

Καταστατικά προσομοιώματα για την ανάλυση άοπλης τοιχοποιίας σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση Constitutive models for the analysis of unreinforced masonry under cyclic loading

Λουτσία ΚΑΡΑΠΙΤΤΑ¹, Χάρης ΜΟΥΖΑΚΗΣ², Παναγιώτης ΚΑΡΥΔΗΣ³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζονται δύο καταστατικά προσομοιώματα για την ανάλυση άοπλης τοιχοποιίας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία υπόκειται σε ανακυκλιζόμενη ένταση εντός του επιπέδου. Τα προσομοιώματα αναπτύσσονται στις δύο διαστάσεις για επίπεδη εντατική κατάσταση. Στο πρώτο προσομοίωμα οι υπολογισμοί γίνονται με βάση τις συνολικές κύριες τροπές, ακολουθώντας τη μέθοδο της περιστρεφόμενης κατανεμημένης ρωγμής και οι τάσεις υπολογίζονται στο σύστημα των κύριων τροπών. Στο δεύτερο προσομοίωμα η συμπεριφορά της τοιχοποιίας σε εφελκυσμό και θλίψη ελέγχεται μέσω των ορθών τροπών, ενώ μέσω της διατμητικής τροπής γίνεται ο έλεγχος της συμπεριφοράς του υλικού έναντι διάτμησης. Οι σχέσεις τάσεων-τροπών σε εφελκυσμό, θλίψη και διάτμηση οι οποίες περιγράφουν τα κύρια χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς του υλικού σε φόρτιση και αποφόρτιση, είναι απαραίτητες για την εφαρμογή των προσομοιωμάτων. Αναλύσεις τοίχων με τα προτεινόμενα καταστατικά προσομοιώματα συγκρίνονται με πειραματικά αποτελέσματα.

ABSTRACT : Two constitutive models for finite elements analysis of unreinforced masonry structures subjected to cyclic in-plane loading are presented. The proposed models are implemented into two dimensional finite elements, for plane stress state. The first model is based on co-axial total strain rotating smeared crack model with two orthogonal cracks. The second model is based on total strains in material global system, where cracking and crushing are controlled through normal strains and shear is controlled through shear strain. Separate hysteretic rules are adopted for each mode of damage. The accuracy and reliability of the proposed constitutive models are examined through their ability to predict experimental results and different types of cyclic response of masonry walls.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πρώτη προσπάθεια αριθμητικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς της τοιχοποιίας άρχισε στο τέλος της δεκαετίας του 70 από τους Page (1978) και Samarasinghe et al. (1982) μετά από ένα εκτεταμένο ερευνητικό πρόγραμμα. Τα προσομοιώματα αυτά είχαν στηριχθεί στα προσομοιώματα τα οποία αναπτύχθηκαν στο τέλος της δεκαετίας του 60 για την περιγραφή της συμπεριφοράς του σκυρόδεματος (Ngo and Scordelis (1967), Rashid (1968)) και άλλων

¹ Πολιτικός Μηχανικός, ΙΔΑΧ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: klucia@central.ntua.gr

² Επίκουρος Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ. Πολυτεχνείο, email: harrismo@central.ntua.gr

³ Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: pcarydis@central.ntua.gr

ψαθυρών υλικών (βραχώδη εδάφη) με αριθμητικές μεθόδους. Στις αναλύσεις με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, διακρίνονται δύο μέθοδοι για την προσομοίωση ενός ρηγματωμένου μέσου: η μέθοδο των διακριτών ρωγμών όπου η ρωγμή αποτελεί μια γεωμετρική ασυνέχεια και η μέθοδο των κατανεμημένων ρωγμών όπου μια ρωγμή αποτελείται από πολλές μικροασυνέχειες οι οποίες «διαχέονται» σε μια ζώνη και το ρηγματωμένο υλικό αντιμετωπίζεται ως συνεχές μέσο. Με τη μέθοδο των διακριτών ρωγμών εισάγονται στο δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων ασυνέχειες στις θέσεις όπου σχηματίζονται οι ρωγμές και κάθε επιμέρους υλικό που συνθέτει την τοιχοποιία (λιθόσωμα, αρμός κονιάματος και διεπιφάνεια λιθοσώματος-αρμού), περιγράφεται με διαφορετικό πεπερασμένο στοιχείο (μικρο-προσομοίωμα). Με τη μέθοδο των κατανεμημένων ρωγμών, η τοιχοποιία προσομοιάζεται ως ένα ομογενοποιημένο σύνθετο ισότροπο ή ανισότροπο υλικό, το οποίο περιγράφεται από ένα τύπο πεπερασμένου στοιχείου (μάκρο-προσομοίωση). Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζεται η μετελαστική συμπεριφορά της τοιχοποιίας, τα μικρο και μάκρο προσομοιώματα διαχωρίζονται: (α): στα προσομοιώματα τα οποία βασίζονται στη μηχανική της θραύσης (σταθερή κατανεμημένη ρωγμή, περιστρεφόμενη κατανεμημένη ρωγμή, σταθερή κατανεμημένη ρωγμή πολλών διευθύνσεων), (β): στα προσομοιώματα τα οποία βασίζονται στη θεωρία της πλαστικότητας και (γ): στα προσομοιώματα τα οποία βασίζονται στη θεωρία βλαβών (damage theory).

Όλα τα προαναφερόμενα καταστατικά προσομοιώματα έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την εκτίμηση της συμπεριφοράς τοιχοποιίας έναντι στατικών μονοτονικών φορτίσεων (Lofti και Shing, (1991, 1994), Lourenco et al. (1995, 1997), Pegon και Anthoine (1994)). Λίγες προσπάθειες καταγράφονται στη βιβλιογραφία για την ανάπτυξη προσομοιωμάτων τοιχοποιίας κατάλληλα για ανακυκλιζόμενες δράσεις (Gambartotta και Logomarsino (1997), Oliveira και Lourenco (2004), Casolo και Pena (2007)).

Γενικά, για να ληφθεί υπόψη η συμπεριφορά τοιχοποιίας σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε ένα καταστατικό νόμο, φαινόμενα όπως το άνοιγμα /κλείσιμο των ρωγμών υπό θλιπτικό φορτίο, η σταδιακή μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού με την αύξηση των κύκλων φόρτισης, η παραμένουσα παραμόρφωση υπό μηδενική εφελκυστική τάση κατά την αποφόρτιση και όλες οι πιθανές διαδρομές των τάσεων/τροπών όπως η μερική αποφόρτιση, ή η μερική επαναφόρτιση πρέπει να περιγράφονται μέσα από τη σχέση τάσεων – τροπών. Επιπλέον, το καταστατικό προσομοίωμα πρέπει να είναι ικανό να προβλέπει τόσο τη διατμητική όσο και τη καμπτική συμπεριφορά ενός τοίχου.

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η ανάπτυξη καταστατικού προσομοιώματος κατάλληλου για την ανάλυση άοπλης τοιχοποιίας σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Αρχικά αναπτύσσεται ένα προσομοίωμα το οποίο στηρίζεται στη μηχανική της θραύσης και στο προσομοίωμα της περιστρεφόμενης κατανεμημένης ρωγμής και περιγράφονται οι απαραίτητες σχέσεις τάσεων- τροπών. Ακολουθεί ο έλεγχος αξιοπιστίας του καταστατικού προσομοιώματος μέσω επαλήθευσης πειραματικών αποτελεσμάτων, ο οποίος δεν οδήγησε στα επιθυμητά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό αναπτύσσεται ένα καινούργιο προσομοίωμα όπου μέσω των ορθών τροπών ε_{xx} , ε_{yy} στο καθολικό σύστημα x-y ελέγχεται η συμπεριφορά του υλικού σε εφελκυσμό (θετική τροπή) και θλίψη (αρνητική τροπή), ενώ μέσω της διατμητικής τροπής ε_{xy} γίνεται ο έλεγχος της συμπεριφοράς του υλικού έναντι διάτμησης.

