

# Εφαρμογή σπονδυλωτής προσομοίωσης με καταστατικές σχέσεις στην πρόβλεψη της ολίσθησης 4th Avenue λόγω του σεισμού της Alaska το 1964

## Application of the multi-block model with constitutive equations to predict the 4th Avenue landslide as a result of the Alasca 1964 earthquake

ΘΩΜΑΙΔΗΣ Τ. Σπουδαστής, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Λ.Ανοιξέως 1, Βέροια  
ΣΤΑΜΑΤΟΠΟΥΛΟΣ Κ. Διδάσκων, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Ισαύρων 5, 11471, Αθήνα

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Για την πρόβλεψη της μετατόπισης ολισθήσεων έχει αναπτυχθεί σπονδυλωτό προσομοίωμα με καταστατικές σχέσεις. Διερευνάται η αξιοπιστία του προσομοιώματος με εφαρμογή στην ολίσθηση της 4th Avenue λόγω του σεισμού της Alaska το 1964. Πρώτα επαληθεύτηκε η καταστατική σχέση ως προς την ικανότητά της να προβλέψει τη μεταβολή της αντίστασης σε δοκιμές στρεπτικής διάτμησης εδάφους από την επιφάνεια ολίσθησης. Κατόπιν επαληθεύτηκε ότι το προσομοίωμα έδωσε παρόμοιο κινηματικό μηχανισμό ολίσθησης. Λόγω του τεράστιου μέγεθους του σεισμού, χρησιμοποιήθηκε πρότυπο επιταχυνσιογράφημα που προέβλεψε την σεισμική μετακίνηση της ολίσθησης.

**ABSTRACT :** For the prediction of the movement of slides, a multi-block model with constitutive equations has been developed. The new model is evaluated by the prediction of the 4th Avenue landslide, as a result of the Alaska 1964 earthquake. First the constitutive equations of the model were verified by the prediction of the response measured in ring shear tests of soil along the slip surface. Then, it was verified that the model predicts the kinematics of the slide. As a result of the enormous magnitude of the earthquake, an accelerogram was created that predicted the seismic displacement of the slide.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σεισμικές ολισθήσεις λαμβάνουν χώρα συνήθως λόγω της μείωσης της αντοχής κατά μήκος επιφανειών γεγονός που οφείλεται στην ανάπτυξη σημαντικής υπερπίεσης πόρων (Stark and Contreras, 1998). Για την πρόβλεψη της μετακίνησης αυτών των ολισθήσεων, συνήθως χρησιμοποιείται το προσομοίωμα σώματος-σε-κεκλιμένο-επίπεδο (Σταματόπουλος, 2003, Stark and Contreras, 1998). Σε άλλες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων. Όμως, όταν η μετακίνηση είναι μεγάλη, το συνήθες προσομοίωμα σώμα-σε-κεκλιμένο-επίπεδο έχει μειονεκτήματα στην ανάλυση. Προβλέπει μεγαλύτερη μετακίνηση, επειδή δεν λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή της γεωμετρίας προς μία περισσότερο ευσταθή κατάσταση. Επιπροσθέτως,

αριθμητικοί κώδικες που βασίζονται στην μέθοδο πεπερα-σμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών συνήθως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν η μετακίνηση είναι πολύ μεγάλη.

Εναλλακτικά, όταν η μετακίνηση είναι μεγάλη, έχουν προταθεί σπονδυλωτά προσομοιώματα για την περιγραφή της μετατόπισης ολισθήσεων (Stamatoroulos et al. 2000, Sarma and Chlimintzas, 2001). Το πιο γενικό προσομοίωμα ως προς την γεωμετρία είναι αυτό των Sarma and Chlimintzas (2001). Με αντίσταση κατά τον νόμο Mohr-Coulomb, το σπονδυλωτό προσομοίωμα μπορεί να εφαρμοσθεί σε ανάδρομες αναλύσεις για να υπολογισθεί προσεγγιστικά η διατμητική αντοχή του εδάφους (Stamatoroulos et al., 2000).

Όμως, για την πρόβλεψη της ενεργοποίησης της ολίσθησης και για την ακριβή πρόβλεψη της σεισμικής μετακίνησης χρειάζονται καταστατικές σχέσεις που περιγράφουν την μεταβολή της αντοχής στην επιφάνεια ολίσθησης, σε συνδυασμό με το σπονδυλωτό προσομοίωμα. Τέτοιες καταστατικές σχέσεις έχουν ενσωματωθεί πρόσφατα στο προσομοίωμα (Σταματόπουλος και Αναιρούσης, 2008). Ο σκοπός της παρούσης δημοσίευσης είναι να επαληθεύσει την "σπονδυλωτή προσομοίωση με καταστατικές σχέσεις" με την πρόβλεψη της ενεργοποίησης και της τελικής γεωμετρίας της καλά-καταγραμμένης ολίσθησης της 4th Avenue λόγω του σεισμού της Alaska το 1964.

## 2. Η ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ

Παρόμοια με την μέθοδο ευστάθειας του Sarma (1979) που φαίνεται στο Σχ. 1, λαμβάνεται πρηνές που ολισθαίνει σε επιφάνεια ολίσθησης που αποτελείται από  $n$  ευθύγραμμα τμήματα. Ασκείται οριζόντια επιτάχυνση,  $k(t)*g$ , όπου  $k(t)$  είναι ένας αδιάστατος συντελεστής συναρτήσεως του χρόνου και  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Για να κινηθεί το έδαφος, στους κόμβους μεταξύ των ευθύγραμμων τμημάτων της επιφάνειας ολίσθησης, δημιουργούνται ημιεπίπεδα όπου ασκούνται δυνάμεις αντίστασης. Άρα, το πρηνές διαχωρίζεται σε  $n$  σπονδύλους (σώματα) που ολισθαίνουν σε  $n$  διαφορετικά επίπεδα.

