

# Αριθμητική Προσομοίωση Πασσάλου-Ρευστοποιηθέντος Εδάφους με βάση Πείραμα σε Φυγοκεντριστή

## Numerical Simulation of Pile Response due to Liquefaction based on Centrifuge Experiment

ΤΑΣΙΟΠΟΥΛΟΥ, Π. Πολιτικός Μηχανικός, Υπ. Διδάκτωρ, Ε.Μ.Π.  
ΓΕΡΟΥΛΥΜΟΣ, Ν. Πολιτικός Μηχανικός, Λέκτορας, Ε.Μ.Π.  
ΓΚΑΖΕΤΑΣ, Γ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η κινηματική αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους υπό συνθήκες εδαφικής ρευστοποίησης αποτελεί ένα από τα πιο σύνθετα και ιδιαίτεως επιβλαβή φαινόμενα. Στο άρθρο ετούτο επιχειρείται η αριθμητική εν-χρόνων αναπαραγωγή του περίπλοκου αυτού μηχανισμού σε δύο διαστάσεις, με χρήση κατάλληλων ελατηρίων, με βάση πείραμα σε φυγοκεντριστή (Abdoun et al. 2003).

**ABSTRACT:** The kinematic soil-pile interaction under conditions of soil liquefaction consists one of the most complex and particularly damaging phenomena. This paper presents the dynamic numerical simulation of the abovementioned mechanism in two dimensions, using appropriate springs, based on a centrifuge experiment (Abdoun et al. 2003).

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΦΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Η επίδραση της ρευστοποίησης σε βαθιές θεμελιώσεις όπως οι πάσσαλοι ενδέχεται να είναι ιδιαίτεως επιβλαβής, όπως έχουν αποδείξει ισχυρά σεισμικά περιστατικά στο παρελθόν. Οι μεγάλες παραμένουσες εδαφικές μετακινήσεις σε συνδυασμό με την απώλεια αντοχής του εδάφους λόγω ανάπτυξης σημαντικών υδατικών υπερπλίσεων κατά τη διάρκεια του σεισμού αποτελούν κύρια πηγή εντατικής καταπόνησης των πασσάλων. Στην ουσία πρόκειται για ένα περίπλοκο τρισδιάστατο μηχανισμό κινηματικής αλληλεπίδρασης που περιλαμβάνει μόνιμες μεγάλες παραμορφώσεις τόσο στο έδαφος όσο και στον πάσσαλο.

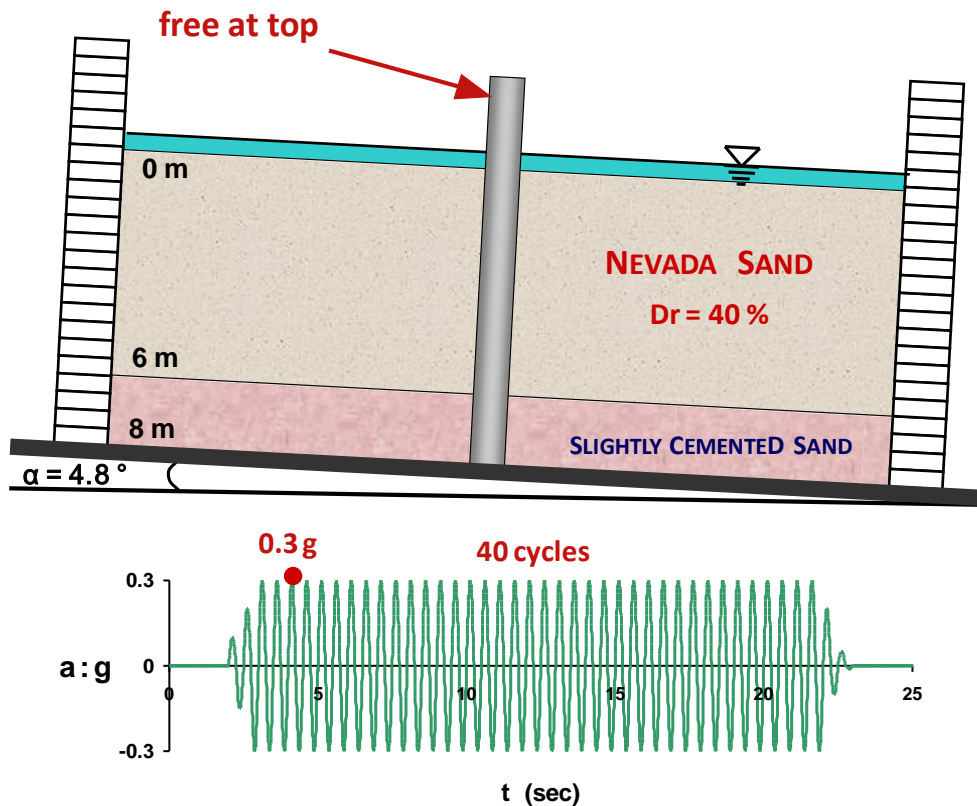
Η περαιτέρω εξέταση και αναπαραγωγή του προαναφερόμενου μηχανισμού τόσο σε πειραματικό όσο και σε αριθμητικό επίπεδο είναι σημαντική για τον σχεδιασμό των πασσάλων σε ρευστοίσιμα εδάφη. Οι Abdoun et al. (2003) είχαν εκτελέσει μια σειρά πειραμάτων στο φυγοκεντριστή του RPI

