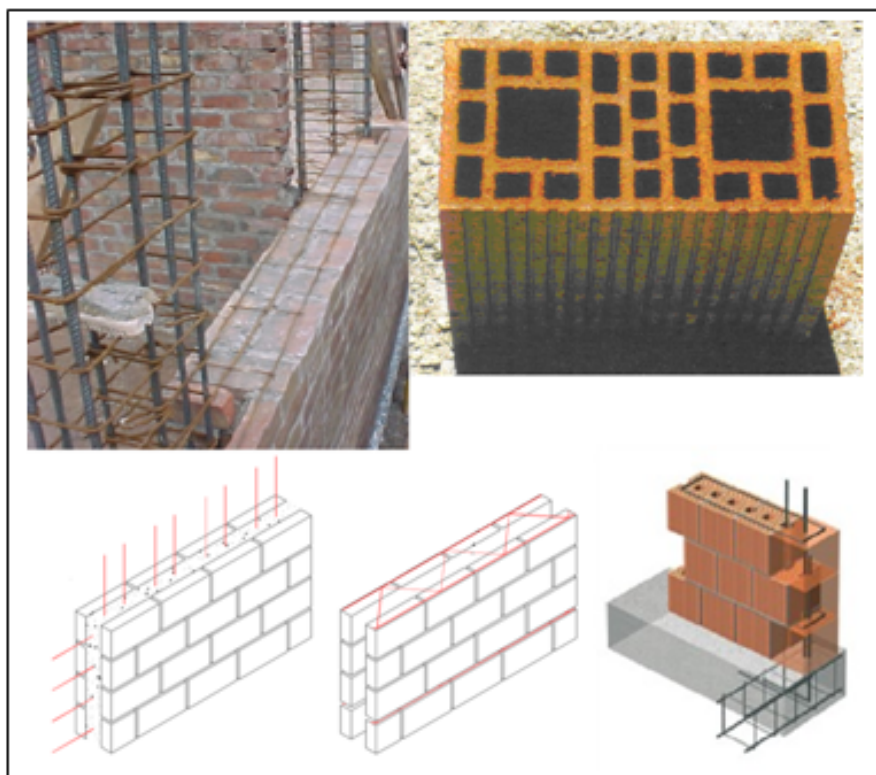




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ
ΥΠΟ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ
ΦΟΡΤΙΣΗ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΤΗΣ**



ΓΕΡΟΥΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:
Χ. ΜΟΥΖΑΚΗΣ Επ. Καθηγητής Ε. Μ. Π.**

**ΑΘΗΝΑ
ΙΟΥΛΙΟΣ 2011**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	vi
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ1 ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΤΟΙΧΟΠΟΙΑ</u>	
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	1
1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ.....	1
1.2.1 ΑΟΠΛΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ.....	2
1.2.2 ΔΙΑΖΩΜΑΤΙΚΗ (ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΗ) ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ.....	3
1.2.3 ΟΠΛΙΣΜΕΝΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ.....	5
1.2.4 ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ.....	8
1.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΙΧΩΝ ΥΠΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΝΑΜΗ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΤΟΥΣ.....	9
1.4 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ.....	12
1.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ.....	13
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΗΣΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ– ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙΜΕΤΑΦΟΡΑΣΔΥΝΑΜΗΣ</u>	
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	16
2.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΜΙΑΣ ΡΩΓΜΗΣ.....	18
2.2.1 ΤΡΙΒΗ ΠΛΙΝΘΟΥ-ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΑΡΜΩΝ.....	18
2.2.2 ΤΡΙΒΗ ΠΛΙΝΘΟΥ-ΠΛΙΝΘΟΥ.....	19
2.2.3 ΔΡΑΣΗ ΒΛΗΤΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΩΝ.....	20
2.2.4 ΔΡΑΣΗ ΒΛΗΤΡΟΥ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΟΠΛΙΣΜΩΝ.....	21
2.2.5 ΕΞΟΛΚΕΥΣΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΩΝ.....	23
2.2.6 ΕΞΟΛΚΕΥΣΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΟΠΛΙΣΜΩΝ.....	24
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ3 ΜΗΧΑΝΙΚΑΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ</u>	
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	26

3.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΝΤΩΝ	
ΥΛΙΚΩΝ	26
3.2.1 ΠΛΙΝΘΟΙ.....	26
3.2.2 ΚΟΝΙΑΜΑ ΔΟΜΗΣΕΩΣ ΚΑΙ ΠΛΗΡΩΣΕΩΣ.....	28
3.3 ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ	29
3.3.1 ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ.....	29
3.3.2 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ.....	30
3.4 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΙ ΝΟΜΟΙ	31
3.4.1 ΤΡΙΒΗ ΠΛΙΝΘΟΥ-ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ.....	32
3.4.2. ΤΡΙΒΗ ΠΛΙΝΘΟΥ-ΠΛΙΝΘΟΥ.....	33
3.4.3 ΔΡΑΣΗ ΒΛΗΤΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΩΝ.....	36
3.4.4 ΔΡΑΣΗ ΒΛΗΤΡΟΥ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΟΠΛΙΣΜΩΝ.....	37
3.4.5 ΕΞΟΛΚΕΥΣΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΩΝ.....	40
3.4.6 ΕΞΟΛΚΕΥΣΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΟΠΛΙΣΜΩΝ.....	42
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</u>	
<u>ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ</u>	
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	45
4.2 ΤΟΙΧΟΣ 1.....	48
4.3 ΤΟΙΧΟΣ 2.....	49
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ</u>	
<u>ΧΑΛΥΒΑ</u>	
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	52
5.2 ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΕΩΝ- ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ.....	52
5.3 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΓΝΕΓΟΤΤΟ-ΡΙΝΤΟ (1983).....	57
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ</u>	
<u>ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΑΒΑQUS</u>	
6.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΒΑQUS.....	61
6.2 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ.....	63
6.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	63

6.2.2 ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΣΥΝΟΛΙΚΩΝ ΤΡΟΠΩΝ.....	63
6.2.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ.....	64
6.3 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ	65
6.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	67
6.4.1 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ	67
6.4.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΠΟ ΘΛΙΨΗ.....	69
6.4.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΠΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ.....	70
6.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΙΧΩΝ 1,2.....	71
6.5.1 ΤΟΙΧΟΣ 1.....	70
6.5.2 ΤΟΙΧΟΣ 2.....	75
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ</u>	
<u>ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ-ΧΑΛΥΒΑ</u>	
7.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ.....	79
7.2 ΤΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΩΝ ELIGENHAUSEN ET AL. 1983.....	80
7.3 ΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΤΩΝ FILIPPOU ET AL. 1983.....	82
7.4 ΤΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΗΣ LOWES 1999.....	84
7.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ CIAMPI ET AL. 1982.....	85
7.6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΟΝΤΙ ET AL. 1997.....	86
7.7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΩΝ ΑΥΟΥΒ & FILIPPOU 1999.....	87
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</u>	88
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	91

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά τοίχων οπλισμένης τοιχοποιίας συγκρίνοντας πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα. Τα πειραματικά αποτελέσματα που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται αναλυτικά στη Διδακτορική διατριβή *“Συμπεριφορά οπλισμένης τοιχοποιίας υπό μονοτονικές και ανακυκλιζόμενες δράσεις εντός του επιπέδου της”* της Νικολέττας Ψύλλα. Τα αναλυτικά αποτελέσματα προέκυψαν με μη γραμμική ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS/Explicit. Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκε το μονοαξονικό προσομοίωμα συνολικών τροπών. Για κάθε τοίχο που εξετάστηκε εκτελέστηκαν δοκιμές ανακυκλιζόμενης φόρτισης για τον προσδιορισμό της καμπύλης οριζόντιας δύναμης – μετατόπισης. Οι συγκεκριμένες καμπύλες προσδιορίστηκαν για κάθε τοίχο από δύο διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης, των οποίων η διαφορά είναι στον τρόπο εισαγωγής των οπλισμών.

Σκοπός της εργασίας είναι η εκτίμηση της συμπεριφοράς οπλισμένης τοιχοποιίας σε μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση εντός του επιπέδου της με την εφαρμογή του μονοαξονικού προσομοιώματος συνολικών τροπών. Το προσομοίωμα αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας για άοπλη τοιχοποιία. Με την εργασία αυτή επιχειρείται η επέκτασή του σε οπλισμένη τοιχοποιία.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τοιχοποιία αποτελεί ένα από τα αρχαιότερα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα. Αιώνες πριν κατασκευάζονταν σπουδαία έργα σε όλο τον κόσμο από φέρουσα τοιχοποιία με τοποθέτηση λιθοσωμάτων το ένα πάνω στο άλλο με ή χωρίς συνδετικό υλικό. Παρόλα τα πλεονεκτήματα, οι κατασκευές από άοπλη τοιχοποιία παρουσιάζουν μειωμένη εφελκυστική αντοχή, γεγονός που τις καθιστά τρωτές για χρήση σε σεισμογενείς περιοχές. Σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλοί μέθοδοι ώστε να εισαχθεί οπλισμός στην τοιχοποιία ο οποίος θα μπορεί να αναλάβει τις σεισμικές δράσεις .

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε οπλισμένη τοιχοποιία από ορθότρυπες κεραμικές πλίνθους στις οπές των οποίων ενσωματώθηκε κατακόρυφος οπλισμός και στους αρμούς ο οριζόντιος οπλισμός.

Για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας και παραμορφωσιμότητας των κατασκευών από οπλισμένη τοιχοποιία είναι απαραίτητη η γνώση των βασικών μηχανικών χαρακτηριστικών των συνιστώντων υλικών της (λιθοσώματα, κονιάματα, χάλυβας), τα οποία προκύπτουν μέσω εργαστηριακών δοκιμών, καθώς επίσης και η γνώση της συμπεριφοράς της, η οποία προκύπτει μέσω δοκιμών επί αντιπροσωπευτικών τμημάτων τοίχου διαφόρων σχημάτων και διαστάσεων.

Για την ερμηνεία της γενικής συμπεριφοράς των τοίχων μετά τη ρηγμάτωση και την ανάπτυξη σχετικών αναλυτικών προσομοιωμάτων είναι απαραίτητη η γνώση των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων κατά μήκος μιας ρωγμής καθώς επίσης και των καταστατικών νόμων που αυτοί ακολουθούν. Οι μηχανισμοί αυτοί χαρακτηρίζουν την απομένουσα αντίσταση του τοίχου στην μετά την αστοχία περιοχή των μεγάλων παραμορφώσεων και συνδέονται άμεσα με την διατιθέμενη πλασιμότητα του στοιχείου, αφού αποτελούν τις κύριες πηγές απορρόφησης ενέργειας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά τοίχων οπλισμένης τοιχοποιίας συγκρίνοντας πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα. Τα αναλυτικά αποτελέσματα προέκυψαν με μη γραμμική ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS/Explicit. Για κάθε τοίχο που

εξετάστηκε εκτελέστηκαν δοκιμές ανακυκλιζόμενης φόρτισης για τον προσδιορισμό της καμπύλης οριζόντιας δύναμης –μετατόπισης καθώς και του τρόπου αστοχίας του.

Σκοπός της εργασίας είναι η εφαρμογή καταστατικών προσομοιωμάτων χάλυβα και τοιχοποιίας για την εκτίμηση της συμπεριφοράς οπλισμένης τοιχοποιίας σε μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση εντός του επιπέδου της. Γίνεται σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων και καταγράφονται οι αδυναμίες των προσομοιωμάτων όπου αυτές υπάρχουν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΟΠΛΙΣΜΕΝΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η τοιχοποιία αποτελεί το αρχαιότερο δομικό υλικό. Πριν την εμφάνιση του χάλυβα και του σκυροδέματος πολλά δομικά έργα όπως κατοικίες, εκκλησίες, υδραγωγεία, γέφυρες, οχυρωματικά έργα κατασκευάζονταν από τοιχοποιία, με την τοποθέτηση φυσικών ή τεχνητών λιθοσωμάτων το ένα πάνω στο άλλο, με ή χωρίς συνδετικό υλικό. Παρ' όλη την απλότητα των κατασκευών παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως η γρήγορη εκτέλεση και το χαμηλό κόστος κατασκευής καθώς επίσης και ικανοποιητικό αποτέλεσμα σε ζητήματα αισθητικής, αντοχής, πυροπροστασίας, θερμομόνωσης και ηχομόνωσης που επιτυγχάνονται με κατάλληλη επιλογή λιθοσωμάτων.

Ωστόσο, οι κατασκευές από άοπλη τοιχοποιία παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα όσον αφορά στη συμπεριφορά τους στις σεισμικές δράσεις. Συγκεκριμένα, η τοιχοποιία μπορεί να αναλάβει θλιπτικά φορτία και μικρά οριζόντια, όμως καθώς η κατασκευή υποβάλλεται στις μεγάλου εύρους ανακυκλιζόμενες μετατοπίσεις του σεισμού, η αντίστασή της μειώνεται δραστικά, λόγω του εγκάρσιου εφελκυσμού που εισάγεται από τις θλιβόμενες διαγωνίους οι οποίες αντιστέκονται στις σεισμικές δράσεις. Μόλις οι εφελκυστικές τάσεις ξεπεράσουν την αντοχή της, η τοιχοποιία αστοχεί αρχικά τοπικά με ψαθυρό τρόπο. Λόγω του ότι σημαντικές ανακατανομές των τάσεων δεν είναι δυνατές, η αστοχία γίνεται καθολική και μπορεί να οδηγηθεί το σύστημα ακόμα και σε κατάρρευση.

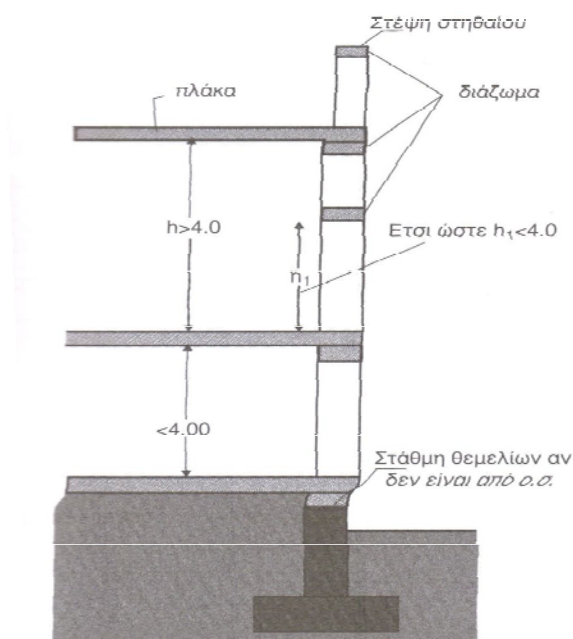
1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

Στην προσπάθεια αντιμετώπισης των αδυναμιών της άοπλης τοιχοποιίας στην ανάληψη σεισμικών φορτίων αναπτύχθηκαν ορισμένα συστήματα τοιχοποιίας: η άοπλη φέρουσα τοιχοποιία η διζωματική (ή περισφιγμένη), η οπλισμένη και η προεντεταμένη τοιχοποιία.

1.2.1 Άοπλη τοιχοποιία

Σε χώρες με μεγάλη σεισμικότητα όπως η Ελλάδα, ακόμα και η άοπλη φέρουσα τοιχοποιία πρέπει να έχει περιμετρικά του κτιρίου οριζόντιες ζώνες από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ειδικότερα πρέπει να ισχύουν τα εξής:

- Τα οριζόντια διαζώματα συνήθως κατασκευάζονται στη στάθμη της οροφής κάθε ορόφου και στη στάθμη των ανωφλίων ή/και των κατωφλίων των ανοιγμάτων.
- Πρέπει να διατάσσονται σε όλες τις στάθμες των ορόφων και στη στέψη φερόντων και μη φερόντων τοίχων ακόμα και στη στέψη των θεμελίων, αν αυτά δεν είναι κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Πρέπει ακόμα να κατασκευάζονται σε ενδιάμεσες στάθμες τοίχων που ξεπερνούν σε ύψος τα 4.0 m. Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η διάταξη οριζόντιων διαζωμάτων καθ' ύψος ενός τοίχου.
- Το πάχος των διαζωμάτων πρέπει να είναι όσο το πάχος του τοίχου και το ύψος τους ίσο με το πάχος της πλάκας αλλά όχι λιγότερο από 15cm.
- Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι ποιότητας τουλάχιστον C12/15.
- Ο ελάχιστος διαμήκης οπλισμός πρέπει να είναι 200mm^2 και οι συνδετήρες να είναι τουλάχιστον $\Phi 6/250$.



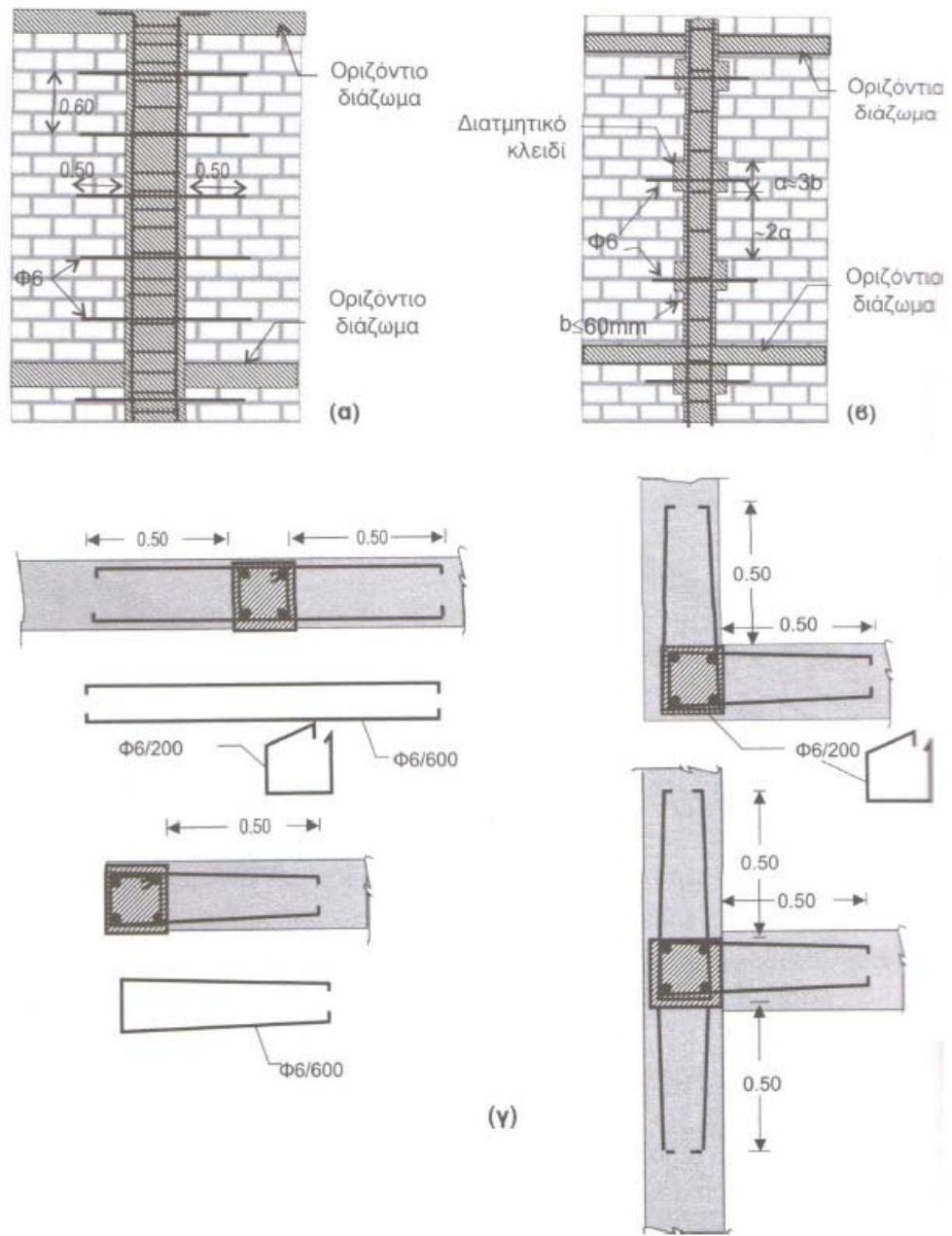
Σχ. 1.1: Διάταξη οριζόντιων διαζωμάτων καθ' ύψος ενός τοίχου

1.2.2 Διαζωματική (περισφιγμένη) τοιχοποιία

Πρόκειται για ένα δομικό σύστημα που αποτελείται από οριζόντιες και κατακόρυφες ζώνες σκυροδέματος ανά κανονικά διαστήματα, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους ώστε να περισφίγγουν τους άοπλους τοίχους. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτού του συστήματος είναι η εξασφάλιση μεγαλύτερης πλασιμότητας στους τοίχους αλλά και στο κτίριο συνολικά.

Κατά την κατασκευή της διαζωματικής τοιχοποιίας πρέπει να ισχύουν τα εξής :

- Οι κατακόρυφες ζώνες από οπλισμένο σκυρόδεμα πρέπει να κατασκευάζονται σε όλες τις γωνίες, τις εσοχές και τις συμβολές των φερόντων τοίχων.
- Σε ανοίγματα με επιφάνεια μεγαλύτερη από 1.5m^2 πρέπει να κατασκευάζονται κατακόρυφες ζώνες στους λαμπάδες τους.
- Η μέγιστη απόσταση των κατακόρυφων και οριζόντιων ζωνών δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 4.0m.
- Οι κατακόρυφες ζώνες πρέπει να κατασκευάζονται μετά την ολοκλήρωση του κτισίματος των τοίχων και η διεπιφάνεια σκυροδέματος-λιθοσωμάτων πρέπει να είναι οδοντωτή ώστε να εξασφαλίζεται η καλή συνεργασία των δύο υλικών (διατμητικοί σύνδεσμοι ή κλειδιά). Σε περίπτωση ευθείας διεπιφάνειας μεταξύ σκυροδέματος και λιθοσωμάτων, η συνεργασία των δύο υλικών εξασφαλίζεται με ράβδους οπλισμού σε κατακόρυφη απόσταση 0.60m που εισέρχονται στην τοιχοποιία τουλάχιστον 0.50m εκατέρωθεν της οπλισμένης ζώνης, ενώ σε περίπτωση οδοντωτής διεπιφάνειας οι ράβδοι τοποθετούνται σε κάθε κλειδί. Στο Σχήμα 1.2 φαίνονται οι λεπτομέρειες οπλισμού των κατακόρυφων ζωνών σε περίπτωση ευθείας και οδοντωτής διεπιφάνειας μεταξύ σκυροδέματος και λιθοσωμάτων.
- Το πάχος των ζωνών πρέπει να είναι όσο το πάχος του τοίχου, πάντως όχι μικρότερες από $0.15 \times 0.15\text{m}$. Στις εξωτερικές πλευρές το πάχος τους μπορεί να είναι μικρότερο από αυτό του τοίχου ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί και θερμομόνωση.
- Το σκυρόδεμα πρέπει να είναι τουλάχιστον ποιότητας C12/15.
- Ο ελάχιστος διαμήκης οπλισμός των οριζόντιων και κατακόρυφων ζωνών δεν πρέπει να έχει διατομή μικρότερη από 240mm^2 . Η τοποθέτηση συνδετήρων είναι επιβεβλημένη.
- Οι οριζόντιες και κατακόρυφες στήλες μπορούν να σχηματίζονται και από οπλισμένη τοιχοποιία με χρήση ειδικών λιθοσωμάτων .



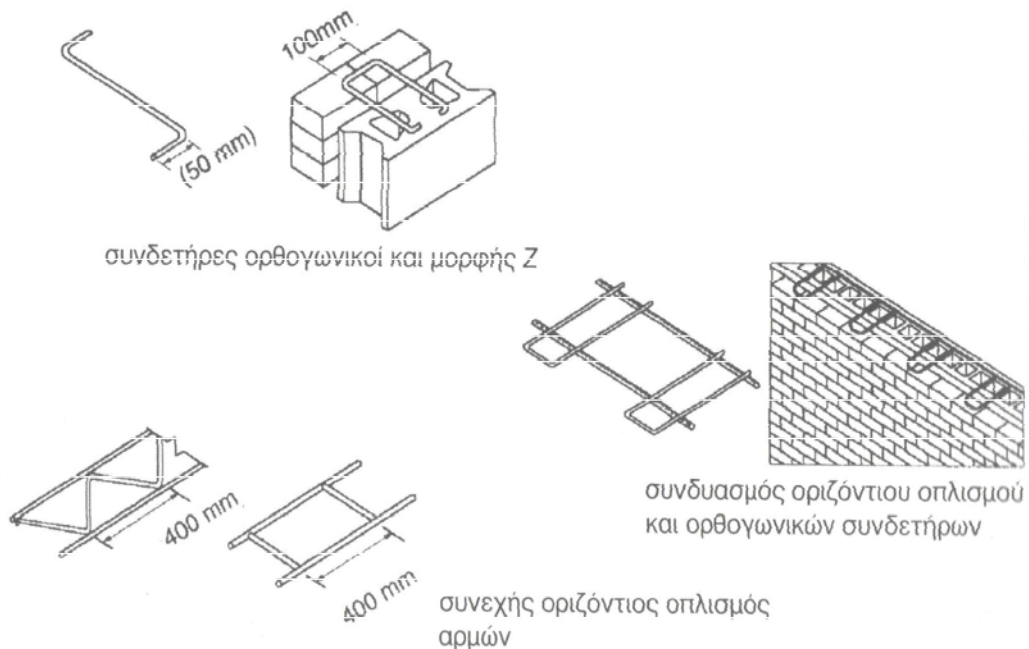
Σχ. 1,2: Διαμόρφωση α) κοινών κατακόρυφων ζωνών β) ζωνών με διατμητικό σύνδεσμο από σκυρόδεμα γ) λεπτομέρειες οπλισμών

1.2.3 Οπλισμένη τοιχοποιία

Διακρίνονται τρεις τύποι οπλισμένης τοιχοποιίας : α) περισφιγμένη οπλισμένη τοιχοποιία, β) τοιχοποιία με οπλισμό στον πυρήνα και γ) τοιχοποιία με διάσπαρτο οπλισμό στα λιθοσώματα.

α) Περισφιγμένη οπλισμένη τοιχοποιία

Πρόκειται για ένα συνδυασμό που αποτελείται από κατακόρυφες ζώνες οπλισμένου σκυροδέματος με προσθήκη οριζόντιου οπλισμού στους αρμούς, ο οποίος αγκυρώνεται περιβάλλοντας τον κατακόρυφο και στα δύο άκρα του τοίχου. Ο οριζόντιος οπλισμός μπορεί να είναι ευθείες ράβδοι, ορθογωνικοί συνδετήρες ή και πλέγματα αποτελούμενα από δύο παράλληλες ράβδους συγκολλημένες με άλλες λοξές. Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζονται οι μορφές του οριζόντιου οπλισμού. Τα λιθοσώματα μπορεί να είναι είτε κοινά όπου ο οπλισμός τίθεται στους οριζόντιους αρμούς είτε ειδικού τύπου όπου ο οπλισμός τοποθετείται σε κατάλληλες αυλακώσεις.



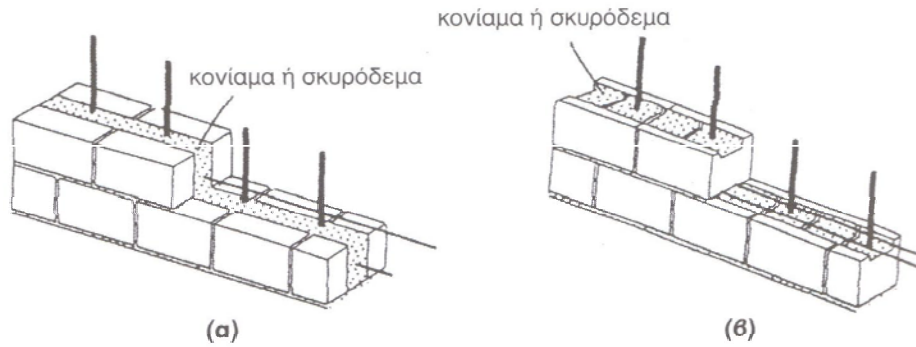
Σχ. 1.3: Οριζόντιος οπλισμός αρμών

β) Τοιχοποιία με οπλισμό στον πυρήνα

Σε αυτόν τον τύπο της οπλισμένης τοιχοποιίας χρησιμοποιούνται συμπαγή λιθοσώματα σε τοίχους δύο στρώσεων όπου ο κατακόρυφος και ο οριζόντιος οπλισμός τοποθετούνται στο ενδιάμεσο κενό το οποίο γεμίζει με έγχυτο τσιμεντοκονίαμα ή σκυρόδεμα. Στην περίπτωση της τοιχοποιίας με οπλισμό στον πυρήνα πρέπει να ισχύουν τα εξής :

- Κάθε κατακόρυφη στρώση έχει το πάχος του λιθοσώματος και ο πυρήνας έχει πάχος 60-100mm.
- Οι δύο στρώσεις πρέπει να συνδέονται με φουρκέτες ή μεταλλικούς συνδέσμους όπως αυτοί του Σχήματος 1.3, σε ποσοστό τουλάχιστον $1\Phi 6/0.25 \text{ m}^2$ κατακόρυφου επιφανείας τοίχου.
- Το κονίαμα του πυρήνα μπορεί να χύνεται είτε σε στάδια είτε όταν ολοκληρωθεί το κτίσιμο των εξωτερικών στρώσεων. Στην πρώτη περίπτωση χτίζονται οι εξωτερικές στρώσεις μέχρι ένα ορισμένο ύψος τοποθετούνται οι κατακόρυφοι οπλισμοί, χύνεται το κονίαμα, τοποθετούνται οι οριζόντιοι οπλισμοί πάνω σε αυτό. Συνεχίζεται το κτίσιμο των εξωτερικών στρώσεων και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία. Στη δεύτερη περίπτωση τοποθετείται το πλέγμα του οριζόντιου και κατακόρυφου οπλισμού, κτίζονται οι εξωτερικές στρώσεις μέχρι το ύψος του ορόφου και τότε χύνεται το κονίαμα στον πυρήνα.
- Κατά τη διάρκεια του κτισίματος οι δύο στρώσεις πρέπει να συνδέονται με συνδετήρες με μέγιστες αποστάσεις 0.60 m οριζοντίως και 0.40 m καθέτως, γι' αυτό και οι δύο στρώσεις πρέπει να κτίζονται συγχρόνως.
- Στη βάση κάθε τμήματος του τοίχου πρέπει να υπάρχει οπή για τον καθαρισμό της βάσης του πυρήνα από το κονίαμα.
- Οι φουρκέτες πρέπει να βρίσκονται στη ίδια ευθεία για διευκόλυνση της δόνησης του κονιάματος.
- Πρέπει να καθαρίζονται οι οπλισμοί από το κονίαμα και να υπάρχει συνάφεια μεταξύ του υλικού του πυρήνα και του θεμελίου ή της πλάκας που στηρίζεται η τοιχοποιία.

Ο οπλισμός μπορεί να τοποθετηθεί στον πυρήνα με χρήση ειδικών λιθοσωμάτων με οπές όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4(β).



Σχ. 1.4: Οπλισμένη τοιχοποιία με οπλισμό στον πυρήνα

γ) Τοιχοποιία με διάσπαρτο οπλισμό στα λιθοσώματα

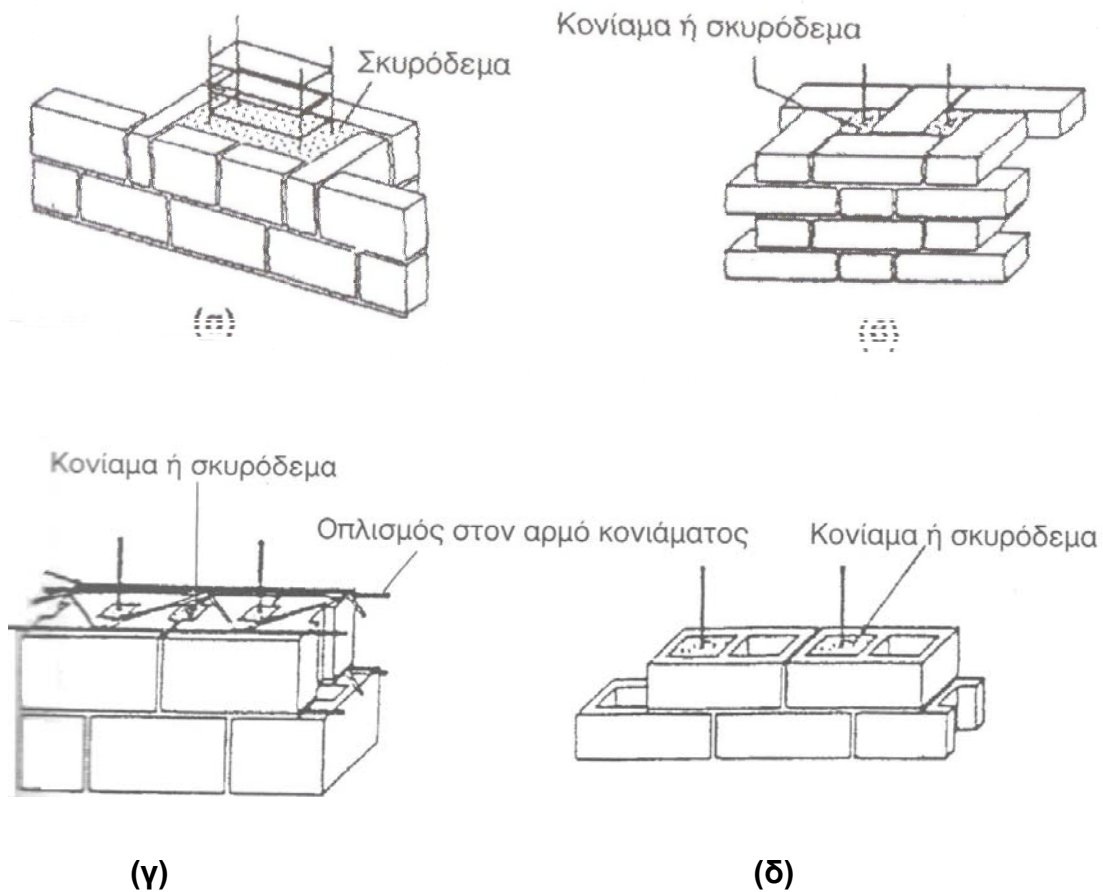
Για την κατασκευή αυτού του τύπου οπλισμένης τοιχοποιίας υπάρχουν δύο τρόποι :

- Η τοποθέτηση των λιθοσωμάτων με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται ‘φωλιές’ στις οποίες τοποθετείται ο κατακόρυφος οπλισμός και στη συνέχεια γεμίζουν με κονίαμα (Σχήμα 1.5 α-β).
- Η χρήση λιθοσωμάτων με αυλακώσεις ή μεγάλες οπές για την τοποθέτηση του οριζώντιου και κατακόρυφου οπλισμού (Σχήμα 1.5 γ-δ).

Κατά την κατασκευή συνήθως τοποθετείται ο κατακόρυφος οπλισμός, στη συνέχεια τοποθετούνται τα λιθοσώματα μέχρι τη στάθμη που πρέπει να τοποθετηθεί ο οριζόντιος οπλισμός είτε στις ειδικές αυλακώσεις των λιθοσωμάτων είτε στους οριζόντιους αρμούς. Έπειτα γίνεται η πλήρωση των κενών με κονίαμα ή σκυρόδεμα και συνεχίζεται το καθ' ύψος κτίσιμο των λιθοσωμάτων.