Στα ημιεπίπεδα επαφής διαδοχικών σπονδύλων η ταχύτητα πρέπει να είναι συνεχής. Αυτή η προϋπόθεση δίδει ότι η μετακίνηση μεταξύ διαδοχικών σωμάτων συσχετίζεται ως:

$$u_i/u_{i+1} = du_i/du_{i+1} = \cos(\delta_i + \beta_{i+1}) / \cos(\delta_i + \beta_i) \quad (1)$$

όπου  $u$  είναι η μετακίνηση κατά μήκος ενός τμήματος της επιφάνειας ολίσθησης, οι δείκτες  $i$  και  $i+1$  αντιστοιχούν στους σπονδύλους  $i$  και  $i+1$  μετρώντας ανωφερικά,  $d$ =διαφορικό και  $\beta_i$  και  $(90-\delta_i)$  είναι οι κλίσεις στην βάση του σπονδύλου  $i$  και στο εσωτερικό ημιεπίπεδο  $i$  αντίστοιχα.

Οι δυνάμεις που ασκούνται στον σπόνδυλο "i" δίδονται στο Σχ. 1. Επειδή το πρηνές ολισθαίνει, το κριτήριο αστοχίας Mohr-

Coulomb εφαρμόζεται τόσο στην επιφάνεια ολίσθησης, όσο και στα ημιεπίπεδα μεταξύ των διαδοχικών σωμάτων. Η εξίσωση κίνησης του σπονδηλωτού προσομοιώματος δίνεται από τους Sarma and Chlimitzas (2001). Όταν ασκείται οριζόντια επιτάχυνση  $a(t)$  έχει την γενική μορφή

$$du_n^2/dt^2 = A (a(t) - a_c) \quad \text{για } du_n/dt > 0 \quad (2)$$

όπου  $A$  είναι ένας συντελεστής και  $a_c$  είναι η κρίσιμη επιτάχυνση, που ορίζεται ως η ελάχιστη οριζόντια επιτάχυνση που απαιτείται για να μετακινηθεί η ολίσθηση. Οι συντελεστές  $A$  και  $a_c$  εξαρτώνται από την γεωμετρία, την πίεση πόρων και την αντοχή των  $n$  σωμάτων του ολισθαίνοντος πρηνούς. Ο συντελεστής  $a_c$  είναι θετικός όταν το (δυναμικά) ολισθαίνον πρηνές είναι ευσταθές και αρνητικός όταν είναι ασταθές.

Επειδή η σχέση (2) έχει μόνον μία διάσταση μετακίνησης, απαιτείται μικρή αριθμητική προσπάθεια για την επίλυση. Αυτό αποτελεί βασικό πλεονέκτημα του προσομοιώματος. Για να επιλυθεί η σχέση (2) για μεγάλη μετακίνηση, επαναυπολογίζονται οι μάζες και τα μήκη του κάθε σπονδύλου  $i$  συναρτήσεως της απόστασης που διανύεται από την ολισθαίνουσα μάζα, λαμβάνοντας υπόψη την σχέση (1) και θεωρώντας ότι η θέση των κόμβων και των ημιεπιπέδων εσωτερικής αντίστασης δεν μεταβάλλεται.

Κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, υπό συνθήκες σταθερού όγκου χρησιμοποιείται το προτεινόμενο από τους Σταματόπουλο και Αναιρούση (2008) καταστατικό προσομοίωμα:

$$\tau = \sigma' * r * f \quad (3)$$

$$dP = -d\sigma' = du * K * (\tan\varphi_{cs} - \tau/\sigma') \quad (4)$$

όπου

$$f = 1 - b * \ln[\tan\varphi_{cs} * \sigma' / (\sigma'_o * \tan\varphi_{res})] \quad (5)$$

$$r = \tan\varphi_{cs} * u / (a + u) \quad (6)$$

$$K = k1 * (\sigma' / Pa)^{k2} \quad (7)$$

Στις σχέσεις (3)-(7)  $\tau$  είναι η διατμητική τάση,  $\sigma'$  είναι η ενεργός τάση κάθετη στην επιφάνεια ολίσθησης,  $\sigma'_o$  είναι η αρχική τιμή της  $\sigma'$ ,  $P$  είναι η υπερπίεση πόρων,  $K$  είναι συντελεστής που συνδέει την κάθετη στην επιφάνεια ολίσθησης μετακίνηση υπό συνθήκες πλήρους στράγγισης με την υπερπίεση πόρων υπό αστράγγιστες συνθήκες,  $u$  είναι η μετακίνηση κατά μήκος

της επιφάνειας ολίσθησης,  $P_a$  είναι η ατμοσφαιρική πίεση,  $\varphi_{cs}$  είναι η τελική ενεργός γωνία τριβής,  $\varphi_{res}$  είναι η τελική ολική γωνία τριβής και  $a$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $b$  είναι πρόσθετοι παράμετροι. Το προσομοίωμα βασίζεται στη θεωρία της κρίσιμης κατάστασης που προβλέπει ότι με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης το έδαφος σταδιακά φθάνει σε κρίσιμη κατάσταση, όπου η τάση και η πίεση πόρων παραμένουν σταθερές με περαιτέρω αύξηση της μετακίνησης στην επιφάνεια ολίσθησης.

