

Καταπόνηση Χ.Υ.Τ.Α. από επιβαλλόμενες μόνιμες μετακινήσεις ενεργών ρηγμάτων Distress of solid waste landfills due to permanent deformations induced during a fault rupture

Βαρβάρα ΖΑΝΙΑ¹, Γιάννης ΤΣΟΜΠΑΝΑΚΗΣ², Πρόδρομος ΨΑΡΡΟΠΟΥΛΟΣ³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η παρουσία ενεργών ρηγμάτων σε σεισμογενείς περιοχές και η ανάπτυξη μόνιμων εδαφικών παραμορφώσεων κατά την ενεργοποίησή τους είναι ιδιαίτερης σημασίας για τον ασφαλή σχεδιασμό μεγάλων τεχνικών έργων. Παρά ταύτα, οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί περιορίζονται σε οδηγίες που απλώς αφορούν τη χωροθέτηση μεγάλων γεωκατασκευών, όπως οι Χ.Υ.Τ.Α. Όμως, καθώς οι Χ.Υ.Τ.Α. αποτελούν γεωκατασκευές που καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις και η χωροθέτησή τους είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων, είναι πολύ πιθανόν να είναι αναπόφευκτη η γεινίαση τους με ενεργά ρήγματα. Στην εργασία αυτή ερευνάται η ευστάθεια των Χ.Υ.Τ.Α μετά από την επιβολή μόνιμων παραμορφώσεων που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρρηξη ενός ρήγματος. Για το σκοπό αυτό, διενεργήθηκαν διάστατες αριθμητικές αναλύσεις επίπεδης παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα πιστοποιούν τη σοβαρότητα του συγκεκριμένου προβλήματος και αναδεικνύουν τη σημαντική επίδραση των μόνιμων παραμορφώσεων στην εκτίμηση της ευστάθειας των εξεταζομένων γεωκατασκευών. Συμπερασματικά, ο αντισεισμικός σχεδιασμός των Χ.Υ.Τ.Α., καθώς και άλλων παρεμφερών τεχνικών έργων, θα πρέπει να λαμβάνει σοβαρά υπόψη και την ενδεχόμενη καταπόνηση λόγω της διάρρηξης ρηγμάτων.

ABSTRACT : The presence of potentially active faults in regions of high seismicity and the permanent deformations developed due to a fault movement have considerable importance in the design of infrastructures. Nevertheless, seismic norms incorporate provisions related mainly to the citation of geostuctures, such as solid waste landfills. Furthermore, waste containment systems are earth structures covering large areas and the selection of their location may be mandated by other socio-economical parameters. Therefore, the presence of active faults in their vicinity may not be possible to be avoided. The current study investigates the instability of landfills due to permanent deformations developed during a fault rupture. For this purpose, two-dimensional finite element analyses are performed, where the effect of permanent deformations on the stability of the earth structure is investigated. Results justify that the seismic design of waste landfills, and other similar earth structures (such as embankments), should take into account the result of an abrupt fault break.

¹ Υποψήφια Διδάκτωρ, Γενικό Τμήμα, Πολυτεχνείο Κρήτης, email: zaniab@tee.gr

² Επίκουρος Καθηγητής, Γενικό Τμήμα, Πολυτεχνείο Κρήτης, email: jt@science.tuc.gr

³ Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, Γενικό Τμήμα, Πολυτεχνείο Κρήτης, email: prod@central.ntua.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σεισμική τρωτότητα των μεγάλων τεχνικών έργων μπορεί να προκληθεί από δύο βασικούς μηχανισμούς καταπόνησης: την αδρανειακή και την κινηματική. Η πρώτη προκύπτει από τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων, ενώ η δεύτερη από τις μόνιμες επιβαλλόμενες μετακινήσεις, κυρίως λόγω της επιφανειακής διάρρηξης σεισμοτεκτονικών ρηγμάτων. Σε αρκετούς σύγχρονους αλλά και παλαιότερους σεισμούς έχει παρατηρηθεί ότι πολλές κατασκευές, όπως για παράδειγμα αγωγοί, γέφυρες, επιχώματα αλλά και κτιριακά έργα, εμφανίζουν αυξημένη τρωτότητα έναντι των μεγάλων επιβαλλόμενων μετακινήσεων που αναπτύσσονται κατά τη διάρρηξη ενός ρήγματος. Οι Kelson et al. (2001) παρουσιάζουν την επίδραση των αναπτυσσόμενων μετακινήσεων λόγω διάρρηξης του ανάστροφου ρήγματος Chelungpu κατά το σεισμό του Chi-Chi (1999, Taiwan). Στοιχεία για την επίδραση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης κατά τον σεισμό Landers (1992, California) αλλά και των Kocaeli και Duzce (1999, Turkey) παρατίθενται από τον Bray (2001). Έπειτα από τον σεισμό του Kocaeli, ο οποίος προκλήθηκε από διάρρηξη ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης (Ανατολίας), παρατηρήθηκαν επίσης επιφανειακές παραμορφώσεις κανονικής διάρρηξης με δυσμενείς επιπτώσεις σε κτιριακές κατασκευές (Anastasopoulos and Gazetas, 2007a & 2007b). Ακόμη, η δυσμενής επίδραση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης, που ενεργοποιήθηκε κατά τον σεισμό του San Fransisco (1906, California), σε αγωγούς, επιχώματα, φράγματα και κτίρια έχει αναλυθεί από τους Bray and Kelson (2006).

Ειδικά για τους Χ.Υ.Τ.Α., ο αντισεισμικός σχεδιασμός απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, κυρίως λόγω των δυσμενών περιβαλλοντικών και κοινωνικών επιπτώσεων που συνεπάγεται η εκδήλωση μίας ενδεχόμενης αστοχίας. Οι διεθνείς κανονισμοί (π.χ. EPA 1993), αναφέρουν ότι οι εν λόγω κατασκευές θα πρέπει να σχεδιάζονται κατά τέτοιο τρόπο, ούτως ώστε κατά την αδρανειακή καταπόνησή τους να διατηρείται η ευστάθειά τους, αλλά και η επάρκεια των επιμέρους συστημάτων τους. Όμως, όσον αφορά στη σεισμική διάρρηξη οι διατάξεις αναφέρονται απλώς στη χωροθέτηση της γεωκατασκευής, θέτοντας ως όριο την απόσταση των 60m από ρήγμα της ολοκαινικής περιόδου. Η χωροθέτηση ενός Χ.Υ.Τ.Α. αποτελεί ένα πρόβλημα που απαιτεί την συνεκτίμηση πολλών παραγόντων (όπως τοπογραφικών, γεωλογικών, υδρογεωλογικών και κοινωνικό-οικονομικών), καθιστώντας πιθανώς δυσχερή την ταυτόχρονη εκπλήρωση της απαίτησης της μη γειτνίασης με ενεργό ρήγμα. Επιπρόσθετη αβεβαιότητα στο ζήτημα αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι πολλά ρήγματα δεν έχουν επιφανειακή εκδήλωση ή δεν έχουν χαρτογραφηθεί. Είναι συνεπώς ανάγκη να διερευνηθεί η επίδραση της ανάπτυξης μετακινήσεων ενεργού ρήγματος σε μεγάλης κλίμακας γεωκατασκευές όπως είναι οι Χ.Υ.Τ.Α. και άλλα μεγάλα επιχώματα και φράγματα.