Η χρήση της οπλισμένης τοιχοποιίας είναι πολύ διαδεδομένη και επιβεβλημένη σε ζώνες με υψηλή σεισμικότητα. Συγκεκριμένα, έχουν επικρατήσει δύο τάσεις. Στην Αμερική και στη Νέα Ζηλανδία επικρατεί η χρήση ορθότρυπων λιθοσωμάτων από σκυρόδεμα και σπανιότερα από άργιλο όπου ο κατακόρυφος οπλισμός τοποθετείται στις κατακόρυφες οπές οι οποίες γεμίζουν όλες με έγχυτο κονίαμα και ο οριζόντιος σε ειδικά σκαφοειδή λιθοσώματα. Έτσι κατασκευάζονται κτίρια μεσαίου και μεγάλου ύψους, στα οποία ενδιαφέρει περισσότερο η αντισεισμικότητα τους και λιγότερο η προστασία από φωτιά, θερμότητα και ήχο που

παρέχουν. Αντίθετα, στην Ευρώπη χρησιμοποιούνται ορθόγωνα κεραμικά λιθοσώματα τα οποία εξασφαλίζουν θερμομόνωση και ηχομόνωση. Ο κατακόρυφος οπλισμός τοποθετείται σε κατακόρυφους αυλούς που προκύπτουν από την αλληλεμπλοκή των λιθοσωμάτων και όσοι από αυτούς περιέχουν οπλισμό γεμίζουν με κονίαμα. Ο οριζόντιος οπλισμός τοποθετείται στους οριζόντιους αρμούς. Τα κτίρια που κατασκευάζονται είναι κυρίως χαμηλού και μεσαίου ύψους.



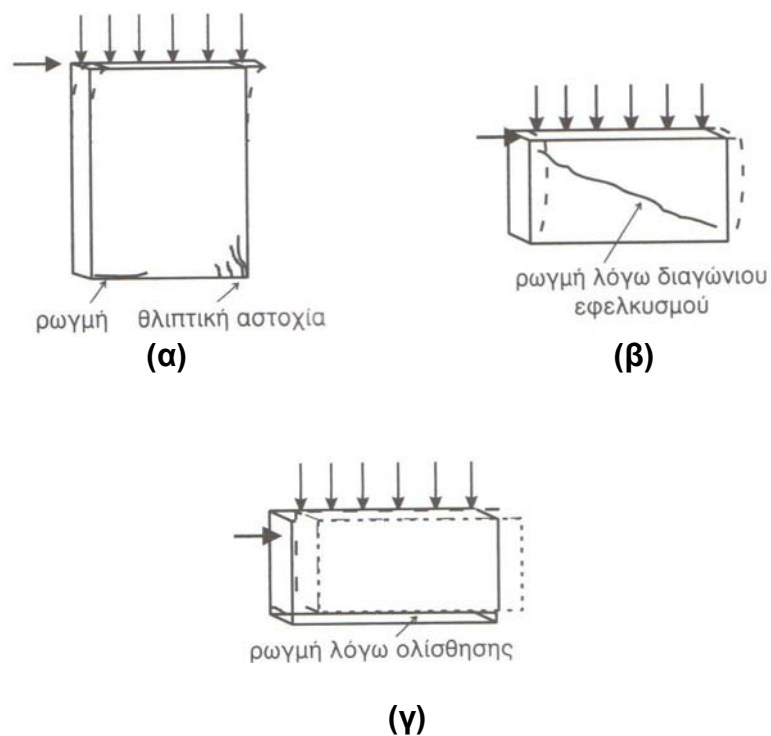
Σχ. 1.5: Τύποι τοιχοποιίας με διάσπαρτο οπλισμό στα λιθοσώματα

1.2.4 Προεντεταμένη τοιχοποιία

Πρόκειται για τοιχοποιία στην οποία έχουν εισαχθεί θλιπτικές τάσεις ώστε να είναι σε θέση να αντέξει φορτίσεις που προκαλούν μεγάλες εφελκυστικές τάσεις.

1.3. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΙΧΩΝ ΥΠΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΝΑΜΗ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΤΟΥΣ

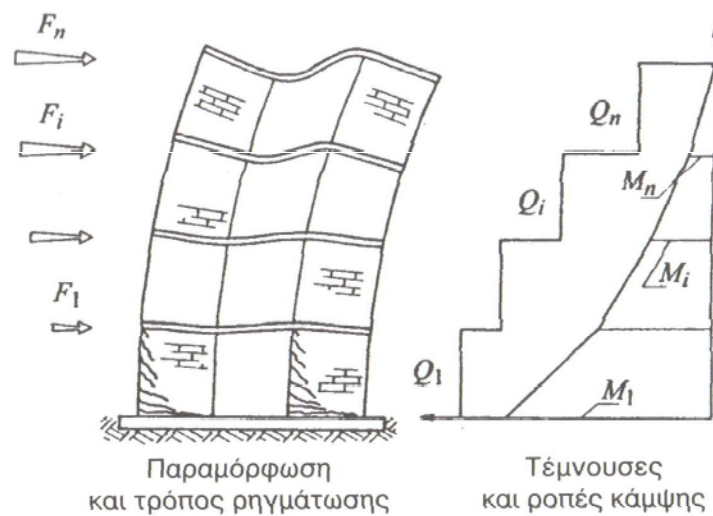
Από τη δράση οριζόντιας δύναμης εντός του επιπέδου ενός τοίχου προκύπτουν τρεις μορφές αστοχίας : α) εφελκυστική ρηγμάτωση στην εφελκυσόμενη παρειά του, πιθανά συνοδευόμενη και από θλιπτική αστοχία του περισσότερο θλιβόμενου ορίου, β) διαγώνια ρηγμάτωση διαμέσου των αρμών του κονιάματος ή διαμέσου των λιθοσωμάτων, γ) ολίσθηση του τοίχου κατά μήκος ενός αρμού (Σχήμα 1.6).



Σχ. 1.6: Αστοχία μεμονωμένου τοίχου από συνδυασμό ορθής και τέμνουσας δύναμης

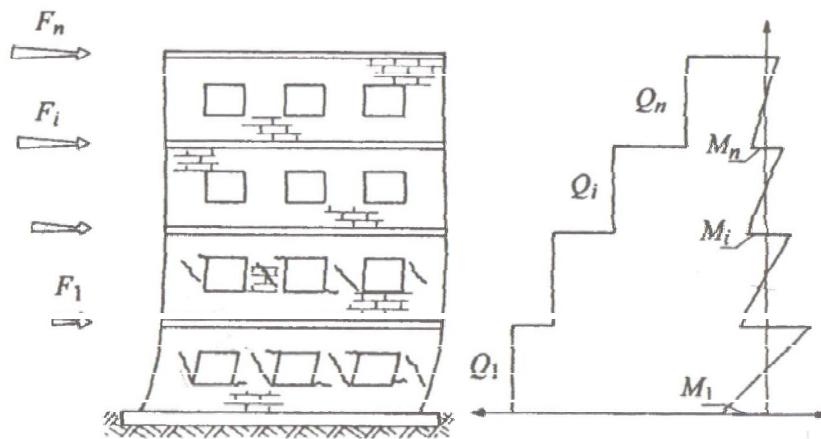
Η συμπεριφορά των τοίχων ενός κτιρίου υπό οριζόντια φόρτιση εξαρτάται από την ύπαρξη ή όχι οριζόντιου διαφράγματος και ανοιγμάτων καθώς και από το μέγεθος και τη θέση των τελευταίων. Έτσι διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις :

- Οι πεσσοί ενός τοίχου συνδέονται μόνο μέσω εύκαμπτων πατωμάτων που δεν μπορούν να μεταφέρουν ροπές, τότε ο τοίχος συνήθως συμπεριφέρεται σαν διατμητικός πρόβολος και υπό οριζόντια φόρτιση θα αναπτυχθεί η ρηγμάτωση του Σχήματος 1.7.



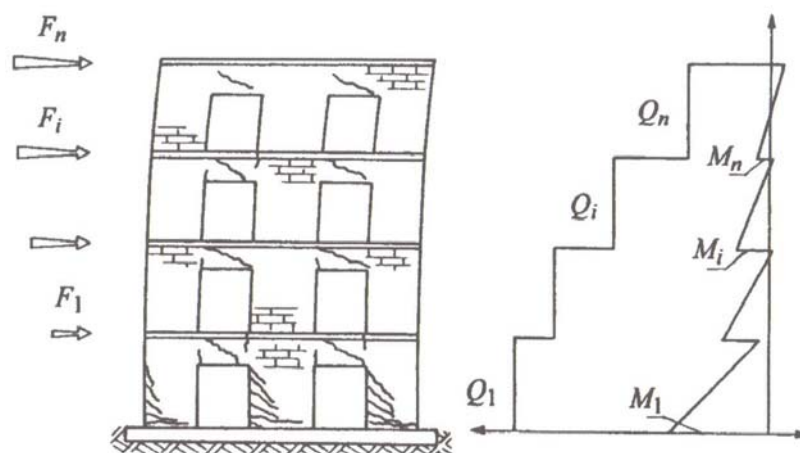
Σχ. 1.7: Τοίχος διατμητικός πρόβολος

- Οι τοίχοι έχουν αρκετά μικρά ανοίγματα και οι πεσσοί που σχηματίζονται συνδέονται μεταξύ τους με ισχυρά ανώφλια ή έχουν πλάκες από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τότε οι πεσσοί αποτελούν το αδύνατο σημείο της κατασκευής και η ρηγμάτωση έχει την μορφή του Σχήματος 1.8. Αν η οριζόντια δύναμη προέρχεται από σεισμική δράση τότε η έκταση των βλαβών αυξάνεται από πάνω προς τα κάτω καθώς η τέμνουσα αυξάνεται προς τα κάτω. Η ρηγμάτωση των πεσσών έχει μορφή χιαστί αφού η δράση είναι εναλλασσόμενη.



Σχ. 1.8: Συζευγμένα τοιχώματα, ισχυρά ανώφλια, αδύναμοι πεσσοί

- Τα ανοίγματα έχουν μικρό μήκος σε σχέση με τον τοίχο ή τα ανώφλια είναι μικρού ύψους και δεν υπάρχουν διαζώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα, τότε τα ασθενή πλέον ανώφλια αποτελούν το αδύνατο σημείο του τοίχου και η ρηγματώση έχει τη μορφή του Σχήματος 1.9 . Αναπτύσσονται καμπτικές ρωγμές στα ανώφλια και διατμητικές στους πεσσούς. Αν η έκταση των βλαβών στα ανώφλια οδηγήσει σε αποκόλλησή τους από τους πεσσούς και το κτίριο έχει εύκαμπτα πατώματα, τότε οι τοίχοι συμπεριφέρονται ως διατμητικοί πρόβολοι.



Σχ.1.9: Συζευγμένα τοιχώματα, ασθενή ανώφλια, ισχυροί πεσσοί

1.4 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Η εμπειρία από τη συμπεριφορά κατασκευών οπλισμένης τοιχοποιίας σε μεγάλα σεισμικά γεγονότα έδειξε πως κτίρια στα οποία έγινε σωστός σχεδιασμός, προσεκτική εκτέλεση με κατάλληλες κατασκευαστικές πρακτικές και χρήση υλικών κατάλληλης γεωμετρίας και ποιότητας, επέδειξαν καλή συμπεριφορά και επέζησαν από τους σεισμούς. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει πως η σωστή χρήση της τεχνολογίας καθιστά την οπλισμένη τοιχοποιία μια ασφαλή δομική μέθοδο.

Σήμερα, ο σχεδιασμός κατασκευών από οπλισμένη τοιχοποιία καλύπτεται από πολλούς κανονισμούς. Συγκεκριμένα στην Ευρώπη οι κατασκευές από άοπλη ή οπλισμένη τοιχοποιία καλύπτονται κανονιστικά από τον Ευρωκώδικα 6 (Eurocode 6, 1995) και Ευρωκώδικα 8 (Eurocode 8, 1994) οι οποίοι συντάχθηκαν και εκδόθηκαν από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN) ως prE-standards ENV, για χρήση από τα κράτη-μέλη μετά την έκδοση των Εθνικών Κειμένων Εφαρμογής. Στις Η.Π.Α. δεν υπάρχει ένας ενιαίος Εθνικός Κανονισμός για τον σχεδιασμό κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία, αλλά ο UBC (Uniform Building Code), 1991) θα μπορούσε να θεωρηθεί ως Εθνικός Κανονισμός με την έννοια ότι εφαρμόζεται στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας. Στη Νέα Ζηλανδία ισχύει ο κανονισμός NZS 4230P:Parts 1 and 2:1990, στη Γερμανία το γερμανικό πρότυπο DIN 1053, Μέρος 3 (1990). Στην Ελλάδα ελλείπει ανάλογο Ελληνικού Εθνικού Κανονισμού, οι Ευρωκώδικες 6 και 8 με μικρές τροποποιήσεις και συμπληρώσεις αποτελούν από το 1996 τον Εθνικό Κανονισμό για τον σχεδιασμό κτιρίων από άοπλη και οπλισμένη τοιχοποιία (Ευρωκώδικας 6, 1996).

Μετά από μια μεγάλη περίοδο εφαρμογής της λογικής των επιτρεπόμενων τάσεων, οι κανονισμοί των περισσότερων χωρών υιοθετούν πλέον τη λογική του σχεδιασμού βάσει των οριακών καταστάσεων. Οι βασικές αρχές σχεδιασμού κατασκευών από οπλισμένη τοιχοποιία είναι παρόμοιες με αυτές που αφορούν στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Παρά τις διαφορές που εμφανίζουν τα δύο υλικά που οφείλονται στη διαφορετική μέθοδο κατασκευής τους και στους περιορισμούς που τίθενται στην οπλισμένη τοιχοποιία σε θέματα αντοχής, διαστάσεων και όπλισης, οι Κανονισμοί θεωρούν ότι υπάρχει επαρκής ομοιότητα στη συμπεριφορά των δύο υλικών. Στις κατασκευές από οπλισμένη τοιχοποιία υιοθετούνται χαμηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής για την τοιχοποιία και μεγαλύτεροι συντελεστές ασφαλείας για την αντιμετώπιση της μεγαλύτερης αβεβαιότητας.

Κατά τους κανονισμού η καμπτική αντίσταση των τοίχων οπλισμένης τοιχοποιίας υπολογίζεται με επέκταση της απλής θεωρίας της κάμψης. Αντίθετα δεν έχει αναπτυχθεί κάποιο ανάλογο θεωρητικό υπόβαθρο για την πρόβλεψη της διατμητικής αντίστασης των τοίχων οπλισμένης τοιχοποιίας. Οι Κανονισμοί υιοθετούν ημιεμπειρικές σχέσεις, σύμφωνα με τις οποίες η διατμητική αντίσταση αποτελεί άθροισμα των αντιστάσεων που προσφέρονται από την τοιχοποιία και από τον οριζόντιο διατμητικό οπλισμό.

1.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

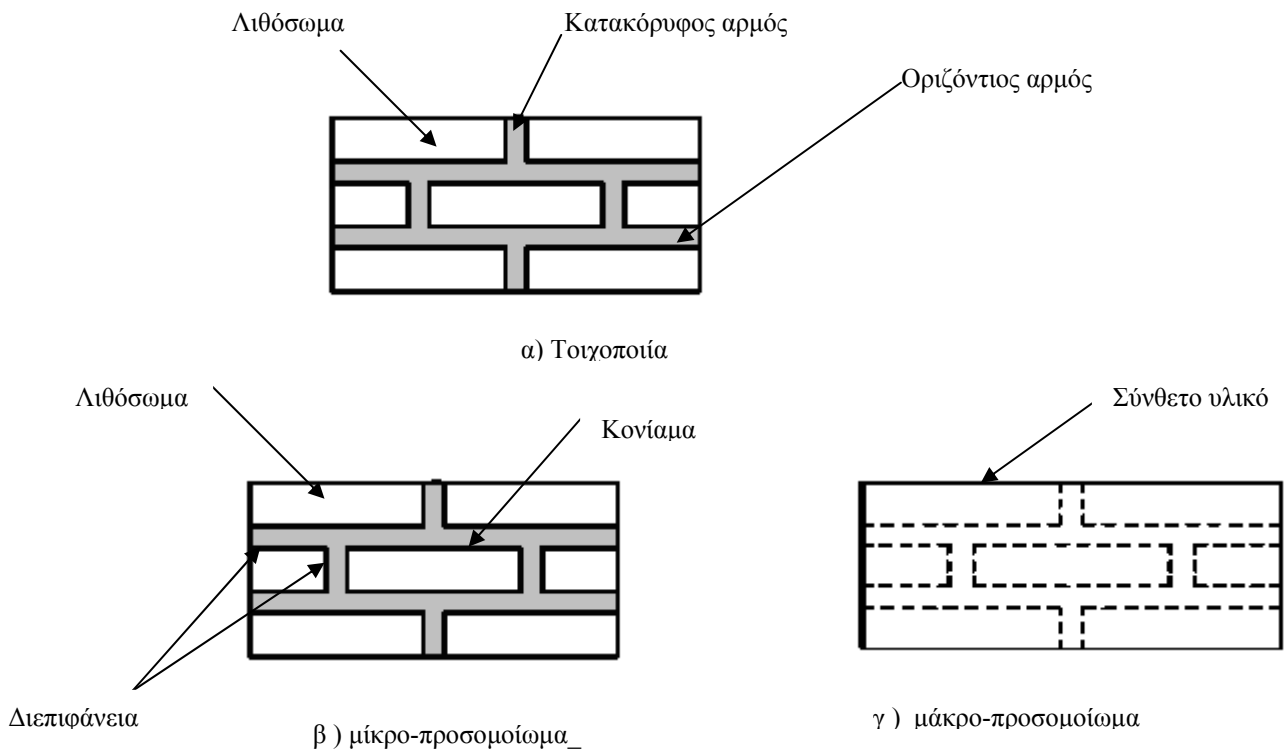
Είναι προφανές ότι για έναν ασφαλή και ορθολογικό σχεδιασμό κατασκευών από οπλισμένη τοιχοποιία, βασική προϋπόθεση αποτελεί η ερμηνεία και η πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς των οπλισμένων τοίχων, όταν αυτοί υποβάλλονται σε σεισμικές δράσεις. Με άλλα λόγια πρέπει να είναι γνωστοί όλοι οι μηχανισμοί αντίστασης που επιστρατεύονται, οι παράμετροι από τις οποίες αυτοί εξαρτώνται και ο αναμενόμενος τρόπος αστοχίας των τοίχων του κτιρίου.

Δυστυχώς λόγω της πολυπλοκότητας των μηχανισμών που λαμβάνουν μέρος στην ανάληψη διατμητικής αντίστασης και του μεγάλου αριθμού των εμπλεκόμενων παραμέτρων (ιδιαίτερα κατά τη αστοχία λόγω διαγώνιας ρηγμάτωσης του τοίχου), λίγες προσπάθειες καταγράφονται στη βιβλιογραφία για την ανάπτυξη ορθολογικών προσομοιωμάτων. Έτσι μέχρι σήμερα, η προβλεψη διατμητικής αντοχής φατνώματος γίνεται μέσω ημιεμπειρικών σχέσεων, οι οποίες αναπτύχθηκαν και βαθμονομήθηκαν από διάφορους ερευνητές με βάση τα πειραματικά τους αποτελέσματα. Οι σχέσεις αυτές συνήθως περιλαμβάνουν έναν όρο συμβολής της τοιχοποιίας μαζί με έναν όρο συμβολής του κατακόρυφου φορτίου και έναν του οριζόντιου. Εντούτοις παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές στις απόψεις των διαφόρων ερευνητών για την εκτίμηση της συμβολής του κάθε όρου στη διατμητική αντίσταση των τοίχων.

Επίσης, πολύ λίγες προσπάθειες καταγράφονται στη βιβλιογραφία και για την ανάπτυξη ορθολογικών προσομοιωμάτων ερμηνείας και πρόβλεψης της μετελαστικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας. Όμως λόγω της πολυπλοκότητας των εμπλεκόμενων μηχανισμών κατά τη διατμητική αστοχία, η ισχύς αυτών των προσομοιωμάτων περιορίζεται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις.

Μια πρώτη προσπάθεια αριθμητικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς της τοιχοποιίας έγινε από τους Page et al κατά τα τέλη της δεκαετίας του 70. Τα προσομοιώματα που αναπτύχθηκαν στηρίζονται στα αντίστοιχα προσομοιώματα περιγραφής της συμπεριφοράς του σκυροδέματος άοπλου ή οπλισμένου. Μέχρι και σήμερα όλες οι προσπάθειες αριθμητικής προσομοίωσης της τοιχοποιίας ακολουθούν την εξέλιξη των προσομοιωμάτων των ψαθυρών υλικών και κυρίως αυτών που αφορούν το σκυρόδεμα λαμβάνοντας πάντα υπόψη τις ιδιαιτερότητες της τοιχοποιίας.

Για την προσομοίωση ενός ρηγματωμένου μέσου υπάρχουν δυο μέθοδοι (για τις αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία) α) η μέθοδος των διακριτών ρωγμών, όπου οι ρωγμές αποτελούν μια γεωμετρική ασυνέχεια και β) η μέθοδος των κατανεμημένων ρωγμών όπου κάθε ρωγή αποτελείται από πολλές μικροασυνέχειες οι οποίες διαχέονται σε μια ζώνη (το υλικό θεωρείται ως συνεχές μέσο). Οι δύο αυτές μέθοδοι οδηγούν στην μικρο-προσομοίωση και στην μακρο-προσομοίωση αντίστοιχα.



Σχ.1,10 Προσομοιώματα

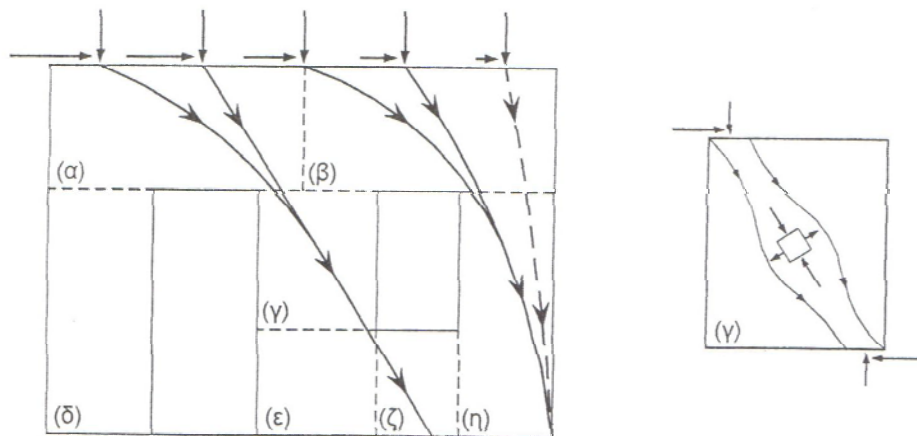
Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1,10 β κάθε επιμέρους υλικό της τοιχοποιίας (λιθόσωμα, αρμός κονιάματος, διεπιφάνεια αρμού-λιθόσωματος) περιγράφεται με διαφορετικό πεπερασμένο στοιχείο. Οι διεπιφάνειες λιθόσωματος-αρμού, θέσεις όπου σχηματίζονται οι ρωγμές, περιγράφονται με στοιχεία επαφής, ενώ τα λιθόσωματα και οι αρμοί κονιάματος περιγράφονται με συνεχή στοιχεία παραμορφώσιμα ή μη. Συχνά για υπολογιστικούς λόγους, το μικρο-προσομοίωμα απλοποιείται, με τη συμπεριφορά του αρμού και της διεπιφάνειας λιθόσωματος – αρμού να περιγράφονται από το ίδιο στοιχείο. Η μέθοδος των διακριτών ρωγμών επιτρέπει τη φυσική προσομοίωση κάθε ρωγμής και είναι κατάλληλη για την περιγραφή τοπικών φαινομένων. Βασική αδυναμία της μεθόδου, στην οποία οφείλεται και το μικρο-προσομοίωμα, είναι ότι η θέση των ρωγμών πρέπει να είναι γνωστή από την αρχή της ανάλυσης και η μορφή της να είναι τέτοια, ώστε να ακολουθεί το σχήμα των πεπερασμένων στοιχείων που συνθέτουν το δίκτυο του εξεταζόμενου φορέα. Με τη δεύτερη μέθοδο, των κατανεμημένων ρωγμών η τοιχοποιία σχήμα 2.10 α προσομοιάζεται ως ένα ομογενοποιημένο σύνθετο ισότροπο ή ανισότροπο υλικό, το οποίο περιγράφεται από ένα τύπο πεπερασμένου στοιχείου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10 γ. Η προσομοίωση αυτή ονομάζεται μακρο-προσομοίωση και η συμπεριφορά της τοιχοποιίας περιγράφεται από ένα υλικό το οποίο προκύπτει εφόσον έχουν ληφθεί υπόψη τα χαρακτηριστικά των επιμέρους υλικών που τη συνθέτουν, ενώ η εμφάνιση μιας ρωγμής οδηγεί στη μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σύνθετου υλικού χωρίς την τροποποίηση του αρχικού δικτύου διακριτοποίησης του εξεταζόμενου φορέα. Οι λόγοι αυτοί καθιστούν τη μέθοδο των κατανεμημένων ρωγμών πολύ δημοφιλή, με αποτέλεσμα να αποτελεί τη βασική μέθοδο ανάλυσης φορέων τοιχοποιίας. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιείτε το μακρο-προσομοίωμα δίνοντας ενιαίες ιδιότητες στο υλικό που περιγράφει τη συμπεριφορά της τοιχοποιίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΗΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ – ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η περιγραφή της συμπεριφοράς της οπλισμένης τοιχοποιίας μετά την εκτεταμένη διαγώνια ρηγμάτωσή της μπορεί να γίνει θεωρώντας την όψη του Σχήματος 2.1.



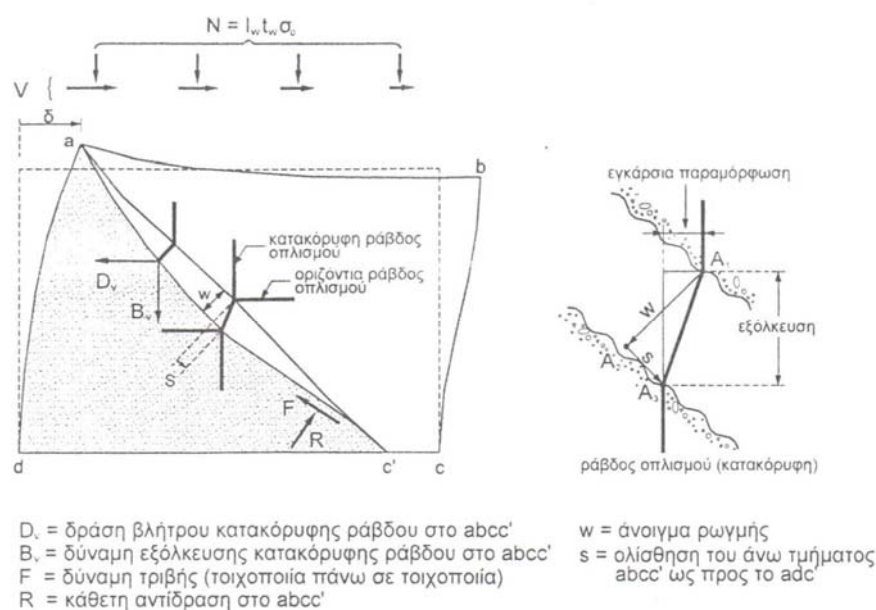
Σχ. 2.1: Απλοποιημένοι θλιπτήρες μεταφοράς σεισμικών δυνάμεων

Εστιάζοντας σε ένα τμήμα της όψης παρατηρείται ότι αυτό λόγω της εκτεταμένης αυτής ρηγμάτωσης χωρίζεται σε δύο μέρη. Μέχρι την πρώτη ουσιώδη διαγώνια ρηγμάτωση οι οπλισμοί δεν εντείνονται. Μόλις ανοίξει η ρωγμή οι οριζόντιοι και οι κατακόρυφοι οπλισμοί που τέμνονται από αυτή υπόκεινται σε αξονική και εγκάρσια παραμόρφωση. Τότε ενεργοποιούνται και αντιστέκονται σε αυτές τις παραμορφώσεις με τις δράσεις εξόλκευσης και βλήτρου. Ακόμα, αναπτύσσεται τριβή τοιχοποιίας πάνω σε τοιχοποιία λόγω της σχετικής ολίσθησης των δύο τμημάτων του τοίχου και της βαθειάς εμπλοκής των διεπιφανειών της

ρωγμής καθώς και της τυχόν παρουσίας εγκάρσιας θλιπτικής τάσης σε τμήματα της ρηγματωμένης διαγωνίου. Αυτοί οι μηχανισμοί μεταφοράς των εσωτερικών δυνάμεων που αναπτύσσονται συμβάλλουν στην αποκατάσταση της μηχανικής συνέχειας του αποσυντεθειμένου κορμού και στη μεταφορά των λοξών θλιπτικών δυνάμεων στο θλιβόμενο πέλμα της βάσης του τοίχου, εφόσον οι τελευταίες δεν υπερβαίνουν την θλιπτική αντοχή της διαγωνίου. Στο Σχήμα 2.2 φαίνονται οι αναπτυσσόμενες εσωτερικές δυνάμεις μετά την εκτεταμένη ρηγμάτωση του τοίχου.

Ταυτόχρονα, η οριζόντια μετατόπιση που επιβάλλεται στην κορυφή του τοίχου οδηγεί στη δημιουργία οριζόντιων καμπτικών ρωγμών στα άκρα και κυρίως στη βάση του τοίχου. Έτσι ο τοίχος τείνει να στραφεί σαν στερεό σώμα. Η καμπτική αυτή παραμόρφωση εμποδίζεται λόγω της παρουσίας του κατακόρυφου οπλισμού στο εφελκόμενο τμήμα του τοίχου και της αντίστασης της τοιχοποιίας στη θλιβόμενη ζώνη της βάσης του τοίχου.

Αύξηση των επιβαλλόμενων οριζόντιων μετατοπίσεων στην κορυφή του τοίχου μπορεί να οδηγήσει σε καμπτική αστοχία του τοίχου με τη διαρροή του κατακόρυφου οπλισμού ή/και τη θραύση της θλιβόμενης τοιχοποιίας, καθώς επίσης και σε μία αποδιοργάνωση του κορμού, είτε λόγω της αστοχίας των μηχανισμών μεταφοράς των δυνάμεων είτε λόγω της αστοχίας της θλιβόμενης διαγωνίου.



Σχ. 2.2: Αναπτυσσόμενες εσωτερικές δυνάμεις μετά την εκτεταμένη ρηγμάτωση του τοίχου

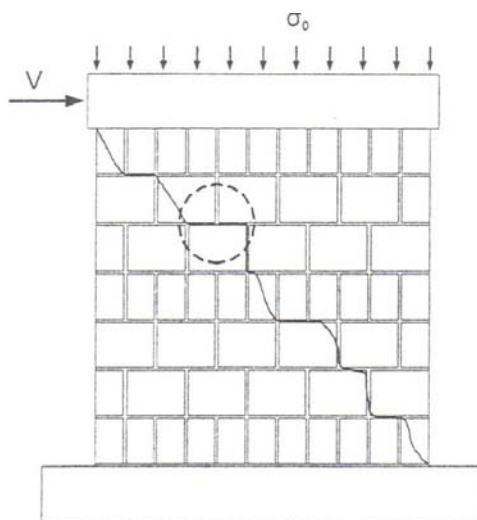
2.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΜΙΑΣ ΡΩΓΜΗΣ

Η συμπεριφορά ενός στοιχείου μετά τη ρηγμάτωση καθορίζεται από την ενεργοποίηση τοπικών μηχανισμών μεταφοράς των δυνάμεων κατά μήκος των ρωγμών. Συγκεκριμένα οι μηχανισμοί αυτοί είναι: α) απομένουσα θλιπτική και εφελκυστική αντοχή, β)τριβή μεταξύ λιθοσώματος και κονιάματος, γ) τριβή μεταξύ των λιθοσωμάτων λόγω της εμπλοκής των διεπιφανειών και της τυχόν παρουσίας εγκάρσιας θλιπτικής τάσης, δ)μηχανισμοί εξόλκευσης και ε) μηχανισμοί βλήτρου των ράβδων του οπλισμού που βρίσκονται ενσωματωμένοι στους οριζόντιους αρμούς και τις κατακόρυφες οπές της τοιχοποιίας και τέμνουν τη ρωγή. Οι μηχανισμοί αυτοί χαρακτηρίζουν την απομένουσα αντίσταση του τοίχου στην μετά την αστοχία περιοχή των μεγάλων παραμορφώσεων και συνδέονται άμεσα με τη διατιθέμενη πλασιμότητα του στοιχείου αφού αποτελούν τους κύριους μηχανισμούς απορρόφησης της σεισμικής ενέργειας. Η γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς αυτών των τοπικών μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την ερμηνεία της γενικής συμπεριφοράς των τοίχων μετά τη ρηγμάτωση.

2.2.1 Τριβή πλίνθου-κονιάματος οριζόντιων αρμών

Σε ένα τοίχο οπλισμένης τοιχοποιίας που υπόκειται σε οριζόντιες δράσεις εντός του επιπέδου του αν η αναπτυσσόμενη διαγώνια διατμητική ρωγή διέλθει από τους οριζόντιους αρμούς είναι δυνατή η ανάπτυξη αντίστασης λόγω τριβής στη διεπιφάνεια κονιάματος – πλίνθου, λόγω της σχετικής ολίσθησης των δύο τμημάτων του τοίχου κατά μήκος της ρωγμής και λόγω των κατακόρυφων φορτίων. Έτσι μέρος της διατμητικής αντίστασης του τοίχου μπορεί να μεταφερθεί από το ένα τμήμα της τοιχοποιίας στο άλλο. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η μορφή ρηγμάτωσης τοίχου οπλισμένης τοιχοποιίας που υπόκειται σε δράσεις εντός του επιπέδου του.

Συγκεκριμένα, η τριβή στη διεπιφάνεια πλίνθου-κονιάματος εξαρτάται από τη ποιότητα του κονιάματος και το πάχος του καθώς επίσης και από τη θλιπτική κατακόρυφη τάση.

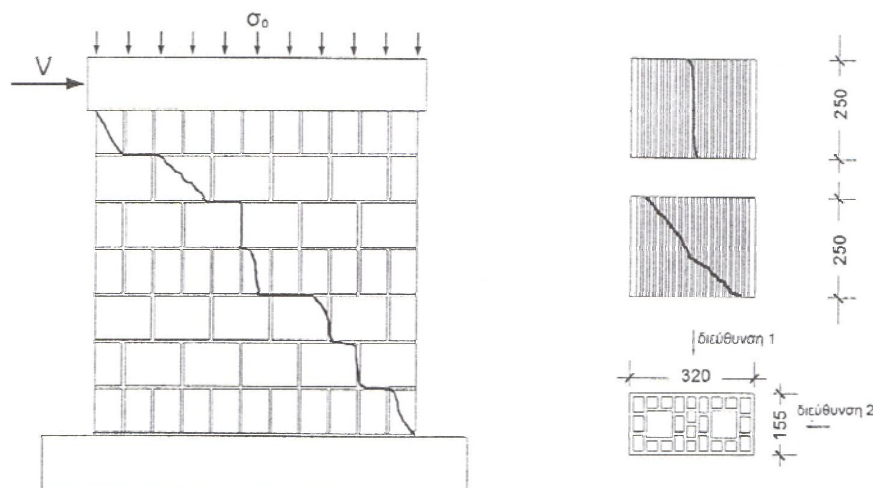


Σχ.2.3: Μορφή ρηγμάτωσης τοίχου οπλισμένης τοιχοποιίας που υπόκειται σε δράσεις εντός του επιπέδου του

2.2.2 Τριβή πλίνθου-πλίνθου

Σε ένα τοίχο οπλισμένης τοιχοποιίας που υπόκειται σε οριζόντιες δράσεις εντός του επιπέδου του αν η αναπτυσσόμενη διαγώνια διατμητική ρωγμή διέλθει μέσα από τα λιθοσώματα είναι δυνατή η ανάπτυξη αντίστασης λόγω τριβής μεταξύ των πλίνθων, λόγω της σχετικής ολίσθησης των δύο τμημάτων του τοίχου κατά μήκος της ρωγμής και λόγω της εξωτερικά επιβαλλόμενης ορθής θλιπτικής τάσης (λόγω των κατακόρυφων φορτίων). Μέσω του μηχανισμού αυτού μέρος της διατμητικής αντίστασης του τοίχου μπορεί να μεταφερθεί από το ένα τμήμα της τοιχοποιίας στο άλλο. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η μορφή ρηγμάτωσης τοίχου οπλισμένης τοιχοποιίας που υπόκειται σε δράσεις εντός του επιπέδου του, η γεωμετρία των πλίνθων και πιθανά επίπεδα ρηγμάτωσης.