Και τα δύο προσομοίωμα αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας την υπορουτίνα Vumat του λογισμικού Abaqus/Explicit (Abaqus 6.4-1) για εντατική κατάσταση δισδιάστατης επίπεδης έντασης. Η επίλυση των δυναμικών εξισώσεων ακολουθεί τη ρητή ολοκλήρωση (explicit dynamic). Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για την επίλυση δυναμικών φαινομένων τα οποία πραγματοποιούνται σε υψηλές συχνότητες, μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί και για την επίλυση ψευδο-στατικών (quasi-static) προβλημάτων. Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτείται η μόρφωση του μητρώου ακαμψίας και δεν εκτελούνται εσωτερικές επαναλήψεις, ενώ το φορτίο επιβάλλεται σε πολύ μικρά βήματα.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΡΩΓΜΗΣ

Σύμφωνα με το προσομοίωμα αυτό, οι υπολογισμοί γίνονται με βάση τις συνολικές κύριες τροπές (Feenstra et al. (1998), He et al. (2006)) και οι τάσεις υπολογίζονται σύμφωνα με τη Modified Compression Field Theory (Vecchio and Collins, 1986). Κύρια παραδοχή του προσομοιώματος είναι ότι το σύστημα των κύριων τάσεων ταυτίζεται με το σύστημα των κύριων τροπών (Core et al., 1980). Επίσης, η μείωση της ακαμψίας λόγω αστοχίας σε εφελκυσμό και θλίψη θεωρείται ότι εξαρτάται από τη διεύθυνση φόρτισης/αποφόρτισης/επαναφόρτισης και οι δύο μορφές αστοχίας δεν είναι συζευγμένες.

Μια ρωγμή δημιουργείται όταν η κύρια εφελκυστική τροπή υπερβεί την εφελκυστική τροπή αστοχίας. Η ρωγμή σχηματίζεται σε επίπεδο κάθετο προς τη μέγιστη τροπή. Το υλικό από ισότροπο, μετατρέπεται σε μη γραμμικό ορθότροπο με άξονες ορθοτροπίας n-s, όπου ο άξονας n είναι κάθετος στο επίπεδο της ρωγμής και ο άξονας s παράλληλος προς αυτήν (Σχήμα 1). Αντίστοιχα συμβαίνει με την αστοχία σε θλίψη, όταν η κύρια θλιπτική τροπή υπερβεί την ελάχιστη θλιπτική τροπή αστοχίας/διαρροής. Οι κύριες τροπές υπολογίζονται στο σύστημα n-s μέσω της ακόλουθης σχέσης:

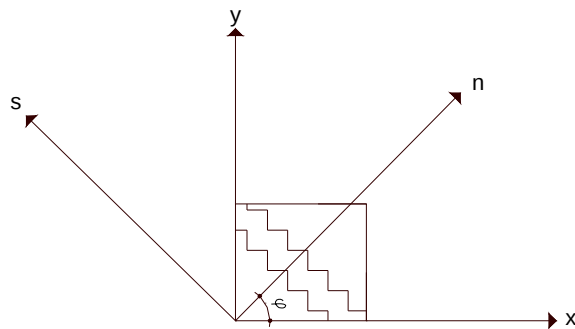
$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ns} = \mathbf{T}_\varepsilon(\varphi) \boldsymbol{\varepsilon}_{xy} \quad (1)$$

όπου

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ns} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{nn} \\ \varepsilon_{ss} \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{xy} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{T}_\varepsilon(\varphi) = \mathbf{T}(\varphi)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos^2\varphi & \sin^2\varphi & 2 \cdot \cos\varphi \cdot \sin\varphi \\ \sin^2\varphi & \cos^2\varphi & -2 \cdot \cos\varphi \cdot \sin\varphi \\ -\cos\varphi \cdot \sin\varphi & \cos\varphi \cdot \sin\varphi & \cos^2\varphi - \sin^2\varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

Η γωνία φ μεταξύ καθολικού συστήματος x-y και τρέχοντος συστήματος κυρίων τροπών n-s, υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}} = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}} \quad (3)$$



Σχήμα 1. Προσομοίωμα περιστρεφόμενης ρωγμής: Καθολικό σύστημα x-y, σύστημα κύριων τροπών n-s.

Οι τάσεις σ_{ns} στο τοπικό σύστημα υπολογίζονται συναρτήσει των κύριων τροπών μέσω της συνάρτησης $F(\epsilon_{ns})$ με την οποία περιγράφεται η συμπεριφορά της τοιχοποιίας έναντι θλίψης /εφελκυσμού ανάλογα με τη φάση φόρτισης (φόρτιση, αποφόρτιση, επαναφόρτιση). Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση του λόγου Poisson και η μεταβολή της έντασης σε μια διεύθυνση λόγω παραμόρφωσης σε εγκάρσια διεύθυνση, οι κύριες τροπές ϵ_{ns} αντικαθίστανται από τις ισοδύναμες κύριες τροπές $\tilde{\epsilon}_{ns}$ (Feenstra et al., 1998) μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$\begin{Bmatrix} \tilde{\epsilon}_{nn} \\ \tilde{\epsilon}_{ss} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-\nu^2} & \frac{\nu}{1-\nu^2} \\ \frac{\nu}{1-\nu^2} & \frac{1}{1-\nu^2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{nn} \\ \epsilon_{ss} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Με τον τρόπο αυτό οι τάσεις στο τοπικό σύστημα n-s δεν είναι συζευγμένες και ο υπολογισμός τους γίνεται συναρτήσει της αντίστοιχης ισοδύναμης κύριας τροπής $\tilde{\epsilon}_{ns}$ χρησιμοποιώντας μονοαξονικές σχέσεις τάσεων – τροπών σε θλίψη και εφελκυσμό. Τέλος, το διάνυσμα των τάσεων στο σύστημα n-s μετασχηματίζεται στο καθολικό σύστημα μέσω του μητρώου μετασχηματισμού $T_\sigma(\varphi)$:

$$\sigma_{xy} = T_\sigma(\varphi) \sigma_{ns} \quad (5)$$

όπου

$$\sigma_{xy} = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}, \quad \sigma_{ns} = \begin{Bmatrix} \sigma_{nn} \\ \sigma_{ss} \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad T_\sigma(\varphi) = T(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos^2\varphi & \sin^2\varphi & -2 \cdot \cos\varphi \cdot \sin\varphi \\ \sin^2\varphi & \cos^2\varphi & 2 \cdot \cos\varphi \cdot \sin\varphi \\ \cos\varphi \cdot \sin\varphi & -\cos\varphi \cdot \sin\varphi & \cos^2\varphi - \sin^2\varphi \end{bmatrix} \quad (6)$$

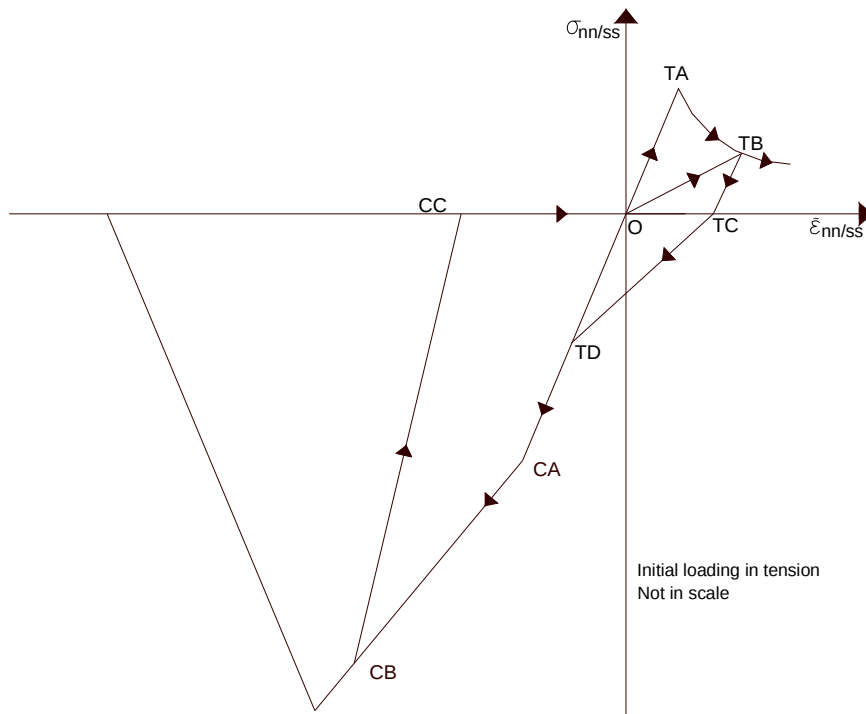
Σχέσεις τάσεων- τροπών σε μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Η μη γραμμική συμπεριφορά της τοιχοποιίας περιγράφεται στο τρέχων σύστημα των κυρίων τροπών χρησιμοποιώντας μονοαξονικές σχέσεις τάσης- ισοδύναμης τροπής στην n ή s διεύθυνση. Η έννοια της ενέργειας θραύσης και του χαρακτηριστικού μήκους πεπερασμένου στοιχείου (Bazant and Oh (1983)) χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του φθιτού κλάδου στον εφελκυσμό, με σκοπό την ανεξαρτητοποίηση των αποτελεσμάτων από την πυκνότητα