Η διερεύνηση του μηχανισμού διάδοσης των ρηγμάτων μέσω εδαφικών στρώσεων έχει συγκεντρώσει το επιστημονικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Σημαντικά ευρήματα έχουν βοηθήσει στην κατανόηση του μηχανισμού διάδοσης των διαφορετικών τύπων ρηγμάτων σε σχέση τόσο με τα χαρακτηριστικά τους, όσο και με τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους. Όσον αφορά τον τύπο του ρήγματος, εργασίες που βασίστηκαν σε παρατηρήσεις πεδίου (Bray et al., 1994a) αναφέρουν ότι τα ρήγματα *οριζόντιας ολίσθησης* διαδίδονται κατακόρυφα εντός της εδαφικής στρώσης και οι σχετικές μετακινήσεις περιορίζονται σε μικρού εύρους ζώνη. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι στα *ανάστροφα* ρήγματα η γωνία διάδοσης μειώνεται κοντά στην επιφάνεια, ενώ στα *κανονικά* ρήγματα η κλίση αυξάνει κατά τη διάδοση εντός της

εδαφικής στρώσης ακολουθώντας σχεδόν κατακόρυφη πορεία (Lade et al., 1984). Στα κανονικά ρήγματα, όταν η γωνία της διάρρηξης είναι μικρή, μία δευτερεύουσα επιφάνεια αστοχίας αναπτύσσεται, σχηματίζοντας ένα «κατακρήμνισμα» στην επιφάνεια. Τα τελευταία συμπεράσματα συμφωνούν και με τα αποτελέσματα πειραμάτων μικρής κλίμακας σε αμμώδη εδάφη των Cole και Lade (1984). Επιπλέον, επισημαίνεται ότι μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση (ως προς το πάχος της εδαφικής στρώσης) απαιτείται για την ανάδυση ενός ανάστροφου ρήγματος συγκριτικά με ένα κανονικό ρήγμα στην επιφάνεια. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν έπειτα από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και οι Duncan και Lefebvre (1983), αντιστοιχίζοντας την παθητική και ενεργητική αντίσταση του εδάφους με τη διάδοση του ανάστροφου και του κανονικού ρήγματος, αντίστοιχα.

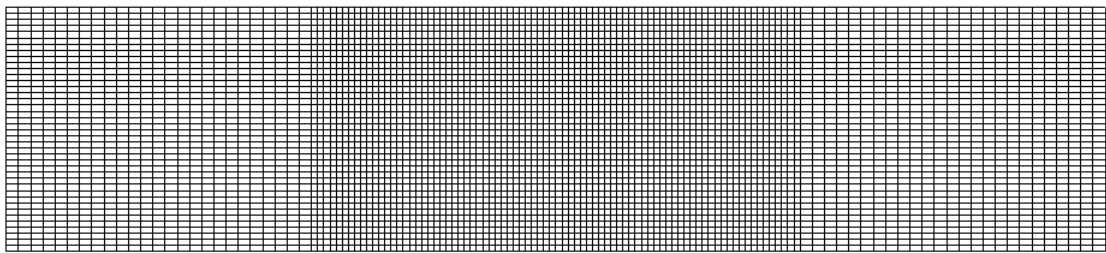
Ιδιαίτερα διαδεδομένη είναι και η χρήση αριθμητικών μεθόδων για την εξέταση του μηχανισμού της σεισμικής διάρρηξης. Οι δημοσιευμένες εργασίες με χρήση είτε της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Bray et al., 1994b; Lin et al., 2006; Anastasopoulos et al., 2007), είτε της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών (Loukidis and Bouckovalas, 2001; Papadimitriou et al., 2007) έχουν αποδείξει ότι η σωστή εφαρμογή τους απαιτεί την ικανοποιητική προσομοίωση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους, πυκνή διακριτοποίηση και ικανό μέγεθος καννάβου για την αποφυγή της επίδρασης των συνόρων. Στον αντίποδα, μη ρεαλιστικά αποτελέσματα προέκυψαν από τις πρώιμες αναλύσεις των Scott και Schoustra (1974) που χρησιμοποίησαν το τροποποιημένο κριτήριο Von Mises. Οι Bray et al. (1994b), αφού επαλήθευσαν την αριθμητική μεθοδολογία τους με πειράματα μικρής κλίμακας, απέδειξαν ότι η διάδοση ανάστροφων ρηγμάτων σε αργίλικα εδάφη συνοδεύεται από κάμψη της επιφάνειας του ανερχόμενου τεμάχους προς το κατερχόμενο. Η επίδραση της γωνίας διαστολικότητας και του μέτρου ελαστικότητας στη διάδοση ανάστροφων ρηγμάτων σε αμμώδη εδάφη αποδείχτηκε σημαντική (Lin et al., 2006). Σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις των Cole και Lade (1984), οι Anastasopoulos et al. (2007) συμπέραναν ότι απαιτούνται μικρότερες σχετικές μετακινήσεις για τη διάδοση της σεισμικής διάρρηξης στην περίπτωση κανονικού ρήγματος ή στην περίπτωση πυκνής άμμου από ότι στην περίπτωση ανάστροφου ρήγματος ή χαλαρής άμμου, αντίστοιχα. Τέλος, οι Papadimitriou et al. (2007) απέδειξαν ότι τα αντίστοιχα μεγέθη σε αργίλους είναι κατά πολύ μικρότερα από ότι σε πυκνές άμμους και είναι συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα χαλαρών άμμων.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται ο μηχανισμός διάδοσης της σεισμικής διάρρηξης ρήγματος εντός της απορριμματικής μάζας ενός Χ.Υ.Τ.Α. Για τον σκοπό αυτό διενεργήθηκαν αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία, τόσο για την περίπτωση ανάστροφου όσο και κανονικού ρήγματος, οι οποίες θεωρήθηκαν αρχικά οι πιο κρίσιμες περιπτώσεις για την ευστάθεια της γεωκατασκευής. Αρχικώς, η προτεινόμενη αριθμητική μεθοδολογία συγκρίθηκε ποιοτικά με τις παρατηρήσεις πεδίου και με μερικές από τις προαναφερθείσες αριθμητικές ερευνητικές εργασίες για την ανάλυση μίας εδαφικής στρώσης και στην συνέχεια επεκτάθηκε και σε Χ.Υ.Τ.Α. Στην ανάλυση της συμπεριφοράς ενός τυπικού υπέργειου Χ.Υ.Τ.Α. ερευνάται επιπροσθέτως και η επίδραση των κεκλιμένων συνόρων, δηλαδή των πρανών της. Στην παραμετρική διερεύνηση που διεξήχθη εξετάστηκε η ανάπτυξη των επιφανειακών παραμορφώσεων για τρεις περιπτώσεις κλίσης του ρήγματος (τόσο για κανονικό όσο και για ανάστροφο) σε δύο διαφορετικές θέσεις της βάσης της γεωκατασκευής.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