(Rensselaer Polytechnic Institute) με στόχο να μελετήσουν την απόκριση πασσάλου υπό καθεστώς εδαφικής "εξάπλωσης" λόγω ρευστοποιήσεως. Οι ερευνητές κατέγραψαν μίαν ιδιαίτεως ενδιαφέρουσα συμπεριφορά: η καμπτική ροπή και η οριζόντια μετατόπιση του πασσάλου λαμβάνουν την μέγιστη τιμή τους κατά την διάρκεια της διέγερσης, μετά δε οι τιμές τους μειώνονται σταδιακά προς μία παραμένουσα εκάστη τιμή. Στο άρθρο αυτο παρουσιάζεται η αριθμητική διδιάστατη προσομοίωση αυτού του σύνθετου μηχανισμού βασισμένη στο προσομοίωμα No. 3 της σειράς πειραμάτων Abdoun et al. (2003), σε πρωτότυπη (φυσική δηλαδή) κλίμακα.

Το προσομοίωμα No. 3 συνίσταται από δύο εδαφικά στρώματα: 6m χαλαρής ρευστοποιήσιμης άμμου με σχετική πυκνότητα 40% υπερκείμενο ενός μή ρευστοποιήσιμου στρώματος ελαφρώς τσιμεντωνέμης άμμου (Σχήμα 1). Το εδαφικό αυτο προφίλ τοποθετείται σε πολυστρωματικό διατμητικό κιβώτιο (lamina box) το οποίο έχει κλίση 4.8°. Ο (πρωτότυπος) πάσσαλος έχει διάμετρο 0.6m, μήκος 8m και καμπτική δυσκαμψία,  $EI =$

8000 kNm<sup>2</sup>, είναι δε ελεύθερος να περιστραφεί στην κεφαλή. Η επιβαλλόμενη διέγερση στη βάση χαρακτηρίζεται από 40 κύκλους

επιτάχυνσης ομοιόμορφου πλάτους ίσου με 0.3g και συχνότητας 2Hz.



Σχήμα 1: Σκαρίφημα του προσομοιώματος Νο.3 της σειράς πειραμάτων όταν είχαν εκτελεσθεί στο φυγοκεντριστή του Rensselaer Polytechnic Institute - RPI (Abdoun et al. 2003) σε κλίμακα πρωτοτύπου. Η επιβαλλόμενη διέγερση στη βάση του μοντέλου συνίσταται από 40 κύκλους επιτάχυνσης 0.3g.

Figure 1: Sketch of Model No.3 of the series of the centrifuge experiments conducted at the Rensselaer Polytechnic Institute - RPI facilities (Abdoun et al. 2003) in prototype scale. The input motion applied to the base of the model consists of 40 cycles of acceleration equal to 0.3g.