Για ανισότροπα υλικά όπως οι πλίνθοι η παραγόμενη αντίσταση τριβής εξαρτάται από τη διεύθυνση της αναπτυσσόμενης ρωγμής, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την κατανομή των τάσεων εντός του τοίχου, από τη γεωμετρία του τοίχου, από την αντοχή της πλίνθου σε κάθε διεύθυνση. Η αλλαγή της διεύθυνσης της ρωγμής οδηγεί σε διατεμνόμενες επιφάνειες διαφορετικού εμβαδού και διαφορετικής τραχύτητας. Σε διάτρητες πλίνθους οι ρωγμές που δημιουργούνται υπό κάποια γωνία ως προς τη διεύθυνση των οπών παρουσιάζουν πιο τραχείες επιφάνειες από εκείνες των ρωγμών σε διεύθυνση παράλληλη με αυτήν των οπών.

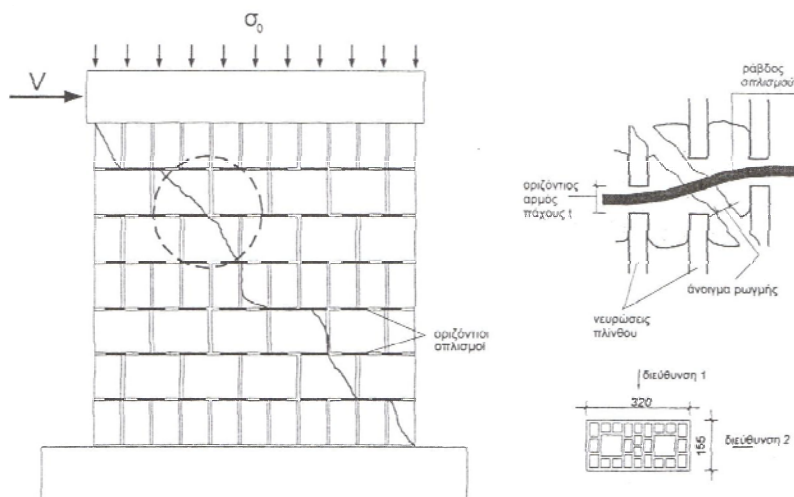


Σχ. 2.4: *Μορφή ρηγμάτωσης τοίχου οπλισμένης τοιχοποιίας που υπόκειται σε δράσεις εντός του επιπέδου του –Γεωμετρία πλίνθων και πιθανά επίπεδα ρηγμάτωσης*

2.2.3 Δράση βλήτρου οριζόντιων οπλισμών

Σε ένα τοίχο που υπόκειται σε οριζόντιες δράσεις εντός του επιπέδου του, μόλις ανοίξει η διατμητική διαγώνια ρωγμή, λόγω της σχετικής ολίσθησης των δύο τμημάτων του τοίχου κατά μήκος της ρωγμής, οι οπλισμοί που βρίσκονται ενσωματωμένοι στο κονίαμα των οριζόντιων αρμών υπόκεινται σε κάμψη, αναπτύσσοντας δράση βλήτρου στις θέσεις όπου τέμνονται από τη ρωγμή, αναλαμβάνοντας κατά συνέπεια μέρος της διατμητικής αντίστασης του τοίχου. Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η μορφή ρηγμάτωσης τοίχου οπλισμένης τοιχοποιίας που υπόκειται σε δράσεις εντός του επιπέδου του και η ανάπτυξη δράσης βλήτρου οριζοντίων οπλισμών.

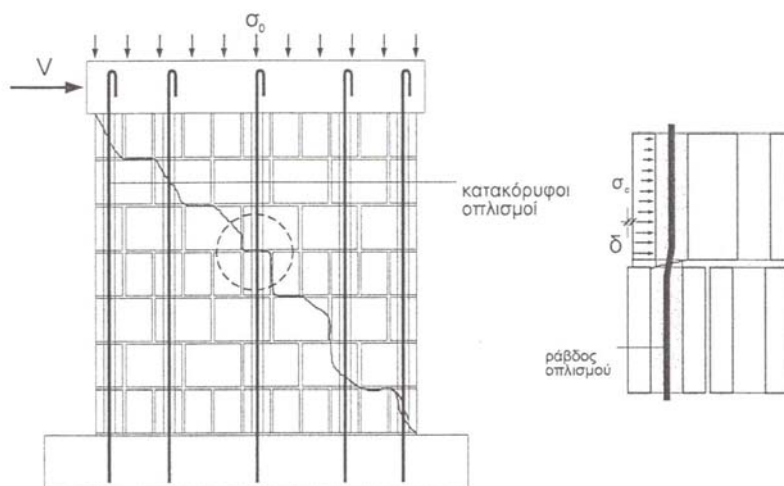
Οι οριζόντιοι οπλισμοί βρίσκονται ενσωματωμένοι σε ένα μικτό περιβάλλον που αποτελείται από την μικρού πάχους στρώση του κονιάματος και την πλίνθο. Παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η διατμητική δύναμη που μπορεί να αναλάβει κάθε ράβδος είναι η ποιότητα, η διάμετρο της ράβδου και η αντοχή του μικτού υποστρώματος κονιάματος-πλίνθου. Η διαρροή της ράβδου ή η θραύση του μικτού υποστρώματος κάτω από το βλήτρο μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της απόκρισης του συστήματος.



Σχ.2.5: Μορφή ρηγμάτωσης τοίχου οπλισμένης τοιχοποιίας που υπόκειται σε δράσεις εντός του επιπέδου του και ανάπτυξη δράσης βλήτρου οριζόντιων οπλισμών

2.2.4 Δράση βλήτρου κατακόρυφων οπλισμών

Σε ένα τοίχο που υπόκειται σε οριζόντιες δράσεις εντός του επιπέδου του, μόλις ανοίξει η διατμητική διαγώνια ρωγμή, λόγω της σχετικής ολίσθησης των δύο τμημάτων του τοίχου κατά μήκος της ρωγμής, οι οπλισμοί που βρίσκονται ενσωματωμένοι στο κονίαμα των κατακόρυφων οπών της πλίνθου υπόκεινται σε κάμψη, αναπτύσσοντας δράση βλήτρου στις θέσεις όπου τέμνονται από τη ρωγμή. Κατά συνέπεια αναλαμβάνουν μέρος της διατμητικής αντίστασης του τοίχου. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η μορφή ρηγμάτωσης τοίχου οπλισμένης τοιχοποιίας που υπόκειται σε δράσεις εντός του επιπέδου του και η ανάπτυξη δράσης βλήτρου κατακόρυφων οπλισμών.



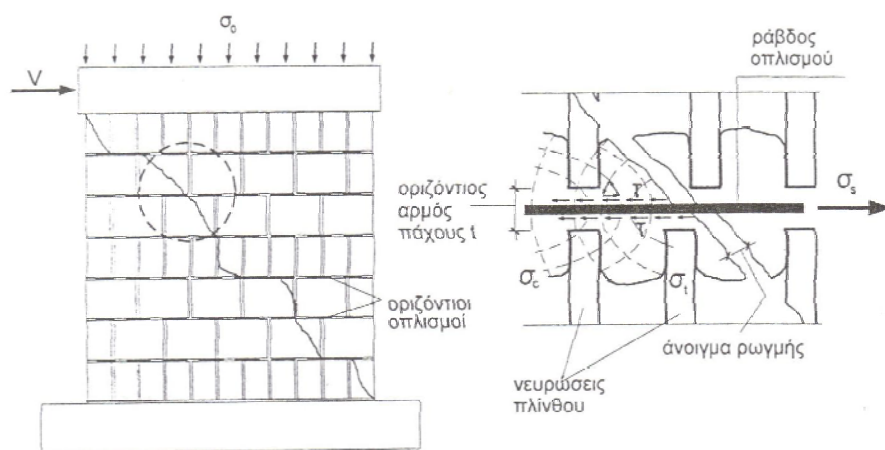
Σχ.2.6: Μορφή ρηγμάτωσης τοίχου οπλισμένης τοιχοποιίας που υπόκειται σε δράσεις εντός του επιπέδου του και ανάπτυξη δράσης βλήτρου κατακόρυφων οπλισμών

Οι οπλισμοί βρίσκονται ενσωματωμένοι σε ένα μικτό περιβάλλον που αποτελείται από τον σωλήνα του κονιάματος πλήρωσης των κατακόρυφων οπών της πλίνθου και από την ίδια την πλίνθο. Διακρίνονται δύο φάσεις στο μηχανισμό βλήτρου των κατακόρυφων οπλισμών. Στην πρώτη φάση καθώς το ένα τμήμα του τοίχου κινείται προς το άλλο η πλίνθος ασκεί θλιπτικές τάσεις στον κατακόρυφο σωλήνα του κονιάματος, ο οποίος λειτουργεί ολόκληρος σαν βλήτρο, αντιδρώντας στην επιβαλλόμενη μετακίνηση και ασκώντας θλιπτικές τάσεις στην πλίνθο. Η αστοχία του μηχανισμού μπορεί να επέλθει λόγω της πρόωρης αστοχίας της πλίνθου μετά την υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής της.

Σε περίπτωση που η πλίνθος δεν αστοχήσει, ξεκινάει η δεύτερη φάση του μηχανισμού μετά την υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του κονιάματος πλήρωσης. Τότε ανοίγει ρωγμή στο κονίαμα πληρώσεως η οποία διαπερνά τον ενσωματωμένο οπλισμό. Η ράβδος του οπλισμού πλέον λειτουργεί σαν βλήτρο ασκώντας θλιπτικές τάσεις στο περιβάλλον κονίαμα πληρώσεως και στην πλίνθο. Σε αυτή τη δεύτερη φάση, η μείωση απόκρισης του μηχανισμού είναι δυνατόν να επέλθει είτε με την υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής του μικτού υποστρώματος κονιάματος-πλίνθου είτε από την υπέρβαση της καμπτικής αντοχής της ράβδου. Συνεπώς η ποιότητα, η διάμετρος των ράβδων οπλισμού και η αντοχή του υποστρώματος κονιάματος-πλίνθου είναι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τον βαθμό ενεργοποίησης του οπλισμού ως βλήτρου.

2.2.5 Εξόλκευση οριζόντιων οπλισμών

Σε ένα τοίχο που υπόκειται σε οριζόντιες δράσεις εντός του επιπέδου του, μόλις ανοίξει η διατμητική διαγώνια ρωγμή, οι οπλισμοί που βρίσκονται ενσωματωμένοι στο κονίαμα των οριζόντιων αρμών υπόκεινται σε εφελκυσμό (εξόλκευση) στις θέσεις όπου τέμνονται από τη ρωγμή, αναλαμβάνοντας έτσι μέρος της διατμητικής αντίστασης του τοίχου. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η μορφή ρηγμάτωσης τοίχου οπλισμένης τοιχοποιίας που υπόκειται σε δράσεις εντός του επιπέδου του και η ανάπτυξη μηχανισμού εξόλκευσης οριζόντιων οπλισμών.



Σχ. 2.7: α) Μορφή ρηγμάτωσης τοίχου οπλισμένης τοιχοποιίας που υπόκειται σε δράσεις εντός του επιπέδου του και ανάπτυξη μηχανισμού εξόλκευσης οριζόντιων οπλισμών, β) τροχιές εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων εντός του κονιάματος των αρμών

Συγκεκριμένα, στις θέσεις όπου τείνει να αναπτυχθεί η ρωγμή, επιβάλλονται εφελκυστικές παραμορφώσεις στη ράβδο του οπλισμού και αμέσως ενεργοποιούνται τάσεις συνάφειας από το κονίαμα που την περιβάλλει, οι οποίες κατανέμονται κατά μήκος της ράβδου σε μια μικρή περιοχή περί την ρωγμή. Αναπτύσσεται έτσι, ένα δίκτυο θλιπτικών και εγκάρσιων εφελκυστικών τάσεων μέσα στο κονίαμα. Με την υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του, αρχίζουν να εμφανίζονται οι πρώτες λοξές μικρορηγματώσεις στο κονίαμα κατά μήκος της ράβδου, ενώ στη συνέχεια ανθίστανται τα τμήματα του κονιάματος μεταξύ των διαδοχικών μικρορωγμών ως

κοντοί πρόβολοι. Με την επιβολή μεγαλύτερων παραμορφώσεων αναπτύσσονται τάσεις συνάφειας σε μεγαλύτερο μήκος ράβδου.

Τελικά, ο μηχανισμός μπορεί να οδηγηθεί σε μείωση της απόκρισής του είτε από θραύση του κονιάματος (αστοχία συνάφειας κονιάματος-οπλισμού) είτε από αστοχία της ράβδου λόγω υπέρβασης του ορίου διαρροής της. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αντοχή συνάφειας ράβδου-κονιάματος εξαρτάται τόσο από την ποιότητα του κονιάματος όσο από τον τύπο του οπλισμού (λείος ή νευροχάλυβας) και ότι η αποδοτικότητα των οπλισμών επηρεάζεται σημαντικά από τις συνθήκες αγκύρωσής τους στα άκρα του τοίχου.

2.2.6 Εξόλκευση κατακόρυφων οπλισμών

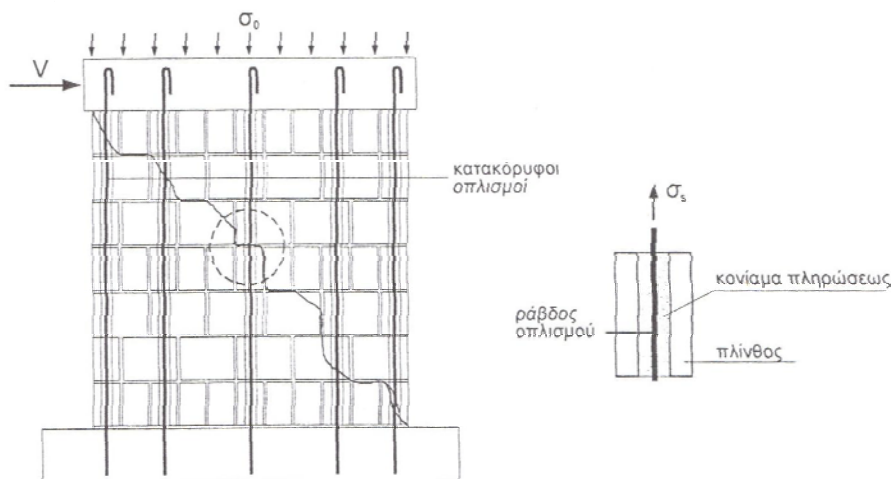
Σε ένα τοίχο που υπόκειται σε οριζόντιες δράσεις εντός του επιπέδου του, μόλις ανοίξει η διατμητική διαγώνια ρωγμή, λόγω του ανασηκώματος και της στροφής του άνω τμήματος του τοίχου, οι οπλισμοί που βρίσκονται ενσωματωμένοι στο κονίαμα πληρώσεως των κατακόρυφων οπών των πλίνθων υπόκεινται σε εφελκυσμό (εξόλκευση) στις θέσεις όπου τέμνονται από τη ρωγμή, αναλαμβάνοντας έτσι μέρος της διατμητικής αντίστασης του τοίχου. Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται η μορφή ρηγμάτωσης τοίχου οπλισμένης τοιχοποιίας που υπόκειται σε δράσεις εντός του επιπέδου του και η ανάπτυξη μηχανισμού εξόλκευσης κατακόρυφων οπλισμών.

Συγκεκριμένα, στις θέσεις όπου τείνει να αναπτυχθεί η ρωγμή, επιβάλλονται εφελκυστικές παραμορφώσεις στη ράβδο του οπλισμού και αμέσως ενεργοποιούνται τάσεις συνάφειας από το κονίαμα που την περιβάλλει, οι οποίες κατανομούνται κατά μήκος της ράβδου σε μια μικρή περιοχή περί την ρωγμή. Ο μηχανισμός συνάφειας οπλισμού-κονιάματος πληρώσεως και κονιάματος πληρώσεως-πλίνθου ευθύνεται για τη μεταφορά των εσωτερικών δυνάμεων από το ένα τμήμα της τοιχοποιίας στο άλλο. Επιβάλλοντας μεγαλύτερες παραμορφώσεις στη ράβδο αναπτύσσονται προοδευτικά τάσεις συνάφειας σε μεγαλύτερο μήκος της ράβδου. Αναπτύσσεται έτσι, ένα δίκτυο θλιπτικών και εγκάρσιων εφελκυστικών τάσεων μέσα στο κονίαμα το οποίο διαδίδεται ακτινικά προς την εξωτερική επιφάνεια της πλίνθου. Έτσι οι δυνάμεις μεταβιβάζονται από το κονίαμα στην πλίνθο μέσω των τάσεων συνάφειας που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια κονιάματος-πλίνθου.

Η μείωση της απόκρισης του συστήματος μπορεί να επέλθει από διαφορετικές αιτίες. Μία αιτία είναι η αστοχία της ράβδου λόγω υπέρβασης του ορίου

διαρροής. Ένας άλλος τρόπος είναι η αστοχία των δεσμών ράβδου-κονιάματος και κονιάματος-πλίνθου. Συγκεκριμένα, αν ξεπεραστεί η διατμητική αντοχή του κονιάματος που περιβάλλει περιμετρικά τη ράβδο τότε το σύστημα θα αστοχήσει λόγω υπέρβασης της αντοχής συναφείας ράβδου-κονιάματος. Ενώ αν ξεπεραστεί η διατμητική αντοχή του κονιάματος στη διεπιφάνεια κονιάματος-πλίνθου, το σύστημα θα αστοχήσει από υπέρβαση της αντοχής συναφείας κονιάματος-πλίνθου. Τέλος, η αστοχία του συστήματος είναι δυνατόν να επέλθει λόγω θραύσης της επικάλυψης του οπλισμού. Συγκεκριμένα, αν υπάρξει υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του κονιάματος, θα αρχίσει η δημιουργία ρηγματώσεων που ξεκινούν από τη ράβδο και διαδίδονται ακτινικά προς τα έξω. Οι ρωγμές αυτές θα φτάσουν στην επιφάνεια μόνο όταν επιβληθεί τέτοια τιμή αξονικού φορτίου στη ράβδο ώστε το πάχος της αρηγμάτωτης επικάλυψης να είναι τόσο μικρό που να ξεπεραστεί πλήρως η εφελκυστική αντοχή του. Τότε μόνο θα υπάρξει αστοχία λόγω θραύσης επικάλυψης.

Πρέπει ακόμα να σημειωθεί πως το μήκος αγκύρωσης των κατακόρυφων ράβδων συνδέεται άμεσα με την αποδοτικότητά τους, δηλαδή την αξιοποίηση της εφελκυστικής ικανότητάς τους.



Σχ. 2.8: Μορφή ρηγματώσης τοίχου οπλισμένης τοιχοποιίας που υπόκειται σε δράσεις εντός του επιπέδου του και ανάπτυξη μηχανισμού εξόλκευσης κατακόρυφων οπλισμών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των συνιστώντων υλικών της τοιχοποιίας. Συγκεκριμένα μέσω κατάλληλων δοκιμών προσδιορίστηκε η θλιπτική αντοχή των λιθοσωμάτων σε διεύθυνση κάθετη και παράλληλη στις οπές, η θλιπτική και εφελκυστική αντοχή των κονιαμάτων δόμησης των οριζόντιων αρμών και πλήρωσης των κατακόρυφων αυλών, καθώς και τα παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά τους. Επίσης μέσω δοκιμών επί άοπλων τοίχων προσδιορίστηκε η θλιπτική και η εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού της τοιχοποιίας. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν από πειραματική έρευνα που έγινε στο πλαίσιο ενός διακρατικού ερευνητικού προγράμματος Brite-Euram, το οποίο χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα και παρουσιάζονται αναλυτικά στη διδακτορική διατριβή “Συμπεριφορά οπλισμένης τοιχοποιίας υπό μονοτονικές και ανακυκλιζόμενες δράσεις εντός του επιπέδου της” της Νικολέττας Ψύλλα (Νοέμβριος 2000).

3.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΝΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

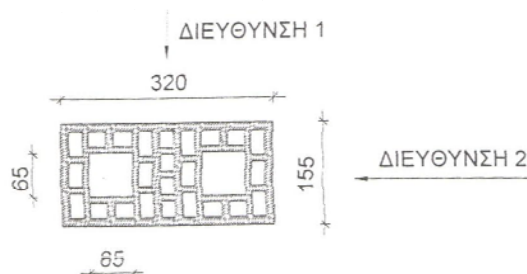
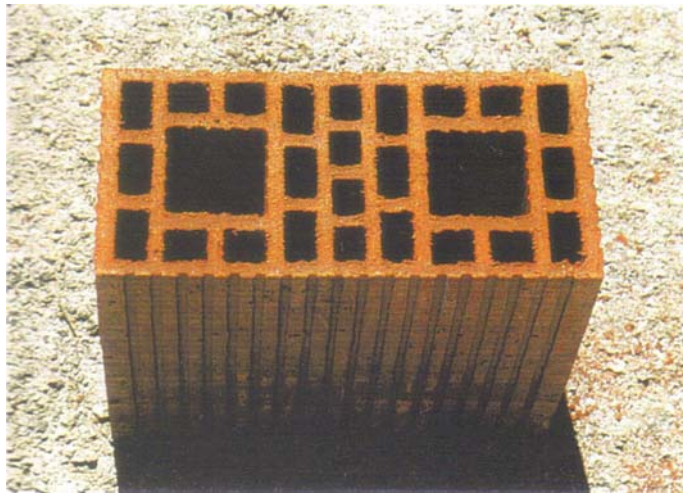
3.2.1 Πλίνθοι

Στην παρούσα εργασία θα εξεταστεί ορθότρουπη κεραμική πλίνθος, κατάλληλη για χρήση σε κατασκευές από οπλισμένη τοιχοποιία. Η πλίνθος σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο πλαίσιο του διευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος “Βιομηχανική Ανάπτυξη Κτιρίων από οπλισμένη τοιχοποιία” (DREMAB 1996). Είναι κατασκευασμένη από μάζα αργίλου κανονικής πυκνότητας (καθαρή ξηρή πυκνότητα 1720 kg/m^3) και έχει βάρος 9.6 kg . Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η

γεωμετρία της πλίνθου. Οι διαστάσεις της διατομής της πλίνθου είναι 155 x 320 χιλιοστά ενώ το ύψος της είναι 250 χιλιοστά. Διαθέτει δύο κατακόρυφες οπές διαστάσεων 65 x 65 mm για τυχόν ενσωμάτωση των κατακόρυφων ράβδων του οπλισμού. Η γεωμετρία της διατομής επιλέχθηκε έτσι ώστε να ικανοποιούνται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του συστήματος οπλισμένης τοιχοποιίας επιπλέον λήφθηκε πρόνοια ώστε να εξασφαλίζονται ικανοποιητικά μηχανικά χαρακτηριστικά (θλιπτική αντοχή, μέτρο ελαστικότητας και λόγος Poisson) και χαρακτηριστικά κατοικησιμότητας (θερμική και ακουστική μόνωση, πυροπροστασία, στεγανότητα). Για την αύξηση συνάφειας πλίνθου-κονιάματος πληρώσεως, οι επιφάνειες των οπών έχουν εκτραχυνθεί με τη δημιουργία περιμετρικών εγκοπών. Για την εξασφάλιση των χαρακτηριστικών κατοικησιμότητας και ενός σχετικά χαμηλού βάρους διαμορφώθηκε ένας αριθμός μικρότερων οπών. Το συνολικό ποσοστό των κενών επί της μκτής διατομής της πλίνθου είναι 55%.

Η μέση θλιπτική αντοχή παράλληλα στις οπές υπολογισθείσα επί της μκτής επιφάνειας της πλίνθου, βρέθηκε ίση με 8.50 MPa (τυπική απόκλιση 1.652 και συντελεστής μεταβλητότητας 0.194). Η μέση θλιπτική αντοχή της πλίνθου σε διεύθυνση κάθετη στις οπές βρέθηκε 2.20 MPa για τη διεύθυνση 1 (τυπική απόκλιση 0.335 και συντελεστής μεταβλητότητας 0.152) και 1.15 MPa για τη διεύθυνση 2 (τυπική απόκλιση 0.208 και συντελεστής μεταβλητότητας 0.181).

Το μέτρο ελαστικότητας E και ο λόγος του Poisson ν εκτιμήθηκαν στο 1/3 του μέγιστου φορτίου και βρέθηκαν ίσα με 7527 MPa και 0.28 αντίστοιχα σε διεύθυνση παράλληλη στις οπές. Σε διεύθυνση κάθετη στις οπές κατά τη διεύθυνση 1, το μέτρο ελαστικότητας E βρέθηκε ίσο με 1172 MPa και ο λόγος του Poisson ν ίσος με 0.12. Τέλος το μέτρο ελαστικότητας E στη διεύθυνση 2 ήταν ίσο με 1046 MPa.



Σχ. 3.1: Γεωμετρία πλίνθου (διαστάσεις σε mm)

3.2.2 Κονίαμα δομήσεως και πληρώσεως

Στην εργασία θα εξεταστούν δύο τύποι κονιαμάτων : ένα κονίαμα δομήσεως για την πλήρωση των οριζόντιων αρμών και ένα κονίαμα πληρώσεως για την πλήρωση των κατακόρυφων οπλισμένων οπών της τοιχοποιίας.

Το κονίαμα δομήσεως των οριζόντιων αρμών είχε κατ' όγκον σύνθεση (Τσιμέντο : Ασβέστης : Άμμος : Νερό) = (1 : 0.25 : 4 : 1.30) που χαρακτηρίζεται ως τύπου M10 κατά το πρότυπο CEN, prEN 998-2/1993. Για την παρασκευή του χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο κατηγορίας Π35, τύπου Portland και ασβέστης υπό μορφή πολτού (ποσοστό ελεύθερου και δεσμευμένου νερού 66% κ.β.). Χρησιμοποιήθηκε ασβεστολιθική άμμος θραυστή με μέγιστο κόκκο 2.38 mm.

Το κονίαμα πληρώσεως των κατακόρυφων οπλισμένων οπών είχε κατ' όγκον σύνθεση (Τσιμέντο : Άμμος : Νερό) = (1 : 3 : 1.10). Για την εξασφάλιση της απαιτούμενης υψηλής ρευστότητας του μίγματος, προστέθηκε στο μίγμα ένας υπερρρευστοποιητής (Rheobuilt 2000), σε αναλογία 1% επί του βάρους του τσιμέντου.

Για το κονίαμα δομήσεως η μέση εφελκυστική αντοχή από κάμψη f_{mt} και η μέση θλιπτική αντοχή του κονιάματος δομήσεως f_{mc} , για την ηλικία των 28 ημερών βρέθηκε ίση με 1.91 MPa και 11.86MPa, αντίστοιχα. Για το κονίαμα πληρώσεως η μέση εφελκυστική αντοχή από κάμψη f_{gt} και η μέση θλιπτική αντοχή του κονιάματος πληρώσεως f_{gc} , για την ηλικία των 28 ημερών βρέθηκε ίση με 3.23 MPa και 19.74 MPa, αντίστοιχα. Για το κονίαμα δόμησης το μέτρο ελαστικότητας E βρέθηκε ίσο με 12700MPa και ο λόγος του Poisson ίσος με 0.26. Αντίστοιχα για το κονίαμα πλήρωσης το μέτρο ελαστικότητας E βρέθηκε ίσο με 17915 MPa και ο λόγος του Poisson ίσος με 0.24.

3.3 ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ

3.3.1 Θλιπτική αντοχή

Η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας καθώς και τα παραμορφωσιακά χαρακτηριστικά της προσδιορίστηκαν επί έξι άοπλων τοίχων οι οποίοι υποβλήθηκαν σε δοκιμές θλίψεως σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο CEN, prEN 1052-1/1991. Οι τοίχοι είχαν μήκος 835 mm, ύψος 1060 mm και πάχος 320 mm . Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η γεωμετρία των δοκιμίων. Η μέση θλιπτική αντοχή των τοίχων f_{wc} βρέθηκε ίση με 4.41 MPa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας E_{wc} (μετρημένο σε θλιπτική τάση ίση με το 1/3 της μέγιστης) ήταν ίσο με 5210 MPa και ο λόγος του Poisson ν ίσος με 0.12.



Σχ. 3.2: Δοκιμές θλίψεως τοίχων. Γεωμετρία δοκιμίων και θέσεις τοποθέτησης των μετρικών οργάνων (διαστάσεις σε mm)

3.3.2 Εφελκυστική αντοχή

Για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής της τοιχοποιίας εκτελέστηκαν δοκιμές διαγώνιας θλίψης σε τετραγωνικά δοκίμια, τα οποία είχαν μήκος 1005 mm, ύψος 1075 mm και πάχος 320 mm Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται η γεωμετρία των δοκιμίων. Η μέση εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας υπολογίστηκε με τρεις διαφορετικές σχέσεις.

- $f_{wt} = 0.707 \frac{P_u}{A}$ όπου $A = \frac{l_w \cdot h_w}{2} \cdot t_w$

όπου l_w, h_w, t_w το μήκος, το ύψος και το πάχος του δοκιμίου αντίστοιχα και P_u το φορτίο αστοχίας.

Η σχέση προτείνεται από τη RILEM (1991, LUMB6, ΣΕΛ.488-489)

Η μέση εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας υπολογίστηκε ίση με 0.46MPa.

- $f_{wt} = 0.49 \frac{P_u}{l_w \cdot t_w} \approx \frac{P_u}{2l_w \cdot t_w}$

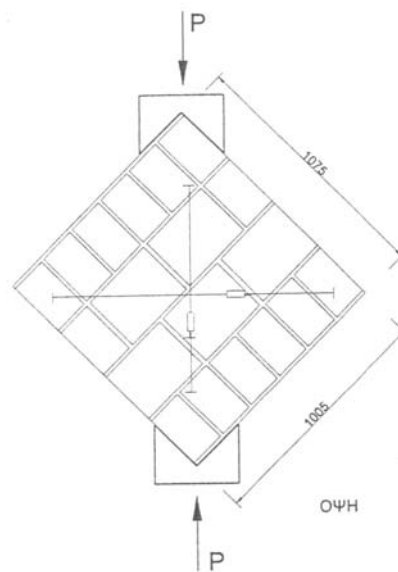
η σχέση αυτή χρησιμοποιείται αν εφαρμοστεί μια πιο λεπτομερής ελαστική ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέση εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας υπολογίστηκε ίση με 0.32MPa

$$\bullet \quad f_{wt} = \frac{2}{\pi} \frac{P_u}{d_w t_w}$$

όπου d_w το μήκος της διαγωνίου του τοίχου.

Η μέση εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας υπολογίστηκε ίση με 0.29MPa.



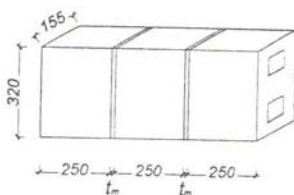
Σχ. 3.3: Δοκιμές τοίχων σε διαγώνια θλίψη. Γεωμετρία δοκιμίων και θέσεις τοποθέτησης των μετρικών οργάνων (διαστάσεις σε mm)

3.4 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΙ ΝΟΜΟΙ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι καταστατικοί νόμοι των μηχανισμών μεταφοράς δυνάμεων κατά μήκος μιας ρωγμής που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Η σύνταξη των καταστατικών αυτών νόμων έγινε έπειτα από εκτέλεση πειραματικών προγραμμάτων τα οποία, καθώς επίσης και τα αποτελέσματά τους παρουσιάζονται αναλυτικά στην διδακτορική διατριβή "Συμπεριφορά οπλισμένης τοιχοποιίας υπό μονοτονικές και ανακυκλιζόμενες δράσεις εντός του επιπέδου της " της Νικολέττας Ψυλλά (Νοέμβριος 2000).

3.4.1 Τριβή πλίνθου-κονιάματος

Για τη διερεύνηση του μηχανισμού τριβής πλίνθου-κονιάματος εξετάστηκαν 21 δοκίμια, εκ των οποίων τα 15 δοκιμάστηκαν σε αυξανόμενες μονοτονικές δράσεις μέχρι αστοχίας και στα υπόλοιπα 6 εκτελέστηκε και μια ανακύκλιση για την εκτίμηση της απόκρισης στην αντίθετη διεύθυνση φόρτισης. Τα δοκίμια αποτελούνται από τρεις πλίνθους (τριπλέττα) και περιλαμβάνουν δύο οριζόντιους αρμούς. Στο Σχήμα 3.4 φαίνεται η γεωμετρία των δοκιμίων. Κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε στη θέση δοκιμής με τους αρμούς σε κατακόρυφη θέση. Οι δύο ακραίες πλίνθοι παρέμεναν σταθερές, ενώ η μεσαία ήταν ελεύθερη να κινείται παράλληλα με τους οριζόντιους αρμούς. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν με επιβολή μετακινήσεων στη μεσαία πλίνθο ενώ επιβαλλόταν ορθή θλιπτική τάση καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Μετρήθηκε η επιστρατευόμενη διατμητική αντίσταση, οι σχετικές μετακινήσεις πλίνθου-κονιάματος και το άνοιγμα των οριζόντιων αρμών.



Σχ. 3.4: Γεωμετρία δοκιμίων

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα επιχειρήθηκε η σύνταξη του καταστατικού διαγράμματος του μηχανισμού τριβής πλίνθου-κονιάματος, για κατασκευές από οπλισμένη τοιχοποιία το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5.

Ο αρχικός κλάδος του διαγράμματος μπορεί να περιγραφεί από τη γραμμική συνάρτηση:

$$\tau_{fr} = \tau_o + (\tau_{fr,u} - \tau_o) \frac{\delta}{\delta_u}$$

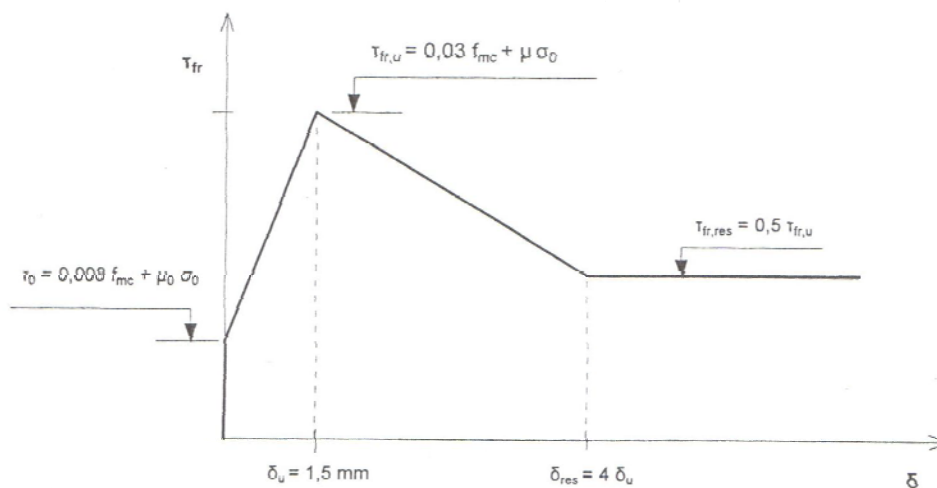
όπου τ_o η αρχική αντοχή τριβής υπό μηδενική μετακίνηση και $\tau_{fr,u}$ η μέγιστη αντίσταση τριβής οι οποίες δίνονται από τις σχέσεις:

$$\tau_o = 0,008f_{mc} + \mu_o \sigma_o$$

$$\tau_{fr,u} = 0,03f_{mc} + \mu \sigma_o$$

όπου σ_o η κάθετα επιβαλλόμενη θλιπτική τάση και μ_o αρχικός οιονεί συντελεστής τριβής και μ συντελεστής τριβής πλίνθου-κονιάματος. Τελικά θέτω $\mu_o \approx \mu \approx 0,3$

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών η αντοχή τριβής επιτυγχάνεται κατά μέσο όρο σε μετακίνηση $\delta_u = 1,5 \text{ mm}$. Ακολουθεί ένας φθιτός κλάδος όπου η αντίσταση τριβής μειώνεται συνεχώς καθώς αυξάνονται οι μετακινήσεις μέχρι μιας παραμένουσας τιμής $\tau_{fr,res}$ η οποία δίνεται από τη σχέση : $\tau_{fr,res} = 0,5 \tau_{fr,u}$ και επιτυγχάνεται σε μετατόπιση $\delta_{res} = 4 \delta_u$.