Όπως προαναφέρθηκε, στην πρώτη φάση της παρούσας διερεύνησης ελέγχθηκε η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με αποτελέσματα της σχετικής βιβλιογραφίας για την περίπτωση της διάδοσης ρήγματος σε μία εδαφική στρώση υπό «μονοδιάστατες» συνθήκες ελευθέρου πεδίου. Για την αριθμητική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (2004). Στο Σχήμα 1 διακρίνεται ο κάνναβος των πεπερασμένων στοιχείων επίπεδης παραμόρφωσης για το προσομοίωμα της εδαφικής στρώσης. Στο κεντρικό τμήμα πραγματοποιήθηκε πιο πυκνή διακριτοποίηση με τετραπλευρικά στοιχεία μεγέθους 0.5m×0.5m, ενώ στα ακραία τμήματα χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία μεγέθους 0.5m×1.0m. Για το μέγεθος του καννάβου τηρήθηκε η αναλογία 1:4 (H:V) που εν γένει θεωρείται αποδεκτή και από αντίστοιχες αριθμητικές αναλύσεις (Bray et al., 1994b; Anastasopoulos et al., 2007; Papadimitriou et al., 2007).

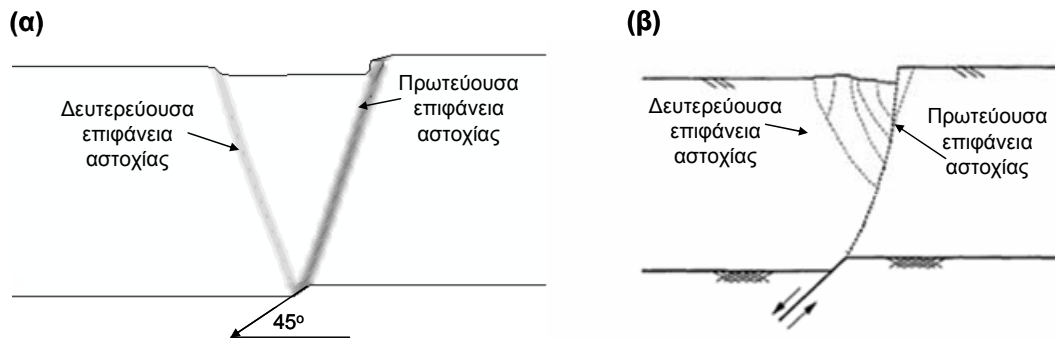
Η αριθμητική προσομοίωση που χρησιμοποιήθηκε για την περίπτωση της εδαφικής στρώσης είναι παρεμφερής με αυτή που εφαρμόστηκε από τους Anastasopoulos et al. (2007), η εγκυρότητα της οποίας έχει επαληθευθεί μέσω προβλέψεων πειραμάτων φυγοκεντριστή. Για την προσομοίωση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο Mohr-Coulomb, ενώ με την εφαρμογή μίας κατάλληλης υπορουτίνας στο λογισμικό ABAQUS προσομοιώθηκε η χαλάρωση του εδαφικού υλικού συναρτήσει της αναπτυσσόμενης πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα, οι παραμένουσες τιμές της γωνίας τριβής και διαστολικότητας είναι 30° και 0° αντίστοιχα, για τιμές της πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης μεγαλύτερες ή ίσες με 5%. Διερευνήθηκε η διάδοση κανονικού και ανάστροφου ρήγματος με γωνία κλίσης 45° εντός εδαφικού σχηματισμού πυκνής άμμου με γωνία τριβής 50° και γωνία διαστολικότητας 20°. Η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση θεωρήθηκε ίση με 1m και για τις δύο περιπτώσεις ρηγμάτων.



Σχήμα 1. Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων για το «μονοδιάστατο» προσομοίωμα ελευθέρου πεδίου που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο της αριθμητικής μεθοδολογίας.

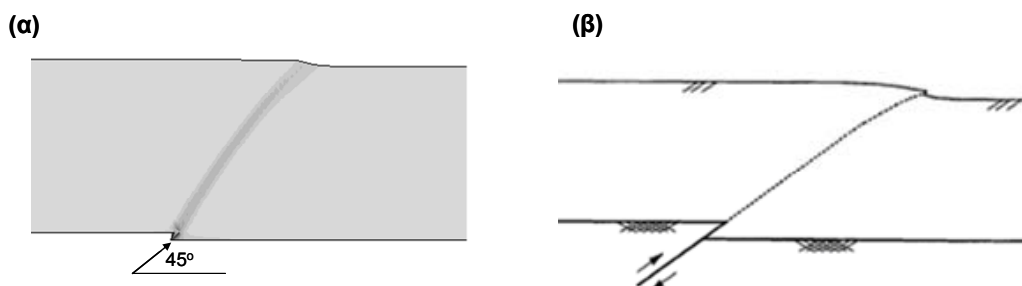
Στο Σχήμα 2 απεικονίζεται η επιφάνεια αστοχίας του κανονικού ρήγματος εντός του εδαφικού σχηματισμού, όπως προσδιορίστηκε από τις ισοϋψείς των πλαστικών παραμορφώσεων. Παρατίθεται, επίσης, και η μορφή αστοχίας που προέκυψε για κανονικά ρήγματα μικρής κλίσης και δύσκαμπτα εδάφη έπειτα από παρατηρήσεις πεδίου (Bray et al., 1994a). Από τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης προσδιορίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια η μορφή της επιφάνειας αστοχίας. Επίσης, η μετακίνηση που απαιτείται για την ανάδυση του ρήγματος στην επιφάνεια ($\delta/H \approx 1\%$) συμφωνεί με τα αποτελέσματα των Cole και Lade

(1984), ενώ οι γωνίες των επιφανειών αστοχίας στην επιφάνεια, όπως προέκυψαν από την παρούσα ανάλυση, είναι μεγαλύτερες. Εν γένει, η μορφή της αστοχίας προσεγγίστηκε με ικανοποιητική ακρίβεια και επιπλέον η υπολογισθείσα παραμόρφωση της επιφάνειας είναι ποιοτικά συγκρίσιμη με τα αποτελέσματα άλλων εργασιών βασισμένων σε αριθμητικές αναλύσεις, οι οποίες αναφέρονται στη διάδοση κανονικού ρήγματος 45° σε στρώμα πυκνής άμμου (Anastasopoulos et al., 2007 και Papadimitriou et al., 2007).



