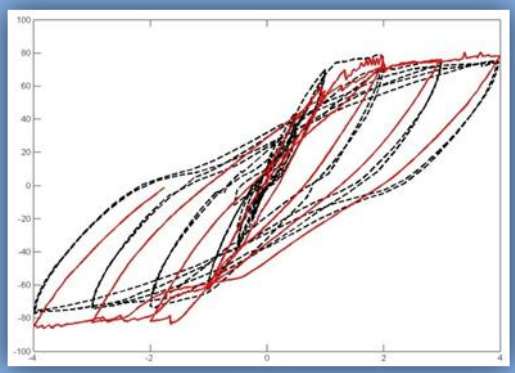
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

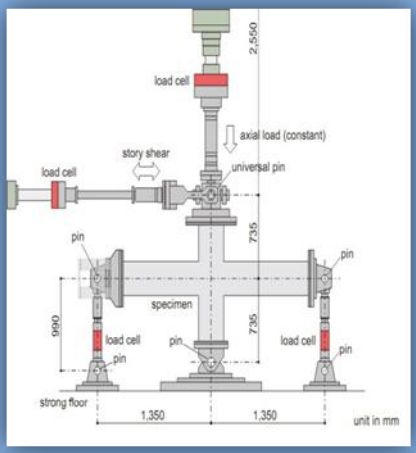
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

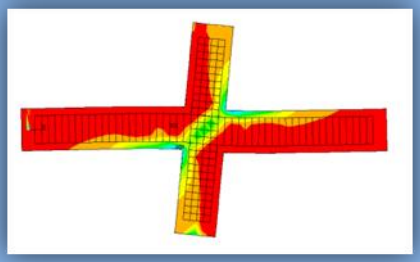
Αναλυτική αποτίμηση της ανελαστικής συμπεριφοράς κόμβων οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη ένταση

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΛΑΛΑΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Χρήστος Ζέρης







Αθήνα, Ιούλιος 2011

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Αναλυτική αποτίμηση της ανελαστικής συμπεριφοράς κόμβων οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη ένταση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΛΑΛΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Χ. Ζέρης
Επίκ. Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19η Ιουλίου 2011.

.....	.....	.....
Χρήστος Α. Ζέρης Επίκ. Καθηγητής, ΕΜΠ	Μιχαήλ Δ. Κωτσοβός Καθηγητής, ΕΜΠ	Κωνσταντίνος Β. Σπηλιόπουλος Ανάπλ. Καθηγητής, ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2011

Copyright © Αλέξανδρος Λάλας, 2011.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η διατήρηση της ακεραιότητας των κόμβων δοκού - υποστυλώματος μιας πλαισιωτής κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα, που υφίσταται ανακυκλιζόμενες σεισμικές δράσεις μεγάλου εύρους, έχει αποδειχθεί να είναι κρίσιμη για την ασφάλεια συνολικά του δομητικού συστήματος. Στην ανάλυση οι κόμβοι προσομοιώνονται ως άκαμπτες συνδέσεις ενώ αναμένουμε να παραμείνουν ελαστικοί κατά τη σεισμική απόκριση. Αντίθετα όμως, παρατηρείται πως οι κόμβοι υφίσταται μεγάλες ανελαστικές παραμορφώσεις με ταυτόχρονη πτώση της αντοχής και της δυσκαμψίας τους. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της συμπεριφοράς του σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη διατμητική δράση και της απώλειας της συνάφειας χάλυβα - σκυροδέματος με επακόλουθη ολίσθηση των οπλισμών της δοκού που περνούν μέσα απ' τον κόμβο.

Ο κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αναλυτική διερεύνηση της ανελαστικής συμπεριφοράς δύο κόμβων δοκού - υποστυλώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα, υπό ανακυκλιζόμενη ένταση. Η ανάλυση πραγματοποιείται στο περιβάλλον του γενικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Για την τεκμηρίωση της αναλυτικής προσέγγισης, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την τρισδιάστατη μη - γραμμική προσομοίωση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με το πρόγραμμα ANSYS, περιγράφεται εκτενώς. Ελέγχεται επιπλέον η αξιοπιστία της, μέσω παραμετρικών αναλύσεων δύο απλών αμφιέριστων δοκών, των οποίων τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν γενικά να είναι σε καλή συμφωνία με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Για την αναλυτική διερεύνηση της συμπεριφοράς των κόμβων, εξετάζονται δύο δοκίμια, ένα για εξωτερικό και ένα για εσωτερικό κόμβο και γίνεται σύγκριση των αναλυτικών προβλέψεων με τα πειραματικά αποτελέσματα. Περεταίρω, διερευνάται η επιρροή της ανελαστικής συμπεριρφοράς του κάθε κόμβου σε μια σειρά παραμέτρους της απόκρισης όπως η δυσκαμψία και η απορρόφηση υστερητικής ενέργειας, μέσω αναλύσεων όπου το σώμα του κόμβου προσομοιώθηκε με ελαστικά υλικά. Η επίδραση στη συμπεριφορά, παραγόντων όπως ο αριθμός οριζόντιων συνδετήρων στον κόμβο και η ύπαρξη εγκάρσιας θλίψης στο σκυρόδεμα επίσης εξετάστηκε.

Τέλος, συζητούνται τα συμπεράσματα τόσο ως προς τη διαδικασία και τις δυνατότητες της προτεινόμενης προσομοίωσης όσο και ως προς τη συμπεριφορά των κόμβων που παρατηρήθηκε μέσω των αναλύσεων και των πειραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

Λέξεις Κλειδιά

Οπλισμένο σκυρόδεμα, δοκός, υποστύλωμα, κόμβος, συνάφεια, ολίσθηση, ανακυκλιζόμενη φόρτιση, σεισμός, ανελαστική απόκριση, υστερητική ενέργεια, σχετική μετάθεση ορόφου, τέμνουσα, ρηγμάτωση, δυσκαμψία, πεπερασμένα στοιχεία, μη-γραμμική ανάλυση, ANSYS

Abstract

The integrity of beam - column joints of a moment resisting frame which is designed to undergo large cyclic seismic loads, is proved to be crucial for the integrity of the whole structure. In the analysis, joints are assumed to be perfectly rigid connections, while in the seismic response we expect them to remain within the elastic region. On the contrary however, joints usually sustain large inelastic deformations with strength and stiffness degradation at the same time. That is mainly due to concrete behavior under cyclic shear and of bond - slip failure of beam longitudinal reinforcement passing through the joint core.

The primary objective of this thesis, was the analytical investigation of the inelastic response of two reinforced concrete beam - column joints under cyclic excitations. The analysis is performed within the environment of the ANSYS general purpose finite element software. To substantiate the analytical approach, the methodology followed for the three - dimensional, nonlinear simulation of reinforced concrete structural members using ANSYS, is duly described. In addition, its reliability is examined by initially presenting a parametric analysis of two simpler test specimens, namely two simply supported beams, for which the numerical results were found to be in good agreement with the experimental data.

For the analytical investigation of the joint performance, two sub-assemblages are examined, one for exterior and one for interior joint for which experimental test results have been obtained. The two joints are analyzed and a comparison is presented between numerical predictions and their experimental counterparts. Furthermore, the effect of inelastic response, bond and cracking suffered by the joint, to the numerous response characteristics like the stiffness and the hysteretic energy dissipation, are investigated during the analysis, where the joint core is simulated using both elastic and inelastic materials. The influence, over the behavior, of factors such as the number of closed hoops in the joint core and the existence of lateral compression, is also being examined.

Finally, conclusions are given regarding the problems and capabilities of the adopted analytical approach and also over the observed, analytical behavior of the joints.

Key Words

Reinforced Concrete, beam, column, joint, bond-slip, cyclic excitation, inelastic response, earthquake, hysteretic energy, storey drift, shear, cracking, stiffness, finite elements, nonlinear analysis, ANSYS

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή κ. Χρήστο Ζέρη, για την αμέριστη βοήθεια και υποστήριξη του καθώς και τη συνεχή θεωρητική και πρακτική του καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης, νιώθω την ανάγκη να αναφέρω πως στάθηκε για εμένα, ο σημαντικότερος ίσως, Δάσκαλος, από όσους γνώρισα αυτά τα χρόνια στο ΕΜΠ και η εκπαιδευτική του προσφορά, πέραν των στενών ορίων αυτής της εργασίας, υπήρξε ανεκτίμητη.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να αποδώσω και στο Δρ. Δημήτριο Κωτσοβό για την ανιδιοτελή συνεισφορά και βοήθεια του σε όλα τα στάδια αυτής της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Νάντια Τζιβελοπούλου για την υπομονή της και τη συνεχή στήριξη που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα καθώς και για την επιμέλεια του εξωφύλλου της εργασίας.

Αλέξανδρος Λάλας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ **5**

ABSTRACT **6**

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ **12**

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ **21**

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ **22**

1.1. ΓΕΝΙΚΑ 22

1.2. ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ 23

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ **25**

2.1. ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ ΔΟΚΟΥ - ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΦΕΡΟΝΤΑ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟ 25

2.2. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ 28

2.2.1. Ταξινόμηση των κόμβων 29

2.2.1.1. Με βάση τη γεωμετρία 29
2.2.1.2. Με βάση την αναμενόμενη σεισμική απόκριση 29

2.2.2. Εντατικά μεγέθη στους κόμβους 30

2.2.3. Διατμητική ένταση κόμβου 32

2.2.4. Ο τρόπος παραλαβής της τέμνουσας 34

2.2.4.1. Ο μηχανισμός παραλαβής μέσω διαγώνιου θλιπτήρα σκυροδέματος.... 35
2.2.4.2. Ο μηχανισμός του δικτυώματος οπλισμών - σκυροδέματος 39

2.2.5. Επιρροή της αγκύρωσης στη μηχανική συμπεριφορά του κόμβου 40

2.2.6. Εναλλακτικό μοντέλο διατμητικής αστοχίας κόμβων (Shiohara, 2001, 2003).. 44

2.2.6.1. Ορισμός της διατμητικής δύναμης στον κόμβο 44
2.2.6.2. Διατμητική τάση στον κόμβο 45
2.2.6.3. Περιορισμός του μοχλοβραχίονα των εσωτερικών δυνάμεων 46
2.2.6.4. Αλλαγή της εντατικής κατάστασης στο θλιβόμενο οπλισμό 47
2.2.6.5. Παράγοντες που συνεισφέρουν στη διατμητική παραμόρφωση του κόμβου 49
2.2.6.6. Περιγραφή του νέου μοντέλου 49

2.3. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΟΜΒΩΝ ΔΟΚΟΥ - ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ 53

2.3.1. Γενικά 53

2.3.1.1. Στοιχεία της ανελαστικής απόκρισης των κόμβων 53
2.3.1.2. Επίπεδα βλάβης κόμβων 55
2.3.1.3. Παράμετροι για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των κόμβων 61
2.3.1.4. Ειδικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των κόμβων 62

2.3.2. Πειραματικές δοκιμές κόμβων οπλισμένου σκυροδέματος 65
2.3.3. Αναλυτικές προσομοιώσεις κόμβων 73
2.3.3.1. Προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων 74
2.3.3.2. Ανάπτυξη προσομοιωμάτων μακρό-στοιχείων 79
2.4. ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΟΜΒΩΝ ΔΟΚΟΥ - ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ 87
2.4.1. Γενικά 87
2.4.2. Κανονιστικό πλαίσιο 88
2.4.2.1. Ευρωκώδικας 8 - Μέρος 1 88
2.4.2.2. Κανονισμός ACI (318M-08) 91
3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΟΡΕΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ANSYS 95
3.1. ΓΕΝΙΚΑ 95
3.2. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ 97
3.2.1. Γενικά 97
3.2.1.1. Συμπεριφορά προρηγματωμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη θλίψη 99
3.2.1.2. Το σκυρόδεμα υπό ανακυκλιζόμενες δράσεις 99
3.2.2. Καταστατική προσομοίωση του σκυροδέματος 100
3.2.2.1. Περιγραφή της αστοχίας του σκυροδέματος 101
3.2.2.2. Περιγραφή του τρόπου σχηματισμού και μεταφοράς φορτίου μέσω των ρωγμών 104
3.2.2.3. Διαδικασία μη-γραμμικής επίλυσης 104
3.3. ΧΑΛΥΒΑΣ 106
3.3.1. Γενικά 106
3.3.1.1. Ο χάλυβας υπό ανακυκλιζόμενες δράσεις 107
3.3.2. Καταστατική προσομοίωση του Χάλυβα 108
3.4. ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ 109
3.4.1. Γενικά 109
3.4.2. Καταστατική προσομοίωση της συνάφειας χάλυβα - σκυροδέματος 113
3.4.2.1. Προσομοίωση της ολίσθησης του οπλισμού κατά την ανακύκλιση 115
3.5. ΠΛΑΚΕΣ ΕΠΙΒΟΛΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 115
4. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ANSYS ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ 117
4.1. ΓΕΝΙΚΑ 117
4.2. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1 - ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΛΑΣΤΙΜΗΣ ΔΟΚΟΥ 119

4.2.1. Περιγραφή στοιχείου και προσομοίωσης 119
4.2.2. Αποτελέσματα 120
4.3. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2 - ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΨΑΘΥΡΗΣ ΔΟΚΟΥ 122
4.3.1. Περιγραφή στοιχείου και προσομοίωσης 122
4.3.2. Αποτελέσματα 124
4.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 127
5. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΟΜΒΩΝ 128
5.1. ΓΕΝΙΚΑ 128
5.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ 129
5.2.1. Γεωμετρία δοκιμίων, φόρτιση και οπλισμοί 129
5.2.2. Μηχανικές ιδιότητες των υλικών 131
5.2.3. Αντοχές των στοιχείων 132
5.2.4. Πειραματική διάταξη και ιστορία της φόρτισης 133
5.3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ 134
5.3.1. Διακριτοποίηση των δοκιμίων 134
5.3.2. Γεωμετρία και διατομές στοιχείων προσομοιώματος 135
5.3.3. Ιδιότητες υλικών και παράμετροι για την ανάλυση 136
5.3.3.1. Σκυρόδεμα 136
5.3.3.2. Χάλυβας 138
5.3.3.3. Συνάφεια χάλυβα - σκυροδέματος 139
5.3.4. Επιβολή της φόρτισης 140
5.3.5. Μη-γραμμική επίλυση 141
6. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ 142
6.1. ΔΟΚΙΜΙΟ Α2 - ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΣ ΚΟΜΒΟΣ 142
6.1.1. Κυρίως ανάλυση 142
6.1.1.1. Σύγκριση αναλυτικών - πειραματικών αποτελεσμάτων 142
6.1.1.2. Διατμητική δύναμη και διατμητική παραμόρφωση κόμβου 149
6.1.1.3. Κύριες τάσεις του σκυροδέματος στο σώμα του κόμβου 151
6.1.1.4. Τάσεις στους εγκάρσιους και διαμήκεις οπλισμούς 154
6.1.1.5. Τάσεις συνάφειας οπλισμών δοκού εντός του κόμβου 158
6.1.2. Ανάλυση με ελαστικό σκυρόδεμα στο πάνελ του κόμβου 160
6.1.3. Ανάλυση με πλήρη αγκύρωση των οπλισμών της δοκού στο σώμα του κόμβου 167
6.1.4. Ανάλυση του ανελαστικού κόμβου με θεώρηση μικρότερου αριθμού συνδετήρων στον κόμβο 168

6.1.5. Ανάλυση με επιβολή εγκάρσιας θλίψης στον κόμβο 173
6.1.6. Ανάλυση για σταθερούς κύκλους φόρτισης μεγάλου εύρους 177
6.2. ΔΟΚΙΜΙΟ Α1 - ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΚΟΜΒΟΣ 179
6.2.1. Κυρίως ανάλυση 179
6.2.1.1. Σύγκριση αναλυτικών - πειραματικών αποτελεσμάτων 180
6.2.1.2. Διατμητική δύναμη κόμβου 186
6.2.1.3. Σχολιασμός των διαπιστώσεων του Shiohara (2001, 2003) 187
6.2.1.4. Κύριες τάσεις σκυροδέματος στο σώμα του κόμβου 189
6.2.1.5. Τάσεις εγκάρσιων και διαμήκων οπλισμών 192
6.2.1.6. Τάσεις συνάφειας οπλισμών δοκού εντός του κόμβου 197
6.2.2. Ανάλυση με ελαστικό σκυρόδεμα στο πάνελ του κόμβου 199
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ 204
7.1. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ANSYS.. 204
7.2. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ 206
7.3. ΣΧΟΛΙΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΩΝ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ 208
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 211
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α 217
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β 222

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1. Αστοχίες εσωτερικών και ακραίων κόμβων (πηγή: Moehle, 2006 και EERI, 2008) 26
Σχήμα 2.2. Αστοχία γωνιακού κόμβου πλαισίου στο σεισμό της Αθήνας, 1999 (πηγή: ΕΜΠ) 26
Σχήμα 2.3. (a) Τυπικό πλαίσιο σε σεισμό. (b) Ροπές λόγω κατακορύφων, (c) ροπές λόγω σεισμού, (d) συνδυασμός των παραπάνω 27
Σχήμα 2.4. Γεωμετρία των κόμβων σύμφωνα με τον ACI 352 29
Σχήμα 2.5. Εξωτερικά φορτία κόμβου σε πλαίσιο υπό σεισμική διέγερση 30
Σχήμα 2.6. Εξωτερικές δράσεις και εσωτερικές εντάσεις (α) σε εσωτερικό και (β) εξωτερικό κόμβο 31
Σχήμα 2.7. Οριζόντια και κατακόρυφη τέμνουσα που αναπτύσσεται σε εσωτερικό κόμβο . 33
Σχήμα 2.8. Οριζόντια και κατακόρυφη τέμνουσα που αναπτύσσεται σε εξωτερικό κόμβο.. 33
Σχήμα 2.9. διαγώνιου θλιπτήρα και κατανομή τάσεων συνάφειας στον κόμβο 36
Σχήμα 2.10. Μηχανισμός διαγώνιου θλιπτήρα σε εξωτερικό κόμβο 37
Σχήμα 2.11. Σχηματισμός μηχανισμού δικτυώματος για τη μεταφορά της τέμνουσας 40
Σχήμα 2.12. Παραμένον άνοιγμα ρωγμών και καταστροφή της συνάφειας σε εσωτερικό κόμβο υπό ανακυκλιζόμενη ροπή 41
Σχήμα 2.13. Τάσεις συνάφειας (α) σε απλή αγκύρωση, (β) σε ράβδο εντός του κόμβου 42
Σχήμα 2.14. Κατανομή τάσεων συνάφειας άνω ράβδων δοκού σε κόμβο 44
Σχήμα 2.15. Σχέση διατμητικής τάσεως κόμβου - σχετικής μετάθεσης ορόφου στα σημεία μέγιστου φορτίου, υπολογίζονται με χρήση της σχέσης (2.1) όπως προέκυψε για τα διάφορα δοκίμια που εξετάστηκαν (Shiohara, 2001) 46
Σχήμα 2.16. Μείωση του μοχλοβραχίονα j_b στην κρίσιμη περιοχή της δοκού συναρτήσει της σχετικής μετάθεσης ορόφου 47
Σχήμα 2.17. Σταδιακή απομείωση της θλιπτικής δύναμης των ράβδων λόγω απώλειας συνάφειας (Shiohara, 2003) 48
Σχήμα 2.18. Επιρροή της απώλειας της αγκύρωσης στο μηχανισμό παραλαβής φορτίου μέσα στον κόμβο 48
Σχήμα 2.19. Μοντέλο συμπεριφοράς για τη διατμητική αστοχία του κόμβου και ροή των εσωτερικών δυνάμεων (Shiohara, 2003) 49
Σχήμα 2.20. Σύγκριση μηχανισμών (a) εναλλακτικού και (b) υπάρχοντος μοντέλου παραλαβής φορτίου κόμβου 50
Σχήμα 2.21. Καθολική συμπεριφορά του κόμβου δοκού - υποστυλώματος 50
Σχήμα 2.22. Ανεξάρτητες μορφές παραμόρφωσης κόμβου 51

Σχήμα 2.23. Εσωτερικές δυνάμεις στους χάλυβες και στα τμήματα του σκυροδέματος..... 52
Σχήμα 2.24. Γεωμετρία ενός μεμονωμένου εσωτερικού κόμβου δοκού - υποστυλώματος .. 53
Σχήμα 2.25. Ρωγμές κόμβου για Επίπεδο Βλάβης 2..... 56
Σχήμα 2.26. Άνοιγμα ρωγμών για το Επίπεδο Βλάβης 5..... 57
Σχήμα 2.27. Ρηγμάτωση στο Επίπεδο Βλάβης 9 για εξωτερικό κόμβο..... 57
Σχήμα 2.28. Αποφλοίωση του σκυροδέματος στο Επίπεδο Βλάβης 6 και 8 58
Σχήμα 2.29. Σύνθλιψη σκυροδέματος πυρήνα στο Επίπεδο Βλάβης 11 59
Σχήμα 2.30. Επίπεδο Βλάβης 12 (α) για εξωτερικό κόμβο..... 59
Σχήμα 2.31. Απομείωση της αντοχής σε τέμνουσα του κόμβου και Επίπεδο Βλάβης 7..... 60
Σχήμα 2.32. Καθορισμός των Επιπέδων Βλάβης σε τυπικό διάγραμμα απόκρισης κόμβου. 61
Σχήμα 2.33. Τυπική διάταξη για τη μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς κόμβου 62
Σχήμα 2.34. Περίσφιγξη κόμβου λόγω εγκάρσιων δοκών (Kitayama et al. 1991)..... 63
Σχήμα 2.35. Επιρροή εγκάρσιων δοκών και πλάκας στη συμπεριφορά του κόμβου (Kitayama et al. 1991)..... 64
Σχήμα 2.36. Επιρροή αξονικού φορτίου υποστυλώματος στην αντοχή του κόμβου..... 65
Σχήμα 2.37. (α) Γεωμετρία και όπλιση δοκιμίων κόμβου, (β) πειραματική διάταξη για την επιβολή των φορτίων (Durrani και Wight, 1985) 66
Σχήμα 2.38. Θέση ηλεκτρομηκυνσιόμετρων στους οπλισμούς (Durrani και Wight, 1985).. 67
Σχήμα 2.39. Δοκίμια εσωτερικών, εξωτερικών και γωνιακών κόμβων (Pampanin et al., 2002) 68
Σχήμα 2.40. Διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας εξωτερικών κόμβων (Pampanin et al., 2002) 69
Σχήμα 2.41. Δοκίμια εξωτερικών κόμβων που εξετάστηκαν (Tsonos, 2007) 70
Σχήμα 2.42. Επίπεδα αστοχίας δοκιμίων (Tsonos, 2007)..... 71
Σχήμα 2.43. Δοκίμια εσωτερικών κόμβων (Sharma et al., 2011)..... 71
Σχήμα 2.44. Ορισμός της πλαστιμότητας για τα δοκίμια των κόμβων (Sharma et al., 2011) 72
Σχήμα 2.45. Εικόνα ρηγμάτωσης απερίσφικτου και περισφιγμένου αντίστοιχα, δοκιμίου πραγματικής κλίμακας (Sharma et al. 2011)..... 72
Σχήμα 2.46. Διακριτοποίηση στοιχείων σκυροδέματος και οπλισμών (Manfredi et al., 2008) 75
Σχήμα 2.47. Σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης (Manfredi et al., 2008) 75
Σχήμα 2.48. Σύγκριση πειραματικών - αναλυτικών καμπύλων (Manfredi et al., 2008)..... 76
Σχήμα 2.49. Εικόνα ρηγμάτωσης από το πείραμα και την ανάλυση (Manfredi et al., 2008) 76
Σχήμα 2.50. Διακριτοποίηση σκυροδέματος και θέση στοιχείων οπλισμού (Cotsovos και Kotsovos, 2008) 77

Σχήμα 2.51. Σύγκριση πειραματικών με αριθμητικά αποτελέσματα (Cotsovos και Kotsovos, 2008) 78
Σχήμα 2.52. Εικόνα ρηγμάτωσης σε διάφορα επίπεδα φόρτισης και σύγκριση δοκιμίου με ρηγματωμένο και αρηγμάτωτο κόμβο (Cotsovos και Kotsovos, 2008) 78
Σχήμα 2.53. Ρηγμάτωση στον κόμβο για μονοτονική φόρτιση Rajaram et al. (2010) 79
Σχήμα 2.54. Ανελαστικό στροφικό ελατήριο μηδενικού μήκους (El-Metwally και Chen, 1988) 80
Σχήμα 2.55. Μοντέλο άκαμπτης ζώνης (Alath και Kunnath, 1995) 80
Σχήμα 2.56. Μοντέλο Elmorsi-Kianoush-Tso (2000) 81
Σχήμα 2.57. Μοντέλο Fleury-Reynouard-Merabet (2000) 82
Σχήμα 2.58. Μοντέλο Youssef-Ghobarah (2001) 83
Σχήμα 2.59. Εξιδανικευμένη κατανομή τάσεων συνάφειας και τάσεων ράβδου αγκυρωμένης εντός του κόμβου (Lowes et al., 2003) 85
Σχήμα 2.60. Μοντέλο Lowes-Altoontash (2003) 85
Σχήμα 2.61. Μοντέλο Tajiri-Shiohara-Kusuhara (2006) 87
Σχήμα 2.62. Διάγραμμα ελευθέρου σώματος για το σώμα του κόμβου, λόγω κατακορύφων φορτίων βαρύτητας και λόγω οριζόντιων σεισμικών δράσεων 93
Σχήμα 3.1. Καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος για μη-γραμμική ανάλυση 98
Σχήμα 3.2. Σχηματισμός ρωγμών στο σκυρόδεμα 99
Σχήμα 3.3. Συμπεριφορά σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση 100
Σχήμα 3.4. Τρισδιάστατο στοιχείο σκυροδέματος SOLID65 101
Σχήμα 3.5. Διατομή επιφάνειας αστοχίας στο αποκλίνον επίπεδο 102
Σχήμα 3.6. Διδιάστατη επιφάνεια αστοχίας για εντατικές καταστάσεις διαξονικές ή σχεδόν διαξονικές ($\sigma_2 = 0$) 103
Σχήμα 3.7. Διαδικασία μη-γραμμικής επίλυσης 106
Σχήμα 3.8. Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος διαφορετικής κατεργασίας. (Fib Model Code 2010) 106
Σχήμα 3.9. Συμπεριφορά του χάλυβα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση (πηγή: OpenSees user manual) 107
Σχήμα 3.10. Τρόποι προσομοίωσης του οπλισμού (Tavarez, 2001) 108
Σχήμα 3.11. Στοιχείο τρισδιάστατης ράβδου οπλισμού LINK180 108
Σχήμα 3.12. Μεταφορά δυνάμεων μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος 110
Σχήμα 3.13. Πειραματικά αποτελέσματα σχέσης τάσεως συνάφειας - ολίσθησης (Eligehausen et al.,1983) 111
Σχήμα 3.14. Αναλυτική σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης (Fib Model Code 2010) ... 111

Σχήμα 3.15. Σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Eligehausen et al.,1983) 112
Σχήμα 3.16. Διαφορετικά μοντέλα ελατηρίων (Hemmaty et al. 1991) 113
Σχήμα 3.17. Περιγραφή του στοιχείου COMBIN39 113
Σχήμα 3.18. Συνδεσμολογία στοιχείων συνάφειας στους κοινούς κόμβους χάλυβα-σκυροδέματος 114
Σχήμα 3.19. Ορισμός μη-γραμμικής καμπύλης στοιχείων συνάφειας για την προσομοίωση της ολίσθησης 115
Σχήμα 3.20. Τρισδιάστατο στοιχείο SOLID185 116
Σχήμα 4.1. Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων σκυροδέματος, καμπύλη τύπου Α της Περίπτωσης 1 και καμπύλη τύπου Β της Περίπτωσης 2. 118
Σχήμα 4.2. Σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης που υιοθετείται για την ανάλυση 118
Σχήμα 4.3. Γεωμετρία και οπλισμός της πλάστιμης δοκού 119
Σχήμα 4.4. Ρηγμάτωση που προέκυψε κατά τη δοκιμή της πλάστιμης δοκού 120
Σχήμα 4.5. Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων της δοκού στο ANSYS 120
Σχήμα 4.6. Σύγκριση καμπύλων φορτίου - μετατόπισης όπως προέκυψαν πειραματικά και από το ANSYS και παρουσίαση των σημείων ρηγμάτωσης. 121
Σχήμα 4.7. Εικόνες ρηγμάτωσης δοκού για τις φάσεις α, β, γ 122
Σχήμα 4.8. Γεωμετρία και οπλισμοί ψαθυρής δοκου 123
Σχήμα 4.9. Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων 123
Σχήμα 4.10. Πειραματική εικόνα ρηγμάτωσης δοκού κατά την αστοχία 123
Σχήμα 4.11. Σύγκριση καμπύλων φορτίου - μετατόπισης από το πείραμα και από το ANSYS 124
Σχήμα 4.12. Εικόνες ρηγμάτωσης ψαθυρής δοκού για f_{ct} = 2 MPa και σημεία (α), (β), (γ) όπως σημειώνονται στην καμπύλη φορτίου μετατόπισης 126
Σχήμα 4.13. Εικόνες ρηγμάτωσης ψαθυρής δοκού για f_{ct} = 5 MPa και σημεία (α), (β) όπως σημειώνονται στην καμπύλη φορτίου μετατόπισης (Σχήμα 4.11) 126
Σχήμα 5.1. Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση των δοκιμίων Α1 και Α2 130
Σχήμα 5.2. Λεπτομέρειες όπλισης των δοκιμίων Α1 και Α2 130
Σχήμα 5.3. Καμπύλη τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων σκυροδέματος 131
Σχήμα 5.4. Καμπύλες τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων για το διαμήκη και τον εγκάρσιο οπλισμό 131
Σχήμα 5.5. Πειραματική διάταξη για τον έλεγχο των δοκιμίων 133
Σχήμα 5.6. Χρονοϊστορία επιβολής της φόρτισης 134
Σχήμα 5.7. Προσομομοίωμα κόμβου με πεπερασμένα στοιχεία 135