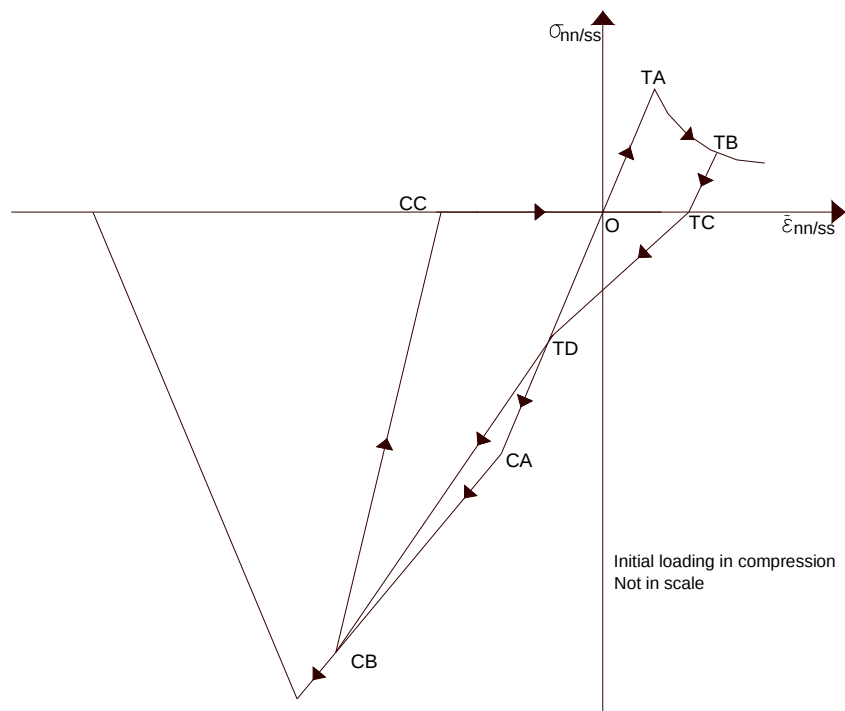
του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση, χωρίς να εξετάζεται περαιτέρω η φυσική του σημασία.

Στο Σχήμα 2 περιγράφεται η διαδρομή ενός υλικού σημείου το οποίο φορτίζεται αρχικά σε εφελκυσμό στην κύρια διεύθυνση n ή s . Όσο η εφελκυστική τροπή είναι μικρότερη από την εφελκυστική τροπή αντοχής (σημείο TA), η συμπεριφορά του υλικού είναι ελαστική και η φόρτιση /αποφόρτιση ακολουθεί την ευθεία γραμμή O-TA με κλίση E (Μέτρο Ελαστικότητας). Όταν η εφελκυστική τροπή ξεπεράσει την εφελκυστική τροπή αντοχής, τότε γίνεται σταδιακή απομείωση της αντοχής και της ακαμψίας του υλικού, η οποία περιγράφεται από το φθιτό κλάδο. Το σημείο TA αντιστοιχεί στο σημείο έναρξης της ρωγμής. Οι κλάδοι αυτοί περιγράφουν την μονοτονική καμπύλη εφελκυσμού. Εάν συμβεί μια αντιστροφή της τροπής όταν το υλικό σημείο κινείται στο φθιτό κλάδο, τότε το υλικό σημείο αρχίζει να αποφορτίζεται ακολουθώντας τους κλάδους TB-TC και TC-TD. Οι κλάδοι αυτοί είναι γραμμικές σχέσεις μεταξύ των σημείων TB-TC και TC-TD. Το σημείο TB αντιστοιχεί στο σημείο έναρξης της αποφόρτισης από τη μονοτονική καμπύλη εφελκυσμού. Το σημείο TC, αντιστοιχεί στο σημείο μηδενικής εφελκυστικής τάσης με παραμένουσα τροπή. Με τον κλάδο TC-TD περιγράφεται το σταδιακό κλείσιμο της ρωγμής και η σταδιακή ανάκτηση της ακαμψίας του υλικού. Στην παρούσα εργασία γίνεται η παραδοχή ότι μια ρωγμή κλείνει όταν η θλιπτική τροπή γίνεται ίση με την τροπή για την οποία δημιουργήθηκε. Από το σημείο αυτό, ξεκινάει η φόρτιση σε θλίψη ακολουθώντας τη μονοτονική καμπύλη θλίψης στις περιπτώσεις όπου το υλικό σημείο δεν έχει φορτιστεί σε θλίψη ή έχει φορτιστεί αλλά παραμένει στην ελαστική περιοχή σε προηγούμενο κύκλο φόρτισης. Αν το υλικό σημείο έχει διαρρεύσει σε θλίψη σε προηγούμενο κύκλο φόρτισης, τότε ακολουθείται ο κλάδος TD-CB (Σχήμα 3) και στη συνέχεια η μονοτονική καμπύλη θλίψης. Το σημείο CB αντιστοιχεί στο σημείο έναρξης της αποφόρτισης από τη μονοτονική καμπύλη θλίψης.

Στο Σχήμα 3 περιγράφεται η διαδρομή ενός υλικού σημείου το οποίο φορτίζεται αρχικά σε θλίψη στην κύρια διεύθυνση n ή s . Όσο η θλιπτική τροπή είναι μικρότερη από την θλιπτική τροπή διαρροής (σημείο CA), η συμπεριφορά του υλικού είναι ελαστική και η φόρτιση /αποφόρτιση ακολουθεί την ευθεία γραμμή O-CA με κλίση E (Μέτρο Ελαστικότητας). Όταν η θλιπτική τροπή ξεπεράσει την θλιπτική τροπή διαρροής, τότε η συμπεριφορά του υλικού περιγράφεται από ένα ανοδικό κλάδο και από ένα φθιτό κλάδο. Το σημείο CA αντιστοιχεί στο σημείο διαρροής. Εάν συμβεί μια αντιστροφή της τροπής όταν το υλικό σημείο κινείται στον ανοδικό ή καθοδικό κλάδο της μονοτονικής καμπύλης, τότε το υλικό σημείο αρχίζει να αποφορτίζεται ακολουθώντας τους κλάδους CC-CD και CD-O. Ο κλάδος CC-CD είναι γραμμική σχέση μεταξύ των σημείων CC-CD. Το σημείο CC, αντιστοιχεί στο σημείο έναρξης της αποφόρτισης από τη μονοτονική θλιπτική καμπύλη. Το σημείο CD, αντιστοιχεί στο σημείο μηδενικής θλιπτικής τάσης με παραμένουσα τροπή, ενώ ο κλάδος CD-O κινείται στον άξονα n ή s (μηδενική τάση), μέχρι η τροπή να γίνει θετική. Από το σημείο αυτό, ξεκινάει η φόρτιση σε εφελκυσμό ακολουθώντας τη μονοτονική καμπύλη εφελκυσμού στις περιπτώσεις όπου το υλικό σημείο δεν έχει φορτιστεί σε εφελκυσμό ή έχει φορτιστεί αλλά παραμένει στην ελαστική περιοχή σε προηγούμενο κύκλο φόρτισης. Αν το υλικό σημείο έχει αστοχήσει σε εφελκυσμό σε προηγούμενο κύκλο φόρτισης, τότε ακολουθείται ο κλάδος O-TB (Σχήμα 2) και στη συνέχεια η μονοτονική καμπύλη εφελκυσμού. Το σημείο TB αντιστοιχεί στο σημείο έναρξης της αποφόρτισης από τη μονοτονική καμπύλη εφελκυσμού.

