

Η επίδραση της μεταβολής της γεωμετρίας του πρανού κατά την ολίσθηση στις προβλέψεις της σεισμικής μετακίνησης με μοντέλα Mohr-Coulomb

The effect of geometry changes of a slope during the slide on the seismic displacement predicted by sliding-block models

ΣΤΑΜΑΤΟΠΟΥΛΟΣ Κ. Διδάσκων, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Ισαύρων 5, 11471, Αθήνα
MAYROMIXALHS Κ. Σπουδαστής, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 28ης Οκτωβρίου 29, 57500, Πλαγιάρι, Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η παρούσα εργασία μελετά την επίδραση της μεταβολής της γεωμετρίας των πρανών, καθώς ολισθαίνουν στις προβλέψεις της σεισμικής μετακίνησης με σπονδυλωτά προσομοιώματα. (α) Για απλοποιημένη γεωμετρία βρίσκεται ένας συντελεστής που περιγράφει την επίδραση. (β) Η επίδραση αυτή διερευνάται για γεωμετρία δύο σωμάτων με την εκτέλεση παραμετρικών αναλύσεων και με τη βοήθεια του προγράμματος multi-block. Με βάση τα (α) και (β) διαμορφώνονται αναλυτικές σχέσεις που περιγράφουν την επίδραση και διορθώνουν τις προβλέψεις της σεισμικής μετακίνησης με τη μέθοδο Newmark.

ABSTRACT: The paper studies the effect of the change in geometry of slopes during their movement in the seismic displacement and predicted by multi-block models. (a) For a simple geometry, a factor that describes this effect is derived. (b) This effect is studied for a geometry of two blocks with parametric analyses using the computer program associated with the Multi-Block model. Based on (a) and (b) analytical equations that describe this effect that correct Newmark's sliding block seismic displacement are formulated.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος ολίσθησης σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο (μέθοδος Newmark, 1965) αποτελεί την βάση απλών μεθόδων που υπολογίζουν την σεισμική μετακίνηση φυσικών πρανών και εδαφικών κατασκευών: Ένα σώμα με αντοχή κατά Mohr-Coulomb βρίσκεται πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο στο οποίο ασκείται οριζόντια σεισμική επιτάχυνση. Κρίσιμη επιτάχυνση ορίζεται ως η οριζόντια επιτάχυνση για την οποία επικρατεί οριακή ισορροπία και κατά την οποία οι δυνάμεις αντίστασης μόλις που μπορούν να αποτρέψουν την κίνηση της μάζας και επομένως την αστοχία. Τις στιγμές που η σεισμική επιτάχυνση ξεπερνά την κρίσιμη επιτάχυνση το σώμα ολισθαίνει. Η συνολική μετακίνηση είναι το άθροισμα των επιμέρους ολισθήσεων. Η σεισμική μετακίνηση πρανών και εδαφικών κατασκευών

υπολογίζεται με τη μέθοδο Newmark λαμβάνοντας σώμα σε κεκλιμένο επίπεδο με κρίσιμη επιτάχυνση και ασκούμενη επιτάχυνση ίσες με αυτές του πρανού (Kramer, 1996).

Η μέθοδος δεν περιγράφει την μεταβολή της γεωμετρίας του πρανού προς περισσότερο ευσταθή θέση που επηρεάζει τις προβλέψεις, όταν η σεισμική μετακίνηση είναι 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 περισσότερο γενικό προσομοίωμα ως προς την γεωμετρία είναι αυτό των Sarma and Chlimintzas (2001). Το ολισθαίνον σώμα χωρίζεται σε n σώματα που η μάζα τους μεταβάλλεται συναρτήσει της διανυόμενης απόστασης. Η μέθοδος περιγράφει την

μεταβολή της γεωμετρίας του πρσανούς προς περισσότερο ευσταθή θέση.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η επίδραση της μεταβολής της γεωμετρίας του πρσανούς κατά την ολίσθηση στις προβλέψεις της σεισμικής μετακίνησης με μοντέλα Mohr-Coulomb και διαμορφώνονται γραφήματα που διορθώνουν τις προβλέψεις της μεθόδου Newmark. Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι η ακόλουθη: 1. Αναλυτική διερεύνηση της επίδρασης: Διαμορφώνονται συντελεστές που περιγράφουν την επίδραση για απλές γεωμετρίες. 2. Αριθμητική διερεύνηση της επίδρασης: Εξετάζονται παραμετρικά διαφορετικές γεωμετρίες πρσανών με το πρόγραμμα multi-block με και χωρίς μεταβολή μάζας με την διανυόμενη απόσταση. 3. Διαμόρφωση γραφημάτων που διορθώνουν τις προβλέψεις της μεθόδου ολίσθησης σώματος-σε-κεκλιμένο-επίπεδο (Newmark), βάσει των αναλυτικών συντελεστών που διαμορφώθηκαν στο 1 και των αριθμητικών αναλύσεων του 2.

2. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Παρόμοια με τη μέθοδο ευστάθειας του Sarma (1979), που δίδεται στο Σχ. 1, λαμβάνεται γενική μάζα που ολισθαίνει σε επιφάνεια ολίσθησης η οποία αποτελείται από n ευθύγραμμα τμήματα. Για να κινηθεί η μάζα, στους κόμβους μεταξύ των ευθυγράμμων τμημάτων, δημιουργούνται διεπιφάνειες που ασκούνται δυνάμεις αντίστασης, συνεπώς η μάζα διαχωρίζεται σε n σώματα που ολισθαίνουν σε n διαφορετικά επίπεδα. Στις διεπιφάνειες η ταχύτητα είναι συνεχής και αυτή η προϋπόθεση δίδει τη γεωμετρική συσχέτιση της μετακίνησης μεταξύ διαδοχικών σωμάτων.

