

# Σεισμική Απόκριση Κολωνοπασσάλων: Αριθμητική Διερεύνηση

## Seismic Response of Pile-columns: Numerical Investigation

ΔΡΟΣΟΣ, Β.Α.  
ΓΕΡΟΛΥΜΟΣ, Ν.  
ΓΚΑΖΕΤΑΣ, Γ.

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Εργαστήριο Εδαφομηχανικής Ε.Μ.Π.  
Πολιτικός Μηχανικός, Λέκτορας Ε.Μ.Π.  
Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Προκαταρκτικές παραμετρικές μή-γραμμικές αναλύσεις εκτελούνται για την διερεύνηση της επίδρασης της πλαστικοποίησης των πασσάλων στην δυναμική απόκριση της κατασκευής. Οκτώ διαφορετικές διατάξεις κολωνοπασσάλου θεμελιωμένες σε τέσσερα διαφορετικά εδαφικά προφίλ υποβάλλονται σε διάφορους σεισμικούς κραδασμούς. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η αυξημένη ενδοσιμότητα του εδάφους και η δυνατότητα δημιουργίας πλαστικής άρθρωσης στον πάσσαλο είναι πολύ πιθανόν να οδηγήσει σε μικρότερες απαιτήσεις τοπικής πλαστιμότητας και συνεπώς σε οικονομικότερο σχεδιασμό της κατασκευής.

**ABSTRACT:** Preliminary investigation of the influence of pile nonlinearity on the soil-pile-structure response is conducted through parametric non-linear analyses. Eight different structure configurations founded on four different soil materials are excited by seismic strong motions. The analyses results indicate that the increased soil deformability and the potentiality of plastic hinge formation on pile may reduce the local ductility demand and consequently lead to a more economic design of the structure.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά την συνήθη πρακτική η πλάσιμη συμπεριφορά των κατασκευών λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό τους. Παρόλα αυτά οι θεμελιώσεις σχεδιάζονται ακόμα με στόχο να συμπεριφερθούν ελαστικά στον σεισμό, παρά την αναπόφευκτα ανελαστική απόκριση του ίδιου του εδάφους. Η λογική της πλάστιμης συμπεριφοράς της θεμελίωσης αποτελεί μια νέα ιδέα για την σεισμική μηχανική. Ο πιθανός σχηματισμός πλαστικής άρθρωσης στον πάσσαλο δεν συνιστάται από τους αντισεισμικούς κανονισμούς για δύο λόγους: (α) η θέση της πλαστικής άρθρωσης δεν είναι προσβάσιμη μετά τον σεισμό για έλεγχο και επισκευή, και (β) η αστοχία του πασσάλου

πριν αστοχήσει το έδαφος αποτελεί ανεπιθύμητη ψαθυρή συμπεριφορά.

Παρόλα αυτά πλήθος περιστατικών στον σεισμό του Κόμπτε έδειξαν ότι η μεν διαρροή των πασσάλων σε ισχυρές δονήσεις δεν μπορεί να αποφευχθεί (ειδικά όταν διαπερνούν μαλακά εδάφη), ο δε μετασεισμικός έλεγχος της ακεραιότητάς τους αποτελεί δύσκολη αλλά όχι αδύνατη εργασία.

Με σκοπό την διερεύνηση της ευεργετικής ή δυσμενούς επίδρασης της πλαστικοποίησης των πασσάλων στην δυναμική απόκριση μιας κατασκευής εκτελούνται παραμετρικές αναλύσεις προσομοιώνοντας την ανελαστική συμπεριφορά τόσο του εδάφους όσο και του πασσάλου με το βαθμονομημένο καταστατικό προσομοίωμα BWGG [Gerolymos & Gazetas, 2005 ; Δρόσος, 2008 ; Gerolymos et al., 2009].

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η εγκάρσια σεισμική απόκριση γεφυρών στηριζομένων σε κολωνοπασσάλους μελετάται με ένα προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων δοκού επί μη-γραμμικού ελατηριωτού εδάφους (Winkler) το οποίο σχηματικά απεικονίζεται στο Σχήμα 1. Για την προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς τόσο του εδάφους όσο και του πασσάλου χρησιμοποιείται το καταστατικό προσομοίωμα BWGG ενσωματωμένο στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων OpenSees [Manzoni et al., 2005].