Σχήμα 5.8. Διακριτοποίηση των οπλισμών με στοιχεία LINK 180 135
Σχήμα 5.9. Γεωμετρία του προσομοιώματος Α1 και Α2 135
Σχήμα 5.10. Διατομή (α) δοκού και (β) υποστυλώματος για την ανάλυση 136
Σχήμα 5.11. Διαφορετικές καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος για την ανάλυση 137
Σχήμα 5.12. Σχέση τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος για την ανάλυση 138
Σχήμα 5.13. Σχέση τάσεων παραμορφώσεων (α) για τους διαμήκεις και (β) για τους εγκάρσιους οπλισμούς 139
Σχήμα 5.14. Σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης για την ανάλυση των δοκιμίων Α1, Α2 140
Σχήμα 5.15. Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση για την ανάλυση..... 141
Σχήμα 5.16. Κύκλοι φόρτισης των δοκιμίων κατά την ανάλυση..... 141
Σχήμα 6.1. Σχέση τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου όπως προέκυψαν από το πείραμα (διακεκομμένη γραμμή) και την ανάλυση (συνεχής γραμμή) για το δοκίμιο Α2 .. 142
Σχήμα 6.2. Σύγκριση υστερητικών κύκλων δοκιμίου Α2 για σχετική μετάθεση ορόφου 1% 143
Σχήμα 6.3. Σύγκριση υστερητικών κύκλων δοκιμίου Α2 για σχετική μετάθεση ορόφου 2% 143
Σχήμα 6.4. Σύγκριση υστερητικών κύκλων δοκιμίου Α2 για σχετική μετάθεση ορόφου 3% 144
Σχήμα 6.5. Σύγκριση υστερητικών κύκλων δοκιμίου Α2 για σχετική μετάθεση ορόφου 4% 144
Σχήμα 6.6. Ορισμός της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας και ενεργειακής απορρόφησης 145
Σχήμα 6.7. Απορροφούμενη υστερητική ενέργεια για το δοκίμιο Α2 146
Σχήμα 6.8. Κατανομή της ρηγμάτωσης στο σώμα του κόμβου, δοκίμιου Α2 147
Σχήμα 6.9. Συνολική ρηγμάτωση του δοκιμίου Α2 στο 4% της σχετικής μετάθεσης ορόφου (πειραματική καταγραφή και αναλυτική πρόβλεψη) 148
Σχήμα 6.10. Μεταβολή της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας κόμβου Α2 148
Σχήμα 6.11. Διατμητική απαίτηση κόμβου Α2 και σύγκριση με τις προβλεπόμενες τιμές αντοχής των Κανονισμών EC8, ACI, AIJ..... 149
Σχήμα 6.12. Διατμητική παραμόρφωση του σώματος του κόμβου 150
Σχήμα 6.13. Περιβάλλουσα καμπύλη διατμητικής δύναμης - διατμητικής παραμόρφωσης κόμβου Α2..... 150
Σχήμα 6.14. Θέσεις υπολογισμού κυρίων τάσεων στη διαγώνιο του κόμβου 151
Σχήμα 6.15. Κύρια θλιπτική τάση στα σημεία της κύριας διαγωνίου για τον κόμβο Α2 152

Σχήμα 6.16. Κατανομή της κύριας θλιπτικής τάσης στο δοκίμιο Α2 και σχηματισμός του διαγώνιου θλιπτήρα σκυροδέματος..... 152
Σχήμα 6.17. Τροχιές κυρίων τάσεων μέσω διανυσμάτων στα κέντρα των ΠΣ 153
Σχήμα 6.18. Κύρια εφελκυστική τάση κάθετα στα σημεία της κύριας διαγωνίου για τον κόμβο Α2..... 154
Σχήμα 6.19. Μεταβολή των τάσεων κατά μήκος των συνδετήρων του κόμβου Α2..... 155
Σχήμα 6.20. Μεταβολή των τάσεων των συνδετήρων καθ' ύψος του κόμβου 155
Σχήμα 6.21. Τάση στους άνω και κάτω οπλισμούς της δοκού αριστερά για φόρτιση κατά (+) 156
Σχήμα 6.22. Τάση στους άνω και κάτω οπλισμούς της δοκού αριστερά για φόρτιση κατά (-) 156
Σχήμα 6.23. Παραμόρφωση στους άνω και κάτω οπλισμούς της δοκού αριστερά για φόρτιση κατά (+)..... 157
Σχήμα 6.24. Παραμόρφωση στους άνω και κάτω οπλισμούς της δοκού αριστερά για φόρτιση κατά (-)..... 157
Σχήμα 6.25. Τάση στους οπλισμούς του άνω υποστυλώματος για φόρτιση κατά (+)..... 158
Σχήμα 6.26. Τάση στους οπλισμούς του άνω υποστυλώματος για φόρτιση κατά (-)..... 158
Σχήμα 6.27. Κατανομή των τάσεων συνάφειας στους άνω οπλισμούς της δοκού μέσα στο σώμα του κόμβου Α2 για φόρτιση κατά (+) 159
Σχήμα 6.28. Κατανομή των τάσεων συνάφειας στους άνω οπλισμούς της δοκού μέσα στο σώμα του κόμβου Α2 για φόρτιση κατά (-) 159
Σχήμα 6.29. Μεταβολή της μέσης τάσης συνάφειας των άνω οπλισμών της δοκού εντός του κόμβου συναρτήσει της σχετικής μετάθεσης ορόφου..... 160
Σχήμα 6.30. Σχέση τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου όπως προέκυψαν από την ανάλυση (διακεκομμένη γραμμή) και την ανάλυση με ελαστικό κόμβο (συνεχής γραμμή) για το δοκίμιο Α2..... 161
Σχήμα 6.31. Σύγκριση υστερητικών κύκλων για ελαστικό - ανελαστικό κόμβο δοκιμίου Α2 για σχετική μετάθεση ορόφου 1% 161
Σχήμα 6.32. Σύγκριση υστερητικών κύκλων για ελαστικό - ανελαστικό κόμβο δοκιμίου Α2 για σχετική μετάθεση ορόφου 2% 162
Σχήμα 6.33. Σύγκριση υστερητικών κύκλων για ελαστικό - ανελαστικό κόμβο δοκιμίου Α2 για σχετική μετάθεση ορόφου 3% 162
Σχήμα 6.34. Σύγκριση υστερητικών κύκλων για ελαστικό - ανελαστικό κόμβο δοκιμίου Α2 για σχετική μετάθεση ορόφου 4% 163

Σχήμα 6.35. Περιβάλλουσα τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου δοκιμίου Α2 164
Σχήμα 6.36. Σύγκριση απορροφούμενης υστερητικής ενέργειας δοκιμίου Α2 για ελαστικό και ανελαστικό κόμβο 164
Σχήμα 6.37. Ρηγμάτωση δοκιμίου Α2 για ελαστική και ανελαστική συμπεριφορά κόμβου165
Σχήμα 6.38. Σύγκριση της μεταβολής της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας του δοκιμίου Α2 για ελαστικό και ανελαστικό κόμβο 166
Σχήμα 6.39. Δυσκαμψία αποφόρτισης / επαναφόρτισης για ελαστικό και ανελαστικό κόμβο 166
Σχήμα 6.40. Αύξηση της διαφοράς μεταξύ της δυσκαμψίας ελαστικού - ανελαστικού κόμβου συναρτήσει των κύκλων φόρτισης 167
Σχήμα 6.41. Σύγκριση υστερητικών βρόχων δοκιμίου Α2 συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων προσομοίωσης 168
Σχήμα 6.42. Περιβάλλουσα τέμνουσας ορόφου για την προσομοίωση με ένα συνδετήρα . 169
Σχήμα 6.43. Κύρια θλιπτική τάση στα σημεία της κύριας διαγωνίου για διαφορετικό αριθμό συνδετήρων 170
Σχήμα 6.44. Κύρια εφελκυστική τάση στα σημεία της κύριας διαγωνίου για διαφορετικό αριθμό συνδετήρων 171
Σχήμα 6.45. Μεταβολή των τάσεων κατά μήκος του μεσαίου συνδετήρα του κόμβου 172
Σχήμα 6.46. Περιβάλλουσα τέμνουσας ορόφου για την προσομοίωση με εγκάρσια θλίψη 173
Σχήμα 6.47. Κύρια θλιπτική τάση στα σημεία της κύριας διαγωνίου για προσομοίωση με εγκάρσια θλίψη 174
Σχήμα 6.48. Κύρια εφελκυστική τάση κάθετα στα σημεία της κύριας διαγωνίου για προσομοίωση με εγκάρσια πρόθλιψη 175
Σχήμα 6.49. Μεταβολή των τάσεων κατά μήκος των συνδετήρων του κόμβου Α2 για προσομοίωση με εγκάρσια πρόθλιψη 176
Σχήμα 6.50. Μεταβολή των τάσεων των συνδετήρων καθ' ύψος του κόμβου Α2 για προσομοίωση με εγκάρσια πρόθλιψη 176
Σχήμα 6.51. Μεταβολή της μέσης τάσης συνάφειας των άνω οπλισμών της δοκού εντός του κόμβου συναρτήσει της σχετικής μετάθεσης ορόφου, για προσομοίωση με εγκάρσια πρόθλιψη 177
Σχήμα 6.52. Χρονοϊστορία ανάλυσης για σταθερούς κύκλους φόρτισης 177
Σχήμα 6.53. Καμπύλη τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου για σταθερούς κύκλους φόρτισης 178
Σχήμα 6.54. Πτώση της αντοχής του δοκιμίου για σταθερούς κύκλους φόρτισης 178

Σχήμα 6.55. Μεταβολή της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας για σταθερούς κύκλους φόρτισης 179
Σχήμα 6.56. Μεταβολή της απορροφούμενης υστερητικής ενέργειας για σταθερούς κύκλους φόρτισης..... 179
Σχήμα 6.57. Σχέση τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου όπως προέκυψαν από το πείραμα (διακεκομμένη γραμμή) και την ανάλυση (συνεχής γραμμή) για το δοκίμιο Α1 180
Σχήμα 6.58. Σύγκριση υστερητικών κύκλων δοκιμίου Α1 για σχετική μετάθεση ορόφου 0.5% 181
Σχήμα 6.59. Σύγκριση υστερητικών κύκλων δοκιμίου Α1 για σχετική μετάθεση ορόφου 1% 181
Σχήμα 6.60. Σύγκριση υστερητικών κύκλων δοκιμίου Α1 για σχετική μετάθεση ορόφου 2% 182
Σχήμα 6.61. Απορροφούμενη υστερητική ενέργεια για το δοκίμιο Α1 183
Σχήμα 6.62. Μεταβολή της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας για το δοκίμιο Α1 183
Σχήμα 6.63. Εικόνες ρηγμάτωσης για το σώμα του κόμβου του δοκίμιου Α1 184
Σχήμα 6.64. Ρηγμάτωση συνολικά του δοκιμίου Α1 στο 4% της σχετικής μετάθεσης ορόφου για το πείραμα και στο 2.5% της ανάλυσης..... 185
Σχήμα 6.65. Διατμητική δύναμη κόμβου Α1 και σύγκριση με τις προβλεπόμενες τιμές αντοχής των Κανονισμών (Ευρωκώδικας 8, ACI, AIJ)..... 186
Σχήμα 6.66. Κύρια θλιπτική τάση στα σημεία της κύριας διαγωνίου για τον κόμβο Α1 189
Σχήμα 6.67. Κατανομή της κύριας θλιπτικής τάσης στο δοκίμιο Α1 για θετική φορά φόρτισης..... 190
Σχήμα 6.68. Κατανομή της κύριας θλιπτικής τάσης στο δοκίμιο Α1 για αρνητική φορά φόρτισης..... 190
Σχήμα 6.69. Αύξηση του βάθους της θλιβόμενης ζώνης λόγω απώλειας της αγκύρωσης .. 191
Σχήμα 6.70. Τροχιές κύριων τάσεων για τον κόμβο του δοκιμίου Α1 191
Σχήμα 6.71. Κύρια εφελκυστική τάση κάθετα στα σημεία της κύριας διαγωνίου για τον κόμβο Α1..... 192
Σχήμα 6.72. Μεταβολή των τάσεων κατά μήκος των συνδετήρων του κόμβου Α1..... 193
Σχήμα 6.73. Μεταβολή των τάσεων των συνδετήρων καθ' ύψος του κόμβου Α1 193
Σχήμα 6.74. Τάση στους άνω και κάτω οπλισμούς της δοκού για φόρτιση κατά (+) 194
Σχήμα 6.75. Τάση στους άνω και κάτω οπλισμούς της δοκού για φόρτιση κατά (-) 194
Σχήμα 6.76. Τάσεις στα άκρα των άνω οπλισμών της δοκού εκατέρωθεν του κόμβου όπως προέκυψαν από την ανάλυση..... 195

Σχήμα 6.77. Τάσεις στα άκρα της άνω στρώσης οπλισμών της δοκού εκατέρωθεν του κόμβου όπως προέκυψαν από το πείραμα 195
Σχήμα 6.78. Τάση στους οπλισμούς του υποστυλώματος για φόρτιση κατά (+) 196
Σχήμα 6.79. Τάση στους οπλισμούς του υποστυλώματος για φόρτιση κατά (-) 197
Σχήμα 6.80. Κατανομή των τάσεων συνάφειας στους οπλισμούς της δοκού μέσα στο σώμα του κόμβου Α1 για φόρτιση κατά (+) 197
Σχήμα 6.81. Κατανομή των τάσεων συνάφειας στους οπλισμούς της δοκού μέσα στο σώμα του κόμβου Α1 για φόρτιση κατά (-) 198
Σχήμα 6.82. Μεταβολή της μέσης τάσης συνάφειας οπλισμών της δοκού εντός του κόμβου συναρτήσει της σχετικής μετάθεσης ορόφου 198
Σχήμα 6.83. Σχέση τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου όπως προέκυψαν από την ανελαστική ανάλυση (διακεκομμένη γραμμή) και την ανάλυση με ελαστικό σκυρόδεμα κόμβου (συνεχής γραμμή) για το δοκίμιο Α1 199
Σχήμα 6.84. Σύγκριση προβλέψεων των υστερητικών κύκλων για ελαστικό - ανελαστικό κόμβο δοκιμίου Α1 για σχετική μετάθεση ορόφου 0.5% 199
Σχήμα 6.85. Σύγκριση προβλέψεων των υστερητικών κύκλων για ελαστικό - ανελαστικό κόμβο δοκιμίου Α1 για σχετική μετάθεση ορόφου 1% 200
Σχήμα 6.86. Σύγκριση προβλέψεων υστερητικών κύκλων για ελαστικό - ανελαστικό κόμβο δοκιμίου Α1 για σχετική μετάθεση ορόφου 2% 200
Σχήμα 6.87. Περιβάλλουσα τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου δοκιμίου Α1 201
Σχήμα 6.88. Σύγκριση απορροφούμενης υστερητικής ενέργειας δοκιμίου Α1 για ελαστικό και ανελαστικό κόμβο 201
Σχήμα 6.89. Σύγκριση της μεταβολής της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας του δοκιμίου Α1 για ελαστικό και ανελαστικό κόμβο 202
Σχήμα 6.90. Ρηγμάτωση δοκιμίου Α1, ελαστική και ανελαστική συμπεριφορά κόμβου 202

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1. Τιμές συντελεστή $\boldsymbol{\gamma}$ στη σχέση (2.53) 94
Πίνακας 3.1. Παράμετροι της σχέσης τάσεως συνάφειας - ολίσθησης (Fib Model Code 2010) 112
Πίνακας 5.1. Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα 132
Πίνακας 5.2. Καμπτική και διατμητική αντοχή στοιχείων 133
Πίνακας 6.1. Μέγιστες τιμές τέμνουσας ορόφου του δοκιμίου Α2 για το πείραμα και την ανάλυση 145
Πίνακας 6.2. Μέγιστες τιμές τέμνουσας ορόφου του δοκιμίου Α1 για το πείραμα και την ανάλυση 182
Πίνακας 6.3. Χαρακτηριστικές τιμές διατμητικής δύναμης κόμβου Α1 και σύγκριση 187

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Όπως είναι γνωστό, μεγάλο μέρος του δομικού πλούτου της Ελλάδας αποτελείται από κτίρια οπλισμένου σκυροδέματος, πολλά απ' τα οποία (περίπου το 80%) έχουν σχεδιαστεί με παλαιότερους Αντισεισμικούς Κανονισμούς, προ της υιοθέτησης του ΕΑΚ (2000) αλλά και πριν ακόμα από το ΝΕΑΚ (1995). Παρ' όλα αυτά, μέχρι σήμερα, η καταγραφή και μελέτη αστοχιών φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα, μετά από ισχυρούς σεισμούς, σε λίγες σχετικά περιπτώσεις έχει εντοπίσει τους κόμβους δοκού - υποστυλώματος ως τα σημεία όπου επικεντρώνεται η αστοχία, ή ως τα δομικά στοιχεία τα οποία προκάλεσαν τη συνολική απώλεια της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής. Η διαπίστωση αυτή βέβαια, δεν οφείλεται σε έναν επιτυχημένο σχεδιασμό κόμβων που είχαν εξασφαλίσει οι παλαιότεροι Κανονισμοί, αντίθετα εξηγείται από το χαμηλό επίπεδο φορτίου σχεδιασμού των δοκών, την απουσία κατάλληλων λεπτομερειών όπλισης στα υποστυλώματα και την έλλειψη ικανοτικών διατάξεων που είχαν μετατρέψει αυτά τα μέλη σε ασθενείς κρίκους του στατικού συστήματος, απομονώνοντας κατά μια έννοια τους κόμβους.

Με τους νεότερους αντισεισμικούς κανονισμούς και συγκεκριμένα με τον ΕΑΚ (2000) που ισχύει σήμερα, ενώ βελτιώνεται σημαντικά ο σχεδιασμός σε επίπεδο λεπτομερειών όπλισης και ικανοτικών διατάξεων, δεν υιοθετείται κάποια ιδιαίτερη διαδικασία για το σχεδιασμό των κόμβων δοκών - υποστυλωμάτων. Η βελτίωση αυτή του σχεδιασμού των συντρεχόντων στοιχείων, αυξάνει και τις απαιτήσεις στον ίδιο τον κόμβο, θέτοντας σε κίνδυνο την ακεραιότητα του στοιχείου, ακόμα και πριν από την επίτευξη της μέγιστης αντοχής στα άκρα των δοκών. Δεν θα ήταν λοιπόν αυθαίρετο να πούμε πως οι κόμβοι ακόμα και σύγχρονων κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα, είναι πιθανόν να αποτελέσουν ασθενή στοιχεία κατά τη σεισμική απόκριση του δομητικού συστήματος. Σε αυτό αρκεί να συνυπολογιστεί και το γεγονός πως οι επισκευές στο σώμα των κόμβων είναι ιδιαίτερα δύσκολες, αν όχι αδύνατες. Στον Ευρωπαϊκό Αντισεισμικό Κανονισμό (Ευρωκώδικας 8 /2004) που αναμένεται σύντομα να αντικαταστήσει τον αντίστοιχο Ελληνικό, υπάρχουν σχετικές διατάξεις για το σχεδιασμό και τον έλεγχο της αντοχής των κόμβων δοκού - υποστυλώματος, εξασφαλίζοντας έτσι την επάρκεια τους, αν και πάλι, όχι σε όλες τις περιπτώσεις, όπως έχει αποδειχθεί πειραματικά. Στο ζήτημα του σχεδιασμού, υπάρχουν λοιπόν ακόμα αμφιλεγόμενα σημεία, όχι μόνο ως προς την αντοχή των κόμβων αλλά και ως προς τη δυσκαμψία τους ενώ και οι συνελκόμενες λεπτομέρειες όπλισης που απαιτούνται δημιουργούν κατασκευαστικά προβλήματα. Επιπλέον παρατηρείται ότι οι

διάφοροι Κανονισμοί μεταξύ τους, όπως ο Ευρωκώδικας 8 και ο Αμερικάνικος ACI 318, παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις στις διατάξεις τους.

Πέραν όμως του σχεδιασμού, στο επίπεδο της προσομοίωσης ραβδωτών φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα, οι κόμβοι, αντιμετωπίζονται ως μαθηματικά σημεία μηδενικών, ή πεπερασμένων (αλλά άκαμπτων) διαστάσεων, θεωρείται πως τα στοιχεία αυτά παραμένουν εντελώς άκαμπτα και απεριόριστα ανθεκτικά κατά την απόκριση της κατασκευής. Μια τέτοια θεώρηση έρχεται σε αντίθεση με την πραγματική συμπεριφορά των κόμβων, η οποία επηρεάζει σε υπολογίσιμο βαθμό τη συνολική απόκριση, εισάγοντας περεταίρω αβεβαιότητες. Υπό ανακυκλιζόμενες σεισμικές δράσεις, ο κόμβος όχι μόνο δεν παραμένει αρηγμάτωτος στις περισσότερες περιπτώσεις, αλλά παρουσίαζει έντονα μη-γραμμική συμπεριφορά, αυξάνοντας τις συνολικές παραμορφώσεις και μειώνοντας τη δυσκαμψία της κατασκευής.

Έτσι με τις σύγχρονες τάσεις που ισχύουν στον αντισεισμικό σχεδιασμό, όπως ο σχεδιασμός με βάση τις επιτελεστικότητες και με την υιοθέτηση μη - γραμμικών ανελαστικών αναλύσεων να απαιτούν περιορισμό των αβεβαιοτήτων στη συμπεριφορά της κατασκευής, κρίνεται αναγκαία η εισαγωγή της συμπεριφοράς των κόμβων στα προσομοιώματα ευρύτερων δομικών συστημάτων. Ένα αξιόπιστο μοντέλο συμπεριφοράς που θα προσεγγίζει ικανοποιητικά τους μηχανισμούς που ορίζουν την ανελαστική απόκριση των κόμβων, αλλά θα παραμένει σχετικά απλό ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές σχεδιασμού απ' τους μηχανικούς στην πράξη, αποτελεί ακόμη σήμερα ζητούμενο και αντικείμενο έρευνας.

Τέλος, δεδομένου ότι το πρόβλημα της σεισμικής συμπεριφοράς των κόμβων δεν έχει ακόμα επιλυθεί πλήρως, ενώ σε επίπεδο μηχανικής συμπεριφοράς δεν υπάρχει ένα μοντέλο λειτουργίας κοινώς αποδεκτό, το ζήτημα σε επίπεδο έρευνας παραμένει σήμερα ανοικτό για περεταίρω αναλυτική και πειραματική μελέτη και κατανόηση.

1.2. ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Μέσα στο ευρύ πεδίο που αναπτύχθηκε παραπάνω, οι στόχοι της παρούσας εργασίας, περιλαμβάνουν τη μελέτη, γενικά, της ανελαστικής συμπεριφοράς κόμβων δοκού - υποστυλώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό ανακυκλιζόμενες δράσεις και πιο συγκεκριμένα, την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, με χρήση του γενικού λογισμικού ANSYS, για την αναλυτική διερεύνηση της συμπεριφοράς αυτής σε δύο δοκίμια κόμβων. Στη γενικότερη διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης των κόμβων, συμβάλει η μελέτη και καταγραφή των στοιχείων που βρίσκονται διαθέσιμα στη

βιβλιογραφία, τόσο από πλευράς θεωρητικών μοντέλων μηχανικής συμπεριφοράς, όσο και πειραματικών και αναλυτικών ερευνών καθώς και κανονιστικών διατάξεων. Ως βάση για την προσέγγιση του προβλήματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας το λογισμικό ANSYS, περιγράφεται αρχικά η μεθοδολογία μη -γραμμικής τρισδιάστατης προσομοίωσης στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα με το εν λόγω λογισμικό. Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας αυτής της προσομοίωσης γίνεται μια ανεξάρτητη διερεύνηση των παραμέτρων που υπεισέρχονται στην ανάλυση, με αναλυτική διερεύνηση αρχικά δύο απλών αμφιέριστων δοκών που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία, η μια πλάστιμη και η άλλη ψαθυρή σε συμπεριφορά, και οι αναλυτικές προβλέψεις συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα.

Ακολούθως ο κύριος στόχος της παρούσης μελέτης, επιτυγχάνεται με την προσομοίωση δύο δοκιμίων κόμβων, που αντιστοιχούν σε ένα εσωτερικό και ένα εξωτερικό κόμβο, οι οποίοι έχουν εξεταστεί πειραματικά και για τους οποίους υπάρχουν επαρκή, διαθέσιμα και καλής ποιότητας δεδομένα. Μέσα από τη μόρφωση του ανελαστικού τους προσομοιώματος και τη συγκριτική μελέτη των αναλυτικών προβλέψεων με τα πειραματικά αποτελέσματα, αυτή εξετάζεται αναλυτικά και η επιρροή διαφόρων παραμέτρων, όπως η ρηγμάτωση του κόμβου, η ολίσθηση των διαμήκων ράβδων της δοκού, ο αριθμός των συνδετήρων στο σώμα του κόμβου και η ύπαρξη εγκάρσιας προθλίψης στο σώμα του κόμβου.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

2.1. ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ ΔΟΚΟΥ - ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΦΕΡΟΝΤΑ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟ

Παλαιότερες αντιλήψεις για το σχεδιασμό πλαισιωτών κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (ΟΣ) αγνοούσαν τους κόμβους ως δομικά στοιχεία με δική τους ιδιαίτερη συμπεριφορά θεωρώντας επαρκές για τη συνολική απόκριση να εξασφαλίζονται τα μέλη που συντρέχουν σε αυτούς. Υπήρχε η αντίληψη πως από τη στιγμή που οι κόμβοι έχουν ίσες ή και μεγαλύτερες διαστάσεις από τα στοιχεία που συνδέουν, οι αναπτυσσόμενες σε αυτούς τάσεις θα ήταν και αυτές ίσες ή μικρότερες από αυτές των εν λόγω στοιχείων. Ως αποτέλεσμα, το θέμα της συμπεριφοράς και του σχεδιασμού των κόμβων είχε υποτιμηθεί διεθνώς για πολλά χρόνια ενώ αρκετοί σύγχρονοι Κανονισμοί είτε αγνοούν τελείως τους κόμβους (π.χ. ΕΑΚ 2000) είτε περιλαμβάνουν σχετικές οδηγίες χωρίς όμως να υιοθετούν κάποιο κοινώς παραδεκτό μοντέλο συμπεριφοράς, ακολουθώντας ο καθένας διαφορετική αντιμετώπιση (π.χ. EC8 /2004, ACI 318-08, NZS 3101 /2006). Επιπλέον έως και σήμερα, κατά την προσομοίωση ραβδωτών φορέων με σκοπό τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών, οι κόμβοι αντιμετωπίζονται ως σημεία μηδενικών διαστάσεων, με την παραδοχή μάλιστα πως θα μείνουν αρηγμάτωτοι και θα συμπεριφερθούν ελαστικά. Με βάση όμως την παρατήρηση των αποτελεσμάτων διαφόρων σεισμών τα τελευταία 25 χρόνια έγινε αντιληπτό στην κοινότητα των μηχανικών πως οι πρότερες αντιλήψεις ήταν εντελώς λανθασμένες. Είναι πλέον γενικά αποδεκτή η μεγάλη δομική συνεισφορά των κόμβων στη συνολική σεισμική απόκριση πλαισιωτών κατασκευών, οι οποίες σχεδιάζονται για ανελαστική συμπεριφορά κατά την προσβολή από ισχυρό σεισμό. Εφόσον δεν σχεδιασθούν σωστά, οι κόμβοι δοκών - υποστυλωμάτων μπορούν να αποτελούν κρίσιμες περιοχές του δομητικού συστήματος, καθώς συχνά αποτελούν τον αδύναμο κρίκο και το σημείο έναρξης της αστοχίας (**Σχήμα 2.1** και **Σχήμα 2.2**). Ακόμα όμως και αν εξασφαλίσουμε την αστοχία εκτός του κόμβου, η επιρροή της συμπεριφοράς του, που όπως είπαμε κατά βάση αγνοείται, θα πρέπει να συμπεριληφθεί στην ανάλυση του ολικού δομήματος αν θέλουμε πιο ακριβείς και άρα ασφαλείς προβλέψεις.

Όπως αναφέρουν οι Paulay και Priestley (1992), συχνά υποστηρίζεται πως η σημασία των κόμβων στον αντισεισμικό σχεδιασμό υπερτονίζεται καθώς υπάρχουν σχετικά λίγες περιπτώσεις μεγάλων βλαβών ή καταρρεύσεων που θα μπορούσαν να αποδοθούν σε αστοχία κόμβων. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι σε πολλές κατασκευές - και ιδιαίτερα κατασκευές προηγούμενων δεκαετιών, το επίπεδο σχεδιασμού των δοκών καθώς και η διαμόρφωση λεπτομερειών στα υποστυλώματα ήταν συχνά χειρότερα από τα σημερινά

πρότυπα, μετατρέποντας αυτά τα μέλη στους αδύναμους κρίκους της κατασκευής, χωρίς να επιτρέπουν στις δοκούς να αναπτύξουν τις διαθέσιμες αντοχές τους και να επαληθεύσουν το βασικό κανόνα σχεδιασμού "ασθενής δοκος - ισχυρό υποστύλωμα".

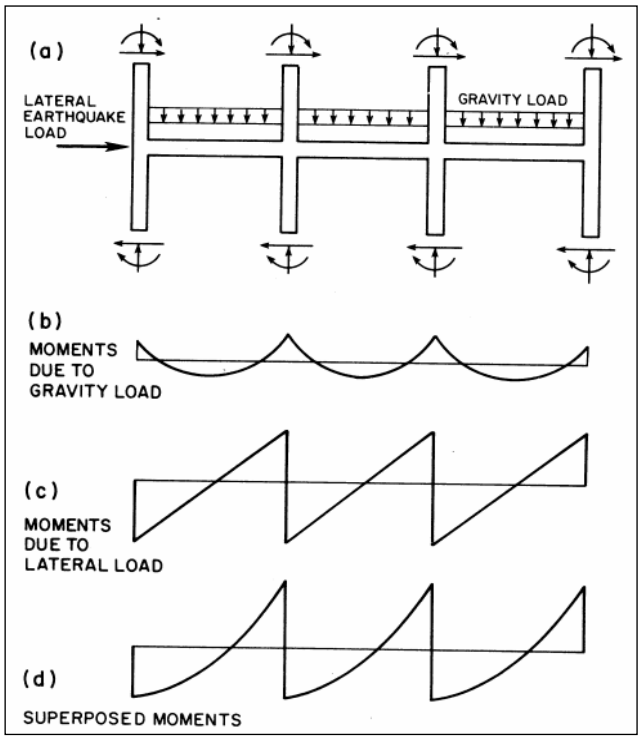
Σχήμα 2.1. Αστοχίες εσωτερικών και ακραίων κόμβων (πηγή: Moehle, 2006 και EERI, 2008)

Σχήμα 2.2. Αστοχία γωνιακού κόμβου πλαισίου στο σεισμό της Αθήνας, 1999 (πηγή: ΕΜΠ)

Ωστόσο σε πολλούς σεισμούς όπως του El Asnam (1980), του Mexico City (1985) και της Loma Prieta (1989) σημειώθηκαν σημαντικές αστοχίες σε κόμβους δοκών

υποστυλωμάτων. Καθώς βελτιώνεται ο σχεδιασμός των συντρεχόντων μελών και επιτυγχάνεται ο σχεδιασμός ασθενούς δοκού - ισχυρού υποστυλώματος με πλήρη ανάπτυξη των αντοχών των δοκών κατά το σεισμό, οι κόμβοι μετατρέπονται σε ευάλωτα στοιχεία.

Η συμπεριφορά των κόμβων υπό ανακυκλιζόμενη σεισμική ένταση χαρακτηρίζεται από απότομη μείωση της αντοχής, της δυσκαμψίας και της ικανότητας για απορρόφηση ενέργειας των στοιχείων αυτών. Ως αποτέλεσμα της εναλλαγής των σεισμικών ροπών των υποστυλωμάτων αμέσως πάνω και κάτω από τον κόμβο, συγχρόνως με παρόμοια αναστροφή των ροπών στις δοκούς εκατέρωθεν του κόμβου, το σώμα του κόμβου δέχεται οριζόντιες και κατακόρυφες τέμνουσες δυνάμεις, των οποίων το μέγεθος συνήθως ξεπερνά αυτό των γειτονικών δοκών και υποστυλωμάτων, με κίνδυνο διατμητικής αστοχίας. Ενίοτε, εδικά για γωνιακά και περιμετρικά στοιχεία, η ταυτόχρονη εναλλαγή του αξονικού φορτίου (που ενδέχεται να λάβει ακόμα και μεγέθη εφελκυσμού) επηρεάζει πρόσθετα και δυσμενώς την απόκριση του κόμβου, ακόμη και αν οι τέμνουσες σε αυτά τα στοιχεία είναι χαμηλώτερες από αυτές των εσωτερικών κόμβων. Βέβαια η εναλλαγή συνολικά των ροπών π.χ. στην περίπτωση υψηλών κατακόρυφων μονίμων φορτίων ή χαμηλής σεισμικής δράσης δεν συμβαίνει απαραίτητα αλλά στην περίπτωση του ακραίου σεισμού σχεδιασμού και σε αμιγώς πλαισιακά συστημάτα, είναι αναπόφευκτη (**Σχήμα 2.3**).