Σχήμα 2. Επιφάνειες αστοχίας λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος όπως προέκυψαν από (α) τα αποτελέσματα της παρούσας αριθμητικής ανάλυσης και (β) από παρατηρήσεις πεδίου των Bray et al. (1994a).

Όπως διαπιστώνεται στο Σχήμα 3, προέκυψαν αντίστοιχα ικανοποιητικά αποτελέσματα και από την ανάλυση της διάδοσης ανάστροφου ρήγματος. Πιο συγκεκριμένα, η μορφή της επιφάνειας αστοχίας, η οποία προσδιορίστηκε βάσει των υπολογισθεισών πλαστικών παραμορφώσεων συμφωνεί ποιοτικά με τις παρατηρήσεις πεδίου των Bray et al. (1994a). Επιπλέον, η απαιτούμενη παραμόρφωση για την ανάδυση του ρήγματος ($\delta/H \approx 3\%$) είναι συγκρίσιμη με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα (Cole και Lade, 1984). Επίσης, και η υπολογισθείσα παραμόρφωση της επιφάνειας είναι ποιοτικά συγκρίσιμη με τα αποτελέσματα παρεμφερών αριθμητικών αναλύσεων (Anastasopoulos et al., 2007 και Papadimitriou et al., 2007).



Σχήμα 3. Επιφάνεια αστοχίας λόγω διάρρηξης κανονικού ρήγματος όπως προέκυψαν από: (α) τα αποτελέσματα της παρούσας αριθμητικής ανάλυσης, και (β) από παρατηρήσεις πεδίου των Bray et al. (1994a).

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ Χ.Υ.Τ.Α.

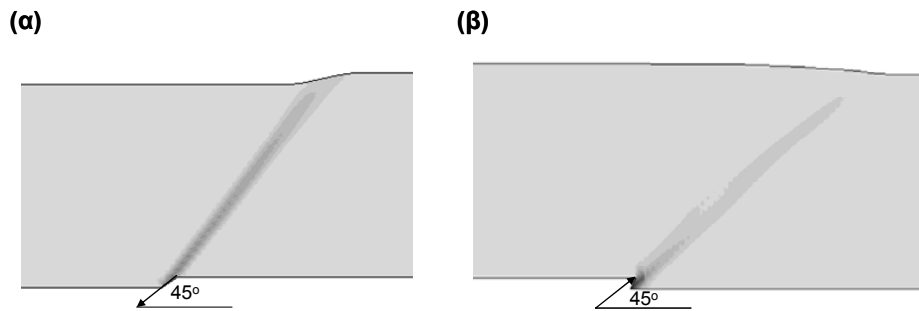
Προσομοίωση Χ.Υ.Τ.Α. σε συνθήκες ελευθέρου πεδίου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην παρούσα εργασία διερευνάται η διάδοση της σεισμικής διάρρηξης σε έναν υπέργειο Χ.Υ.Τ.Α. Η διατμητική αντοχή του απορριμματικού υλικού αποτελεί συνάρτηση πολλών παραμέτρων, όπως είναι η σύσταση των απορριμμάτων, η διαδικασία απόθεσής και συμπύκνωσής τους, αλλά και η ηλικία τους. Αυτό συντελεί στο να παρατηρείται αρκετά μεγάλη διασπορά, ακόμη και στα αποτελέσματα ίδιου τύπου δοκιμών. Στον Πίνακα 1 παρατίθενται οι παράμετροι του κριτηρίου Mohr-Coulomb, όπως αυτά προσδιορίστηκαν από δοκιμές άμεσης διάτμησης σε μικρής και μεγάλης κλίμακας δοκίμια από διάφορους ερευνητές. Πειράματα μεγάλης κλίμακας (Zekkos, 2005) έχουν αποδείξει επίσης ότι η διατμητική αντοχή εξαρτάται και από τη διεύθυνση των ινωδών συστατικών (πλαστικό, ξύλο, κ.λπ.) σε σχέση με την επιφάνεια αστοχίας, αλλά και ότι το απορριμματικό υλικό μπορεί να παρουσιάσει κράτυνση. Επομένως, για την προσομοίωση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του απορριμματικού υλικού θεωρήθηκαν οι εξής παράμετροι του κριτηρίου Mohr-Coulomb: συνοχή ίση με 15kPa και γωνία τριβής ίση με 36°.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης σε απορριμματικό υλικό.

Παράμετροι		Μέγεθος δοκιμίου (mm)	Αναφορά
Γωνία τριβής (°)	Συνοχή (kPa)		
33 - 35	5	1220x1220	Houston et al. (1995)
31	43	460	Kavazanjian et al. (1999)
40.4 - 46.6	6.4 - 31.4	40x75	Zhu et al. (2003)
36	15	300x300	Zekkos (2005)

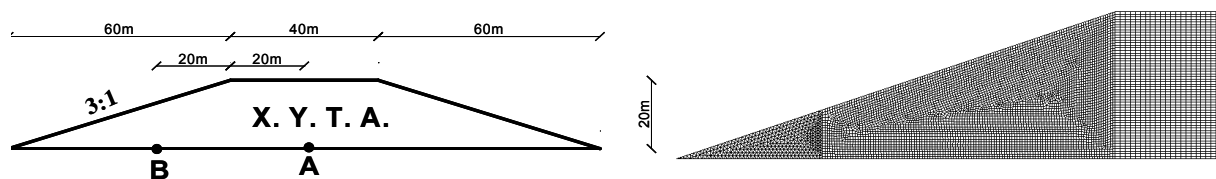
Από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων προκύπτει ότι η παραμόρφωση της επιφάνειας είναι πιο μικρή και σχετίζεται με πιο ευρεία ζώνη ανάπτυξης πλαστικών παραμορφώσεων, όπως έχει παρατηρηθεί και για αργίλους (Papadimitriou et al., 2007). Συγκεκριμένα, για την περίπτωση κανονικού ρήγματος η ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων σε μια δευτερογενή επιφάνεια αστοχίας είναι αισθητά μειωμένη (βλ. Σχήμα 4α), ενώ η πρωτογενής επιφάνεια χαρακτηρίζεται εμφανώς από κλίση ελάχιστα μεγαλύτερη σε σχέση με την αρχική γωνία διάδοσης. Η διεύθυνση διάδοσης του ανάστροφου ρήγματος (βλ. Σχήμα 4β) μεταβάλλεται με την αύξηση των επιβαλλόμενων μετακινήσεων προσεγγίζοντας την προβολή της διεύθυνσης της μετατόπισης, καταλήγοντας σε ευρεία ζώνη πλαστικών παραμορφώσεων. Σημειώνεται ότι η απαιτούμενη σχετική μετακίνηση για την ανάδυση του ρήγματος στην επιφάνεια είναι για κανονικό ρήγμα περίπου 0.3%, ενώ για ανάστροφο 1.1%, τιμές μικρότερες από τις αντίστοιχες μετακινήσεις στην περίπτωση του εδαφικού υλικού που εξετάστηκε προηγουμένως.