## 2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΣ

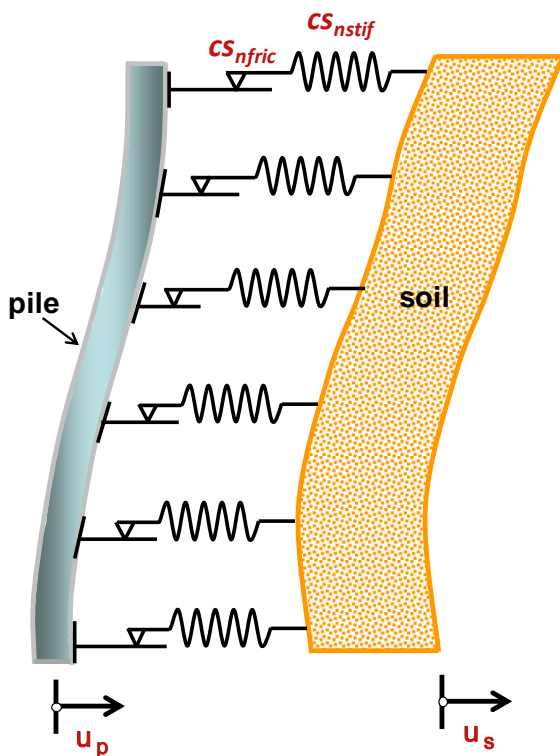
Το προαναφερθέν πείραμα σε φυγοκεντριστή προσομοιώνεται αριθμητικά με χρήση του κώδικα πεπερασμένων διαφορών FLAC σε δύο διαστάσεις υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης. Ο κώδικας αυτός επιτρέπει την μη γραμμική εν χρόνω ανάλυση σε όρους ενεργών τάσεων και υδατικών υπερπιέσεων. Η επίλυση των εξισώσεων δυναμικής ισορροπίας γίνεται με εν-χρόνω αριθμητική ολοκλήρωση. Ο δε μη-γραμμικός υστερητικός χαρακτήρας της συμπεριφοράς του εδαφικού στοιχείου σε ανακυκλική φόρτιση, περιγράφεται από την θεωρία της πλαστικότητας.

Το FLAC διαθέτει ένα κατάλληλο καταστατικό προσομοίωμα για την ανάπτυξη και αποτόνωση των υδατικών υπερπιέσεων το οποίο έχει ενσωματωθεί στο τυπικό για αμμούς κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (με παραμέτρους την συνοχή  $c$ , και την γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$ ). Η επαύξηση της σεισμικής ογκομετρικής παραμόρφωσης  $\Delta \epsilon_{vd}$ , η οποία είναι ευθέως ανάλογη της υδατικής υπερπίεσης, εκφράζεται συναρτήσει των τρεχουσών τιμών της ογκομετρικής  $\epsilon_{vd}$  και αποκλίνουσας παραμόρφωσης  $\gamma_d$  (Byrne, 1991).

Αξίζει να επισημανθεί ότι ενώ προκειται για έναν απλοποιημένο καταστατικό νόμο τάσεων-παραμόρφωσης που οδηγεί σε ελαστικούς-

ιδεωδώς πλαστικούς βρόχους, είναι σε θέση να αναπαράγει ικανοποιητικά τους βασικούς μηχανισμούς σε προβλήματα μεγάλων παραμορφώσεων, όπως εδαφική ροή χαλαρής άμμου μετά την ρευστοποίηση.

Το τρισδιάστατο τώρα φαινόμενο της αλληλεπίδρασης πασσάλου-εδάφους μπορεί να προσομοιωθεί στα μέσω συζευγμένων μή γραμμικών ελατηρίων που συνδέουν τον πάσσαλο με το περιβάλλον έδαφος, όπως αναπαρίσταται στο Σχήμα 2. Τα ελατήρια αυτά αντιπροσωπεύουν την τοπική αλληλεπίδραση των στοιχείων του πασσάλου με τα στοιχεία του γειτονικού εδάφους. Η συμπεριφορά τους είναι ελαστική-ιδεωδώς πλαστική και χαρακτηρίζεται από δύο παραμέτρους προς βαθμονόμηση: i) την σταθερά του ελατηρίου,  $CS_{nstif}$ , για την ελαστική περιοχή και ii) μία γωνία τριβής,  $CS_{nfric}$ , για την πλαστική περιοχή. Ο πάσσαλος προσομοιώνεται με ειδικά στοιχεία δοκού που συμπεριφέρονται γραμμικώς ελαστικά.



