηρίων και αποσβεστήρων χρησιμοποιούνται βασικές ιδιότητες των βρόχων p-y, οι οποίοι με την σειρά τους εξάγονται από πειραματικές καταγραφές ροπής κατά μήκος του πασσάλου. Για τον έλεγχο της διαδικασίας χρησιμοποιείται μια σειρά καλά τεκμηριωμένων πειραμάτων σε φυγοκεντριστή υπό σεισμική διέγερση (Wilson et al. 1997b, Wilson, 1998, Boulanger et al. 1999) που αφορά σε μεμονωμένο πάσσαλο θεμελίωσης μονοβάθμιου ταλαντωτή εντός διστρωματικού εδάφους.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Για την εκτίμηση των δεικτών δυναμικής αλληλεπίδρασης $k_x(\omega)$ και $c_x(\omega)$ (Σχέση 1) από βρόχους p-y υπό σεισμική φόρτιση, δομήθηκε μια διαδικασία η οποία χωρίζεται σε δύο στάδια υπολογισμού (Rovithis et al. 2009):

Το πρώτο στάδιο αφορά στον ανάστροφο υπολογισμό των βρόχων p-y με βάση τις αναπτυσσόμενες ροπές του πασσάλου. Για κάθε χρονική στιγμή t_i λαμβάνεται η κατανομή της ροπής με το βάθος $M(z, t_i)$ η οποία στην συνέχεια προσομοιώνεται με κατάλληλη συνάρτηση παρεμβολής. Η διπλή παραγωγή

και ολοκλήρωση της συνάρτησης αυτής οδηγεί στην αντίστοιχη κατανομή της εδαφικής αντίδρασης $p(z, t_i)$ και της μετακίνησης του πασσάλου $y_{pile}(z, t_i)$:

$$p(z, t_i) = \frac{d^2 M(z, t_i)}{dz^2} \quad (2)$$

$$y_{pile}(z, t_i) = \frac{1}{E_p I_p} \iint M(z, t_i) dz \quad (3)$$

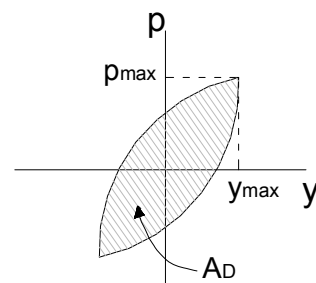
Λαμβάνοντας για ένα συγκεκριμένο βάθος τις επιμέρους τιμές από κάθε κατανομή, υπολογίζεται ανάστροφα η χρονοϊστορία των μεγεθών p και y_{pile} . Από τις εξαγόμενες χρονοϊστορίες προκύπτει ο αντίστοιχος βρόχος p-y υπό σεισμική φόρτιση. Η επανάληψη της διαδικασίας για διαφορετικά βάθη οδηγεί στον προσδιορισμό των σεισμικών βρόχων p-y κατά μήκος του πασσάλου.

Κατά το δεύτερο στάδιο, υπολογίζεται το εμβαδόν A_D και η κλίση των βρόχων p-y (Σχήμα 1) κατά μήκος του πασσάλου, εξισώνοντας το εμβαδόν κάθε βρόχου με την ενέργεια η οποία απορροφάται, σε έναν κύκλο φόρτισης, από ταλαντωτή ιξώδους απόσβεσης ο οποίος διεγείρεται αρμονικά. Αυτό οδηγεί στην εκτίμηση του συντελεστή απόσβεσης $c_x(\omega)$ σύμφωνα με την εξίσωση (Ting, 1987):

$$c_x(\omega) = \frac{A_D}{\pi \omega y_{max}} \quad (4)$$

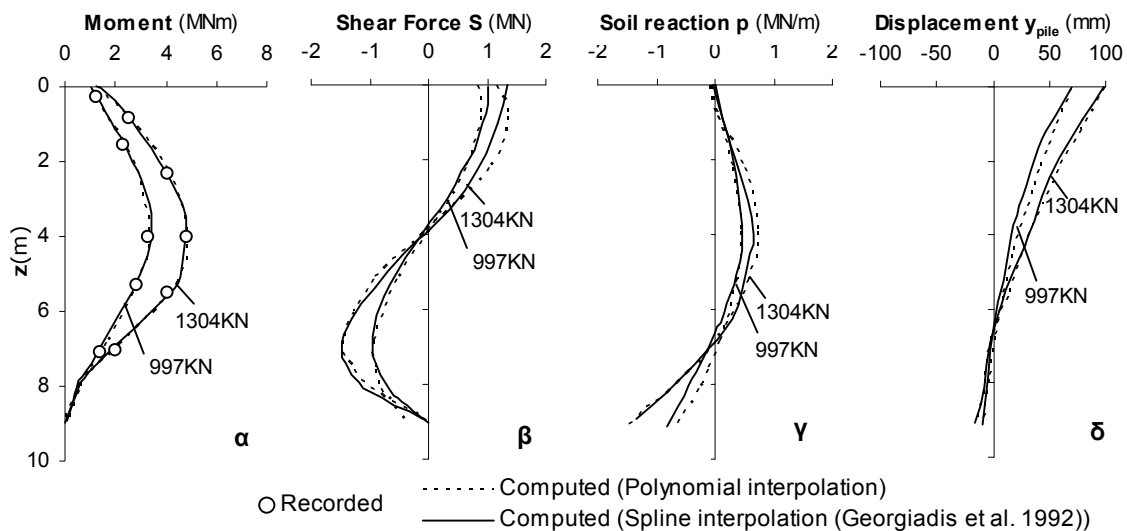
όπου ω η συχνότητα της διέγερσης.