Το προσομοίωμα μπορεί να επεκταθεί και στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς του εδάφους σε συνθήκες πλήρους στράγγισης (Stamatoroulos C. and Stamatoroulos A., 2007). Σε αυτήν την περίπτωση, οι σχέσεις (3) και (6) εξακολουθούν να ισχύουν. Οι σχέσεις (4) και (5) διαμορφώνονται ως

$$du_n = du (\tan\varphi_{cs} - \tau/\sigma) \quad (8)$$

$$f = 1 - b \ln[\tan\varphi_{cs} \sigma' / (\sigma'_{c-o} \tan\varphi_{res})] \quad (9)$$

$$\sigma'_{c-o} = \sigma'_o \exp(-\beta u_n) \quad (10)$$

Στις σχέσεις (8)-(11),  $u_n$  είναι η μετακίνηση κάθετη στην επιφάνεια ολίσθησης και  $\beta$  είναι μία πρόσθετη παράμετρος που εξαρτάται από την συμπίεστικότητα του εδάφους.

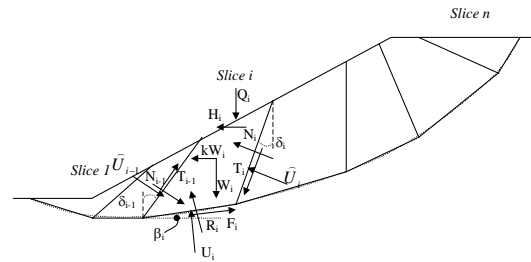
Οι προαναφερθείσες καταστατικές σχέσεις (3) έως (10) μπορούν να ενσωματωθούν στο σπονδυλωτό προσομοίωμα, μεταβάλλοντας τη γωνία τριβής στη βάση κάθε σώματος  $i$  ως

$$\varphi_i = \arctan[\tau_i/\sigma'_{o-i}] \quad (11)$$

όπου  $\tau_i$  και  $\sigma'_{o-i}$  είναι η διατμητική τάση και η αρχική κάθετη ενεργός τάση αντίστοιχα στην επιφάνεια ολίσθησης  $i$ . Σε κάθε διάστημα η τιμή  $\tau_i$  προβλέπεται από τις σχέσεις (3) έως (10), ανάλογα με τις συνθήκες στράγγισης του σπονδύλου. Περισσότερες λεπτομέρειες δίδονται από τους Σταματόπουλο και Αναιρούση (2008).

Από τον Σταματόπουλο έχει αναπτυχθεί πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή, με το οποίο επιλύονται οι σχέσεις του σπονδυλωτού προσομοιώματος με καταστατικές σχέσεις (Σταματόπουλος και Αναιρούσης, 2008). Στο πρόγραμμα, η γεωμετρία του πρανούς δίδεται με τους κόμβους που ορίζουν (α) την επιφάνεια ολίσθησης, (β) την επιφάνεια του εδάφους και (γ) την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Το

πρόγραμμα παράγει διαγράμματα που δείχνουν την αρχική και τελική παραμορφωμένη γεωμετρία του πρανούς, καθώς και (i) την ασκούμενη επιτάχυνση, (ii) την κρίσιμη επιτάχυνση, (iii) την επιτάχυνση, ταχύτητα και μετακίνηση, (iv) την πίεση πόρων και (v) την ισοδύναμη γωνία τριβής της σχέσης (11) του κάθε σπονδύλου του ολισθαίνοντος πρανούς, όλα συναρτημένα του χρόνου.



Σχήμα 1. Η σπονδυλωτή μέθοδος ευστάθειας που έχει προταθεί από τον Sarma (1979).

Fig.1. The multi-block stability method that has been proposed by Sarma (1979).

### 3. ΒΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΑΠΑΙΤΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

Σύμφωνα με τους Σταματόπουλο και Αναιρούση (2008), τα βήματα που απαιτούνται για την εφαρμογή του σπονδυλωτού προσομοιώματος με καταστατικές σχέσεις σε επιφάνεια ολίσθησης για την μελέτη της ενεργοποίησης της ολίσθησης και την πρόβλεψη της μετακίνησης της λόγω σεισμού είναι:

(α) Η επιφάνεια ολίσθησης περιγράφεται από ευθύγραμμα τμήματα. Εκτιμάται η κλίση των εσωτερικών ημιεπιπέδων σύμφωνα με την αρχή της ελάχιστης κρίσιμης επιτάχυνσης της αρχικής θέσης της ολίσθησης. Για την αντοχή του εδάφους χρησιμοποιείται ο κανόνας Mohr-Coulomb. Κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης πρέπει να χρησιμοποιηθεί η τελική τιμή της εδαφικής αντοχής. Στα εσωτερικά ημιεπίπεδα, επειδή διαφορετικό υλικό αστοχεί σε κάθε χρονικό διάστημα, η τελική παραμένουσα εδαφική αντοχή δεν ενεργοποιείται. Ως εκ τούτου πρέπει να χρησιμοποιηθεί η μέγιστη τιμή της εδαφικής αντοχής. Εφαρμογή της διαδικασίας δίδεται στο παράδειγμα παρακάτω.

(β) Μετά την εκτίμηση της κλίσης των εσωτερικών ημιεπιπέδων, με το σπονδυλωτό προσομοίωμα μελετάται η ενεργοποίηση της ολίσθησης και γίνεται ακριβής πρόβλεψη της μετακίνησης. Ασκείται αντιπροσωπευτικό

επιταχυνσιογράφημα. Στην επιφάνεια ολίσθησης χρησιμοποιείται το προτεινόμενο καταστατικό προσομοίωμα. Στα εσωτερικά ημιεπίπεδα, παρόμοια με το (α), εφαρμόζεται ο κανόνας Mohr-Coulomb με την μέγιστη τιμή της εδαφικής αντοχής.