Κατά τη διάρκεια της ολίσθησης το έδαφος θεωρείται ότι συμπεριφέρεται σύμφωνα με το νόμο Mohr-Coulomb τόσο στην επιφάνεια ολίσθησης, όσο και στις διεπιφάνειες μεταξύ των διαδοχικών σωμάτων. Η εξίσωση της κίνησης που υπολογίζεται, όταν ασκείται σεισμική διέγερση με οριζόντια επιτάχυνση $g^*k(t)$, όπου g είναι η επτάχυνση της βαρύτητας δίδεται από τους Sarma and Chlimitzas (2001):

$$\ddot{u}(t) \cdot \sum_{i=1}^n \left(m_i q_i \cos(\phi'_i) \cdot \prod_{j=i}^{n-1} \frac{\bar{d}_{j+1}}{\bar{f}_j} \right) = \sum_{i=1}^{n-1} \left([-\bar{c}'_i b_i \cos(\bar{\phi}'_i) + \bar{U}_i \sin(\bar{\phi}'_i)] \cdot \frac{\bar{s}_i}{\bar{f}_i} \cdot \prod_{j=i+1}^{n-1} \frac{\bar{d}_{j+1}}{\bar{f}_j} \right) + \sum_{i=1}^n \left(\left\{ \bar{x}_i [m_i g k(t) + H_i] - \bar{v}_i [m_i g + Q_i] - \bar{c}'_i l_i \cos(\phi'_i) + \right. \right. \\ \left. \left. U_i \sin(\phi'_i) \right\} \cdot \prod_{j=i}^{n-1} \frac{\bar{d}_{j+1}}{\bar{f}_j} \right) \quad (1)$$

όπου

$$\begin{aligned} \bar{s}_i &= \sin(\beta_{i+1} - \beta_i + \phi'_i - \phi'_{i+1}) \\ \bar{f}_i &= \cos(\phi'_i + \bar{\phi}'_i - \beta_i - \delta_i) \\ \bar{d}_i &= \cos(\phi'_i + \bar{\phi}'_{i-1} - \beta_i - \delta_{i-1}) \\ \bar{x}_i &= \cos(\phi'_i - \beta_i) \\ \bar{v}_i &= \sin(\phi'_i - \beta_i) \\ q_i &= \prod_{j=i}^{n-1} \frac{\cos(\beta_{j+1} + \delta_j)}{\cos(\beta_j + \delta_j)} \end{aligned}$$

όπου u είναι η μετακίνηση του άνω σώματος (σώμα n), λαμβάνοντας κατωφερική μετακίνηση θετική, β_i είναι η κλίση του τμήματος της επιφάνειας ολίσθησης με την οριζόντιο, θετική στη διεύθυνση που είναι αντίθετη με τη φορά του ρολογιού, δ_i είναι η κλίση που η διεπιφάνεια i σχηματίζει με την κατακόρυφο, θετική στη διεύθυνση της φοράς του ρολογιού, ϕ'_i είναι η αντίσταση τριβής του i τμήματος της επιφάνειας ολίσθησης, $c'_i l_i$ είναι η δύναμη ανά μονάδα μήκους (κάθετη στο χαρτί) λόγω της συνοχής κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης του σώματος i , $\bar{\phi}'_i$ είναι η αντίσταση τριβής της i εσωτερικής διεπιφάνειας (μεταξύ των σωμάτων i και $i+1$), $\bar{c}'_i l_i$ είναι η δύναμη ανά μονάδα μήκους λόγω της συνοχής της i εσωτερικής διεπιφάνειας, m_i είναι η μάζα του σώματος i ανά μονάδα μήκους, Q_i είναι η κατακόρυφη εξωτερική δύναμη στο σώμα i , θετική κατωφερικά, H_i είναι η οριζόντια εξωτερική δύναμη στο σώμα i , θετική στην κατωφερική διεύθυνση της ολίσθησης, U_i είναι η δύναμη που ασκείται στο σώμα, κάθετα και κατά μήκος της βάσης του λόγω της πίεσης πόρων και \bar{U}_i είναι η δύναμη που ασκείται στο σώμα λόγω της πίεσης πόρων, κάθετα και κατά μήκος της i εσωτερικής διεπιφάνειας.

Η σχέση (1) μπορεί να διατυπωθεί ως

$$\ddot{u}_1 = Z_1 g (k(t) - k_c) \quad (2)$$

όπου

$$Z_1 = \frac{\{-\bar{x}_i(m_i g)\} \cdot \prod_{j=i}^{n-1} \frac{\bar{d}_{j+1}}{\bar{f}_j}}{\sum_{i=1}^n \left(m_i q_i \cos(\varphi'_i) \cdot \prod_{j=i}^{n-1} \frac{\bar{d}_{j+1}}{\bar{f}_j} \right)}$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \left(\left[\bar{c}'_i b_i \cos(\bar{\varphi}'_i) - \bar{U}_i \sin(\bar{\varphi}'_i) \right] \cdot \frac{\bar{s}_i}{\bar{f}_i} \cdot \prod_{j=i+1}^{n-1} \frac{\bar{d}_{j+1}}{\bar{f}_j} \right) +$$

$$k_c = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left\{ \begin{array}{l} -\bar{x}_i(H_i) + \bar{v}_i [m_i g + Q_i] \\ + c'_i l_i \cos(\varphi'_i) \\ - U_i \sin(\varphi'_i) \end{array} \right\} \cdot \prod_{j=i}^{n-1} \frac{\bar{d}_{j+1}}{\bar{f}_j} \right)}{\{-\bar{x}_i(m_i g)\} \cdot \prod_{j=i}^{n-1} \frac{\bar{d}_{j+1}}{\bar{f}_j}}$$