Υιοθετείται κατά συνέπεια η προσέγγιση μιας συνολικής απόσβεσης η οποία ορίζεται από το εμβαδόν του βρόχου, περιλαμβάνει το σύνολο της υστερητικής απόσβεσης και της απόσβεσης ακτινοβολίας, και εξαρτάται από τα



Σχήμα 1. Βασικές ιδιότητες συμμετρικού βρόχου p-y

Figure 1. Fundamental properties of a symmetric p-y loop



Σχήμα 2. Σύγκριση πολυωνυμικής και “καμπύλης” συνάρτησης για την προσομοίωση πειραματικών τιμών ροπής πασσάλου υπό στατική φόρτιση
 Figure 2. Comparison of polynomial and spline function for interpolating recorded pile bending moments developed under static pilehead loading

χαρακτηριστικά της σεισμικής κίνησης και το είδος του εδαφικού σχηματισμού. Αντίστοιχα, ορίζεται και η κλίση του βρόχου p-y ως ο λόγος της μέγιστης αναπτυσσόμενης εδαφικής αντίδρασης p_{max} προς την αντίστοιχη τιμή της μετακίνησης y_{max} . Το πραγματικό μέρος $k_x(\omega)$ που ορίζει και την δυναμική δυσκαμψία του ελατηρίου σε κάθε θέση μπορεί στην συνέχεια να υπολογιστεί από τον συνδυασμό των σχέσεων 1 και 4, καταλήγοντας στην εξίσωση (Badoni and Makris, 1996):

$$k_x(\omega) = \sqrt{\left(\frac{p_{max}}{y_{max}}\right)^2 - \left(\frac{A_D}{\pi y_{max}}\right)^2} \quad (5)$$

Με τον τρόπο αυτό παρέχεται μια άμεση σύνδεση των ιδιοτήτων του βρόχου p-y με την σύνθετη δυναμική δυσκαμψία του εδάφους, οι επιμέρους συνιστώσες της οποίας μπορούν στην συνέχεια να χρησιμοποιηθούν, στα πλαίσια της θεωρίας Winkler, για την προσομοίωση της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-πασσάλου.

2.1 Προσομοίωση της κατανομής των ροπών $M(z,t_i)$

Ένα από τα βασικά σημεία της διαδικασίας για τον υπολογισμό της εδαφικής αντίδρασης και της μετακίνησης του πασσάλου, αποτελεί η επιλογή της μεθόδου προσομοίωσης της κατανομής των ροπών με το βάθος. Η επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης $M=f(z)$ εξαρτάται από το πλήθος των τιμών $[z_i, M_i]$ και το βαθμό

ακρίβειας που απαιτείται για την ανάλυση. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται συνήθως είτε “καμπύλη” συνάρτηση (spline function) μεταξύ διαδοχικών τιμών ροπής (Georgiadis et al. 1992) είτε πολυώνυμο ανώτερου βαθμού (polynomial function) το οποίο προσεγγίζει το σύνολο των τιμών ροπής (Ting, 1987).

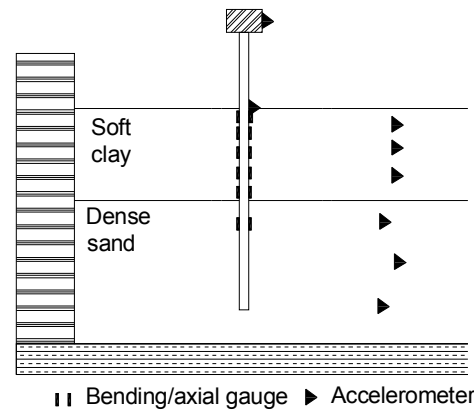
Η επάρκεια της πολυωνυμικής συνάρτησης σε επίπεδο ορθής περιγραφής της κατανομής των ροπών με το βάθος ελέγχθηκε με χρήση πειραμάτων σε συσκευή φυγόκεντρου, τα οποία αφορούν σε στατική φόρτιση πασσάλων εγκιβωτισμένων σε ομοιογενές αμμώδες έδαφος (Georgiadis et al. 1992). Κατά την διάρκεια των πειραμάτων, οι αναπτυσσόμενες ροπές λαμβάνονται από πέντε ζεύγη μετρητών παραμόρφωσης κατανεμημένων, σε περίπου ίσες αποστάσεις, κατά μήκος δυο μεμονωμένων πασσάλων, για οριζόντιο φορτίο $H=997\text{KN}$ και $H=1304\text{KN}$ αντίστοιχα. Οι πάσσαλοι είχαν κοινή διάμετρο $D=1\text{m}$, μήκος $L=9\text{m}$ και καμπτική δυσκαμψία $EI=2066\text{MNm}^2$ και $EI=2495\text{MNm}^2$ αντίστοιχα.