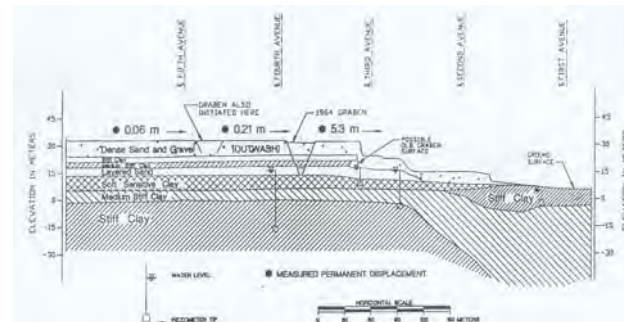
#### 4. Η ΟΛΙΣΘΗΣΗ 4th AVENUE

Μια από τις καλά καταγεγραμμένες ολίσθησεις με άμεση συσχέτιση με σεισμό είναι η ολίσθηση 4th Avenue στην πόλη Anchorage, λόγω του σεισμού της Αλάσκας το 1964. Ο σεισμός έλαβε χώρα την 27/3/1964, είχε επιφανειακό μέγεθος 8.5, η δε τοποθεσία της ολίσθησης βρισκόταν σε απόσταση 130 Km από το επίκεντρο. Είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος σεισμούς που έχει ποτέ καταγραφεί στην γη (Martirosyan et al., 2005). Δεν καταγράφηκαν επιταχυνσιογραφήματα λόγω του σεισμού. Εκτιμήθηκε ότι η μέγιστη επιτάχυνση στην πόλη Anchorage ήταν περίπου 0.15 έως 0.20g, όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Η διάρκεια της διέγερσης ήταν 4 έως 7 λεπτά με εν δυνάμει καταστροφική διέγερση περίπου 2 έως 3 λεπτά (Stark et al, 1998). Πρόσφατες αναλύσεις εδαφικής απόκρισης σε σεισμό στην πόλη Anchorage έδειξαν ότι υπάρχει συντονισμός στα μαλακά εδάφη στο κέντρο της πόλης σε περίοδο περίπου 1s, με συντελεστή ενίσχυσης περίπου 4 (Martirosyan et al., 2005).

Το σχήμα 2α δίδει την διατομή της ολίσθησης. Ο μηχανισμός της ολίσθησης ήταν οριζόντια μετακίνηση που χαρακτηρίζεται από δημιουργία κοιλότητας πίσω από την ολίσθηση (Σχ. 2α και β). Η οριζόντια μετακίνηση ήταν περίπου 5m και η κοιλότητα είχε κλίση περίπου 40°.

Οι εδαφικοί σχηματισμοί στην περιοχή της ολίσθησης δίδονται στο Σχ. 2α. Ο λόγος της ολίσθησης, κατά τους Stark et al (1998) είναι η αστοχία υπό αστράγγιστες συνθήκες της μαλακής αργιλικής στρώσης “bootlegger cove clay” σε βάθος περίπου 20m (Σχ. 2α). Η άργιλος έχει τιμή του OCR περίπου 1.2, δείκτη πλαστικότητας που κυμαίνεται μεταξύ 7 και 22 και όριο πλαστικότητας που κυμαίνεται μεταξύ 20 και 30. Η συμπεριφορά της άργιλου μετρήθηκε σε δοκιμές στρεπτικής διάτμησης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δίδονται στο Σχ. 3 (Stark et al. 1998). Παρατηρείται ότι η άργιλος χάνει την αντοχή

της σε μεγάλη μετακίνηση και η τελική γωνία τριβής της είναι ελάχιστη ( $\text{atctan}(0.065)=4^\circ$ ). (α)



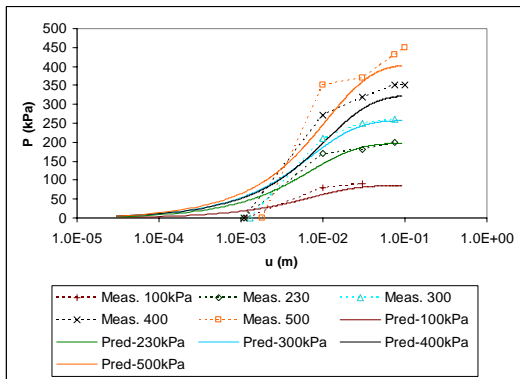
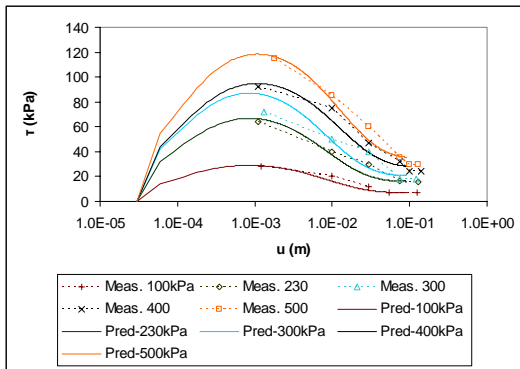
(β)