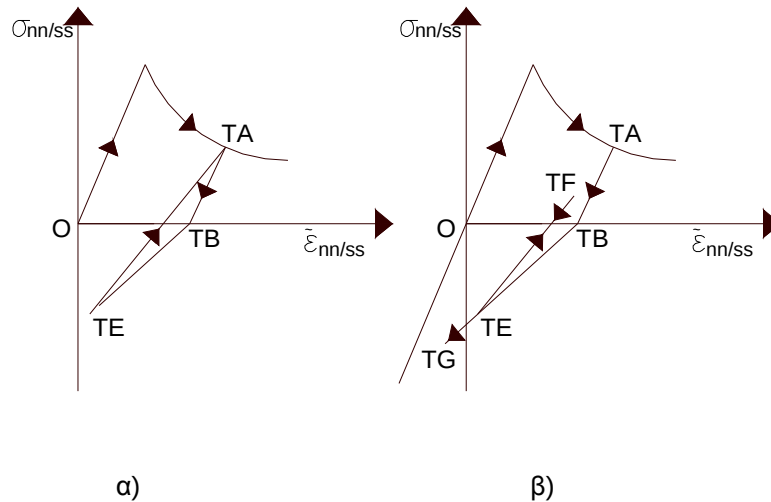


Σχήμα 2. Σχέση τάσης- ισοδύναμης τροπής στην n ή s κύρια διεύθυνση: Αρχική φόρτιση σε εφελκυσμό: (O-TA: φόρτιση σε εφελκυσμό, TB-TC-TD: πλήρης αποφόρτιση, TD-CA- CB: φόρτιση σε θλίψη, CB-CC-O: πλήρης αποφόρτιση, O-TB: φόρτιση μέχρι το σημείο αποφόρτισης σε εφελκυσμό.

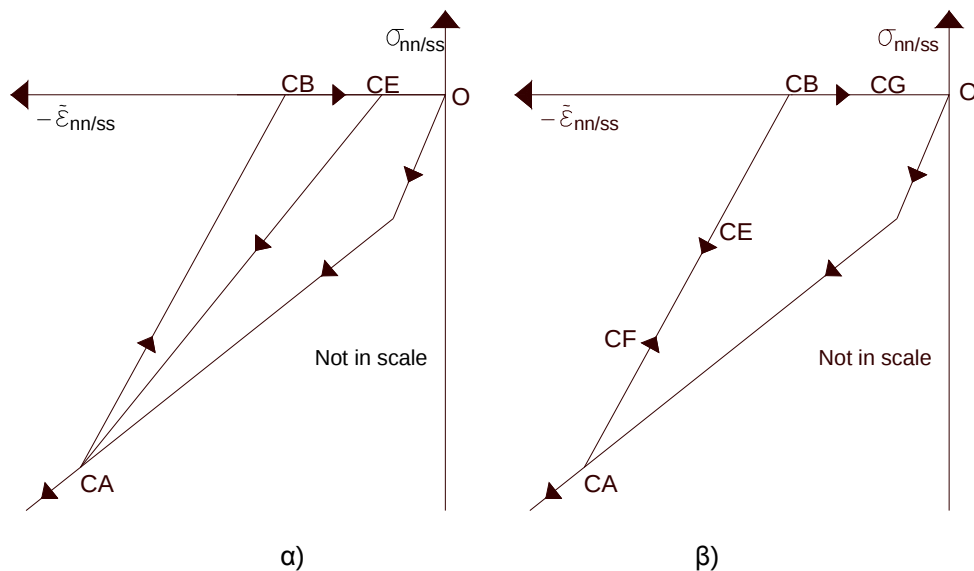


Σχήμα 3. Σχέση τάσης- ισοδύναμης τροπής στην n ή s κύρια διεύθυνση: Αρχική φόρτιση σε θλίψη: O- CA-CB: φόρτιση σε θλίψη, CB-CC-O: πλήρης αποφόρτιση, O- TA-TB: φόρτιση σε εφελκυσμό, TB-TC- TD: πλήρης αποφόρτιση, TD-CB: φόρτιση μέχρι το σημείο αποφόρτισης σε θλίψη.

Στην περίπτωση που συμβεί μια καινούργια αντιστροφή τροπής κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης σε εφελκυσμό ή θλίψη πριν την πλήρη αποφόρτιση (μερική αποφόρτιση, μερική επαναφόρτιση), τότε η συμπεριφορά του υλικού σημείου περιγράφεται όπως φαίνεται στα Σχήματα 4 και 5.



Σχήμα 4. Μερική αποφόρτιση/ μερική επαναφόρτιση σε εφελκυσμό. α): O-TA: φόρτιση, TA-TB-TE: αποφόρτιση, TE-TA: επαναφόρτιση. β): O-TA: φόρτιση, TA-TB-TE: αποφόρτιση, TE-TF: μερική επαναφόρτιση, TF-TE: μερική αποφόρτιση, TE-TG: αποφόρτιση.



Σχήμα 5. Μερική αποφόρτιση/ μερική επαναφόρτιση σε θλίψη. α): O-CA: φόρτιση, CA-CB-CE: αποφόρτιση, CE-CA: επαναφόρτιση. β): O-CA: φόρτιση, CA-CE: αποφόρτιση, CE-CF: μερική επαναφόρτιση, CF-CE: μερική αποφόρτιση, CE-CB-CG: αποφόρτιση.

Έλεγχος αξιοπιστίας προσομοιώματος

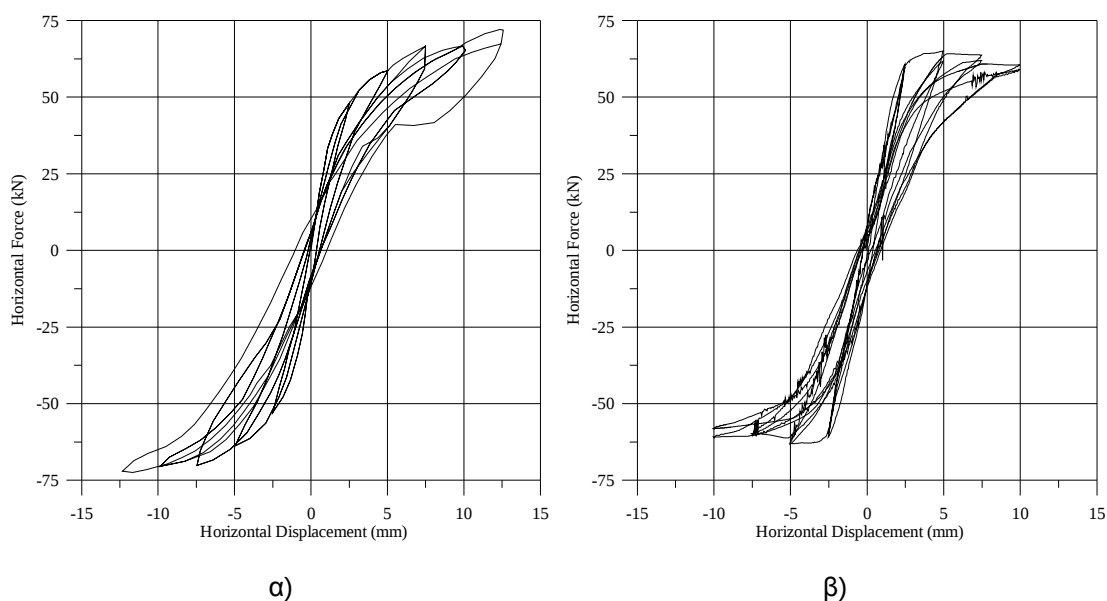
Ο έλεγχος αξιοπιστίας του καταστατικού προσομοιώματος έγινε μέσω επαλήθευσης πειραματικών αποτελεσμάτων. Η επίλυση των στατικών προβλημάτων γίνεται με δυναμική ανάλυση ρητής ολοκλήρωση (explicit dynamic analysis). Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση στατικών προβλημάτων υπό την προϋπόθεση ότι η κινηματική ενέργεια παραμένει μικρή συγκρινόμενη με την συνολική ενέργεια του συστήματος κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Για να επιτευχθεί αυτό, υπολογίζονται αρχικά οι ιδιοσυχνότητες του εξεταζόμενου φορέα και ο χρόνος επιβολής των φορτίσεων αυξάνεται κατάλληλα. Επίσης ελέγχεται ότι μετά την επιβολή των φορτίων βαρύτητας και των κατακόρυφων φορτίων, η ταλάντωση που δημιουργείται από την επιβολή των φορτίων αυτών, έχει αποσβεστεί πριν την επιβολή της επιβαλλόμενης μετακίνησης.