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των ροπών με ένα πολυώνυμο 4^{ου} βαθμού δίνεται στο Σχήμα 2α. Από την διπλή παραγωγή και ολοκλήρωση της πολυωνυμικής συνάρτησης που επιλέχθηκε προκύπτει η κατανομή της εδαφικής αντίδρασης (Σχήμα 2γ) και της μετακίνησης του πασσάλου (Σχήμα 2δ). Για λόγους πληρότητας υπολογίστηκε και η κατανομή της τέμνουσας δύναμης (Σχήμα 2β) που αναπτύσσεται σε κάθε πάσσαλο με βάση την 1^η παράγωγο της ροπής. Στα σχήματα αυτά φαίνονται επίσης και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσέγγιση των

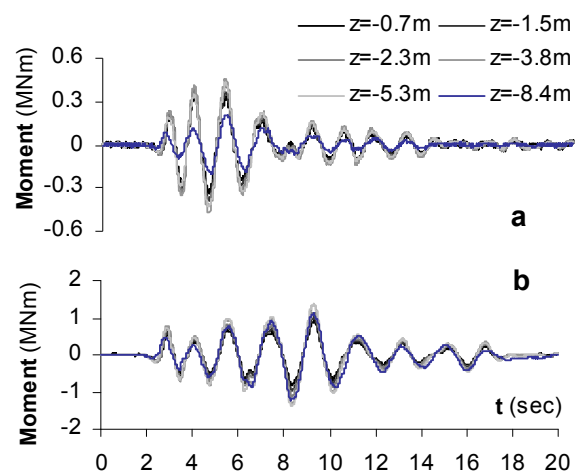
Georgiadis et al. 1992, κατά την οποία υιοθετήθηκε καμπύλη συνάρτηση, ορίζοντας έτσι ένα διαφορετικό πολυώνυμο (4^{ου} επίσης βαθμού) μεταξύ διαδοχικών τιμών ροπής. Η ικανοποιητική συμφωνία που επιτυγχάνεται μεταξύ των δυο μεθόδων οδηγεί σε ορθή πρόβλεψη της απόκρισης του πασσάλου. Πράγματι, η τάση μεταβολής των μεγεθών συμφωνεί σε όλο το μήκος των πασσάλων, γεγονός το οποίο ισχύει και για τις δύο ομάδες πειραματικών τιμών ροπής, καταδεικνύοντας την σταθερότητα του πολυωνύμου για την περιγραφή της μεταβολής της ροπής με το βάθος.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΠΑΣΣΑΛΟΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ-ΑΝΩΔΟΜΗΣ

Η προτεινόμενη διαδικασία εφαρμόζεται στην συνέχεια σε συζευγμένο σύστημα εδάφους-πασσαλοθεμελίωσης-ανωδομής, αξιοποιώντας μια σειρά καλά τεκμηριωμένων πειραμάτων σε φυγόκεντριστη (Wilson, 1998, Boulanger et al. 1999). Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στον φυγόκεντριστή ακτίνας 9m του πανεπιστημίου του Davis, υπό φυγόκεντρο επιτάχυνση 30g. Το πειραματικό προσομοίωμα αποτελείται από μεμονωμένο πάσσαλο θεμελίωσης μονοβάθμιου ταλαντωτή εντός διστρωματικού εδαφικού σχηματισμού (Σχήμα 3). Πιο συγκεκριμένα, το έδαφος χαρακτηρίζεται από ένα επιφανειακό στρώμα πάχους 6m ιδιαίτερα μαλακής και πλαστικής αργίλου ($c_u=8-10\text{KPa}$, $PI=48\%$) υπερκείμενο ενός στρώματος πάχους 11m πυκνής άμμου ($D_r=75-80\%$). Το ύψος της ανωδομής, σε πρωτότυπη κλίμακα, είναι 4m ενώ η ιδιοπερίοδος της υπό συνθήκες πλήρους πάκτωσης μετρήθηκε ίση με 0.29s. Ο πάσσαλος έχει συνολικό μήκος 17m και δυσκαμψία ίση με 417MNm^2 . Στην βάση του εδαφικού προσομοιώματος εφαρμόστηκε μια πραγματική καταγραφή από το σεισμό του Kobe κανονικοποιημένη σε 2 επίπεδα έντασης, 0.05g και 0.20g αντίστοιχα. Η εντοπιότητα της πειραματικής διάταξης περιλαμβάνει έξι μετρητές παραμόρφωσης κατά μήκος του πασσάλου καθώς και επιταχυνσιογράφους τοποθετημένους στο ελεύθερο πεδίο, την κεφαλή του πασσάλου και την ανωδομή. Στο Σχήμα 4 δίνονται οι καταγραφές των ροπών στον πάσσαλο για κάθε επίπεδο έντασης της διέγερσης, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισαγωγής για την εξαγωγή των σεισμικών βρόχων p-y.