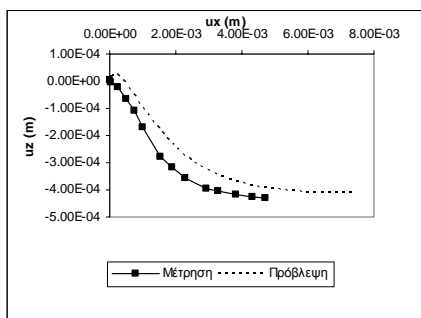
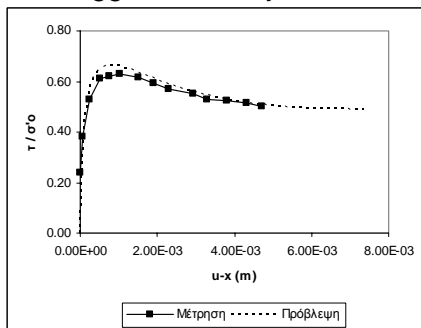
Σχήμα 2. (α). Τομή της ολίσθησης (Stark and Contreras, 1998). (β) Φωτογραφία της ολίσθησης (Walker, 1982)  
Fig. 2. (a). Cross-section of the slide (Stark and Contreras, 1998). (b) Photo of the slide (Walker, 1982)

#### 5. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΛΙΣΘΗΣΗ 4TH AVENUE

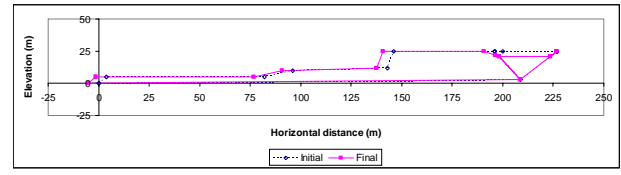
Κατά τον κανόνα Mohr-Coulomb, οι πέντε δοκιμές στρεπτικής διάτμησης υπό σταθερό όγκο στην μαλακή άργιλο “bootlegger cove clay” έδωσαν για την τελική ολική αντίσταση τις παραμέτρους  $c=0$ ,  $\phi=4^\circ$ . Για το προτεινόμενο καταστατικό προσομοίωμα, οι παράμετροι που προβλέπουν καλύτερα τις δοκιμές στρεπτικής διάτμησης είναι  $\phi_{cs} = 26^\circ$ ,  $\phi_{res} = 4^\circ$ ,  $b=0.12$ ,  $a=10^{-4}m$ ,  $k_1= 10^5 \text{ kPa/m}$ ,  $k_2= 1$ . Γι' αυτές τις παραμέτρους το Σχ. 3 δείχνει την σύγκριση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών με τις προβλέψεις του προτεινόμενου προσομοιώματος. Παρατηρείται ικανοποιητική πρόβλεψη.



Σχήμα 3. Αποτελέσματα και πρόβλεψη σε δοκιμές στρεπτικής διάτμησης υπό σταθερό όγκο στην άργιλο “bootlegger cove clay”  
Fig. 3. Measured and computed response at constant-volume ring shear tests of “bootlegger cove clay”.



Σχήμα 4. Αποτελέσματα και πρόβλεψη δοκιμής απλής διάτμησης σε πυκνή άμμο σε συνθήκες πλήρους στράγγισης που δίδεται στον Taylor (1955).  
Fig. 4. Measured and predicted drained direct shear test on dense sand reported by Taylor (1955).



Σχήμα 5. Η προσομοίωση της ολίσθησης 4th Avenue στην πόλη Anchorage. Αρχική γεωμετρία και τελική υπολογισθείσα γεωμετρία.  
Fig. 5. The 4th Avenue slide. Intial and final computed geometry

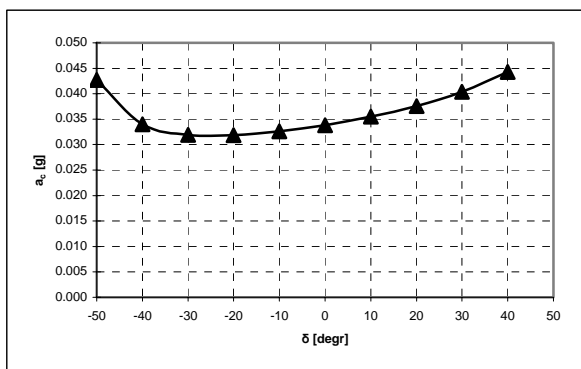
Πέραν της αργίλου, η επιφάνεια ολίσθησης διαπερνά και άλλες εδαφικές στρώσεις. Αυτές οι στρώσεις είναι κυρίως αμμώδεις, υψηλής πυκνότητας, και πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Άρα επικρατούν συνθήκες πλήρους στράγγισης. Δυστυχώς δεν έχει εκτελεσθεί κάποια εργαστηριακή έρευνα σε αυτά τα εδάφη της ολίσθησης. Δοκιμή απλής διάτμησης σε άμμο υπό παρόμοιες συνθήκες στράγγισης και υπό παρόμοια πυκνότητα βρέθηκε στον Taylor (1955) και παρουσιάζεται στο Σχ. 4. Θα υποθεθεί ότι το έδαφος των άλλων πην της αργίλου χαμηλής τελικής αντοχής στρώσεων συμπεριφέρεται όπως αυτή η δοκιμή. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό εκτιμάται πως δεν θα επιφέρει σημαντική διαφοροποίηση στην ανάλυση, επειδή υπό συνθήκες πλήρους στράγγισης η αντοχή των αμμωδών εδαφών υψηλής πυκνότητας δεν μειώνεται σε μεγάλη μετακίνηση και η συμπεριφορά από άμμο σε άμμο δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές.

Κατά τον κανόνα Mohr-Coulomb, σε αυτήν την δοκιμή η τελική αντοχή της άμμου είναι  $c=0$ ,  $\phi=26^\circ$ , ενώ η μέγιστη είναι  $c=0$ ,  $\phi=35^\circ$ . Για το προτεινόμενο καταστατικό προσομοίωμα, οι παράμετροι που προβλέπουν καλύτερα αυτήν την δοκιμή είναι  $\phi_{cs} = 26^\circ$ ,  $\phi_{res} = 87^\circ$ ,  $b=0.2$ ,  $a=10^{-4}$  m,  $\beta=7000$ . Γι' αυτές τις παραμέτρους το Σχ. 4 δίνει την σύγκριση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών με τις προβλέψεις του προτεινόμενου προσομοιώματος. Παρατηρείται ικανοποιητική πρόβλεψη.