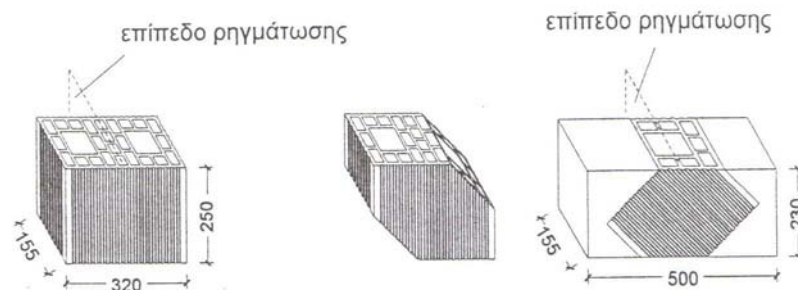


Σχ.3.5: Καταστατικό διάγραμμα μηχανισμού τριβής πλίνθων κονιάματος οριζόντιων αρμών οπλισμένης τοιχοποιίας

3.4.2. Τριβή πλίνθου-πλίνθου

Για τη διερεύνηση του μηχανισμού τριβής πλίνθου-πλίνθου εξετάστηκαν 14 δοκίμια σε πειραματικό πρόγραμμα στο Πανεπιστήμιο της Πάδοβα στην Ιταλία. Σε 7 από αυτά η επιφάνεια ρηγμάτωσης ήταν παράλληλη με την διεύθυνση των οπών ενώ στα υπόλοιπα 7, υπό γωνία 45° με τη διεύθυνση των οπών. Κάθε δοκίμιο αποτελείται από μια πλίνθο, η οποία προρηγματώθηκε κατά την επιθυμητή διεύθυνση όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.6 αφού υποβλήθηκε σε δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού. Στη συνέχεια τα δύο τμήματα της πλίνθου συγκρατήθηκαν μαζί και τους επιβλήθηκε κατακόρυφο φορτίο με τη βοήθεια μεταλλικής κατασκευής που λειτουργεί σαν

αμφιέριστη δοκός. Σε κάθε δοκίμιο εκτελέστηκαν δύο πλήρεις ανακυκλίσεις σε προκαθορισμένα επίπεδα διατμητικής μετακίνησης ενώ η ορθή θλιπτική τάση παρέμεινε σταθερή καθόλη τη διάρκεια της δοκιμής. Τελικά, μεγάλες μετακινήσεις επιβλήθηκαν μονοτονικά στο δοκίμιο. Μετρήθηκε η διατμητική αντίσταση και οι σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των δύο τμημάτων της πλίνθου.



Σχ.3.6: Γεωμετρία δοκιμίου α) επίπεδο ρηγμάτωσης παράλληλο στη διεύθυνση των οπών και β) επίπεδο ρηγμάτωσης υπό γωνία 45° ως προς τη διεύθυνση των οπών

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα επιχειρήθηκε η σύνταξη του καταστατικού διαγράμματος του μηχανισμού τριβής πλίνθου-πλίνθου, για τις περιπτώσεις ρηγμάτωσης παράλληλα και υπό γωνία 45° ως προς τις οπές της πλίνθου αντίστοιχα όπως φαίνονται και στο Σχήμα 3.7 και 3.8. Τα διαγράμματα ισχύουν για περιπτώσεις εφαρμογής χαμηλών θλιπτικών τάσεων, δηλαδή $\sigma_n/f_{bc} < 0.02$.

- Για την περίπτωση ρηγμάτωσης παράλληλα προς τις οπές της πλίνθου η αντίσταση τριβής υπό οιονεί μηδενική μετακίνηση δίνεται από τον τύπο :

$$\tau_{fr,0} = 1.5\sigma_n$$

Η μέγιστη αντίσταση τριβής δίνεται από τον τύπο :

$$\tau_{fr,u} = 2.0\sigma_n \text{ και επιτυγχάνεται σε μετακίνηση περίπου ίση με } 8 \text{ mm.}$$

Τέλος η αντίσταση τριβής πρακτικά δεν μεταβάλλεται με την αύξηση των μετακινήσεων αφού $\tau_{fr,u} \approx \tau_{fr,res}$.

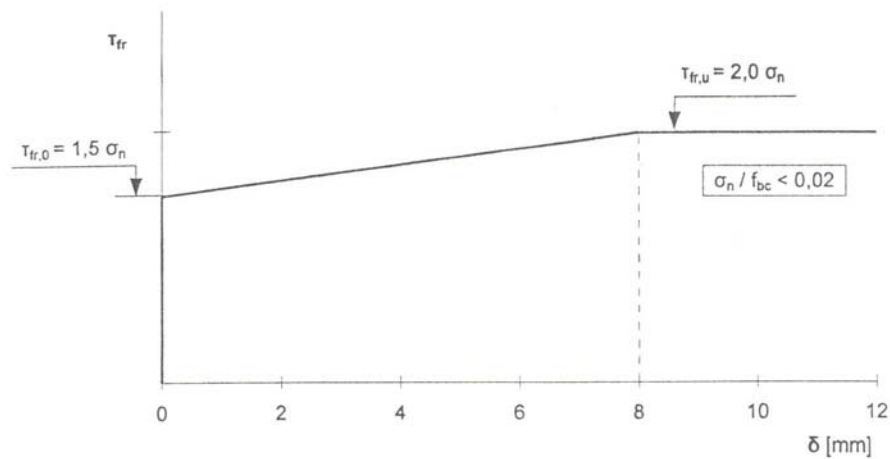
- Για την περίπτωση ρηγμάτωσης υπό γωνία 45° ως προς τις οπές της πλίνθου η αντίσταση τριβής υπό οιονεί μηδενική μετακίνηση δίνεται από τον τύπο :

$$\tau_{fr,0} = 0.8\sigma_n$$

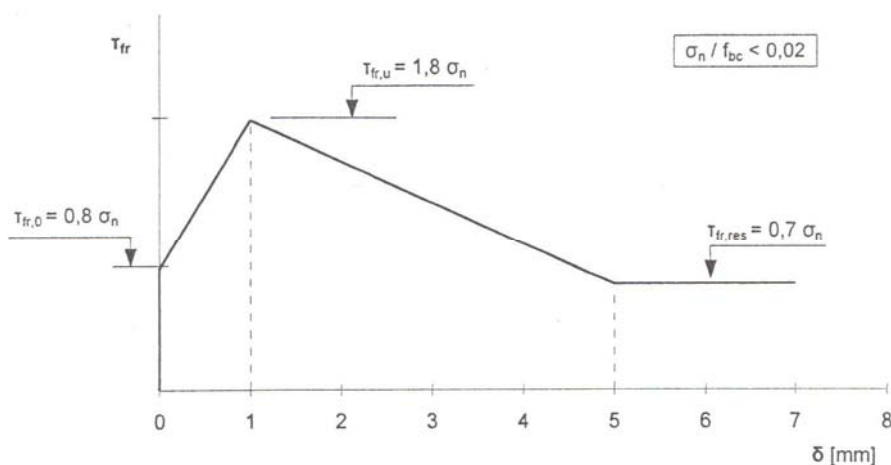
Η μέγιστη αντίσταση τριβής δίνεται από τον τύπο :

$\tau_{fr,u} = 1.8 \sigma_n$ και επιτυγχάνεται σε μετακίνηση περίπου ίση με 1 mm.

Ακολουθεί ένας φθιτός κλάδος όπου η αντίσταση τριβής μειώνεται συνεχώς καθώς αυξάνονται οι μετακινήσεις μέχρι μιας απομένουσας αντίστασης τριβής $\tau_{fr,res}$ η οποία δίνεται από τη σχέση : $\tau_{fr,res} = 0.7 \sigma_n$ και επιτυγχάνεται σε μετακίνηση ίση με 5 mm.



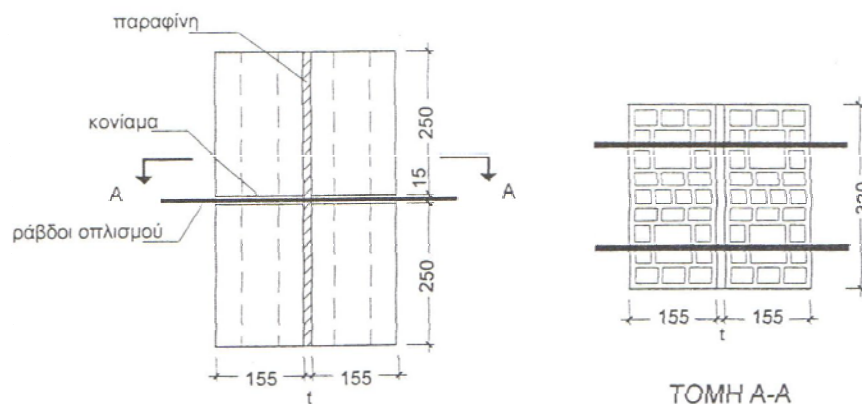
Σχ.3.7: Καταστατικό διάγραμμα μηχανισμού τριβής πλίνθου-πλίνθου οπλισμένης τοιχοποιίας για διεύθυνση ρηγμάτωσης παράλληλη στην διεύθυνση των οπών της πλίνθου



Σχ.3.8: Καταστατικό διάγραμμα μηχανισμού τριβής πλίνθου-πλίνθου οπλισμένης τοιχοποιίας για διεύθυνση ρηγμάτωσης υπό γωνία 45° ως προς τη διεύθυνση των οπών της πλίνθου

3.4.3 Δράση βλήτρου οριζόντιων οπλισμών

Για τη διερεύνηση της δράσης βλήτρου οριζόντιων οπλισμών εξετάστηκαν 19 δοκίμια, εκ των οποίων τα 11 δοκιμάστηκαν σε αυξανόμενες μονοτονικές δράσεις μέχρι αστοχίας και τα υπόλοιπα 8 σε ανακυκλιζόμενες δράσεις. Κάθε δοκίμιο αποτελείται από τέσσερις πλίνθους. Περιλαμβάνει ένα οριζόντιο αρμό στον οποίο τοποθετούνται δύο ράβδοι οπλισμού και έναν κατακόρυφο αρμό. Για την αποφυγή ανάπτυξης τριβής κατά μήκος του κατακόρυφου αρμού τοποθετούνται πλάκες παραφίνης. Η γεωμετρία του δοκιμίου φαίνεται στο Σχήμα 3.9. Το δοκίμιο τοποθετήθηκε σε θέση δοκιμής με τις ράβδους οπλισμού σε οριζόντια θέση και του επιβλήθηκε θλιπτική τάση. Το αριστερό μισό παρέμενε ακίνητο ενώ το δεξί μισό ήταν ελεύθερο να κινείται προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Σε αυτό το άκρο επιβλήθηκαν και οι μετακινήσεις. Μετρήθηκε η διατμητική αντίσταση, οι διατμητικές μετακινήσεις και το άνοιγμα του οριζόντιου και του κατακόρυφου αρμού.

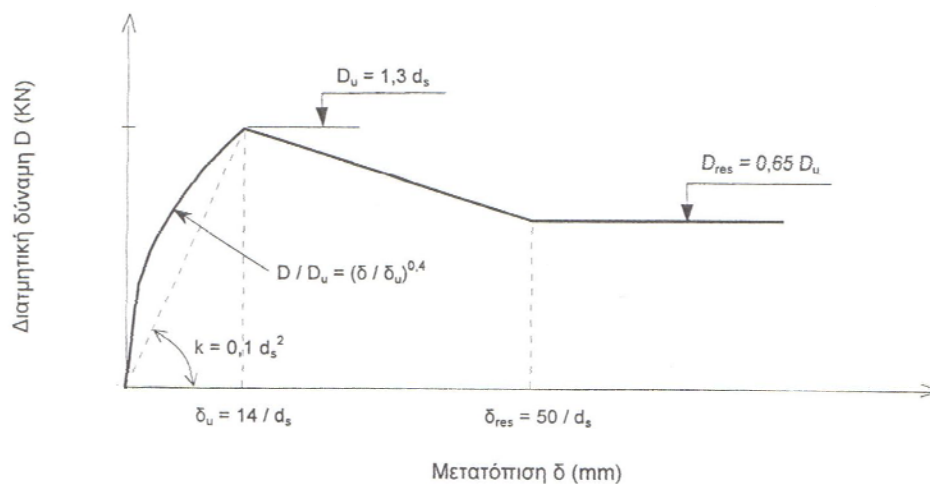


Σχ. 3.9: Γεωμετρία δοκιμίου διερεύνησης μηχανισμού βλήτρου οριζόντιων οπλισμών

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα επιχειρήθηκε η σύνταξη του καταστατικού διαγράμματος του μηχανισμού βλήτρου οριζόντιων οπλισμών οπλισμένης τοιχοποιίας το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 3.10. Ο ανοδικός κλάδος του μηχανισμού περιγράφεται από την εξίσωση : $D/D_u = (\delta/\delta_u)^{0.4}$

Η μέγιστη διατμητική δύναμη δίνεται από τον τύπο: $D_u = 1,3d_s$ και επιτυγχάνεται σε μετακίνηση ίση με $\delta_u = \frac{14}{d_s}$

όπου d_s η διάμετρος της ράβδου. Η συμπεριφορά του μηχανισμού μετά την επίτευξη της μέγιστης διατμητικής δύναμης D_u μπορεί να περιγραφεί κατά προσέγγιση με γραμμικούς κλάδους. Ακολουθεί φθιτός κλάδος όπου η δύναμη μειώνεται συνεχώς με την αύξηση της μετακίνησης μέχρι μια παραμένουσα τιμή D_{res} , η οποία δίνεται από τον τύπο : $D_{res} = 0,65 D_u$ και επιτυγχάνεται σε μετακίνηση $\delta_{res} = \frac{50}{d_s}$.

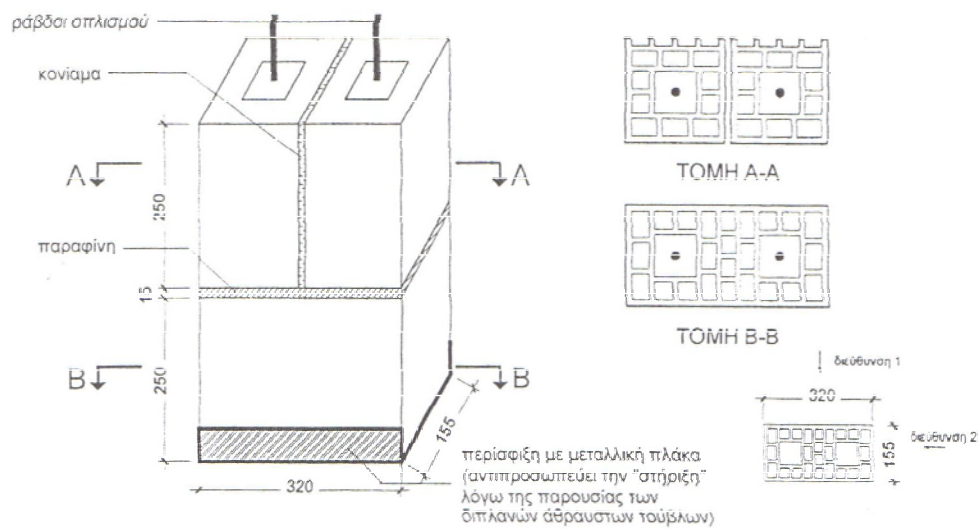


Σχ. 3.10: Καταστατικό διάγραμμα μηχανισμού βλήτρου οριζόντιων οπλισμών οπλισμένης τοιχοποιίας

3.4.4 Δράση βλήτρου κατακόρυφων οπλισμών

Για τη διερεύνηση της δράσης βλήτρου κατακόρυφων οπλισμών εξετάστηκαν 12 δοκίμια, εκ των οποίων τα 7 δοκιμάστηκαν σε αυξανόμενες μονοτονικές δράσεις μέχρι αστοχίας και στα υπόλοιπα 5 σε ανακυκλιζόμενες δράσεις. Κάθε δοκίμιο αποτελείται από δύο μισές και μία ολόκληρη πλίνθο. Περιλαμβάνει έναν κατακόρυφο αρμό που πληρώνεται με κονίαμα, δύο κατακόρυφους σωλήνες όπου τοποθετούνται οι ράβδοι του οπλισμού και έναν οριζόντιο αρμό. Για την αποφυγή ανάπτυξης τριβής κατά μήκος του οριζόντιου αρμού τοποθετούνται πλάκες παραφίνης. Το δοκίμιο περισφίγγθηκε κατά την εγκάρσια διεύθυνση μέσω ενός μεταλλικού Π, για την

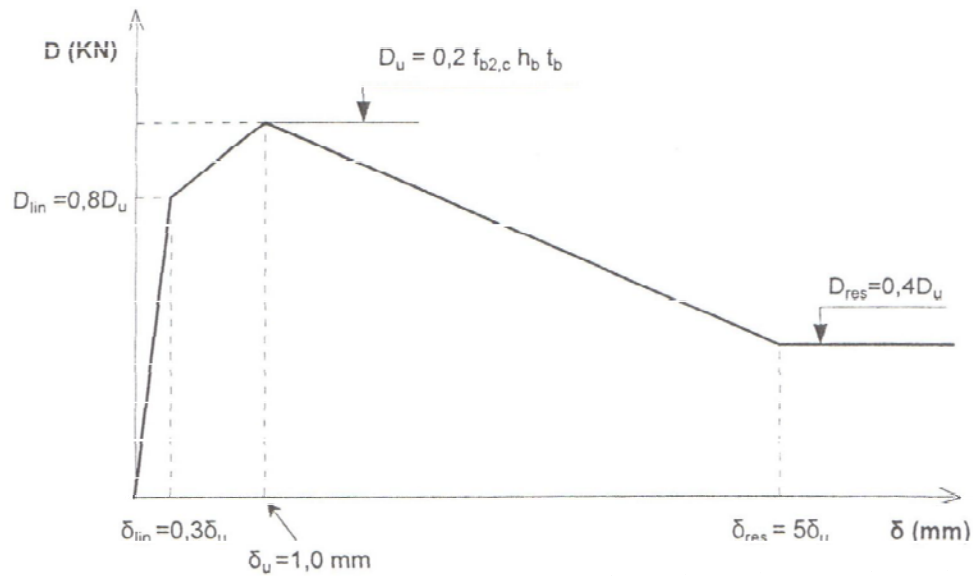
προσομοίωση της πλευρικής στήριξης (μέσα σε έναν πραγματικό τοίχο) λόγω της παρουσίας των διπλανών άθραυστων πλίνθων. Η γεωμετρία των δοκιμίων φαίνεται στο Σχήμα 3.11. Το δοκίμιο τοποθετήθηκε στη θέση δοκιμής με τις ράβδους οπλισμού σε οριζόντια θέση και του επιβλήθηκε θλιπτική τάση. Το αριστερό μισό του δοκιμίου παρέμενε ακίνητο κατά τη διάρκεια της δοκιμής ενώ το δεξιό μισό ήταν ελεύθερο να κινείται παράλληλα με τον οριζόντιο αρμό. Μετρήθηκε η αναλαμβανόμενη διατμητική δύναμη, οι διατμητικές μετακινήσεις και το άνοιγμα του οριζόντιου και του κατακόρυφου αρμού.



Σχ. 3.11: Γεωμετρία δοκιμίου διερεύνησης μηχανισμού βλήτρου κατακόρυφων οπλισμών

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα επιχειρήθηκε η σύνταξη του καταστατικού διαγράμματος του μηχανισμού βλήτρου κατακόρυφων οπλισμένων τοιχοποιίας το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 3.12. Στον ανοδικό κλάδο του μηχανισμού η διατμητική δύναμη αυξάνεται γραμμικά μέχρι την τιμή D_{lim} ίση με το 80% της μέγιστης, για ανηγμένη μετακίνηση d_{lim}/d_u ίση με 0.3. Στο σημείο αυτό επέρχεται σημαντική μείωση της δυστημσίας του μηχανισμού, λόγω έναρξης της θραύσεως του υποβάθρου (δηλαδή της πλίνθου). Ακολουθεί ένας δεύτερος ανοδικός κλάδος κατά τον οποίο η αναλαμβανόμενη διατμητική δύναμη συνεχίζει να αυξάνει μέχρι μια μέγιστη τιμή D_u που δίνεται από τη σχέση : $D_u = 0.2f_{b2,c}h_b t_b$ για μετακίνηση

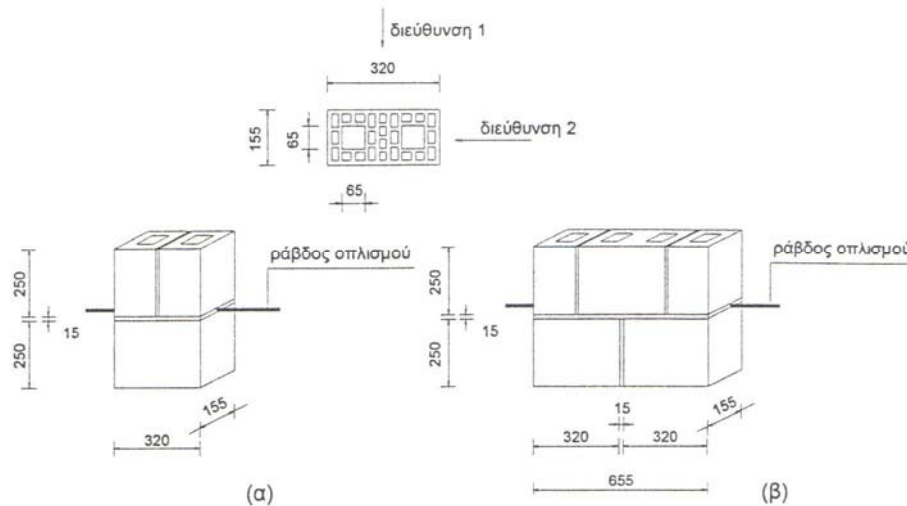
δ_u ίση με 1.0 mm. Στο σημείο αυτό θα επέλθει απότομη μείωση της απόκρισης του μηχανισμού λόγω καταστροφής της πλίνθου, δηλαδή θα ακολουθήσει ένα απότομος φθιτός κλάδος κατά τον οποίο η διατμητική δύναμη μειώνεται συνεχώς με την αύξηση της μετακίνησης, μέχρι μια παραμένουσα τιμή D_{res} που αντιστοιχεί περίπου σε 0.4 της μέγιστης σε μια τιμή ανηγμένης μετακίνησης δ_{res}/δ_u ίση περίπου με 5.



Σχ. 3.12: Καταστατικό διάγραμμα μηχανισμού βλήτρου κατακόρυφων οπλισμών οπλισμένης τοιχοποιίας

3.4.5 Εξόλκευση οριζόντιων οπλισμών

Για τη διερεύνηση του μηχανισμού εξόλκευσης των οριζόντιων οπλισμών εξετάστηκαν 18 δοκίμια, στα οποία επιβλήθηκαν μονοτονικά αυξανόμενες παραμορφώσεις μέχρι αστοχίας τους. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι δοκιμίου (‘‘κοντά’’ και ‘‘μακριά’’ δοκίμια), με ολικό μήκος επαφής της ράβδου του οπλισμού ίσο με 320 mm και 655 mm αντίστοιχα. Το πάχος των οριζόντιων αρμών ήταν 15mm, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του EC6 για φέρουσα τοιχοποιία. Έτσι προκύπτει άνω και κάτω επικάλυψη των ράβδων του οπλισμού ίση με 4.5 mm και 2.5 mm για τις ράβδους διαμέτρου 6 και 10 mm αντίστοιχα. Η γεωμετρία των δοκιμίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.13. Κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε σε ένα μεταλλικό πλαίσιο και στερεώθηκε στη θέση δοκιμής με δύο μεταλλικές δοκούς μορφής Π και εφαρμόστηκε κατακόρυφο φορτίο, σταθερό καθόλη τη διάρκεια της δοκιμής. Το εντεινόμενο άκρο της ράβδου του οπλισμού αγκυρώθηκε με τη βοήθεια μεταλλικού κώνου. Μετρήθηκαν οι επιβαλλόμενες μετακινήσεις στο εντεινόμενο άκρο της ράβδου, οι μετακινήσεις στο ελεύθερο άκρο της ράβδου, το επιστρατευόμενο αξονικό φορτίο και οι επιμηκύνσεις του οπλισμού.



Σχ. 3.13: Γεωμετρία δοκιμίου διερεύνησης μηχανισμού εξόλκευσης των οριζόντιων οπλισμών (α) ‘‘κοντά’’ δοκίμια και (β) ‘‘μακριά’’ δοκίμια

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα επιχειρήθηκε η σύνταξη του καταστατικού νόμου εξόλκευσης οριζόντιων οπλισμών όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.14. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις :

- α) Περίπτωση επαρκούς μήκους αγκύρωσης ($l_{eff} > l_b$)

όπου l_{eff} είναι το ενεργό μήκος αγκύρωσης και l_b είναι το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης.

Στον ανοδικό κλάδο του μηχανισμού η αξονική τάση αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της μετακίνησης μέχρι που η ράβδος φτάνει στο όριο διαρροής της ($\sigma_{s,lin} = f_{sy}$) για ανηγμένη μετακίνηση δ_{lin} / d_s ίση περίπου με 0.12. Στο σημείο αυτό επέρχεται δραστική μείωση της ακαμψίας του μηχανισμού, λόγω της διαρροής της ράβδου. Ακολουθεί ένας δεύτερος ανοδικός κλάδος κατά τον οποίο η αξονική τάση της ράβδου συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι του ορίου θραύσης της ($\sigma_{s,max} = f_{st}$). Εδώ επιτυγχάνεται και η μέγιστη απόκριση του μηχανισμού για ανηγμένη μετακίνηση δ_{max}/d_s ίση περίπου με 1.4. Στο σημείο αυτό θα επέλθει πρακτικά αστοχία του μηχανισμού, είτε λόγω της θραύσης της ράβδου είτε λόγω της πλήρους καταστροφής της συνάφειας ράβδου-κονιάματος.

- β) Περίπτωση ανεπαρκούς μήκους αγκύρωσης ($l_{eff} < l_b$)

Λόγω ανεπαρκούς μήκους αγκύρωσης, η ράβδος δεν είναι δυνατόν να αναπτύξει την τάση διαρροής της. Στον ανοδικό κλάδο του μηχανισμού η αξονική τάση αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της μετακίνησης (με την ίδια αρχική ακαμψία όπως και στην προηγούμενη περίπτωση) μέχρι μιας τιμής

$$\sigma_{s,lin} = \left[(0.10 + 0.1f_b) \frac{l_{eff}}{l_b} \right] f_{sy} \leq f_{sy}$$

σε MPa,

Στο σημείο αυτό επέρχεται μείωση της ακαμψίας του μηχανισμού λόγω προοδευτικής καταστροφής της συνάφειας ράβδου-κονιάματος. Ακολουθεί λοιπόν ένας δεύτερος ανοδικός κλάδος κατά τον οποίο η αξονική τάση της ράβδου συνεχίζει να αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό μέχρι μια μέγιστη τιμή

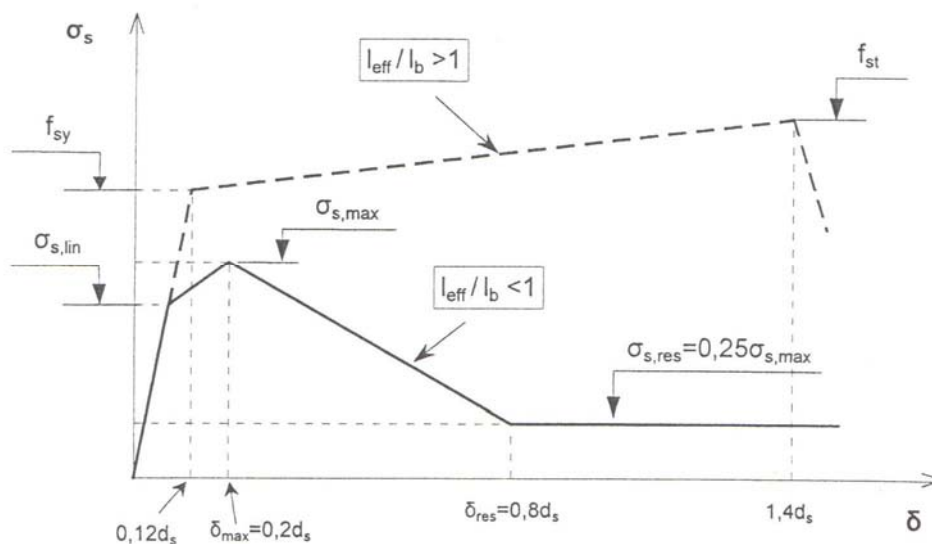
$$\sigma_{s,max} = \left[(0.25 + 0.1f_b) \frac{l_{eff}}{l_b} \right] f_{sy} \leq f_{sy}$$

σε MPa,

Εδώ επιτυγχάνεται η μέγιστη απόκριση του μηχανισμού για ανηγμένη μετακίνηση δ_{max} / d_s ίση περίπου με 0.2. Από το σημείο αυτό και μετά, επέρχεται απότομη μείωση της απόκρισης του μηχανισμού λόγω αστοχίας συνάφειας ράβδου-κονιάματος και ακολουθεί ένας απότομος φθιτός κλάδος. Στη φάση αυτή η αξονική τάση της ράβδου

μειώνεται συνεχώς με την αύξηση της μετακίνησης, μέχρι μιας παραμένουσας τιμής που αντιστοιχεί περίπου στο 0.25 της μέγιστης, από μια τιμή της ανηγμένης μετακίνησης δ_{res} / d_s ίση με 0.8 και πέρα.

Όπου f_b η μέση αντοχή συνάφειας κονιάματος-ράβδου, $\sigma_{s,lin}$ η αξονική τάση της ράβδου στο τέλος του γραμμικού κλάδου, δ_{lin} η αντίστοιχη μετατόπιση, $\sigma_{s,max}$ η μέγιστη επιστρατευόμενη αξονική τάση της ράβδου και $\sigma_{s,res}$ η παραμένουσα ακραία αξονική τάση της ράβδου.

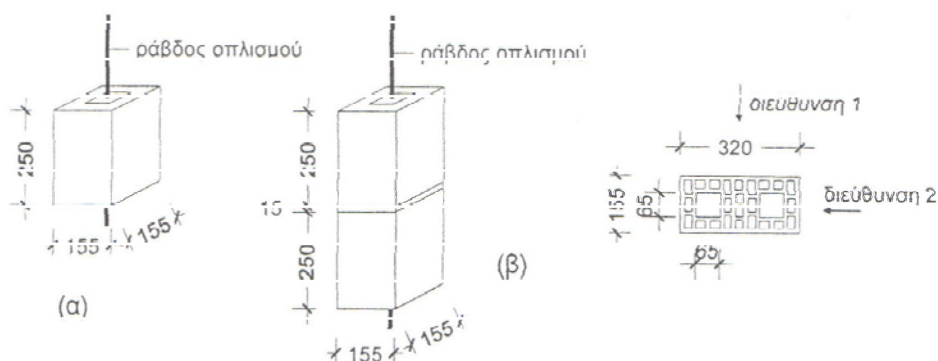


Σχ. 3.14: Καταστατικό διάγραμμα εξόλκευσης νευροχαλύβων στον οριζόντιο αρμό οπλισμένης τοιχοποιίας

3.4.6 Εξόλκευση κατακόρυφων οπλισμών

Για τη διερεύνηση του μηχανισμού εξόλκευσης των κατακόρυφων οπλισμών εξετάστηκαν 9 δοκίμια, στα οποία επιβλήθηκαν μονοτονικά αυξανόμενες μετακινήσεις μέχρι αστοχίας τους. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι δοκιμίου (‘‘κοντά’’ και ‘‘μακριά’’ δοκίμια), με ολικό μήκος επαφής της ράβδου του οπλισμού l_{eff} ίσο με 250 mm και 515 mm αντίστοιχα. Η διατομή των οπών όπου τοποθετήθηκε ο οπλισμός ήταν τετραγωνική διαστάσεων 65x65 mm. Προκύπτει έτσι περιμετρική

επικάλυψη των ράβδων οπλισμού ίση με 26.5 mm και 25.5 mm για τις ράβδους διαμέτρου 12 και 14 mm αντίστοιχα. Η γεωμετρία των δοκιμίων φαίνεται στο Σχήμα 3.15. Κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε σε ένα μεταλλικό πλαίσιο και στερεώθηκε στη θέση δοκιμής με δύο μεταλλικές δοκούς μορφής Π και εφαρμόστηκε κατακόρυφο φορτίο, σταθερό καθόλη τη διάρκεια της δοκιμής. Το εντεινόμενο άκρο της ράβδου του οπλισμού αγκυρώθηκε με τη βοήθεια μεταλλικού κώνου. Επιβλήθηκαν μετακινήσεις στο άκρο της ράβδου μέσω ενός κοχλίου. Μετρήθηκαν οι επιβαλλόμενες μετακινήσεις στο εντεινόμενο άκρο της ράβδου, οι μετακινήσεις του ελεύθερου άκρου της ράβδου ως προς το κονίαμα πληρώσεως όπου ήταν ενσωματωμένη η ράβδος, το επιβαλλόμενο αξονικό φορτίο και οι μετακινήσεις του ελεύθερου και εντεινόμενου άκρου ως προς την πλίνθο.



Σχ. 3.15: Γεωμετρία δοκιμίου διερεύνησης μηχανισμού εξόλκευσης των κατακόρυφων οπλισμών (α) ‘κοντά’ δοκίμια και (β) ‘μακριά’ δοκίμια

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα επιχειρήθηκε η σύνταξη του καταστατικού νόμου εξόλκευσης κατακόρυφων οπλισμών όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.16. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις :

- α) Περίπτωση επαρκούς μήκους αγκύρωσης ($l_{eff} > l_b$)

Στον ανοδικό κλάδο του μηχανισμού η αξονική τάση αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της σχετικής μετακίνησης ράβδου-πλίνθου, μέχρι που η ράβδος φτάνει στο όριο διαρροής της ($\sigma_{s,max} = f_{sy}$) για ανηγμένη μετακίνηση δ / d_s ίση με 0.15. Στο σημείο αυτό η ακαμψία του μηχανισμού ουσιαστικά μηδενίζεται, λόγω της διαρροής

της ράβδου. Με τη αύξηση της μετακίνησης η αξονική τάση της ράβδου διατηρείται σταθερή στο όριο διαρροής της (εκτός αν προλάβει να εισέλθει σε κράτυνση)

- β) Περίπτωση ανεπαρκούς μήκους αγκύρωσης ($l_{eff} < l_b$)

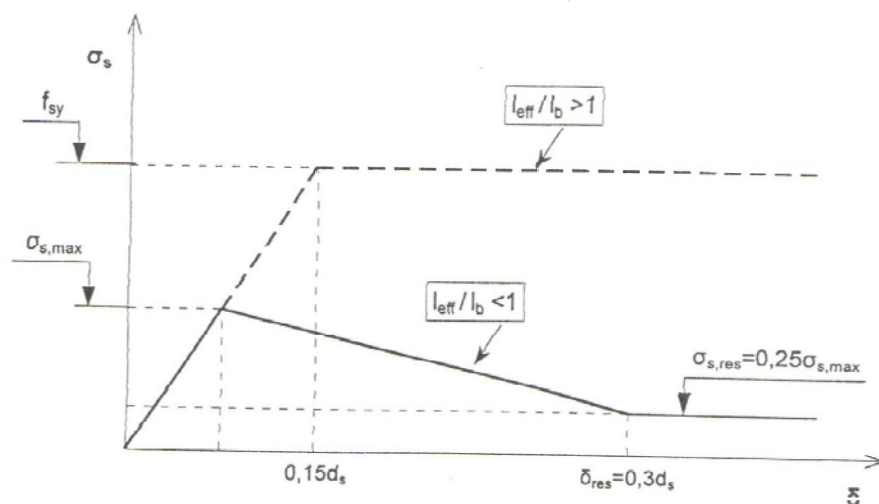
Στον ανοδικό κλάδο του μηχανισμού η αξονική τάση αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της μετακίνησης μέχρι της τιμής

$$\sigma_{s,max} = \left[(0.45 + 0.20 f_b) \frac{l_{eff}}{l_b} \right] f_{sy} \leq f_{sy}$$

σε MPa

όπου f_b η μέση αντοχή συνάφειας κονιάματος-ράβδου.