Σχήμα 3. Πειραματικό προσομοίωμα σε συσκευή φυγόκεντρο (Boulanger et al. 1999)
Figure 3. Configuration of the centrifuge model (modified after Boulanger et al. 1999)



Σχήμα 4. Καταγραφές ροπών για α) 0.05g και β) 0.20g πλάτος σεισμικής κίνησης
Figure 4. Pile bending moments recordings for a) 0.05g and b) 0.20g amplitude of the input motion

3.1 Υπολογισμός βρόχων p-y και σύγκριση με αναλυτικές καμπύλες

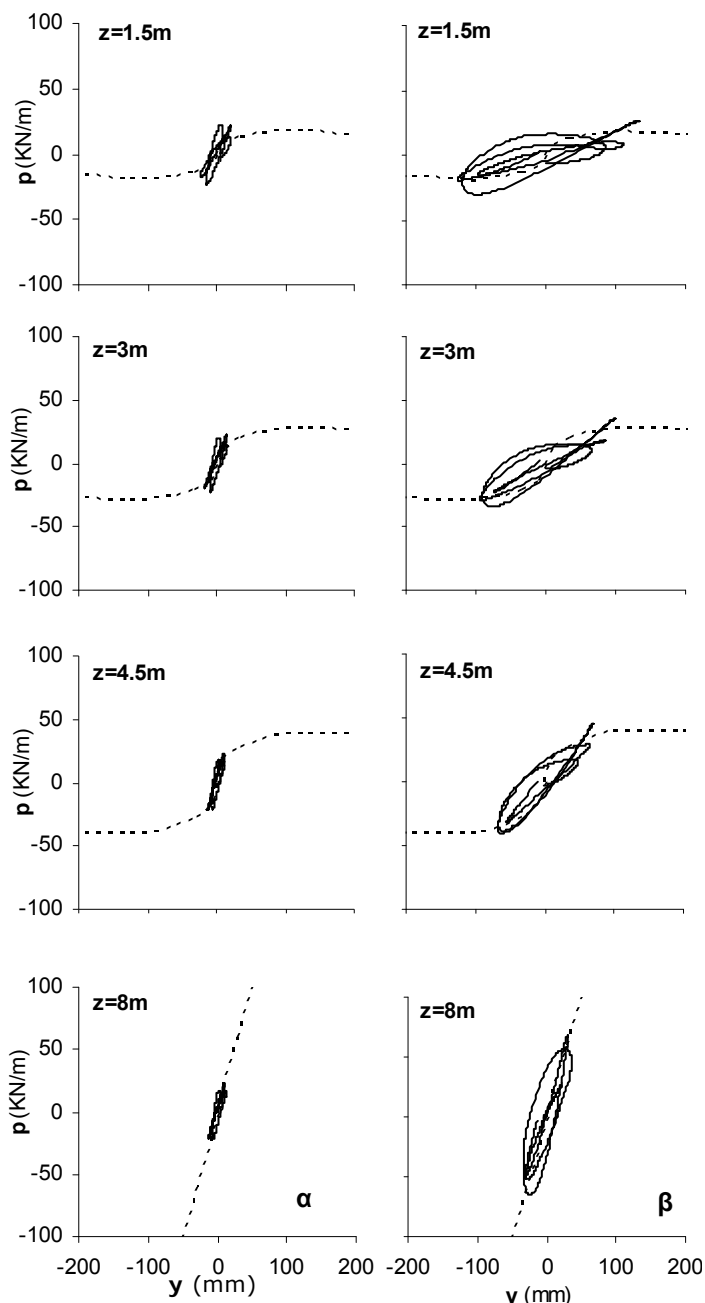
Λόγω της ανομοιόμορφης κατανομής των μετρητών παραμόρφωσης κατά μήκος του πασσάλου (5 εντός του επιφανειακού στρώματος της αργίλου έναντι 1 εντός του στρώματος της άμμου), ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην επιλογή της πολυωνυμικής συνάρτησης για την προσομοίωση της κατανομής των ροπών. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση ευαισθησίας της επιρροής του βαθμού του πολυωνύμου στην απόκριση του πασσάλου (Ροβίθης, 2007) η οποία κατέληξε σε πολυωνυμική συνάρτηση $M(z, t_i)$ 3^{ου} βαθμού:

$$M(z, t_i) = A_{t_i}z^3 + B_{t_i}z^2 + C_{t_i}z + D_{t_i} \quad (6)$$

Οι σταθεροί όροι A_{ti} , B_{ti} , C_{ti} και D_{ti} ορίζονται για κάθε χρονική στιγμή t_i ώστε να προσεγγίζουν τις πειραματικές τιμές ροπής με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Εισάγοντας την συνάρτηση $M(z,t_i)$ στις σχέσεις 2 και 3 προκύπτουν, σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφηκε, οι αντίστοιχες κατανομές της εδαφικής αντίδρασης και της μετακίνησης του πασσάλου και εξάγονται τελικά οι βρόχοι p - y κατά μήκος του πασσάλου. Σημειώνεται ότι οι δυο συνοριακές συνθήκες που απαιτούνται κατά την διπλή ολοκλήρωση των ροπών καθορίστηκαν στην κεφαλή και την αιχμή του πασσάλου, χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνικές επεξεργασίας σήματος (Wilson, 1998) για τον υπολογισμό των μετακινήσεων από τις αντίστοιχες καταγραφές επιτάχυνσης.

Ενδεικτικά αποτελέσματα βρόχων p - y , όπως αυτοί προέκυψαν κατά μήκος του πασσάλου, δίνονται στο Σχήμα 5 και για τα δυο επίπεδα έντασης της σεισμικής κίνησης. Συγκεκριμένα, δίνονται τα αποτελέσματα στην στάθμη των -1.5m , -3m και -4.5m στο τμήμα του πασσάλου που διαπερνάει το επιφανειακό στρώμα της μαλακής αργίλου καθώς και στην στάθμη των 8.2m εντός του στρώματος της πυκνής άμμου. Σημειώνεται ότι οι βρόχοι p - y αντιστοιχούν σε ένα χρονικό παράθυρο των χρονιστοριών εδαφικής αντίδρασης και μετακίνησης το οποίο οριοθετεί την μέγιστη απόκριση. Στο ίδιο σχήμα φαίνονται και οι αναλυτικές καμπύλες p - y υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση που προκύπτουν από την εφαρμογή των διατάξεων του API (1993) για το συγκεκριμένο σύστημα εδάφους-πασσάλου. Παρατηρείται ότι η κλίση των βρόχων p - y αυξάνει με το βάθος, γεγονός το οποίο καταδεικνύει αντίστοιχη αύξηση της εδαφικής δυσκαμψίας, ενώ η επιφάνεια τους μειώνεται, ενδεικτικό χαμηλότερων επιπέδων απόσβεσης κατά την ταλάντωση του πασσάλου. Η απόκριση αυτή θα πρέπει να αποδοθεί στην μείωση των πλευρικών μετακινήσεων του πασσάλου και συνεπώς την περισσότερο γραμμική απόκριση του συστήματος σε μεγαλύτερα βάθη.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η επιρροή του επιπέδου έντασης της σεισμικής κίνησης στην μορφή των βρόχων p - y . Η αύξηση του πλάτους της κίνησης από 0.05g σε 0.20g οδήγησε σε μικρότερη κλίση βρόχων και μεγαλύτερη απόσβεση. Εξετάζοντας τα αποτελέσματα μόνο στο επιφανειακό στρώμα της μαλακής αργίλου, παρατηρείται ότι για 0.20g η απόκριση του εδάφους είναι έντονα μη γραμμική σε αντίθεση με την μικρότερου



Σχήμα 5. Αποτελέσματα βρόχων p - y για (α) 0.05g και (β) 0.20g πλάτος της σεισμικής κίνησης. Σύγκριση με αναλυτικές καμπύλες p - y κατά API (1993) υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση (διακεκομμένες γραμμές)

Figure 5. Seismic p - y loops for (a) 0.05g and (b) 0.20g amplitude of the input motion. Comparison with cyclic p - y curves (dashed lines) according to API (1993)

πλάτους κίνησης η οποία οδήγησε κατά κανόνα σε γραμμική εδαφική συμπεριφορά.

Επίσης παρατηρείται ότι οι αναλυτικές καμπύλες p - y κατά API παρέχουν μια ικανοποιητική εκτίμηση της δυσκαμψίας για γραμμική συμπεριφορά του εδάφους. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά τόσο στο αργιλικό

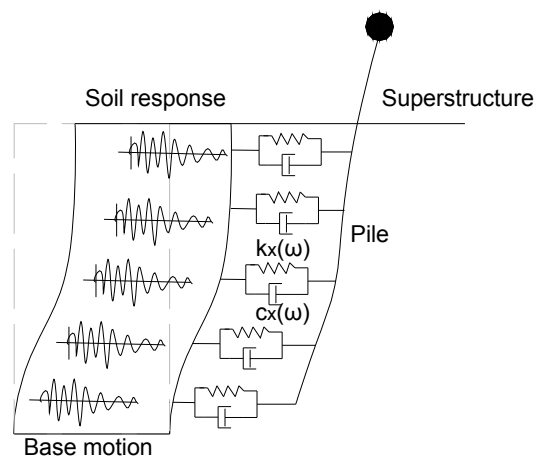
στρώμα όσο και στο στρώμα της άμμου για επίπεδο έντασης 0.05g, όπου η μέση κλίση των βρόχων $p-y$ συμφωνεί με τον αρχικό κλάδο των αναλυτικών καμπυλών $p-y$. Εντούτοις, για μεγαλύτερα επίπεδα έντασης (0.20g), τα αναλυτικά μοντέλα $p-y$ φαίνεται να υπερεκτιμούν την εδαφική δυσκαμψία ειδικά για την περίπτωση της πολύ μαλακής αργίλου. Προφανώς, η χρήση των συγκεκριμένων αναλυτικών μοντέλων αδυνατεί να περιγράψει την μορφή των βρόχων λόγω σεισμικής διέγερσης χωρίς να αποδίδει κατά συνέπεια την συνιστώσα της απόσβεσης.