όπου Z_1 είναι ένας συντελεστής και $(k_c g)$ είναι η κρίσιμη επιτάχυνση, που ορίζεται ως η ελάχιστη οριζόντια επιτάχυνση που απαιτείται για να μετακινηθεί η ολίσθηση.

Για να επιλυθεί η εξίσωση ισορροπίας για μεγάλη μετακίνηση, οι μάζες και τα μήκη του κάθε σώματος i επαναυπολογίζονται συναρτήσει της απόστασης που διανύεται. Θεωρείται ότι η θέση των κόμβων της επιφάνειας ολίσθησης και των εσωτερικών διεπιφανειών δεν αλλάζει. Στην περίπτωση που η μετακίνηση u είναι μικρότερη από την αρχική τιμή του μήκους l_n η μεταβολή των μηκών l_i σε κάθε διάστημα Δu ισούται με

$$\Delta l_1 = \Delta u \cdot q \quad (3)$$

$$\Delta l_n = -\Delta u$$

$$\Delta l_2 = \Delta l_3 = \dots = \Delta l_{n-1} = 0.$$

Επιπροσθέτως, η μεταβολή στα μήκη των εσωτερικών επιφανειών b_i είναι

$$\Delta b_i = \frac{\sin \theta_i}{\cos(\theta_i + \beta_i + \delta_i)} \cdot q_i \Delta u_i \quad (4)$$

Η μεταβολή των μαζών μπορεί να υπολογισθεί ως:

$$\Delta m_i = \Delta A_i \cdot \rho_{i+1} \quad (6)$$

όπου ρ_{i+1} είναι το (ολικό) ειδικό βάρος του σώματος $i+1$ και η μεταβολή των επιφανειών του σώματος i , ΔA_i , είναι:

$$\Delta A_i = b_{(i+1)0} \cdot \cos(\beta_{i+1} + \delta_{i+1}) \cdot q_i \Delta u_i +$$

$$\frac{0.5 \cdot \cos(\beta_{i+1} + \delta_{i+1}) \cdot \sin \theta_{i+1}}{\cos(\theta_{i+1} + \beta_{i+1} + \delta_{i+1})} \cdot (q_i \Delta u_i)^2$$

$$- b_{i0} \cdot \cos(\beta_i + \delta_i) \cdot q_i \Delta u_i - \quad (5)$$

$$\frac{0.5 \cdot \cos(\beta_i + \delta_i) \cdot \sin \theta_i}{\cos(\theta_i + \beta_i + \delta_i)} \cdot (q_i \Delta u_i)^2$$

Η παραμόρφωση που αυτές οι σχέσεις προβλέπουν για σύστημα δύο σωμάτων παρουσιάζεται στο Σχ. 2.

Για πολύ μικρή μετακίνηση η εξίσωση (2) μπορεί να προσεγγισθεί ως

$$\ddot{u}_1 = Z_{1-0} g (k(t) - k_{c-0}) \quad (7)$$

όπου Z_{1-0} και k_{c-0} είναι οι συντελεστές Z_1 και k_c , οι οποίοι δίδονται από τη σχέση (2), όταν τα l_i , b_i , και m_i ισούνται με τις αρχικές τιμές τους l_{i-0} , b_{i-0} και m_{i-0} .

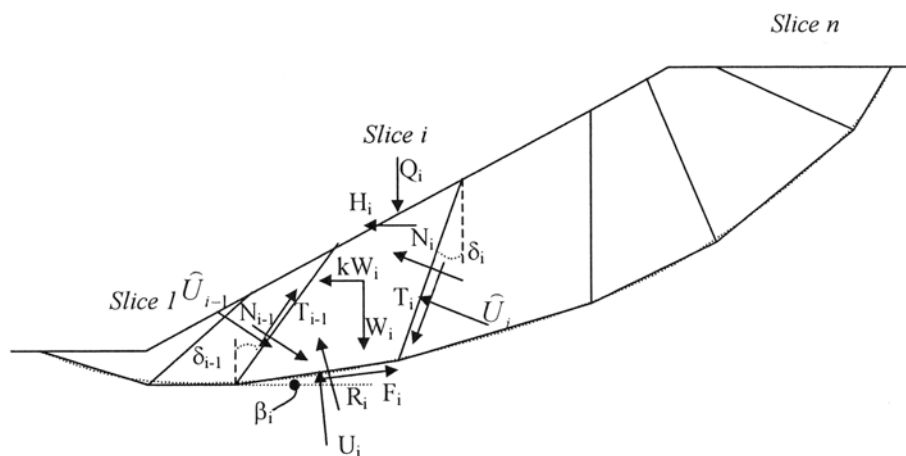
Σε αυτό το σημείο μπορεί να αναφερθεί ότι, όπως αναφέρεται και στον Σταματόπουλο (2003) η γενική εξίσωση της κίνησης της προσομοίωσης ολίσθησης σώματος-σε-κεκλιμένο-επίπεδο (Newmark) δίνεται από τη σχέση (7) με:

$$Z_{1-0} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \beta}{\cos \phi}$$