Η επιφάνεια ολίσθησης του Σχ. 2α ορίζεται με 2 τμήματα και 1 κόμβο (Σχ. 5). Το πρώτο (μπροστινό) τμήμα της ολίσθησης κινείται περίπου οριζόντια, ενώ το δεύτερο τμήμα κινείται κατωφερικά και προκαλεί την καθίζηση του εδάφους. Ο υδροφόρος

ορίζοντας ελήφθη 3m περίπου πάνω από το οριζόντιο τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης.

Εκτιμάται η κλίση του εσωτερικού ημιεπιπέδου στην αρχική γεωμετρία της ολίσθησης. Σύμφωνα με τα προηγούμενα, κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, η αντοχή περιγράφεται ως  $\phi=4^\circ$  για το κάτω τμήμα και ως  $\phi=26^\circ$  για άνω τμήμα της επιφάνειας της ολίσθησης, ενώ για το εσωτερικό ημιεπίπεδο η αντοχή λαμβάνεται ως  $35^\circ$ . Το Σχ. 6 δείχνει υπολογισθείσα μεταβολή της κρίσιμης επιτάχυνσης ( $a_c$ ) συναρτήσει της κλίσης του εσωτερικού ημιεπιπέδου. Επειδή η κλίση του εσωτερικού ημιεπιπέδου είναι αυτή που προκαλεί την ελάχιστη τιμή του  $a_c$ , συμπεραίνεται ότι  $\delta=27^\circ$ .



Σχήμα 6. Η προσομοίωση της ολίσθησης 4th Avenue. Ο συντελεστής της κρίσιμης επιτάχυνσης στην αρχική γεωμετρία συναρτήσει της γωνίας του εσωτερικού ημιεπιπέδου.

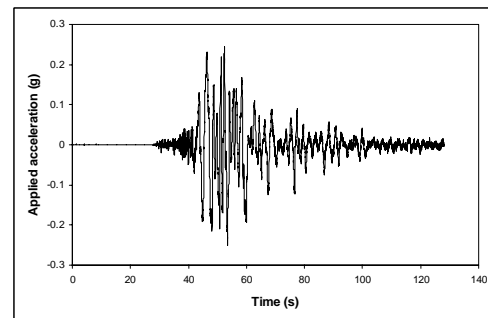
Fig. 6. The 4th Avenue slide. The critical acceleration factor at the initial slide configuration in terms of the angle of the internal sub-plane

## 6. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗΣ ΤΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΜΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑ

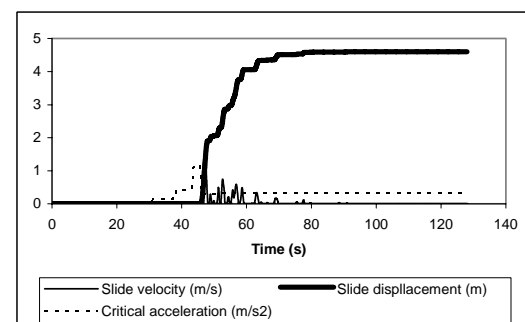
Ελήφθη η γεωμετρία του σχήματος 5 που προσομοιώνει την ολίσθηση 4th Avenue. Σύμφωνα με τα προηγούμενα, κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, η αντοχή περιγράφεται από το καταστατικό προσομοίωμα, για το κάτω τμήμα όπως στην μαλακή άργιλο του Σχ. 3, ενώ για το άνω τμήμα όπως για την άμμο του Σχ. 4. Στο εσωτερικό ημιεπίπεδο η αντοχή ελήφθη ως  $\phi=35^\circ$ .

Ασκήθηκαν 100 διαφορετικές σεισμικές διεγέρσεις που βρέθηκαν με διαδικτυακή αναζήτηση. Σε όλες τις περιπτώσεις η σεισμική μετακίνηση ήταν μικρότερη από την μετρηθείσα. Ο λόγος είναι, πιθανώς, το τεράστιο μέγεθος του σεισμού που πρακάλεσε την ολίσθηση, που είναι μεγαλύτερο από όλους τους σεισμούς που προκάλεσαν τα επιταχυνσιογράφημα που εξετάστηκαν.

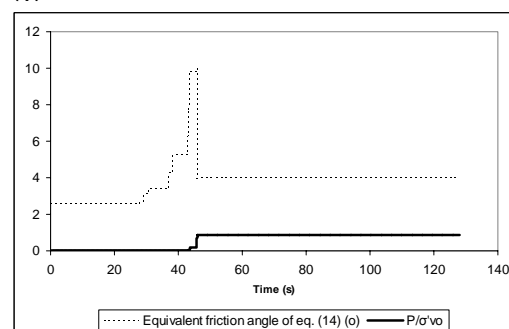
(α)



(β)

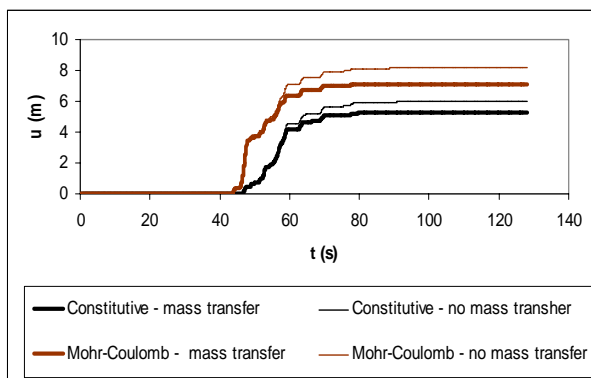


(γ)



Σχήμα 7. (α) Το επιταχυνσιογράφημα που ασκήθηκε, (β) η επιτάχυνση, ταχύτητα και μετακίνηση, (γ) η υπερπίεση πόρων και η ισοδύναμη γωνίας τριβής του κάτω τμήματος της επιφάνειας ολίσθησης, όλα συναρτήσει του χρόνου

Fig. 7. (a) The applied accelerogram, (b) the acceleration, velocity and displacement and (c) the excess pore pressure and equivalent friction angle, at the base of the slide, all in terms of time.