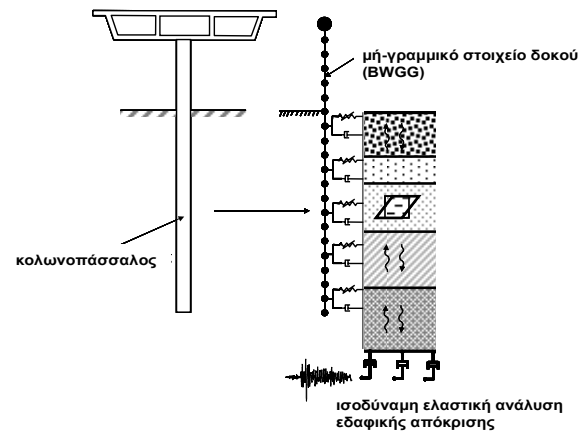
Η διατομή του κολωνοπασσάλου θεωρείται κυκλική με διάμετρο  $d$  για το τμήμα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, και  $b$  για το τμήμα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (Σχ. 2). Το κατάστρωμα της γέφυρας θεωρείται άκαμπτα συνδεδεμένο με τον κολωνοπάσσαλο. Η απόσταση μεταξύ επιφανείας του εδάφους και κέντρου μάζας του καταστρώματος ορίζεται ως ύψος βάρους  $H$ . Αντιστοίχως, ως μήκος πασσάλου  $L$  ορίζεται η απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους έως την βάση του πασσάλου. Στις παραμετρικές αναλύσεις η βάση του πασσάλου θεωρείται δεσμευμένη μόνο ως προς την κατακόρυφη συνιστώσα της μετακίνησης.

Η απόκριση του ελεύθερου πεδίου όπως προκύπτει από μονοδιάστατες δυναμικές αναλύσεις του εδάφους εισάγεται ως διέγερση στα ελεύθερα άκρα των ελατηρίων τα οποία προσομοιώνοντας την διεπιφάνεια εδάφους-πασσάλου μεταβιβάζουν στον πάσσαλο την σεισμική φόρτιση.

Τα φαινόμενα P-Δ (δευτέρας τάξεως) αγνοήθηκαν κατά τις πραγματοποιηθείσες δυναμικές αναλύσεις θεωρώντας πως η μεγάλη εξάρτησή τους από τη γεωμετρία και τη μάζα του συστήματος θα επισκίαζε την επιρροή άλλων παραμέτρων όπως η ενδοσιμότητα του εδάφους και η πλαστιμότητα της κατασκευής.

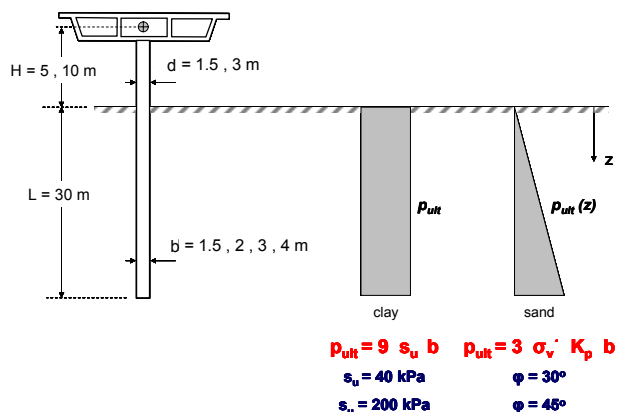
Η διερεύνηση της επιρροής της ενδοσιμότητας του εδάφους “εγγύς πεδίου” στην σεισμική απόκριση του συστήματος εδάφους-πασσάλου-ανωδομής πραγματοποιήθηκε παραμετρικά μέσω τεσσάρων εδαφικών προφίλ (Σχ. 2). Για τον προσδιορισμό της σχέσης αντίστασης εδάφους-μετακίνηση ( $p$ - $y$ ) χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις των Reese et al. (1974) και του Matlock (1970), για την άμμο και την άργιλο, αντιστοίχως. Η επιρροή του εδάφους στο ελεύθερο πεδίο δεν εξετάστηκε