Σχήμα 2: Ελαστικά-ιδεωδώς πλαστικά ελατήρια που συνδέουν τον πάσσαλο με το περιβάλλον έδαφος.

Figure 2: Elastic-perfectly plastic springs connecting the pile with the surrounding soil.

Η εντατική καταπόνηση των πασσάλων κατά τη διάρκεια σεισμού οφείλεται σε δύο

βασικούς μηχανισμούς: α) την κινηματική αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους που λαμβάνει χώρα πριν την ανάπτυξη σημαντικών υδατικών υπερπιέσεων και β) τη εδαφική ροή του εδάφους γύρω από τον πάσσαλο μετά την ρευστοποίηση.

Συμφωνά με τα παραπάνω, η βαθμονόμηση της δυσκαμψίας των ελατηρίων επιτυγχάνεται με το βέλτιστο συνταίριασμα της κινηματικής απόκρισης του πασσάλου σε όρους καμπτικής ροπής στις δύο διαστάσεις, με την αντίστοιχη στις τρεις διαστάσεις. Η ροή δε του ρευστοποιημένου εδάφους γύρω από τους πασσάλους ελέγχεται από την μέγιστη αντίδραση των εν-λόγω ελατηρίων. Έτσι, η τριδιάστατη φύση της αλληλεπίδρασης πασσάλου-εδάφους προσεγγίζεται ικανοποιητικά στα πλαίσια της επίπεδης παραμόρφωσης.

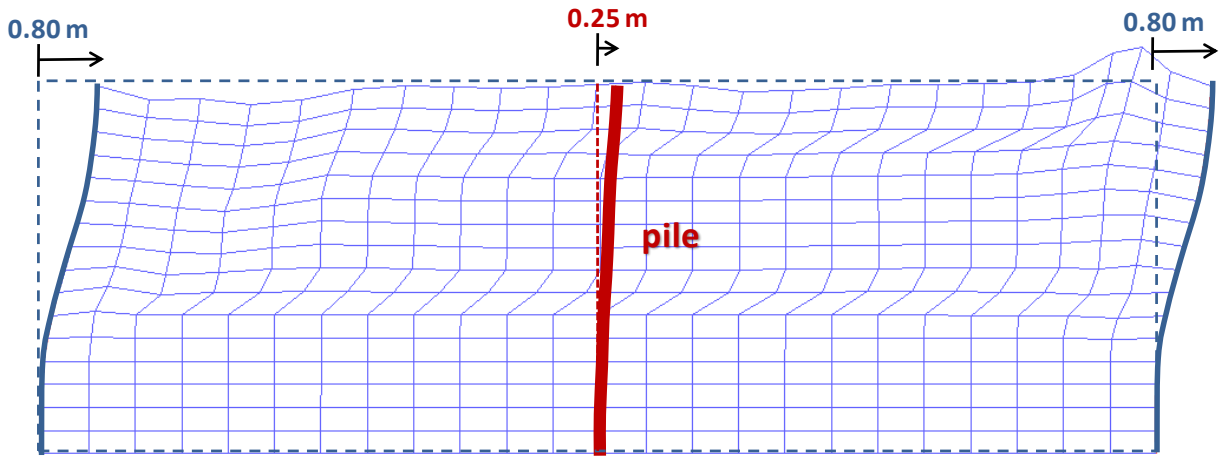
Το πείραμα του φυγοκεντριστή προσομοιώνεται αριθμητικά σε κλίμακα πρωτοτύπου. Ο κάρναβος της διακριτοποίησης έχει στοιχεία μήκους 1m και ύψους 0.5m (Σχήμα 3) Οι κόμβοι των πλευρικών συνόρων είναι συνδεδεμένοι ώστε να αναπτύσσουν την ίδια οριζόντια μετακίνηση αναπαράγοντας τους αντιστοιχούς κινηματικούς περιορισμούς των συνόρων του πολυστρωματικού διατμητικού κιβωτίου. Η διέγερση επιβάλλεται στη βάση του συστήματος.