Σχήμα 8. Η χρονική εξέλιξη της μετακίνησης για τις περιπτώσεις (α) με καταστατική σχέση και το σπονδυλωτό προσομοίωμα, (β) με καταστατική σχέση και χωρίς μεταβολή μαζών, (γ) με αντοχή κατά Mohr-Coulomb και το σπονδυλωτό προσομοίωμα και (δ) με αντοχή κατά Mohr-Coulomb και χωρίς μεταβολή μαζών.

Fig. 8. Displacement in terms of time for the cases of (a) with the constitutive model and the multi-block model, (b) with the constitutive model but without the masses change, (c) with the Mohr-Coulomb law and the multi-block model and (d) with the Mohr-Coulomb law but without the masses change

Συμπεραίνεται ότι κρίνεται απαραίτητη η κατασκευή "πρότυπου" επιταχυνσιογραφήματος. Ως βάση χρησιμοποιήθηκε το επιταχυνσιογράφημα του Skinkobe λόγω του σεισμού Hgogoken – nambu του 1995 με μέγεθος  $M_w = 7.0$ . Ο λόγος είναι το αρκετά μεγάλο μέγεθος του σεισμού που το προκάλεσε. Είναι γνωστό (Σταματόπουλος, 2003) ότι η σεισμική μετακίνηση αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της επιτάχυνσης και εκθετικά (με τιμή εκθέτη 2) με την αύξηση του διαστήματος  $dt$  του επιταχυνσιογραφήματος. Το επιταχυνσιογράφημα τροποποιήθηκε πολλαπλασιάζοντας την επιτάχυνση και το διάστημα  $dt$  επί σταθερούς συντελεστές, ώστε (α) η σεισμική μετακίνηση της ολίσθησης να είναι περίπου 5m, και (β) η μέγιστη επιτάχυνση, χρονική διάρκεια και κρίσιμη περίοδος να είναι παρόμοιες με αυτές που εκτιμάται ότι έλαβαν χώρα κατά τον σεισμό του 1964 και αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.

Το επιταχυνσιογράφημα που παρήχθη παρουσιάζεται στο σχήμα 7α. Έχει μέγιστη επιτάχυνση 0.26g και διάρκεια 2 λεπτά, παρόμοια με τις εκτιμώμενες τιμές της

ολίσθησης 4th Avenue λόγω του σεισμού του 1964 (ενότητα 4). Με χρήση του προγράμματος Seismosignal βρέθηκε ότι το επιταχυνσιογράφημα αυτό έχει κρίσιμη περίοδο ίση με 1.26 sec, δηλαδή παρόμοια με τις αναλύσεις εδαφικής απόκρισης που περιγράφηκαν στην ενότητα 4.

Για το επιταχυνσιογράφημα του Σχ. 7α, το Σχ. 7β παρουσιάζει την χρονική εξέλιξη της μετακίνησης που υπολογίστηκε από το προσομοίωμα. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η υπολογισθείσα ταχύτητα, επιτάχυνση (απόκριση) και κρίσιμη επιτάχυνση του πρανούς. Το σχήμα 7γ δίνει την χρονική εξέλιξη (α) της υπερπίεσης πόρων και (β) της ισοδύναμης γωνίας τριβής (σχέση (11)) του κάτω τμήματος της επιφάνειας ολίσθησης. Το Σχ. 5 δίνει την υπολογισθείσα τελική γεωμετρία της ολίσθησης.

Από το Σχ. 7 παρατηρείται ότι κατά την άσκηση του σεισμού, διατμητική μετακίνηση αρχίζει να συσσωρεύεται. Αυτό προκαλεί την σταδιακή αύξηση της υπερπίεσης πόρων και αύξηση της γωνίας τριβής του υλικού. Σε χρόνο περίπου  $t=12s$ , η γωνία τριβής φτάνει την μέγιστη τιμή της, και κατόπιν μειώνεται δραστικά μέχρι την τελική τιμή της σε  $t=12.5s$ . Στο  $t=12.5s$ , η κρίσιμη επιτάχυνση του συστήματος γίνεται ελάχιστη και, αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όταν ασκούνται μεγάλες επιταχύνσεις, η ταχύτητα της ολίσθησης να είναι σημαντική, ενώ αντίστοιχα να συσσωρεύεται μεγάλη μετακίνηση. Λόγω της κατωφερικής μετακίνησης, το πρανές σταδιακά ολισθαίνει σε μικρότερη μέση κλίση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η κρίσιμη επιτάχυνση του συστήματος να αυξάνεται σταδιακά.