για δύο λόγους: (α) η διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης του ελεύθερου πεδίου δεν εντάσσεται άμεσα στο αντικείμενο της συγκεκριμένης έρευνας, και (β) η αναπόφευκτη διαφορά στις επιβαλλόμενες διεγέρσεις στα ελεύθερα άκρα των ελατηρίων που θα προέκυπτε από τις μονοδιάστατες δυναμικές αναλύσεις των διαφόρων εδαφικών σχηματισμών θα δυσχέρανε την κατανόηση των “εγγύς πεδίου” φαινομένων. Ως εκ τούτου, αποφασίσθηκε η χρήση ενός ιδεατού / γενικευμένου εδαφικού προφίλ για την εκτέλεση των μονοδιάστατων δυναμικών αναλύσεων του εδαφικού σχηματισμού. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα SHAKE [Schnabel et al., 1972]. Εξετάσθηκαν παραμετρικά 3 πραγματικά επιταχυνσιογραφήματα από τον ελληνικό και διεθνή χώρο:



Σχήμα 1. Σκαρίφημα χρησιμοποιηθέντος προσομοιώματος.

Figure 2. Schematic illustration of the model used for the analyses



Σχήμα 2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κατασκευής και εδαφικοί σχηματισμοί εξετασθέντες παραμετρικά

Figure 2. The problem investigated and the two types of presumed soil deposits

- η καταγραφή στον σεισμό του Αιγίου (1995),
- η καταγραφή στον σεισμό της Λευκάδας (2003),
- η καταγραφή JMA στον σεισμό του Kobe (1995).

Οκτώ διαφορετικές διατάξεις κολωνο-πασσάλου αναλύθηκαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής. Το ύψος του βάρου  $H$  θεωρήθηκε παραμετρικά ίσο με 5 και 10 m ενώ το μήκος του πασσάλου  $L$  παρέμενε σταθερό σε κάθε ανάλυση και ίσο με 30 m. Η διάμετρος του κολωνοπασσάλου πήρε τιμές  $d = b = 1.5$  και  $d = b = 3$  m. Με στόχο να καταγραφεί η επίδραση της θέσης της πλαστικής άρθρωσης στην δυναμική απόκριση του συστήματος μελετήθηκαν δύο ακόμη περιπτώσεις όπου η διάμετρος του πασσάλου  $b$  πήρε τιμές 2 και 4 m, για διάμετρο βάρου  $d = 1.5$  και 3 m, αντίστοιχα. Εφεξής, για λόγους οικονομίας του λόγου, θα αναφερόμαστε μόνο στην διάμετρο του πασσάλου θεωρώντας ότι για τιμές  $b = 1.5, 2.0, 3.0,$  και  $4.0$  m η διάμετρος του βάρου λαμβάνει τιμές  $d = 1.5, 1.5, 3.0,$  και  $3.0$  m, αντίστοιχα. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κατασκευών που αναλύθηκαν συνοψίζονται στο Σχήμα 2 και στον Πίνακα 1. Για κάθε ένα από τα αναλυθέντα δομητικά συστήματα η μάζα του καταστρώματος υπολογίστηκε έτσι ώστε η πρώτη ιδιοπερίοδος του πακτωμένου στην βάση-του βάρου να είναι ίση με 0.3 sec.

Πίνακας 1. Τιμές των παραμέτρων που εξετάστηκαν

Table 1. Values of investigated parameters

διάμετρος πασσάλου	διάμετρος βάρου	ύψος βάρου	Συστοιχία εδάφους	σεισμική διέγερση
b (m)	d (m)	H (m)		
1.5	1.5	5.0	χαλαρή άμμος ( $\varphi = 30^\circ$ )	Αίγιο (1995)
2.0	3.0	10.0	πυκνή άμμος ( $\varphi = 45^\circ$ )	Λευκάδα (2003)
3.0			μαλακή άργιλος ( $s_u = 40$ kPa)	Kobe JMA (1995)
4.0			σπιφρή άργιλος ( $s_u = 200$ kPa)	

Η μή-γραμμική συμπεριφορά των κολωνοπασσάλων ορίστηκε μέσω προ-διαγεγραμμένων σχέσεων ροπής-καμπυλό-

τητας. Η ροπή αντοχής υπολογίστηκε συμβατικά στο επίπεδο του εδάφους θεωρώντας ότι στη μάζα του καταστρώματος επιβάλλεται μια επιτάχυνση διαρροής  $a_y = 0.2 g$ .