Από το σημείο αυτό και μετά επέρχεται μείωση της απόκρισης του μηχανισμού λόγω αστοχίας ράβδου-κονιάματος πληρώσεως και ακολουθεί ένας σχετικά ήπιος φθιτός κλάδος κατά τον οποίο η αξονική τάση της ράβδου μειώνεται συνεχώς με την αύξηση της μετακίνησης, μέχρι μιας παραμένουσας τιμής που αντιστοιχεί περίπου στο 0.25 της μέγιστης, από μια τιμή της ανηγμένης μετακίνησης δ_{res} / d_s ίση με 0.30 και πέρα.



Σχ. 3.16: Καταστατικό διάγραμμα εξολκείσεως νευροχαλύβων κατακόρυφων
οπών οπλισμένης τοιχοποιίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η συμπεριφορά δύο τοίχων οπλισμένης τοιχοποιίας φυσικής κλίμακας έναντι ανακυκλιζόμενων οριζόντιων δράσεων εντός του επιπέδου τους με ταυτόχρονη δράση κατακόρυφης θλιπτικής τάσης. Στον Πίνακα 1 περιγράφονται οι εξεταζόμενες τοιχοποιίες. Για τη κατασκευή τους έγινε χρήση ειδικών ορθότρυπων κεραμικών πλίνθων και χρησιμοποιήθηκε κονίαμα δομήσεως για την πλήρωση των οριζόντιων αρμών και κονίαμα πληρώσεως μόνο στις οπλισμένες κατακόρυφες οπές του τοίχου. Στον Πίνακα 2 περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της τοιχοποιίας. Τα υλικά αυτά περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3. Όλες οι ράβδοι οπλισμού που χρησιμοποιήθηκαν είναι ράβδοι με νευρώσεις κατηγορίας S500. Η μέση τάση διαρροής και η μέση εφελκυστική αντοχή κάθε ράβδου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η γεωμετρία και η διάταξη των οπλισμών των τοίχων.

Το πάχος των τοίχων είναι ίσο με το μήκος της πλίνθου, δηλαδή 0.32 m . Το πάχος των οριζόντιων αρμών είναι 15 mm, ενώ το πάχος των κατακόρυφων αρμών ποικίλλει από 10 μέχρι 20 mm. Μία δοκός οπλισμένου σκυροδέματος ύψους 0.30 m κατασκευάστηκε στην κορυφή κάθε τοίχου για την επιβολή των οριζόντιων μετατοπίσεων. Οι εξεταζόμενοι τοίχοι είχαν λόγο διάτμησης 1.08 (Τοίχοι 1,2). Ο λόγος διάτμησης α_s ορίζεται από τη σχέση :

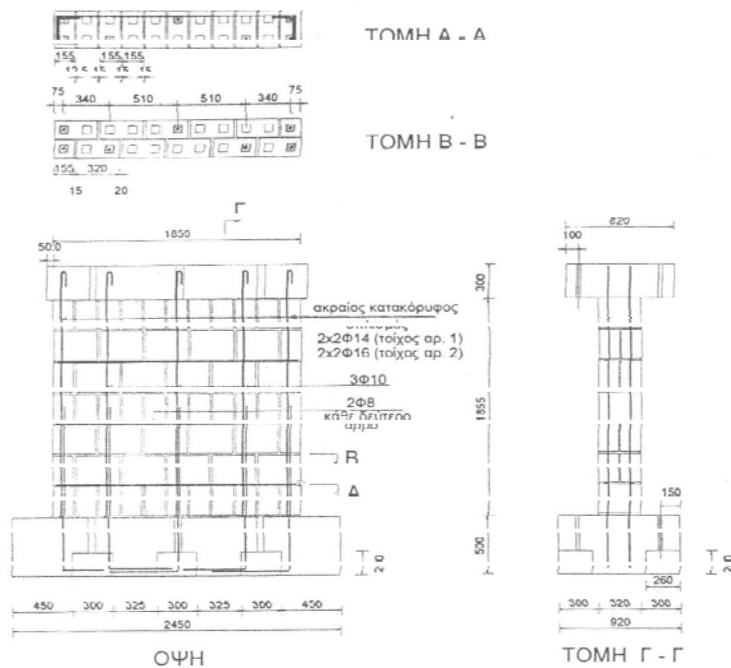
$$\alpha_s = \frac{M}{Vl_w} = \frac{Vh_w^*}{Vl_w} = \frac{h_w^*}{l_w}$$

όπου M είναι η αναπτυσσόμενη ροπή στη βάση του τοίχου, V η αναπτυσσόμενη τέμνουσα, l_w το μήκος της τοιχοποιίας.

Στην περίπτωση αμφιάκτου στοιχείου η ροπή M είναι ίση με $0,5Vh$ ($h_w^*=h/2$) ενώ στην περίπτωση προβόλου η ροπή M είναι ίση με Vh ($h_w^*=h$).

Στις παρούσες δοκιμές η τοιχοποιία εξετάστηκε ως πρόβολος και το ύψος h_w^* είναι ίσο με $h+0.15$ m.

Κάθε τοίχος υποβλήθηκε σε μια προκαθορισμένη ιστορία οριζόντιων φορτίσεων της κορυφής. Κάθε τοίχος υποβλήθηκε αρχικά σε προοδευτικά αυξανόμενες μετατοπίσεις, μέχρι τη μετατόπιση εκείνη (δ_{cr}) όπου συνέβη η ισχυρή εφελκυστική ρηγμάτωσή του. Η τιμή δ_{cr} αντιστοιχούσε στην εμφάνιση της πρώτης ρωγμής κατά την οποία διαπιστώθηκε συγχρόνως και σημαντική μείωση της ακαμψίας του τοίχου. Κατόπιν ο τοίχος υποβλήθηκε σε μετατοπίσεις των οποίων οι τιμές ήταν ακέραια πολλαπλάσια του δ_{cr} . Εκτελέστηκαν τρεις πλήρεις ανακυκλίσεις σε κάθε στάθμη μετατόπισης. Η δοκιμή διακοπτόταν όταν ο τοίχος έχανε τουλάχιστον το 80% της μέγιστης αντίστασής του.



Σχ. 4.1: Γεωμετρία και όπλιση δοκιμών αρ.1 και 2

Πίνακας 1: Δοκίμια τοίχων οπλισμένης τοιχοποιίας

α/α τοίχου	h_w/l_w (mm)	t_w (mm)	α_s	σ_o (Mpa)	ρ_v (‰)	A_{sv}	ρ_h (‰)	A_{sh}	$A_{s,end}$
1	1855/1850	320	1.08	0.2	0.48	1Φ10/51	0.59	2Φ8/53	2Φ14
2	1855/1850		1.08	0.4	0.94	1Φ10/51	0.59	2Φ8/53	2Φ16

h_w =ύψος του τοίχου

l_w =μήκος του τοίχου

t_w =πάχος του τοίχου

$\alpha_s=M/(V*l_w)$ =λόγος διατμήσεως

σ_o =κατακόρυφη θλιπτική τάση

ρ_v =ποσοστό κατακόρυφου οπλισμού

A_{sv} =διατομή κατακόρυφου οπλισμού

ρ_h =ποσοστό οριζόντιου οπλισμού

A_{sh} =διατομή οριζόντιου οπλισμού

$A_{s,end}$ =διατομή ακραίου οπλισμού

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά υλικών τοιχοποιίας (μέσες τιμές)

α/α τοίχου	Πλίνθοι f_{bc} (MPa)	Κονιάματα				Τοίχοι	
		Δομήσεως		Πληρώσεως		f_{wc} (Mpa)	f_{wt} (Mpa)
		$f_{mt,fl}$ (Mpa)	f_{mc} (Mpa)	$f_{gt,fl}$ (Mpa)	f_{gc} (Mpa)		
1	$f_{bc1}=8.50$	1.63	9.07	3.72	18.26	4.41	0.29
2	$f_{bc2}=2.20$	1.74	9,26	3,32	16,29		
	$f_{bc3}=1.15$						

f_{bc1} =θλιπτική αντοχή πλίνθου

παράλληλα στις οπές

f_{bc2} =θλιπτική αντοχή πλίνθου κάθετα στις οπές κατά τη διεύθυνση 2

f_{bc3} =θλιπτική αντοχή πλίνθου κάθετα στις οπές κατά τη διεύθυνση 3

$f_{mt,fl}$ =καμπτική αντοχή κονιάματος δομήσεως

f_{mc} =θλιπτική αντοχή κονιάματος δομήσεως

$f_{gt,fl}$ =καμπτική αντοχή κονιάματος πληρώσεως

f_{gc} =θλιπτική αντοχή κονιάματος πληρώσεως

f_{wc} =θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας

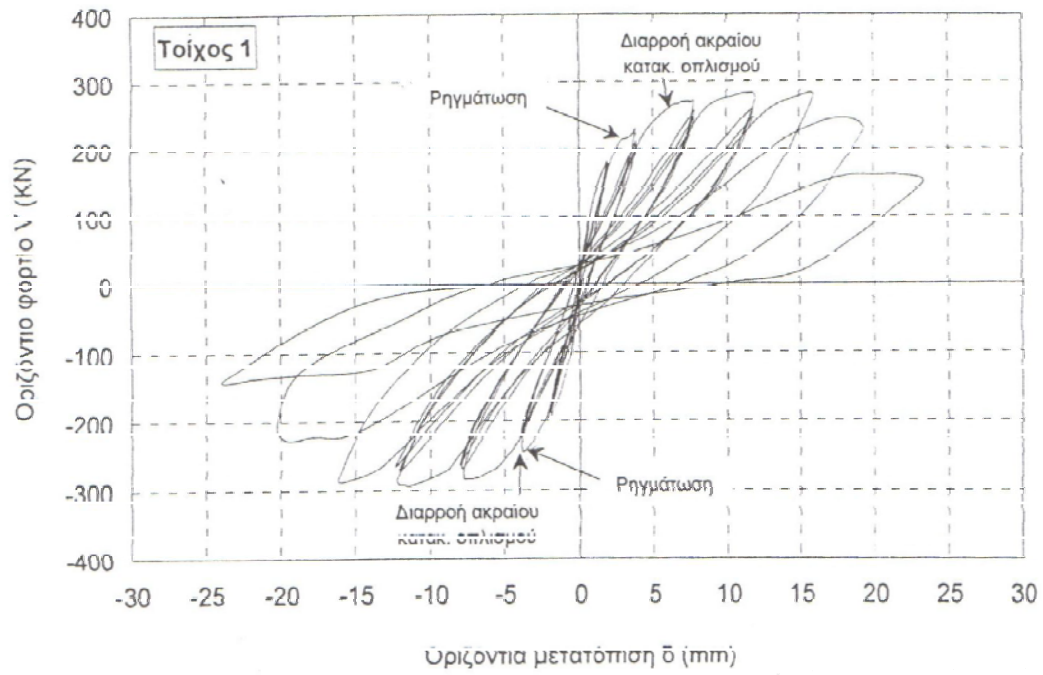
f_{wt} =εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας

Πίνακας 3: Μέσες τάσεις διαρροής και εφελκυστικές αντοχές ράβδων οπλισμού

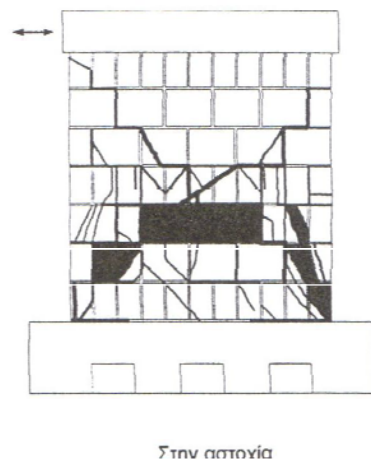
Διάμετρος d_s (mm)	α/α τοίχου	Μέση τάση διαρροής f_{sy} (Mpa)	Μέση εφελκυστική αντοχή f_{st} (Mpa)
8	1	521	617
10	1,2	494	615
14	1,2	511	600
18	2	511	636

4.2 Τοίχος 1

Ο τοίχος 1 είναι τετραγωνικός με λόγο διατμήσεως 1.08, με ύψος 1.855 m και μήκος 1.85 m. Επιβλήθηκε κατακόρυφη τάση ίση με 0.2 MPa. Το ποσοστό του κατακόρυφου οπλισμού είναι $\rho_v=0.48\%$ και το ποσοστό του οριζόντιου οπλισμού είναι $\rho_h=0.59\%$. Για την κατακόρυφη όπλισή του τοποθετήθηκαν ράβδοι $\Phi 10\text{mm}$ και $\Phi 14\text{ mm}$ ανά 0.51m και για την οριζόντια δύο ράβδοι $\Phi 8\text{ mm}$ ανά κάθε δεύτερο οριζόντιο αρμό του τοίχου (ανά 0.53m). Ο τοίχος αστόχησε διατμητικά. Η πρώτη κύρια διαγώνια ρωγμή αναπτύχθηκε προς τη θετική διεύθυνση φόρτισης υπό φορτίο 215kN και μετατόπιση 3.0 mm., ενώ στην αντίθετη διεύθυνση φόρτισης αναπτύχθηκε σε μετατόπιση 3.5 mm στα 240 kN. Οι ρωγμές αναπτύχθηκαν περί το κέντρο του τοίχου και διαδίδονταν υπό γωνία 45° περίπου προς τα άκρα. Η πρώτη διαρροή του ακραίου κατακόρυφου οπλισμού σημειώθηκε σε μετατόπιση 3.5mm υπό φορτίο 240kN στην αρνητική διεύθυνση φόρτισης, ενώ στην αντίθετη διεύθυνση σημειώθηκε σε μετατόπιση 6.0 mm (1ος κύκλος στα 8 mm) υπό φορτίο 260 kN. Η μέγιστη αντίσταση του τοίχου στη θετική διεύθυνση ήταν 282.6 kN και επιτεύχθηκε σε μετατόπιση ίση με 11.8 mm, ενώ στην αντίθετη διεύθυνση φόρτισης η αντίσταση ήταν 294.2 kN για μετατόπιση 11.5 mm. Παρατηρήθηκαν αποκολλήσεις κελυφών και θραύσεις των νευρώσεων των πλίνθων κατά μήκος των διαγωνίων, από τη βάση μέχρι το μέσο ύψος του τοίχου, καθώς και θραύση των κάτω γωνιών. Στο Σχήμα 4,2 παρουσιάζεται το διάγραμμα οριζόντιου φορτίου (V) – οριζόντιας μετατόπισης (δ) του τοίχου 1 και στο Σχήμα 4.3 φαίνεται η αστοχία του τοίχου μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής.



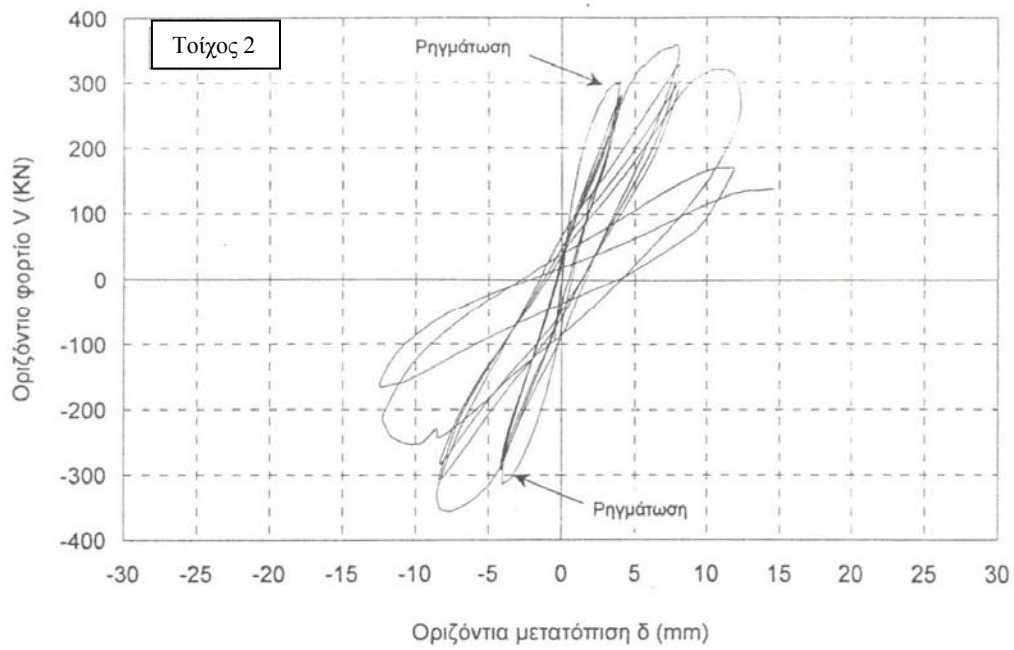
Σχ. 4.2: Υστερητικοί βρόγχοι οριζόντιου φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης τοίχου 1



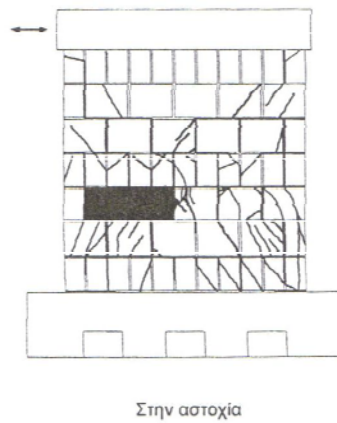
Σχ. 4.3: Μορφή ρηγμάτωσης τοίχου 1 στην ασοχία

4.4 Τοίχος 2

Ο τοίχος 2 είναι τετραγωνικός με λόγο διαμήσεως 1.08, με ύψος 1.855 m και μήκος 1.85 m. Επιβλήθηκε κατακόρυφη τάση ίση με 0.4 MPa. Το ποσοστό του κατακόρυφου οπλισμού είναι $\rho_v=0.94\%$ και το ποσοστό του οριζόντιου οπλισμού είναι $\rho_h=0.93\%$. Για την κατακόρυφη όπλισή του τοποθετήθηκαν ράβδοι $\Phi 14\text{mm}$ και $\Phi 18\text{ mm}$ ανά 0.51m και για την οριζόντια δύο ράβδοι $\Phi 10\text{ mm}$ ανά κάθε δεύτερο οριζόντιο αρμό του τοίχου (ανά 0.53m). Η πρώτη κύρια διαγώνια ρωγμή αναπτύχθηκε προς τη θετική διεύθυνση φόρτισης υπό φορτίο 290kN και μετατόπιση 3.1 mm, ενώ στην αντίθετη διεύθυνση φόρτισης αναπτύχθηκε σε μετατόπιση 3.4 mm στα 305 kN. Αναπτύχθηκαν λοξές ρωγμές μικρού εύρους σε όλη σχεδόν την επιφάνεια του τοίχου, καθώς αυξάνονταν οι μετακινήσεις, ενώ το πλάτος του ανοίγματος των κύριων διαγωνίων παρέμενε σε χαμηλά επίπεδα. Οι ακραίες κατακόρυφοι ράβδοι δεν διέρρευσαν. Η μέγιστη αντίσταση του τοίχου στη θετική διεύθυνση ήταν 359.0 kN και επιτεύχθηκε σε μετατόπιση ίση με 8.0mm, ενώ στην αντίθετη διεύθυνση φόρτισης η αντίσταση ήταν 356.4 kN για μετατόπιση 7.6mm. Ο τοίχος παρουσίασε ψαθυρή συμπεριφορά. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα οριζόντιου φορτίου (V) – οριζόντιας μετατόπισης (δ) του τοίχου 2 και στο Σχήμα 4.5 φαίνεται η αστοχία του τοίχου μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής.



Σχ. 4.4: Υστερητικοί βρόχοι οριζόντιου φορτίου – οριζόντιας μετατόπισης τοίχου 2



Σχ. 4.5: Μορφή ρηγμάτωσης τοίχου 2 στην αστοχία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΜΑ ΧΑΛΥΒΑ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

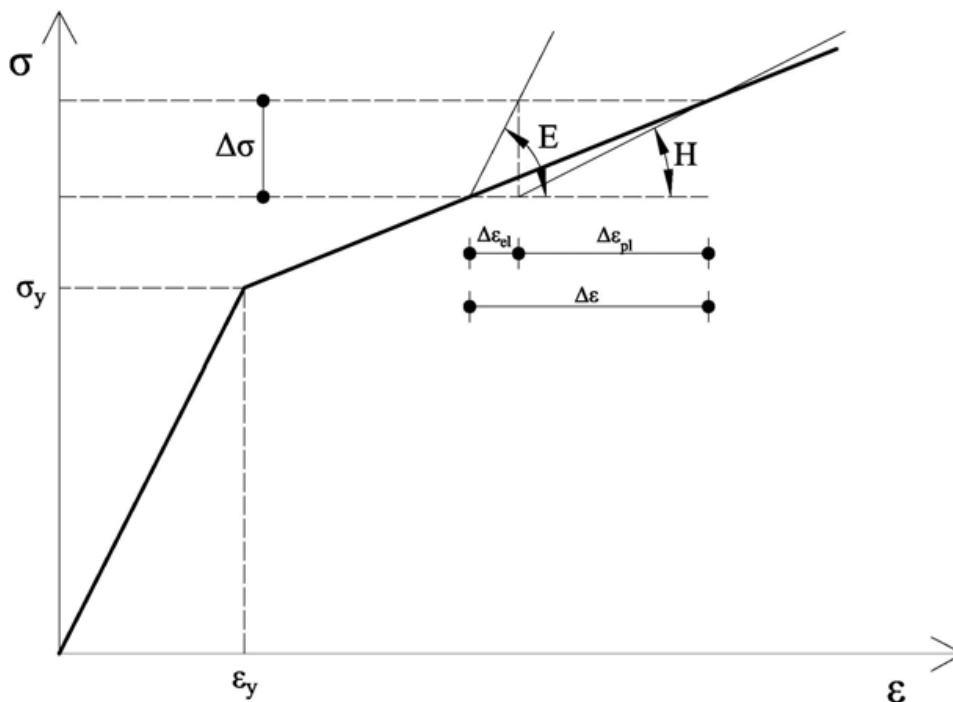
Το πιο σημαντικό στοιχείο ενός μαθηματικού μοντέλου που χρησιμοποιείται για τον αναλυτικό προσδιορισμό της απόκρισης ενός πραγματικού φορέα είναι οι καταστατικές σχέσεις ή αλλιώς τα καταστατικά μοντέλα που επιλέγονται για κάθε υλικό. Γενικά οι καταστατικές σχέσεις αποτελούν ένα πολύπλοκο και ευρύτατο ζήτημα και συχνά η μαθηματική τους προσομοίωση μπορεί να γίνει αρκετά πολύπλοκη. Η επιλογή των καταστατικών σχέσεων εξαρτάται από το είδος της προσομοίωσης. Στη συνέχεια γίνεται μια παρουσίαση μιας διγραμμικής καταστατικής σχέσης που χρησιμοποιείται πολύ συχνά για την προσομοίωση χάλυβα. Ακολουθώς παρουσιάζεται το μοντέλο των Menegotto and Pinto (1973) η οποία σχέση προτάθηκε αρχικά για την προσομοίωση του χάλυβα οπλισμού στο σκυρόδεμα.

5.2 ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Μια καταστατική σχέση βασίζεται σε κανόνες που καθορίζουν: (α) την ελαστική συμπεριφορά, (β) πότε το υλικό διαρρέει, δηλαδή το κριτήριο διαρροής, (γ) κανόνες που διέπουν τη συμπεριφορά μετά τη διαρροή και (δ) κανόνες που διέπουν την ανακύκλιση της έντασης. Για το διγραμμικό μοντέλο η συμπεριφορά πριν τη διαρροή περιγράφεται από τον νόμο του Hooke με μέτρο ελαστικότητας E , ενώ το σημείο διαρροής καθορίζεται από την τάση διαρροής σ_y . Το υλικό αφού διαρρεύσει ακολουθεί ένα δεύτερο κλάδο που έχει κλίση ίση με το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας E_t . Οι παράμετροι της διγραμμικής σχέσης μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν από ένα απλό μονοαξονικό πείραμα. Παράδειγμα του διγραμμικού μοντέλου παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1 όπου η ανηγμένη παραμόρφωση στη διαρροή ϵ_y προκύπτει αναλόγως της τάσης διαρροής ενώ το μέτρο ελαστικότητας και το εφαπτομενικό συνδέονται με τη βοήθεια του λόγου κράτυνσης b :

$$E_t = bE$$

Όταν το b είναι ίσο με μηδέν τότε το υλικό καλείται ελαστικό-απολύτως πλαστικό.



Σχήμα 5.1 Διγραμμικό μοντέλο χάλυβα

Οι παραμορφώσεις που είναι μικρότερες της ε_y χαρακτηρίζονται σαν αναστρέψιμες κατά την αποφόρτιση εφόσον θεωρούμε ότι το υλικό έχει τέλεια μνήμη δηλαδή το υλικό κατά την αποφόρτιση ακολουθεί τον ίδιο δρόμο ισορροπίας. Στην περίπτωση που το υλικό έχει διαρρεύσει τότε μόνο το ελαστικό μέρος της παραμόρφωσης είναι αναστρέψιμο. Πολλές φορές αντί του λόγου b για τον προσδιορισμό του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας (E_t) χρησιμοποιείται το μέτρο κράτνσης H το οποίο συνδέει την τάση με τις πλαστικές, μη αναστρέψιμες, παραμορφώσεις :

$$\sigma = H \varepsilon_{pl}$$

Στην περίπτωση που το υλικό έχει διαρρεύσει τότε μια προσαύξηση της παραμόρφωσης $\Delta\varepsilon$ συνδέεται με την ολική παραμόρφωση ως εξής:

$$\Delta\sigma = E \Delta\varepsilon$$

Έτσι η συνολική παραμόρφωση αποτελείται από την ελαστική και από την πλαστική παραμόρφωση σύμφωνα με τη σχέση :

$$\varepsilon = \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{el}$$

Με το συνδυασμό των παραπάνω σχέσεων τελικά προκύπτουν οι δύο σχέσεις που αφορούν το μέτρο κράτνσης H και το λόγο κράτνσης b και οι οποίες αποδεικνύουν την ευκολία προσδιορισμού τους μέσω ενός απλού μονοαξονικού πειράματος.

$$H = \frac{Er}{1-b} \quad , \quad E\tau = E \left(1 - \frac{E}{E-H} \right)$$

Κατά την αποφόρτιση του υλικού η τάση διαρροής για το νέο κλάδο είναι διαφορετική από την αρχική (στην περίπτωση που το υλικό εφελκυστεί πέρα από το όριο διαρροής και στη συνέχεια υποβληθεί σε θλίψη) και ποιο συγκεκριμένα η νέα τάση διαρροής είναι μικρότερη της αρχικής στη νέα διεύθυνση φόρτισης. Το ίδιο ακριβώς φαινόμενο συμβαίνει και στην περίπτωση που το υλικό αρχικά θλίβεται και στη συνέχεια εφελκύεται και είναι γνωστό σαν το φαινόμενο Bauschinger και οφείλεται στη δομή του υλικού λόγω ελαστοπλαστικών παραμορφώσεων. Για τα πρακτικά προβλήματα έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για την προσομοίωση της ανακυκλικής συμπεριφοράς του χάλυβα από τα οποία τα ποιο συνηθισμένα είναι τα μοντέλα κινηματικής και ισοτροπικής κράτνσης (kinematic and isotropic hardening). Κατά την ισοτροπική κράτνση το φαινόμενο Bauschinger αγνοείται και η ίδια τάση διαρροής χρησιμοποιείται τόσο στον εφελκυσμό όσο και στη θλίψη με αποτέλεσμα να παρατηρείται μια διόγκωση του βρόγχου υστέρησης. Στο άλλο μοντέλο της κινηματικής κράτνσης υποθέτει ότι η νέα τάση διαρροής $\overline{\sigma}_y$ προκύπτει αν αφαιρέσουμε από την τάση του σημείου στο οποίο συνέβη η αλλαγή της φοράς φόρτισης το διπλάσιο της αρχικής τάσης διαρροής, δηλαδή:

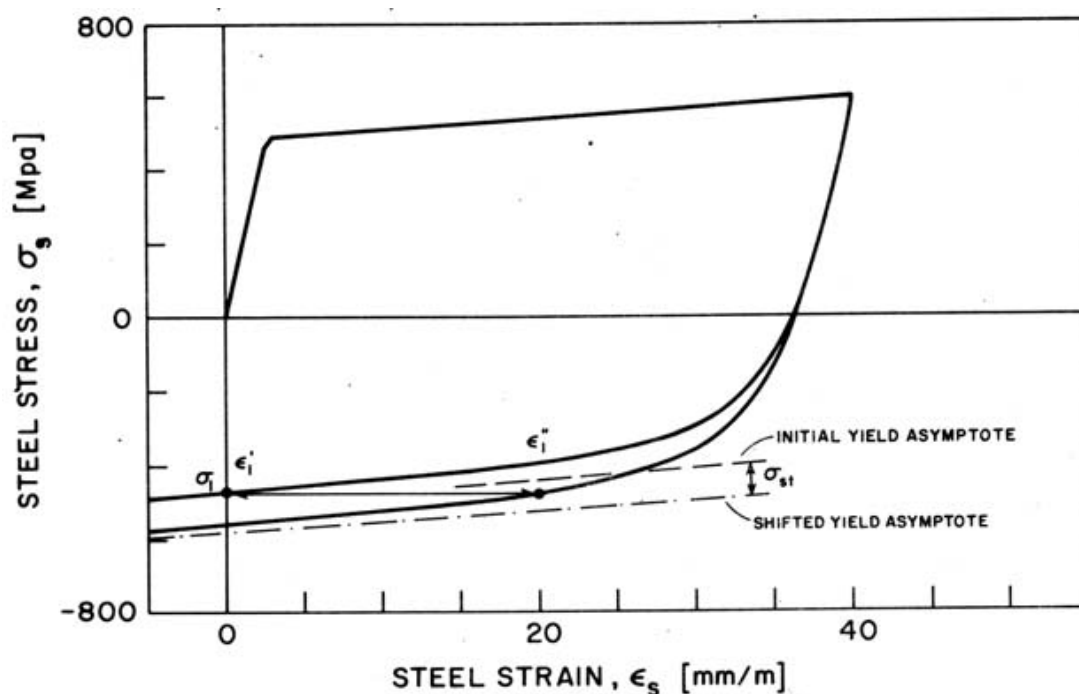
$$\overline{\sigma}_y = \sigma_r - 2\sigma_y$$

Όπου σ_r είναι η τάση του σημείου όπου το πρόσημο της φόρτισης αντιστράφηκε. Εν αντιθέση με την ισοτροπική κράτνση η κινηματική δεν μεταβάλλει το μέγεθος του βρόγχου υστέρησης αλλά έχει σαν αποτέλεσμα τη μετάθεση του κέντρου του. Στην περίπτωση που γίνεται χρήση και των δύο ειδών κράτνσης τότε η τελευταία καλείται μεικτή. Για την προσομοίωση του χάλυβα οπλισμού χρησιμοποιείται το διγραμμικό μοντέλο με κινηματική κράτνση όπου γίνεται η υπόθεση ότι λόγω της κινηματικής κράτνσης προσημειώνεται σε κάποιο βαθμό και το φαινόμενο Bauschinger.

Για να ληφθεί υπόψη και η επιρροή της ισοτροπικής κράτνσης οι Fillippou et al (1983) πρότειναν την μετατόπιση του ορίου διαρροής κατά την ποσότητα :

$$\sigma_{sh} = \sigma_y a_1 \left(\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_y} - \alpha_2 \right) < 0$$

όπου το ε_r είναι κατά απόλυτη τιμή η μέγιστη παραμόρφωση στο σημείο αλλαγής της φοράς φόρτισης ενώ η παράμετρος a_1 καθορίζει το μέγεθος της ισοτροπικής κράτνσης και το α_2 καθορίζει την παραμόρφωση πέρα από την οποία το φαινόμενο λαμβάνεται υπόψη . Η μετατόπιση αυτή φαίνεται στο σχήμα 5.2



Σχήμα 5.2 Μετατόπιση του ορίου διαρροής λόγω ισοτροπικής κράτνσης
(Πηγή: Fillippou et al. (1983))

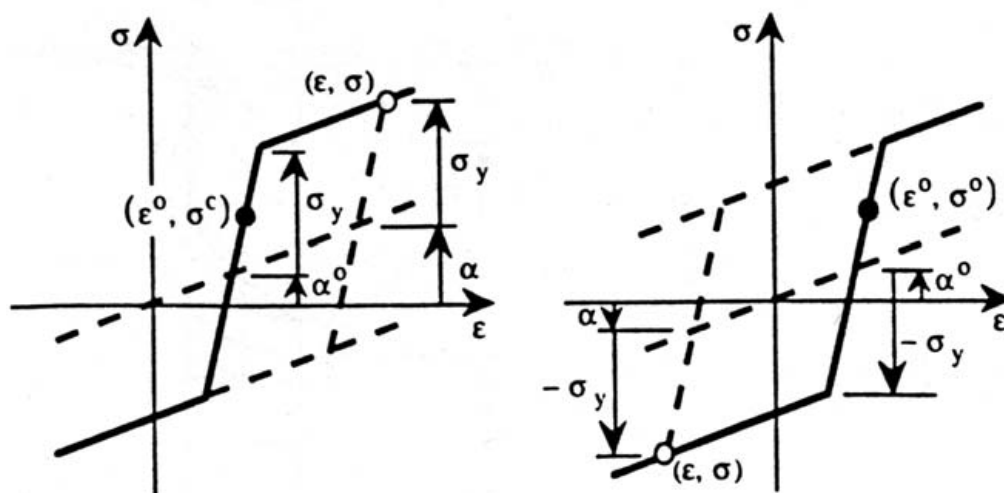
Οι παράμετροι a_1 και α_2 μπορούν να καθοριστούν πειραματικά ενώ οι τιμές τους μπορούν να διαφέρουν για θλιπτικά και για εφελκυστικά βήματα φόρτισης. Το σχήμα του βρόγχου δεν μεταβάλλεται ανεξάρτητα από το είδος της κράτνσης , μεταβάλλεται μόνο η τάση διαρροής κατά τη νέα διεύθυνση φόρτισης.