Συνοπτικά, η μέθοδος ανάλυσης που ακολουθήθηκε αναπαράγει:

- την ανάπτυξη υδατικών υπερπιέσεων,
- την ρευστοποίηση του εδάφους και κατ' επέκταση την ανάπτυξη μεγάλων παραμορφώσεων
- την υδατική ροή και την συνεπαγόμενη ανακατανομή και αποτόνωση των υδατικών υπερπιέσεων
- την αναπτυσσόμενη ένταση των πασσάλων και
- την τρισδιάστατη αλληλεπίδραση πασσάλου-εδάφους (έστω και προσεγγιστικά).

### 3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

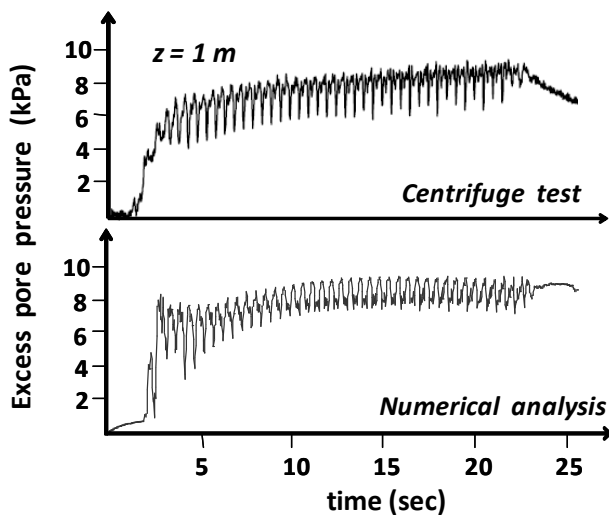
Η σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων αναπαρίσταται στα σχήματα 4 - 7 και υποδεικνύει πως η αριθμητική ανάλυση αναπαράγει ικανοποιητικά τους μηχανισμούς που αναπτύσσονται στην διάρκεια του πειράματος. Ειδικότερα, το



Σχήμα 3: Παραμορφωμένος κάναβος του αριθμητικού προσομοιώματος συμπεριλαμβανομένου του πασσάλου στο τέλος της διέγερσης.

Figure 3: The deformed grid of the numerical model including the pile, after the end of shaking.

ανώτερο αμώδες στρώμα αναπτύσσει σημαντικές υδατικές υπερπίεσεις από τους πρώτους κύκλους της διέγερσης (Σχήμα 4), οδηγώντας το έδαφος σε μονοτονικώς συσσωρευόμενες πλευρικές μετακινήσεις προς τα κατόντη - έως και 0.8 m στην επιφάνεια όπως προκύπτει στα σύνορα του μοντέλου (Σχήματα 5 και 7).



Σχήμα 4: Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών χρονιοιστοριών της υδατικής υπερπίεσης πόρων σε βάθος 1m από την επιφάνεια του εδάφους.

Figure 4: Comparison between the experimental and numerical time histories of excess pore pressure at the depth of 1m below the ground surface.

Η μέγιστη καμπτική ροπή του πασσάλου παρατηρείται για κάθε χρονική στιγμή κοντά στη διεπιφάνεια των στρωμάτων της ρευστοποιημένης χαλαρής άμμου και της (μή ρευστοποιήσιμης) ελαφρώς τσιμεντωμένης άμμου, σε βάθος 5.75 m. Επιπλέον, η χρονοϊστορία της καμπτικής ροπής του πασσάλου στο βάθος αυτό δείχνει μια σταδιακή αύξηση της ροπής έως τα 7 sec περίπου, οπότε και λαμβάνει την μέγιστη τιμή της (110 kNm). Μετέπειτα παρατηρείται μια σταδιακή μείωση της ροπής παρά την συνεχιζόμενη διέγερση και την αύξηση των εδαφικών μετακινήσεων. Την ίδια τάση φανερώνει και η χρονοϊστορία των οριζόντιων μετακινήσεων στην κεφαλή του πασσάλου (Σχήματα 6 και 7).