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Στα Σχήματα 3 και 4 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα των ανελαστικών δυναμικών αναλύσεων υπό την μορφή κατανομών μεγίστων ροπών, καμπυλοτήτων, και μετατοπίσεων. Παρατηρούνται τα εξής:

- Αυξημένη ενδοσιμότητα του εδάφους προκαλεί αύξηση του ενεργού μήκους του πασσάλου, ως αναμένεται.
- Αύξηση της διατομής του κολωνοπασσάλου κάτω από την επιφάνεια του εδάφους οδηγεί το σημείο μέγιστης ροπής σε μεγαλύτερο βάθος. Δεν συμβαίνει το ίδιο όμως και με το σημείο μέγιστης καμπυλότητας (πλαστική άρθρωση).
- Αυξημένη ενδοσιμότητα του εδάφους προκαλεί μείωση της μέγιστης αναπτυσσόμενης καμπυλότητας και συνεπώς δημιουργεί μικρότερη απαίτηση πλαστιμότητας.
- Δυνατότητα σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης στον πάσσαλο (με  $d = b$ ) οδηγεί σε σημαντική μείωση της μέγιστης αναπτυσσόμενης καμπυλότητας και συνεπώς σε μικρότερη απαίτηση πλαστιμότητας.

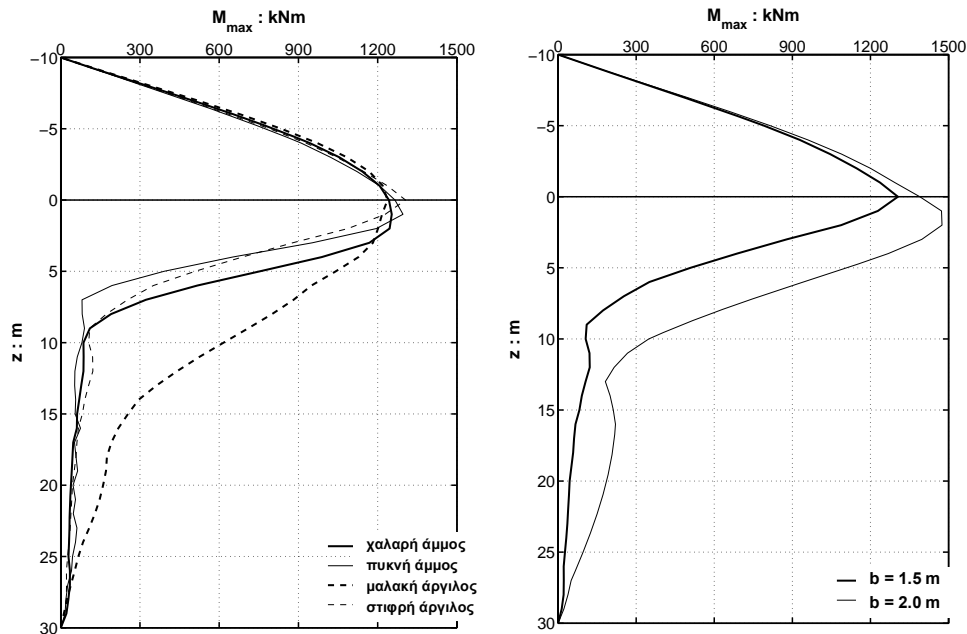
### 4. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ

Εκτός από τα πρωτογενή μεγέθη όπως είναι οι μετακινήσεις, οι επιταχύνσεις, οι ροπές, κ.α. τα οποία περιγράφουν την απόκριση μιας κατασκευής σε μια σεισμική διέγερση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια συνοπτικότερη περιγραφή της συμπεριφοράς οι γνωστοί δείκτες πλαστιμότητας  $\mu_\varphi = \varphi / \varphi_y$  (σε όρους καμπυλοτήτων) και  $\mu_\delta = u / u_y$  (σε όρους μετακινήσεων), καθώς και ο λόγος οριζόντιας σχετικής μετακίνησης ανωδομής  $\gamma = u / H$ .