Σχήμα 4. Επιφάνεια αστοχίας λόγω διάρρηξης: (α) κανονικού, και (β) ανάστροφου ρήγματος, όπως προέκυψαν για τις μηχανικές ιδιότητες απορριμματικού υλικού.

Προσομοίωση τραπεζοειδούς Χ.Υ.Τ.Α.

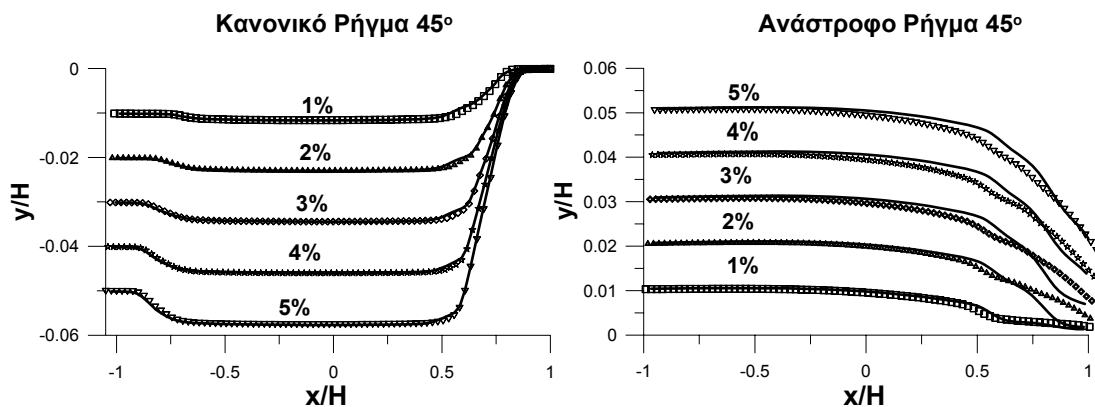
Είναι σαφές ότι η θεώρηση της «μονοδιάστατης» ανάλυσης της διάδοσης της σεισμικής διάρρηξης σε έναν Χ.Υ.Τ.Α. αποτελεί μία υπέρ-απλουστευτική παραδοχή. Για το λόγο αυτό το εξεταζόμενο πρόβλημα θα αναλυθεί λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τη γεωμετρία της γεωκατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διενέργεια των αριθμητικών αναλύσεων προσομοιώθηκε ένας τυπικός υπέργειος Χ.Υ.Τ.Α. τραπεζοειδούς μορφής, με ύψος ίσο με 20m και κλίση πρανών 3:1 (H:V). Προκειμένου να διερευνηθεί καλύτερα η συμπεριφορά της γεωκατασκευής εξετάστηκε η διάρρηξη ρήγματος σε δύο χαρακτηριστικές θέσεις (βλ. Σχήμα 5). Η πρώτη θέση (σημείο Α) αναφέρεται στον άξονα συμμετρίας της γεωκατασκευής, ενώ η δεύτερη σε αντίστοιχη απόσταση, δηλαδή 20m, από την αιχμή του πρανού (σημείο Β). Για κάθε μία από τις προαναφερθείσες περιπτώσεις αναπτύχθηκε διαφορετικός κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η λεπτομέρεια του κάρναβου πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε στα πρανή της γεωκατασκευής (Σχήμα 5). Προκειμένου να προσδιοριστεί η επιφάνεια αστοχίας με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, χρησιμοποιήθηκαν τετραπλευρικά στοιχεία και πυκνή διακριτοποίηση στην περιοχή διάδοσης της διάρρηξης, όπου αναμένεται να αναπτυχθούν μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις. Επιπλέον, λόγω της γεωμετρίας της κατασκευής, χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικά στοιχεία κοντά στον πόδα του πρανού και εκτός των ορίων των προαναφερθεισών περιοχών.



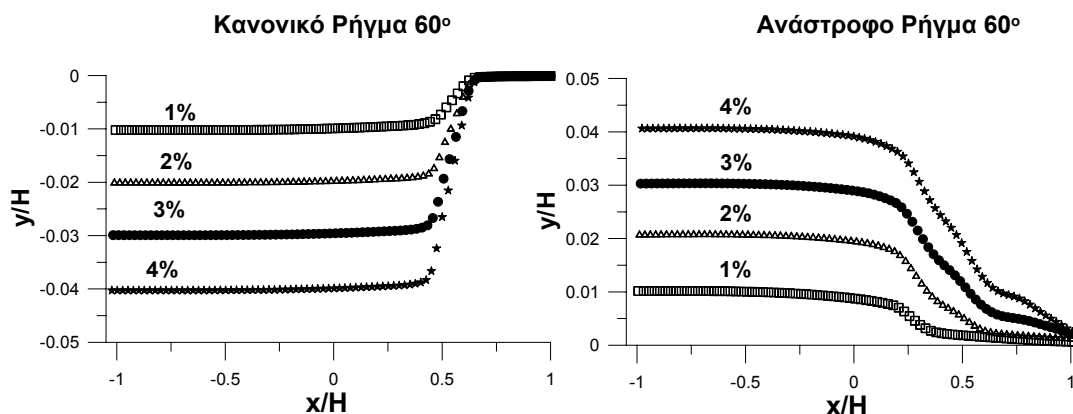
Σχήμα 5. Γεωμετρία του εξεταζόμενου υπέργειου Χ.Υ.Τ.Α. και θέσεις (Α, Β) του ενεργού ρήγματος. Παράγεται επίσης λεπτομέρεια του κάρναβου των πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε για τις αριθμητικές αναλύσεις.