Σχήμα 2.3. (a) Τυπικό πλαίσιο σε σεισμό. (b) Ροπές λόγω κατακορύφων, (c) ροπές λόγω σεισμού, (d) συνδυασμός των παραπάνω

Η αναστροφή λοιπόν της ροπής εκατέρωθεν του κόμβου συνεπάγεται πως ο διαμήκης οπλισμός της δοκού από τη μία πλευρά βρίσκεται σε θλίψη και από την άλλη σε εφελκυστική διαρροή. Για τη μεταβολή αυτή της δύναμης της ράβδου που πρέπει να συμβεί εντός του μήκους του κόμβου (και συχνά σε ακόμα μικρότερο μήκος λόγω της εισχώρησης της διαρροής της ράβδου εντός του κόμβου) απαιτούνται υψηλές τάσεις συνάφειας που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία της αγκύρωσης και ολίσθηση.

Γενικά, η επιθυμητή συμπεριφορά κόμβων δοκού - υποστυλώματος σε πλάστιμα πλαίσια πρέπει να πληροί τα παρακάτω κριτήρια: (Paulay και Priestley, 1992)

1. Η αντοχή του κόμβου δεν πρέπει να είναι μικρότερη από τη μέγιστη απαίτηση που αντιστοιχεί στην ανάπτυξη μηχανισμού πλαστικών αρθρώσεων για το πλαίσιο. Αποφεύγεται έτσι η ανάγκη για επισκευή ή ενίσχυση του κόμβου μετά το σεισμό, γεγονός που είναι ιδιαίτερα δυσχερές, ενώ αποφεύγεται και η ανάγκη ενεργειακής απορρόφησης από, έτσι και αλλιώς ψαθυρούς μηχανισμούς κόμβων, που εμφανίζουν σοβαρή απομείωση αντοχής και δυσκαμψίας υπό ανακυκλιζόμενες δράσεις στην ανελαστική περιοχή, ειδικά σε μεγάλες παραμορφώσεις.
2. Η φέρουσα ικανότητα του υποστυλώματος δεν θα πρέπει να χάνεται από πιθανή αποδιοργάνωση του κόμβου. Ο κόμβος θεωρείται αναπόσπαστο τμήμα του υποστυλώματος.
3. Στη διάρκεια μετρίων σεισμών, οι κόμβοι συνίσταται να αποκρίνονται ελαστικά και να είναι δύσκαμπτοι.
4. Οι παραμορφώσεις των κόμβων δεν θα πρέπει να αυξάνουν σημαντικά τη σχετική μετάθεση των ορόφων.
5. Ο οπλισμός του κόμβου που απαιτείται για να πληρούνται τα παραπάνω κριτήρια θα πρέπει να μην εμποδίζει τη χύτευση και τη συμπύκνωση του σκυροδέματος.

2.2. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ

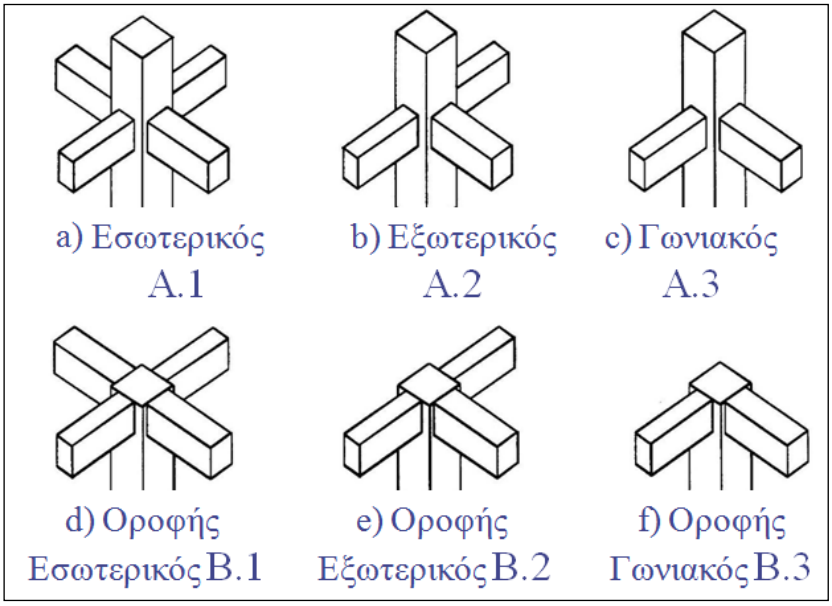
Παρά την εκτεταμένη έως σήμερα έρευνα σε Η.Π.Α., Ευρώπη, Νέα Ζηλανδία και Ιαπωνία, το πρόβλημα της σεισμικής συμπεριφοράς των κόμβων δεν έχει κατανοηθεί και επιλυθεί πλήρως ενώ μοντέλο λειτουργίας κοινώς παραδεκτό από όλους δεν υπάρχει ακόμα. Όπως θα φανεί παρακάτω, η απόκριση των κόμβων είναι άμεσα συνδεδεμένη με ιδιότητες συμπεριφοράς τόσο του σκυροδέματος, όσο και της συνάφειας μεταξύ χάλυβα - σκυροδέματος που ακόμα βρίσκονται υπό διερεύνηση. Οι σημαντικότερες από αυτές, όπως αναφέρει ο Καραγιάννης (2008), είναι (α) η συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενες διατμητικές δράσεις, (β) η αλληλεπίδραση αξονικής και διατμητικής

δύναμης, (γ) η συνάφεια χάλυβα - σκυροδέματος, (δ) η περίσφιγξη και η επιρροή της στην αντοχή του κόμβου και στη συνάφεια. Σήμερα, το μοντέλο των Park και Paulay (1975) και οι βελτιώσεις κατά Paulay και Priestley (1992) και Park (2002) αποτελούν ένα παραδεκτό και ίσως το πλέον διαδεδομένο μοντέλο συμπεριφοράς για κόμβους ΟΣ. Βεβαίως έχουν προταθεί από ερευνητές και εναλλακτικά, ως προς το παραπάνω, προσομοιώματα όπως το μοντέλο διατμητικής αστοχίας κόμβων που έχει δημοσιευτεί από το Shiohara (2001, 2003) και στο οποίο θα γίνει επίσης αναφορά παρακάτω.

2.2.1. Ταξινόμηση των κόμβων

2.2.1.1. Με βάση τη γεωμετρία

Η γεωμετρία των κόμβων που συναντώνται σε ένα δομητικό σύστημα ποικίλει. Η επιτροπή ACI 352 χωρίζει τους κόμβους σε έξι κατηγορίες, σύμφωνα με τη θέση τους στην κατασκευή (**Σχήμα 2.4**). Στη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των κόμβων οι κόμβοι μελετώνται συνήθως στο επίπεδο και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, εσωτερικούς (interior joints) και εξωτερικούς (exterior joints). Οι δύο αυτές κατηγορίες παρουσιάζουν τόσο ομοιότητες όσο και κάποιες σημαντικές διαφορές στη συμπεριφορά τους.



Σχήμα 2.4. Γεωμετρία των κόμβων σύμφωνα με τον ACI 352

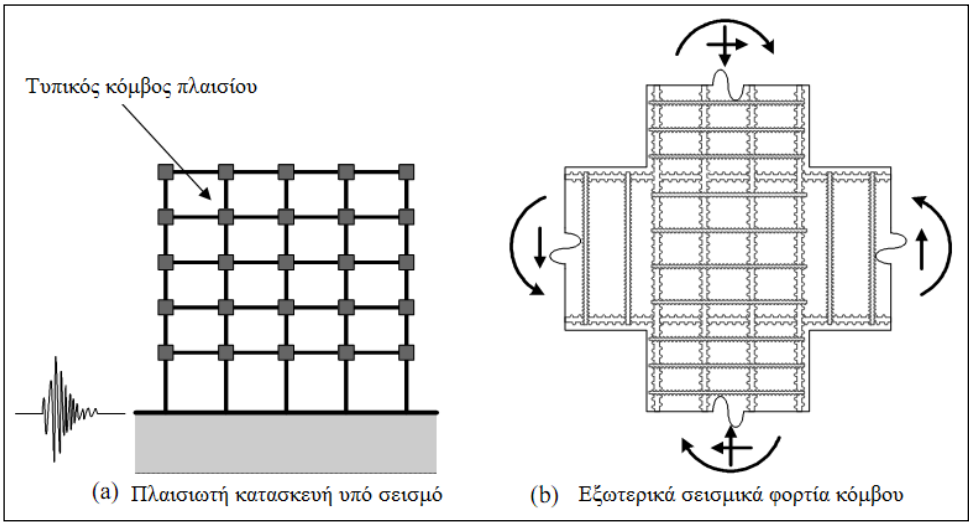
2.2.1.2. Με βάση την αναμενόμενη σεισμική απόκριση

Όταν κατά το σεισμό οι ανελαστικές παραμορφώσεις δε συμβαίνουν στις δοκούς ή στα υποστυλώματα στην άμεση παρειά του κόμβου, τότε αυτός, με κατάλληλη όπλιση είναι

δυνατόν να παραμείνει ελαστικός. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να επιτευχθεί ακόμα και στο σχεδιασμό "ασθενούς δοκού - ισχυρού υποστυλώματος" με μετατόπιση των πλαστικών αρθρώσεων των δοκών, μέσω κατάλληλης διαμόρφωσης λεπτομερειών όπλισης, σε κάποια απόσταση από την παρειά του κόμβου και ενίσχυση της όπλισης της παρειάς. Πάντως μια τέτοια πρακτική δεν είναι συνήθης, λόγω των αυξημένων απαιτήσεων που παρουσιάζονται σε πλαστικές παραμορφώσεις και της επιρροής της τέμνουσας. Στο συνήθη αντισεισμικό σχεδιασμό οι πλαστικές αρθρώσεις αναμένεται να αναπτυχθούν στα άκρα των δοκών σε άμεση γειτονία με τον κόμβο. Σε αυτή την περίπτωση ο κόμβος είναι πιθανό να εισέλθει στην ανελαστική περιοχή με συνέπειες στην απόκριση και στις απαιτήσεις σχεδιασμού που αναφέρθηκαν νωρίτερα.

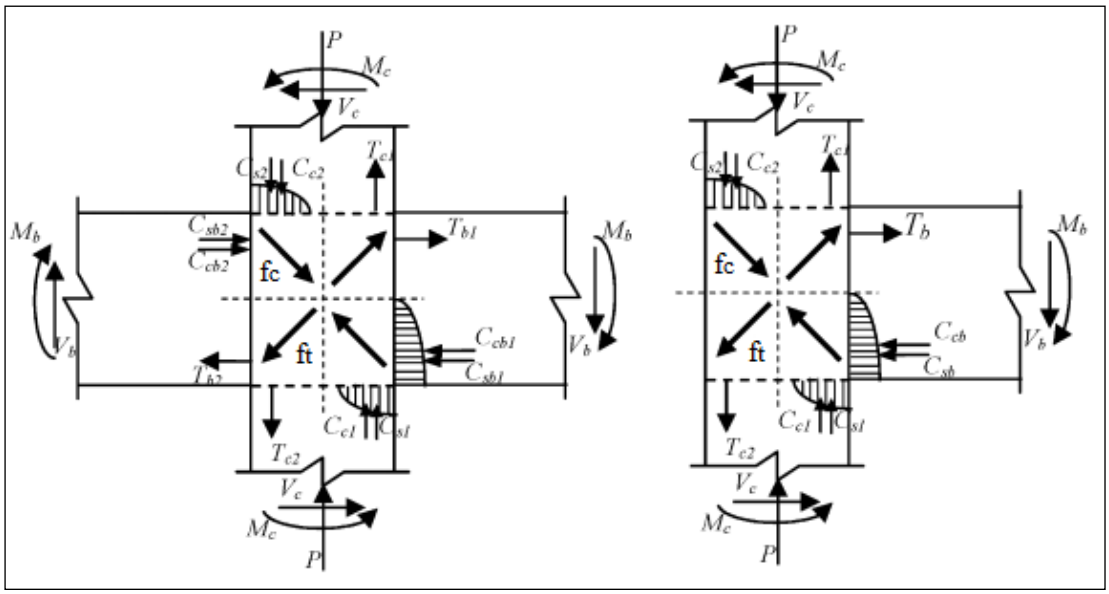
2.2.2. Εντατικά μεγέθη στους κόμβους

Στο **Σχήμα 2.5** φαίνεται μια πλαισιωτή κατασκευή υπό μέτρια έως σοβαρή σεισμική δράση. Τυπικά, υπό αυτή την κατανομή φορτίων, οι δοκοί αναπτύσσουν τη μέγιστη καμπτική τους αντοχή στα όρια του κόμβου ενώ ο διαμήκης οπλισμός των υποστυλωμάτων μεταφέρει εφελκυστικές δυνάμεις που υπερβαίνουν τη διαρροή. Στον αντισεισμικό σχεδιασμό η καμπτική αντοχή των δοκών είναι που θα καθορίσει και τις απαιτήσεις για τον κόμβο (Moehle, 2006)



Σχήμα 2.5. Εξωτερικά φορτία κόμβου σε πλαίσιο υπό σεισμική διέγερση

Οι εξωτερικές δράσεις από τις δοκούς και τα υποστυλώματα, καθώς και οι εσωτερικές κύριες τάσεις που αναπτύσσονται σε έναν τυπικό εσωτερικό (α) και έναν τυπικό εξωτερικό (β) κόμβο λόγω σεισμικής καταπόνησης φαίνονται στο **Σχήμα 2.6**.



Σχήμα 2.6. Εξωτερικές δράσεις και εσωτερικές εντάσεις (α) σε εσωτερικό και (β) εξωτερικό κόμβο

όπου:

C_{s1} Δύναμη θλιβόμενου διαμήκους οπλισμού κάτω υποστυλώματος

C_{s2} Δύναμη θλιβόμενου διαμήκους οπλισμού άνω υποστυλώματος

C_{sb} Δύναμη θλιβόμενου διαμήκους οπλισμού δοκού

C_{c1} Συνισταμένη θλιβόμενης ζώνης σκυροδέματος κάτω υποστυλώματος

C_{c2} Συνισταμένη θλιβόμενης ζώνης σκυροδέματος άνω υποστυλώματος

C_{cb} Συνισταμένη θλιβόμενης ζώνης σκυροδέματος δοκού

T_{c1} Δύναμη εφελκυόμενου οπλισμού κάτω υποστυλώματος

T_{c2} Δύναμη εφελκυόμενου οπλισμού άνω υποστυλώματος

T_b Δύναμη εφελκυόμενου οπλισμού δοκού

$V_{c1,2}$ Διατμητικές δυνάμεις κάτω και άνω υποστυλωμάτος

V_b Διατμητική δύναμη δοκού

f_c Θλιπτική κύρια τάση σκυροδέματος

f_t Εφελκυστική κύρια τάση σκυροδέματος

2.2.3. Διατμητική ένταση κόμβου

Κατά το σεισμό, ο κόμβος καλείται να παραλάβει μεταξύ άλλων τη διατμητική ένταση που αναπτύσσεται στην άνω παρειά του κόμβου από το άνω υποστύλωμα και να την μεταφέρει στη κάτω παρειά και στο κάτω υποστύλωμα. Η μεταφορά της ανακυκλιζόμενης αυτής διατμητικής έντασης θεωρείται (Καραγιάννης, 2008) η πλέον σημαντική λειτουργία του κόμβου και αποτελεί την πλέον κρίσιμη καταπόνηση. Ένα σημαντικό μέρος στη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των κόμβων αποτελεί ο υπολογισμός της αναπτυσσόμενης σε αυτόν διατμητικής έντασης και ο προσδιορισμός του μηχανισμού παραλαβής και μεταφοράς αυτής της έντασης μεταξύ των στοιχείων. Η εκτίμηση της διατμητικής έντασης που θα αναπτυχθεί στον κόμβο κατά το σεισμό και η σύγκριση της με τη διατμητική αντοχή του κόμβου που επίσης πρέπει να εκτιμηθεί, αποτελεί μέρος του σχεδιασμού των κόμβων στους σύγχρονους Κανονισμούς (π.χ. EC8, ACI 318-08).

Για επίπεδη καταπόνηση, η οριζόντια τέμνουσα που αναπτύσσεται σε ένα **εσωτερικό κόμβο** (**Σχήμα 2.7**) υπολογίζεται όπως παρακάτω με βάση τους συμβολισμούς που δίδονται στο **Σχήμα 2.6**:

$$V_{jh} = T_{b1} + C_{s2} + C_{c2} - V_{c2} = T_{b2} + C_{s1} + C_{c1} - V_{c1} \tag{2.1}$$

η μέση τιμή της τέμνουσας των δύο υποστυλωμάτων:

$$V_c = (V_{c1} + V_{c2})/2 \tag{2.2}$$

από ισορροπία δυνάμεων στη δοκό 2:

$$T_{b2} = C_{s2} + C_{c2} \tag{2.3}$$

αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.2) και (2.3) στη (2.1) η οριζόντια τέμνουσα του κόμβου γίνεται:

$$V_{jh} = T_{b1} + T_{b2} - V_c \tag{2.4}$$

προσεγγιστικά μπορεί να ληφθεί πως:

$$T_1 = A_{s1}\lambda\, f_y \text{ και } T_2 = A_{s2}\lambda\, f_y \tag{2.5}$$

όπου:
A_{s1} και A_{s2}, οι εφελκυόμενοι οπλισμοί των δοκών με βάση τη φορά του σεισμού στο **Σχήμα 2.6**. Με βάση τον αντισεισμικό σχεδιασμό συνίσταται να ισχύει $0.5 < \frac{A_{s2}}{A_{s1}} < 1$.

λ, ο συντελεστής υπεραντοχής του χάλυβα πέραν της τιμής διαρροής f_y που μπορεί να ληφθεί ως $\lambda = 1.25$.

Η σχέση (2.4) γίνεται πλέον:

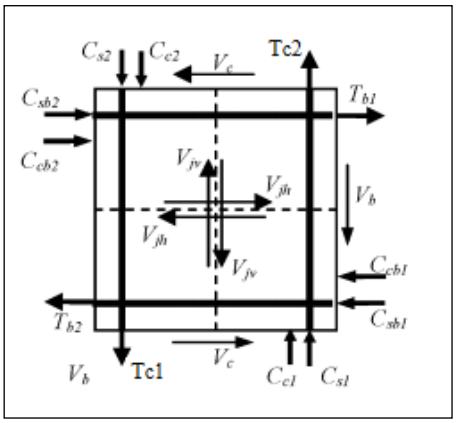
$$V_{jh} = 1.25(A_{s1} + A_{s2})\, f_y - V_c \tag{2.6}$$

η κατακόρυφη συνιστώσα της τέμνουσας V_{jv} προκύπτει συναρτήσει της οριζόντιας V_{jh} από ισορροπία ροπών στον κόμβο ως:

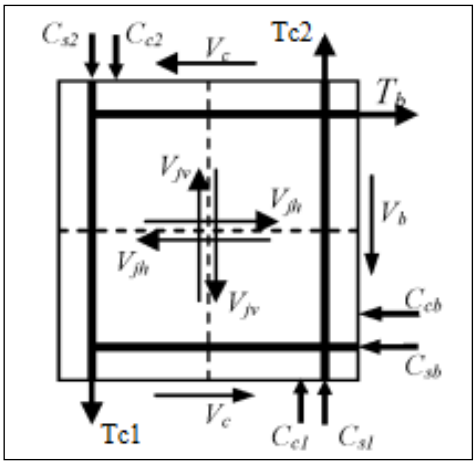
$$V_{jv} = (\frac{h_b}{h_c})\, V_{jh} \tag{2.7}$$

όπου:
h_b, το ύψος της διατομής της δοκού

h_c, το ύψος της διατομής του υποστυλώματος



Σχήμα 2.7. Οριζόντια και κατακόρυφη τέμνουσα που αναπτύσσεται σε εσωτερικό κόμβο



Σχήμα 2.8. Οριζόντια και κατακόρυφη τέμνουσα που αναπτύσσεται σε εξωτερικό κόμβο

Στην περίπτωση **εξωτερικού κόμβου** (**Σχήμα 2.8**) οι αντίστοιχες σχέσεις για την τέμνουσα προκύπτουν απλοποιημένες ως εξής:

$$V_{jh} = T_{b1} - V_c \tag{2.8}$$

$$V_{jh} = 1.25A_{s1}f_y - V_c \tag{2.9}$$

Η μέση οριζόντια διατμητική τάση τ που αναπτύσσεται σε εσωτερικό και εξωτερικό κόμβο προκύπτει ως εξής:

$$\tau = V_{jh}/(b_c h_c) \tag{2.10α}$$

Η μέση κατακόρυφη θλιπτική τάση σ προκύπτει ως εξής:

$$\sigma = V_{jv}/(b_c h_c) \tag{2.10β}$$

όπου:
b_c, το ελάχιστο μεταξύ του πλάτους του πυρήνα του υποστυλώματος και του πλάτους του θλιβόμενου πέλματος της δοκού αυξημένο κατά h_c

h_c, το πλάτος του πυρήνα κατά τη φορά του σεισμού

Οι κύριες τάσεις στο σώμα του κόμβου, η θλιπτική f_c και η εφελκυστική f_t, μπορούν να υπολογιστούν ως εξής (Tsonos, 2007):

$$f_{c,t} = \frac{\sigma}{2} \pm \frac{\sigma}{2}\sqrt{1 + \frac{4\tau^2}{\sigma^2}} \tag{2.11}$$

2.2.4. Ο τρόπος παραλαβής της τέμνουσας

Σύμφωνα με το μοντέλο των Park και Paulay (1975) και Paulay και Priestley (1992), οι διατμητικές δυνάμεις V_{jh} που καλείται να παραλάβει ο κόμβος, μεταφέρονται (α) κατά ένα μέρος, V_{ch}, από έναν διαγώνιο θλιπτήρα σκυροδέματος που φαίνεται να σχηματίζεται διαγωνίως μεταξύ των απέναντι γωνιών του κόμβου όπου βρίσκεται η θλιβόμενη παρειά των δοκών και του υποστυλώματος και (β) κατά ένα μέρος V_{sh}, από ένα μηχανισμό δικτυώματος που σχηματίζεται από τους οριζόντιους συνδετήρες του υποστυλώματος (που συνεχίζουν εντός του κόμβου) και κατακόρυφους οπλισμούς και τους μεταξύ τους θλιπτήρες που δημιουργούνται με το διαγώνια θλιβόμενο σκυρόδεμα, ρηγματωμένο λόγω της εφελκυστικής κύριας τάσης f_t. Και οι δύο μηχανισμοί εξαρτώνται από την αντοχή του σκυροδέματος στον πυρήνα του κόμβου. Επομένως η μέγιστη αντοχή του σκυροδέματος υπό διαξονική θλίψη / εφελκυσμό καθορίζει και τη μέγιστη αντοχή της σύνδεσης. Μετά την αστοχία του σκυροδέματος, η αντοχή στον κόμβο είναι περιορισμένη από τη σταδιακή θλίψη στις επιφάνειες των διαγώνιων ρωγμών και κυρίως στην επιφάνεια του κύριου επιπέδου αστοχίας (Tsonos, 2007). Για κάθε διεύθυνση, οριζόντια και κατακόρυφη, η

τέμνουσα που μπορεί να μεταφέρει ο κόμβος ισούται με το σύνολο των δυνάμεων που μπορούν να παραλάβουν οι δύο αυτοί μηχανισμοί:

$$V_{jh} = V_{ch} + V_{sh} \quad (2.12α)$$

$$V_{jv} = V_{cv} + V_{sv} \quad (2.12β)$$

αν ορίσουμε ως D_c τη δύναμη που μπορεί να παραλάβει ο διαγώνιος θλιπτήρας του σκυροδέματος τότε ισχύει για κάθε διεύθυνση:

$$V_{ch} = D_c \, cosa \quad (2.13α)$$

$$V_{cv} = D_c \, sina \quad (2.13β)$$

όπου, $tana = (\frac{h_b}{h_c})$

2.2.4.1. Ο μηχανισμός παραλαβής μέσω διαγώνιου θλιπτήρα σκυροδέματος

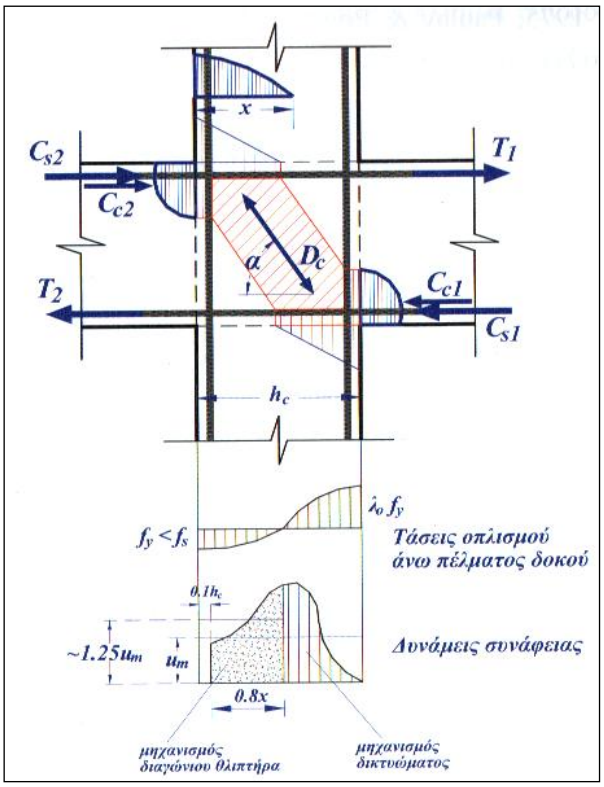
α) Εσωτερικοί κόμβοι

Η οριζόντια τέμνουσα του κόμβου, V_{ch}, που παραλαμβάνεται από το διαγώνιο θλιπτήρα σκυροδέματος, είναι η άνω οριζόντια συνιστώσα της δύναμης D_c (σχέση 2.13α) και ισούται με το άθροισμα της δύναμης της θλίβόμενης ζώνης της δοκού C_{c2} και της δύναμης ΔT_c, που μεταφέρουν στο σκυρόδεμα μέσω συνάφειας οι άνω χάλυβες του κόμβου, μείον την τέμνουσα V_{col} του υποστυλώματος (**Σχήμα 2.9** και σχέση 2.14).

$$V_{ch} = C_{c2} + \Delta T_c - V_{col} \quad (2.14)$$

Το τμήμα της συνολικής δύναμης συνάφειας των άνω οπλισμών των δοκών που διέρχονται μέσα από τον κόμβο, που είναι δυνατόν να θεωρήσουμε πως λειτουργεί ως δύναμη ΔT_c για το θλιπτήρα, εξαρτάται κατ' αρχήν από την κατανομή των δυνάμεων συνάφειας κατά μήκος του κόμβου σε μήκος h_c (**Σχήμα 2.9**). (Να σημειωθεί πως εδώ ως h_c λαμβάνεται το συνολικό μήκος του κόμβου. Στους Κανονισμούς, συντηρητικά το h_c αναφέρεται στον πυρήνα του υποστυλώματος). Λαμβάνοντας λοιπόν, υπόψη την εισχώρηση της διαρροής των χαλύβων εντός του κόμβου ($0.1h_c$) και πιθανές ειδικές συνθήκες που επικρατούν στην επικάλυψη, ένα τμήμα ίσο με $0.2h_c$ θεωρείται ότι έχει μηδενικές συνθήκες συνάφειας. Η μέση τιμή u_m των δυνάμεων συνάφειας κατά μήκος του συνολικού μήκους του κόμβου h_c είναι ίση με:

$$u_m = (T_1 + C_{s2})/h_c \quad (2.15)$$



Σχήμα 2.9. διαγώνιου θλιπτήρα και κατανομή τάσεων συνάφειας στον κόμβο

Ο θλιπτήρας για να σχηματιστεί, απαιτεί την ύπαρξη θλιβόμενης ζώνης στο άνω υποστύλωμα και γενικά έχει οριζόντια διάσταση όση και το βάθος της θλιβόμενης ζώνης του υποστυλώματος x. Από την κατανομή των δυνάμεων συνάφειας στο **Σχήμα 2.9**, φαίνεται πως η μέση τιμή τους στο μήκος αυτό είναι μεγαλύτερη από τη μέση τιμή της σχέσης (2.15). Αντικαθιστούμε λοιπόν την τιμή u_m με $1.25u_m$ και προκύπτει η σχέση:

$$\Delta T_c = 1.25u_m * 0.8x = u_m\, x = (T_1 + C_{s2})x/h_c \qquad (2.16)$$

Από τη σχέση (2.5) έχουμε ότι $T_1 = A_{s1}\lambda\, f_y$ οπότε η δύναμη των θλιβόμενων χαλύβων προκύπτει:

$$C_{s2} = \gamma\, f_y A_{s1} = \frac{\gamma}{\lambda}\, T_1 \qquad (2.17)$$

όπου για το συντελεστή γ μπορούμε να υποθέσουμε την τιμή 0.7 καθώς οι θλιβόμενοι χάλυβες μετά από λίγους κύκλους φόρτισης υφίστανται ολισθήσεις και δεν μπορούν να αναπτύξουν μεγαλύτερες τιμές τάσεων στη θλιβόμενη ζώνη (Paulay και Priestley, 1992). Η σχέση (2.16) γίνεται:

$$\Delta T_c = \frac{T_1\left(1+\frac{\gamma}{\lambda}\right)x}{h_c} = 1.56\, T_1\, \frac{x}{h_c} \qquad (2.18)$$

Θεωρώντας ίσο εμβαδόν για τους άνω A_{s1} και κάτω A_{s2} χάλυβες, σύνηθης παραδοχή σε εσωτερικό κόμβο σχεδιασμένο για σεισμικές δράσεις, (βέβαια για κόμβους παλαιών κατασκευών η σχέση απαιτεί τροποποίηση), η ισορροπία στη διατομή 2 της δοκού δίνει τη σχέση:

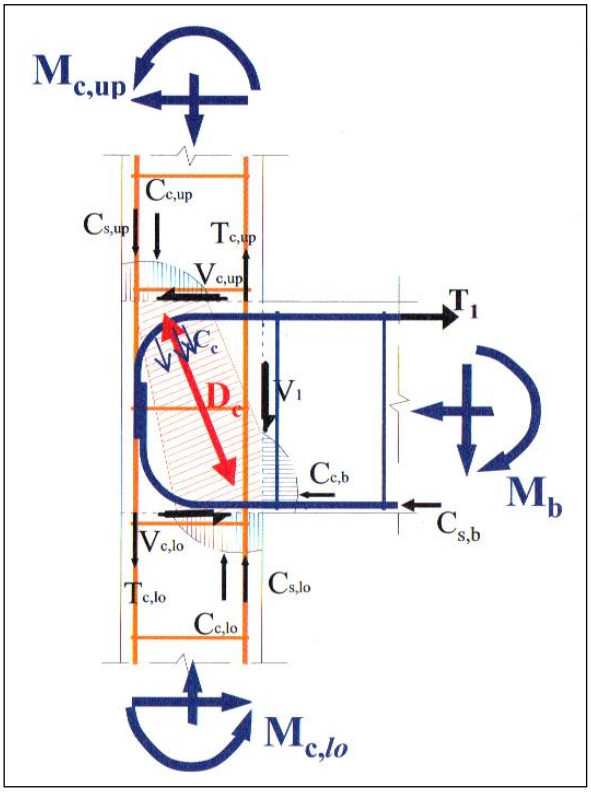
$$C_{c2} = T_2 - C_{s2} = T_1 - \frac{\gamma}{\lambda} T_1 = 0.44\, T_1 \qquad (2.19)$$

Τελικώς, η δύναμη V_{ch} που παραλαμβάνει ο διαγώνιος θλιπτήρας με βάση τις σχέσεις 2.14, 2.18, 2.19 είναι:

$$V_{ch} = C_{c2} + \Delta T_c - V_{col} = (0.44 + 1.56\, \frac{x}{h_c}) T_1 + V_{col} \qquad (2.20)$$

β) Εξωτερικοί κόμβοι

Όπως αναφέρθηκε, σε εξωτερικούς κόμβους, η οριζόντια τέμνουσα V_{jh} δίδεται από τη σχέση (2.9). Σε εξωτερικούς κόμβους επίσης παρατηρείται η δημιουργία διαγώνιου θλιπτήρα (**Σχήμα 2.10**) ο οποίος σχηματίζεται μεταξύ του καμπυλωμένου μέρους της αγκύρωσης των άνω εφελκυόμενων οπλισμών του κόμβου και της περιοχής μεταξύ της θλιβόμενης ζώνης δοκού και υποστυλώματος.