Επιλέχθηκαν δύο τοίχοι οι οποίοι δοκιμάστηκαν στο Joint Research Center (Antoine et al., 1995). Οι τοίχοι με πλάτος 1000mm και πάχος 250mm, είχαν κατασκευαστεί από λιθοσώματα διαστάσεων 250x120x55mm και κονίαμα από υδραυλική άσβεστο πάχους 10mm. Τα λιθοσώματα είχαν τοποθετηθεί σε δύο στρώσεις κατά το πάχος των τοίχων. Ο ένας τοίχος ήταν λυγηρός με λόγο ύψους προς πλάτος 2.00 (ύψος τοίχου 2000mm) και ο άλλος χθαμαλός με λόγο ύψους προς πλάτος 1.35 (ύψος τοίχου 1350mm). Η διακριτοποίηση των τοίχων έγινε με τετραπλευρικά τετρακομβικά στοιχεία επίπεδης έντασης διαστάσεων $250 \times 55 \text{ mm}^2$ με μειωμένο κανόνα ολοκλήρωσης. Οι κόμβοι της βάσης δεσμεύτηκαν σε οριζόντια και κατακόρυφη μετακίνηση, ενώ οι κόμβοι της κορυφής του τοίχου είχαν κοινή βύθιση και κοινή οριζόντια μετατόπιση. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας λήφθηκαν από διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα (Antoine et al., 1995) ενώ οι μη διαθέσιμες τιμές των μη γραμμικών παραμέτρων του υλικού εκτιμήθηκαν. Αρχικά ο κάθε τοίχος φορτίστηκε με το ίδιο βάρος του και το ομοιόμορφο κατακόρυφο φορτίο 150kN και ακολούθησε η επιβολή μετακίνησης ανακυκλιζόμενης μορφής. Ο λυγηρός τοίχος παρουσίασε καμπτική συμπεριφορά με τη δημιουργία οριζόντιας ρωγμής στη βάση και τη στέψη του τοίχου. Ο χθαμαλός τοίχος, παρουσίασε διατμητική συμπεριφορά με τη δημιουργία κατακόρυφων ρωγμών κατά τους κατακόρυφους αρμούς στο κεντρικό τμήμα του.

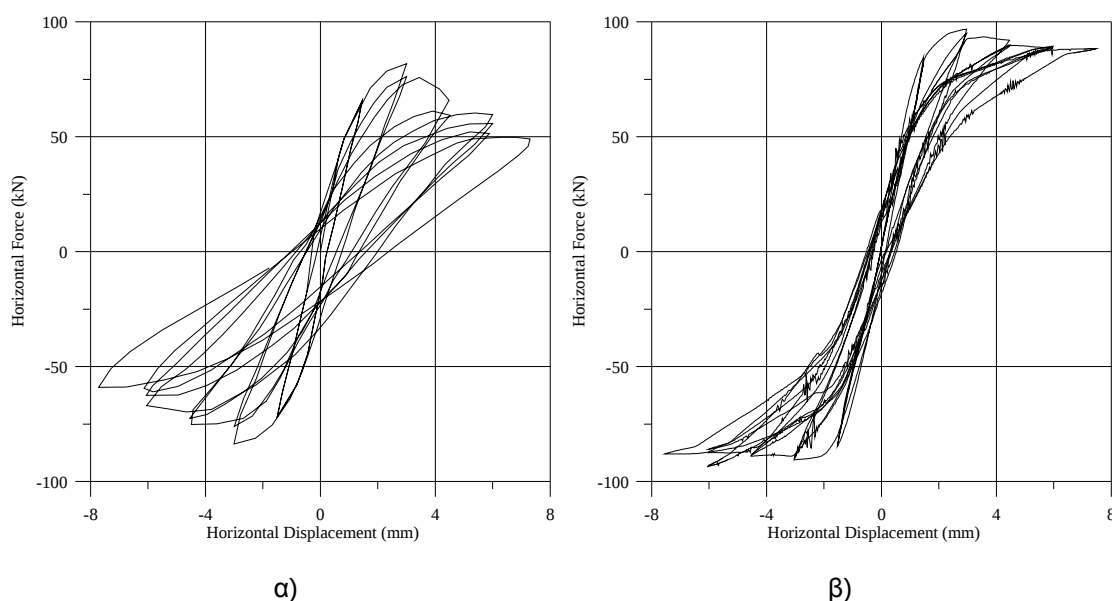
Στα Σχήματα 5 και 6 παρουσιάζονται τα πειραματικά και τα αναλυτικά διαγράμματα δύναμης – μετακίνησης των δύο τοίχων. Η σύγκριση πειραματικού και αναλυτικού διαγράμματος δύναμης- μετακίνησης του λιγυρού τοίχου κρίνεται ικανοποιητική. Το ίδιο δεν συμβαίνει στην περίπτωση του χθαμαλού τοίχου. Από το Σχήμα 6 φαίνεται η αδυναμία του προσομοιώματος να περιγράψει σωστά τη συμπεριφορά του διατμητικού τοίχου. Η αδυναμία αυτή έγκειται στο γεγονός ότι στο προσομοίωμα της περιστρεφόμενης ρωγμής η διατμητική τάση εξαρτάται από τις ορθές λόγω της ταύτισης του συστήματος των κύριων τάσεων με αυτό των κύριων τροπών. Το πρόβλημα αυτό έχει επισημανθεί και στην περίπτωση ανάλυσης τοίχων από οπλισμένο σκυρόδεμα τόσο σε μονοτονική όσο και σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, ειδικά όταν ο οπλισμός διάτμησης είναι ελάχιστος [17].

Για την αντιμετώπιση της αδυναμίας αυτής, έγινε προσπάθεια τροποποίησης της σχέσης τάσεων- τροπών στο σύστημα n-s είτε με την αύξηση της αρνητικής τάσης για την οποία κλείνει μια ρωγμή, είτε με τη μετάθεση της μονοτονικής καμπύλης θλίψης στο σημείο παραμένουσας εφελκυστικής τροπής. Οι προσπάθειες αυτές οδήγησαν σε αριθμητικές αστάθειες. Λαμβάνοντας υπόψη τις πιο πάνω επισημάνσεις, προτείνεται ένα καινούργιο

προσομοίωμα για την ανάλυση άοπλων τοίχων οι οποίοι υποβάλλονται σε ανακυκλοζόμενη φόρτιση εντός του επιπέδου τους.



Σχήμα 5. Λυγερός τοίχος: Διάγραμμα δύναμης- μετακίνησης, α): πείραμα, β): ανάλυση.

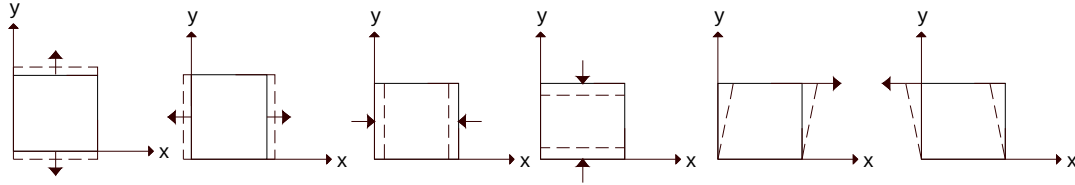


Σχήμα 6. Χθαμαλός τοίχος: Διάγραμμα δύναμης- μετακίνησης, α): πείραμα, β): ανάλυση.

ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΩΝ ΤΡΟΠΩΝ

Στην περίπτωση των στοιχείων επίπεδης έντασης δισδιάστατης ελαστικότητας, το διάνυσμα της τροπής σε κάθε υλικό σημείο αποτελείται από τρεις συνιστώσες: τις δύο ορθές τροπές ϵ_{xx} και ϵ_{yy} και τη διατμητική ϵ_{xy} . Μέσω των ορθών τροπών ελέγχεται η συμπεριφορά του υλικού σε εφελκυσμό (θετική τροπή) και θλίψη (αρνητική τροπή) κατά τη διεύθυνση x και y ,

ενώ μέσω της διατμητικής τροπής ϵ_{xy} γίνεται ο έλεγχος της συμπεριφοράς του υλικού έναντι διάτμησης. Οι τρεις αυτοί μηχανισμοί περιγράφονται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7. Μορφές αστοχίας: εφελκυσμός, θλίψη και διάτμηση.