Αρχικά αναλύεται η περίπτωση κανονικού και ανάστροφου ρήγματος στη θέση Α με κλίση ίση με 45° . Στην περίπτωση αυτή, η προβολή του ρήγματος αντιστοιχεί με την αιχμή του πρανού. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο της διδιάστατης προσομοίωσης (με σύμβολα) όσο και της «μονοδιάστατης» προσομοίωσης ελεύθερου πεδίου (με συνεχείς γραμμές). Παρατηρείται ότι, για την περίπτωση του κανονικού ρήγματος, η κατανομή της κανονικοποιημένης κατακόρυφης μετακίνησης (συναρτήσεως της

παραμορφωμένης οριζόντιας συνιστώσας της θέσης στην οποία αντιστοιχεί) δεν επηρεάζεται από τα κεκλιμένα σύνορα της γεωκατασκευής. Στην περίπτωση αυτή η δευτερογενής επιφάνεια αστοχίας διαμορφώνεται σε αρκετά σημαντικό επίπεδο μετακίνησης (περίπου στο 2%). Η περιοχή ανάπτυξης παραμορφώσεων εντοπίζεται στη ζώνη μεταξύ $0.85H$ και $0.5H$. Αντιθέτως, για την περίπτωση ανάστροφου ρήγματος παρατηρείται σημαντική διαφορά, ιδιαίτερα στην περιοχή που βρίσκεται κοντά στην αιχμή του πρानούς. Πιο συγκεκριμένα, για μέτρια επίπεδα μετακινήσεων (2% και 3%), υπολογίζεται μεγαλύτερη παραμόρφωση στη διδιάστατη σε σχέση με τη «μονοδιάστατη» ανάλυση σε απόσταση ίση με $0.25H$ από την αιχμή του πρानούς. Η διαφορά αυτή αμβλύνεται καθώς αυξάνει η επιβαλλόμενη μετακίνηση, αλλά παρατηρείται μικρότερη παραμόρφωση στην περίπτωση της διδιάστατης προσομοίωσης σε απόσταση ίση με $0.25H - 0.75H$ από την αιχμή του πρानούς.



Σχήμα 6. Ρήγμα στη θέση A: Κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης (y/H) συναρτήσεως της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα (x/H). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για διάφορα επίπεδα επιβαλλόμενης μετακίνησης (δ/R): 1%, 2%, 3%, 4 % και 5%.

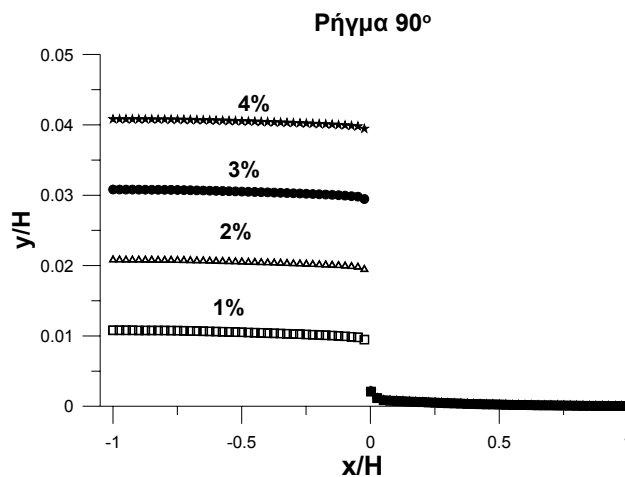


Σχήμα 7. Ρήγμα στη θέση A: Κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης (y/H) συναρτήσεως της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα (x/H). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για διάφορα επίπεδα επιβαλλόμενης μετακίνησης (δ/R): 1%, 2%, 3%, και 4%.

Στην ίδια θέση εξετάσθηκε και η διάδοση κανονικού και ανάστροφου ρήγματος με κλίση ίση με 60° και ρήγματος με γωνία 90° . Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών παρουσιάζονται στα Σχήματα 7 και 8. Το κανονικό ρήγμα δεν εμφανίζει δευτερογενή επιφάνεια αστοχίας και η

επιφανειακή εκδήλωσή του είναι σε απόσταση $0.5H$ από τον άξονα συμμετρίας, η οποία συμπίπτει με την προέκταση του επιπέδου του ρήγματος. Επιπλέον, η ζώνη παραμόρφωσης έχει εύρος $0.25H$ (δηλαδή από $0.5H$ έως $0.75H$). Το ρήγμα των 90° διαδίδεται σχεδόν κατακόρυφα, οπότε οι παραμορφώσεις περιορίζονται στη θέση του άξονα συμμετρίας.

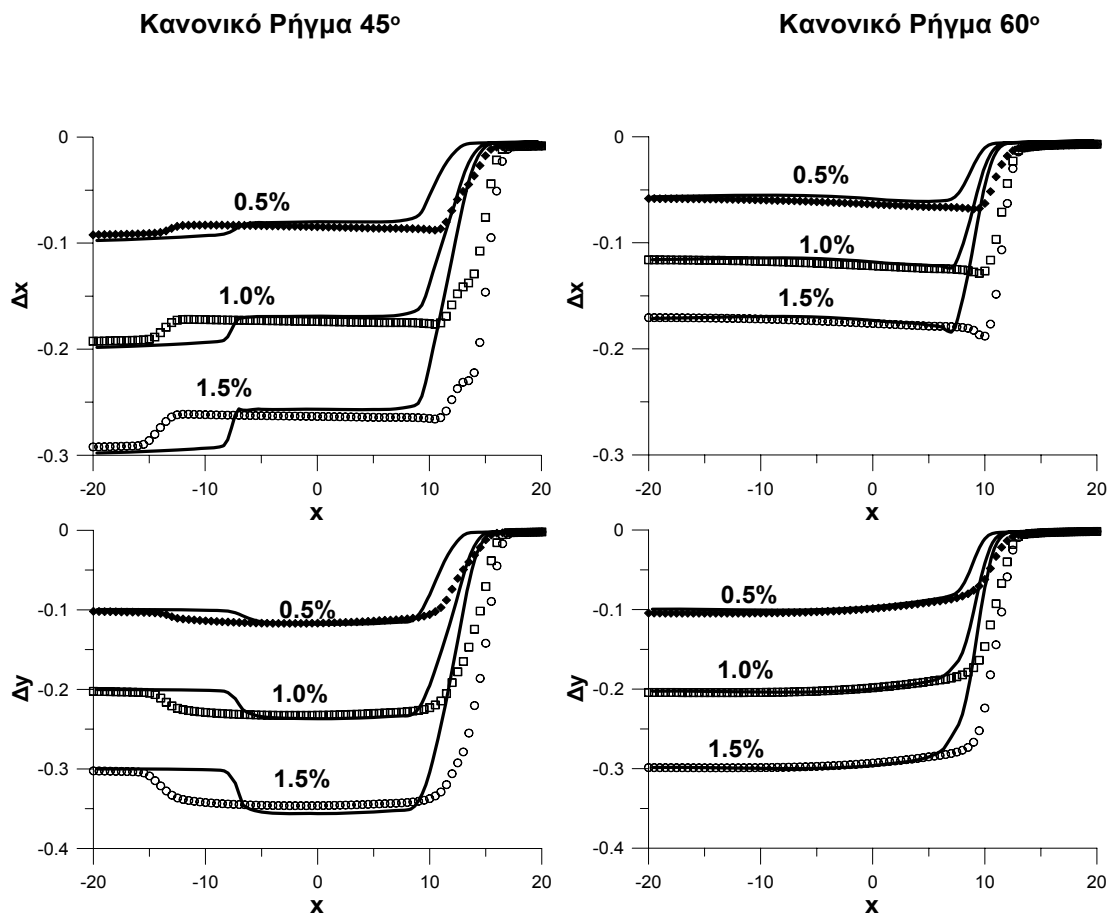
Παρατηρείται επίσης ότι, για την περίπτωση του ανάστροφου ρήγματος με γωνία 60° η ζώνη σημαντικής παραμόρφωσης εκτείνεται σε απόσταση ίση με $0.25H$ από τον άξονα συμμετρίας έως την αιχμή του πρηνούς, γεγονός που οφείλεται στο μηχανισμό ανάπτυξης των πλαστικών παραμορφώσεων. Αρχικά, για χαμηλές τιμές επιβαλλόμενης μετακίνησης ($\delta/R \approx 1\%$) η ζώνη ανάπτυξης των πλαστικών παραμορφώσεων αναπτύσσεται με γωνία μεγαλύτερη της αρχικής (περίπου ίση με 75°), όπως εύκολα προκύπτει και από το Σχήμα 7. Καθώς αυξάνει η μετακίνηση, πλαστικές παραμορφώσεις αρχίζουν και αναπτύσσονται σε ζώνες με μικρότερη κλίση φτάνοντας μέχρι και την αιχμή του πρηνούς, με αποτέλεσμα να διευρύνεται η ζώνη αστοχίας.