3.2 Ανάλυση σεισμικής απόκρισης με χρήση αριθμητικού προσομοιώματος Winkler

Τα βασικά χαρακτηριστικά των βρόχων $p-y$ χρησιμοποιούνται στην συνέχεια για τον υπολογισμό των συντελεστών δυσκαμψίας και απόσβεσης (k_x , c_x) κατά μήκος του πασσάλου, στα πλαίσια του 2^{ου} σταδίου της προτεινόμενης διαδικασίας. Τα κατανεμημένα ελατήρια και αποσβεστήρες εισάγονται σε ένα αριθμητικό προσομοίωμα Winkler το οποίο αποτελείται από τον πάσσαλο και την υπερκείμενη ανωδομή (Σχήμα 6). Σημειώνεται ότι τα βάθη υπολογισμού των βρόχων $p-y$ αντιστοιχούν στις θέσεις πειραματικής καταγραφής της σεισμικής κίνησης στο ελεύθερο πεδίο. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την απευθείας εφαρμογή της κίνησης στα άκρα των στοιχείων Kelvin υπό μορφή μετακινήσεων, μετά την διπλή ολοκλήρωση των καταγραφών επιτάχυνσης για κάθε επίπεδο έντασης της σεισμικής κίνησης.

Δεδομένης της συχνотικής εξάρτησης της σύνθετης δυναμικής δυσκαμψίας (Εξίσωση 1) μέσω της επιφάνειας A_D και της κλίσης των βρόχων, απαιτείται η συνεκτίμηση της συχνότητας ω της σεισμικής κίνησης κατά τον υπολογισμό της σταθεράς των ελατηρίων και αποσβεστήρων. Μια προσεγγιστική αλλά ρεαλιστική λύση στο πρόβλημα αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω του υπολογισμού των συντελεστών k_x και c_x στην δεσπόζουσα ιδιοσυχνότητα της κίνησης (Makris et al. 1993). Έτσι, στα πλαίσια καθορισμού μιας μοναδικής τιμής συχνότητας για την περιγραφή του συχνотικού περιεχομένου της σεισμικής κίνησης επιλέχθηκε η συχνότητα f_0 στην οποία το φάσμα Fourier κάθε καταγραφής σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου εμφανίζει το μέγιστο πλάτος του.

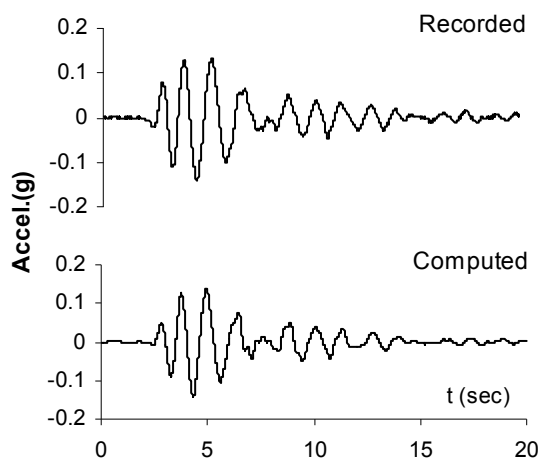
Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο πεδίο του χρόνου με χρήση του γενικού κώδικα



Σχήμα 6. Αριθμητικό προσομοίωμα δοκού επί δυναμικών ελατηρίων και αποσβεστήρων του συστήματος εδάφους-πασσάλου-ανωδομής (Τροποποιημένο από Boulanger et al. 1999)
Figure 6. Beam on Dynamic Winkler Foundation model of the soil-pile-structure system (modified after Boulanger et al. 1999)

πεπερασμένων στοιχείων ANSYS (Ansys, 2000) και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις πειραματικές καταγραφές. Η σύγκριση εντοπίζεται στην απόκριση της κεφαλής του πασσάλου και της ανωδομής καθώς και στις αναπτυσσόμενες ροπές και μετακινήσεις κατά μήκος του πασσάλου.