Οι τάσεις σ_{xy} υπολογίζονται συναρτήσει των κύριων τροπών μέσω της συνάρτησης $F(\epsilon_{xy})$ με την οποία περιγράφεται η συμπεριφορά της τοιχοποιίας έναντι θλίψης /εφελκυσμού/διάτμησης ανάλογα με τη φάση φόρτισης (φόρτιση, αποφόρτιση, επαναφόρτιση). Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση του λόγου Poisson οι τροπές ϵ_{xy} αντικαθίστανται από τις ισοδύναμες κύριες τροπές $\tilde{\epsilon}_{xy}$ (Core et al., 1980) μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$\begin{Bmatrix} \tilde{\epsilon}_{xx} \\ \tilde{\epsilon}_{yy} \\ \tilde{\epsilon}_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-\nu^2} & \frac{\nu}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu^2} & \frac{1}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

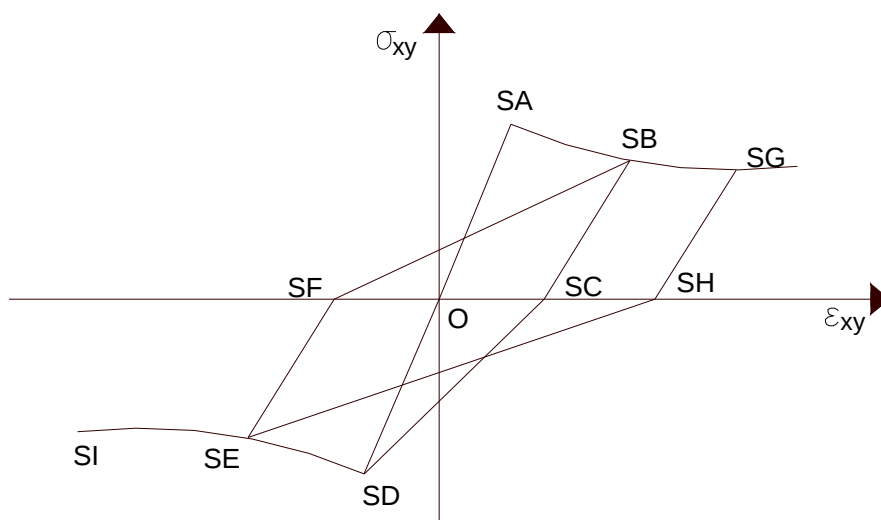
Με τον τρόπο αυτό οι τάσεις στο τοπικό σύστημα n-s δεν είναι συζευγμένες και ο υπολογισμός τους γίνεται συναρτήσει της αντίστοιχης ισοδύναμης κύριας τροπής $\tilde{\epsilon}_{xy}$:

$$\sigma_{xy} = F(\tilde{\epsilon}_{xy}) = \begin{bmatrix} F(\tilde{\epsilon}_{xx}) & 0 & 0 \\ 0 & F(\tilde{\epsilon}_{yy}) & 0 \\ 0 & 0 & F(\tilde{\epsilon}_{xy}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{\epsilon}_{xx} \\ \tilde{\epsilon}_{yy} \\ \tilde{\epsilon}_{xy} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

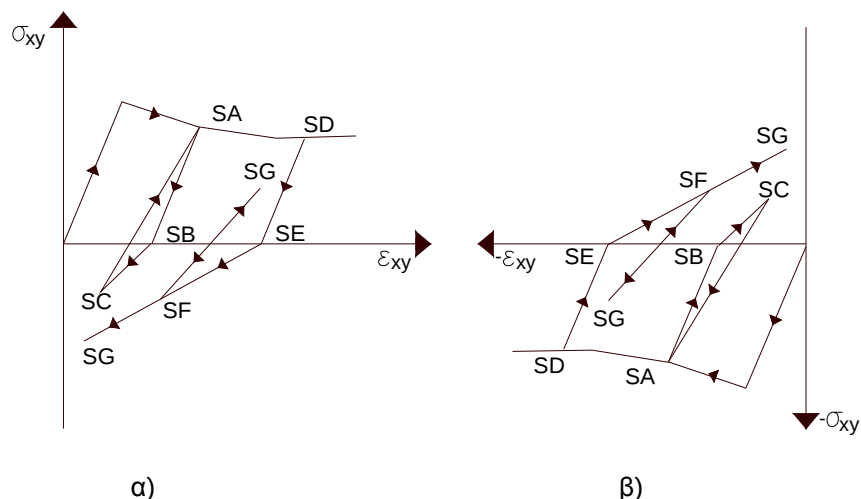
Σχέσεις τάσεων- τροπών σε μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Η μη γραμμική συμπεριφορά της τοιχοποιίας περιγράφεται στο καθολικό σύστημα χρησιμοποιώντας μονοαξονικές σχέσεις τάσης- ισοδύναμης τροπής. Οι ίδιες σχέσεις τάσεων-τροπών που ορίζουν τη μονοτονική και ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά του υλικού στο προσομοίωμα της περιστρεφόμενης ρωγμής, χρησιμοποιούνται κατά τη διεύθυνση x και y για τον έλεγχο έναντι εφελκυσμού και θλίψης. Για την εφαρμογή του προσομοιώματος αυτού, χρειάζεται επιπλέον η περιγραφή της μονοτονικής και ανακυκλιζόμενης συμπεριφοράς σε διάτμηση.

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται ο πρώτος και δεύτερος κύκλος φόρτισης ενός υλικού σημείου το οποίο φορτίζεται αρχικά σε διάτμηση στη θετική διεύθυνση. Όσο η διατμητική τροπή είναι μικρότερη από την διατμητική τροπή αντοχής (σημείο SA), η συμπεριφορά του υλικού είναι ελαστική και η φόρτιση /αποφόρτιση ακολουθεί την ευθεία γραμμή O-SA με κλίση G (Μέτρο Διάτμησης). Όταν η διατμητική τροπή ξεπεράσει την διατμητική τροπή αντοχής, τότε γίνεται σταδιακή απομείωση της αντοχής και της ακαμψίας του υλικού σε διάτμηση, μέχρι ένα όριο, από το οποίο και μετά η διατμητική αντοχή παραμένει σταθερή. Εάν συμβεί μια αντιστροφή στο σημείο SB, τότε το υλικό σημείο αρχίζει να αποφορτίζεται ακολουθώντας τους κλάδους SB-SC και SC-SD ή SH-SE. Οι κλάδοι αυτοί συνδέουν γραμμικά τα σημεία SB-SC και SC-SD και SH-SE. Το σημείο SC, αντιστοιχεί στο σημείο μηδενικής διατμητικής τάσης με παραμένουσα διατμητική τροπή. Στην περίπτωση που το υλικό σημείο έχει αστοχήσει στην αρνητική διεύθυνση σε προηγούμενο κύκλο φόρτισης, ακολουθείται ο κλάδος SH-SE όπου το σημείο SE είναι το σημείο από το οποίο ξεκίνησε η αποφόρτιση στην αρνητική διεύθυνση. Στην περίπτωση που το υλικό σημείο δεν έχει φορτιστεί στην αρνητική διεύθυνση, ή επέδειξε ελαστική συμπεριφορά σε προηγούμενο κύκλο φόρτισης, τότε ακολουθείται ο κλάδος SC-SD όπου το σημείο SD αντιστοιχεί στο σημείο διαρροής. Στην περίπτωση που συμβεί μια καινούργια αντιστροφή τροπής πριν την πλήρη αποφόρτιση (μερική αποφόρτιση, μερική επαναφόρτιση), τότε η συμπεριφορά του υλικού σημείου περιγράφεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 8. Σχέση διατμητικής τάσης- ισοδύναμης διατμητικής τροπής: Αρχική φόρτιση στη θετική διεύθυνση (O-SA-SB-SC-SD-SE-SF-SB-SG-SH-SE-SI).



Σχήμα 8. Μερική αποφόρτιση/ μερική επαναφόρτιση σε διάτμηση, α): Θετική διεύθυνση, β): Αρνητική διεύθυνση..