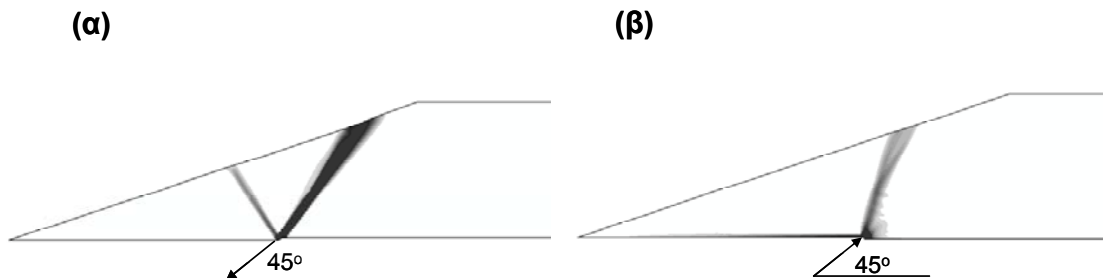
Σχήμα 8. Ρήγμα στη θέση A: Κατανομή της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος κατακόρυφης μετακίνησης (y/H) συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το ύψος οριζόντιας συνιστώσας του παραμορφωμένου φορέα (x/H). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για διάφορα επίπεδα επιβαλλόμενης μετακίνησης (δ/R): 1%, 2%, 3%, και 4%.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η διάδοση κανονικών ρηγμάτων με γωνία ίση με 45° και 60° στο σημείο B (βλ. Σχήμα 5). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 9 σε όρους οριζόντιας και κατακόρυφης μετακίνησης συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης από το ίχνος του ρήγματος ($x=0m$). Για άμεση αντιπαραβολή στο ίδιο σχήμα παρατίθενται και τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αναλύσεων που αναφέρονται σε ρήγμα στη θέση A (με σύμβολα). Για την πρώτη περίπτωση, δηλαδή για ρήγμα με γωνία ανάδυσσης ίση με 45° , η απαιτούμενη μετακίνηση για την επιφανειακή εκδήλωση του ρήγματος, καθώς και η γωνία διάδοσής του δεν διαφέρουν σημαντικά. Σημαντική διαφοροποίηση παρατηρείται στην απόσταση στην οποία αναπτύσσεται η δευτερογενής επιφάνεια αστοχίας, αφού η απόσταση μεταξύ των δύο επιφανειών αστοχίας είναι μικρότερη στην περίπτωση που το ρήγμα βρίσκεται στη θέση B. Επίσης, όταν το ίχνος του ρήγματος εντοπίζεται κάτω από τα πρηνή της γεωκατασκευής το εύρος της ζώνης των σημαντικών παραμορφώσεων είναι μεγαλύτερο, και επιπλέον σχετίζεται με μεγαλύτερου μεγέθους πλαστικές παραμορφώσεις. Η τελευταία

παρατήρηση επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα που αναφέρονται σε ρήγμα με γωνία ανάδυσσης ίση με 60° .



Σχήμα 9. Κατανομή της οριζόντιας και της κατακόρυφης μετακίνησης συναρτήσει της οριζόντιας συνιστώσας απόστασης από το ίχνος του ρήγματος. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε κανονικό ρήγμα με γωνία ίση με 45° και 60° και παρουσιάζονται για διάφορα επίπεδα επιβαλλόμενης μετακίνησης (δ/R): 0.5%, 1%, και 1.5%. Οι συνεχείς γραμμές και τα σύμβολα αντιπροσωπεύουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις οποίες η θέση του ρήγματος βρίσκεται στο σημείο Β ή Α, αντίστοιχα.



Σχήμα 10. Επιφάνεια αστοχίας λόγω διάρρηξης: (α) κανονικού, και (β) ανάστροφου ρήγματος στην θέση Β, κάτω από το πρηνές ενός υπέργειου Χ.Υ.Τ.Α.

Τέλος, στο Σχήμα 10 παρουσιάζονται οι επιφάνειες αστοχίας, όπως διαμορφώθηκαν έπειτα από τις αριθμητικές αναλύσεις λόγω της μετακίνησης κανονικού και ανάστροφου ρήγματος

κάτω από το πρηνές του εξεταζόμενου Χ.Υ.Τ.Α. Παρατηρείται ότι η επιφάνεια αστοχίας του ανάστροφου ρήγματος κάμπτεται ελαφρώς προς το κατερχόμενο τέμαχος, ενώ η διεύθυνση της διάδοσης της διάρρηξης ακολουθεί μεγαλύτερη γωνία (περίπου ίση με 80°) από την αρχική. Αντίστοιχες παρατηρήσεις ισχύουν και για την διάδοση ανάστροφου ρήγματος 60° , όπου η διεύθυνση της διάδοσης είναι περίπου στις 85° .