Ενδεικτικά αποτελέσματα δίνονται στα σχήματα 7, 8 και 9. Συγκρίνοντας τις χρονοϊστορίες επιτάχυνσης στην ανωδομή για την μικρότερου πλάτους (0.05g) σεισμική κίνηση (Σχήμα 7) και τα φάσματα απόκρισης στην κεφαλή του πασσάλου για 0.05g και 0.20g (Σχήμα 8), προκύπτει ότι η αριθμητική προσομοίωση συμφωνεί με τις πειραματικές καταγραφές σε επίπεδο χρονικής εξέλιξης του φαινομένου, αποδίδοντας ορθά το συχνотικό περιεχόμενο της κίνησης. Η αύξηση του πλάτους από 0,05g σε 0.20g μετέφερε την μέγιστη φασματική επιτάχυνση σε μεγαλύτερη ιδιοπερίοδο, ενδεικτικό της αυξημένης πλέον συμβολής της εδαφικής ενδοσιμότητας στα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Η καμπτική επιπόνηση του πασσάλου (Σχήμα 9β) προσομοιώνεται επίσης ορθά τόσο ως προς την κατανομή των ροπών με το βάθος όσο και ως προς την θέση εμφάνισης της μέγιστης ροπής, αποδίδοντας την επιρροή του επιπέδου έντασης της σεισμικής κίνησης. Η αύξηση από 0.05g σε 0.20g οδήγησε πέρα από την αύξηση του μεγέθους των ροπών και σε υποβιβασμό της θέσης εμφάνισης της μέγιστης ροπής. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρά την ύπαρξη της διεπιφάνειας (στα -6m)



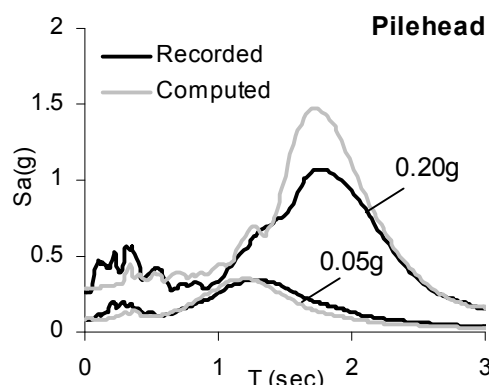
Σχήμα 7. Επιτάχυνση ανωδομής για σεισμική κίνηση πλάτους 0.05g
Figure 7. Superstructure acceleration for 0.05g amplitude of the input motion

έντονης σχετικής δυστησίας μεταξύ της μαλακής αργίλου και της άμμου, η θέση της μέγιστης ροπής προκύπτει κοντά στην κεφαλή του πασσάλου, καταδεικνύοντας την έντονη επιρροή της αδρανειακής ταλάντωσης της ανωδομής (Wilson, 1998, Mylonakis et al. 1997). Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και από τις μέγιστες μετακινήσεις στην κεφαλή του πασσάλου και την ανωδομή (Σχήμα 9α), με την αύξηση του επιπέδου φόρτισης από 0.05g σε 0.20g να προκαλεί σημαντική αύξηση των μετακινήσεων.

Γενικά προκύπτει ότι το αριθμητικό προσομοίωμα αποδίδει επαρκώς την σεισμική απόκριση του εξεταζόμενου συστήματος, παρέχοντας πειραματική επαλήθευση της ορθότητας της προτεινόμενης διαδικασίας για ένα σχετικά ευρύ φάσμα σεισμικών φορτίσεων.

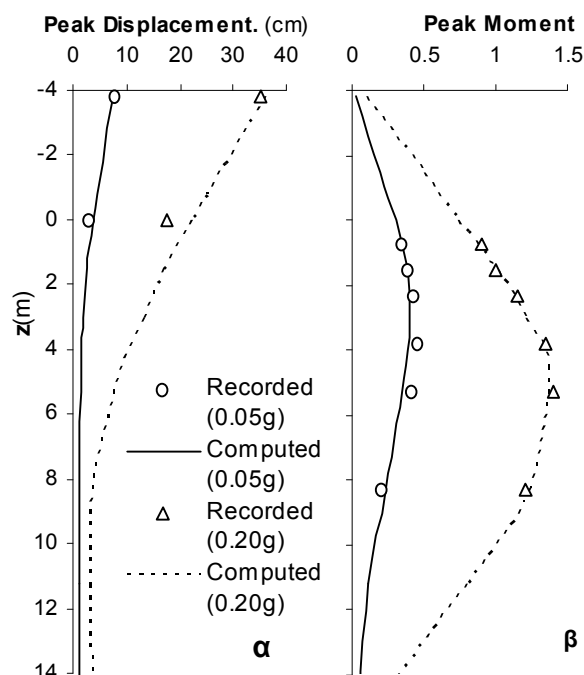
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρουσιάστηκε μια μεθοδολογία υπολογισμού της σεισμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-πασσάλου με βάση πειραματικούς βρόχους p-y. Η μέθοδος καταλήγει σε κατανεμημένα ελατήρια και αποσβεστήρες προσομοίωσης της δυναμικής δυσκαμψίας του εδάφους με άμεση δυνατότητα εφαρμογής στην σεισμική ανάλυση κατασκευών θεμελιωμένων επί πασσάλων. Η ικανοποιητική σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με πειραματικές καταγραφές σεισμικής φόρτισης συστήματος εδάφους-πασσάλου-ανωδομής καταδεικνύει επάρκεια του προτεινόμενου προσομοιώματος Winkler, συνεκτιμώντας τόσο το κινηματικό όσο και το αδρανειακό μέρος του φαινομένου. Στα βασικά συμπεράσματα συγκαταλέγεται ο σημαντικός ρόλος του επιπέδου σεισμικής