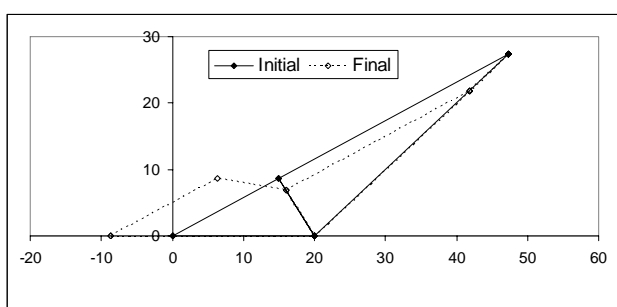
$$k_{c-0} = \frac{mg \sin(\phi - \beta) + cl \cos \phi}{mg \cos(\phi - \beta)} \quad (8)$$

όπου β είναι η κλίση του επιπέδου, ϕ και c είναι η τριβή και συνοχή στην επιφάνεια ολίσθησης, l είναι το μήκος του σώματος και m η μάζα του. Παρατηρείται ότι η σπονδυλωτή προσομοίωση για μικρή μετακίνηση έχει την μορφή της προσομοίωσης ολίσθησης σώματος-σε-κεκλιμένο-επίπεδο. Μια ισοδύναμη κλίση και αντοχή μπορεί να βρεθεί με ισοδύναμη συμπεριφορά.

Από τον Σταματόπουλο έχει αναπτυχθεί πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή (το πρόγραμμα multi-block), με το οποίο επιλύονται οι σχέσεις (2)–(6) (Σταματόπουλος και Αναϊρούσης, 2008)



Σχήμα 1. Η μέθοδος ευστάθειας multi – block που έχει προταθεί από τον Sarma (1979).
Fig. 1. The multi-block method that has been proposed by Sarma (1979).



Σχήμα 2. Παραμόρφωση που προβλέπει το προσομοίωμα για την περίπτωση δύο σωμάτων.
Fig. 2. The deformation that the method predicts for the case of two blocks

3. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΓΙΑ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Επιλογή απλοποιημένης γεωμετρίας

Η εξίσωση της κίνησης της σπονδυλωτής προσομοίωσης απλοποιείται δραστικά εάν (α) $\varphi_i=0$, (β) $\delta_i=-(\beta_i+\beta_{i-1})/2$, (γ) $\theta_1=\theta_2=\dots=0$, (δ) η ακριανή πλευρά του πρώτου σώματος είναι παράλληλη με την ακριανή πλευρά στο τελευταίο σώμα, (ε) δεν υπάρχουν υπερπίεσεις πόρων και εξωτερικές δυνάμεις. Η συνθήκη (β) σημαίνει ότι οι εσωτερικές διεπιφάνειες διχοτομούν τις γωνίες που σχηματίζει η επιφάνεια ολίσθησης. Η συνθήκη (γ) δίδει ότι η επιφάνεια του εδάφους είναι παράλληλη με την επιφάνεια ολίσθησης. Λόγω των συνθηκών (α) και (β):

$$i=1, \quad \cos(\varphi_i)=1, \quad \prod_{j=i}^{n-1} \frac{\bar{d}_{j+1}}{\bar{f}_j}=1, \quad (9)$$

$$\bar{v}_i = -\sin(\beta_i) \bar{x}_i = \cos(\beta_i),$$

$$\bar{s}_i = \sin(\beta_{i+1} - \beta_i), \quad \bar{f}_i = \cos(-\beta_i - \delta_i)$$

Λόγω των συνθηκών (γ) και (δ)

$$l_1 = l_{10} + u \quad (10)$$

$$l_n = l_{n0} - u$$

όπου l_{1-0} και l_{n-0} είναι οι αρχικές τιμές των l_1 και l_n . Επίσης τα μήκη l_2, l_3, \dots, l_{n-1} , καθώς και τα εσωτερικά μήκη b_i δε μεταβάλλονται. Επίσης, οι μάζες των σπονδύλων ισούνται με:

$$m_1 = m_{1-0} + u \rho b_{20} \cos(\beta_2 + \delta_2) = m_{10} + u m_{tot} / l \quad (12)$$

$$m_n = m_{n-0} - u m_{tot} / l$$

όπου l είναι το μήκος της επιφάνειας ολίσθησης και m_{1-0} και m_{n-0} είναι οι αρχικές τιμές των m_1 και m_n . Επιπροσθέτως, οι μάζες m_2, m_3, \dots, m_{n-1} δε μεταβάλλονται.

Άρα, αντικαθιστώντας τη μεταβολή των μαζών και μηκών και λαμβάνοντας υπόψη και τις συνθήκες (ε) και (ζ) στην εξίσωση της κίνησης έχουμε

$$\ddot{u}(t) = \sum_{i=1}^{n-1} \left([\bar{c}_i b_i] \cdot \frac{\bar{s}_i}{\bar{f}_i} \right) / m_{total} +$$

$$\sum_{i=1}^n \left((m_{i-0} g (-k \cos \beta_i + \sin \beta_i)) + c_i l_i \right) / m_{total}$$

$$+ u \cdot g \{ -k (\cos \beta_1 - \cos \beta_n) + \sin \beta_1 - \sin \beta_n \} / l \quad (12)$$