Καθώς η ολίσθηση μετατοπίστηκε οριζόντια, δημιουργήθηκε κοιλότητα στο πίσω έδαφος με καθίζηση με τιμή ίση με περίπου αυτής της οριζόντιας μετακίνησης. Επίσης, όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 4, η μετρηθείσα μετακίνηση της ολίσθησης ήταν περίπου 5m. Η ανάλυση προβλέπει επίσης ότι καθώς η ολίσθηση μετατοπίστηκε οριζόντια, δημιουργήθηκε κοιλότητα στο πίσω έδαφος με καθίζηση με τιμή ίση με περίπου με αυτή της οριζόντιας μετακίνησης. Επίσης προβλέπει της ίδιας τάξεως μέγεθος μετακίνησης όταν ασκείται το πρότυπο επιταχυνσιογράφημα.

Εκτελέστηκαν παραμετρικές αναλύσεις για να διαπιστωθεί η επίδραση του σπονδυλωτού και καταστατικού προσομοιώματος. Στο σχήμα 8 δίδεται η χρονική εξέλιξη της μετακίνησης για τις περιπτώσεις (α) με καταστατική σχέση και το σπονδυλωτό προσομοίωμα, (β) με καταστατική σχέση και χωρίς μεταβολή μαζών και μηκών των σπονδύλων, κατά την μετακίνηση, (γ) με αντοχή κατά Mohr-Coulomb και το σπονδυλωτό προσομοίωμα και (δ) με αντοχή κατά Mohr-Coulomb και χωρίς μεταβολή μαζών χωρίς μεταβολή μαζών και μηκών των σπονδύλων κατά την μετακίνηση. Η περίπτωση (δ) είναι όμοια με το συχνά εφαρμοζόμενο προσομοίωμα σώματος-σε-κεκλιμένο-επίπεδο. Η περίπτωση (α) είναι αυτή που εξετάστηκε προηγουμένως. Τα αποτελέσματα δίδονται στο Σχ. 8. Παρατηρείται ότι το βελτιωμένο προσομοίωμα προβλέπει σεισμική μετακίνηση που διαφέρει σημαντικά από αυτήν που προβλέπει το προσομοίωμα σώμα σε κεκλιμένο επίπεδο: Η μετακίνηση μειώθηκε από 8 σε 5m. Από αυτήν την μείωση των 3m, τα 2m οφείλονται στη καταστατική σχέση, ενώ το 1m στην μεταβολή μαζών και μηκών των σπονδύλων. Επιπροσθέτως, το Σχ. 8 δείχνει ότι (i) οι καταστατικές σχέσεις επηρεάζουν την μετακίνηση στα αρχικά στάδια της σεισμικής διέγερσης, πριν το έδαφος λάβει την τελική τιμή της αντοχής του ενώ (ii) η μεταβολή μάζας επηρεάζει την μετακίνηση στα μέσα και τελικά στάδια της σεισμικής διέγερσης, όταν σημαντική μεταβολή της γεωμετρίας του πρσανούς έχει λάβει χώρα.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το σπονδυλωτό προσομοίωμα με καταστατικές σχέσεις χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της ολίσθησης 4th Avenue, λόγω του σεισμού της Αλάσκας το 1964. Οι καταστατικές σχέσεις του προσομοιώματος προέβλεψαν την μετρηθείσα συμπεριφορά σε δοκιμές στρεπτικής διάτμησης. Το σπονδυλωτό προσομοίωμα προέβλεψε τον κινηματικό μηχανισμό της ολίσθησης. Λόγω του τεράστιου μεγέθους του σεισμού που πρακάλεσε την ολίσθηση, κρίθηκε απαραίτητη η κατασκευή "πρότυπου" επιταχυνσιογραφήματος. Το "πρότυπο" επιταχυνσιογράφημα προέβλεψε ικανοποιητικά την σεισμική μετακίνηση της ολίσθησης.

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Martirosyan A. H. , Biswas N. N., Dutta U. Seismic Hazard Studies in Anchorage, Alaska. Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 01431, 2005
- Newmark, N. M. (1965). "Effect of earthquakes on dams and embankments", Geotechnique, Vol. 15, No. 2, London, England, June, pp. 139-160.
- Stark, T.-D., Contreras, I.-A. (1998). Fourth Avenue Landslide during 1964 Alaskan Earthquake. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 2, pp. 99-109.
- Sarma, S. K. and Chlimintzas, G. (2001) Analysis of seismic displacement of slopes using multi-block model. Final report performed under the grant of the European Commission Project ENV4-CT97-0392, 2001, January.
- Sarma S.K. (1979). Stability analysis of embankments and slopes. Journal of Geotechnical Engineering ASCE; Vol.105, No. 12, pp. 1511-1524.
- Stamatopoulos C., Velgaki E., and Sarma S. (2000) "Sliding-block back analysis of earthquake induced slides". Soils and foundations, The Japanese Geotechnical Society, Vol. 40, No. 6, pp 61-75.
- Stamatopoulos C., Stamatopoulos A. (2007) Deliverable 95, Project No.: GOCE-CT-2003-505488, LESSLOSS, Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides Integrated Project, Sixth Framework Programme, Priority 1.1.6.3 Global Change and Ecosystems. European Commission
- Taylor, D. W. (1955). Fundamentals of soil mechanics. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Walker B. and the editors of time-life books. (1982) Planet earth. Earthquake, Time-Life books Inc, Amsterdam.
- Σταματόπουλος Κ. (2003). Δυναμική εδαφών και θεμελιώσεων. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα, 320 σελίδες
- Σταματόπουλος Κ. (2003). Δυναμική εδαφών και θεμελιώσεων. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα, 320 σελίδες.
- Σταματόπουλος Κ. Αναϊρούσης Σ. (2008) Ενσωμάτωση καταστατικών σχέσεων σε σπονδυλωτή προσομοίωση πρσανών και πρόβλεψη της σεισμικής μετακίνησης της ολίσθησης Nikawa, 3<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής, Αθήνα.