Σχήμα 2.10. Μηχανισμός διαγώνιου θλιπτήρα σε εξωτερικό κόμβο

Η οριζόντια τέμνουσα του κόμβου, V_{ch}, που παραλαμβάνεται από το διαγώνιο θλιπτήρα σκυροδέματος, είναι η άνω οριζόντια συνιστώσα της δύναμης D_c (σχέση 2.13α). Ισούται με το άθροισμα της δύναμης $C_{c,b}$ που δημιουργείται στη θλιβόμενης ζώνης της δοκού, με τη δύναμη ΔT_c, που μεταφέρουν στο σκυρόδεμα μέσω συνάφειας οι κάτω χάλυβες του κόμβου, μείον την τέμνουσα V_{col} του υποστυλώματος (σχέση 2.21).

$$V_{ch} = C_{c,b} + \Delta T_c - V_{col} \tag{2.21}$$

Από την ισορροπία της διατομής της δοκού και τις σχέσεις $T_1 = 1.25\, f_y A_{s1}$, $C_{s,b} = 0.7\, f_y A_{s2}$, προκύπτει η σχέση για τη δύναμη των θλιβόμενων χαλύβων και ίσο εμβαδόν οπλισμού πάνω και κάτω:

$$C_{s,b} = 0.56 * T_1 \tag{2.22}$$

Τότε έχουμε για τη δύναμη στη θλιβόμενη ζώνη του σκυροδέματος:

$$C_{c,b} = T_1 - C_{s,b} = 0.44\, T_1 \tag{2.23}$$

Η δύναμη ΔT_c, που μεταφέρουν στο σκυρόδεμα μέσω συνάφειας οι οριζόντιοι οπλισμοί εξαρτάται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, από την κατανομή των δυνάμεων συνάφειας. Η κατανομή αυτή δεν είναι ομοιόμορφη και έχει τις μικρότερες τιμές κοντά στο καμπύλο τμήμα της αγκύρωσης. Θεωρώντας ένα μήκος ίσο με $0.7h_c$ όπου οι τάσεις συνάφειας δεν είναι μηδενικές, προκύπτει η μέση δύναμη συνάφειας:

$$u_m = \frac{C_{c,b}}{0.7h_c} = 1.4\, (\frac{C_{c,b}}{h_c}) \tag{2.24}$$

Οι δυνάμεις συνάφειας συνεισφέρουν στο θλιπτήρα μόνο στο μήκος της θλιβόμενης ζώνης του υποστυλώματος όπου και αυτός δημιουργείται, ενώ ενεργό τμήμα αυτής της ζώνης δεν μπορεί να θεωρηθεί το σύνολο. Επομένως η δύναμη ΔT_c γράφεται:

$$\Delta T_c = u_m * 0.8x = 1.12\, C_{s,b}\, \frac{x}{h_c} \tag{2.25}$$

και μέσω της (2.23):

$$\Delta T_c = 0.493\ T_1\, \frac{x}{h_c} \tag{2.26}$$

Τελικώς, η δύναμη V_{ch} που παραλαμβάνει ο διαγώνιος θλιπτήρας με βάση τις σχέσεις 2.21, 2.23, 2.26 είναι:

$$V_{ch} = C_{c,b} + \Delta T_c - V_{col} = \left(0.44\ + 0.493\, \frac{x}{h_c}\right) T_1\ - V_{col} \tag{2.27}$$

Το μέγεθος x της θλιβόμενης ζώνης του υποστυλώματος, μπορεί να δοθεί, για στοιχεία υπό κυριαρχούσα θλίψη, από μια σχέση της μορφής:

$$x = (0.25 + 0.85\frac{N_c}{f_c A_c})h_c \tag{2.28}$$

Για εσωτερικούς κόμβους, μια προσεγγιστική σχέση για την αντοχή του θλιπτήρα ο οποίος βρίσκεται σε μια σύνθετη εντατική κατάσταση με ύπαρξη ταυτόχρονα θλίψης και εγκάρσιου εφελκυσμού μπορεί να δοθεί από την παρακάτω σχέση:

$$F_{D_c} = 400 * (1 - \frac{f_c}{250})f_c\sqrt{1 - \frac{\frac{N_c}{f_c A_c}}{0.6(1-\frac{f_c}{250})}}\, b_c h_c \tag{2.29α}$$

με f_c σε MPa. Για την τιμή f_c μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε η χαρακτηριστική τιμή f_{ck} είτε μια τιμή $f_c{}'$ για περισφιγμένο σκυρόδεμα σύμφωνα με κάποιο έγκυρο μοντέλο (π.χ. Paulay και Priestley, 1992).

Για εξωτερικούς κόμβους η σχέση (2.29α) αρκεί να πολλαπλασιαστεί με έναν μειωτικό συντελεστή ίσο με 0.8.

Ένα πάνω όριο της κύριας εφελκυστικής τάσης για την αντοχή του διαγώνιου θλιπτήρα κατά την πρώτη ρηγμάτωση δίδεται από την παρακάτω προσεγγιστική, συντηρητική σχέση (Pampanin et al. 2002):

$$f_t = 0.2\sqrt{f_c} \tag{2.29β}$$

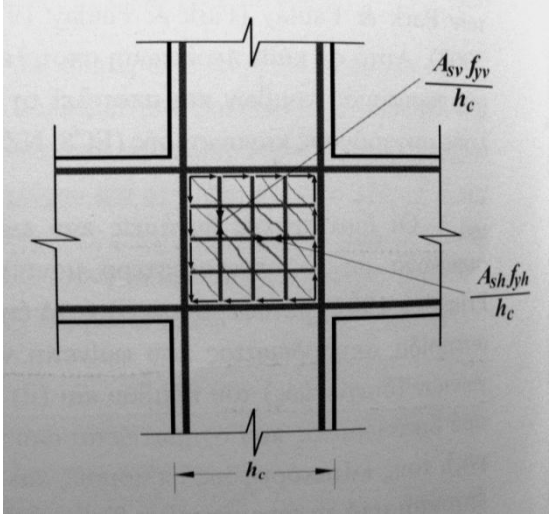
όπου, f_c η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε MPa.

2.2.4.2. Ο μηχανισμός του δικτυώματος οπλισμών - σκυροδέματος

α) Εσωτερικοί κόμβοι

Το τμήμα της οριζόντιας τέμνουσας που θα πρέπει να παραληφθεί από το μηχανισμό του δικτυώματος (**Σχήμα 2.11**), V_{sh}, με βάση τις σχέσεις (2.4), (2.12α), (2.20), είναι:

$$\begin{aligned} V_{sh} &= V_{jh} - V_{ch} = \\ &= 2T_1 - V_{col} - \left[\left(0.44 + 1.56\frac{x}{h_c}\right)T_1 - V_{col}\right] = \\ &= 1.56\left(1 - \frac{x}{h_c}\right)T_1 \end{aligned} \tag{2.30}$$



Σχήμα 2.11. Σχηματισμός μηχανισμού δικτυώματος για τη μεταφορά της τέμνουσας

β) Εξωτερικοί κόμβοι

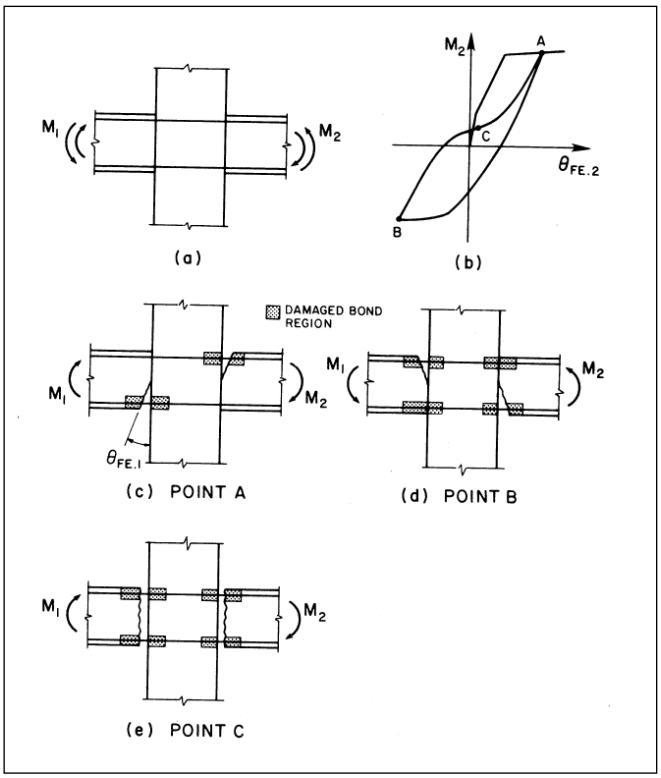
Για εξωτερικούς κόμβους η σχέση (2.30) με χρήση των (2.8), (2.12α), (2.27) γίνεται:

$$V_{sh} = V_{jh} - V_{ch} = T_1 - V_{col} - \left[\left(0.44 + 0.493\,\frac{x}{h_c}\right)T_1 - V_{col}\right] =$$
$$= \left(0.56 - 0.493\,\frac{x}{h_c}\right)T_1 \qquad (2.31)$$

2.2.5. Επιρροή της αγκύρωσης στη μηχανική συμπεριφορά του κόμβου

Η αποδιοργάνωση της συνάφειας ξεκινά αμέσως μόλις έχουμε διαρροή του χάλυβα ο οποίος είναι αγκυρωμένος στον πυρήνα του κόμβου ενώ έχει αποδειχθεί (Filippou, Popov και Bertero, 1983) πως η συγκεντρωμένη παραμόρφωση στην πάκτωση λόγω συνάφειας του οπλισμού μέσα στον κόμβο μπορεί να συνεισφέρει έως και 50% στα συνολικά βέλη της σύνδεσης δοκού - υποστυλώματος (fixed end rotation). Μεγάλος αριθμός ανακυκλίσεων της ροπής προκαλεί καταστροφή της συνάφειας της ράβδου στην περιοχή της ρωγμής στην πάκτωση της δοκού στην παρειά του κόμβου, οδηγώντας σε σημαντικές ολισθήσεις και μεγάλες στροφές του στοιχείου. Επίσης, η ρωγμή στη θέση πάκτωσης της δοκού, μετά από μεγάλες ανακυκλίσεις της ροπής, είναι πιθανό να παραμένει μονίμως ανοικτή και στις δύο παρειές εκατέρωθεν του κόμβου, λόγω της παρουσίας εναλασσόμενων τεμνουσών δυνάμενων και της σχετικής μετατόπισης μεταξύ των παρειών της ρωγμής. (**Σχήμα 2.12**). Ως αποτέλεσμα, οι διαμήκεις οπλισμοί της δοκού που είναι αγκυρωμένοι σε εσωτερικό κόμβο, υπόκεινται σε ανακυκλιζόμενη θλίψη από το ένα άκρο τους και εφελκυσμό από το άλλο με συνέπεια την πλήρη απώλεια της αγκύρωσης σε πλείστες όσες περιπτώσεις. Τότε η θλίψη εισάγεται στον κόμβο μόνο από τις θλιβόμενες ράδβους του οπλισμού, σημειακά,

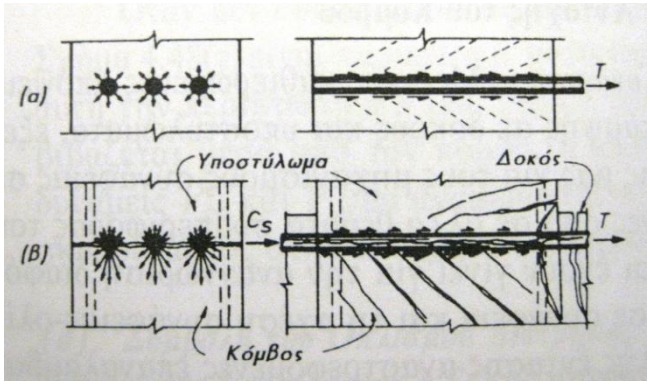
περιορίζοντας το εύρος του διαγώνιου θλιπτήρα. Σύμφωνα με το μοντέλο των Paulay και Priestley (1992), μετά από την απώλεια της αγκύρωσης των διαμήκων οπλισμών της δοκού οι μηχανισμοί μεταφοράς τέμνουσας που περιγράφηκαν νωρίτερα, δεν μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά. Συγκεκριμένα ο μηχανισμός του δικτυώματος μπορεί να αναπτυχθεί μόνο αν διατηρείται επαρκής τάση συνάφειας κατά μήκος του οπλισμού στον κόμβο ενώ ο μηχανισμός του διαγώνιου θλιπτήρα, παρ' ότι μπορεί να λειτουργήσει επιβαρύνεται σημαντικά (Kitayama et al., 1991). Πάντως να υπογραμμιστεί πως, στην περίπτωση όπου η ρωγμή στη θέση πάκτωσης της δοκού δεν παραμένει μονίμως ανοικτή αλλά μπορεί κλείνει στη θλιβόμενη ζώνη κατά τις ανακυκλίσεις, η επιρροή της απώλειας της αγκύρωσης των οπλισμών έχει διαφορετική επίπτωση στον μηχανισμό του διαγώνιου θλιπτήρα όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Shiohara, 2001, 2003 και Κεφ. 2.2.6.4 του παρόντος) και προκύπτει εν μέρη απ' τα αποτελέσματα της ανάλυσης στην παρούσα εργασία (Κεφ. 6.2.1.3). Οι δυσμενέστερες απαιτήσεις σε συνάφεια λοιπόν, όπως θα περιγραφεί και παρακάτω, παρατηρούνται στους εσωτερικούς κόμβους. Βέβαια σε ακραίους κόμβους, παρ' ότι οι απαιτήσεις σε συνάφεια μπορεί να είναι σχετικά πιο ευμενείς, η κακή αγκύρωση των οπλισμών της δοκού μπορεί επίσης να προκαλέσει την αστοχία όπως έχει συχνά αποδειχθεί πειραματικά (Pampanin et al. 2002, Καραγιάννης, 2008).



Σχήμα 2.12. Παραμένον άνοιγμα ρωγμών και καταστροφή της συνάφειας σε εσωτερικό κόμβο υπό ανακυκλιζόμενη ροπή

Σε ότι αφορά τις συνθήκες συνάφειας, γενικά, η ποιότητα της συνάφειας της ράβδου οπλισμού της δοκού μειώνεται σημαντικά στο σκυρόδεμα που βρίσκεται εκτός του πυρήνα του κόμβου. Εντός του πυρήνα μπορούν να αναπτυχθούν υψηλές τάσεις συνάφειας λόγω της παρουσίας περίσφιγξης (εφόσον υπάρχει) και των εγκάρσιων δοκών. Ως αποτέλεσμα αυτών των μεταβολών, η σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης δεν είναι σταθερή για όλο το μήκος της ράβδου. Επιπλέον, οι τάσεις συνάφειας που επικρατούν μέσα στον κόμβο είναι διαφορετικές και κατά βάση δυσμενέστερες από αυτές που προσομοιώνουμε στις συνήθεις πειραματικές δοκιμές (**Σχήμα 2.13**).

Οι άνω ράβδοι των δοκών, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, καλούνται να μεταβιβάσουν πολύ μεγάλη δύναμη μέσω συνάφειας, λόγω της ύπαρξης εφελκυσμού από τη μία και θλίψης από την άλλη πλευρά, ενώ η ύπαρξη εγκάρσιου εφελκυσμού από την κάμψη του υποστυλώματος ευνοεί την ανάπτυξη των ακτινικών ρωγμών αστοχίας λόγω συνάφειας κατά μήκος του άνω οπλισμού. Βέβαια, το θλιπτικό πεδίο που δημιουργείται λόγω της αξονικής δύναμης που ασκείται στο υποστύλωμα, δρα ευεργετικά στον συγκεκριμένο μηχανισμό αλλά συνήθως δεν είναι επαρκές, δεδομένων και των περιορισμών που απαιτούνται στο αξονικό φορτίο για λόγους πλαστιμότητας του μέλους. Στα παραπάνω έρχεται να προστεθεί το γεγονός ότι η δύναμη συνάφειας από της άνω ράβδου, δεν μεταβιβάζεται ομοιόμορφα στο περιβάλλον σκυρόδεμα, αλλά πρέπει να μεταφερθεί κατά βάση προς τα κάτω, όπου δημιουργείται ο διαγώνιος θλιπτήρας, δημιουργώντας έτσι πολύ μεγαλύτερες απαιτήσεις συνάφειας σε αυτή την περιοχή που έτσι και αλλιώς είναι βεβαρημένη (περιοχή συνάφειας ΙΙ). Υπό αυτές τις συνθήκες ο μηχανισμός μεταβίβασης δυνάμεων από τις ράβδους στο σκυρόδεμα μέσω συνάφειας είναι ιδιαίτερα ασθενής.



Σχήμα 2.13. Τάσεις συνάφειας (α) σε απλή αγκύρωση, (β) σε ράβδο εντός του κόμβου

Με βάση τα παραπάνω, οι παρακάτω παράγοντες επηρεάζουν την απόκριση συνάφειας (Paulay και Priestley, 1992):

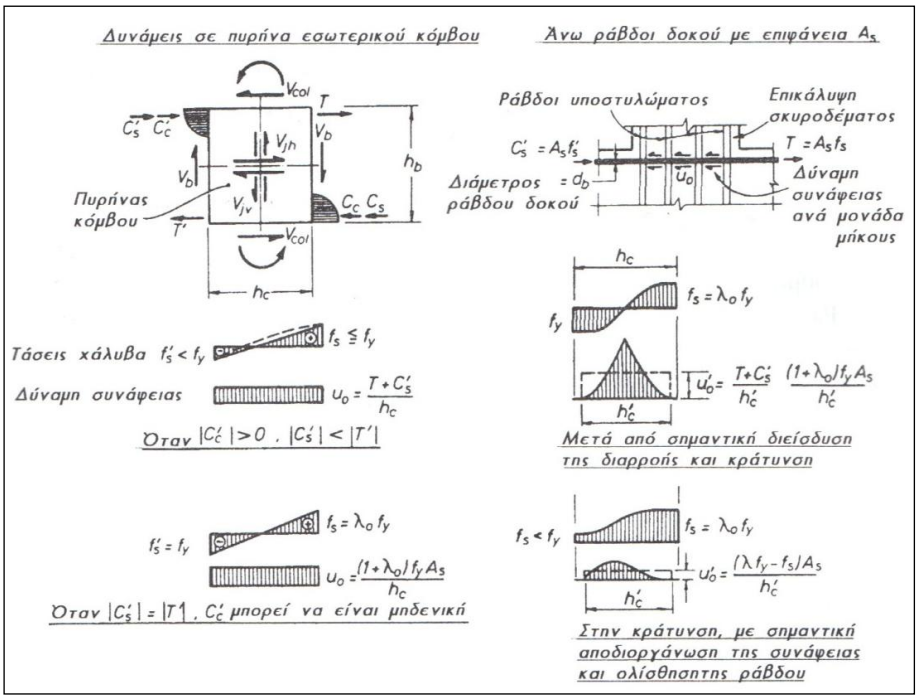
1. Η ύπαρξη επαρκούς περίσφιξης εγκάρσια και θλιπτικών πεδίων τάσεων κατά τη διαμήκη έννοια της ράβδου είναι καθοριστική για τη συμπεριφορά της συνάφειας. Η περίσφιξη μπορεί να επιτευχθεί με την ύπαρξη αξονικού θλιπτικού φορτίου στο υποστύλωμα, με την παρουσία κατακόρυφων οπλισμών από το υποστύλωμα, με την παρουσία πυκνών συνδετήρων στον πυρήνα του κόμβου και τέλος με την ύπαρξη εγκάρσιας θλίψης στο σκυρόδεμα από τα εγκάρσια στοιχεία και την πλάκα.
2. Η διάμετρος της ράβδου d_b. Παρ' ότι δεν έχει σημαντική επίδραση στην αντοχή συνάφειας, θα πρέπει, για ίδια παραλαμβανόμενη δύναμη, (η οποία έχει ένα πάνω όριο λόγω της τοπικής αντοχής συνάφειας), να παραμένει σταθερός ο λόγος ενεργού μήκους αγκύρωσης - διαμέτρου: $\frac{l_e}{d_b} = \sigma\tau\alpha\theta$.
3. Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος είναι αυτή που σε περίπτωση ανακυκλιζόμενης φόρτισης επηρεάζει την τοπική αντοχή συνάφειας ενώ αντίθετα η θλιπτική αντοχή δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο. Η αντοχή θα μπορούσε να αυξηθεί με την προσθήκη ινών οπλισμού στο σκυρόδεμα.
4. Η καθαρή εγκάρσια απόσταση μεταξύ των οπλισμών επηρεάζει σε κάποιο βαθμό την αντοχή της συνάφειας, για αποστάσεις μικρότερες του $4d_b$, παρατηρείται μείωση έως και 20%.

Σε πειραματικές μελέτες έχει μετρηθεί, λαμβάνοντας υπόψη τις πιο δυσμενείς συνθήκες τάσεων, πως σχετικές μεταθέσεις ορόφων τουλάχιστον 2.5% και πλαστιμότητες μετατοπίσεων τουλάχιστον 6, μπορούν να επιτευχθούν αν ικανοποιείται η παρακάτω συντηρητική σχέση:

$$\left(\frac{d_b}{h_c}\right) f_y \leq 11\ (MPa) \tag{2.32}$$

Η κατανομή των τάσεων συνάφειας εντός του κόμβου για διάφορες συνθήκες τάσεων στα άκρα των διαμήκων ράβδων της δοκού φαίνεται στο **Σχήμα 2.14**. Η προτεινόμενη τιμή σχεδιασμού για τη μέση τάση συνάφειας u_m κατά μήκος των ράβδων μήκους ίσου προς το πλάτος h_c του κόμβου δίδεται από την παρακάτω σχέση (Paulay και Priestley, 1992):

$$u_m \approx 1.35\sqrt{f_c'}\ (MPa) \tag{2.33}$$



Σχήμα 2.14. Κατανομή τάσεων συνάφειας άνω ράβδων δοκού σε κόμβο

2.2.6. Εναλλακτικό μοντέλο διατμητικής αστοχίας κόμβων (Shiohara, 2001, 2003)

Τα υπάρχοντα μοντέλα διατμητικής αστοχίας κόμβων, που υιοθετούνται μάλιστα, από πολλούς σύγχρονους κανονισμούς (Eurocode 8, NZS 3101) βασίζονται στην ύπαρξη των μηχανισμών διαγώνιου θλιπτήρα και δικτυώματος. Αυτοί οι μηχανισμοί, δημιουργήθηκαν αρχικά για να περιγράψουν την ισορροπία του κόμβου δοκού - υποστυλώματος. Επεκτάθηκαν αργότερα για να περιγράψουν και την αιτία της διατμητικής αστοχίας του κόμβου, υιοθετώντας την υπόθεση πως η διατμητική αστοχία επέρχεται όταν η διατμητική δύναμη στον κόμβο ξεπεράσει τη διατμητική του αντοχή. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούν το διαγώνιο θλιπτήρα και το δικτύωμα, θεωρούν ως διατμητική αστοχία την υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος του θλιπτήρα και τη διαρροή του εγκάρσιου οπλισμού του κόμβου αντίστοιχα. Από την ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων όμως, αποδεικνύεται πως τα μοντέλα αυτά δεν μπορούν να περιγράψουν με ικανοποιητικό τρόπο τη μορφή της διατμητικής αστοχίας και την πραγματική συμπεριφορά του κόμβου.

2.2.6.1. Ορισμός της διατμητικής δύναμης στον κόμβο

Ο ορισμός της διατμητικής δύναμης του κόμβου, V_{jh}, δόθηκε μέσω της σχέσης (2.1), ως μια εσωτερική δύναμη που ασκείται στο ελεύθερο σώμα του κόμβου στο οριζόντιο επίπεδο. Για να υπολογιστεί η διατμητική αυτή δύναμη σε ένα πείραμα, απαιτείται η χρήση

μηκυνσιομέτρων, ώστε να υπολογιστούν οι εφελκυστικές δυνάμεις στους άνω και κάτω οπλισμούς. Επιπλέον, ένα ανελαστικό μοντέλο για το χάλυβα, είναι αναγκαίο όταν οι τάσεις ξεπερνούν το γραμμικό ελαστικό τμήμα. Για να καθοριστούν οι συνολικές δυνάμεις στους άνω και κάτω οπλισμούς της δοκού, οι παραμορφώσεις σε κάθε διαμήκη οπλισμό πρέπει να καταγράφονται κατά τη διάρκεια του πειράματος, κάτι που είναι μη ρεαλιστικό και στα συνήθη πειράματα δεν εφαρμόζεται. Η σχέση (2.1) μπορεί να ξαναγραφτεί χρησιμοποιώντας τον ορισμό της ροπής M_b στην παρειά της δοκού. Η ροπή M_b ισούται με το γινόμενο της εφελκυστικής δύναμης του οπλισμού και του μοχλοβραχίονα των εσωτερικών δυνάμεων j_b, υποθέτοντας πως δεν υπάρχει αξονική δύναμη στη δοκό.

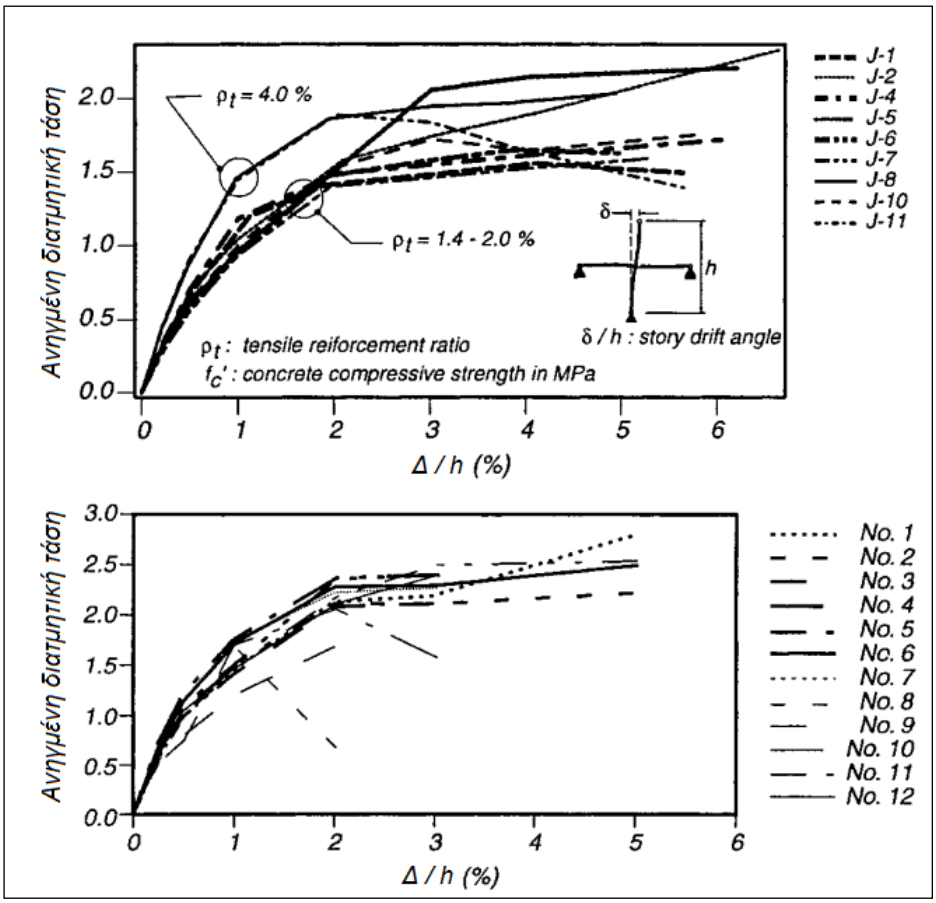
$$V_{jh} = \frac{M_b}{j_b} + \frac{M_b'}{j_b'} - V_c \tag{2.34}$$

Λόγω της δυσκολίας άμεσου υπολογισμού των εφελκυστικών δυνάμεων των οπλισμών, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η σχέση (2.34) που ονομάζεται και "ψευδο-διατμητική δύναμη κόμβου", χρησιμοποιείται πολύ συχνά στη βιβλιογραφία και στο σχεδιασμό των κόμβων, για τον καθορισμό της διατμητικής απαίτησης στον κόμβο, υιοθετώντας την υπόθεση πως ο μοχλοβραχίονας j_b παραμένει σταθερός κατά τη διάρκεια του πειράματος. Με βάση αυτή την υπόθεση, οι διατμητικές τάσεις στον κόμβο παραμένουν ανάλογες της τέμνουσας του ορόφου σε κάθε στιγμή.

Η σχέση (2.34) όμως, δεν είναι κατάλληλη για τον καθορισμό ενός μοντέλου διατμητικής αστοχίας κόμβου, καθώς η βασική υπόθεση ότι ο μοχλοβραχίονας j_b παραμένει σταθερός δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Η αλλαγή στο j_b κατά τη διάρκεια του πειράματος οφείλεται στη μη-γραμμική σχέση τάσεων - παραμορφώσεων των υλικών, καθώς και στη σχέση ολίσθησης - συνάφειας μεταξύ του διαμήκους οπλισμού των δοκών και του περιβάλλοντος σκυροδέματος. Η σημασία της υιοθέτησης μιας ρεαλιστικής τιμής για το j_b υπογραμμίζεται και από άλλους ερευνητές (Hakuto et al., 1999).

2.2.6.2. Διατμητική τάση στον κόμβο

Από την επανεξέταση των πειραματικών αποτελεσμάτων σε 20 εσωτερικούς κόμβους δοκού - υποστυλώματος, προέκυψε το συμπέρασμα πως η διατμητική τάση του κόμβου (όπως ορίστηκε από τη σχέση 2.10α) αυξανόταν μονοτονικά με την αύξηση της σχετικής μετάθεσης του ορόφου στην πλειοψηφία των δοκιμίων (**Σχήμα 2.15**). Αν και η διατμητική τάση του κόμβου αυξανόταν, ενώ ταυτόχρονα το εύρος των διαγώνιων διατμητικών ρωγμών μέσα στο σώμα του κόμβου μεγάλωνε εξίσου.