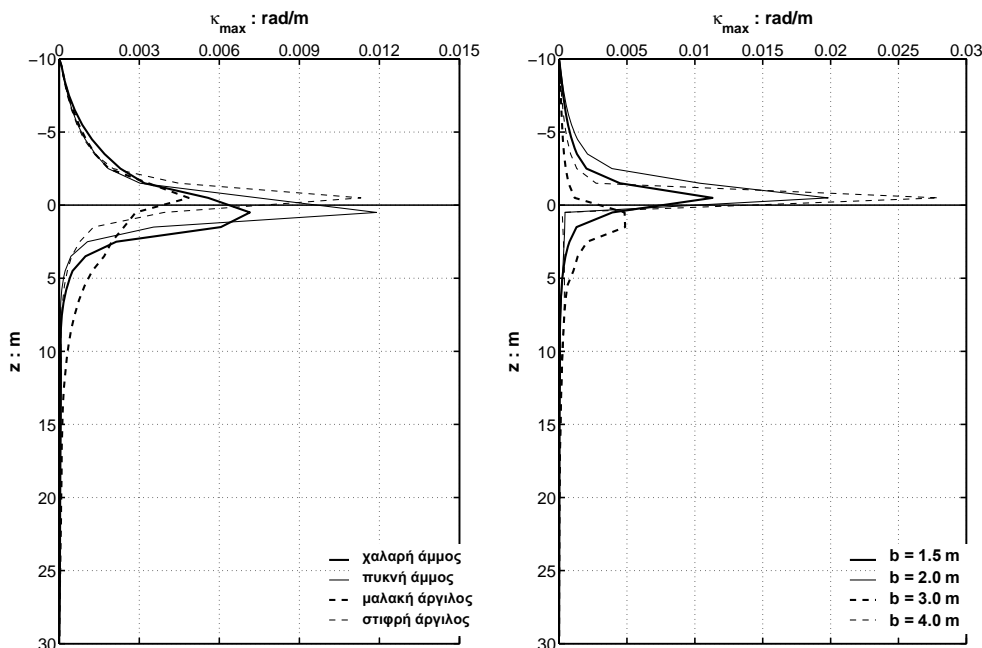
Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η συσχέτιση του δείκτη τοπικής πλαστιμότητας  $\mu_\varphi$  με τον δείκτη ολικής πλαστιμότητας  $\mu_\delta$  ως συνάρτηση του τύπου του εδάφους θεμελιώσεως. Τα αποτελέσματα αυτά εκ πρώτης όψεως φαίνεται να προκρίνουν την θεμελίωση σε σκληρά εδάφη ως ευνοϊκότερη αφού για δεδομένη επιβαλλόμενη από τον σεισμό πλαστιμότητα σε όρους μετακινήσεων η απαίτηση σε τοπική

πλαστιμότητα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη για μαλακά εδάφη θεμελίωσης. Η εικόνα αυτή ενδέχεται να είναι παραπλανητική όπως διευκρινίζεται παρακάτω. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η συσχέτιση του δείκτη τοπικής πλαστιμότητας  $\mu_{\phi}$  με τον δείκτη ολικής

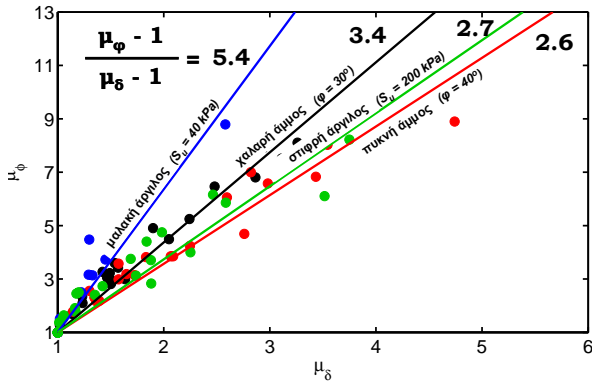
πλαστιμότητας  $\mu_{\delta}$  ως συνάρτηση της θέσης πιθανής πλαστικής άρθρωσης. Τα αποτελέσματα φαίνεται να αποθαρρύνουν τον ανελαστικό σχεδιασμό του πασσάλου, όμως και σε αυτήν την περίπτωση η εικόνα δεν είναι ακριβής.