Εάν δε η μεταβολή των μαζών και μηκών δεν ληφθεί υπόψη, η εξίσωση της κίνησης διαμορφώνεται ως

$$\ddot{u}(t) = \sum_{i=1}^{n-1} \left([\bar{c}_i' b_i] \cdot \frac{\bar{s}_i}{\bar{f}_i} \right) / m_{total} + \sum_{i=1}^n \{ (m_{i-o} g (-k \cos \beta_i + \sin \beta_i)) + c_i' l_i \} / m_{total} \quad (13)$$

Παράγοντες που επηρεάζουν τη λύση

Αναφέρθηκε προηγουμένως ότι η εξίσωση της κίνησης της σπονδυλωτής προσομοίωσης για μικρή μετακίνηση έχει τη μορφή της προσομοίωσης ολίσθησης σώματος-σε-κεκλιμένο επίπεδο. Επιπροσθέτως, στην περίπτωση μεγάλης μετακίνησης και απλοποιημένης γεωμετρίας η σχέση (12) δείχνει ότι η εξίσωση της κίνησης μεταβάλλεται (σχετικά με την περίπτωση μικρής μετακίνησης ή χωρίς μεταβολή μηκών και μαζών) με το συντελεστή

$$K = u \cdot g \{ -k(\cos \beta_1 - \cos \beta_n) + \sin \beta_1 - \sin \beta_n \} / l \quad (14)$$

Τα αποτελέσματα θα διατυπωθούν ως ο λόγος (u_f/u_{f-o}), όπου u_f είναι η συνολική μετακίνηση του σπονδυλωτού προσομοιώματος λόγω της σεισμικής διέγερσης, ενώ u_{f-o} είναι η αντίστοιχη μετακίνηση εάν η μεταβολή μαζών και μηκών δε ληφθεί υπόψη. Η εξίσωση (2) δείχνει ότι εάν η μεταβολή μαζών και μηκών δε ληφθεί υπόψη η λύση εξαρτάται από τους συντελεστές $k(t)$, k_{c-o} , Z_{1-o} . Επιπροσθέτως, η εξίσωση (12) δείχνει ότι όταν λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή μαζών και μηκών, η σεισμική μετακίνηση του σπονδυλωτού προσομοιώματος για την απλοποιημένη γεωμετρία εξαρτάται όχι μόνον από τους συντελεστές (α) $k(t)$, (β) k_{c-o} , (γ) Z_{1-o} , αλλά και από τους συντελεστές (δ) $\{u(\sin \beta_n - \sin \beta_1)/l\}$, (ε) $\{uk(t)(\cos \beta_n - \cos \beta_1)/l\}$. Άρα, η μεταβολή της γεωμετρίας επηρεάζει την διαφορική εξίσωση κυρίως με τους συντελεστές (α) $\{u_1(\sin \beta_n - \sin \beta_1)/l\}$, (β) $\{u_1 k(t)(\cos \beta_n - \cos \beta_1)/l\}$.

Εξετάζεται η συσχέτιση (i) του συντελεστή ($\sin \beta_n - \sin \beta_1$) και (ii) του συντελεστή ($\cos \beta_n - \cos \beta_1$) με το συντελεστή ($\beta_n - \beta_1$). Ως β_1

λαμβάνονται οι τιμές 0 ως 40° και ως β_n οι τιμές 0 ως 45° ανά 5 μοίρες, με την προϋπόθεση ότι $\beta_n > \beta_1$. Τα αποτελέσματα δίδονται στο Σχ. 3. Παρατηρείται ότι ο συντελεστής ($\sin \beta_n - \sin \beta_1$) έχει ισχυρή συσχέτιση με το συντελεστή ($\theta_1 - \theta_n$). Αυτό ισχύει (αλλά σε μικρότερο βαθμό), και με το συντελεστή ($\cos \beta_n - \cos \beta_1$). Επίσης παρατηρείται ότι ($\sin \beta_n - \sin \beta_1$) > 2 ($\cos \beta_n - \cos \beta_1$). Επίσης, ο συντελεστής k κυμαίνεται συνήθως μεταξύ των τιμών +/-0.5. Συμπεραίνεται ότι ο πρώτος συντελεστής επηρεάζει σε σημαντικότερο βαθμό από το δεύτερο τη λύση.

Βάσει των παραπάνω, συμπεραίνεται ότι ο συντελεστής

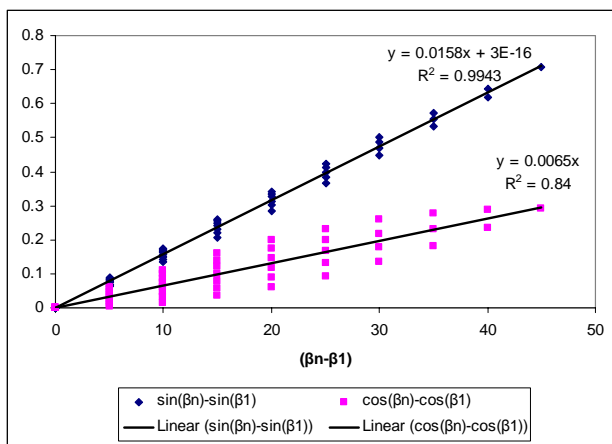
$$L = u(\beta_n - \beta_1) / l \quad (15)$$

επηρεάζει το λόγο (u_f/u_{f-o}) που ορίστηκε παραπάνω. Ο συντελεστής L εξαρτάται από την γεωμετρία του πρηνούς και τη σεισμική μετακίνηση. Ειδικότερα, η γεωμετρία επηρεάζει το συντελεστή μέσω του μήκους της επιφάνειας ολίσθησης και της διαφοράς της κλίσης του άνω και κάτω τμήματος της επιφάνειας ολίσθησης. Παρατηρείται ότι ο συντελεστής ισούται με μηδέν όταν (i) η σεισμική μετακίνηση είναι μηδενική, (ii) το μήκος της επιφάνειας ολίσθησης είναι τεράστιο και (γ) η διαφορά της κλίσης του άνω και κάτω τμήματος της επιφάνειας ολίσθησης είναι μηδενική. Πράγματι, σε αυτές τις τρεις περιπτώσεις δεν υπάρχει επίδραση της μεταβολής της μάζας κατά την ολίσθηση στη σεισμική μετακίνηση.