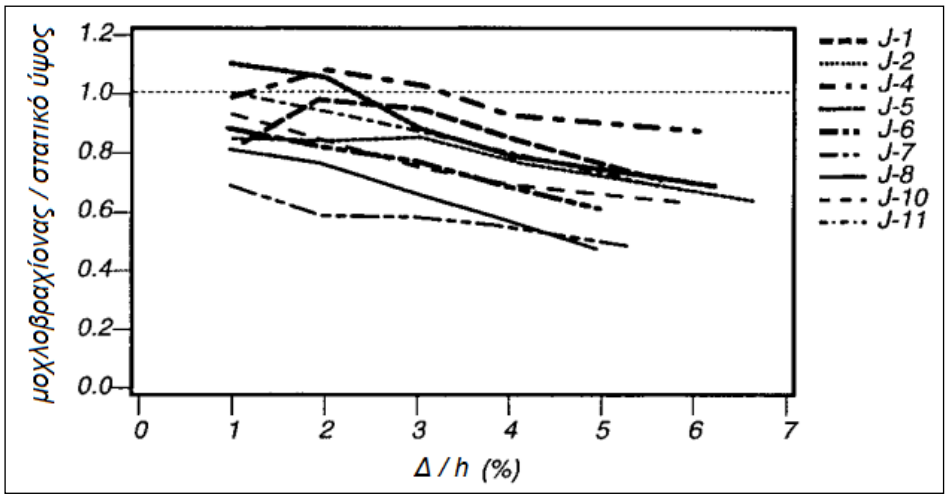


Σχήμα 2.15. Σχέση διατμητικής τάσεως κόμβου - σχετικής μετάθεσης ορόφου στα σημεία μέγιστου φορτίου, υπολογίζονται με χρήση της σχέσης (2.1) όπως προέκυψε για τα διάφορα δοκίμια που εξετάστηκαν (Shiohara, 2001)

Επομένως οι ερευνητές συμπεραίνουν ότι η αύξηση των διατμητικών παραμορφώσεων του κόμβου και η μείωση της τέμνουσας ορόφου για μεγάλες σχετικές μετατοπίσεις ορόφου, δεν είναι αποτέλεσμα της απομείωσης της διατμητικής τάσης του κόμβου. Από αυτά αποδεικνύεται πως στα πειράματα που εξετάστηκαν, οι κόμβοι δοκού - υποστυλώματος διατήρησαν τη διατμητική αντοχή τους σε κάθε στιγμή, παρ' ότι οι διατμητικές παραμορφώσεις αυξάνονταν και η τέμνουσα του ορόφου μειώθηκε.

2.2.6.3. Περιορισμός του μοχλοβραχίονα των εσωτερικών δυνάμεων

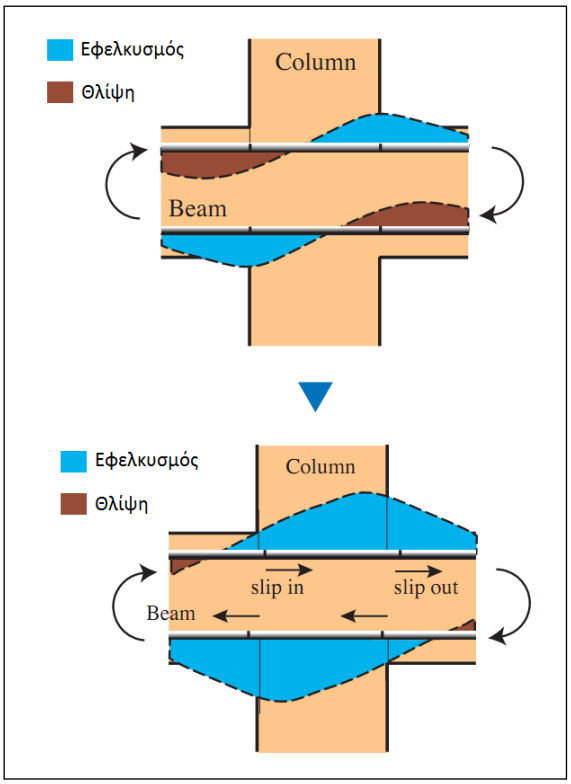
Διαπιστώθηκε άρα πως το μέγεθος του μοχλοβραχίονα j_b μειωνόταν με την αύξηση της σχετικής μετάθεσης ορόφου σε όλα τα δοκίμια (**Σχήμα 2.16**). Ο μοχλοβραχίονας υπολογίζεται διαιρώντας τη ροπή στην παρειά της δοκού με την εφελκυστική δύναμη στους διαμήκεις χάλυβες. Επομένως, η πτώση της τέμνουσας ορόφου, οφείλεται στον περιορισμό της καμπτικής αντίστασης των δοκών λόγω της μείωσης του μοχλοβραχίονα των εσωτερικών δυνάμεων.



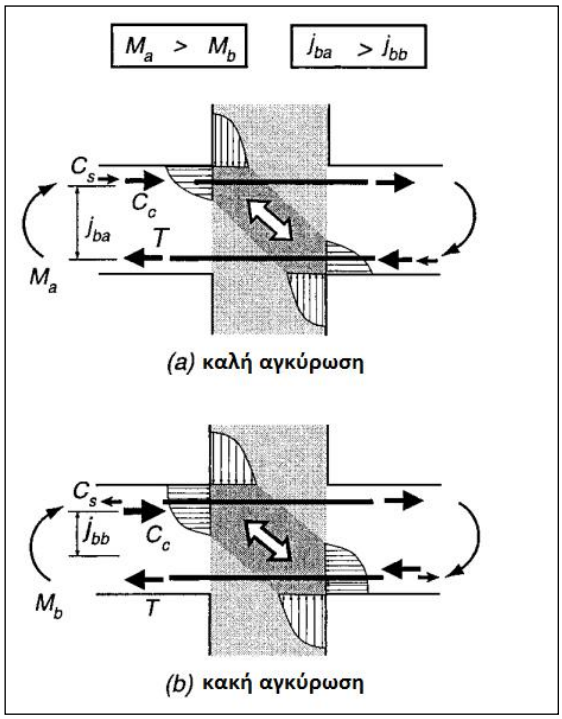
Σχήμα 2.16. Μείωση του μοχλοβραχίονα j_b στην κρίσιμη περιοχή της δοκού συναρτήσει της σχετικής μετάθεσης ορόφου

2.2.6.4. Αλλαγή της εντατικής κατάστασης στο θλιβόμενο οπλισμό

Η πτώση της τέμνουσας ορόφου αποδίδεται στην απομείωση των τάσεων λόγω σταδιακής απώλειας της αγκύρωσης των διαμήκων οπλισμών της δοκού που περνούν μέσα από τον κόμβο. Αν η τάση συνάφειας των οπλισμών, φτάσει τη μέγιστη αντοχή της και η σχετική μετάθεση ορόφου συνεχίσει να αυξάνεται, οι εφελκυόμενοι ράβδοι ολισθαίνουν έξω από τον κόμβο, ενώ οι θλιβόμενες ράβδοι θα ολισθήσουν μέσα στον κόμβο. Ένα μεγαλύτερο τμήμα της ράβδου βρίσκεται πλέον υπό εφελκυσμό και έτσι η δύναμη στους θλιβόμενους οπλισμούς μειώνεται (**Σχήμα 2.17**). Σαν συνέπεια, απαιτείται αύξηση του βάθους της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος ώστε να διατηρηθεί η ισορροπία των δυνάμεων. Έτσι όμως μειώνεται ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων και άρα και η καμπτική αντίσταση της δοκού (**Σχήμα 2.18**). Συμπερασματικά, η απομείωση της τέμνουσας ορόφου, οφείλεται στην ύπαρξη ενός "πάνω ορίου" στην ικανότητα αγκύρωσης των διαμήκων οπλισμών της δοκού στο σώμα του κόμβου και δεν οφείλεται στην αστοχία του συστήματος αντίστασης σε τέμνουσα.



Σχήμα 2.17. Σταδιακή απομείωση της θλιπτικής δύναμης των ράβδων λόγω απώλειας συνάφειας (Shiohara, 2003)



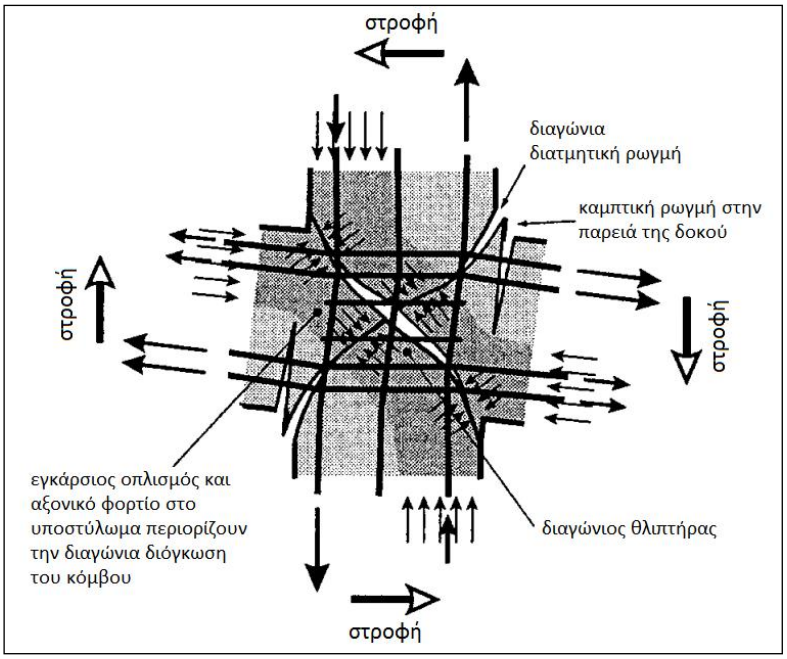
Σχήμα 2.18. Επιρροή της απώλειας της αγκύρωσης στο μηχανισμό παραλαβής φορτίου μέσα στον κόμβο

2.2.6.5. Παράγοντες που συνεισφέρουν στη διατμητική παραμόρφωση του κόμβου

Από τη μέτρηση των διατμητικών παραμορφώσεων του κόμβου, διαπιστώθηκε πως η συνεισφορά της διαγώνιας θλιπτικής παραμόρφωσης είναι μικρότερη του 20% της συνολικής. Δεν παρατηρήθηκε απότομη αύξηση της διαγώνιας θλιπτικής παραμόρφωσης ακόμα και μετά την έναρξη πτώσης της τέμνουσας ορόφου, ενώ η εμφανής επιφανειακή θλιπτική αστοχία του σκυροδέματος περιορίστηκε σε μια μικρή περιοχή στο κέντρο του κόμβου. Η τέμνουσα του κόμβου δεν μειώθηκε καθώς η θλιπτική δύναμη παραλήφθηκε απ' το διαγώνιο θλιπτήρα, ο οποίος είχε και αυξημένο πλάτος, παρ' ότι είχε συμβεί τοπική αστοχία του σκυροδέματος. Τελικά, οι ερευνητές συμπέραναν ότι το μεγαλύτερο μέρος της διατμητικής παραμόρφωσης του κόμβου οφείλεται στη διαγώνια εφελκυστική ρηγμάτωση.

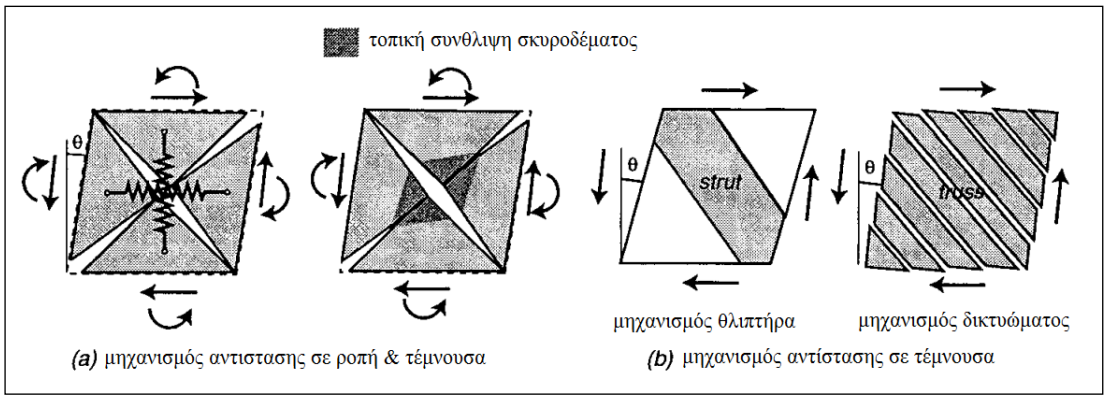
2.2.6.6. Περιγραφή του νέου μοντέλου

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, κατά τη διατμητική αστοχία του κόμβου, η διατμητική παραμόρφωση αυξήθηκε κυρίως λόγω της διαγώνιας εφελκυστικής διόγκωσης, η διατμητική αντίσταση της σύνδεσης παρέμεινε σταθερή ενώ, ταυτόχρονα, η τέμνουσα ορόφου απομειώθηκε. Τα υπάρχοντα μοντέλα διαγώνιου θλιπτήρα και δικτυώματος δεν είναι ικανά να περιγράψουν αυτή τη συμπεριφορά. Ένα εναλλακτικό μοντέλο για την περιγραφή της διατμητικής αστοχίας του κόμβου φαίνεται στο **Σχήμα 2.19**.



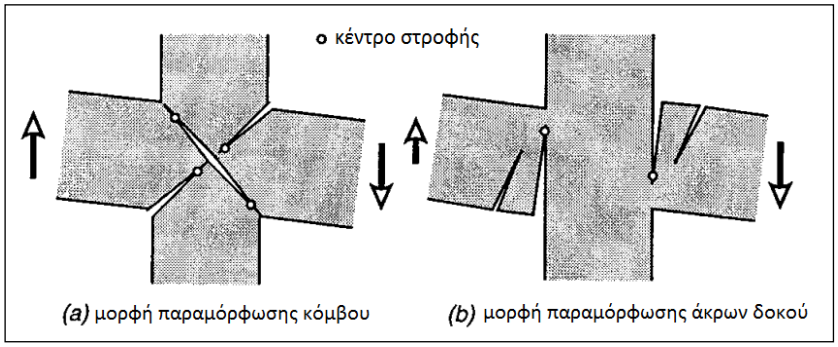
Σχήμα 2.19. Μοντέλο συμπεριφοράς για τη διατμητική αστοχία του κόμβου και ροή των εσωτερικών δυνάμεων (Shiohara, 2003)

Σε αυτό το μοντέλο, η διατμητική παραμόρφωση της σύνδεσης δεν κατανέμεται καθολικά και οφείλεται στη στροφή τεσσάρων τριγωνικών τμημάτων σκυροδέματος και στο άνοιγμα των ρωγμών. Η στροφική μετακίνηση των τμημάτων αυτών, προκαλεί το άνισο άνοιγμα των ρωγμών.

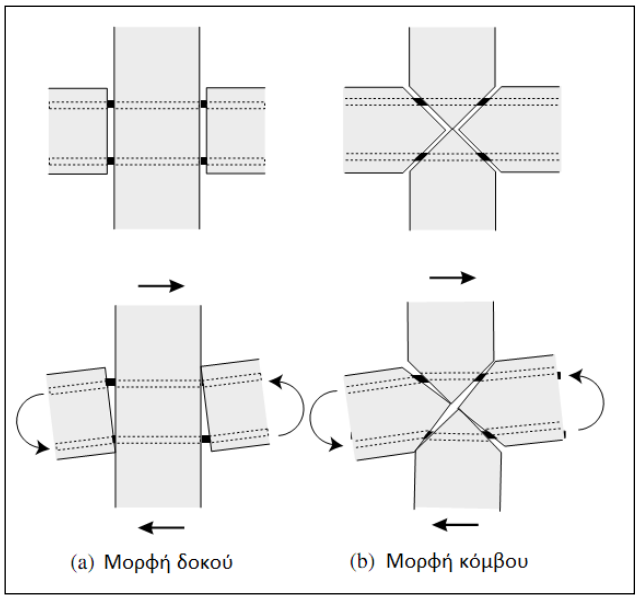


Σχήμα 2.20. Σύγκριση μηχανισμών (a) εναλλακτικού και (b) υπάρχοντος μοντέλου παραλαβής φορτίου κόμβου

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.20a**, τα οριζόντια και κατακόρυφα ελατήρια που συνδέουν τα τμήματα του σκυροδέματος, αποτρέπουν την αποδιοργάνωση του κόμβου σε επιμέρους κομμάτια. Σε ένα τυπικό κόμβο, οι διαμήκεις οπλισμοί των δοκών και του υποστυλώματος που περνούν μέσα από τον κόμβο, καθώς και ο εγκάρσιος οπλισμός μέσα στο σώμα του κόμβου, παίζουν το ρόλο των ελατηρίων. Όταν ασκείται ροπή στα τμήματα του σκυροδέματος από τις αντίστοιχες δοκούς και υποστυλώματα, τα τμήματα υφίστανται περιστροφή. Χωρίς την ύπαρξη των ελατηρίων τα τμήματα αυτά δεν θα μπορούσαν να αντισταθούν σε καμιά ροπή. Πέραν της καμπτικής αντίστασης, το μοντέλο αυτό μπορεί επίσης να παραλάβει και διατμητική δύναμη, προσομοιώνοντας καλύτερα την πραγματική συμπεριφορά που περιγράφηκε παραπάνω.



Σχήμα 2.21. Καθολική συμπεριφορά του κόμβου δοκού - υποστυλώματος



Σχήμα 2.22. Ανεξάρτητες μορφές παραμόρφωσης κόμβου

Η καθολική συμπεριφορά ενός μεμονωμένου κόμβου, φαίνεται στο **Σχήμα 2.21**. Γενικά, στην καθολική μετάθεση του ορόφου συνεισφέρουν δύο ανεξάρτητες μορφές παραμόρφωσης (**Σχήμα 2.22**), η παραμόρφωση της σύνδεσης (**Σχήμα 2.22b**) και η παραμόρφωση στα άκρα των δοκών (**Σχήμα 2.22a**). Για την αποφυγή μιας κακής συμπεριφοράς για τον κόμβο και, συνολικά, για το πλαισιακό σύστημα, η παραμόρφωση της σύνδεσης πρέπει να περιορίζεται. Αν η αντοχή του μηχανισμού καμπτικής αντίστασης του σώματος του κόμβου, είναι μεγαλύτερη από αυτή των άκρων των δοκών και των υποστυλωμάτων, τότε η παραμόρφωση της σύνδεσης θα παραμείνει μικρή. Σε αντίθετη περίπτωση, η παραμόρφωση της σύνδεσης θα είναι μεγάλη.

Για την εκτίμηση της αντοχής της μορφής παραμόρφωσης κόμβου, θεωρώντας την ισορροπία ελευθέρου σώματος για τέσσερα τμήματα σκυροδέματος, θα είχαμε συνολικά δώδεκα εξισώσεις ισορροπίας. Θεωρώντας όμως τον κόμβο συμμετρικό και επίσης κάνοντας την παραδοχή πως η τέμνουσα του υποστυλώματος V_c είναι ανάλογη με την τέμνουσα της δοκού V_b μέσω της σχέσης $V_c L_c = V_b L_b$, χρειαζόμαστε τελικά μόνο πέντε εξισώσεις για την περιγραφή του μοντέλου. Μέσω των παρακάτω εξισώσεων μπορούμε να υπολογίσουμε τη σχέση της τέμνουσας ορόφου V_c με τις άλλες παραμέτρους αντοχής του κόμβου. Όλες οι δυνάμεις κανονικοποιούνται με βάση την τιμή $t\sigma_c$.

Από την ισορροπία των εσωτερικών δυνάμεων που δείχνεται στο **Σχήμα 2.23**, κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση για τη δεξιά δοκό έχουμε:

$$-T_1 - T_2 - T_5 + C_1 + C_2 - N_b = 0 \qquad (2.35)$$

$$T_3 - T_4 - C_1 + C_2 - a\,V_c = 0 \tag{2.36}$$

Από την ισορροπία ροπών ως προς το κέντρο Ο στη δεξιά δοκό έχουμε:

$$\frac{L_b}{2} a\,V_c + \frac{1}{2} j\,(T_3 - T_4) + \frac{1}{2} j\,(T_1 - T_2) + C_2(1 - C_2) - C_1 C_1 = 0 \tag{2.37}$$

Από την ισορροπία κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση για το άνω υποστύλωμα προκύπτει:

$$T_1 - T_2 - C_1 + C_2 - V_c = 0 \tag{2.38}$$

$$-T_3 - T_4 + C_1 + C_2 - N_c = 0 \tag{2.39}$$

όπου:
j, η απόσταση μεταξύ άνω και κάτω διαμήκους οπλισμού στις δοκούς και τους στύλους, προς το αντίστοιχο ύψος της διατομής.

N_c, η αξονική δύναμη του υποστυλώματος

N_b, η αξονική δύναμη της δοκού

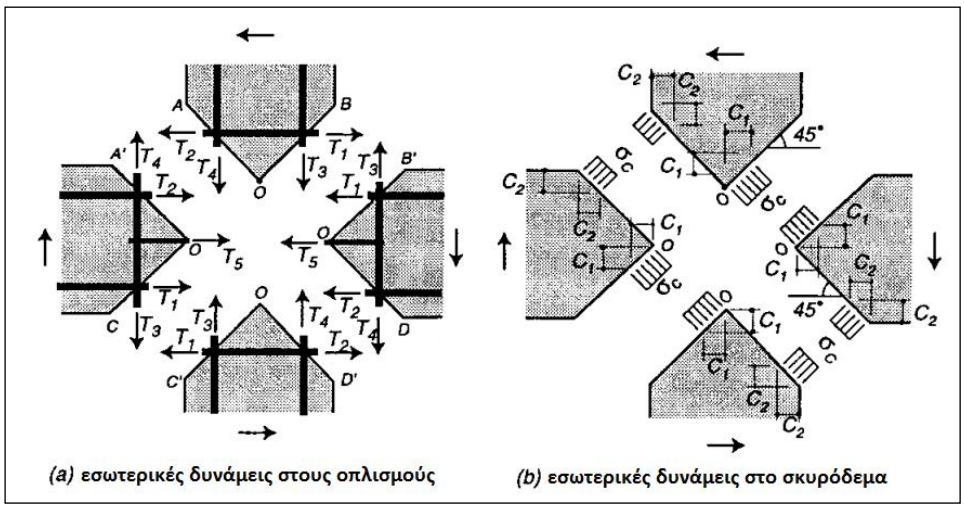
$a = \frac{L_c}{L_b}$, ο λόγος του μήκους του υποστυλώματος προς το μήκος της δοκού (**Σχήμα 2.24**)

T_5, η συνισταμένη δύναμη των συνδετήρων, που υποτίθεται ότι ασκείται στο μέσον του κόμβου

C_1, C_2, οι θλιπτικές αυτές δυνάμεις του σκυροδέματος είναι οι οριζόντιες και κατακόρυφες συνιστώσες των δυνάμεων που ασκούνται κάθετα στις παρειές σύνδεσης με τα δομικά μέλη.

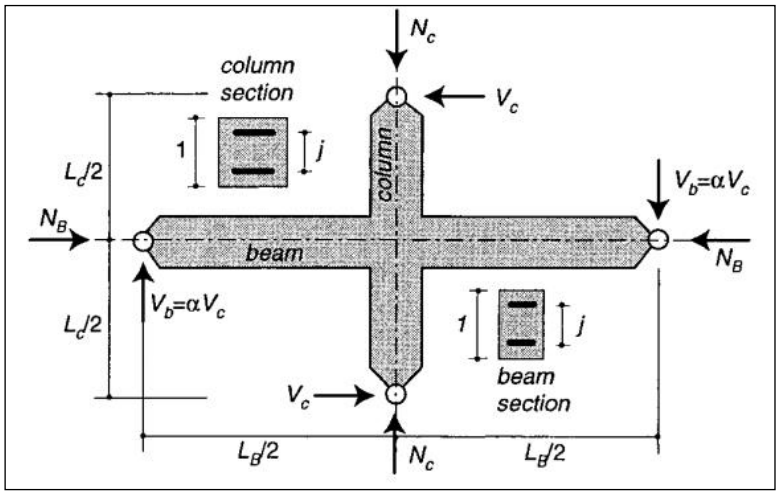
t, το πάχος του κόμβου κατά την εγκάρσια έννοια.

σ_c, η τάση αστοχίας του σκυροδέματος



Σχήμα 2.23. Εσωτερικές δυνάμεις στους χάλυβες και στα τμήματα του σκυροδέματος

Η φυσική σημασία της τιμής $T_1 - T_2$ είναι η συνολική δύναμη που μπορεί να μεταφερθεί μέσω συνάφειας από τους διαμήκεις οπλισμούς της δοκού στον πυρήνα του κόμβου και βρίσκεται σε άμεση σχέση με την αντοχή της αγκύρωσης. Το φυσικό νόημα της δύναμης T_5 είναι η συνολική δύναμη που μπορούν να παραλάβουν οι συνδετήρες του κόμβου και σχετίζεται με την τάση διαρροής των οπλισμών αυτών καθώς και με την ποσότητα εγκάρσιου οπλισμού που τοποθετείται.



Σχήμα 2.24. Γεωμετρία ενός μεμονωμένου εσωτερικού κόμβου δοκού - υποστυλώματος

Συμπερασματικά και σύμφωνα με το Shiohara (2001), το νέο προτεινόμενο μοντέλο διατμητικής αστοχίας του κόμβου βρίσκεται σε συμφωνία με την παρατηρούμενη πειραματικά συμπεριφορά του κόμβου δοκού - υποστυλώματος. Μπορεί να προβλέψει ικανοποιητικά τον τρόπο αστοχίας του στοιχείου, την αντοχή της μορφής συμπεριφοράς (μορφή δοκού ή μορφή κόμβου) καθώς και την επιρροή καθοριστικών παραγόντων όπως η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και η ποσότητα εγκάρσιου οπλισμού.

2.3. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΟΜΒΩΝ ΔΟΚΟΥ - ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ

2.3.1. Γενικά

2.3.1.1. Στοιχεία της ανελαστικής απόκρισης των κόμβων

Από πειραματικά αποτελέσματα και από την εμπειρία προηγούμενων σεισμών έχει αποδειχθεί πως σε υφιστάμενες πλαισιωτές κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, σχεδιασμένες με παλαιότερους Κανονισμούς, η αστοχία είναι πιθανό να επέλθει στους κόμβους. Επιπλέον, όσον αφορά νέους κόμβους, που σχεδιάζονται με βάση σύγχρονους Κανονισμούς, παρ' ότι υπάρχει γενικά περιορισμένος αριθμός πειραματικών

αποτελεσμάτων, έχει δειχθεί από ερευνητές (Tsonos, 2007) πως και πάλι μπορούν κατά περιπτώση να υποστούν πρώιμη διατμητική αστοχία που δεν προβλέπεται από τα σύγχρονα προσομοιώματα σχεδιασμού

Η συμπεριφορά της σύνδεσης δοκού - υποστυλώματος υπό σεισμικές δράσεις χαρακτηρίζεται ως επιθυμητή ή μη επιθυμητή, ανάλογα με το αν πληροί τις απαιτήσεις και τη φιλοσοφία του ευρύτερου αντισεισμικού σχεδιασμού. Επιθυμητή συμπεριφορά θα έχουμε όταν εξασφαλιστεί πως οι δοκοί που συντρέχουν στον κόμβο θα μπορέσουν να αναπτύξουν πλήρως τις καμπτικές τους αντοχές πριν συμβεί οποιαδήποτε αστοχία στο σώμα του κόμβου. Κάτι τέτοιο συνάδει με τη φιλοσοφία "ασθενής δοκός / ισχυρό υποστυλώμα" που επιτυγχάνεται μέσω του ικανοτικού κόμβου. Επιπλέον θα θέλαμε να αποφύγουμε τη ανάπτυξη μεγάλων διατμητικών παραμορφώσεων καθώς και την απομείωση της δυσκαμψίας στο σώμα του κόμβου. Άρα, σε επίπεδο αστοχίας, η μορφή της μπορεί να αφορά το σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των δοκών με ή χωρίς εμφάνιση τριχοειδών ρωγμών στον πυρήνα του κόμβου. Από την άλλη, η μη επιθυμητή αστοχία της σύνδεσης αφορά τη διατμητική αστοχία του κόμβου, με αστοχία του σκυροδέματος του διαγώνιου θλιπτήρα (θλίψη είτε ευρεία εφελκυστική ρηγμάτωση), αστοχία της συνάφειας των διαμήκων οπλισμών της δοκού, αστοχία της αγκύρωσης (για εξωτερικούς κόμβους), διαρροή των συνδετήρων του κόμβου, ή ένα συνδυασμό κάποιων ή και όλων από τα προαναφερθέντα φαινόμενα. Η μη επιθυμητή αυτή συμπεριφορά συνοδεύεται από απότομη πτώση της αντοχής και/ή της δυσκαμψίας του κόμβου μετά από μικρό αριθμό κύκλων φόρτισης και φτωχή απορρόφηση υστερητικής ενέργειας με στένωση των υστερητικών βρόχων (pinching) και μεγάλες παραμορφώσεις.

Πάντως, ακόμη και αν υποθέσουμε πως έχουμε καλοσχεδιασμένες τις κρίσιμες περιοχές που πρόκειται να αναπτύξουν ανελαστικές παραμορφώσεις και, συγκεκριμένα εδώ, τους κόμβους δοκού - υποστυλώματος , το κυριότερο πρόβλημα κατά τη σεισμική απόκριση παραμένει η απομείωση της δυσκαμψίας μετά από κάποιο σημαντικό αριθμό κύκλων. Αυτό έχει σαν συνέπεια:

1. Την αύξηση της ευκαμψίας της κατασκευής με επακόλουθη αύξηση της ιδιοπεριόδου
2. Τη μείωση τη δυνατότητας απορρόφησης υστερητικής ενέργειας
3. Τη σημαντική αδυναμία ανακατανομής των εσωτερικών δυνάμεων με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση των παραμορφώσεων σε κάποια μέλη

Επομένως, με τη μείωση της δυσκαμψίας σε περιορισμένο αριθμό κρισίμων περιοχών μεταβάλλεται και η συνολική σεισμική απόκριση της κατασκευής. Η πτώση της δυσκαμψίας σε κόμβους μπορεί να οφείλεται (Filippou, Popov και Bertero, 1983):

1. Στο φαινόμενο Bauschinger που υφίστανται οι χάλυβες υπό ανακύκλιση.
2. Στην απομείωση της αντοχής συνάφειας των οπλισμών κατά τις ανακυκλίσεις.
3. Στη διατμητική ολίσθηση σε περιοχές με μεγάλες ρωγμές που εκτείνονται σε όλο το ύψος του στοιχείου, όπως η παρειά της δοκού στην όψη του κόμβου.
4. Στη σύνθλιψη και αποφλοίωση του σκυροδέματος τοπικά
5. Στη δημιουργία ρωγμών στο σκυρόδεμα που έχουν διεύθυνση παράλληλη με τους οπλισμούς και αναπτύσσονται περιμετρικά αυτών.