Σχήμα 8. Φάσματα απόκρισης στην κεφαλή του πασσάλου

Figure 8. Acceleration response spectra at pilehead



Σχήμα 9. Μέγιστες αναπτυσσόμενες ροπές (α) και μετακινήσεις (β) πασσάλου-ανωδομής

Figure 9. (a) Peak pile bending moments and (b) peak lateral deflections of the pile-structure system

φόρτισης, με την μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους να κυριαρχεί για αυξημένο επίπεδο φόρτισης, οδηγώντας σε βρόχους p-y μεγαλύτερου εμβαδού και σημαντικά μικρότερης κλίσης. Παράλληλα προέκυψε ότι αναλυτικές καμπύλες p-y υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση που έχουν προκύψει για μαλακές αργίλους και συχνά εφαρμόζονται στην πράξη, υπερεκτιμούν την εδαφική δυσκαμψία χωρίς να μπορούν να αποδώσουν την μορφή των βρόχων που περιγράφει την σχέση μεταξύ εδαφικής αντίδρασης και μετακίνησης του πασσάλου υπό σεισμική διέγερση.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Angelides, D.C. and Roesset, J.M. (1981), "Nonlinear lateral dynamic stiffness of piles". Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.107, No GT11.
- ANSYS Inc (2000), "ANSYS User's manual. Version 8.1", SAS IP, Houston, USA
- API, (1993) "Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms", API RP 2A-WSD 20th ed., American Petroleum Institute, Washington DC.
- Badoni, D. and Makris, N. (1996), "Nonlinear response of single piles under lateral inertial and seismic loads". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.15, pp. 29-43.
- Boulanger, R.W., Curras, C.J., Kutter, B.L., Wilson, D.W. and Abghari, A. (1999), "Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 125, pp. 750-759.
- Dobry, R., Vicente, E., O'Rourke, M.J. and Roesset, J.M. (1982), "Horizontal Stiffness and Damping of Single Piles". Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.108, No.GT3, pp. 439-459.
- Georgiadis, M., Anagnostopoulos, C. and Safflekou S. (1992), "Centrifugal testing of laterally loaded piles in sand", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 29, pp. 208-216.
- Kavvas, M. and Gazetas, G. (1993), "Kinematic seismic response and bending of free-head piles in layered soil". Geotechnique, Vol. 43(2), pp. 207-222.
- Matlock, H. (1970), "Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay". In Proceedings of the 2nd Annual Offshore Technology Conference, Vol. 1, pp. 577-594.
- Makris, N., Badoni, D., Delis, E., Gazetas G. (1993), "Prediction of observed bridge response with soil-pile-structure interaction", Journal of Structural Engineering, Vol. 120, pp. 2992-3011.
- Mylonakis, G., Nikolaou, A., and Gazetas, G. (1997), "Soil-Pile-Bridge seismic interaction: Kinematic and Inertial effects. Part I: Soft Soil", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, pp.337-359.
- Novak, M. (1974) "Dynamic stiffness and damping of piles". Canadian Geotechnical Journal, Vol. 11(4), pp. 574-598.
- Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop F.D. (1974), "Analysis of laterally loaded piles in sand". In Proceedings of the 6th Offshore Technology Conference, Houston, Texas, Paper 2080, pp. 473-483.
- Roesset, J.M. (1980), "Stiffness and Damping coefficients of foundations". Special technical publication on dynamic response of pile foundations: Analytical Aspects, ASCE, O'Neill and Dobry (eds)
- Rovithis, E., Kirtas, E. and Pitilakis K. (2009), "Experimental p-y loops for estimating seismic soil-pile interaction". Bulletin of Earthquake Engineering, Vol.7, pp:719-736.
- Syngros K. (2004) "Contributions to the static and seismic analysis of piles and pile supported bridge piers evaluated through case histories", Ph.D. Dissertation, City University of New York.
- Ting, J.M. (1987), "Full-scale cyclic dynamic lateral pile response". Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 113, pp. 30-45.
- Wilson, D.W. (1998), "Soil-pile-superstructure interaction in liquefying sand and soft clay". PhD Thesis, University of California, Davis.
- Ροβίθης, Εμμ. (2007) "Δυναμική ανάλυση συζευγμένων συστημάτων εδάφους-πασσαλοθεμελίωσης-ανωδομής". Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.