Για τον προγραμματισμό του μοντέλου πρέπει σε κάθε βήμα να υπολογίζεται το νέο κέντρο της ελαστικής περιοχής που αντιστοιχεί σε μια τιμή τάσης α . Το βήμα της παραμόρφωσης $\Delta\epsilon$ υπολογίζεται από τη διαφορά της παραμόρφωσης ϵ του τρέχοντος βήματος με την παραμόρφωση ϵ_0 που αντιστοιχεί στο προηγούμενο βήμα. Με ανάλογο τρόπο υπολογίζεται και η σχέση τάσης διαρροής σ_y και της τάσης του προηγούμενου βήματος σ_0 . Αναλόγως της τιμής του $\Delta\epsilon$ διακρίνονται τρεις περιπτώσεις από τις οποίες προκύπτουν οι τιμές της τάσης και του κέντρου της ελαστικής περιοχής α . Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας που χρησιμοποιείται για την ανανέωση του μητρώου στιβαρότητας προκύπτει από τη σχέση :

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = E \quad \alpha - \sigma_y < \sigma < \alpha + \sigma_y$$

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = E_r \quad \sigma = \alpha - \sigma_y \quad \text{ή} \quad \sigma = \alpha + \sigma_y$$

Ο προσδιορισμός της τάσης για θετικό και αρνητικό βήμα περιγράφεται από στο σχήμα 5.3. Παρατηρώντας το σχήμα βλέπουμε ότι οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές της τάσης βρίσκονται πάντα πάνω σε δύο παράλληλες ευθείες που έχουν κλίση E_r . Αντίστοιχα το κέντρο του βρόγχου, δηλαδή τα σημεία με τεταγμένη α , βρίσκεται πάντα σε μια ευθεία παράλληλη προς τις προηγούμενες δύο ευθείες που διέρχεται από την αρχή των αξόνων.



Σχήμα 5.3 Διγραμμικό μοντέλο με κινηματική κράντωση για θετικό (αριστερά) και αρνητικό (δεξιά) βήμα φόρτισης (Πηγή: Elnashai and Izzuddin (1993))

Στην περίπτωση που το μοντέλο εισάγεται και ισοτροπική κράτυνση χρησιμοποιούνται οι σχέσεις:

$$\sigma_{sh}^{tension} = \sigma_y a_1 \left(\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_y} - \alpha_2 \right) > 0$$

$$\sigma_{sh}^{compression} = \sigma_y a_3 \left(\left| \frac{\varepsilon_{min}}{\varepsilon_y} \right| - \alpha_4 \right) > 0$$

Οι παράμετροι $a_1, \alpha_2, a_3, \alpha_4$ μπορούν να προσδιοριστούν πειραματικά ενώ οι παραμορφώσεις ε_{max} και ε_{min} αντιστοιχούν στην παραμόρφωση κατά την αντιστροφή της φόρτισης σε θετικό και αρνητικό κλάδο φόρτισης, αντίστοιχα. Τυπικές τιμές για a_3 και a_1 είναι 0,01-0,025 ενώ για τα α_2 και α_4 είναι 2-7 (Fragiadakis (2001)).

5.3 TO MONTELO MEGNEGOTTO-PINTO (1983)

Η καταστατική σχέση των Megnegotto-Pinto βασίζεται σε μια ρητή συνάρτηση της μορφής $f(\sigma, \varepsilon) = 0$. Η σχέση προτάθηκε αρχικά από τους Giuffre και Pinto και δημοσιεύτηκε αργότερα από τους Megnegotto-Pinto (1983). Η σχέση προτάθηκε για την προσομοίωση του χάλυβα οπλισμού και συνδυάζει απλότητα και ικανοποιητική ακρίβεια. Η καταστατική σχέση έχει μορφή:

$$\sigma^* = b\varepsilon^* + \frac{(1-b)\varepsilon^*}{\sqrt[R]{1+\varepsilon^{*R}}}$$

$$\text{όπου } \varepsilon^* = \frac{\varepsilon - \varepsilon_r}{\varepsilon_o - \varepsilon_r}$$

$$\text{και } \sigma^* = \frac{\sigma - \sigma_r}{\sigma_o - \sigma_r}$$

Η παραπάνω εξίσωση περιγράφει τη μετάβαση από μια ευθεία με κλίση E σε μια ευθεία με κλίση $E_r = bE$. Οι παράμετροι σ_o και ε_o αντιστοιχούν στην τάση και η παραμόρφωση στο σημείο τομής των δύο ευθειών. Αντίστοιχα ε_r και σ_r είναι η τάση

παραμόρφωση του σημείου όπου έγινε η τελευταία αλλαγή της φοράς της φόρτισης. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στην αρχή του νέου κλάδου φόρτισης. Η παράμετρος R καθορίζει το σχήμα της καμπύλης μετάβασης και δίνει την καμπυλότητα του τόξου συναρμογής (σχήμα 5.4). Μετά από κάθε αλλαγή της φοράς φόρτισης οι παράμετροι ε_o , σ_o και ε_r , σ_r ανανεώνονται.

Η καμπυλότητα R εξαρτάται από τη διαφορά της παραμόρφωσης στο σημείο τομής των δύο ευθειών και της παραμόρφωσης του προηγούμενου σημείου αλλαγής της φοράς φόρτισης, ανάλογα με το αν η αντίστοιχη τάση είναι θετική ή αρνητική. Έτσι, το R για το n -οστό κύκλο φόρτισης δίνεται από τη σχέση :

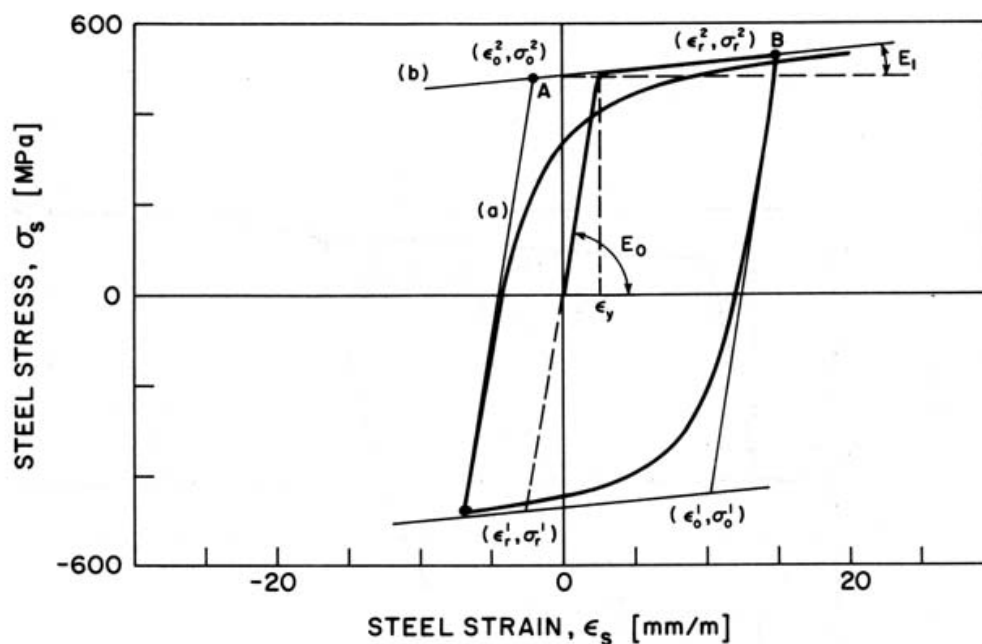
$$R^n = R_0 - \frac{a_1 \xi_p^n}{a_2 + \xi_p^n}$$

Για κάθε κλάδο φόρτισης ορίζεται η πλαστική παραμόρφωση ξ_p^n ως εξής :

$$\xi_p^n = \varepsilon_r^n - \varepsilon_o^n$$

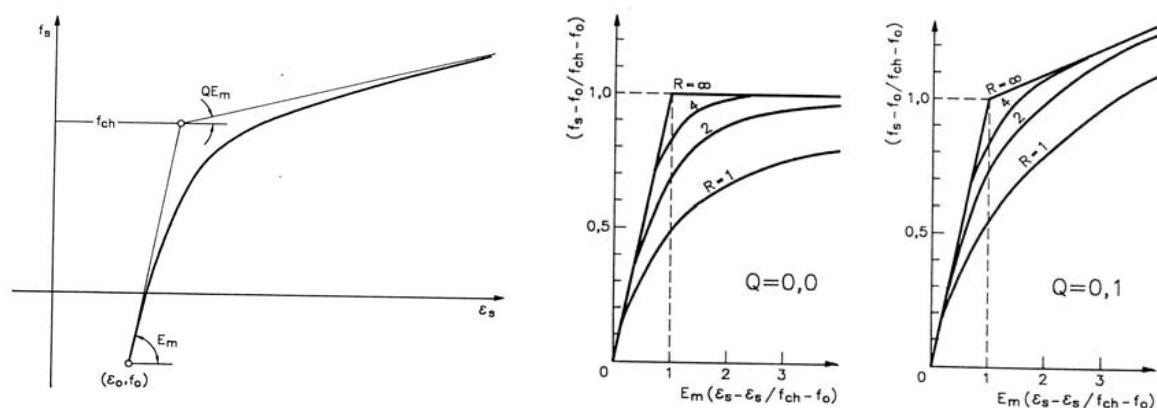
Όπου το ε_o^n προκύπτει από τη σχέση :

$$\varepsilon_o^n = \varepsilon_r^{n-1} + \frac{\sigma_o^n - \sigma_r^{n-1}}{E}$$



Σχήμα 5.4 Το μοντέλο Menegotto-Pinto (Πηγή: Filippou et al. (1983))

Όσον αφορά τις μεταβλητές του μοντέλου η ξ_p ανανεώνεται σε κάθε αλλαγή φόρτισης ενώ η R_0 αποτελεί την καμπυλότητα R για τον πρώτο κύκλο φόρτισης και όπως και οι μεταβλητές a_1, a_2 μπορούν να καθοριστούν πειραματικά με τυπικές τιμές 18,5 και 0,15 αντίστοιχα ενώ για την R_0 γύρω στο 20. Μια αύξηση της R έχει σαν αποτέλεσμα η μετάβαση από τη μια ευθεία στην άλλη να γίνεται πιο απότομη, ενώ για μικρότερες τιμές έχουμε μια πιο ομαλή μετάβαση. (βλ. σχήμα 5.5)



Σχήμα 5.5 Επιρροή της καμπυλότητας R στο μοντέλο Menegotto-Pinto (Πηγή: Pira 1993)

Το παραπάνω μοντέλο αποτελεί την αρχική πρόταση των Menegotto-Pinto και διαφέρει από την πρόταση των Ciampi et al (1982) όπου ο παρονομαστής της σχέσης είναι ίσος με $2 \varepsilon_0$.

Το μοντέλο των Menegotto-Pinto έχει παρατηρηθεί ότι είναι δυνατόν να δώσει λανθασμένα την τάση στην περίπτωση που συμβαίνουν μικρές αποφορτίσεις και επαναφορτίσεις κατά τη χρονιοιστορία της φόρτισης (αν και το πρόβλημα αυτό είναι γενικό και δεν αφορά μόνο το συγκεκριμένο μοντέλο). Κλασική περίπτωση είναι η περίπτωση όπου ο φορέας υποβάλλεται σε μια σεισμική καταγραφή. Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος προτάθηκε αρχικά από τους Dodd και Restrepo-Posada (1995) οι αλλαγές φόρτισης να διαχωρίζονται σε κύριες, δευτερεύουσες και απλές ενώ οι Balan και Filippou (1998) πρότειναν το διαχωρισμό τους σε πλήρεις και μη-πλήρεις χρησιμοποιώντας σαν κριτήριο μια οριακή τιμή τάσης ίση με $2\sigma_y$. Έτσι για το μοντέλο αυτό οι Filippou et al σημειώνουν ότι προκειμένου να αντιμετωπίσει το πρόβλημα αυτό, το μοντέλο θα πρέπει να έχει μνήμη όλων των

αλλαγών της φοράς φόρτισης που έλαβαν χώρα. Εφόσον κάτι τέτοιο θα ήταν υπολογιστικά πολύπλοκο, οι Filippou et al πρότειναν τον περιορισμό της μνήμης του μοντέλου σε τέσσερις ευθείες: (α) τη μονοτονική περιβάλλουσα, (β) τον ανώτερο φθίνοντα κλάδο που ξεκινά από το σημείο αλλαγής της φοράς φόρτισης με τη μικρότερη τιμή παραμόρφωσης, (γ) τον κατώτερο ανιόντα κλάδο που ξεκινά από το σημείο αλλαγής φοράς φόρτισης με τη μεγαλύτερη τιμή παραμόρφωσης και (δ) την τρέχουσα καμπύλη που ξεκινά από το πιο πρόσφατο σημείο αλλαγής της φοράς φόρτισης. Με την αλλαγή αυτή το μοντέλο χρησιμοποιεί τις παραπάνω τέσσερις ευθείες για να υπολογίσει τις παραμέτρους του νέου κλάδου φόρτισης. Το πρόβλημα απαλείφεται στους επίπεδους φορείς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ABAQUS

6.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ABAQUS

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS το οποίο περιλαμβάνει δύο υποπρογράμματα: το ABAQUS/Standard, ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων γενικής χρήσης και το ABAQUS/Explicit, ένα πρόγραμμα δυναμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Τα ABAQUS/Standard και ABAQUS/Explicit είναι δύο ξεχωριστές ενότητες προγραμμάτων με διαφορετική δομή στην εισαγωγή δεδομένων. Οι αναλύσεις στην παρούσα εργασία έγιναν με τη μέθοδο ABAQUS/Explicit.

Το πρόγραμμα ABAQUS είναι σχεδιασμένο ως ένα εύχρηστο εργαλείο για τη μόνιμωση πεπερασμένων στοιχείων. Μία σημαντική πτυχή αυτής της ευχέρειας είναι ο διαχωρισμός σε βήματα της χρονοϊστορίας της φόρτισης που πρόκειται να αναλυθεί. Σε κάθε βήμα επιλέγεται ο τρόπος της ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκειά του, π.χ. δυναμική ανάλυση τάσεων, λυγισμός ιδιοτιμών κ.τ.λ. Ο τρόπος ανάλυσης μπορεί να αλλάξει από βήμα σε βήμα και πάντοτε τα αποτελέσματα του προηγούμενου βήματος περιλαμβάνονται στην απόκριση του επόμενου βήματος.

Στο φάκελο δεδομένων (input file) εισάγουμε δεδομένα του μοντέλου (model data) και δεδομένα της παρούσας κατάστασης ή της κατάστασης που προϋπήρχε (history data). Τα model data περιγράφουν τα στοιχεία (elements), τους κόμβους (nodes), τις ιδιότητες του στοιχείου (element properties), το υλικό (material definition) και κάθε στοιχείο που προσδιορίζει το μοντέλο καθαυτό. Τα history data καθορίζουν το τι συμβαίνει στο μοντέλο, τη συχνότητα της φόρτισης για την οποία ζητείται η απόκριση του μοντέλου. Στο Abaqus ο χρήστης κλιμακώνει την «ιστορία» του μοντέλου σε μια αλληλουχία βημάτων (steps). Η φόρτιση περιλαμβάνει συνολικά τρία βήματα (steps). Στο πρώτο βήμα γίνεται εφαρμογή της βαρύτητας σε όλο το δοκίμιο ενώ στο δεύτερο βήμα γίνεται εφαρμογή της κατακόρυφης δύναμης που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής μαζί με το συνολικό βάρος της δοκού οπλισμένου σκυροδέματος μέσω της οποίας γίνεται η εφαρμογή του κατακόρυφου φορτίου κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Τέλος στο τρίτο βήμα γίνεται εφαρμογή της

οριζόντιας μετατόπισης στο κόμβο πάνω και αριστερά με χρήση της ίδιας χρονοιστορίας που χρησιμοποιήθηκε και στη πειραματική διαδικασία. Στη βιβλιογραφία του Abaqus περιλαμβάνονται διάφοροι τύποι στοιχείων. Ανάλογα με το είδος της ανάλυσης και τα αποτελέσματα που θέλουμε να εξάγουμε χρησιμοποιούμε κατάλληλα στοιχεία. Το abaqus cae τέλος παρέχει τη δυνατότητα να γίνει με απλό, άμεσο και γραφικό τρόπο η προσομοίωση του μοντέλου, η ανάλυση αυτού, αλλά και η απεικόνιση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Ένας μεγάλος αριθμός προβλημάτων ανάλυσης τάσεων μπορεί να επιλυθεί με το ABAQUS. Βασικός διαχωρισμός αυτών των προβλημάτων είναι σε στατικής ή δυναμικής απόκρισης. Στα δυναμικά προβλήματα οι επιδράσεις της αδράνειας είναι σημαντικές.

Στις αναλύσεις που κάναμε, το υλικό της τοιχοποιίας προσομοιώθηκε ως μη γραμμικό αρχικά ισότροπο ομογενές και ο οπλισμός ως μη γραμμικό ισότροπο υλικό με ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Ο οπλισμός τοποθετήθηκε στο προσομοίωμα με δύο μεθόδους στηριζόμενοι σε δύο εντολές του Abaqus. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η εντολή rebar για την εισαγωγή των οπλισμών. Βασικό μειονέκτημα της εντολής αυτής είναι ότι οι οπλισμοί που τοποθετούνται δεν είναι ορατοί μέσω του Abaqus cae. Το πρόγραμμα εισηγείται αντί της εντολής rebar να χρησιμοποιείτε η εντολή embedded η οποία και λύνει το πρόβλημα της παρουσίασης των οπλισμών εφόσον αυτοί είναι πλέον ορατοί μέσω του Abaqus cae. Όπως φαίνεται και πιο κάτω στα αποτελέσματα οι εντολές rebar και embedded δίνουν σχεδόν πανομοιότυπα διαγράμματα για την ανακυκλική φόρτιση. Η μη γραμμική ανάλυση λαμβάνει υπ' όψιν της την πραγματική συμπεριφορά των υλικών, σε διάφορες καταπονήσεις, προσδιορίζει τις θέσεις των ρωγμών και αναλύει το ρηγματωμένο φορέα.

Στις εφαρμογές της παρούσης εργασίας πραγματοποιείται δυναμική επιβολή οριζόντιας μετατόπισης στους κόμβους της στέγης των τοιχοποιιών. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να προσομοιώσουμε τη σεισμική δράση. Η επιβολή δυναμικού φαινομένου απαιτεί τον προσδιορισμό της χρονικής διάρκειας του φαινομένου, καθώς και τη μεταβολή του επιβαλλόμενου φορτίου (στη συγκεκριμένη περίπτωση, μετατόπιση) συναρτήσεως του χρόνου. Τα ζεύγη τιμών (δ, t) δίνονται σε μορφή πίνακα.

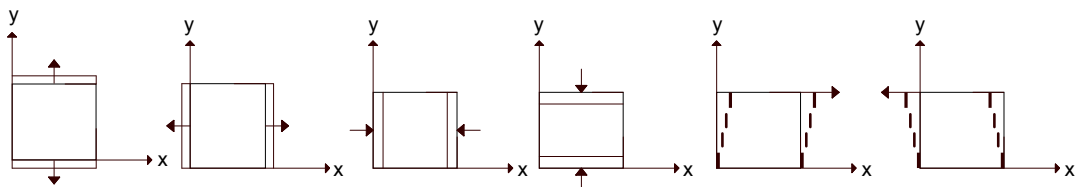
6.2 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

6.2.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε το Μονοαξονικό προσομοίωμα συνολικών τροπών για την ανάλυση οπλισμένης τοιχοποιίας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία υπόκειται σε ανακυκλιζόμενη ένταση εντός του επιπέδου της. Το προσομοίωμα αυτό αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας για άοπλη τοιχοποιία. Στο προσομοίωμα αυτό 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.

6.2.2 Μονοαξονικό προσομοίωμα συνολικών τροπών

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 6.1



Σχ. 6.1 : Μορφές αστοχίας: εφελκυσμός, θλίψη και διάτμηση

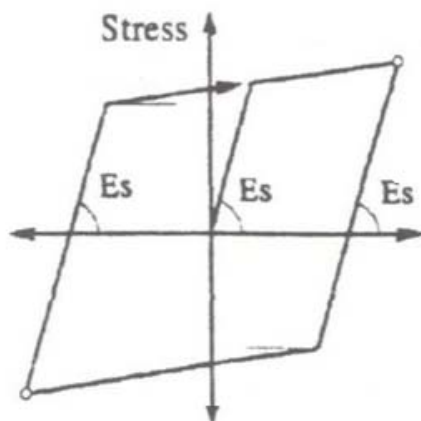
6.2.3 Έλεγχος αξιοπιστίας προσομοιωμάτων

Ο έλεγχος αξιοπιστίας των καταστατικών προσομοιωμάτων έγινε μέσω επαλήθευσης των πειραματικών αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Η επίλυση των στατικών προβλημάτων γίνεται με δυναμική ανάλυση ρητής ολοκλήρωσης (explicit dynamic analysis).

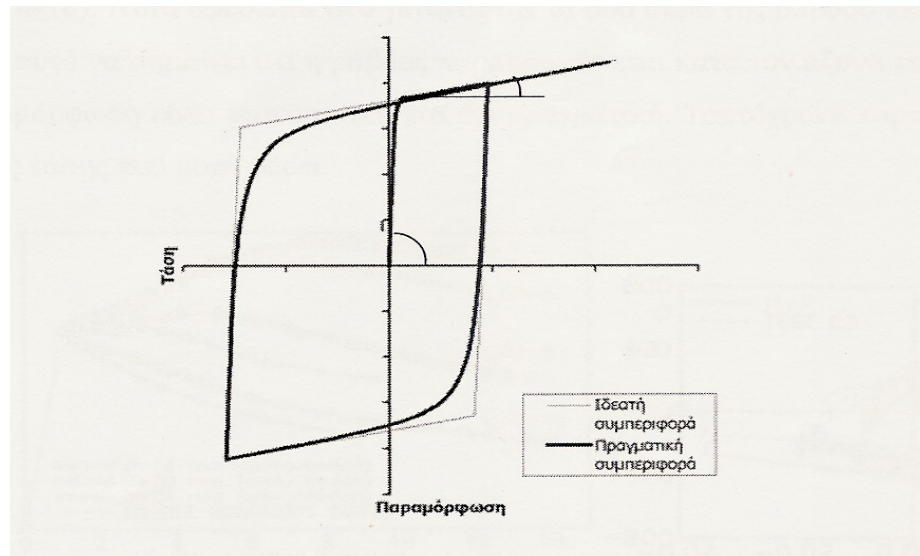
Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση στατικών προβλημάτων υπό την προϋπόθεση ότι η κινηματική ενέργεια παραμένει μικρή συγκρινόμενη με την συνολική ενέργεια του συστήματος κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Για να επιτευχθεί αυτό, υπολογίζονται αρχικά οι ιδιοσυχνότητες του εξεταζόμενου φορέα και ο χρόνος επιβολής των φορτίσεων αυξάνεται τουλάχιστον 100 φορές. 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. Το τελευταίο επιτυγχάνεται με ορισμό χρόνου υποβολής του φορτίου αρκετά μεγάλο ούτως ώστε πρακτικά να θεωρείτε στατικό. Πριν την επαλήθευση των πειραματικών αποτελεσμάτων έγιναν παραμετρικές αναλύσεις για τον έλεγχο της ευαισθησίας του καταστατικού νόμου της τοιχοποιίας.

6.3 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΧΑΛΥΒΑ

Στην αριθμητική ανάλυση των τοίχων που έχουν αναφερθεί δεν γίνεται χρήση του καταστατικού προσομοιώματος χάλυβα που περιέχεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus το οποίο αφορά ελεύθερο οπλισμό (βλέπε σχήμα 6,2). Αντί αυτού χρησιμοποιείτε ένα τροποποιημένο καταστατικό χάλυβα το οποίο περιγράφει πιο ρεαλιστικά την πραγματική συμπεριφορά του χάλυβα και το οποίο φαίνεται στο σχήμα 6,3. Η τυπική μονοαξονική συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμού χαρακτηρίζεται από (α) ένα γραμμικά μεταβαλλόμενο αύξοντα κλάδο (β) ένα οριζόντιο κλάδο διαρροής ο οποίος είναι μικρός για τους χάλυβες της Ελληνικής αγοράς και (γ) την περιοχή της κράτυνσης με μέτρο ελαστικότητας της τάξης του 1%-2% του αρχικού (σχήμα 6.5). Ο χάλυβας φτάνει σε ένα παραμορφωσιακό όριο θραύσης το οποίο είναι της τάξης του 12%. Αν υπάρξει αποφόρτιση πριν το όριο αυτό τότε το υλικό επιστρέφει στην ελαστική του συμπεριφορά με σταδιακή όμως απομείωση του μέτρου ελαστικότητας έως ότου φτάσει την τιμή του ορίου διαρροής της αντίστροφης κατεύθυνσης κατά την οποία το μέτρο παίρνει την τιμή που αντιστοιχεί στην περιοχή της κράτυνσης. Μια νέα αποφόρτιση θα έχει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά. Η σταδιακή αυτή μετάβαση αποτελεί το γνωστό φαινόμενο Bauschinger. Δεδομένης της εκτεταμένης ρηγμάτωσης που υφίσταται η τοιχοποιία κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση το φαινόμενο αυτό έχει αρκετά μεγάλη επιρροή στη συμπεριφορά του δομικού συστήματος.



Σχ. 6.2 : Καταστατικό προσομοίωμα χάλυβα προγράμματος Abaqus



Σχ. 6.3 : Τροποποιημένο καταστατικό προσομοίωμα χάλυβα που εισήχθη κατά τη διάρκεια των αναλύσεων στο πρόγραμμα *Abaqus*

6.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

6.4.1 Εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας

Για τον έλεγχο της συμπεριφοράς της τοιχοποιίας όταν μεταβάλλεται η εφελκυστική αντοχή έγινε επίλυση των τοίχων 1 και 2 για διάφορες τιμές της όπως φαίνετε και πιο κάτω και διατηρώντας τις υπόλοιπες μεταβλητές σταθερές :

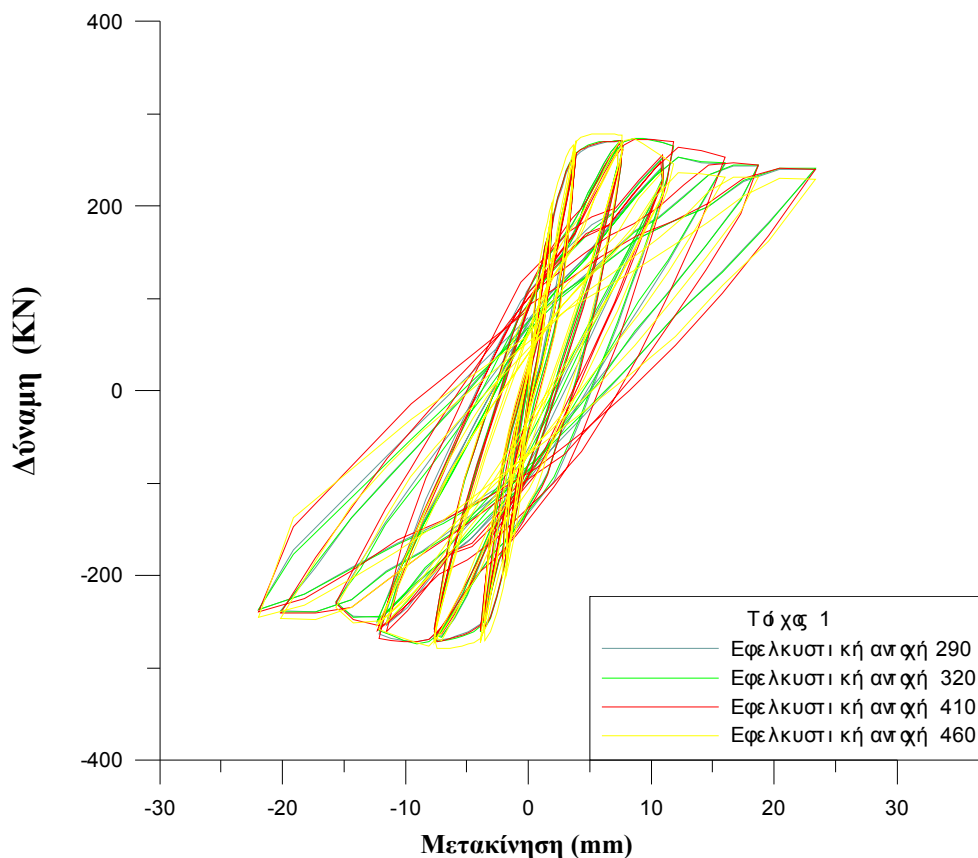
$$(\alpha) f_t = 290 \text{ kN/m}^2$$

$$(\beta) f_t = 320 \text{ kN/m}^2$$

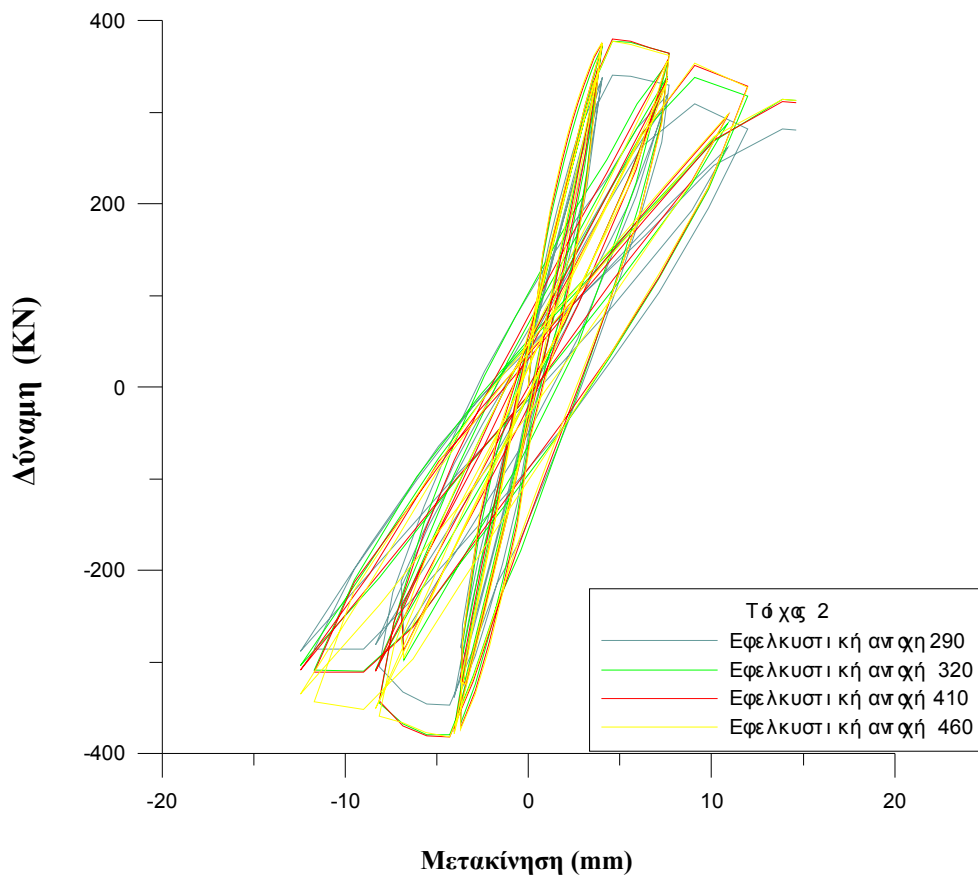
$$(\gamma) f_t = 460 \text{ kN/m}^2$$

$$(\gamma) f_t = 410 \text{ kN/m}^2$$

Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν με βάση την εκτίμηση που έγινε πειραματικά όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας. Με τη χρήση του προγράμματος ABAQUS εξετάστηκε ο τοίχος 1 και 2 διαστάσεων $1.85 \times 1.855 \times 0.32 \text{ m}$. Στο σχήμα 6.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τον τοίχο 1 ενώ στο σχήμα 6,5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τον τοίχο 2.



Σχ. 6.4: Αποτελέσματα αναλύσεων για τον τοίχο 1 διαφορετικών τιμών εφελκυστικής αντοχής



Σχ. 6.5: Αποτελέσματα αναλύσεων για τον τοίχο 2 διαφορετικών τιμών εφελκυστικής αντοχής

Είναι φανερό από τα παραπάνω διαγράμματα ότι η μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής στο καταστατικό δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τη συμπεριφορά της τοιχοποιίας κατά την αναλυτική επίλυση.

6.4.2 Παράμετρος αποφόρτισης από θλίψη

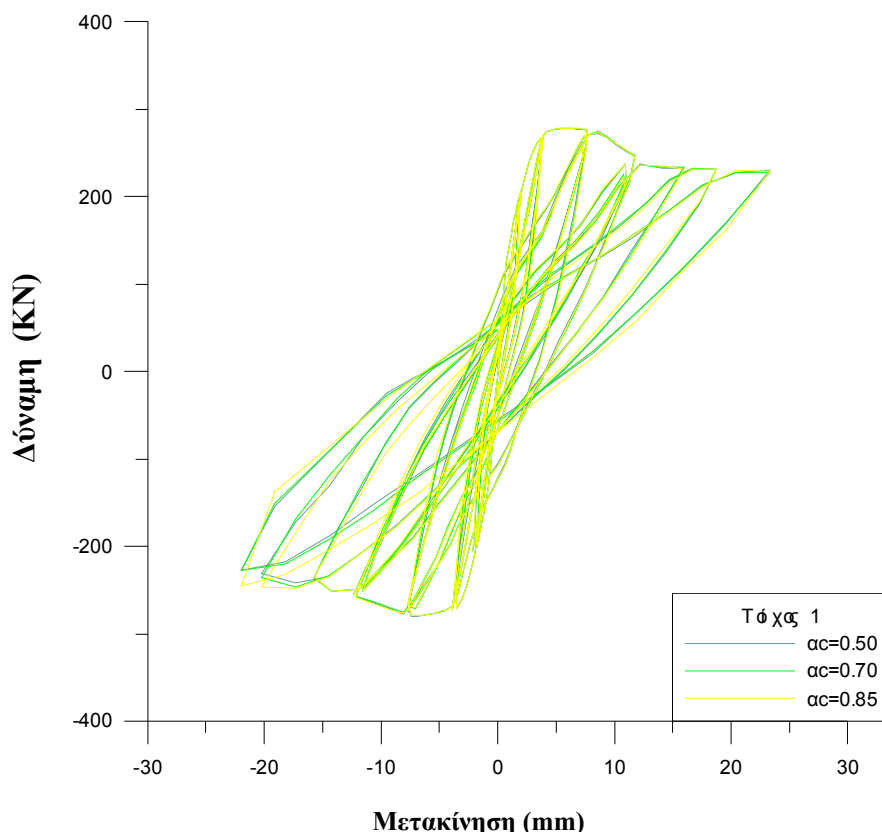
Για τον έλεγχο της συμπεριφοράς της τοιχοποιίας όταν μεταβάλλεται η παράμετρος αποφόρτισης από θλίψη έγινε επίλυση για τον τοίχο 1 για διάφορες τιμές της όπως φαίνεται και πιο κάτω και διατηρώντας τις υπόλοιπες μεταβλητές σταθερές :

$$(\alpha) a_c = 0.50$$

$$(\beta) a_c = 0.70$$

$$(\gamma) a_c = 0.85$$

Με τη χρήση του προγράμματος ABAQUS εξετάστηκε ο τοίχος 1 διαστάσεων $1.85 \times 1.855 \times 0.32$ m . Στο σχήμα 6.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τον τοίχο 1.



Σχ. 6.6: Αποτελέσματα αναλύσεων για τον τοίχο 1 διαφορετικών τιμών συντελεστή a_c

Είναι φανερό από το παραπάνω διάγραμμα ότι η μεταβολή της παραμέτρου αποφόρτισης από θλίψη στο καταστατικό δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τη συμπεριφορά της τοιχοποιίας κατά την αναλυτική επίλυση εφόσον τα διαγράμματα ταυτίζονται.