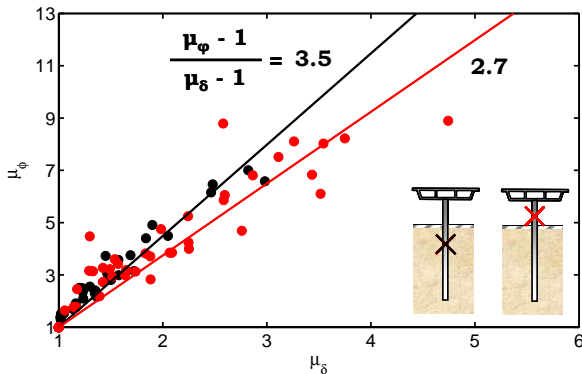
Σχήμα 3. Κατανομές μεγίστων καπτικών ροπών ως συνάρτηση του εδάφους θεμελίωσης και της διαμέτρου του πασσάλου  
 Figure 3. Maximum bending moment distributions as a function of foundation soil type and pile diameter



Σχήμα 4. Κατανομές μεγίστων καμπυλότητας ως συνάρτηση του εδάφους θεμελίωσης και της διαμέτρου του πασσάλου  
 Figure 4. Maximum curvature distributions as a function of foundation soil type and pile diameter



Σχήμα 5. Σχέση  $\mu_\phi$  -  $\mu_\delta$  ως συνάρτηση του εδάφους θεμελίωσης  
 Figure 5. Correlation of local and global ductility demand for different soil types

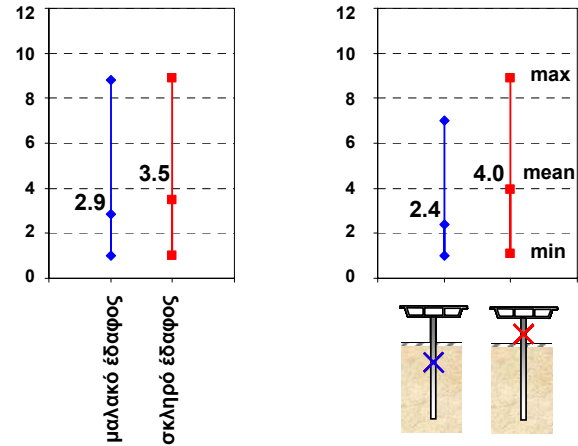


Σχήμα 6. Σχέση  $\mu_\phi$  -  $\mu_\delta$  ως συνάρτηση της θέσης πλαστικής άρθρωσης  
 Figure 6. Correlation of local and global ductility demand for different plastic hinge locations

Η εικόνα αποσαφηνίζεται στα επόμενα σχήματα (Σχ. 7 και 8) όπου απεικονίζονται οι μέσες και οι ακραίες τιμές των δεικτών συμπεριφοράς  $\mu_\phi$ , και  $\mu_\delta$  για διάφορες εξετασθείσες παραμέτρους. Παρατηρούμε ότι *καί* οι μέσες *καί* οι μέγιστες τιμές των δεικτών  $\mu_\phi$  και  $\mu_\delta$  είναι μικρότερες στις περιπτώσεις μαλακού εδάφους και πλαστικοποιημένου πασσάλου. Το γεγονός αυτό αναιρεί την εικόνα των Σχημάτων 5 και 6 και αποκαλύπτει την ενδεχόμενη ευμενή επίδραση της ενδοσιμότητας του εδάφους και της πλαστικοποίησης του πασσάλου στην δυναμική απόκριση του συστήματος. Συμπερασματικά σημειώνεται ότι:

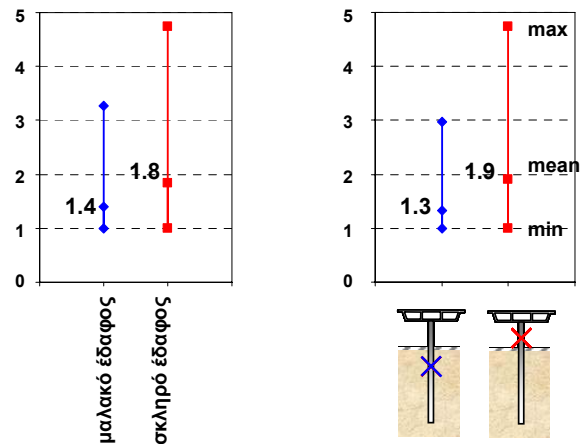
- Για δεδομένον σεισμό, η απαίτηση σε ολική πλαστιμότητα  $\mu_\delta$  μειώνεται όσο αυξάνεται η ενδοσιμότητα του εδάφους. Έτσι, ενώ η σχέση  $\mu_\phi / \mu_\delta$  έχει αυξημένη τιμή για ένα μαλακό έδαφος θεμελίωσης, η μικρότερη απαίτηση σε πλαστιμότητα μετακινήσεων,

$\mu_\delta$ , ενδέχεται να περιορίσει και την απαίτηση σε τοπική πλαστιμότητα  $\mu_\phi$ , σε επίπεδα μικρότερα από τα αντίστοιχα ενός σκληρότερου εδάφους.