Ο μηχανισμός που προκάλεσε την ανωτέρω συμπεριφορά ερμηνεύτηκε από τους Abdoun et al. (2003). Έως τα 7 sec, το περιβάλλον έδαφος πιέζει τον πάσσαλο να κινηθεί μαζί του προς τα κατόντη, πράγμα που οδηγεί στη σταδιακή αύξηση των μετακινήσεων και της καμπτικής ροπής στον πάσσαλο. Στα 7 sec το ρευστοποιημένο έδαφος φτάνει την μέγιστη αντοχή του τοπικά και μετέπειτα αρχίζει να ρέει γύρω από τον πάσσαλο, προκαλώντας ένα είδος αποφόρτισης, που υποδηλώνεται ως μερική επαναφορά του πασσάλου και μείωση της ροπής του.

Ο μηχανισμός αυτός αναπαρήχθη με την αριθμητική ανάλυση με κατάλληλη βαθμονόμηση των ελατηρίων που συνδέουν

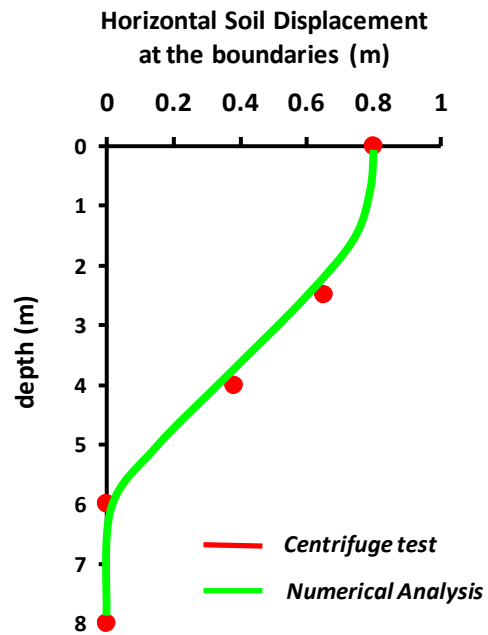
τον πάσσαλο με το έδαφος. Αρχικά, όσο οι σχετικές μετακινήσεις του συστήματος πασσάλου-εδάφους διατηρούν μικρές τιμές, το κινηματικό φορτίο στον πάσσαλο αυξάνεται αναλογικά με την σταθερά του ελατηρίου, έως μία μέγιστη τιμή περί τα 7 sec, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{F_n^{max}}{L} = CS_{nstif}(u_p - u_s) = \sigma'_c \tan(CS_{nfric}) \pi d \quad (1)$$

όπου  $F_n^{max}$  είναι η μέγιστη δύναμη που ασκείται στον πάσσαλο,  $L$  το μήκος του πασσάλου,  $u_p$  η οριζόντια μετακίνηση του πασσάλου,  $u_s$  η οριζόντια μετακίνηση του εδάφους,  $\sigma'_c$  η μέση ενεργός τάση,  $d$  η διάμετρος του πασσάλου.

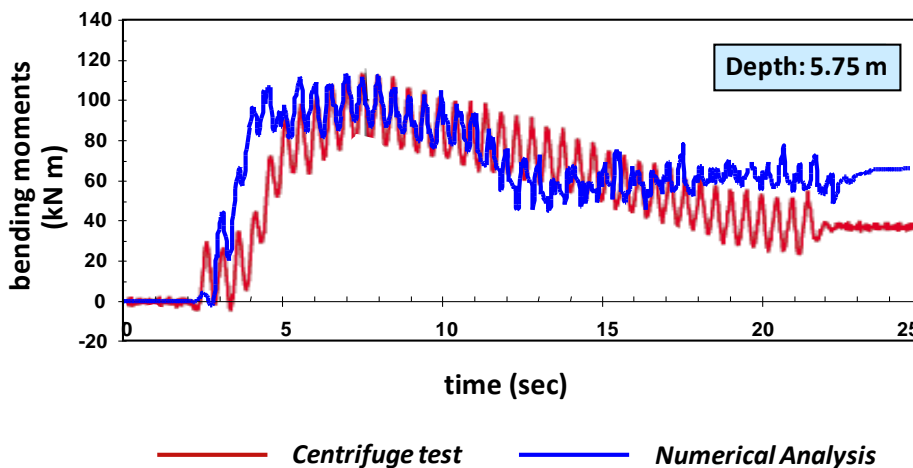
Τη στιγμή αυτή το ρευστοποιηθέν έδαφος έχει εξαντήσει τη μέγιστη αντοχή του, γεγονός το οποίο αντικατοπτρίζεται στην πίεση που ασκεί το έδαφος στον πάσσαλο ( $F_n^{max}/L$ ) μέσω της μέσης ενεργού τάσης ( $\sigma'_c$ ). Ταυτόχρονα, η καμπτική ροπή και η οριζόντια μετακίνηση του πασσάλου αποκτούν τις μέγιστες τιμές τους. Αμέσως μετά, η αντοχή του ρευστοποιημένου εδάφους ( $\sigma'_c$ ) μειώνεται συνεχώς έως μία παραμένουσα τιμή μετά το τέλος του σεισμού. Αυτό συνεπάγεται τη μείωση της πίεσης που ασκείται στον πάσσαλο και αποτυπώνεται στη μείωση της καμπτικής ροπής και παθητικής μετατόπισης του πασσάλου προς τα πίσω ("πισωτίναγμα"). Ο παραμορφωμένος κάρναβος στο Σχήμα 3, επιβεβαιώνει πως ο