Έλεγχος αξιοπιστίας προσομοιώματος

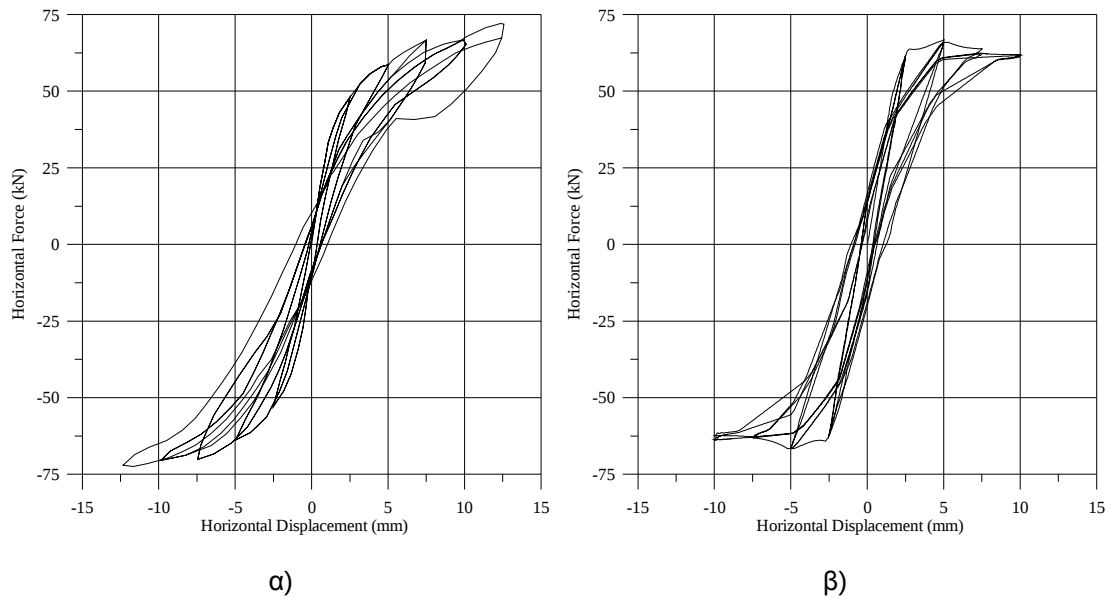
Ο έλεγχος αξιοπιστίας του μονοαξονικού καταστατικού προσομοιώματος έγινε μέσω επαλήθευσης πειραματικών αποτελεσμάτων. Για το σκοπό αυτό, αναλύθηκαν οι δύο τοίχοι οι οποίοι εξετάστηκαν για την αξιολόγηση του προσομοιώματος της περιστρεφόμενης ρωγμής. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά αποτελέσματα από δοκιμή άοπλης τοιχοποιίας σε στατική ανακυκλιζόμενη φόρτιση, η οποία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΑΤ/ΕΜΠ).

Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων

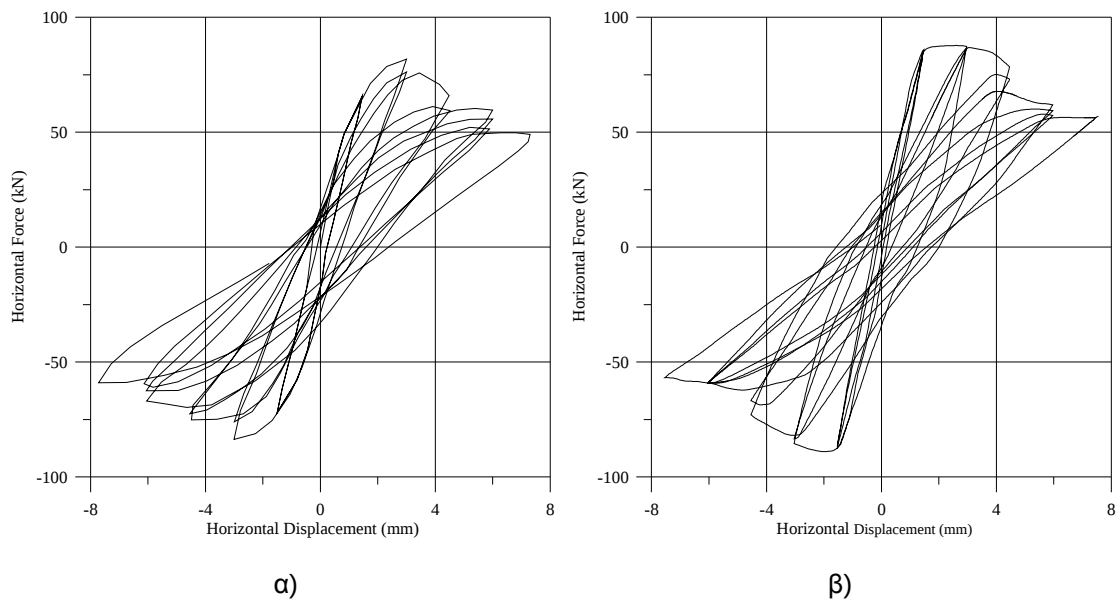
Τα πειραματικά και αναλυτικά διαγράμματα δύναμης- μετακίνησης του λιγυρού και χθαμαλού τοίχου οι οποίοι εξετάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, παρουσιάζονται στα Σχήματα 9 και 10 αντίστοιχα. Η διαφορετική υστρερητική συμπεριφορά του λιγυρού και χθαμαλού τοίχου, εκτιμάται από το προτεινόμενο καταστατικό προσομοίωμα με ικανοποιητική ακρίβεια, τόσο ως προς το μέγεθος του μέγιστου φορτίου, όσο και ως προς τη μορφή του διαγράμματος δύναμης- μετακίνησης.

Στη συνέχεια για την επαλήθευση του προτεινόμενου καταστατικού προσομοιώματος χρησιμοποιήθηκαν αποτελέσματα δοκιμής άοπλης τοιχοποιίας η οποία πραγματοποιήθηκε στο ΕΑΤ/ΕΜΠ (ΕΑΤ, 2002). Ο εξεταζόμενος φορέας είναι τοιχοποιία διαστάσεων $1.00 \times 1.50 \text{m}^2$ και πάχους 0.40m , η οποία αποτελείται από τρίστρωτη λιθοδομή (δύο ισχυρές στρώσεις από λιθοσώματα και εσωτερική στρώση από κονίαμα). Η τοιχοποιία κατά τη δοκιμή εξετάζεται ως αμφίπακτο στοιχείο. Έτσι κατά την ανάλυση, όλοι οι κόμβοι της βάσης θεωρούνται πακτωμένοι, ενώ οι κόμβοι της στέψης έχουν κοινή οριζόντια και κατακόρυφη μετακίνηση. Αρχικά η τοιχοποιία φορτίζεται με το ίδιο βάρος της και πρόσθετο κατακόρυφο φορτίο 0.75kN/m^2 . Ακολουθεί η επιβολή της μετακίνησης ανακυκλιζόμενης μορφής με αυξανόμενο εύρος. Η τοιχοποιία αστόχησε σε διάτμηση με τη δημιουργία διαγώνιων ρωγμών οι οποίες διαπερνούσαν τους κατακόρυφους και οριζόντιους αρμούς, ενώ για μετακινήσεις μεγάλου εύρους παρατηρήθηκε αποκόλληση των εξωτερικών στρώσεων από την εσωτερική. Το πειραματικό και αναλυτικό διάγραμμα δύναμης- μετακίνησης της εξεταζόμενης λιθοδομής,