2.3.1.2. Επίπεδα βλάβης κόμβων

Τα αποτελέσματα πειραμάτων, μετά-σεισμικών παρατηρήσεων και εμπειρικών διαπιστώσεων, χρησιμοποιούνται από τους Pagni και Lowes (2004) για να οριστούν δώδεκα επίπεδα αστοχίας που περιγράφουν την εξέλιξη της βλάβης σε κόμβους δοκού - υποστυλώματος οπλισμένου σκυροδέματος. Τα επίπεδα αυτά αφορούν κυρίως κόμβους σχεδιασμένους με παλαιότερους Κανονισμούς, μπορούν όμως να εφαρμοστούν και σε σύγχρονους κόμβους που όμως υφίστανται διατμητική αστοχία. Τα Επίπεδα Βλάβης (ΕΒ στο εξής), ορίζονται στη βάση εξωτερικών, οπτικά εμφανών βλαβών όπως: το εύρος των ρωγμών στο σκυρόδεμα, η έκταση της ρηγμάτωσης και σύνθλιψης του σκυροδέματος, η απώλεια συνάφειας όπως εκφράζεται από την καταστροφή της ζώνης συνάφειας του σκυροδέματος ή το άνοιγμα μεγάλων καμπτικών ρωγμών στις παρειές μεταξύ των συντρεχόντων μελών και του κόμβου. Η πλειοψηφία των ΕΒ που ορίζεται εδώ, μπορούν να παρατηρηθούν οπτικά εκτός από δύο που ορίζονται στη βάση εργαστηριακών μετρήσεων και σχετίζονται με τη μείωση της αντοχής του κόμβου.

Τα ΕΒ που υφίσταται ένας κόμβος υπό αυξανόμενες σεισμικές δράσεις είναι:

0. Αρχική ρηγμάτωση στη διεπιφάνεια κόμβου - δοκού.

1. Αρχική ρηγμάτωση στην περιοχή του κόμβου

2. Το εύρος των ρωγμών είναι μικρότερο από 5 mm

3. Το εύρος των ρωγμών γίνεται μεγαλύτερο από 5 mm

4. Διαρρέει ο διαμήκης οπλισμός της δοκού

5. Το εύρος των ρωγμών γίνεται μεγαλύτερο από 1.3 cm

6. Αποφλοίωση τουλάχιστον του 10% του επιφανειακού σκυροδέματος του κόμβου

7. Η διατμητική αντοχή του κόμβου αρχίζει να μειώνεται

8. Αποφλοίωση τουλάχιστον του 30% του επιφανειακού σκυροδέματος του κόμβου

9. Οι ρωγμές επεκτείνονται στη δοκό και/η στο υποστύλωμα

10. Αποφλοίωση τουλάχιστον του 80% του επιφανειακού σκυροδέματος του κόμβου

11. Η σύνθλιψη του σκυροδέματος επεκτείνεται εντός του πυρήνα του κόμβου

12. (α) Λυγισμός του διαμήκους οπλισμού

12. (β) Απώλεια της αγκύρωσης του διαμήκους οπλισμού της δοκού εντός του κόμβου

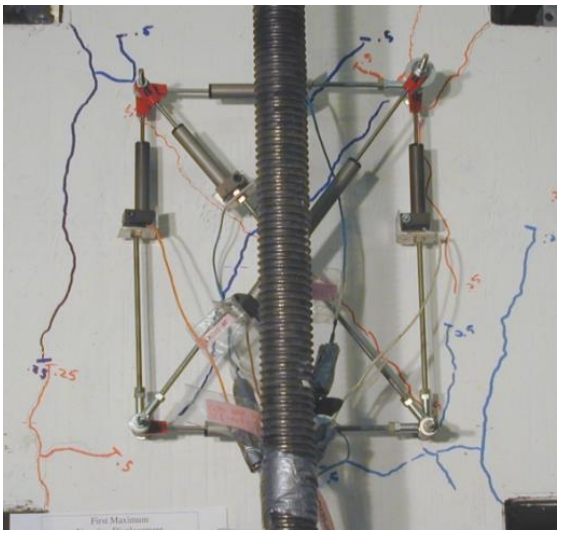
12. (γ) Εξόλκευση του οπλισμού αυτού από τον πυρήνα του κόμβου

i. Ρηγμάτωση

Η πρώτη ένδειξη βλάβης στον κόμβο είναι η παρουσία ρωγμών στο σκυρόδεμα. Αρχικά, ρωγμές σχηματίζονται περιμετρικά του κόμβου λόγω της κάμψης των δοκών. Με την αύξηση του φορτίου, διαγώνιες ρωγμές εμφανίζονται μέσα στο σώμα του κόμβου λόγω της διατμητικής φόρτισης.

<u>Επίπεδο Βλάβης 0 και 1</u>

Οι καμπτικές ρωγμές στη διεπιφάνεια δοκού - κόμβου είναι οι πρώτες που εμφανίζονται, συνήθως πριν την εμφάνιση ρωγμών στον ίδιο τον κόμβο, για σχετικές μεταθέσεις ορόφου τυπικά μεταξύ 0.25% και 0.5%. Στη συνέχεια έχουμε την εμφάνιση τριχοειδών ρωγμών στο σώμα του κόμβου (**Σχήμα 2.25**).



Σχήμα 2.25. Ρωγμές κόμβου για Επίπεδο Βλάβης 2

Επίπεδο Βλάβης 2, 3 και 5

Αυτά τα ΕΒ καθορίζονται από την προοδευτική αύξηση του ανοίγματος των ρωγμών όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.26**.

Σχήμα 2.26. Άνοιγμα ρωγμών για το Επίπεδο Βλάβης 5

Επίπεδο Βλάβης 9

Αυτό το ΕΒ αφορά τη ρηγμάτωση που ξεκινά στον κόμβο και επεκτείνεται στις συντρέχουσες δοκούς και υποστυλώματα. Τυπικά η ρωγμή προεκτείνεται κατά μήκος του οπλισμού και μπορεί να θεωρηθεί χαρακτηριστική της απώλειας της αγκύρωσης των οπλισμών. Τέτοιες ρωγμές συναντώνται κυρίως σε εξωτερικούς κόμβους αλλά δεν είναι σπάνιες και σε εσωτερικούς. Μια τέτοια ρωγμή για έναν εξωτερικό κόμβο φαίνεται στο **Σχήμα 2.27**.

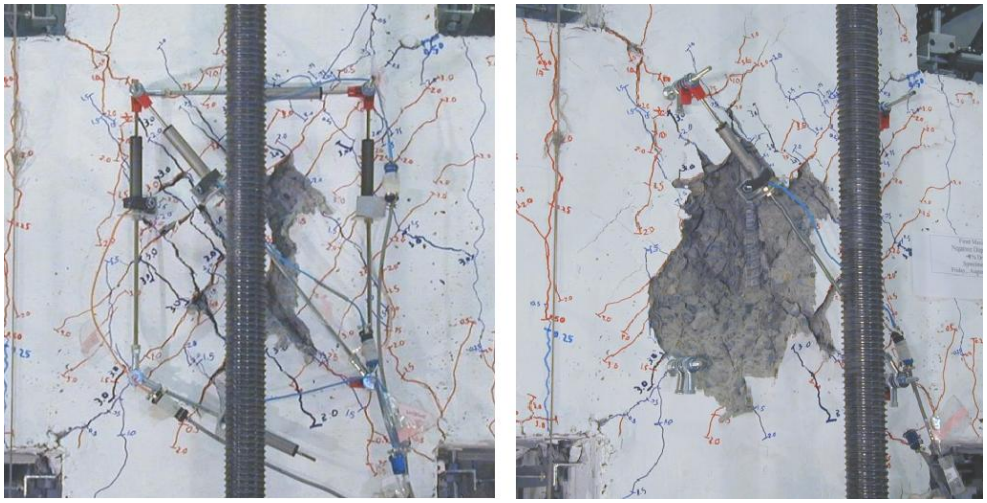
Σχήμα 2.27. Ρηγμάτωση στο Επίπεδο Βλάβης 9 για εξωτερικό κόμβο

ii. Αποφλοίωση και θλιπτική αστοχία σκυροδέματος

Τα ΕΒ 6, 8, 10 και 11 περιγράφουν τη βλάβη του σκυροδέματος στον πυρήνα του κόμβου. Ως αποφλοίωση ορίζεται η αποκόλληση της επικάλυψης του σκυροδέματος που καλύπτει τους εξωτερικούς οπλισμούς, είτε αυτοί είναι πλευρικοί οπλισμοί του υποστυλώματος είτε συνδετήρες μέσα στο σώμα του κόμβου.

Επίπεδο Βλάβης 6, 8 και 10

Το ΕΒ 6 ορίζει τη μετάβαση από τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος στην αποφλοίωση. Με την αποκόλληση του σκυροδέματος από μια περιοχή ίση περίπου με το 10% της επιφάνειας του κόμβου, πλέον το εύρος των ρωγμών δεν μπορεί να εκτιμηθεί. Στο ΕΒ 8 το 30% της επιφάνειας του κόμβου έχει αποφλοιωθεί (**Σχήμα 2.28**). Στο ΕΑ 10, περισσότερο από το 80% του πυρήνα του κόμβου έχει αποφλοιωθεί ενώ η περιοχή έχει προχωρήσει και σε βάθος, αποκαλύπτοντας τον κατακόρυφο οπλισμό του υποστυλώματος



Σχήμα 2.28. Αποφλοίωση του σκυροδέματος στο Επίπεδο Βλάβης 6 και 8

Επίπεδο Βλάβης 11

Η αποφλοίωση του σκυροδέματος στον εσωτερικό πυρήνα πέραν της επικάλυψης, θεωρείται πλέον σύνθλιψη του σκυροδέματος που πλέον έχει προχωρήσει μέσα στον πυρήνα. Μεγάλα τμήματα του κατακόρυφου οπλισμού του υποστυλώματος έχουν εμφανισθεί ενώ υπάρχει και ο κίνδυνος λυγισμού των ράβδων λόγω της απουσίας περιβάλλοντος σκυροδέματος (**Σχήμα 2.29**).

Σχήμα 2.29. Σύνθλιψη σκυροδέματος πυρήνα στο Επίπεδο Βλάβης 11

iii. Μηχανισμοί αστοχίας κόμβου

Τα ΕΒ 12 (α, β, γ) περιγράφουν τρείς τύπους αστοχίας που συναντώνται συχνά, κυρίως σε υφιστάμενους κόμβους όπου δεν υπάρχει περίσφιγξη του πυρήνα της σύνδεσης. Τα επίπεδα αυτά δεν συμβαίνουν διαδοχικά αλλά μπορούν να συμβούν για το ίδιο υψηλό σεισμικό φορτίο. Το πιο συνηθισμένο είναι να συμβαίνει λυγισμός στις κατακόρυφες ράβδους του υποστυλώματος με καταστροφή του κόμβου εμποδίζοντας το σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των δοκών.

<u>Επίπεδο Βλάβης 12 (α)</u>

Σε αυτό το ΕΒ έχουμε απώλεια της φέρουσας ικανότητας κατακόρυφων φορτίων από τον κόμβο. Μετά τη θλιπτική αστοχία του σκυροδέματος του πυρήνα αναπόφευκτα εμφανίζεται λυγισμός των ράβδων του οπλισμού όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.30**.

Σχήμα 2.30. Επίπεδο Βλάβης 12 (α) για εξωτερικό κόμβο

Επίπεδο Βλάβης 12 (β), (γ)

Σε αυτά τα ΕΒ έχουμε απώλεια της αγκύρωσης του διαμήκους οπλισμού μέσα στο σώμα του κόμβου. Οι δοκοί φαίνεται να απομακρύνονται από τον κόμβο και κινούνται χωρίς αντίσταση στα οριζόντια φορτία. Έχουμε μειωμένη αντίσταση και αυξημένες μετατοπίσεις.

iv. Επίπεδα βλάβης με βάση την αντοχή

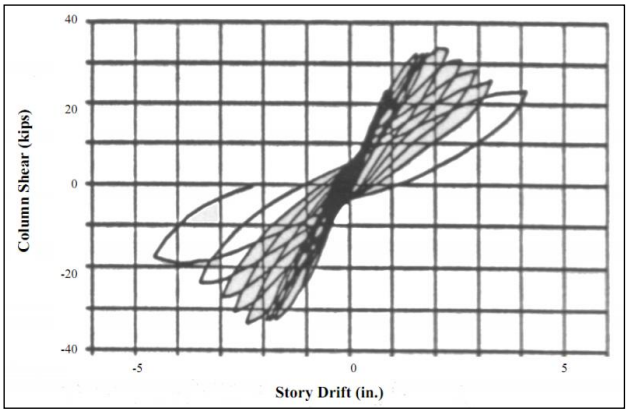
Τα ΕΒ 4 και 7 που ορίζονται μέσω εργαστηριακών μετρήσεων παρέχουν πληροφορίες για το μέγεθος της βλάβης στις περιπτώσεις που οι άλλες περιγραφές βλαβών είναι ανεπαρκείς. Άλλωστε καθώς το φορτίο αυξάνεται προς το σημείο της αστοχίας του κόμβου, η παραμόρφωση του σκυροδέματος του πυρήνα φτάνει μια κρίσιμη τιμή που αντιστοιχεί στην αστοχία υπό θλίψη. Αυτό το στάδιο προηγείται της αστοχίας του κόμβου και παρ' ότι το επίπεδο της βλάβης είναι υψηλό, δεν μπορεί να παρατηρηθεί εξωτερικά.

Επίπεδο βλάβης 4

Αυτό το ΕΒ αντιστοιχεί στη διαρροή του διαμήκους οπλισμού της δοκού. Μετά τη διαρροή, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο, η αντοχή της συνάφειας μεταξύ χάλυβα - σκυροδέματος περιορίζεται, λόγω ολίσθησης του οπλισμού στο σημείο διαρροής. Πλέον έχουμε αύξηση της ολίσθησης των πάνω οπλισμών της δοκού και ανακατανομή των τάσεων μέσα στο σώμα του κόμβου.

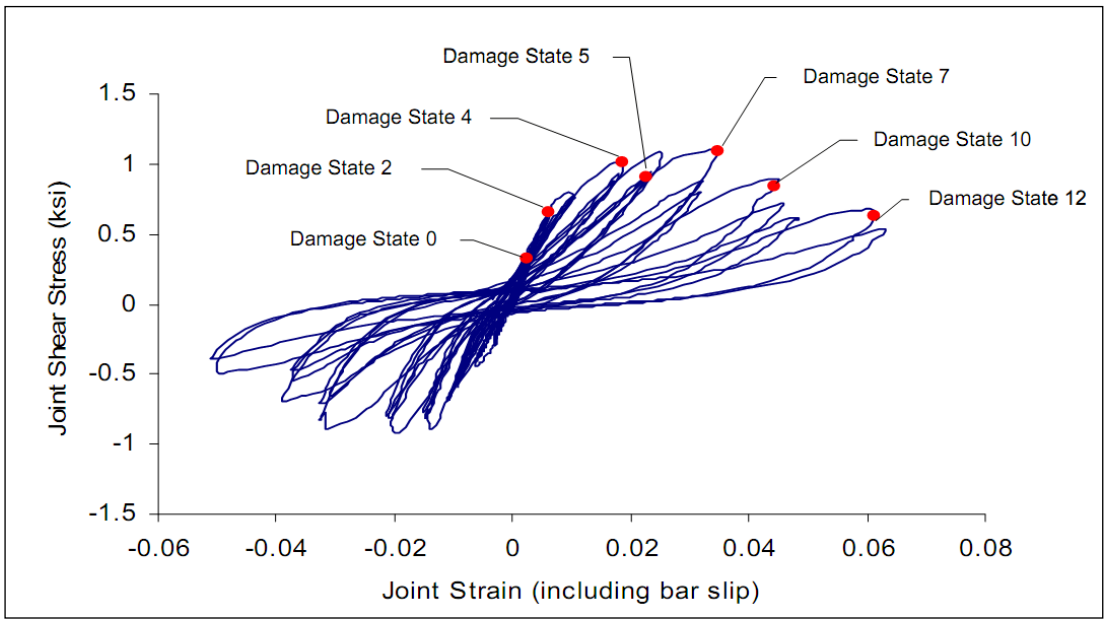
Επίπεδο βλάβης 7

Το ΕΒ αυτό σημαίνει την έναρξη της απομείωσης της τέμνουσας ορόφου (**Σχήμα 2.31**). Η διατμητική αντοχή του κόμβου φτάνει σε μια μέγιστη τιμή και έπειτα αρχίζει να απομειώνεται προτού θεωρηθεί πως έχει χαθεί η ακεραιότητα του και έχει επέλθει η αστοχία. Αυτό το σημείο μπορεί να οριστεί ως το σημείο με αντοχή μικρότερη του 80% της μέγιστης που καταγράφηκε.



Σχήμα 2.31. Απομείωση της αντοχής σε τέμνουσα του κόμβου και Επίπεδο Βλάβης 7

Τα επίπεδα βλάβης που ορίστηκαν και περιγράφηκαν παραπάνω είναι χρήσιμα για την ποσοτικοποίηση της βλάβης και τη γενικότερη κατανόηση της σεισμικής συμπεριφοράς των κόμβων δοκού - υποστυλώματος στα διάφορα στάδια επιβολής του φορτίου αλλά και για χρήση σε μεθοδολογίες αποτίμησης ή πρόβλεψης της τρωτότητας κατασκευών ΟΣ. Στο **Σχήμα 2.32**, σημειώνονται τα επίπεδα βλάβης σε μια τυπική καμπύλη διατμητικής τάσεως - παραμόρφωσης κόμβου (Walker, 2001)



Σχήμα 2.32. Καθορισμός των Επιπέδων Βλάβης σε τυπικό διάγραμμα απόκρισης κόμβου

2.3.1.3. Παράμετροι για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των κόμβων

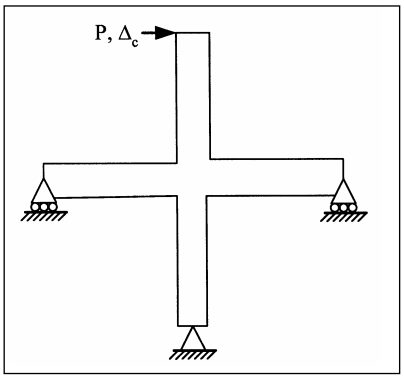
Για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των κόμβων δοκού - υποστυλώματος έχει καθιερωθεί να υπολογίζονται ορισμένες παράμετροι οι οποίες είναι: η μέγιστη σχετική μετάθεση ορόφου που παρατηρήθηκε, ο αριθμός των κύκλων φόρτισης και η μέγιστη καταγεγραμμένη διατμητική παραμόρφωση του κόμβου.

Σχετική μετάθεση ορόφου (Storey Drift)

Η σχετική μετάθεση ορόφου εκπεφρασμένη επί τοις εκατό, είναι ένα απλό και ευρέως χρησιμοποιούμενο μέτρο για την περιγραφή της σεισμικής απόκρισης δομικών μελών. Στην περίπτωση μιας τυπικής διάταξης για τη μελέτη της συμπεριφοράς κόμβων δοκού υποστυλώματος (**Σχήμα 2.33**), η σχετική μετάθεση ορόφου ορίζεται ως:

$$drift = \frac{\Delta_c}{l_c} \times 100 \qquad (2.39)$$

όπου Δ_c είναι η μετακίνηση κορυφής και l_c το συνολικό ύψος του δοκιμίου από την κορυφή έως την κάτω στήριξη. Για την ορθή αντίληψη της τάξης μεγέθους του αναμενόμενου storey drift ορόφου σημειώνεται (Tsonos, 2007), πως οι περισσότεροι σύγχρονοι κανονισμοί επιτρέπουν σχετικές μεταθέσεις ορόφων υπό σεισμικές δράσεις περίπου μέχρι 2%, ενώ τιμές μεγαλύτερες του 4% είναι δύσκολο να συμβούν στην πράξη.



Σχήμα 2.33. Τυπική διάταξη για τη μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς κόμβου

Αριθμός κύκλων φόρτισης

Ο αριθμός των ανακυκλίσεων που υφίσταται ένας κόμβος είναι χρήσιμο στοιχείο για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του καθώς και για το επίπεδο της βλάβης που θα υποστεί ενώ είναι αντιπροσωπευτικό και της ενέργειας που θα απορροφηθεί. Έχει παρατηρηθεί πως κύκλοι φόρτισης που δεν υπερβαίνουν τη μέγιστη ικανότητα του στοιχείου, προκαλούν και μικρότερη βλάβη.

Διατμητική παραμόρφωση του κόμβου

Η διατμητική παραμόρφωση του κόμβου, ορίζει την απαίτηση που προκύπτει μόνο για το σώμα του κόμβου. Η σχετική μετάθεση ορόφου, είναι το άθροισμα της καμπτικής και διατμητικής παραμόρφωσης των δοκών και των υποστυλωμάτων συν την παραμόρφωση του κόμβου και της συγκεντρωμένης στροφής λόγω ολίσθησης των οπλισμών. Για το λόγο αυτό η διατμητική παραμόρφωση του κόμβου είναι καλύτερος δείκτης για το χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς μεμονωμένα του κόμβου και όχι συνολικά της σύνδεσης.

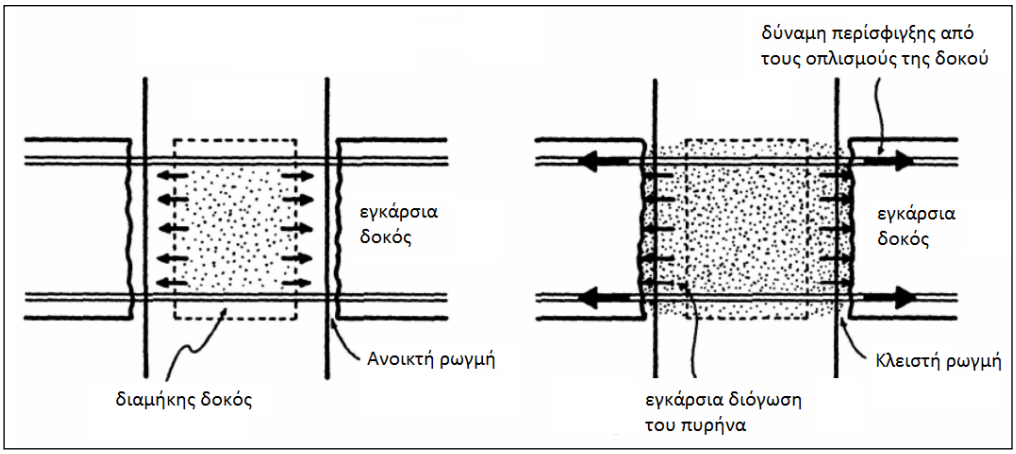
2.3.1.4. Ειδικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των κόμβων

Στη μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς των κόμβων, υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες, οι οποίοι ενώ κατά βάση συναντούνται στην πράξη, συνήθως δεν λαμβάνονται υπόψη και κρίνεται σκόπιμο να περιγραφεί συνοπτικά η επιρροή τους. Μερικοί από αυτούς

τους παράγοντες είναι: η ύπαρξη και εγκάρσιων δοκών που καταλήγουν στο σώμα του κόμβου κάθετα στη διεύθυνση φόρτισης, η ύπαρξη πλάκας σκυροδέματος και τέλος η μεταβολή του αξονικού φορτίου του υποστυλώματος. Η πειραματική διερεύνηση αυτών των παραγόντων αναφέρεται στη βιβλιογραφία από ερευνητές (Kitayama et al. 1991, Karayannis et al. 2002).

Επιρροή εγκάρσιων δοκών

Έχει παρατηρηθεί πως αφόρτιστες εγκάρσιες δοκοί, μπορούν να αυξήσουν τη διατμητική αντοχή του κόμβου, λόγω της αύξησης του ενεργού όγκου του πυρήνα του (**Σχήμα 2.35**). Ακόμα όμως και αν οι δοκοί φορτιστούν μέχρι την καμπτική τους διαρροή, η διατμητική αντοχή του κόμβου εμφανίζεται έως και 1.2 φορές μεγαλύτερη. Αυτό εξηγείται λόγω της περίσφιγξης που προσφέρουν οι διαμήκης οπλισμοί των δοκών αυτών στην εγκάρσια διόγκωση του πυρήνα του κόμβου καθώς και στην περίσφιγξη από τη δύναμη της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος (**Σχήμα 2.34**). Η επιρροή αυτή αναφέρεται πιο ορθά ως ψευδό-περίσφιγξη (Καραγιάννης, 2008). Πάντως, αποτελεί ακόμα ζήτημα έρευνας, αν η ευνοϊκή αυτή ψευδο-περίσφιξη από τις δοκούς της εγκάρσιας διεύθυνσης, μπορεί να εξισορροπήσει τη δυσμενή επιρροή λόγω της επιπλέον διατμητικής έντασης που επίσης αυτές εισάγουν στον κόμβο.



Σχήμα 2.34. Περίσφιγξη κόμβου λόγω εγκάρσιων δοκών (Kitayama et al. 1991)

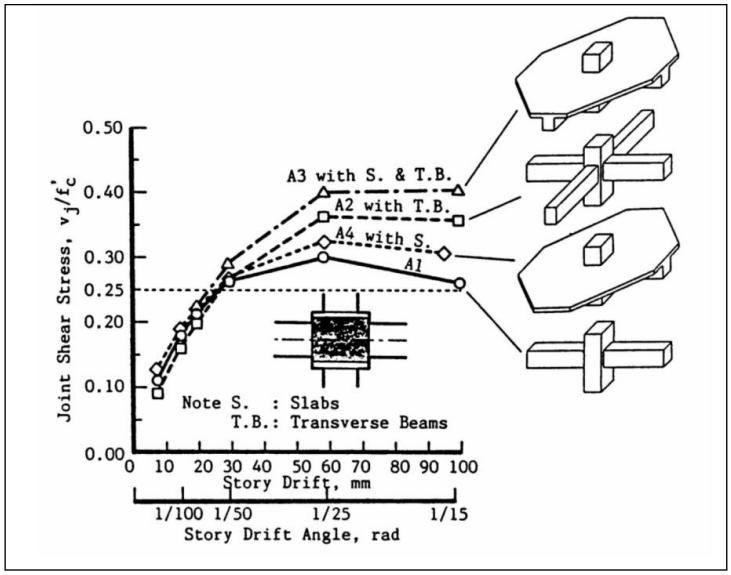
Επιρροή της πλάκας του ορόφου

Η επιρροή της πλάκας στη συνολική απόκριση του κόμβου περιλαμβάνει:

(α) την επιρροή των οπλισμών της που συμμετέχουν στη συνολική απόκριση του δοκιμίου, καθώς η δοκός κάμπτεται από αρνητική ροπή

(β) τη συμμετοχή της πλάκας στην παραλαβή των θλιπτικών τάσεων λόγω κάμψης της δοκού, καθώς αυτή καταπονείται από θετική ροπή (λειτουργία πλακοδοκού).

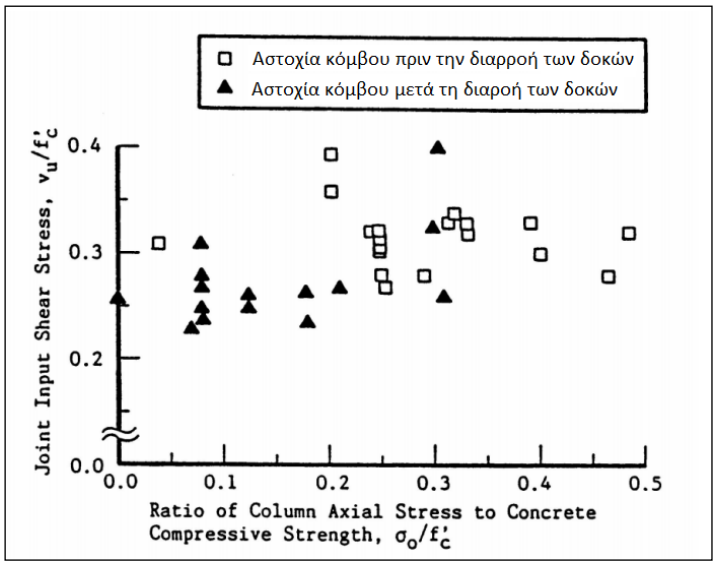
Η ευνοϊκή επιρροή (**Σχήμα 2.35**) έγκειται στην καθολική κατανομή διατμητικών τάσεων από την πλάκα στον πυρήνα του κόμβου, που ανακουφίζει τη συγκέντρωση θλιπτικών τάσεων στο διαγώνιο θλιπτήρα σκυροδέματος.



Σχήμα 2.35. Επιρροή εγκάρσιων δοκών και πλάκας στη συμπεριφορά του κόμβου (Kitayama et al. 1991)

Αξονικό φορτίο υποστυλώματος

Με βάση τα πειραματικά αποτελεέσματα το αξονικό φορτίο του υποστυλώματος δεν φαίνεται να επηρεάζει τη διατμητική αντοχή του κόμβου. Όμως, υψηλό θλιπτικό φορτίο, επιταχύνει την πτώση της αντοχής του διαγώνιο θλιπτήρα σκυροδέματος μετά την καμπτική διαρροή των δοκών. Στθ **Σχήμα 2.36**, συγκρίνεται η διατμητική τάση του κόμβου συναρτήσει της θλιπτική τάσης στο υποστύλωμα και της μορφής της αστοχίας, όπου επιβεβαιώνεται η παραπάνω διαπίστωση. Για υψηλά αξονικά φορτία είναι πιθανότερο να έχουμε διατμητική αστοχία του κόμβου πριν τη διαρροή των δοκών.



Σχήμα 2.36. Επιρροή αξονικού φορτίου υποστυλώματος στην αντοχή του κόμβου

2.3.2. Πειραματικές δοκιμές κόμβων οπλισμένου σκυροδέματος

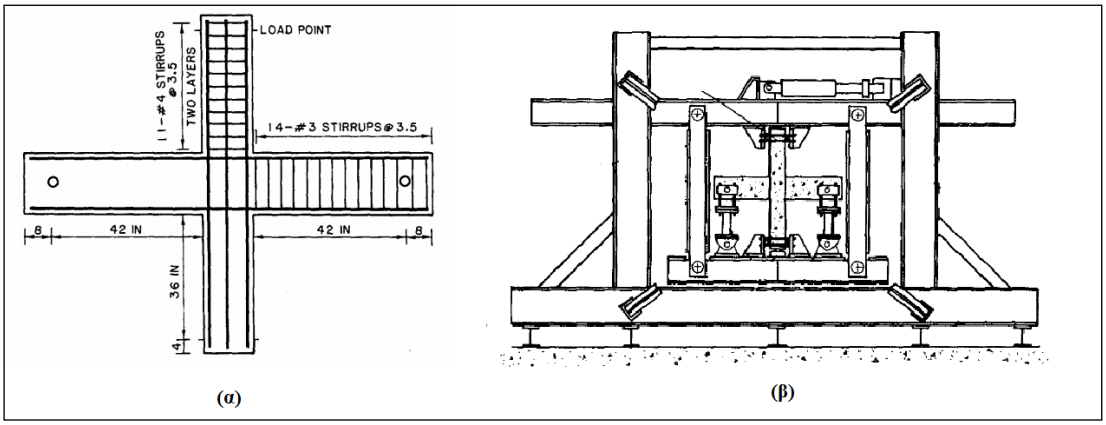
Τα τελευταία τριάντα περίπου χρόνια έχει γίνει εκτεταμένη και συστηματική πειραματική έρευνα στον τομέα της μελέτης της σεισμικής συμπεριφοράς των κόμβων δοκού - υποστυλώματος, σε χώρες με έντονη σεισμικότητα όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, Ευρώπη, Νέα Ζηλανδία, Ιαπωνία, Ελλάδα και προσφάτως και Ινδία. Από πολλούς ερευνητές παγκοσμίως γίνεται προσπάθεια για την κατανόηση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς των κόμβων υπό ανακυκλιζόμενες δράσεις αλλά επίσης και για τη διερεύνηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά αυτή. Η μέχρι τώρα έρευνα αφορά τόσο εσωτερικούς όσο και εξωτερικούς κόμβους ενώ οι παράμετροι που εξετάζονται ποικίλουν: το ποσοστό των κλειστών οριζόντιων συνδετήρων στο σώμα του κόμβου, οι ύπαρξη πλευρικών κατακόρυφων οπλισμών, η διατμητική τάση στον κόμβο, η χρήση οπλισμών μορφής Χ ή ινών, ο τρόπος αγκύρωσης των διαμήκων οπλισμών, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, η επιρροή της πλάκας και της εγκάρσιας δοκού, είναι μερικές από αυτές. Αν και μέχρι πρόσφατα η έρευνα είχε επικεντρωθεί στη συμπεριφορά κόμβων υφιστάμενων κατασκευών, σχεδιασμένων σύμφωνα με προγενέστερους Κανονισμούς, εντούτοις και σύγχρονοι κόμβοι έχουν αρχίσει να δοκιμάζονται πειραματικά καθώς παρατηρείται πως και οι νέοι κανονισμοί δεν αποτρέπουν πάντα την αστοχία ή τη δυσμενή για το δομητικό σύστημα συμπεριφορά.