Σχήμα 7. Μέσες και ακραίες τιμές πλαστιμότητας καμπυλοτήτων ( $\mu_\phi$ ) ως συνάρτηση του εδάφους θεμελίωσης και της θέσης πλαστικής άρθρωσης

Figure 7. Variation of local curvature ductility ( $\mu_\phi$ ) demand for different soil types and plastic hinge locations



Σχήμα 8. Μέσες και ακραίες τιμές πλαστιμότητας μετακινήσεων ( $\mu_\delta$ ) ως συνάρτηση του εδάφους θεμελίωσης και της θέσης πλαστικής άρθρωσης

Figure 8. Variation of global curvature ductility ( $\mu_\delta$ ) demand for different soil types and plastic hinge locations

Το ίδιο ισχύει και για την θέση δημιουργίας πλαστικής άρθρωσης:

- Η δυνατότητα δημιουργίας της άρθρωσης στον πάσσαλο (κάτω από την επιφάνεια του εδάφους) μειώνει την απαίτηση ολικής

πλαστιμότητας  $\mu_\delta$ , με συνεπακόλουθη ενδεχόμενη μείωση της απαίτησης σε τοπική πλαστιμότητα  $\mu_\phi$ .

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε (α) η αξιοποίηση ενός νέου φαινομενολογικού καταστατικού προσομοιώματος για την προσομοίωση της μή-γραμμικής σεισμικής απόκρισης συστημάτων εδάφους-πασσάλου-ανωδομής και (β) η διερεύνηση της επιρροής της πλαστικοποίησης του πασσάλου στην απόκριση της κατασκευής. Το σημαντικότερο συμπέρασμα που προκύπτει από αυτήν την προσπάθεια συνοψίζεται στο ακόλουθο σημείο:

Η αυξημένη ενδοσιμότητα του εδάφους και η δυνατότητα δημιουργίας πλαστικής άρθρωσης στον πάσσαλο (κάτω από την επιφάνεια του εδάφους) είναι πολύ πιθανόν να οδηγήσει σε μικρότερες απαιτήσεις τοπικής πλαστιμότητας και συνεπώς σε οικονομικότερο σχεδιασμό. Ως εκ τούτου, η δυνατότητα πλαστικοποίησης στοιχείων της θεμελίωσης δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται αφοριστικά.

## 6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί μέρος του ερευνητικού προγράμματος "DARE" ("Soil-Foundation-Structure Systems Beyond Conventional Seismic Failure Thresholds : Application to New or Existing Structures and Monuments"), το οποίο χρηματοδοτείται από την ΕΕ μέσω του 7<sup>ου</sup> Πλαισίου Στήριξης και του προγράμματος "Ideas", Support for Frontier Research — Advanced Grant, και με αριθμό σύμβασης ERC-2008-AdG 228254-DARE.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Δρόσος, Β.Α. (2008) *Ανελαστική Δυναμική Απόκριση Εδάφους και Αλληλεπίδραση Εδάφους – Κατασκευής*, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Gerolymos N., Gazetas G. (2005). "Phenomenological model applied to inelastic response of soil-pile interaction systems", *Soils and Foundations*, Vol 45(4): 119-132.

Gerolymos N., Drosos V., Gazetas G. (2009). "Seismic response of single-column bent on pile: evidence of beneficial role of pile and soil inelasticity", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 7, No.2, pp. 547–573.

Manzoni, S., McKenna, F., and Fenves, G.L. (2005). *OpenSees command language manual*, The Regents of the University of California, 375 p.

Matlock, H. (1970). "Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay", *Proc., 2nd Annual Offshore Technology Conference*, Houston, Texas. 577-594.

Reese, L.C., Cox, W.R., and Koop, F.D. (1974). "Analysis of laterally loaded piles in sand", *Proc., 6th Annual Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, 473–485

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.