Επιπροσθέτως, μία πρακτική προσέγγιση του συντελεστή (15) είναι ο συντελεστής

$$F = u_{f-o}(\beta_n - \beta_1) / l \quad (16)$$

όπου u_{f-o} ορίστηκε προηγουμένως ως η συνολική μετακίνηση που προβλέπεται στην περίπτωση που η μεταβολή των μαζών και μηκών δε λαμβάνεται υπόψη.



Σχήμα 3. Η συσχέτιση των συντελεστών (i) $(\sin\beta_n - \sin\beta_1)$ και (ii) $(\cos\beta_n - \cos\beta_1)$ με τον συντελεστή $(\beta_n - \beta_1)$.

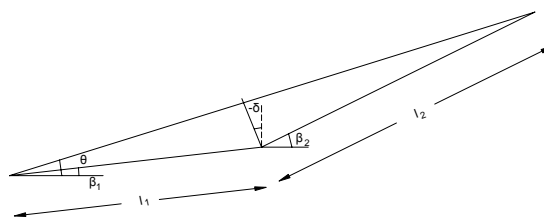
Fig. 3. The correlation of the factors (i) $(\sin\beta_n - \sin\beta_1)$ and (ii) $(\cos\beta_n - \cos\beta_1)$ with the factor $(\beta_n - \beta_1)$.

4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Ο τρόπος που ο συντελεστής F της σχέσης (16) επηρεάζει το λόγο (u_f/u_{f-o}) μελετήθηκε με εφαρμογή του προγράμματος multi-block (ενότητα 2) στη γεωμετρία δύο σωμάτων του Σχ. 4. Από το Σχήμα 4 φαίνεται ότι η γεωμετρία καθορίζεται από τις παραμέτρους $\beta_1, \beta_2, \delta, \theta, l$ ($l=l_1+l_2$), φ, c . Όλες αυτές οι παράμετροι μεταβλήθηκαν παραμετρικά. Η αρχική και κύρια περίπτωση που εξετάστηκε είχε $\delta=-10^\circ, \beta_1=5^\circ, \beta_2=40^\circ, \theta=30^\circ, l=20m$ Για όλες τις άλλες περιπτώσεις των παραμετρικών αναλύσεων μόνο μία παράμετρος μεταβλήθηκε. Σε όλες τις περιπτώσεις ασκήθηκε το επιταχυνσιογράφημα El-Centro και θεωρήθηκε ομοιόμορφη αντοχή. Ο πίνακας 1 δίδει τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

Η διαδικασία επίλυσης είναι η ακόλουθη: Αρχικά ετοιμάζουμε το αρχείο για εισαγωγή στο πρόγραμμα multi-block της γεωμετρίας που εξετάζουμε. Στη συνέχεια για $\varphi=0$ υπολογίζουμε την οριακή τιμή του c , δηλαδή τη μέγιστη τιμή του c που δίνει θετική κρίσιμη επιτάχυνση (δηλαδή στην περίπτωση χωρίς σεισμό μηδενική μετακίνηση). Η τιμή της κρίσιμης επιτάχυνσης πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 0 και 0.01g. Έπειτα ανεβάζουμε την τιμή της συνοχής c κατά μικρά διαστήματα πολλαπλασιάζοντάς την με 1.05 κάθε φορά. Όταν η κρίσιμη επιτάχυνση a_c ξεπεράσει τη μέγιστη επιτάχυνση a_{max} της δόνησης που ασκείται στο πρηνές, τότε η ανάλυση σταματά. Για κάθε μία περίπτωση καταγράφονται οι τελικές μετακινήσεις u_f και u_{f-o} για τις περιπτώσεις που η μεταβολή της γεωμετρίας

των σπονδύλων λαμβάνεται και δε λαμβάνεται υπόψη αντίστοιχα.



Σχήμα 4. Γεωμετρία δύο σωμάτων που εξετάζεται παραμετρικά

Fig 4. The geometry of two blocks that is studied in a parametric fashion.

5. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΣΧΕΣΗ

Όσον αφορά τα αποτελέσματα, δηλαδή τον λόγο (u_f/u_{f-o}) συναρτήσει του συντελεστή F πρώτα παρατηρούμε ότι: (α) για μικρές τιμές του συντελεστή $F=u_{f-o}(\beta_2-\beta_1)/l$, η συνάρτηση (u_f/u_{f-o}) είναι κοντά στη μονάδα και (β) για τιμές του συντελεστή F μεγαλύτερες από μία τιμή, η συνάρτηση (u_f/u_{f-o}) μειώνεται από τη μονάδα προς το μηδέν με μορφή S σε λογαριθμική κλίμακα. Τα αποτελέσματα μπορούν να περιγραφούν με τη σχέση:

$$(u_f/u_{f-o}) = 0,5[1 + \tanh(\ln(A/F)^B)] \quad (18)$$

όπου A, B είναι παράμετροι που υπολογίζονται για τη βέλτιστη συσχέτιση.