πάσσαλος δεν ακολουθεί πια ποσοτικά την μετακίνηση του εδάφους.



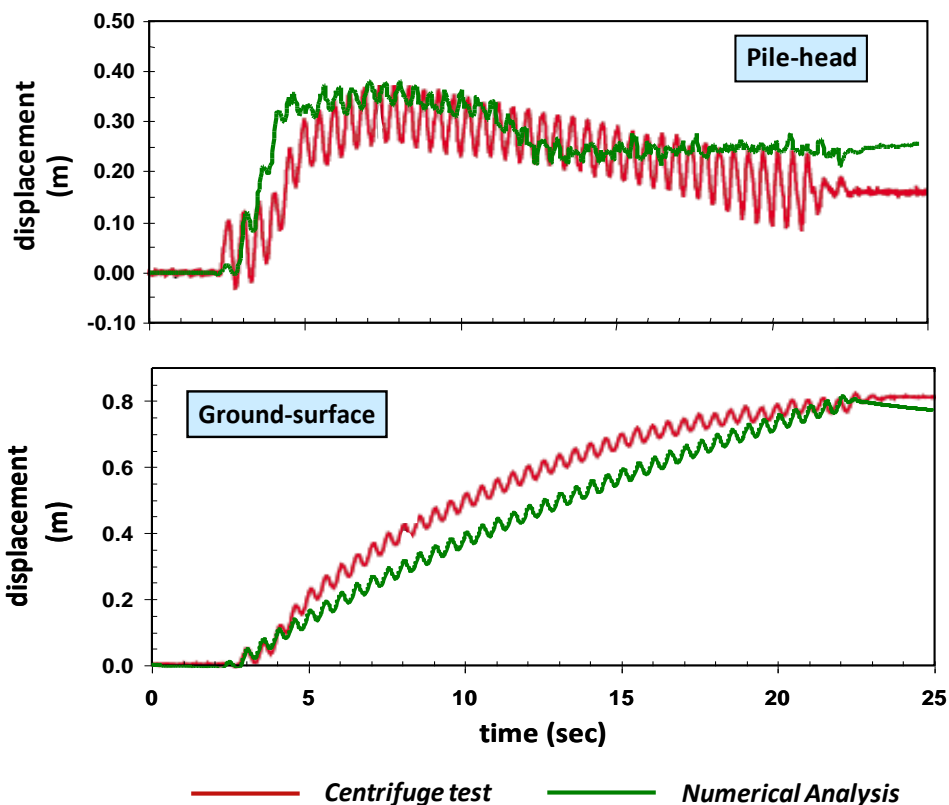
Σχήμα 5: Σύγκριση πειραματικής και αριθμητικής κατανομής οριζόντιας εδαφικής με το βάθος μετακινήσης στα σύνορα του μοντέλου μετά το τέλος της διέγερσης.

Figure 5: Comparison between the experimental and numerical distribution of the horizontal soil displacements with depth at the boundaries of the model after the end of shaking.