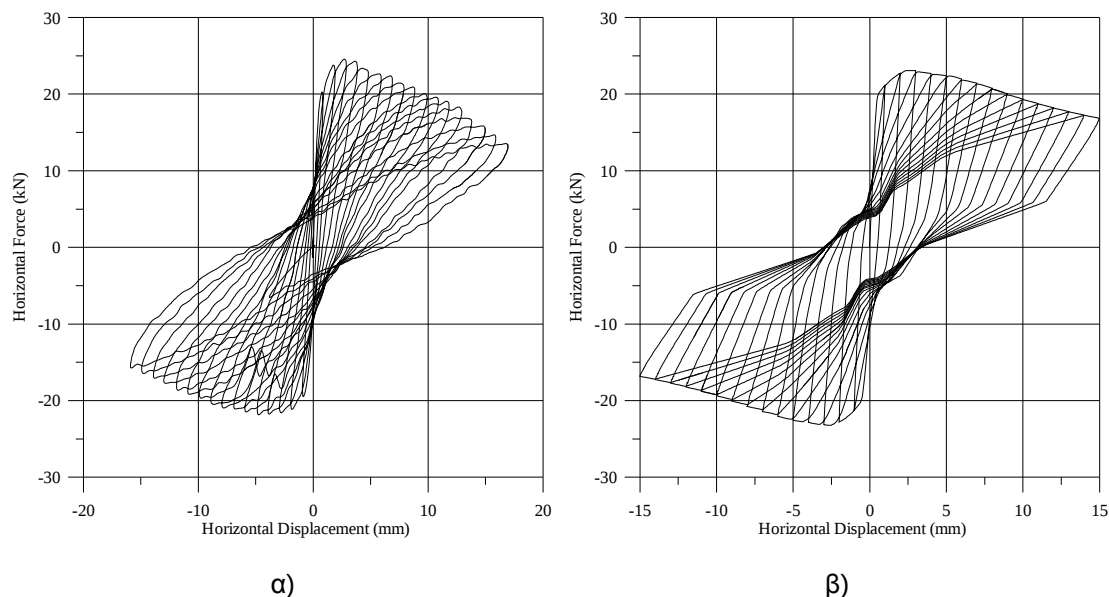
παρουσιάζονται στο Σχήμα 11. Από το σχήμα αυτό, φαίνεται ότι το προτεινόμενο καταστατικό προσομοίωμα μπορεί να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια τη συμπεριφορά της τοιχοποιίας, τόσο ως προς το μέγεθος του μέγιστου φορτίου, όσο και ως προς τη μορφή του διαγράμματος δύναμης- μετακίνησης.



Σχήμα 9. Λυγρός τοίχος εξεταζόμενος στο JRC: Διάγραμμα δύναμης- μετακίνησης, α): πείραμα, β): ανάλυση.



Σχήμα 10. Χθαμαλός τοίχος εξεταζόμενος στο JRC: Διάγραμμα δύναμης- μετακίνησης, α): πείραμα, β): ανάλυση.



Σχήμα 11. Τοίχος εξεταζόμενος στο ΕΑΤ/ΕΜΠ: Διάγραμμα δύναμης- μετακίνησης, α): πείραμα, β): ανάλυση.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται δύο καταστατικά προσομοιώματα για την ανάλυση άοπλης τοιχοποιίας, η οποία υπόκειται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση εντός του επιπέδου της. Τα προσομοιώματα ανήκουν στην κατηγορία της κατανεμημένης ρωγμής και αναπτύσσονται για στοιχείο επίπεδης έντασης στις δύο διαστάσεις. Το πρώτο προσομοίωμα στηρίζεται στο προσομοίωμα της περιστρεφόμενης κατανεμημένης ρωγμής. Για την εφαρμογή του απαιτούνται τα διαγράμματα τάσεων – τροπών σε θλίψη και εφελκυσμό σε μονοτονική και επανακυκλιζόμενη φόρτιση. Το προσομοίωμα αυτό, μπορούσε να εκτιμήσει σε ικανοποιητικό βαθμό την καμπτική συμπεριφορά τοιχοποιίας, όχι όμως και τη διατμητική. Για την άρση αυτής της αδυναμίας, προτάθηκε ένα μονοαξονικό καταστατικό προσομοίωμα, με το οποίο η συμπεριφορά έναντι θλίψης και εφελκυσμού ελέγχεται μέσω των ορθών τροπών στο σύστημα του υλικού, ενώ μέσω της διατμητικής τροπής ελέγχεται η συμπεριφορά έναντι διάτμησης. Το προσομοίωμα αυτό, απαιτεί πρόσθετα το διάγραμμα διατμητικής τάσης-διατμητικής τροπής υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, το οποίο όπως αποδείχθηκε από τη σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων, μπορεί να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια τόσο την καμπτική όσο και τη διατμητική συμπεριφορά της τοιχοποιίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ABAQUS 6.4-1, Theory Manual. Hibbit, Karlson and Sorenson, INC.
- Antoine A, Magonette G, Magenes G., (1995) "Shear – compression testing and analysis of brick masonry wall", *Proc. 10th European Conference on Earthquake Engineering* 3, G. Dumas (ed), pp. 1657-1662.
- Bazant ZP, Oh BH. (1983), "Crack band theory for fracture of concrete", *Materials and Structures*, RILEM, 93 (16), pp. 155-177.
- Casolo S, Pena F., (2007), "Rigid element model for in- planer dynamics of masonry walls considering hysteretic behaviour and damage", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* (in press).

- Cope RJ, Rao PV, Clark LA, Noris P., (1980), "Modeling of Reinforced Concrete Behavior for Finite Element Analysis of Bridges Slabs". *Numerical Methods for Non-Linear Problems*, C. Taylor, E. Hinton, D.R.J Owen eds., Pineridge Press, Swansea, UK, pp. 457-470.
- Feenstra PH, Rots JG, Arnese A, Teigen JG and Hoiseth KV. (1998), A 3D constitutive model for concrete based on co-rotational concept. *Computational modeling of concrete structures*, Proceedings of the EURO-C, ed. R. de Borst, N. Bioanio, H. Mang, and G. Meschke eds, pp. 13-22.
- Gabarotta L, Logomarsino S., (1997), "Damage models for the seismic response of brick masonry shear wall. Part I: The mortar joint model and its applications", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 26, pp. 423-439.
- Gabarotta L, Logomarsino S., (1997), "Damage models for the seismic response of brick masonry shear wall. Part II: The continuum model and its applications", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 26, pp. 441-462.
- He W, Wu YF, Liew KM, Wu Z. (2006), "A 2D total strain based constitutive model for predicting the behaviours of concrete structures", *Int. J. Eng. Scienc.*, 44, pp. 1280-1303.
- Kwa WP, Billington SL., (2001), "Simulation of structural concrete under cyclic load". *J. Struct. Engrg.*, 127, pp. 1391-1401.
- Lofti HR, Shing PB, (1991). "An Appraisal of Smeared crack models for masonry shear wall analysis". *Computer and Structures*, 41 (3), pp. 413-425.
- Lofti HR, Shing PB.,(1994) "An Interface Model applied to Fracture of Masonry Structures". *Journal of Structural Engineering ASCE*, 120 (1), pp. 63-80.
- Lourenço PB, Rots JG, Feenstra PH., (1995), "A tensile "Rankine" type orthotropic model for masonry", *Computer Methods in Structural Masonry -3*, Ed. J. Middleton, G.N. Pande, Books & Journals International, Swansea, UK, pp. 167-176.
- Lourenço PB, Rots JG., (1997), "Multisurface Interface Model for Analysis of Masonry Structures", *Journal of Engineering Mechanics*, 123 (7): 660-668.
- Ngo, D., Scordelis, AC., (1967) "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams", *ACI Journal* 64 (3), pp.153-163.
- Oliveira DV, Lourenco PB., (2004), "Implementation and validation of a constitutive model for the cyclic behaviour of interface elements", *Compt. and Struct.*, 82, pp. 1451-1461.
- Page AW. (1978) "Finite Element model for masonry", *J. Struct. Div., ASCE*, 104 (8), pp.1267-1285.
- Pegon P, Anthoine A., (1994), "Numerical strategies for solving continuum damage problems involving softening: application to the homogenization of masonry", *CIVIL-COMP Advances in Non-Linear Finite Elements Methods*, pp. 143-157.
- Rashid YR., (1968) "Analysis of prestressed concrete pressure vessels", *Nucl. Engng. Des.* 7, pp.334-344.
- Samarasinghe, W., Page, AW., Hendry, AW., (1982) "A finite element model for the in-plane behavior of brickwork", *The Structural Engineering*, 59B, 3, pp. 42-48.
- Vecchio FJ, Collins MP., (1986), "The modified compression filed theory for reinforced concrete elements subjected to shear", *ACI Journal*, 83 (3), pp. 219-231.
- Τεχνική Έκθεση, (2002), «Λιθοδομή υπό στατική ανακυκλιζόμενη επιβολή μετακίνησης», Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.