6.4.3 Παράμετρος αποφόρτισης από εφελκυσμό

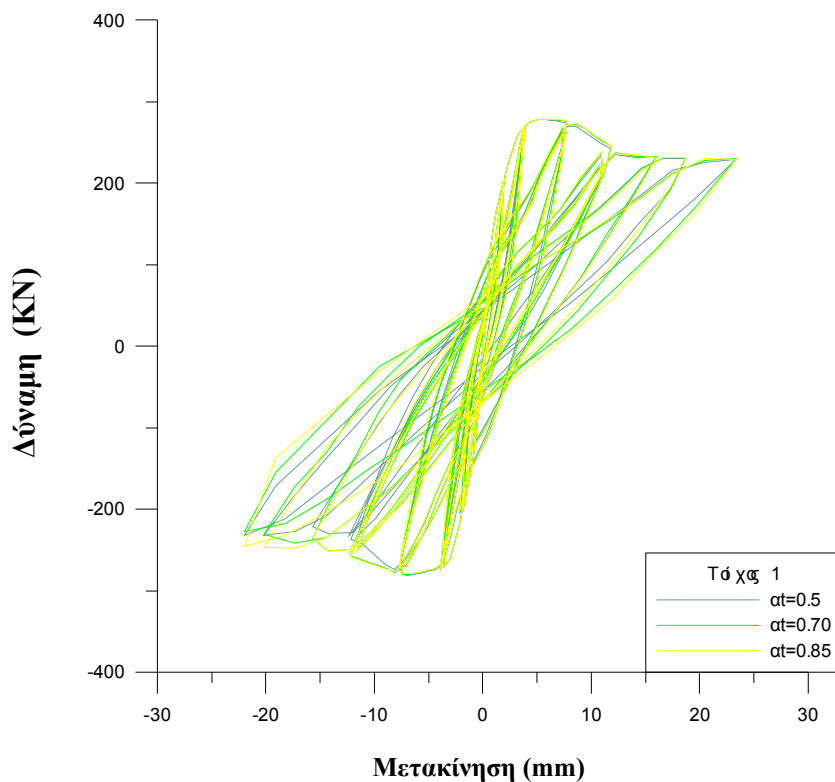
Για τον έλεγχο της συμπεριφοράς της τοιχοποιίας όταν μεταβάλλεται η παράμετρος αποφόρτισης από εφελκυσμό έγινε επίλυση για τον τοίχο 1 για διάφορες τιμές της όπως φαίνεται και πιο κάτω και διατηρώντας τις υπόλοιπες μεταβλητές σταθερές :

$$(\alpha) at = 0.50$$

$$(\beta) at = 0.70$$

$$(\gamma) at = 0.85$$

Με τη χρήση του προγράμματος ABAQUS εξετάστηκε ο τοίχος 1 διαστάσεων $1.85 \times 1.855 \times 0.32$ m . Στο σχήμα 6.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τον τοίχο 1.



Σχ. 6.7: Αποτελέσματα αναλύσεων για τον τοίχο 1 διαφορετικών τιμών συντελεστή at

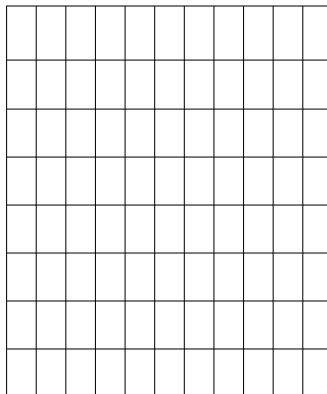
Είναι φανερό από το παραπάνω διάγραμμα ότι η μεταβολή της παραμέτρου αποφόρτισης από εφελκυσμό στο καταστατικό δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τη συμπεριφορά της τοιχοποιίας κατά την αναλυτική επίλυση εφόσον τα διαγράμματα ταυτίζονται.

6.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΝ 1-2

6.5.1 Τοίχος 1

Ο τοίχος 1 είναι τετραγωνικός με λόγο διάτμησης 1.08, με ύψος 1.855 m, μήκος 1.85 m και πάχος 0.32m. Επιβλήθηκε κατακόρυφη τάση ίση με 0.2 MPa. Το ποσοστό του κατακόρυφου οπλισμού είναι $\rho_v=0.48\%$ και το ποσοστό του οριζόντιου οπλισμού είναι $\rho_h=0.59\%$. Χρησιμοποιήθηκε ορθότρυπη κεραμική πλίνθος διαστάσεων 0.155m x 0.32m και ύψους 0.250m όπως αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3. Ο οριζόντιος οπλισμός τοποθετήθηκε στους αρμούς πάχους 15mm και ποιότητας κονιάματος M10 και ο κατακόρυφος στις οπές της πλίνθου που στη συνέχεια γέμισαν με κονίαμα πληρώσεως θλιπτικής αντοχής 18 MPa.

Η διακριτοποίηση των τοίχων καθώς και της δοκού επιβολής φόρτισης έγινε με τετραπλευρικά τετρακομβικά στοιχεία επίπεδης έντασης διαστάσεων 155x250mm² με μειωμένο κανόνα ολοκλήρωσης. Οι οπλισμοί προσομοιώθηκαν με τα στοιχεία rebar όπως επίσης και με την εντολή embedded (δημιουργία του δικτύωματος των οπλισμών και τοποθέτηση του μετά στο τοίχο). Οι κόμβοι της βάσης δεσμεύτηκαν σε οριζόντια και κατακόρυφη μετακίνηση, ενώ οι κόμβοι της κορυφής του τοίχου είχαν κοινή οριζόντια μετατόπιση. Το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 6.10. Το μέγεθος του πεπερασμένου στοιχείου επιλέχθηκε να έχει διαστάσεις αντίστοιχες με το λιθόσωμα.

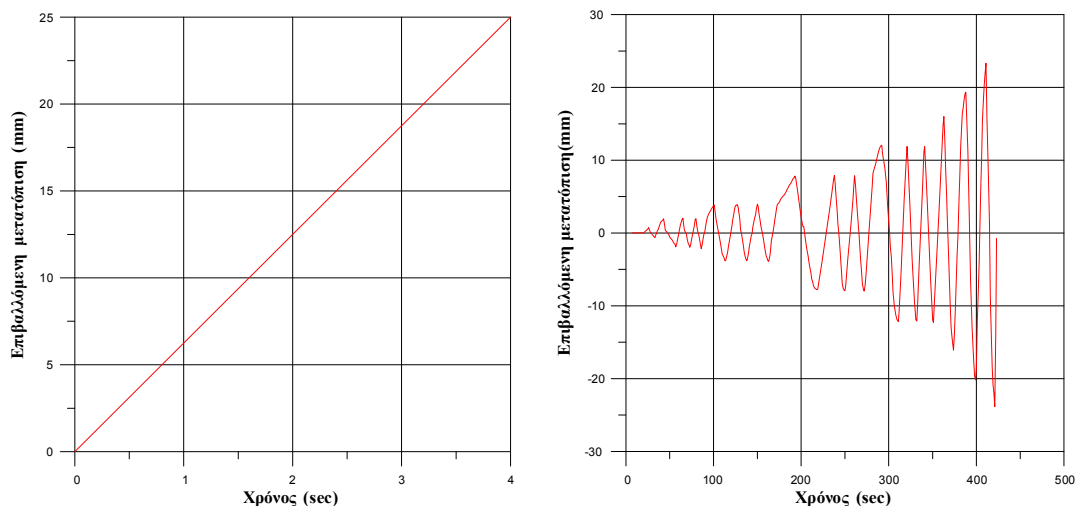


Σχ. 6.10: Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων τοίχου 1

Ο φορέας εξετάζεται ως πρόβολος. Στους κόμβους της στέγης του φορέα επιβάλλεται κοινή οριζόντια μετατόπιση. Συγκεκριμένα, τα στάδια φόρτισης που επιβάλλονται στο φορέα είναι τα εξής:

- Φόρτιση 1 : Επιβολή ίδιου βάρους τοιχοποιίας
- Φόρτιση 2 : Επιβολή κατακόρυφου φορτίου 200kN/m^2
- Φόρτιση 3 : Επιβολή κοινής οριζόντιας μετατόπισης στους κόμβους της στέγης της τοιχοποιίας.

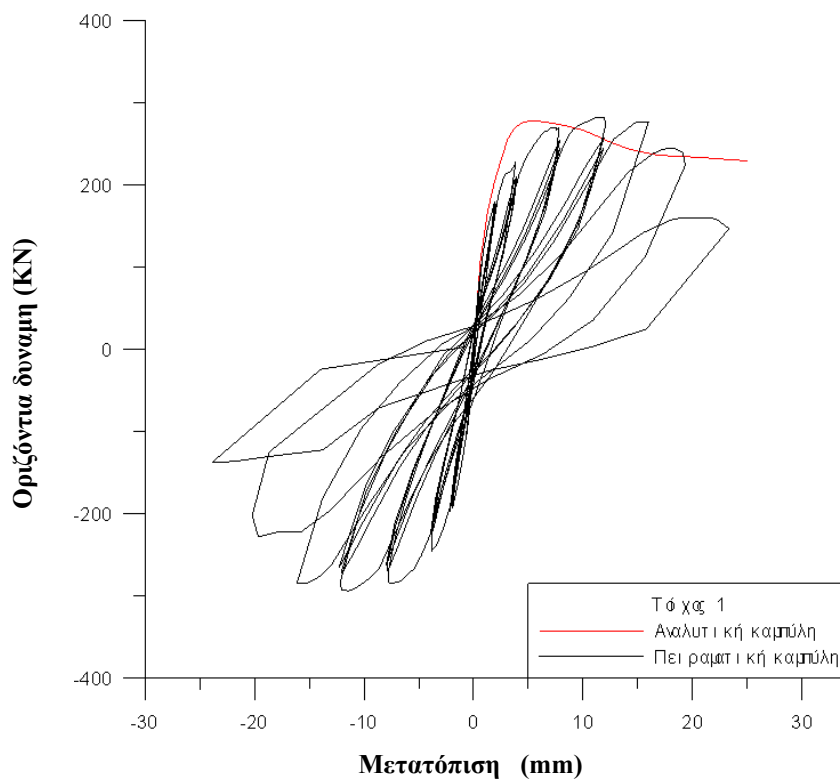
Στον τοίχο γίνονται δύο αναλύσεις, η πρώτη αντιστοιχεί σε μονοτονική επιβολή της μέγιστης μετακίνησης (Σχήμα 6.11α) και η δεύτερη σε επιβολή μετακίνησης ανακυκλιζόμενης μορφής όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11β .



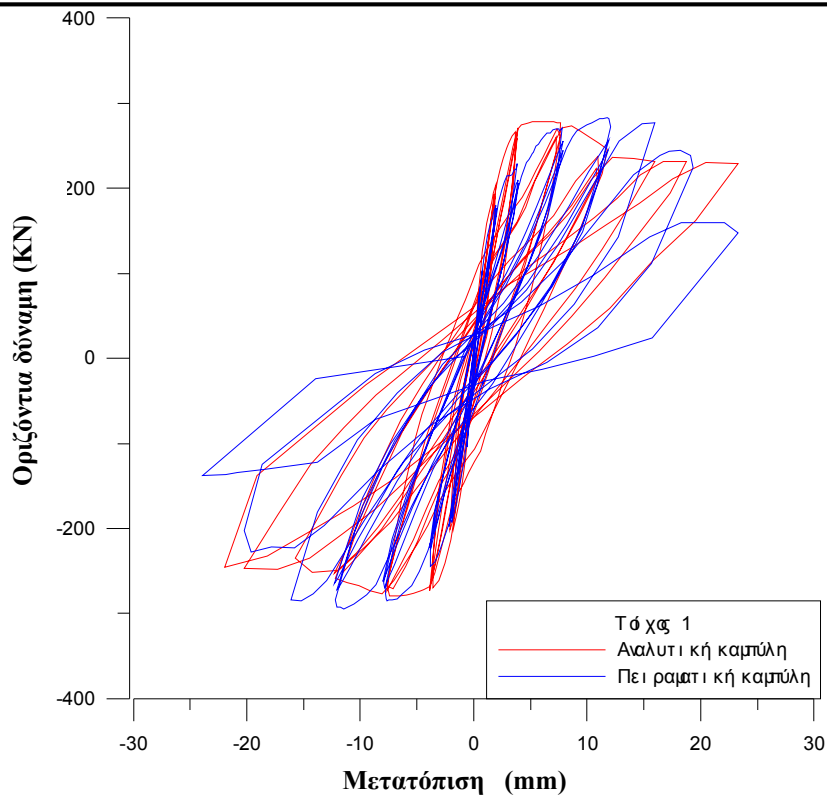
Σχ. 6.11: Επιβαλλόμενη μετατόπιση τοίχου 1 (α) μονοτονική και (β) ανακυκλιζόμενη

Στα Σχήματα 6.12 , 6.13 και 6.14 δίνεται το πειραματικό και αναλυτικό διάγραμμα του τοίχου 1 για μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση αντίστοιχα με εφαρμογή του μονοαξονικού προσομοιώματος συνολικών τροπών ενώ για την ανακυκλιζόμενη φόρτιση η δοκιμή και η σύγκριση γίνεται και με τους δύο τρόπους εισαγωγής του οπλισμού στο μοντέλο. Από το Σχήμα 6.13 προκύπτει ότι το μονοαξονικό προσομοίωμα συνολικών τροπών εκτιμά ικανοποιητικά το μέγιστο φορτίο σε μονοτονική φόρτιση, όχι όμως και τη μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας του τοίχου μετά από μετακίνηση 15mm.

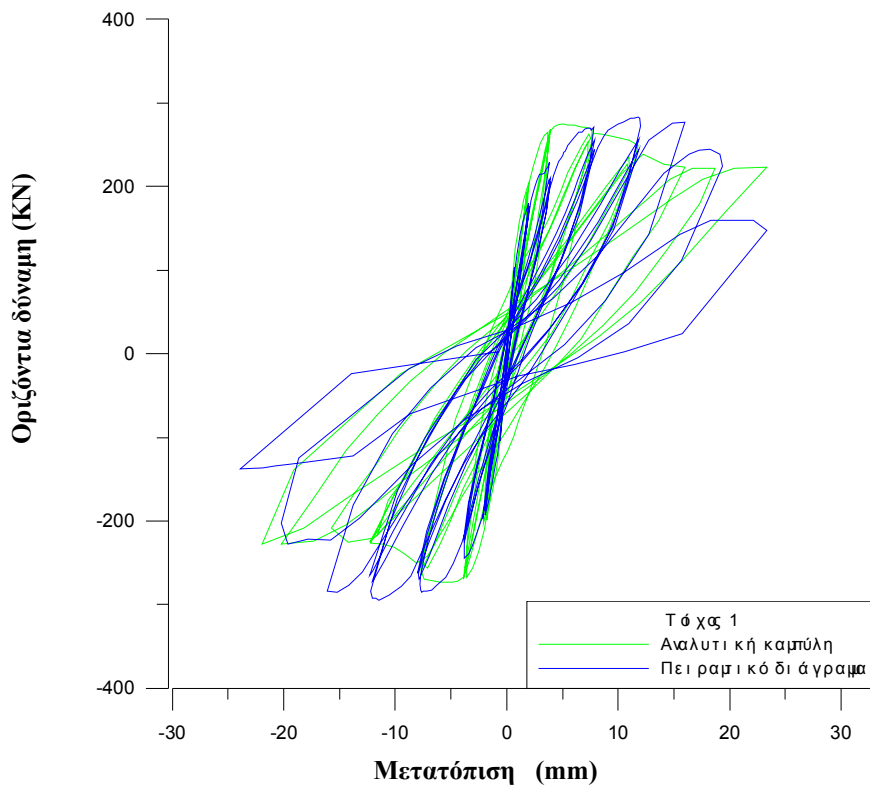
Από το Σχήμα 6.14 προκύπτει ότι για το μονοαξονικό προσομοίωμα συνολικών τροπών και με προσομοίωση των οπλισμών με την εντολή *embedded* η εκτίμηση της συμπεριφοράς του τοίχου σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση είναι αρκετά ικανοποιητική (μορφή βρόχων υστέρησης). Καλή σύγκλιση παρατηρείται σχεδόν σε όλους τους κύκλους φόρτισης μικρής μετακίνησης με εξαίρεση τον τελευταίο βρόγχο όπου το φορτίο που υπολογίζεται είναι κατά τι μεγαλύτερο από αυτό που προκύπτει πειραματικά. Τα ίδια ισχύουν και για τη περίπτωση του σχήματος 6.15 όπου οι οπλισμοί στο μοντέλο τοποθετήθηκαν με την εντολή *rebar* αποδεικνύοντας τα παραπλήσια αποτελέσματα που προκύπτουν στις δύο αυτές περιπτώσεις προσομοίωσης.



Σχ. 6.13: Σύγκριση πειραματικής-αναλυτικής καμπύλης του τοίχου 1 για μονοτονική φόρτιση με εφαρμογή του μονοαξονικού προσομοιώματος συνολικών τροπών (μοντέλο *embedded*)



Σχ. 6.14: Σύγκριση πειραματικής-αναλυτικής καμπύλης του τοίχου 1 για ανακυκλιζόμενη φόρτιση με εφαρμογή του μονοαξονικού προσομοιώματος συνολικών τροπών (μοντέλο *embedded*)

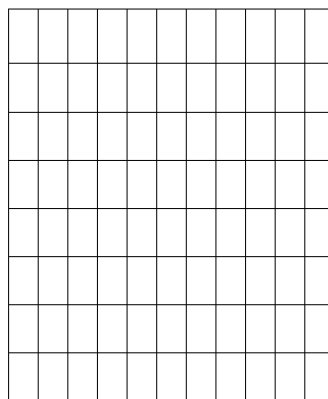


Σχ. 6.15: Σύγκριση πειραματικής-αναλυτικής καμπύλης του τοίχου 1 για ανακυκλιζόμενη φόρτιση με εφαρμογή του μονοαξονικού προσομοιώματος συνολικών τροπών (μοντέλο *rebar*)

6.5.3 Τοίχος 2

Ο τοίχος 2 είναι τετραγωνικός με λόγο διατμήσεως 1.08, με ύψος 1.855 m και μήκος 1.85 m. Επιβλήθηκε κατακόρυφη τάση ίση με 0.4 MPa. Το ποσοστό του κατακόρυφου οπλισμού είναι $\rho_v=0.94\%$ και το ποσοστό του οριζόντιου οπλισμού είναι $\rho_h=0.93\%$. Χρησιμοποιήθηκε ορθότρυπη κεραμική πλίνθος διαστάσεων 0.155m x 0.32m και ύψους 0.250m όπως αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3. Ο οριζόντιος οπλισμός τοποθετήθηκε στους αρμούς πάχους 15mm και ποιότητας κονιάματος M10 και ο κατακόρυφος στις οπές της πλίνθου που στη συνέχεια γέμισαν με κονίαμα πληρώσεως θλιπτικής αντοχής 18 MPa.

Η διακριτοποίηση των τοίχων έγινε με τετραπλευρικά τετρακομβικά στοιχεία επίπεδης έντασης διαστάσεων $155 \times 250 \text{mm}^2$ με μειωμένο κανόνα ολοκλήρωσης. Οι οπλισμοί προσομοιώθηκαν με τα στοιχεία rebar όπως επίσης και με την εντολή embedded (δημιουργία του δικτύματος των οπλισμών και τοποθέτηση τους μετά στο τοίχο). Οι κόμβοι της βάσης δεσμεύτηκαν σε οριζόντια και κατακόρυφη μετακίνηση, ενώ οι κόμβοι της κορυφής του τοίχου είχαν κοινή οριζόντια μετατόπιση. Το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 6.16.

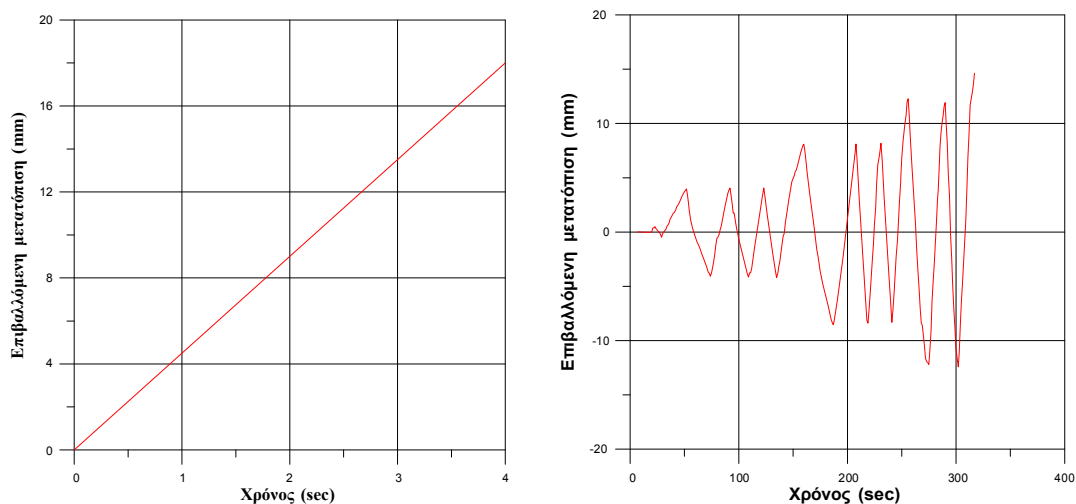


Σχ. 6.16: Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων τοίχου 2

Ο φορέας εξετάζεται ως πρόβολος. Στους κόμβους της στέψης του φορέα επιβάλλεται κοινή οριζόντια μετατόπιση. Συγκεκριμένα, τα στάδια φόρτισης που επιβάλλονται στο φορέα είναι τα εξής:

- Φόρτιση 1 : Επιβολή ίδιου βάρους τοιχοποιίας
- Φόρτιση 2 : Επιβολή κατακόρυφου φορτίου 400kN/m^2
- Φόρτιση 3 : Επιβολή κοινής οριζόντιας μετατόπισης στους κόμβους της στέψης της τοιχοποιίας.

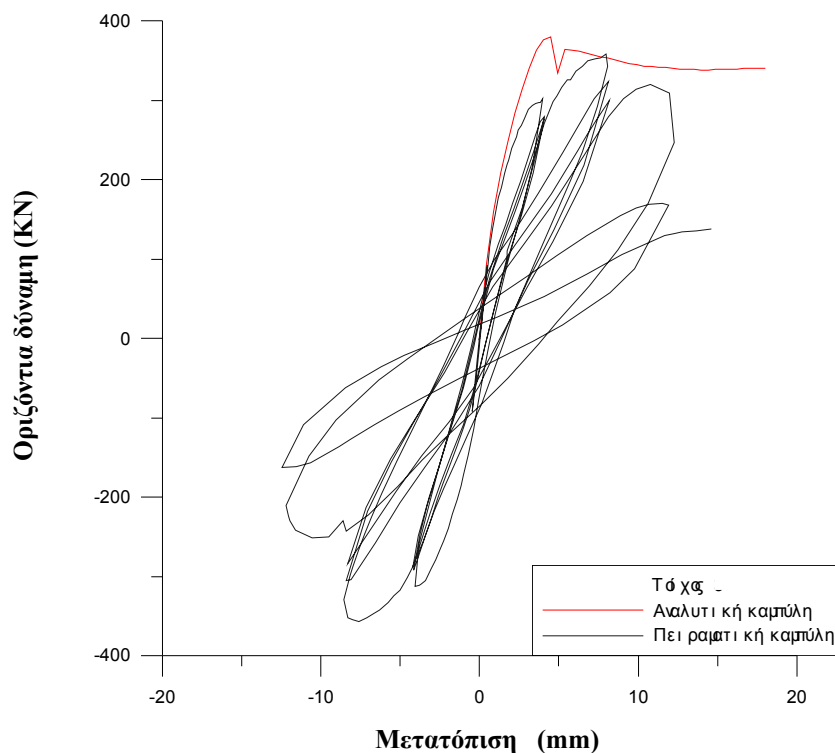
Στον τοίχο γίνονται δύο αναλύσεις, η πρώτη αντιστοιχεί σε μονοτονική επιβολή της μέγιστης μετακίνησης (Σχήμα 6.17α) και η δεύτερη σε επιβολή μετακίνησης ανακυκλιζόμενης μορφής όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.17β .



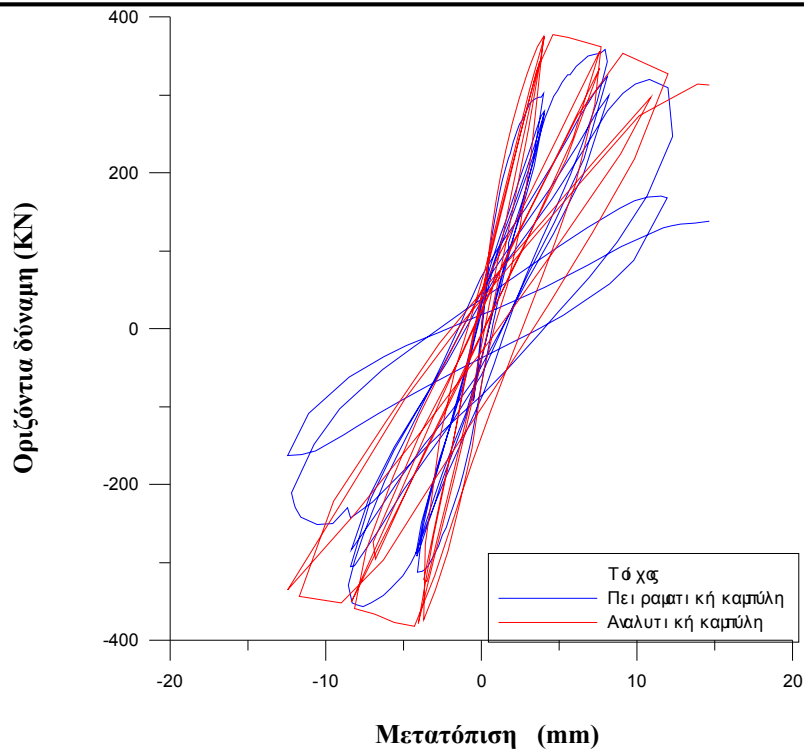
Σχ. 6.17: Επιβαλλόμενη μετατόπιση τοίχου 2 (α) μονοτονική και (β) ανακυκλιζόμενη

Στα Σχήματα 6.18 , 6.19 και 6.20 δίνεται το πειραματικό και αναλυτικό διάγραμμα του τοίχου 2 για μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση αντίστοιχα με εφαρμογή του μονοαξονικού προσομοιώματος συνολικών τροπών ενώ για την ανακυκλιζόμενη φόρτιση η δοκιμή και η σύγκριση γίνεται και με τους δύο τρόπους εισαγωγής του οπλισμού στο μοντέλο. Από το Σχήμα 6.18 προκύπτει ότι το μονοαξονικό προσομοίωμα συνολικών τροπών εκτιμά ικανοποιητικά το μέγιστο φορτίο σε μονοτονική φόρτιση.

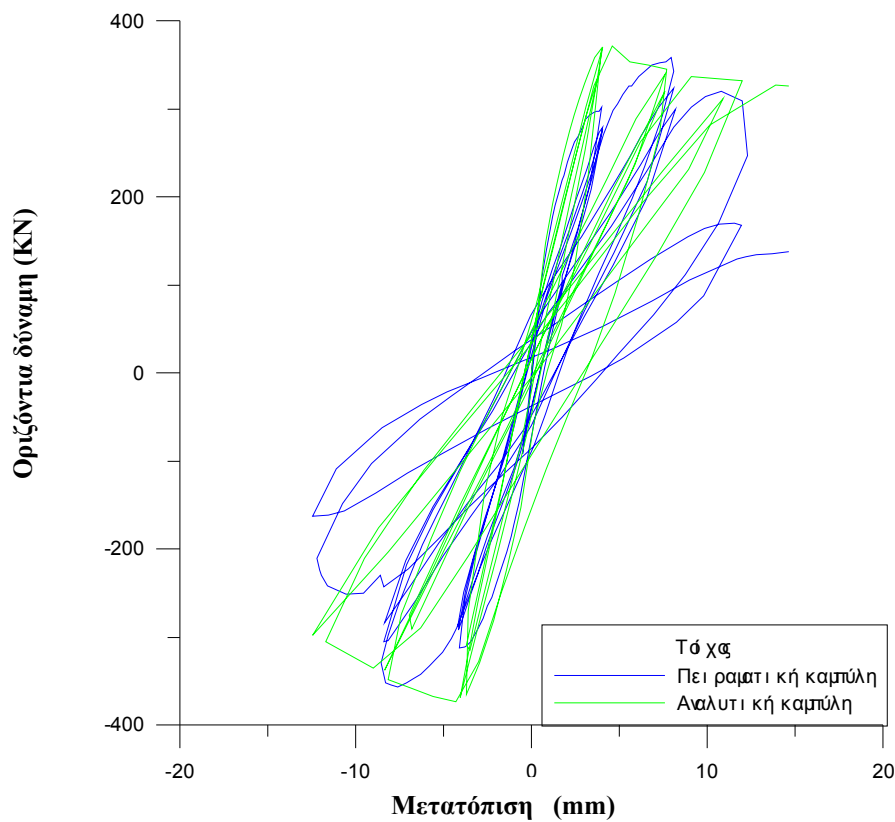
Από το Σχήμα 6.19 προκύπτει ότι για το μονοαξονικό προσομοίωμα συνολικών τροπών και με προσομοίωση των οπλισμών με την εντολή *embedded* η εκτίμηση της συμπεριφοράς του τοίχου σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση είναι αρκετά ικανοποιητική (μορφή βρόχων υστέρησης). Καλή σύγκλιση παρατηρείται σχεδόν σε όλους τους κύκλους φόρτισης μικρής μετακίνησης με εξαίρεση τον τελευταίο ενάμιση βρόγχο όπου το φορτίο που υπολογίζεται είναι κατά τι μεγαλύτερο από αυτό που προκύπτει πειραματικά. Τα ίδια ισχύουν και για τη περίπτωση του σχήματος 6.20 όπου οι οπλισμοί στο μοντέλο τοποθετήθηκαν με την εντολή *rebar* αποδεικνύοντας τα παραπλήσια αποτελέσματα που προκύπτουν στις δύο αυτές περιπτώσεις προσομοίωσης.



Σχ. 6.18: Σύγκριση πειραματικής-αναλυτικής καμπύλης του τοίχου 2 για μονοτονική φόρτιση με εφαρμογή του μονοαξονικού προσομοιώματος συνολικών τροπών



Σχ. 6.19: Σύγκριση πειραματικής-αναλυτικής καμπύλης του τοίχου 2 για ανακυκλιζόμενη φόρτιση με εφαρμογή του μονοαξονικού προσομοιώματος συνολικών τροπών (μοντέλο *embedded*)



Σχ. 6.20: Σύγκριση πειραματικής-αναλυτικής καμπύλης του τοίχου 2 για ανακυκλιζόμενη φόρτιση με εφαρμογή του μονοαξονικού προσομοιώματος συνολικών τροπών (μοντέλο *rebar*)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ-ΧΑΛΥΒΑ

7.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ

Λαμβάνοντας υπόψη τα αναλυτικά αποτελέσματα του Κεφαλαίου 6, στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται βιβλιογραφική διερεύνηση της σχέσης κονιάματος-χάλυβα. Η βιβλιογραφία κυρίως αναφέρεται σε πειραματικά και αναλυτικά αποτελέσματα που αφορούν στην αλληλεπίδραση σκυροδέματος-χάλυβα. Θεωρούμε ότι αντίστοιχες σχέσεις ισχύουν και για την αλληλεπίδραση κονιάματος-χάλυβα λόγω του ότι και τα δύο υλικά είναι ψαθυρά.

Η συμπεριφορά οπλισμένης τοιχοποιίας που υπόκεινται σε μεγάλο εύρους ανακυκλιζόμενες δράσεις εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αλληλεπίδραση του κονιάματος με τον χάλυβα

Η συνεργασία των δυο υλικών μπορεί να εκφραστεί μέσω της σχέσης της τάσης συνάφειας t_b και της ολίσθησης s .

Η τάση συνάφειας που αναπτύσσεται κατά μήκος μιας ράβδου οφείλεται κατά κύριο λόγο στους εξής τρεις παράγοντες: (α) την προσκόλληση των δύο υλικών στη διεπιφάνεια λόγω χημικής αλληλεπίδρασης (β) την τοπική αντίδραση του κονιάματος στις νευρώσεις η οποία δημιουργεί μικρορηγματώσεις και μικροαστοχίες και (γ) την τριβή που αναπτύσσεται λόγω της εγκάρσιας περίσφιγξης καθώς και τη διατμητική αποκόλληση των τμημάτων του κονιάματος ανάμεσα στις νευρώσεις .

Υπό μονοτονικές φορτίσεις δύο τυπικές μορφές αστοχίας είναι: (α) Με απευθείας εξόλκευση της ράβδου, κυρίως σε περιπτώσεις που υπάρχει άφθονη περίσφιγξη. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται πλήρης αποκόλληση των τμημάτων ανάμεσα στις νευρώσεις και σχετική μετακίνησή τους σε σχέση με το υπόλοιπο κονίαμα και (β) με αποκόλληση της επικάλυψης κονιάματος ως αποτέλεσμα των εγκάρσιων εφελκυστικών τάσεων που δημιουργούνται από τις πιέσεις του κονιάματος στις νευρώσεις της ράβδου απουσία περίσφιγξης.

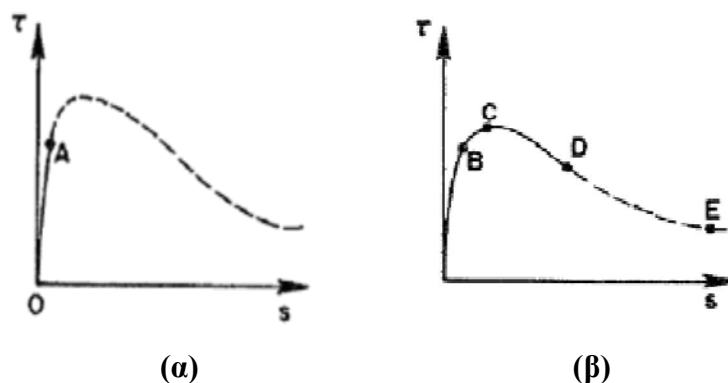
Υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις σε σχετικά μικρές τιμές ολίσθησης, οι μορφές της αστοχίας είναι παρόμοιες με αυτές που περιγράφηκαν για τις μονοτονικές

ενώ για μεγάλες τιμές σχετικής ολίσθησης παρατηρείται γρήγορη μείωση της αντοχής και της στιβαρότητας λόγω φαινομένων κόπωσης.

7.2 ΤΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΩΝ ELIGEHAUSEN ET AL. 1983.