Σχήμα 6: Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών χρονιοιστοριών της καμπτικής ροπής του πασσάλου σε βάθος 5.75m, κοντά στην διεπιφάνεια των δύο στρωμάτων.

Figure 6. Comparison between the experimental and numerical time histories of pile bending moment at the depth of 5.75m below the ground surface close to the interface of the two layers.



Σχήμα 7: Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών χρονοϊστοριών των οριζοντίων μετατοπίσεων στην κεφαλή του πασσάλου (πάνω) και στην επιφάνεια του εδάφους (κάτω) στο ελεύθερο πεδίο (σύνορα του προσομοιώματος).

Figure 7. Comparison between the experimental and numerical time histories of horizontal displacement at the pile head (above) and soil displacement at the ground surface (bottom) in the free field (at the boundaries of the model), respectively.

Συνολικά, οι μέγιστες τιμές της καμπτικής ροπής και της μετακίνησης του πασσάλου είναι ίσες τόσο για τις πειραματικές όσο και τις αριθμητικές καταγραφές. Μικρές διαφορές παρατηρούνται στις παραμένουσες τιμές μετά το τέλος της διέγερσης, καθώς και στο ανακυκλικό εύρος της χρονοϊστορίας των μετακινήσεων στην κεφαλή του πασσάλου.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συμπεριφορά των πασσάλων υπό οριζόντιες στατικές συνθήκες εδαφικής ροής λόγω ρευστοποίησης μπορεί να μην ακολουθεί την τάση μονοτονικώς αυξανόμενων οριζοντίων μετατοπίσεων και καμπτικών ροπών κατά την διάρκεια της διέγερσης, όπως θεωρείται συνήθως. Ειδικότερα, πειράματα σε φυγοκεντριστή (Abdoun et al. 2003) αποδεικνύουν πως ο μηχανισμός κινηματικής αλληλεπίδρασης πασσάλου-εδάφους μπορεί να είναι πιο σύνθετος, δίνοντας κορυφαίες

τιμές καμπτικής ροπής και μετακινήσεις στον πάσσαλο, οι οποίες αργότερα απομειώνονται παρόλο που οι οριζόντιες μετατοπίσεις του εδάφους συνεχίζουν να αυξάνουν.

Η κατάλληλη αριθμητική προσομοίωση του πειράματος αναπαρήγαγε τον μηχανισμό αυτόν. Η μέθοδος περιλαμβάνει κατάλληλα μη γραμμικά ελατήρια που συνδέουν τον πάσσαλο με τον περιβάλλοντα έδαφος τοπικά, τα οποία καθιστούν δυνατή την προσομοίωση του τρισδιάστατου αυτού φαινομένου.

#### 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abdoun T., Dobry R., O' Rourke T. D., Goh S. H. (2003) "Pile response to lateral spreads: Centrifuge modeling", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 10, pp. 867-878
- Byrne, P. (1991) "A Cyclic Shear-Volume Coupling and Pore-Pressure Model for

Sand,” in Proceedings of the Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics (St. Louis, Missouri, March, 1991), Vol. I, 47-55. S. Prakash, ed. Rolla: University of Missouri-Rolla

Byrne Peter M., Park Sung-Sink, Beaty Michael, Sharp Michael, Gonzalez Lenart and Abdoun Tarek (2004) “Numerical modeling of liquefaction and comparison with centrifuge tests”, Proceedings of the 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., paper 3387

Dobry R., Abdoun T., O’ Rourke T., Goh S. H. (2003) “Single piles in lateral spreads: Field bending moment evaluation”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 10, pp. 879-889

Gazetas G., Gerolymos N. (2004) “Piles in liquefaction-induced lateral spreading: Current state of the art”, Report for the research program “X-soils”, School of Civil Engineering, NTUA, Greece

ITASCA (2002) “FLAC - Fast langrangian analysis of continua”, Version 4.0 ITASCA Consulting Group Inc., Minneapolis, Minnesota

Tasiopoulou P. (2007) “Soil-Pile Interaction due to liquefaction-induced soil flow after large displacements of quay-walls”, Diploma thesis, School of Civil Engineering, NTUA, Greece