Στα Κεφάλαια 5 και 6 της παρούσης γίνεται εκτενής αναφορά στην πειραματική μελέτη των Shiohara και Kusuhara (2006) καθώς επιχειρείται η αναλυτική προσομοίωση ορισμένων δοκιμίων της πειραματικής αυτής έρευνας, με αξιολόγηση των αριθμητικών αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τα πειραματικά. Επίσης συμπεράσματα από άλλες

πειραματικές μελέτες κόμβων αναφέρονται διάσπαρτα και σε διάφορα σημεία του παρόντος Κεφαλαίου, στα πλαίσια της βιβλιογραφικής διερεύνησης του θέματος. Παρακάτω γίνεται αναφορά σε κάποιες πειραματικές μελέτες ενδεικτικά, και για λόγους πληρότητας, χωρίς λεπτομερή αναφορά στα αποτελέσματα τα οποία μπορούν να βρεθούν στις αντίστοιχες δημοσιευσεις. Άλλωστε ο αριθμός των δημοσιευμένων πειραματικών ερευνών, σε κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων, που είναι διαθέσιμος στη βιβλιογραφία είναι αρκετά μεγάλος και η εκτενής παρουσίαση τους ξεφεύγει από τους στόχους της παρούσης.

Η μελέτη των Durrani και Wight

Η πειραματική διερεύνηση των Durrani και Wight (1985) αφορούσε τη συμπεριφορά εσωτερικών κόμβων, με χαμηλότερο ποσοστό κλειστών συνδετήρων στο σώμα του κόμβου από αυτό που επέβαλλαν οι τότε κανονισμοί (ACI-ASCE Committee 352, 1976). Τρία δοκίμια κόμβων (**Σχήμα 2.37α**) υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση τοποθετημένα στη διάταξη που φαίνεται στο **Σχήμα 2.37β**.

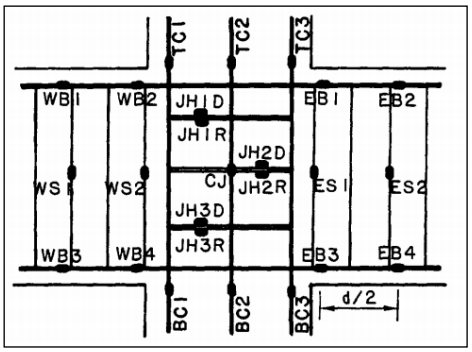


Σχήμα 2.37. (α) Γεωμετρία και όπλιση δοκιμίων κόμβου, (β) πειραματική διάταξη για την επιβολή των φορτίων (Durrani και Wight, 1985)

Ηλεκτρομηκυνσιόμετρα τοποθετήθηκαν στους οπλισμούς σε κατάλληλες θέσεις για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων (**Σχήμα 2.38**) ενώ δύο μηκυνσιόμετρα LDVT τοποθετήθηκαν διαγώνια επί του σώματος του κόμβου για τη μέτρηση της διατμητικής παραμόρφωσης.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών αναλύθηκαν ως προς: (α) τις P-Δ επιρροές, (β) τη μορφή της ρηγμάτωσης, (γ) την απώλεια αντοχής, (δ) την απώλεια δυσκαμψίας, (ε) τη διατμητική παραμόρφωση του κόμβου, (στ) την ενεργειακή απορρόφηση και (ζ) την ολίσθηση των ράβδων του οπλισμού που περνούν μέσα από τον κόμβο. Εξετάστηκε η

επίδραση της διατμητικής τάσεως του κόμβου και της ποσότητας του εγκάρσιου οπλισμού στις παραπάνω παραμέτρους.



Σχήμα 2.38. Θέση ηλεκτρομηκυνσιόμετρων στους οπλισμούς (Durrani και Wight, 1985)

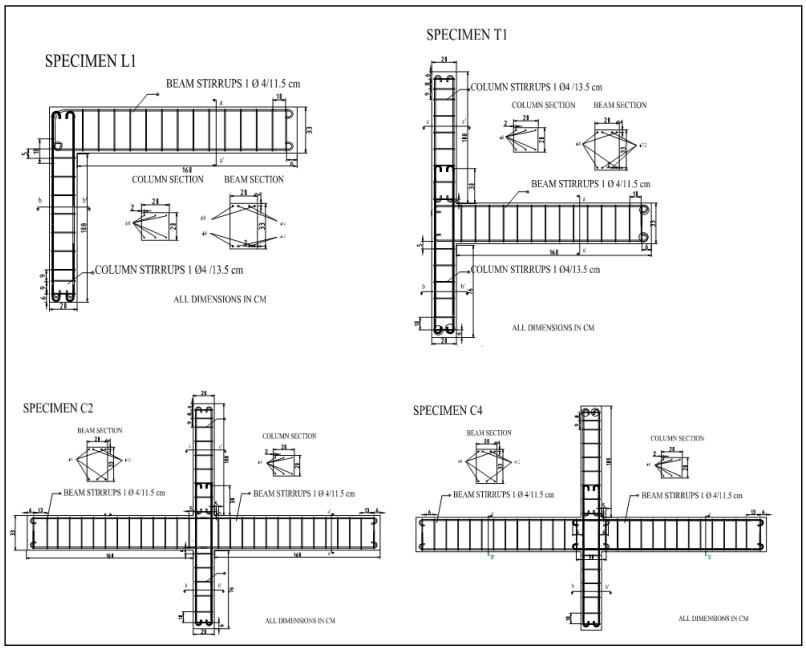
Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική διερεύνηση των δοκιμίων συνοψίζονται παρακάτω:

1. Η απαιτούμενη διατμητική τάση του κόμβου έχει πολύ μεγάλη επίδραση στην αντοχή και τη δυσκαμψία των δοκιμίων για πλαστιμότητες μετακινήσεων μεγαλύτερες του 2. Χαμηλότερη διατμητική τάση στον κόμβο επιτρέπει την εξισορρόπηση της απώλειας αντοχής και δυσκαμψίας ανεξαρτήτως της ποσότητας εγκάρσιου οπλισμου.
2. Οι συνδετήρες μέσα στο σώμα του κόμβου είναι πιο αποτελεσματικοί για χαμηλές τιμές πλαστιμότητας μετακινήσεων (μικρότερες του 2) ενώ συμβάλουν στη διατήρηση της αντοχής όχι όμως και της δυσκαμψίας.
3. Η διατμητική τάση του κόμβου, επηρεάζει τη διατμητική του παραμόρφωση, την ολίσθηση των ράβδων του οπλισμού και άρα και το στένωμα (pinching) των υστερητικών κύκλων. Ο περιορισμός της διατμητικής τάσης συμβάλει πιο αποτελεσματικά στη βελτίωση της συμπεριφοράς απ' ότι η προσθήκη επιπλέον εγκάρσιου οπλισμου.
4. Ως προς την ενεργειακή απορρόφηση, αποδείχθηκε πως ο συνδυασμός περιορισμένης διατμητικής τάσης κόμβου και μέτριου ποσοστού εγκάρσιου οπλισμού είναι καλύτερος από υψηλή διατμητική τάση και μεγάλη ποσότητα συνδετήρων.
5. Βρέθηκε πως ο λόγος των καμπτικών αντοχών μεταξύ στύλου και δοκού είναι καταλληλότερο να είναι τουλάχιστον 1.5.

Η μελέτη των Pampanin - Calvi - Moratti

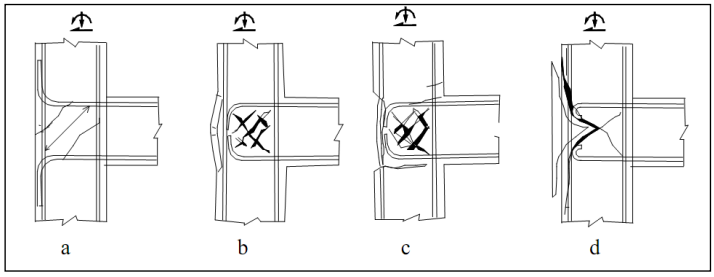
Η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς κόμβων δοκού - υποστυλώματος, σχεδιασμένων για κατακόρυφα και όχι σεισμικά φορτία, ήταν το αντικείμενο της πειραματικής μελέτης των Pampanin et al. (2002). Συγκεκριμένα εξετάστηκαν δοκίμια (**Σχήμα 2.39**) που αναπαριστούσαν τυπικούς κόμβους Ιταλικών κατασκευών μεταξύ του 1950 και 1970, σχεδιασμένων με παλαιούς Κανονισμούς και με σημαντικές δομικές ανεπάρκειες: λείες ράβδοι οπλισμού, χαμηλής αντοχής σκυρόδεμα, πλήρης απουσία συνδετήρων εντός του κόμβου, κακή αγκύρωση και απουσία ικανοτικών διατάξεων σχεδιασμού. Η φόρτιση των δοκιμίων ήταν ψευδο-στατική με αυξανόμενου εύρους κύκλους φόρτισης και επιβαλλόμενη μετατόπιση στην κορυφή. Η διάταξη για την επιβολή των φορτίων ήταν η τυπική που συναντάται σε αντίστοιχα πειράματα και έχει παρουσιαστεί νωρίτερα (**Σχήμα 2.37β**). Η επιβολή του αξονικού φορτίου στα υποστυλώματα δεν ήταν σταθερή αλλά μεταβαλλόταν κατά τη διάρκεια του πειράματος συναρτήσει του οριζόντιου φορτίου για καλύτερη αναπαράσταση της πραγματικής εντατικής κατάστασης γωνιακών ή περιμετρικών κόμβων.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώθηκε η μεγάλη τρωτότητα του σώματος των κόμβων που εξετάστηκαν ενώ παρατηρήθηκε σημαντική πτώση της δυσκαμψίας και στένωση των υστερητικών κύκλων (pinching) λόγω της απώλειας αγκύρωσης των ράβδων.



Σχήμα 2.39. Δοκίμια εσωτερικών, εξωτερικών και γωνιακών κόμβων (Pampanin et al., 2002)

Συγκεκριμένα στους εξωτερικούς κόμβους, ο συνδυασμός λείων ράβδων με κακή αγκύρωση καθώς και η έλλειψη ικανοτικού σχεδιασμού οδήγησε σε ψαθυρές αστοχίες: διατμητική αστοχία κόμβου και ολίσθηση διαμήκους οπλισμού, λόγω και της αδυναμίας σχηματισμού, εναλλακτικών μηχανισμών μεταφοράς τέμνουσας, μετά την πρώτη διαγώνια ρηγμάτωση. Όπως σημειώνεται, με τις τυπικές λεπτομέρειες αγκύρωσης του διαμήκους οπλισμού δοκού που συναντώνται σε υφιστάμενους κόμβους, δεν είναι δυνατή η ανάπτυξη του μηχανισμού διαγώνιου θλιπτήρα σκυροδέματος για τη μεταφορά της τέμνουσας. Οι μηχανισμοί ψαθυρής αστοχίας που εμφανίστηκαν ποικίλουν ανάλογα με τον τρόπο αγκύρωσης του διαμήκους οπλισμού της δοκού (**Σχήμα 2.40**). Στους εσωτερικούς κόμβους καθώς και στους κόμβους οροφής δεν παρατηρήθηκαν βλάβες στο σώμα του κόμβου κυρίως λόγω της πρώιμης καμπτικής αστοχίας του υποστυλώματος ελλείψει ικανοτικού σχεδιασμού. Από τη διερεύνηση της επιρροής του τρόπου αγκύρωσης του διαμήκους οπλισμού της δοκού, προέκυψε πως χειρότερη διαμόρφωση λεπτομερειών, οδηγεί και σε μεγαλύτερες τιμές συνολικής παραμόρφωσης των δοκιμίων.

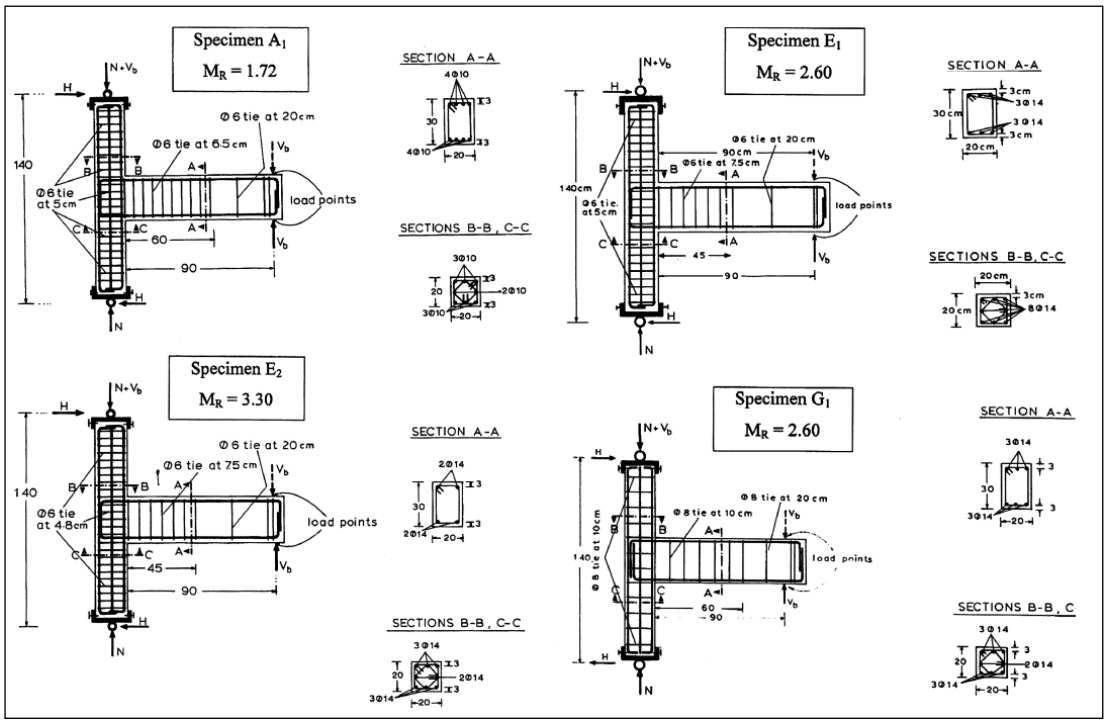


Σχήμα 2.40. Διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας εξωτερικών κόμβων (Pampanin et al., 2002)

Η μελέτη του Τσώνου

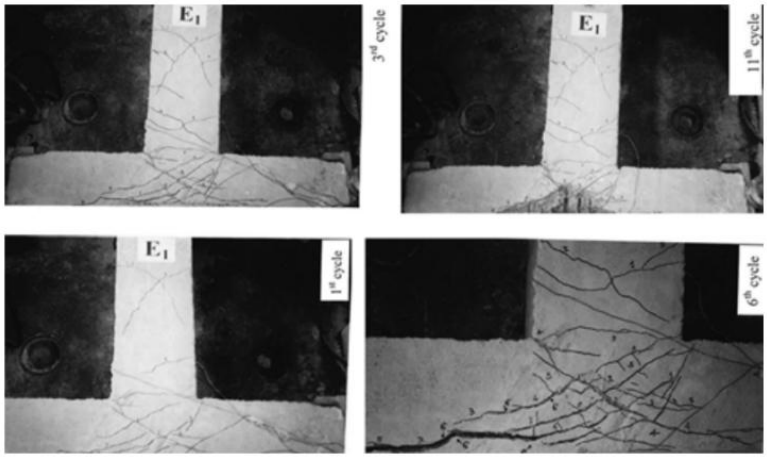
Η πειραματική διερεύνηση του Τσώνου (Tsonos, 2007), παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από τη σκοπιά ότι εξετάζει δοκίμια κόμβων σχεδιασμένων σύμφωνα με όλες τις απαιτήσεις των σύγχρονων κανονισμών ως προς τις λεπτομέρειες όπλισης και τις ικανοτικές διατάξεις.

Συγκεκριμένα, τέσσερα δοκίμια εξωτερικών κόμβων (**Σχήμα 2.41**), σχεδιασμένα σύμφωνα με σύγχρονους κανονισμούς: Ευρωκώδικα 2 και 8 (σειρά Ε), ACI 318-05 και ACI 352R-02 (σειρά Α), ΕΚΩΣ και ΕΑΚ (σειρά G) αντίστοιχα, υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη οριζόντια φόρτιση προσομοιώνοντας μια πραγματική, ισχυρή σεισμική δράση. Στα υποστυλώματα ασκήθηκεν σταθερό αξονικό φορτίο ίσο με 200 kN.



Σχήμα 2.41. Δοκίμια εξωτερικών κόμβων που εξετάστηκαν (Tsonos, 2007)

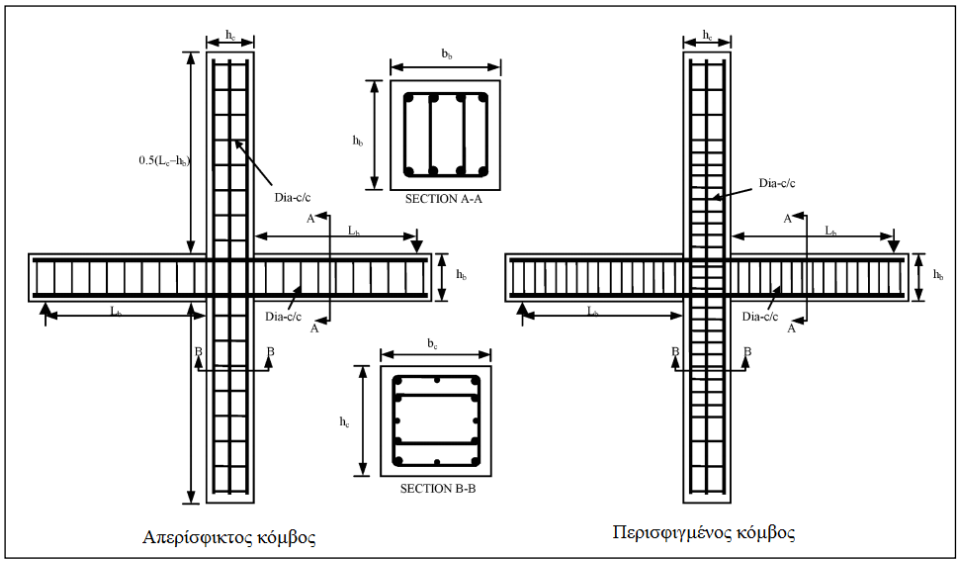
Από τη μελέτη αυτή, προέκυψε το συμπέρασμα πως ακόμα και οι σύγχρονες διατάξεις σχεδιασμού, μπορούν κατά περιπτώσεις να οδηγήσουν σε μεγάλες βλάβες στο σώμα του κόμβου. Πράγματι, ενώ τα δοκίμια A1 και E2 (**Σχήμα 2.41**) συμπεριφέρθηκαν όπως προβλέπεται από τους κανονισμούς με δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στις δοκούς, δεν συνέβη το ίδιο με τα δοκίμια E1 και G1 στα οποία προέκυψε διατμητική αστοχία του κόμβου σε αρκετά πρώιμους κύκλους φόρτισης ενώ σημαντική ήταν και η βλάβη στις κρίσιμες περιοχές των υποστυλωμάτων (**Σχήμα 2.42**). Να σημειωθεί πως, παρ' ότι στο δοκίμιο E2 αποτράπηκε η διατμητική αστοχία, δεν αποφεύχθηκε ο σχηματισμός, περιορισμένων αλλά εμφανών ρωγμών στο σώμα του κόμβου κάτι που δεν συνέβη στο δοκίμιο A1. Πάντως και τα δύο αυτά δοκίμια διατήρησαν την αντοχή τους χωρίς απότομη απομείωση, ακόμα και μετά την επίτευξη της μέγιστης ικανότητας τους. Για τα δοκίμια E1 και G1, ως αίτιο της ψαθυρής αυτής συμπεριφοράς, θεωρείται το γεγονός ότι η διατμητική τάση στον κόμβο βρέθηκε να είναι υψηλότερη της διατμητικής αντοχής όπως αυτή υπολογίζεται από μια μεθοδολογία που προτείνει ο συγγραφέας.



Σχήμα 2.42. Επίπεδα αστοχίας δοκιμίων (Tsonos, 2007)

Η μελέτη των Sharma - Reddy - Eligehausen - Vaze

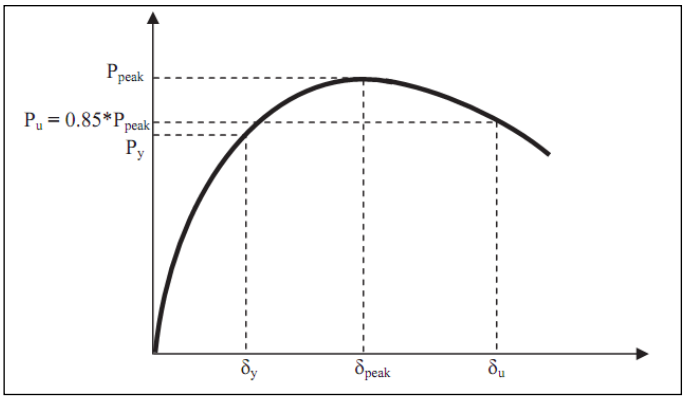
Τα αποτελέσματα τεσσάρων δοκιμίων εσωτερικών κόμβων, δύο σε φυσικό μέγεθος και δύο σε κλίμακα 1/2, παρουσιάζονται από τους Sharma et al. (2011). Τα δοκίμια χαρακτηρίζονται ως περισφιγμένα ή απερίσφικτα, αναλόγως με το αν αναπαριστούν κόμβους υφιστάμενων ή σύγχρονων κατασκευών (**Σχήμα 2.43**).



Σχήμα 2.43. Δοκίμια εσωτερικών κόμβων (Sharma et al., 2011)

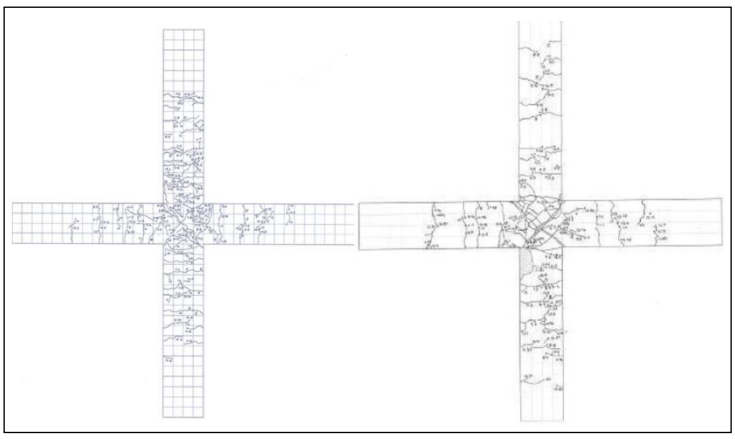
Η αντοχή και η πλαστιμότητα των κόμβων αποτέλεσαν τις κύριες παραμέτρους που εξετάστηκαν κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Η πλαστιμότητα μ των δοκιμίων ορίστηκε όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.44** ως ο λόγος της μετατόπισης δ_u που αντιστοιχεί στο

85% της μέγιστης που επιτεύχθηκε προς τη μετατόπιση δ_y κατά τη διαρροή του διαμήκους οπλισμού των δοκών.



Σχήμα 2.44. Ορισμός της πλαστιμότητας για τα δοκίμια των κόμβων (Sharma et al., 2011)

Αξίζει να σημειωθεί πως από τα συμπεράσματα που παρατίθενται, προκύπτει εμμέσως ζήτημα ως προς την επιρροή της κλίμακας των δοκιμίων στη δομητική τους συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, όσον αφορά την εικόνα της ρηγμάτωσης μεταξύ απερίσφικτου και περισφιγμένου κόμβου, παρατηρείται διαφορά μόνο στα δοκίμια κλίμακας 1/2 ενώ στα δοκίμια πραγματικής κλίμακας, η εικόνα είναι σχεδόν πανομοιότυπη (**Σχήμα 2.45**). Επιπλέον, από τη σκοπιά της πλαστιμότητας, μόνο στα δοκίμια κλίμακας 1/2 υπήρξε αισθητή διαφορά ενώ στα άλλα δοκίμια, η περίσφιγξη δεν φάνηκε να προσφέρει σημαντική βελτίωση. Ως προς την υπερεκτιμημένη συμβολή της ποσότητας συνδετήρων εντός του κόμβου, οι παρατηρήσεις των συγγραφέων για τα δοκίμια πραγματικής κλίμακας, έρχονται να προστεθούν και σε άλλες αντίστοιχες αναφορές όπως των Durrani και Wight (1985).



Σχήμα 2.45. Εικόνα ρηγμάτωσης απερίσφικτου και περισφιγμένου αντίστοιχα, δοκιμίου πραγματικής κλίμακας (Sharma et al. 2011)

2.3.3. Αναλυτικές προσομοιώσεις κόμβων

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, πέραν της έλλειψης ενός καθολικά αποδεκτού θεωρητικού μοντέλου σχεδιασμού - λειτουργίας κόμβων δοκού - υποστυλώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα, φανερή είναι και η έλλειψη αναλυτικών εργαλείων και προσομοιωμάτων που να επιτρέπουν στους μηχανικούς να λάβουν υπόψη τους ικανοποιητικά την πραγματική συμπεριφορά των κόμβων, κατά την ανάλυση και το σχεδιασμό πλαισιωτών κατασκευών. Στην κατεύθυνση αυτή, έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια αρκετές προσπάθειες από ερευνητές, με την εφαρμογή μη-γραμμικών αναλύσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ΠΣ) καθώς και με τη δημιουργία διαφόρων μακρό -στοιχείων (macro elements) για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των κόμβων δοκού - υποστυλώματος υπό ανακυκλιζόμενες σεισμικές δράσεις. Στην πραγματικότητα και οι δύο προσεγγίσεις κινούνται στα πλαίσια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Η πρώτη προσέγγιση αναφέρεται εναλλακτικά και ως προσέγγιση του συνεχούς (continuum approach) (Mitra, 2007) και αφορά τη λεπτομερή απεικόνιση του φορέα με χωρικά ΠΣ. Χρησιμοποιείται κυρίως για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς πειραματικών δοκιμίων, την επιβεβαίωση της εικόνας της ρηγμάτωσης μέσα στο σώμα του κόμβου, αλλά και για τη μελέτη των χαρακτηριστικών σε τοπικό επίπεδο όπως η αλληλεπίδραση της συνάφειας, η διατμητική παραμόρφωση και άλλα. Η προσέγγιση αυτή (που υιοθετείται και στην παρούσα εργασία), παρ' ότι μπορεί να προσομοιώσει, συχνά με ικανοποιητική ακρίβεια την πραγματική απόκριση ενός κόμβου, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πρακτικές εφαρμογές και δεν μπορεί να ικανοποιήσει μια βασική ανάγκη, να ληφθεί δηλαδή υπόψη η απόκριση του κόμβου στη δισδιάστατη ανάλυση ενός ευρύτερου πλαισιακού δομητικού συστήματος. Ενίοτε πάλι προβλέπεται και λάθος ο μηχανισμός αστοχίας. Αποτελεί λοιπόν περισσότερο ένα ερευνητικό εργαλείο στην παρούσα φάση. Αυτό συμβαίνει, γιατί πέρα από τη διαδικασία γεωμετρικής σύνθεσης του προσομοιώματος που έτσι και αλλιώς μπορεί να είναι κοπιώδης, στα περισσότερα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS, DIANA) υπεισέρχονται υπολογιστικές παράμετροι με συχνά μικρό φυσικό νόημα που επηρεάζουν όμως σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Επιπλέον, πολύ συχνά είναι και τα προβλήματα σύγκλισης που συναντούνται στις μη-γραμμικές αναλύσεις (ειδικά στην παρούσα περίπτωση της προσομοίωσης του οπλισμένου σκυροδέματος που αποτελεί και το αντικείμενο στην παρούσα εργασία) ενώ ταυτόχρονα απαιτούνται και μεγάλοι υπολογιστικοί πόροι και χρόνος.

Η δεύτερη προσέγγιση αφορά βασικά δύο κατηγορίες μοντέλων (Mitra, 2007): τα ενσωματωμένα μοντέλα (implicit models) και τα λεπτομερή μακροσκοπικά μοντέλα (explicit macroscopic models). Στα πρώτα, η απώλεια δυσκαμψίας και φέρουσας ικανότητας λόγω της βλάβης του κόμβου, πραγματοποιείται μεταβάλλοντας τα στοιχεία των δοκών και των υποστυλωμάτων. Συνήθως, μη-γραμμικά ελατήρια, πλαστικές αρθρώσεις, ή και τα δύο προστίθενται στα άκρα των στοιχείων. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά χρήσιμη για τον καθορισμό της επίπτωσης της ανελαστικής απόκρισης του κόμβου στη συνολική δομητική συμπεριφορά ενώ δεν απαιτεί και υψηλή υπολογιστική ικανότητα. Από την άλλη, τα μοντέλα αυτά είναι δύσκολο να βαθμονομηθούν καθώς ανελαστικότητα του κόμβου κατανέμεται μεταξύ των δοκών και των υποστυλωμάτων, ενώ μη υιοθετώντας μια λεπτομερή περιγραφή της σύνδεσης, δεν ικανοποιούν τις αντίστοιχες κινηματικές συνθήκες και έτσι δεν είναι κατάλληλα για μια αναλυτική διερεύνηση των μηχανισμών της μη-γραμμικής απόκρισης του κόμβου. Τα λεπτομερή μακροσκοπικά μοντέλα απο την άλλη, ακολουθούν μια λεπτομερή απεικόνιση του σώματος του κόμβου, μπορούν να συνδεθούν, ως ξεχωριστά μακρο-στοιχεία, με ραβδόμορφα στοιχεία δοκών και υποστυλωμάτων ενώ λαμβάνουν υπόψη φαινόμενα όπως η ολίσθηση (λόγω συνάφειας) των ράβδων και η διατμητική αστοχία.