Ο πίνακας 1 δείχνει ότι η καμπύλη, δηλαδή οι παράμετροι A και B μεταβάλλονται με την παράμετρο l , ενώ η επίδραση των άλλων παραμέτρων είναι ελάχιστη. Επομένως, τα αποτελέσματα του δεν μπορούν να προσεγγιστούν απόλυτα από μία και μόνο καμπύλη, και οι συντελεστές A και B πρέπει να ληφθούν συναρτήσει του l . Στο Σχήμα 5 αποτυπώνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων με μεταβολή των παραμέτρων $\beta_1, \beta_n, c, \delta$ και θ . Δεν συμπεριλαμβάνονται τα αποτελέσματα με μεταβολή του μήκους l , που λαμβάνεται ως 20m. Η υπολογισθείσα (P) με τη σχέση (18) και $A=1.5, B=0.56$, συναρτήσει των πραγματικών (X) τιμών της σεισμικής μετακίνησης της προσομοίωσης ολίσθησης σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο δίδονται στο σχήμα.

Πίνακας 1. Παραμετρική ανάλυση της γεωμετρίας του Σχ. 4 και αριθμός τιμών (N) και συσχέτιση (συντελεστής C και συντελεστής συσχέτισης R²) της αναλυτικής σχέσης για κάθε περίπτωση.

Table 1. Parametric analysis of the geometry of Fig. 4 and number of values (N), and correlation (the factor C and the coefficient of correlation R²) of the analytical relationship for every case

Παρά-μετρος	Τιμή	Σχέση (18), με A=1.5, B=0.56			Σχέσεις (18), (20)		
		C	R ²	N	C	R ²	N
β ₁ (°)	-30	0.99	1.00	10	1.00	1.00	81
	-20	0.99	1.00	10			
	-10	1.00	1.00	10			
	0	1.00	1.00	10			
	5	0.99	1.00	11			
	10	1.00	1.00	10			
	20	1.00	0.99	10			
29	1.00	0.99	10				
β ₂ (°)	31	1.00	0.99	9	1.00	1.00	50
	40	0.99	1.00	11			
	50	1.00	1.00	10			
	60	1.00	1.00	10			
	70	1.00	1.00	10			
δ (°)	-40	0.99	0.99	11	1.00	1.00	88
	-30	0.99	1.00	11			
	-20	0.99	1.00	11			
	-10	0.99	1.00	11			
	0	0.99	1.00	11			
	10	1.00	1.00	11			
	20	1.01	0.99	11			
	30	1.01	0.98	11			
θ (°)	10	0.99	1.00	20	1.00	1.00	72
	15	0.99	1.00	17			
	20	0.99	1.00	14			
	25	1.00	1.00	12			
	35	1.00	1.00	9			
l (m)	10	0.99	1.00	10	1.00	1.00	61
	20	0.99	1.00	11			
	60	0.99	1.00	10			
	100	0.99	0.97	10			
	300	0.99	0.97	10			
	1000	0.98	0.93	10			
c (kPa) - (μεταβάλλεται το φ)	0	1.00	1.00	8	1.00	1.00	72
	2	1.00	1.00	11			
	4	1.00	1.00	14			
	6	1.00	1.00	19			
	8	1.00	1.00	20			

Επιπροσθέτως, συγκρίνεται η προβλεφθείσα (P) με την πραγματική (X) τιμή της σεισμικής μετακίνησης θεωρώντας γραμμική συσχέτιση:

$$P = C X \quad (19)$$

όπου C είναι ένας συντελεστής. Ο συντελεστής C, αλλά και ο συντελεστής συσχέτισης (R²) πρέπει να είναι κοντά στη μονάδα για ικανοποιητική πρόβλεψη. Όπως

λοιπόν φαίνεται από το Σχ. 5 το σύνολο των αποτελεσμάτων προσεγγίζεται ικανοποιητικά (C=0.9957 και R²=0.9969).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο ρόλος του μήκους της επιφάνειας ολίσθησης l μελετάται ξεχωριστά. Ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Για κάθε τιμή του l βρέθηκε η τιμή του συντελεστή A που περιγράφει καλύτερα τα αποτελέσματα (πίνακας 2). Κατόπιν από γράφημα του A συναρτήσε του l (Σχ.6) υπολογίστηκε η βέλτιστη συσχέτιση ως {A= -0,3ln(b)+2,33} και παρατηρήθηκε ότι η συσχέτιση είναι ισχυρή (R²=0.96). Πρέπει να αναφερθεί ότι ο συντελεστής B παραμένει σταθερός και ίσος με 0.56. Άρα, τελικά προτείνονται για τους συντελεστές A και B της σχέσης (18) οι τιμές