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε ο μηχανισμός διάδοσης της σεισμικής διάρρηξης εντός της απορριμματικής μάζας ενός τυπικού υπέργειου Χ.Υ.Τ.Α. Αρχικά επαληθεύθηκε η αριθμητική μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε μέσω δημοσιευμένων αποτελεσμάτων που αναφέρονται σε παρατηρήσεις πεδίου, πειραματικά δεδομένα και αριθμητικές αναλύσεις για την περίπτωση μίας εδαφικής στρώσης σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου. Στη συνέχεια, η διερεύνηση επεκτάθηκε σε προσομοιώματα Χ.Υ.Τ.Α. και επικεντρώθηκε στη μελέτη της εξεταζόμενης διατομής και την επίδραση της τοπογραφίας στην καταπόνηση της. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων συνάγεται το συμπέρασμα ότι, η γεωμετρία της γεωκατασκευής μπορεί αναλόγως με: (α) τη θέση, (β) τη γωνία, και (γ) το είδος του ρήγματος να επηρεάσει σημαντικά το μέγεθος και την κατανομή των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων. Ειδικότερα, ακόμη και όταν το ίχνος του ρήγματος εντοπίζεται κάτω από το κατάστρωμα του Χ.Υ.Τ.Α., οι παραμορφώσεις στην περιοχή της αιχμής του πρηνούς αυξάνουν στην περίπτωση διάδοσης ανάστροφου ρήγματος, ιδιαίτερα όταν χαρακτηρίζεται και από μικρή γωνία διάδοσης. Επιπλέον, όταν το ίχνος του ρήγματος εντοπίζεται κάτω από τα πρηνή της απορριμματικής μάζας, οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις αυξάνουν ακόμα περισσότερο. Συμπερασματικά, ο αντισεισμικός σχεδιασμός των Χ.Υ.Τ.Α. θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα ανωτέρω προκειμένου να εξασφαλίζεται η ευστάθεια της γεωκατασκευής.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τμήμα του ερευνητικού προγράμματος 03ΕΔ454, εντεταγμένου στο Πρόγραμμα Ενίσχυσης του Ερευνητικού Δυναμικού (ΠΕΝΕΔ) και συγχρηματοδοτούμενου από εθνικούς και κοινοτικούς πόρους (75% από την Ε.Ε. – Ευρωπαϊκή Κοινωνική Επιχορήγηση και 25% από το Υπουργείο ανάπτυξης- Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ABAQUS (2004), “Analysis User’s Manual Version 6.4”, ABAQUS Inc, USA.
- Anastasopoulos I., and Gazetas G. (2007a), “Foundation-Structure Systems over a Rupturing Normal Fault: Part I. Observations after the Kocaeli 1999 Earthquake”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5(3), pp. 253–275.
- Anastasopoulos I., and Gazetas G. (2007b), “Behaviour of Structure–Foundation Systems over a Rupturing Normal Fault: Part II. Analysis of the Kocaeli Case Histories”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5(3), pp. 277–301.
- Anastasopoulos I., Gazetas G., Bransby M.F., Davies M.C.R., and El Nahas A. (2007), “Fault rupture propagation through sand: Finite–element analysis and validation through centrifuge experiments”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(8), pp. 943-958.

- Bray J.D., (2001), "Developing Mitigation Measures for the Hazards Associated with Earthquake Surface Fault Rupture", Workshop on Seismic Fault-Induced Failures – Possible Remedies for Damage to Urban Facilities, University of Tokyo Press, pp. 55-79.
- Bray J.D., and Kelson K.I., (2006), "Observations of Surface Fault Rupture from the 1906 Earthquake in the Context of Current Practice", *Earthquake Spectra*, 22(2), pp. 69-89.
- Bray J.D., Seed R.B., Cluff L.S., and Seed H.B. (1994a), "Earthquake fault rupture propagation through soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, 120 (3), pp. 543-561.
- Bray J.D., Seed R.B., and Seed H.B. (1994b), "Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, 120 (3), pp. 562-580.
- Cole D.A., and Lade P.V. (1984), "Influence zones in alluvium over dip-slip faults", *Journal of Geotechnical Engineering*, 110 (5), pp. 599-615.
- Duncan J.M. and Lefebvre G. (1973), "Earth pressures on structures due to fault movement", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99 (SM12), pp.1153-1163.
- EPA (1993), "MSW landfill criteria technical manual - Subpart D Design criteria", Environmental Protection Agency, USA, pp. 149-188.
- Houston W.N., Houston S.L., Liu J.W., El Sayed A., and Sanders, C.O. (1995), "In-situ testing methods for dynamic properties of MSW landfills", in Yegian M.K., and Finn W.D.L. (eds), *Earthquake Design and Performance of Solid Waste Landfills—Geotechnical special publication No54*, American Society of Civil Engineers, pp. 73–82.
- Kavazanjian E.Jr., Matasovic N., and Bachus R.C. (1999), "Large diameter static and cyclic laboratory testing of municipal solid waste", Proc. of the 7th International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy.
- Kelson K.I., Kang K.-H., Page W.D., Lee C.-T., and Cluff L.S., (2001), "Representative Styles of Deformation along the Chelungpu Fault from the 1999 Chi-Chi (Taiwan) Earthquake: Geomorphic Characteristics and Responses of Man-Made Structures", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 91(5), pp. 930–952.
- Lade P.V., Cole D.A., and Cummings D., (1984), "Multiple failure surfaces over dip-slip faults", *Journal of Geotechnical Engineering*, 110 (5), pp. 616-627.
- Lin M.-L., Chung C.-F., and Jeng F.-S., (2006), "Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip," *Engineering Geology*, 88, pp. 70-89.
- Loukidis D., and Bouckovalas G. (2001), "Numerical simulation of active fault rupture propagation through dry soil", Proc. 4th International Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Eng. and Soil Dynamics and Symposium in Honor of Professor W.D. Liam Finn, San Diego, CA, pp. 26-31.
- Papadimitriou A., Loukidis D., Bouckovalas G., and Karamitros D. (2007), "Zone of excessive ground surface distortion due to dip-slip fault rupture", Proc. of the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece.
- Scott R.F., and Schoustra J.J., (1974), "Nuclear power plant siting on deep alluvium", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 100(4), pp. 449-459.
- Zekkos D.P. (2005), "Evaluation of static and dynamic properties of municipal solid-waste", PhD Dissertation, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, CA, USA.
- Zhu X.-R., Jin J.-M., and Fang P.-F., (2003), "Geotechnical behaviour of the MSW in Tianziling landfill", *Journal of Zhejiang University*, 4(3), pp. 324–330.