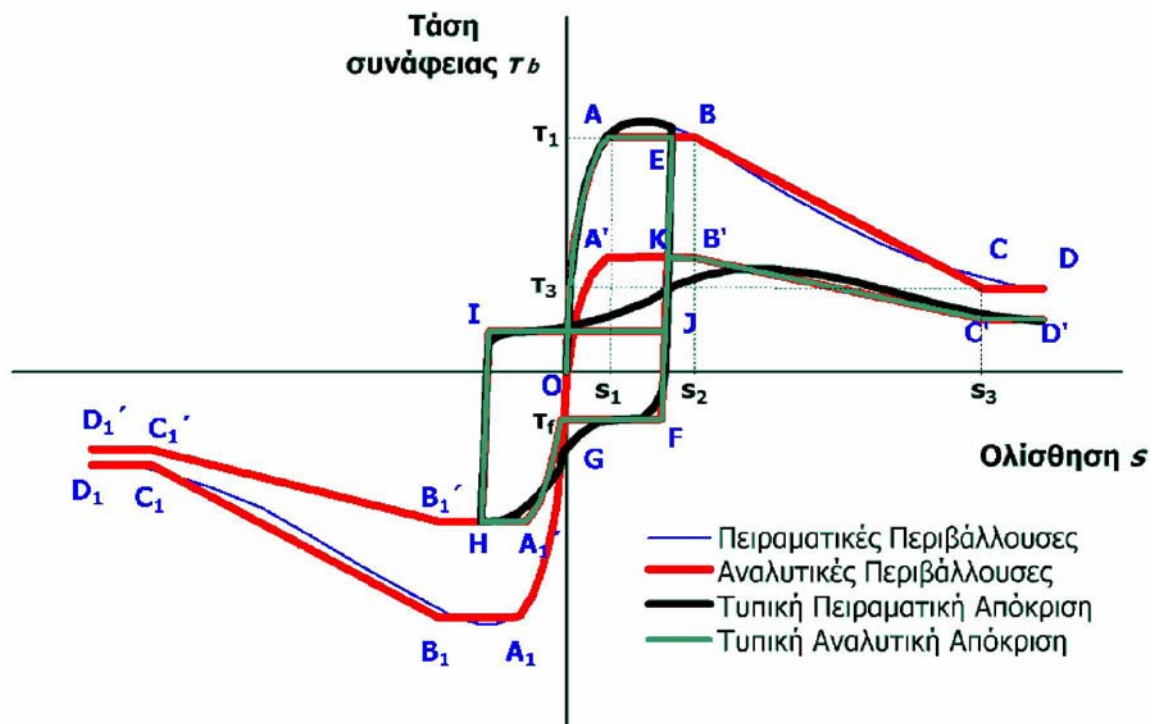
Η σχέση της τοπικής τάσεως συνάφειας συναρτήσει επιβαλλόμενων ανακυκλιζόμενων ολισθήσεων διερευνήθηκε πειραματικά από τους Eligehausen et al. 1983 οι οποίοι διεξήγαγαν εξολκεύσεις ράβδων από δοκίμια σκυροδέματος μικρού σχετικά πάχους (ίσο με πέντε φορές τη διάμετρο της ράβδου) στα οποία θα μπορούσε κανείς να θεωρήσει ότι η τάση συνάφειας σε όλο το μήκος είναι σταθερή. Από τις δοκιμές αυτές προέκυψαν συμπεράσματα για την τοπική συμπεριφορά στη διεπιφάνεια ανάμεσα στο χάλυβα και το σκυρόδεμα καθώς και ένα προσομοίωμα το οποίο μπορεί να την περιγράψει αναλυτικά:

Υπό μονοτονική φόρτιση έχουμε αρχικά μια ελαφρώς μη γραμμική αύξηση της τάσης συνάφειας σε σχέση με την ολίσθηση μέχρι το σημείο A (Σχήμα 7.1α). Για τις μικρές αυτές τιμές ολισθήσεων μικρές διαγώνιες ρωγμές ξεκινούν να αναπτύσσονται στα σημεία των νευρώσεων. Με περαιτέρω αύξηση του φορτίου η ρηγμάτωση γίνεται πιο έντονη μειώνοντας την φέρουσα θλιπτική ικανότητα του σκυροδέματος τοπικά και κατά συνέπεια μειώνοντας τη στιβαρότητα του όλου συστήματος (σημεία B έως C, Σχήμα 7.1β). Πέραν του σημείου C το σκυρόδεμα ανάμεσα στις νευρώσεις αστοχεί διατμητικά με σταδιακή απομείωση της συνολικής φέρουσας ικανότητας έως ότου η συνολική ολίσθηση φτάσει την τιμή της απόστασης μεταξύ των νευρώσεων (σημείο E, Σχήμα 7.1β). Μετά το σημείο E, ο μοναδικός μηχανισμός που δίνει αντίσταση με συνάφεια είναι αυτός της τριβής.



Σχ.7.1: Μηχανισμοί αντίστασης μέσω της συνάφειας σε μονοτονική φόρτιση

Οι Eligehausen, Popov & Bertero 1983 κατόπιν ευρείας πειραματικής διερεύνησης (125 εξολκεύσεις ράβδων εγκιβωτισμένες σε μήκος 5Φ) αναπτύσσουν ένα μοντέλο που μπορεί να καλύψει ένα μεγάλο εύρος περιπτώσεων σχέσης συνάφειας – ολίσθησης για μικρό αριθμό ανακυκλίσεων.



Σχ. 7.2: Μοντέλο συνάφειας Eligehausen et al. 1983.

Στο Σχήμα 7.2 παρουσιάζεται η απόκριση σε μια τυπική δοκιμή εξόλκευσης ράβδου εγκιβωτισμένης σε σκυρόδεμα υπό μία μοναδική ανακύκλιση (καμπύλη χρώματος μαύρου). Ταυτόχρονα δίνονται οι καμπύλες για αντίστοιχες μονοτονικές δοκιμές και προς τις δύο διευθύνσεις (καμπύλη χρώματος μπλε). Με κόκκινο δίνονται οι μονοτονικές περιβάλλουσες όπως αυτές προκύπτουν από το συγκεκριμένο προσομοίωμα και με πράσινο η αντίστοιχη αναλυτική πρόβλεψη της συγκεκριμένης ανακυκλιζόμενης εξόλκευσης.

Η μονοτονική περιβάλλουσα του διαγράμματος OABCD (Σχήμα 7.2) αποτελείται από ένα ανερχόμενο κλάδο OA ακολουθούμενο μια οριζοντιοποίηση AB, ένα φθιτό κλάδο BC και οριζοντιοποίηση μετά το σημείο C. Πέραν του σημείου αυτού ο μοναδικός μηχανισμός που συμβάλει τη συνάφεια είναι αυτός της τριβής, όλοι οι υπόλοιποι (δηλαδή χημική συνοχή και συμβολή νευρώσεων) έχουν σχεδόν

εξαφανιστεί. Η μονοτονική περιβάλλουσα μπορεί να περιγραφεί πλήρως μέσω των μεγεθών s_1, s_2, s_3, τ_1 και τ_3 . Κατά μια ενδεχόμενη αποφόρτιση (κλάδος EF) η δυσκαμψία του συστήματος παίρνει την αρχική της τιμή μέχρις ότου η τάση πάρει την τιμή κάποιας τάσης τριβής (ίση με τ_f) κατά την αντίθετη κατεύθυνση η οποία εξαρτάται από την παράμετρο τ_3 και τις μέγιστες σχετικές ολισθήσεις που έχουν επιβληθεί μέχρι το τρέχον σημείο.

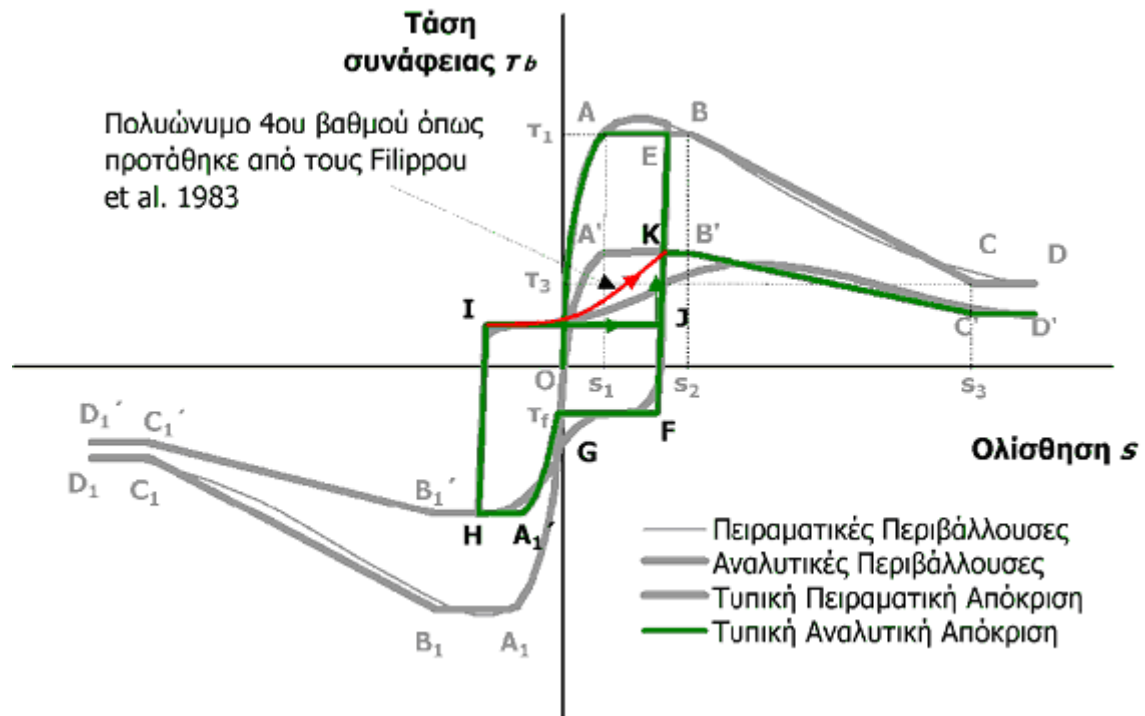
Περαιτέρω μείωση της σχετικής ολίσθησης ακολουθεί τον οριζόντιο κλάδο τριβής FG μέχρις ότου αυτή ξεκινήσει να αλλάζει πρόσημο (κλάδος GA₁) όπου παρατηρείται συμπεριφορά κοντά σε αυτή της μονοτονικής περιβάλλουσας σε απομειωμένη όμως μορφή. Ο κλάδος OA₁'B₁'C₁'D₁' ονομάζεται απομειωμένη περιβάλλουσα. Με νέα αντιστροφή της ολίσθησης στο H, ακολουθείται όπως και πριν ένας ελαστικός κλάδος αποφόρτισης και ένας οριζόντιος κλάδος τριβής τ_f^+ μέχρι να τμηθεί ο κλάδος EF της αρχικής αποφόρτισης στο σημείο J. Από εκεί ξεκινάει επαναφόρτιση (διαδρομή JK) με τη δυσκαμψία της αποφόρτισης μέχρις ότου συναντηθεί ο κλάδος της απομειωμένης περιβάλλουσας (σημείο K) στον οποίο και συνεχίζει (διαδρομή KB'C'D'). Οι απομειωμένες περιβάλλουσες προκύπτουν από τις μονοτονικές με πολλαπλασιασμό των τ_1 και τ_3 με ένα συντελεστή βλάβης d ο οποίος είναι ίσος με το μηδέν ($d=0$) για καθόλου βλάβη και ίσος με τη μονάδα ($d=1$) για πλήρη καταστροφή της συνάφειας ($\tau=0$).

Ο βαθμός απομείωσης της περιβάλλουσας φαίνεται πειραματικά να εξαρτάται από το βαθμό της βλάβης του σκυροδέματος τοπικά γύρω από τις νευρώσεις της ράβδου (και ουσιαστικά δηλαδή από τη μέγιστη ολίσθηση s_{max} ως και προς τις δύο κατευθύνσεις), τη διαφορά μεταξύ των ακραίων τιμών ολίσθησης, καθώς και από τον αριθμό των ανακυκλίσεων.

7.3 ΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΤΩΝ FILIPPOU ET AL. 1983

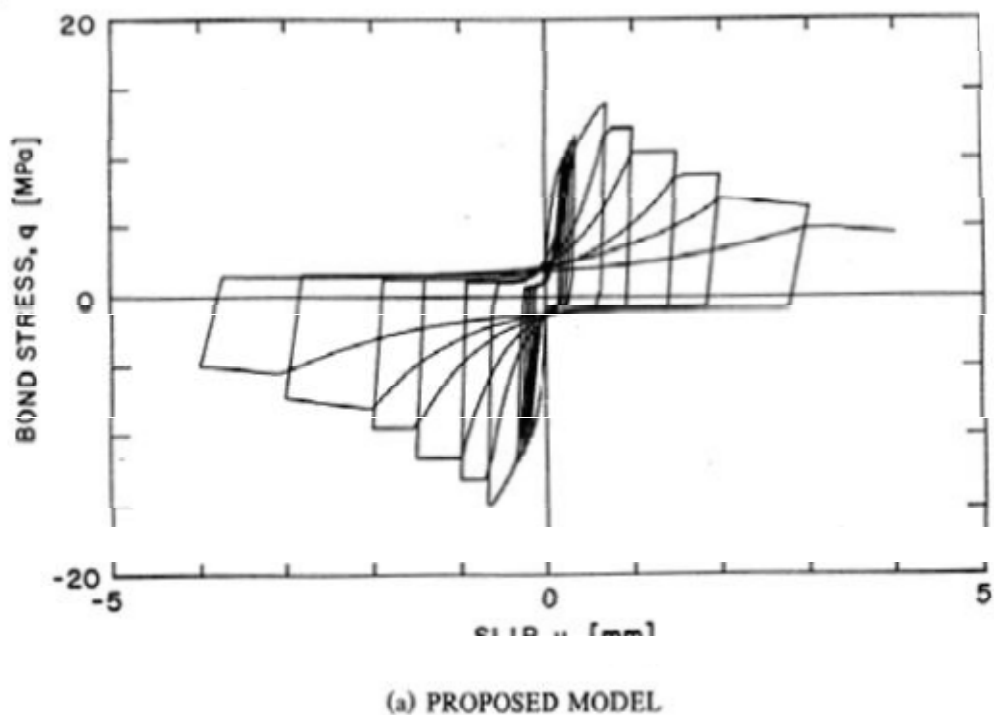
Οι Filippou, Popov & Bertero 1983 παρουσιάζουν κάποιες τροποποιήσεις στο μοντέλο του Eligehausen προκειμένου να προσομοιωθεί καλύτερα η συμπεριφορά κατά την αποφόρτιση – επαναφόρτιση (κλάδος JFGA₁'HIJK, Σχήμα 7.3). Οι βελτιώσεις αφορούν την προσθήκη ενός πολυωνύμου 4ου βαθμού (κλάδος IK, Σχήμα 7.3) αντί για τον οριζόντιο κλάδο έτσι ώστε να προσομοιώνεται μια σταδιακή αύξηση

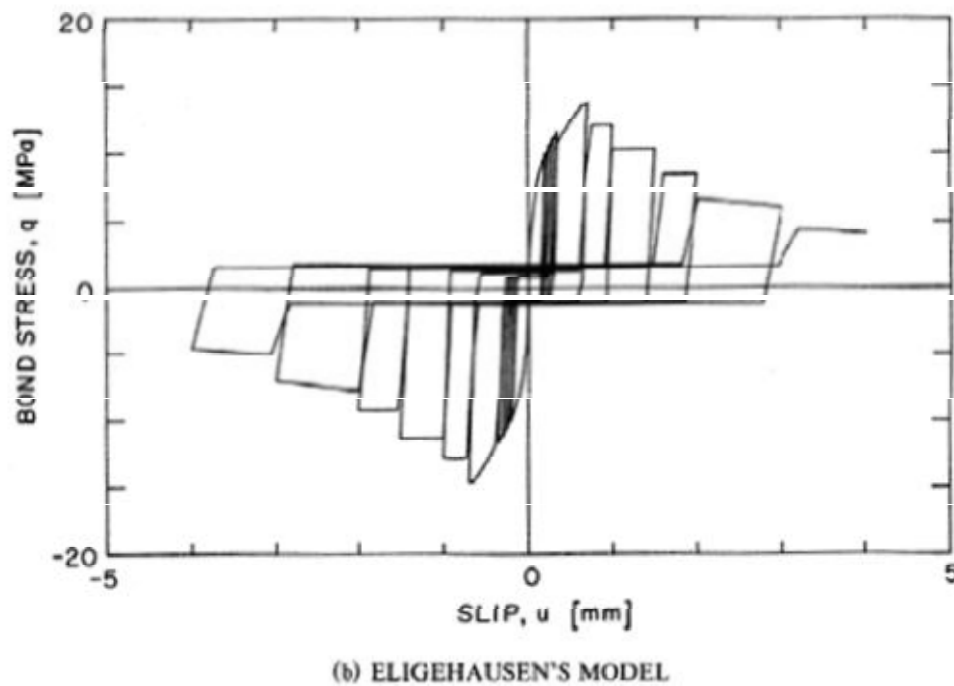
της τάσης συνάφειας αντί της απότομης αύξησης λίγο πριν συναντήσει την νέα περιβάλλουσα (Σχήμα 7.3).



Σχ. 7.3: Βελτίωση των Filippou et al. 1983 σε σχέση με την αποφόρτιση και επαναφόρτιση

Στο Σχήμα 7.4 παρουσιάζονται οι αναλυτικές προβλέψεις από το μοντέλο συνάφειας Eligehausen et al. 1983 και από το μοντέλο Filippou et al. 1983.





Σχ. 7.4: Σύγκριση των αναλυτικών προβλέψεων από Filippou *et al.* 1983 (καμπύλη (a)) και από το αρχικό μοντέλο του Eligehausen *et al.* 1983 (καμπύλη (b))

7.4 ΤΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΗΣ LOWES 1999

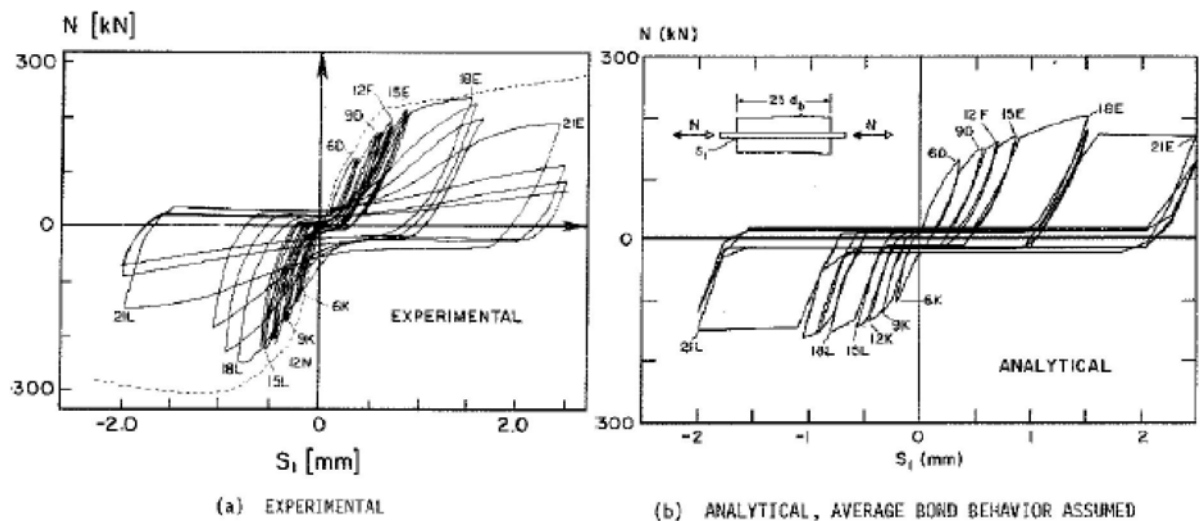
Η Lowes 1999 και οι Lowes *et al.* 2004 παρουσιάζουν ένα μοντέλο συνάφειας – ολίσθησης το οποίο χρησιμοποιεί μία μη τοπική τεχνική προσομοίωσης για τη διεπιφάνεια σκυροδέματος και χάλυβα. Μέσω αυτής της διαδικασίας δεν είναι απαραίτητη η εισαγωγή ξεχωριστών ιδιοτήτων σε συγκεκριμένες ζώνες των οπλισμών ανάλογα με το τι περίσφιγξη ή τι συνθήκες εκτιμάται ότι δημιουργούνται σε κάθε μία, αλλά γίνεται αυτόματος υπολογισμός ανάλογα με την εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση του σκυροδέματος σε κάθε χρονική στιγμή. Χρησιμοποιείται επίσης ένας απλός αλγόριθμος μέτρησης των κύκλων για τον προσδιορισμό της απομείωσης της αντοχής σε συνάφεια. Τέλος δίδεται μια προσέγγιση για τον προσδιορισμό της ακτινικής απόκρισης λόγω της ολίσθησης, κάτι που αγνοείται παντελώς στις προγενέστερες προσεγγίσεις.

Το καταστατικό προσομοίωμα βασίζεται σε μια ομάδα έξι συντελεστών Γ_0 , Γ_1 έως Γ_5 που απομειώνουν την τάση συνάφειας καθώς και την τάση που δημιουργείται ακτινικά ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκρίσεις διαφόρων προσομοιωμάτων με πειραματικά αποτελέσματα για δοκίμια μεγάλου μήκους αγκύρωσης.

7.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ CIAMPI ET AL. 1982

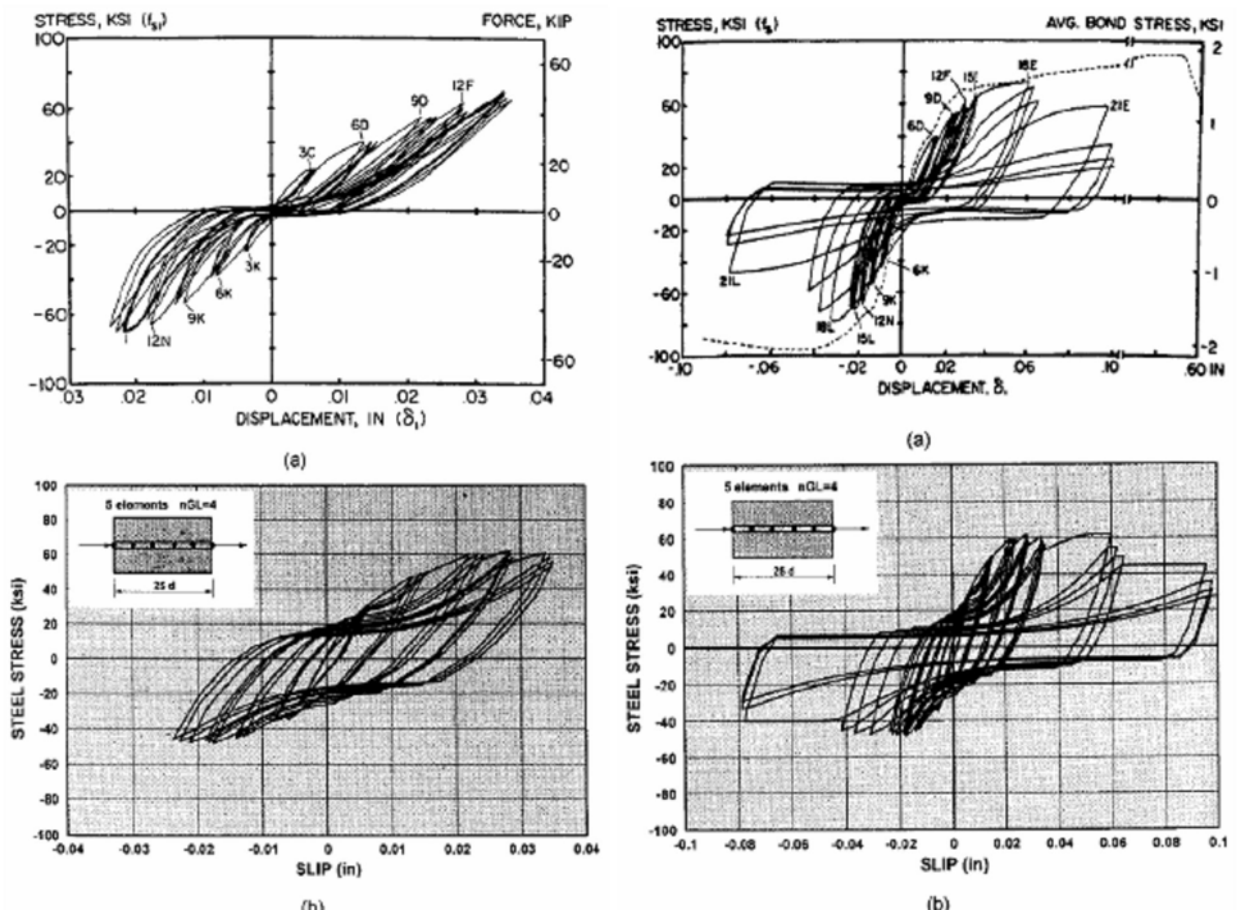
Οι Ciampi et al. 1982 χρησιμοποίησαν μια αριθμητική μέθοδο για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης που εκφράζει τη συμπεριφορά της εγκιβωτισμένης ράβδου. Η ράβδος διακριτοποιήθηκε σε πολλά τμήματα και σε κάθε σημείο ορίστηκαν διαφορετικές ιδιότητες για τη συνάφεια (Σχήμα 7.5)



Σχ. 7.5 : Σύγκριση (a) πειραματικής καμπύλης δύναμης – ολίσθησης με (b) αναλυτική πρόβλεψη όπως προέκυψε από τις αναλύσεις των Ciampi et al. 1982.

7.6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΟΝΤΙ ET AL. 1997

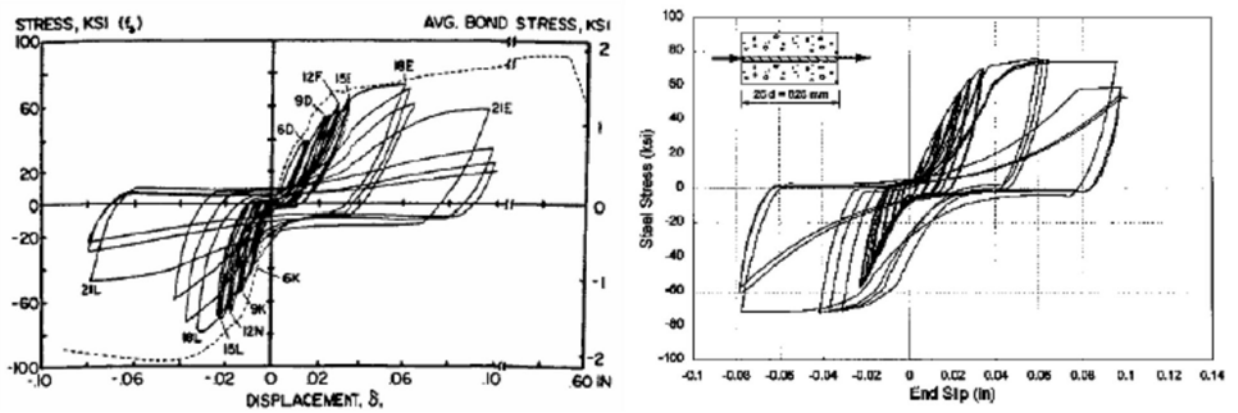
Οι Monti et al. 1997 διεξήγαγαν αναλύσεις κάποιων από τις πειραματικές αυτές δοκιμές, με ένα στοιχείο ράβδου στο οποίο οι συναρτήσεις σχήματος εκφράζουν το πεδίο των τάσεων και όχι των μετατοπίσεων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει πολύ αραιό δίκτυο στοιχείων, και για το λόγο αυτό σύμφωνα με τους συγγραφείς δεν απαιτείται λεπτομερής εισαγωγή των ιδιοτήτων της συνάφειας σε όλο το μήκος του. Βάσει αυτού χρησιμοποιούν τις ίδιες ιδιότητες σε όλο το μήκος της ράβδου. (Σχήμα 7.6)



Σχ. 7.6: Σύγκριση πειραματικών καμπύλων τάσεως – μετατόπισης με τις προβλεπόμενες από τους Montiet al. 1997.

7.7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΩΝ ΑΥΟΥΒ & ΦΙΛΙΠΠΟΥ 1999

Στην εργασία των Ayoub & Filippou 1999 παρουσιάστηκε ένα νέο στοιχείο ράβδου, στο οποίο εκφράζονται ταυτόχρονα με συναρτήσεις σχήματος τόσο η ολίσθηση όσο και η τάση. Και σε αυτή την εργασία χρησιμοποιείται μια σχετικά απλή κατανομή των ιδιοτήτων στη σχέση τάσεων συνάφειας – ολίσθησης (Σχήμα 7.7)



Σχ. 7.7 : Σύγκριση πειραματικών καμπύλων τάσεως – μετατόπισης με τις προβλεπόμενες από τους Ayoub & Filippou 1991

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

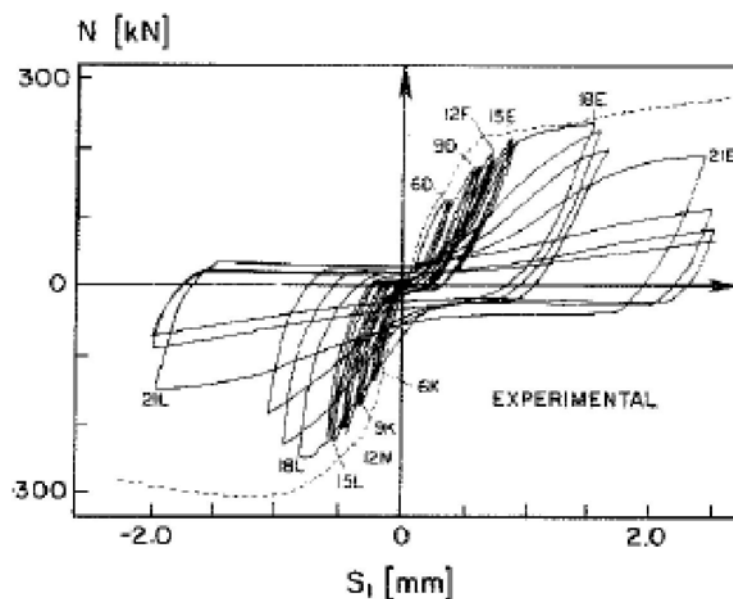
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρούσα εργασία εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται κατά τη βαθμονόμηση των προσομοιωμάτων της τοιχοποιίας. Το προσομοίωμα χρειάζεται διάφορα πειράματα για τη βαθμονόμηση του όπως αυτά παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3 ενώ για όσα δεν γίνεται κάποια πειραματική δοκιμή όπως για την ενέργεια θραύσης πρέπει να συμβουλευόμαστε την βιβλιογραφία για να τις ορίσουμε. Σε κάθε περίπτωση όμως καλό είναι για τις συγκεκριμένες τιμές να γίνονται δοκιμές ώστε να προσδιορίζεται η ακριβής επιρροή του εύρους των τιμών στην αναλυτική συμπεριφορά της τοιχοποιίας.
- Το μονοαξονικό προσομοίωμα συνολικών τροπών μπορεί να προβλέψει ικανοποιητικά τη μονοτονική συμπεριφορά των εξεταζόμενων τοίχων από οπλισμένη τοιχοποιία. Απόκλιση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων παρατηρείται στις μεγάλες μετακινήσεις όπου λαμβάνουν χώρα φαινόμενα τα οποία δεν λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση (π.χ. ανασήκωμα τοίχων και μεταβολή των συνοριακών συνθηκών). Το φαινόμενο είναι πιο έντονο στην περίπτωση του τελευταίου κύκλου φόρτισης όπου παρατηρείται απόκλιση οσον αφορά τη μέγιστη οριζόντια δύναμη.
- Τα αποτελέσματα της ανακυκλιζόμενης φόρτισης από το μονοαξονικό προσομοίωμα είναι ικανοποιητικά με εξαίρεση τους δύο τελευταίους κύκλους φόρτισης στον τοίχο 2 και τον τελευταίο κύκλο φόρτισης στον τοίχο 1. Πολύ καλή σύγκλιση παρατηρείται κυρίως για τους πρώτους κύκλους φόρτισης μικρής μετακίνησης.

Για βελτίωση του προσομοιώματος προτείνονται τα εξής :

- Εισαγωγή του καταστατικού νόμου εξόλκευσης των οριζόντιων οπλισμών οι οποίοι δεν είναι επαρκώς αγκυρωμένοι. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν την εξόλκευση ράβδων οπλισμών σκυροδέματος όπως φαίνεται στο σχήμα 8.2. Αντίστοιχα πειράματα πρέπει να γίνουν και στην περίπτωση της τοιχοποιίας ώστε να διερευνηθεί η επίδραση α) του πάχους του αρμού, β) της διαμέτρου της ράβδου και γ) του κατακόρυφου θλιπτικού φορτίου.



Σχ. 8.2: Πειραματική καμπύλη δύναμης-ολίσθησης

- Πρέπει να ληφθεί επίσης υπόψη για τους συγκεκριμένους τοίχους το γεγονός ότι γίνεται μάστιξη των κατακόρυφων οπλισμών μέσα στην τοιχοποιία γεγονός που επηρεάζει τη συμπεριφορά ολόκληρου του τοίχου και τη διαφοροποιεί έναντι εφελκυσμού και θλίψης. Στους τοίχους που έχουν προσομοιωθεί ο οπλισμός θεωρήθηκε ενιαίος και συνεχής σε όλο το ύψος του τοίχου πακτωμένος στο κάτω άκρο και αγκυρωμένος μέσα στη δοκό που βρίσκεται στο πάνω μέρος του τοίχου.

Προοπτικές επέκτασης του προσομοιώματος :

- Με βάση τα αποτελέσματα που έδωσε το συγκεκριμένο προσομοίωμα όσον αφορά την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της οπλισμένης τοιχοποιίας έναντι μονοτονικής και ανακυκλικής φόρτισης και της ταυτίσής τους με τα πειραματικά (κυρίως στις μικρές παραμορφώσεις) θα μπορούσε η έρευνα να επεκταθεί και στην χρήση του συγκεκριμένου προσομοιώματος για τον υπολογισμό της συμπεριφοράς τοιχοποιίας στην οποία περιλαμβάνονται ξυλοδεσίες (λαμβάνοντας υπόψη τις όποιες ιδιαιτερότητες). Αυτό θα είχε και πρακτικό ενδιαφέρον λόγω του γεγονότος ότι πληθώρα υφισταμένων κατασκευών είναι κτισμένα με αυτή ακριβώς τη μέθοδο άρα θα αποτελούσε ένα χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση της συμπεριφοράς αλλά και της αντοχής τέτοιων κατασκευών σε περίπτωση όπου απαιτείται επέμβαση για συντήρηση ή ενίσχυση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αράβας Ν., *Εγχειρίδιο χρήσης του Λογισμικού ABAQUS*, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Κέντρο Δικτύου Τηλεματικής, Βόλος, 2001
- Θεωρητικό εγχειρίδιο λογισμικού, *Abaqus Theory Manual, Abaqus Analysis User's Manual, Abaqus/ Cae User's Manual, Version 6.4.1* ©Abaqus, INC 2003, Printed in USA
- Καραντώνη Φυλλίτσα Β., *Κατασκευές από τοιχοποιία*, Εκδότης Παπασωτηρίου, Έτος έκδοσης 2004
- Λυκίδης Γεώργιος, *Στατική και δυναμική ανάλυση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα με χρήση τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων διανεμημένης ρηγμάτωσης*, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών, Αθήνα, Ιούνιος 2007.
- Ψύλλα Νικολέττα, *Συμπεριφορά οπλισμένης τοιχοποιίας υπό μονοτονικές και ανακυκλιζόμενες δράσεις εντός του επιπέδου της*, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα, Νοέμβριος 2000.
- Psilla Nikoletta and Theodosios P. Tassios, *Designed Models of Reinforced Masonry walls under monotonic and cyclic loads*, Engineering Structures, Volume 31, Issue 4, April 2009, Pages 935-945
- Καράπιττα Λ., Μουζάκης Χ., Καρύδης Π., *Καταστατικά προσομοιώματα για την ανάλυση άοπλης τοιχοποιίας σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση*, Άρθρο 2041, 3^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Νοέμβριος 2008

-
- Eligehausen, R., Popov, E. P. and Bertero, V. V., 1983, Local bond stress - slip relationships of deformed bars under generalized excitations, Rep. UCB/EERC 83-23, Earthquake Engng. Res. Ctr., University of California, Berkeley.
 - Filippou, F. C., Popov, E. P., Bertero, V. V., 1983, Effects of bond deterioration on hysteretic behaviour of reinforced concrete joints, *Rep. UCB/EERC 83-19*, Earthquake Engng. Res. Ctr., University of California, Berkeley.
 - Ciampi, V., Eligehausen, R., Bertero, V. & Popov, E. P., 1982, Analytical model for concrete anchorages of reinforcing bars under generalized excitations, Rep. UCB/EERC 82-23, Earthquake Engng. Res. Ctr., University of California, Berkeley.
 - Lowes, L. N., 1999, *Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beam – Column Bridge Connections*, PhD Thesis, University of California, Berkeley.
 - Monti, G., Filippou, F. C. and Spacone, E., 1997, Finite element for anchored bars under cyclic load reversals, *J. Struct. Engng*, ASCE, vol. 123(5), p. 614-623.
 - Ayoub, A., Filippou, C., 1999, Mixed Formulation of bond-slip problems under cyclic loads *J. Struct. Engng*, vol 125 (6), pp. 661-671 ASCE 1999.
 - H. Noguchi, *Toward a high-quality FEM analysis of RC members subjected to reversed cyclic shear*, Computational Modelling of Concrete Structures, Chiba University, Chiba City, Japan