$$A = (-0.3 \ln(l) + 2.33), \quad B = 0.56. \quad (20)$$

όπου το l είναι σε m

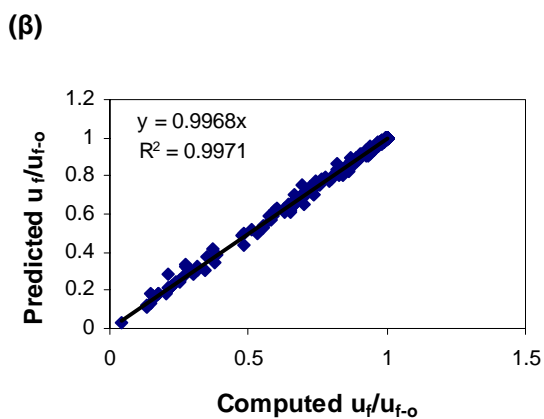
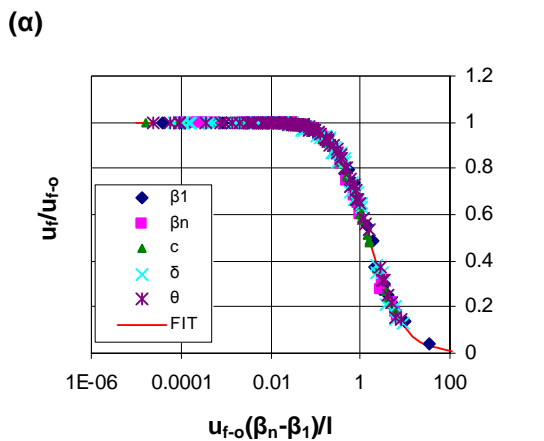
6. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η εξίσωση (18) με τους συντελεστές A και B με τις εξισώσεις (20) επαληθεύονται στον πίνακα 1. Για κάθε περίπτωση των β₁, β₂, θ, c, δ, l που εξετάστηκε δίδεται ο αριθμός τιμών (N) και η συσχέτιση (συντελεστής C και συντελεστής συσχέτισης R²). Για όλες τις περιπτώσεις η συσχέτιση είναι ισχυρή, καθώς οι συντελεστές C και R² προσεγγίζουν ή είναι ίσοι με τη μονάδα.

Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε μόνον το επιταχυνσιογράφημα EI-Centro και η γεωμετρία του Σχ. 4. Πριν την εφαρμογή των σχέσεων για οποιοδήποτε πρηνές και σεισμό χρειάζεται να εξετασθεί η ικανότητα των εξισώσεων (18), (20) να περιγράψουν την επίδραση της μεταβολής της γεωμετρίας στη σεισμική μετακίνηση που προβλέπει η μέθοδος Newmark και για άλλους σεισμούς και άλλες γεωμετρίες πρηνών.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετάται η επίδραση της μεταβολής της γεωμετρίας του πρηνούς κατά την ολίσθηση στις προβλέψεις της σεισμικής μετακίνησης με μοντέλα Mohr-Coulomb και προτείνονται οι εξισώσεις (18) και (20) που διορθώνουν τις προβλέψεις της μεθόδου Newmark.

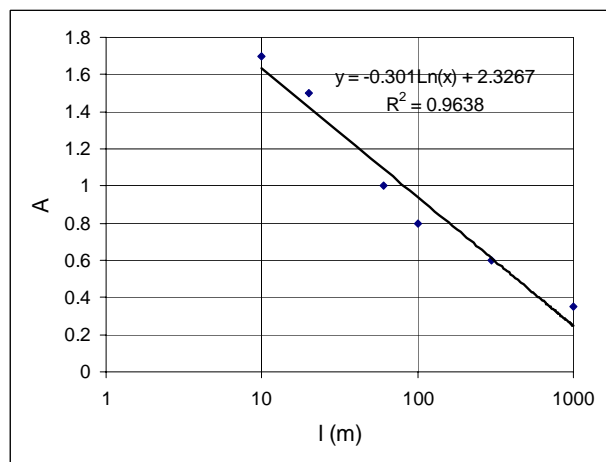


Σχήμα 5. Εύρεση των συντελεστών A και B και επιβεβαίωση των τιμών A=1.5, B=0.56. Εξετάζεται η απλοποιημένη γεωμετρία για l=20m και του σεισμού του El-Centro. Μελετώνται όλα τα ζεύγη τιμών του πίνακα 1 (πλην της επίδρασης του l).

Fig. 5. Estimation of the factors A and B and verification of the values A=1.5, B=0.56. The case of the simplified geometry for l=20m and the El-Centro earthquake. All cases of table 1 are studied (except from the effect of l).

Πίνακας 2. Βέλτιστος συντελεστής A για κάθε l της γεωμετρίας του Σχ. 4 και συσχέτιση (συντελεστής C, συντελεστής συσχέτισης R², αριθμός τιμών N) για κάθε περίπτωση Table 2. The optimum value of the factor A for every l of the geometry of Fig. 4 and correlation (factor C, coefficient of correlation R², number of values N) for each case

l (m)	A	C	R ²	N
10	1.7	0.99	1.00	10
20	1.5	0.99	1.00	11
60	1	1.00	0.99	10
100	0.8	0.99	0.99	10
300	0.55	1.00	0.99	10
1000	0.35	1.00	0.99	10



Σχήμα 6. Επίδραση του μήκους της επιφάνειας ολίσθησης στο συντελεστή A Fig. 6. The effect of the slip surface on the factor A.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Kramer S. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, 1996, pp 438-44
- Newmark, N. M. (1965). "Effects of earthquakes on dams and embankments." Geotechnique, 15(2), 139-159.
- 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. A., 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, Dec., pp 61-75.
- Σταματόπουλος Κ. Αναϊρούσης Σ. (2008) Ενσωμάτωση καταστατικών σχέσεων σε σπονδυλωτή προσομοίωση πρηνών και πρόβλεψη της σεισμικής μετακίνησης της ολίσθησης Nikawa, 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής, Αθήνα.