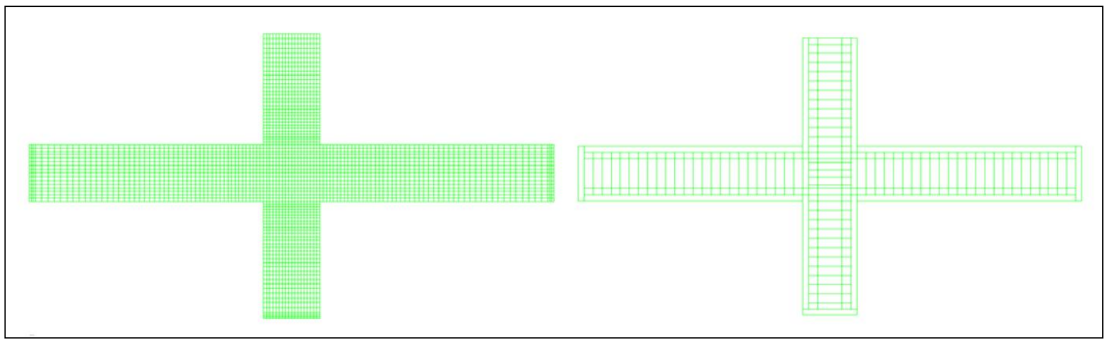
2.3.3.1. Προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Λόγω της πολυπλοκότητας της μεθόδου προσομοίωσης καθώς και της περιορισμένης ευρύτητας εφαρμογής τέτοιων προσπαθειών (πέραν της ερευνητικής αξίας), λίγες σχετικά μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει χωρικά μη-γραμμικά προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση κόμβων δοκού υποστυλώματος. Δεδομένης και της ποικιλίας των λογισμικών ΠΣ που χρησιμοποιούνται από τους ερευνητές στην πράξη, κάποια γενικότητα για την προσομοίωση είναι δύσκολο να διατυπωθεί. Καθώς η μέθοδος αυτή, με χρήση ειδικώς του λογισμικού ANSYS, αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας υπάρχει σχετικά εκτενής αναφορά στον τρόπο αυτό προσομοίωσης σε επόμενα κεφάλαια, όπως το Κεφάλαιο 3 που περιγράφει την προσομοίωση γενικά του οπλισμένου σκυροδέματος καθώς και στο Κεφ. 5.3 όπου περιγράφεται συγκεκριμένα το προσομοίωμα του κόμβου δοκού - υποστυλώματος. Παρ' όλα αυτά κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν σύντομα και κάποιες σχετικές αναφορές από τη βιβλιογραφία.

Η εργασία των Manfredi - Verderame - Lignola

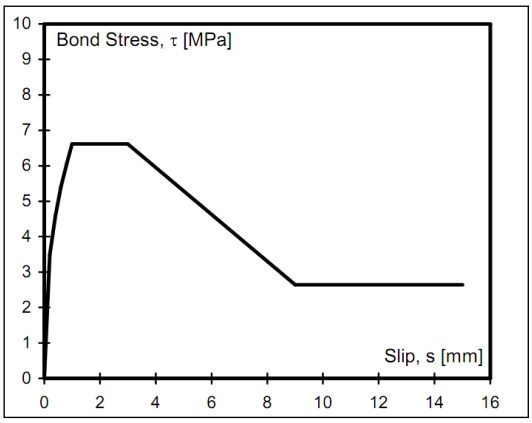
Οι Manfredi et al. (2008) χρησιμοποίησαν το γενικό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων DIANA v9.1, για τη μη-γραμμική προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία ενός

εσωτερικού κόμβου δοκού - υποστυλώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ο κόμβος που προσομοιώθηκε είχε δοκιμασθεί πειραματικά από τους Zaid et al., 1999 και υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία. Στην ανάλυση τους χρησιμοποίησαν 8-κομβικά, δισδιάστατα στοιχεία επίπεδης έντασης, υιοθετώντας μη γραμμικές ιδιότητες υλικών (**Σχήμα 2.46**).

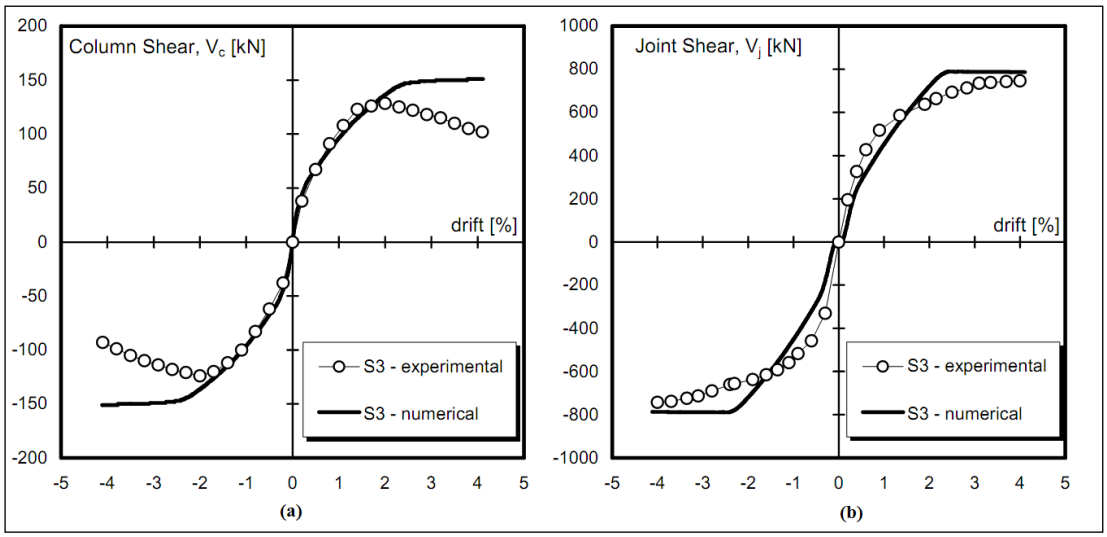


Σχήμα 2.46. Διακριτοποίηση στοιχείων σκυροδέματος και οπλισμών (Manfredi et al., 2008)

Η μη-γραμμική συμπεριφορά του σκυροδέματος ελήφθη υπόψη σε θλίψη μέσω ενός μοντέλου πλαστιμότητας ενώ σε εφελκυσμό με τη δυνατότητα ρηγμάτωσης. Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά μοντέλα και ιδιότητες για περισφιγμένο και απερίσφιγκτο σκυρόδεμα. Για το χάλυβα υιοθετήθηκε ένα ιδεατό μοντέλο πλαστιμότητας χωρίς σκλήρυνση (hardening). Ο εγκάρσιος οπλισμός θεωρείται ότι συνδέεται με απόλυτη συνάφεια με το σκυρόδεμα (χωρίς καμιά ολίσθηση) ενώ οι διαμήκεις οπλισμοί συνδέονται μέσω κατάλληλων στοιχείων διεπαφής. Τα στοιχεία αυτά ρυθμίζονται ώστε να ακολουθούν τη μη γραμμική σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης που προτείνεται στον Model Code 90 (Fib, 1990) (**Σχήμα 2.47**)

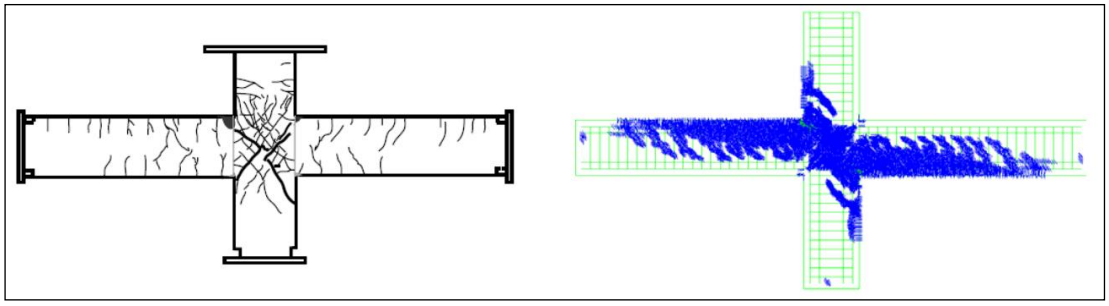


Σχήμα 2.47. Σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης (Manfredi et al., 2008)



Σχήμα 2.48. Σύγκριση πειραματικών - αναλυτικών καμπύλων (Manfredi et al., 2008)

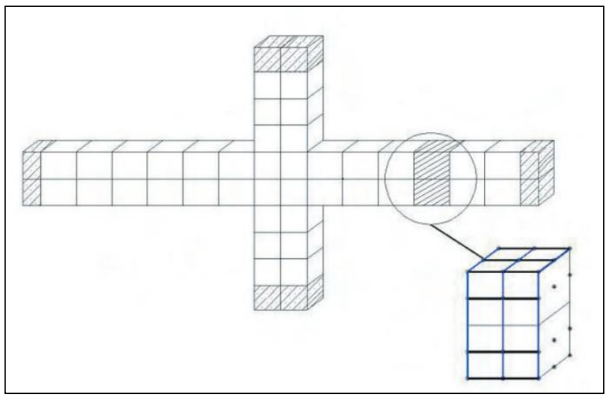
Πρέπει να σημειωθεί πως η ανάλυση που έγινε ήταν σε μονοτονική και όχι ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Από τη σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικών αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε αρκετά καλή ταύτιση. Συγκεκριμένα, η καμπύλη τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου όπως προέκυψε από την ανάλυση βρίσκεται σε καλή συμφωνία με την πειραματική έως την επίτευξη της μέγιστης αντοχής. Στον μετά τη μέγιστη αντοχή κλάδο, παρατηρείται απόκλιση καθώς η ανάλυση δεν καταφέρνει να προσεγγίσει την πτώση στο διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης (**Σχήμα 2.48α**) πιθανόν λόγω της προσομοίωσης μέσω μονοτονικής και όχι ανακυκλιζόμενης φόρτισης όπως στο πείραμα. Αντίστοιχα πολύ καλή προσέγγιση γίνεται και στην καμπύλη τέμνουσας κόμβου - σχετικής μετάθεσης ορόφου (**Σχήμα 2.48β**). Τέλος η εικόνα της ρηγμάτωσης, όπως προβλέπεται αναλυτικά είναι συγκρίσιμη με αυτή που παρατηρήθηκε πειραματικά (**Σχήμα 2.49**).



Σχήμα 2.49. Εικόνα ρηγμάτωσης από το πείραμα και την ανάλυση (Manfredi et al., 2008)

Η εργασία των Cotsovos - Kotsovos

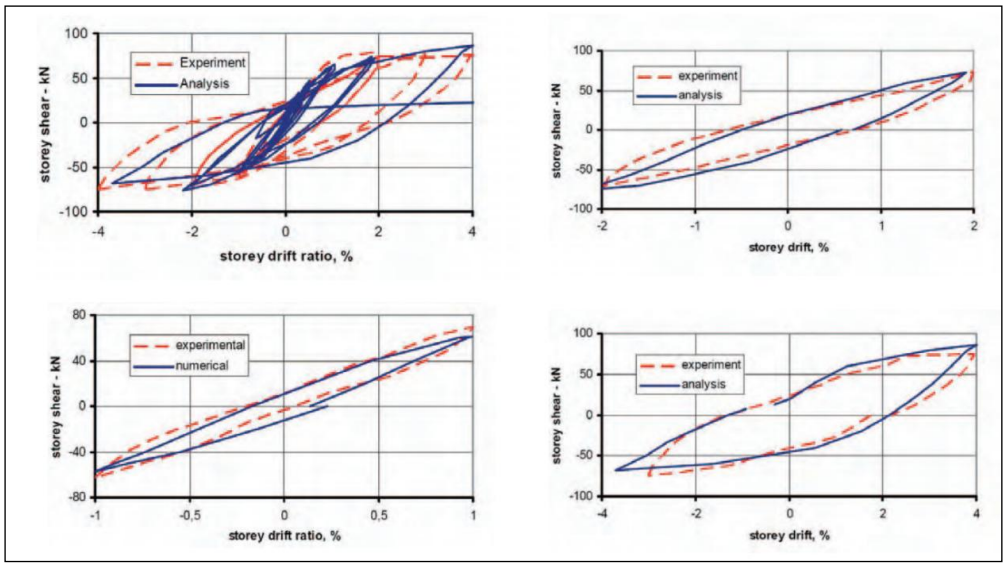
Οι Cotsovos και Kotsovos (2008) χρησιμοποίησαν ένα λογισμικό ΠΣ, ικανό για τρισδιάτατη, μη-γραμμική ανάλυση, το οποίο είναι εξειδικευμένο στην προσομοίωση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (RC-FINEL) και έχει βρεθεί να δίνει ακριβείς αριθμητικές προβλέψεις σε μεγάλο εύρος εφαρμογών. Κύριος σκοπός της εργασίας ήταν η δυνατότητα προσομοίωσης κόμβων και η εξέταση της επιρροής της ρηγμάτωσης του κόμβου στη συνολική δομητική απόκριση. Μάλιστα, οι κόμβοι που προσομοιώθηκαν αφορούν δοκίμια που έχουν ήδη εξεταστεί πειραματικά (Shiohara και Kusuhara, 2006) και αποτέλεσαν βάση για την αναλυτική διερεύνηση και της παρούσης, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5. Το σκυρόδεμα προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας εξαεδρικά ορθογωνικά στοιχεία Lagrange 27 κόμβων ενώ ο χάλυβας με ισοπαραμετρικά στοιχεία δικτυώματος 3 κόμβων κατάλληλης διατομής (**Σχήμα 2.50**). Το μοντέλο υλικού για το σκυρόδεμα είναι μη-γραμμικό πλήρως ψαθυρό και λαμβάνει υπόψη του τη διόγκωση του σκυροδέματος και την τριαξονική εντατική κατάσταση με βάση καταστατικές εξισώσεις και επιφάνεια αστοχίας που βασίζεται σε πειράματα κυλινδρικών δοκιμίων. Ο χάλυβας ακολουθεί ένα διγραμμικό νόμο για τη σχέση τάσεων - παραμορφώσεων ενώ η συνάφεια χάλυβα - σκυροδέματος θεωρείται πλήρης. Αυτή η υπόθεση θεωρείται συμβατή με την προσέγγιση διανεμημένων ρωγμών (smeared cracks) για το σκυρόδεμα καθώς και με το γεγονός ότι η εφελκυστική αντοχή είναι μικρότερη από την αντοχή της συνάφειας μεταξύ των δύο υλικών.



Σχήμα 2.50. Διακριτοποίηση σκυροδέματος και θέση στοιχείων οπλισμού (Cotsovos και Kotsovos, 2008)

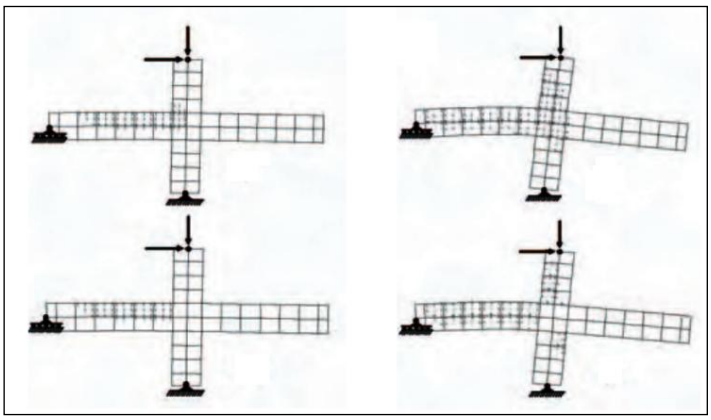
Κατά τη διερεύνηση, έγιναν τόσο μονοτονικές όσο και ανακυκλιζόμενες αναλύσεις ενώ έγινε σύγκριση της συμπεριφοράς στοιχείων κόμβων με και χωρίς τη δυνατότητα δημιουργίας ρωγμών μέσα στο σώμα του κόμβου. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης, όπως προκύπτει και από τη σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα, προβλέπουν πολύ καλά όλες τις παραμέτρους: φέρουσα ικανότητα, μέγιστη

σχετική μετατόπιση ορόφου, εμβαδόν εντός των υστερητικών κύκλων, με μέγιστη απόκλιση της τάξης του 10% (**Σχήμα 2.51**)



Σχήμα 2.51. Σύγκριση πειραματικών με αριθμητικά αποτελέσματα (Cotsovos και Kotsovos, 2008)

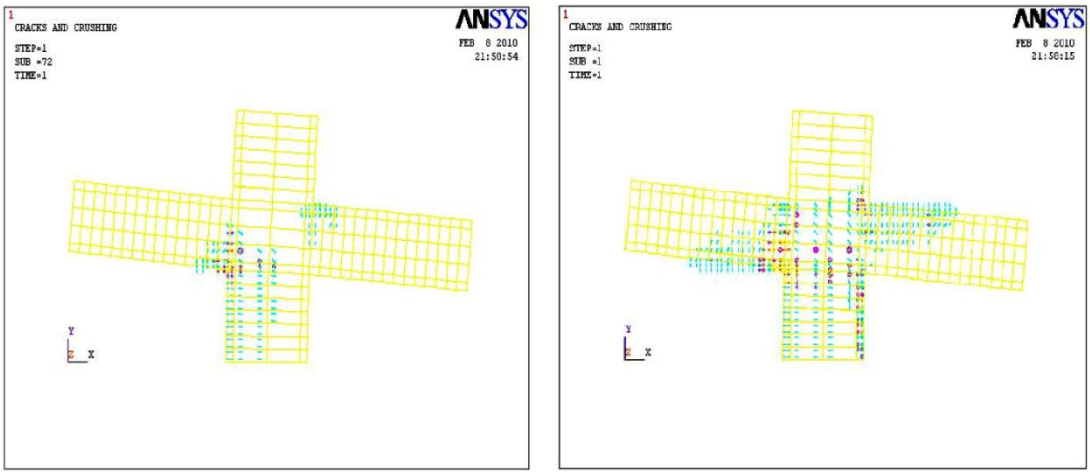
Αξίζει να σημειωθεί πως από τους συγγραφείς διατυπώνεται η άποψη πως τα πειραματικά δεδομένα και ιδιαίτερα αυτά που αφορούν τη συμπεριφορά των δοκιμίων μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής (post-peak behavior) επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό από την αλληλεπίδραση του δοκιμίου με την πειραματική διάταξη, μια συμπεριφορά που δεν μπορεί να προσομοιωθεί κατά την ανάλυση. Τέλος, η αριθμητική πρόβλεψη της ρηγμάτωσης προκύπτει όπως αναμενόταν σύμφωνα με την πραγματική συμπεριφορά ενώ διαπιστώνεται πως στην περίπτωση αρηγμάτωτου κόμβου, η κατανομή των ρωγμών στα συντρέχοντα μέλη παραμένει η ίδια (**Σχήμα 2.52**).



Σχήμα 2.52. Εικόνα ρηγμάτωσης σε διάφορα επίπεδα φόρτισης και σύγκριση δοκιμίου με ρηγματωμένο και αρηγμάτωτο κόμβο (Cotsovos και Kotsovos, 2008)

Η εργασία των Rajaram - Murugesan - Thirugnanam

Στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος για τη διερεύνηση της πειραματικής συμπεριφοράς κόμβων δοκού - υποστυλώματος, οι Rajaram et al. (2010) ακολούθησαν και μια διαδικασία μη-γραμμικής ανάλυσης των δοκιμίων, με τη μεθόδο των ΠΣ και χρήση του λογισμικού ANSYS. Οι παράμετροι που διερευνήθηκαν αφορούσαν την πλαστιμότητα, την ενεργειακή απορρόφηση και τη δυσκαμψία του κόμβου υπό ανακυκλιζόμενα φορτία. Στη δημοσιευμένη εργασία δεν παρατίθενται στοιχεία σχετικά με τη διαδικασία προσομοίωσης (όπως τύπος ΠΣ που χρησιμοποιήθηκαν, μοντέλα υλικών, μορφή φόρτισης). Παρατίθεται όμως η μορφή ρηγμάτωσης για δύο φάσεις του μονοτονικά αυξανόμενου φορτίου (**Σχήμα 2.53**).



Σχήμα 2.53. Ρηγμάτωση στον κόμβο για μονοτονική φόρτιση Rajaram et al. (2010)

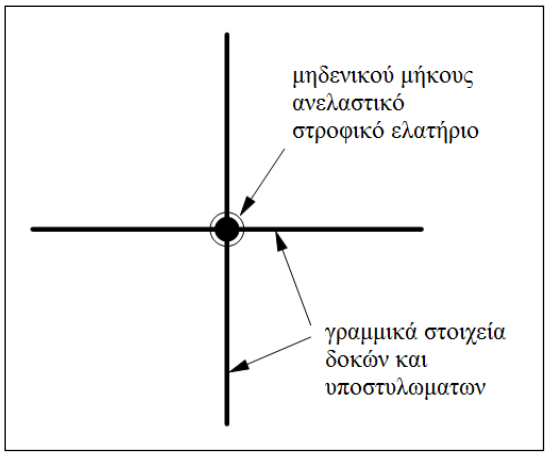
2.3.3.2. Ανάπτυξη προσομοιωμάτων μακρό-στοιχείων

Παρακάτω γίνεται μια σύντομη περιγραφή ορισμένων μακρο-στοιχείων που έχουν κατά καιρούς προταθεί από ερευνητές:

i. Ενσωματωμένα στοιχεία (implicit elements)

Συγκεντρωμένο ανελαστικό στροφικό ελατήριο μηδενικού μήκους

Το μοντέλο που ανέπτυξαν οι El-Metwally και Chen (1988) αφορά την τοποθέτηση ενός μη-γραμμικού στροφικού ελατηρίου μηδενικού μήκους μεταξύ των δοκών και των υποστυλωμάτων για την περιγραφή της ανελαστικής απόκρισης του κόμβου (**Σχήμα 2.54**).

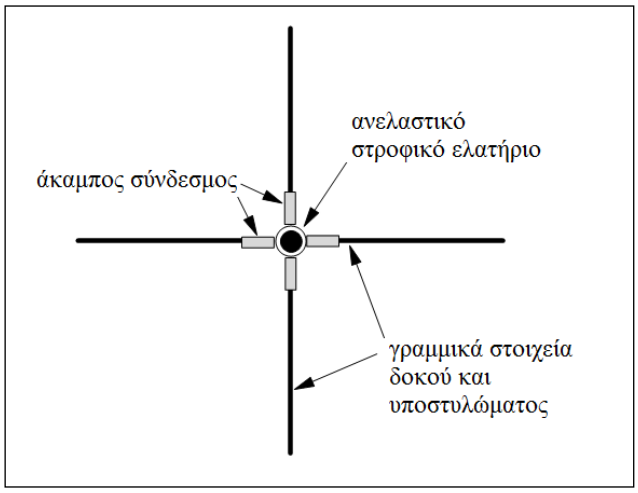


Σχήμα 2.54. Ανελαστικό στροφικό ελατήριο μηδενικού μήκους (El-Metwally και Chen, 1988)

Τρείς παράμετροι χρειάζονται για τον καθορισμό του μοντέλου, η αρχική δυσκαμψία του κόμβου, η μέγιστη καμπτική αντοχή και μια σταθερά που αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απορροφάται από τον κόμβο. Η ενέργεια που απορροφάται οφείλεται στην ολίσθηση των οπλισμών λόγω συνάφειας και της υστερητικής συμπεριφοράς του ρηγματωμένου σκυροδέματος.

Μοντέλο άκαμπτης ζώνης

Στο μοντέλο που φαίνεται στο **Σχήμα 2.55**, ο κόμβος προσομοιώνεται σαν ένας άκαμπτος σύνδεσμος με ένα στροφικό ελατήριο συνδεδεμένο στην άκρη του (Alath και Kunnath, 1995). Το στροφικό ελατήριο ρυθμίζεται από μια ανελαστική σχέση διατμητικής τάσης - διατμητικής παραμόρφωσης. Η ολίσθηση λόγω απώλειας συνάφειας δεν έχει ληφθεί υπόψη.

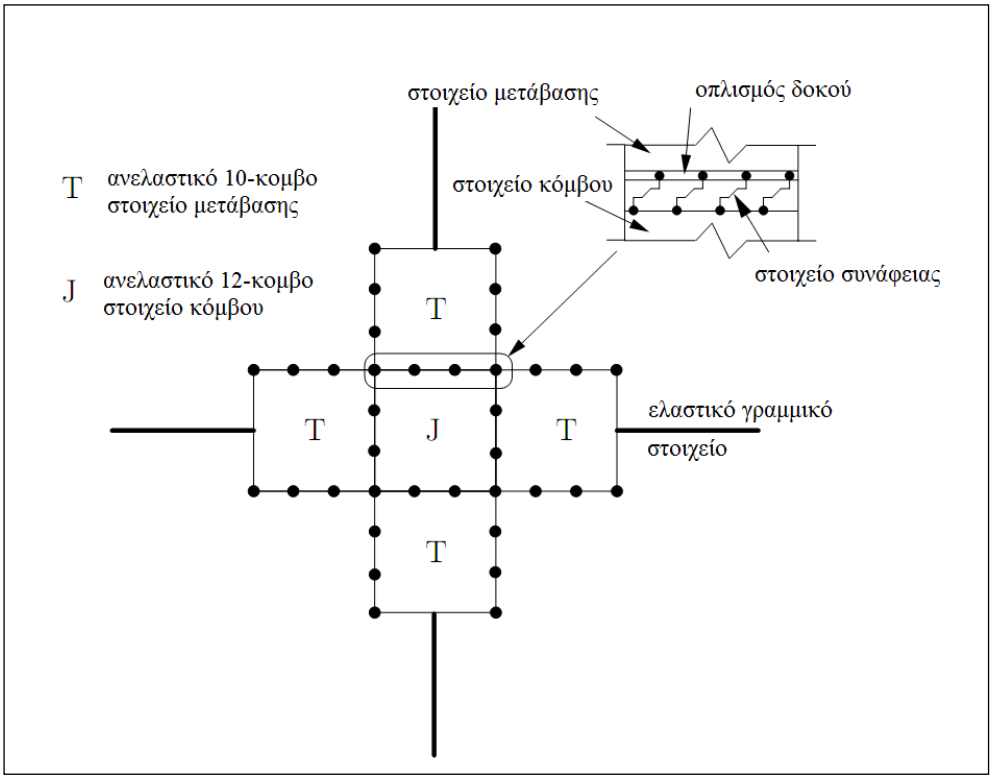


Σχήμα 2.55. Μοντέλο άκαμπτης ζώνης (Alath και Kunnath, 1995)

ii. Λεπτομερή μακροσκοπικά στοιχεία (explicit macroscopic elements)

Το μοντέλο Elmorsi-Kianoush-Tso

Οι Elmorsi et al. (2000) πρότειναν ένα μοντέλο κόμβου που περιλαμβάνει μια ζώνη για το σώμα του κόμβου και τέσσερεις κρίσιμες ζώνες (**Σχήμα 2.56**). Η ζώνη του σώματος του κόμβου, προσομοιώνεται με ένα 12-κομβο ανελαστικό στοιχείο επίπεδης έντασης, ενώ οι κρίσιμες ζώνες από 10-κομβα ανελαστικά στοιχεία τα οποία συνδέονται με τις συντρέχουσες δοκούς και υποστυλώματα. Τα στοιχεία προσομοίωσης των κρίσιμων ζωνών αναπαριστούν τις πλαστικές αρθρώσεις όπου υποτίθεται πως συμβαίνουν οι περισσότερες ανελαστικές παραμορφώσεις και εκτείνονται σε μήκος όσο το ύψος του στοιχείου που συνδέουν. Ο διαμήκης οπλισμός των δοκών και των υποστυλωμάτων τοποθετείται στις ακραίες ίνες των συντρεχόμενων στοιχείων και αναπαριστάται μέσω ανελαστικών στοιχείων δικτυώματος. Και τα δύο επιμέρους τμήματα των κρισίμων ζωνών και του κόμβου αποτελούνται από σκυρόδεμα ενώ οι οπλισμοί συνδέονται μέσω στοιχείων συνάφειας.



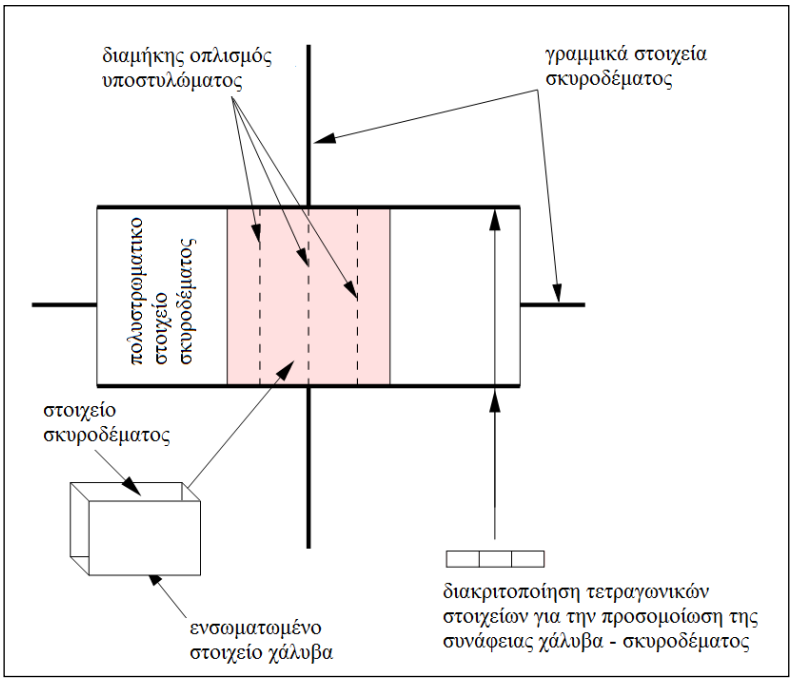
Σχήμα 2.56. Μοντέλο Elmorsi-Kianoush-Tso (2000)

Η μονοαξονική σχέση τάσεων - παραμορφώσεων για το σκυρόδεμα βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις που λαμβάνουν υπόψη και την απομείωση της θλιπτικής αντοχής λόγω ύπαρξης εγκαρσίων ρωγμών. Για τη συμπεριφορά του χάλυβα εφαρμόζεται το μοντέλο

Menegotto-Pinto ενώ για τη σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης το μοντέλο που προτάθηκε από τους Eligehausen et al. (1983).

Μοντέλο Fleury-Reynouard-Merabet

Το μοντέλο των Merabet et al. (1995), θεωρεί πως η συμπεριφορά του κόμβου καθορίζεται από τους εξής ανελαστικούς μηχανισμούς: (α) διαρροή του κύριου διαμήκους οπλισμού των δοκών και/ή των υποστυλωμάτων, (β) ολίσθηση του οπλισμού που είναι αγκυρωμένος μέσα στον κόμβο και άνοιγμα ρωγμών στην περίμετρο του κόμβου, (γ) διατάραξη του σώματος του κόμβου λόγω διαγώνιας ρηγμάτωσης, (δ) εγκάρσια δράση βλήτρου του διαμήκους οπλισμού στη διεπιφάνεια δοκού - κόμβου. Το μοντέλο που φαίνεται στο **Σχήμα 2.57**, αποτελείται από (α) δύο 4-κομβικά τετράπλευρα στοιχεία τοποθετημένα εν παραλλήλω που περιγράφουν τη συμπεριφορά του σκυροδέματος και του εγκάρσιου οπλισμού στον πυρήνα, (β) διακριτοποιημένα τετραπλευρικά στοιχεία μικρού πλάτους για την περιγραφή του οπλισμού που βρίσκεται αγκυρωμένος μέσα στον κόμβο και της συνάφειας χάλυβα - σκυροδέματος, (γ) δύο στοιχεία που παρεμβάλονται για τη σύνδεση των δοκών στον κόμβο, (δ) ραβδωτά στοιχεία δύο κόμβων για τους κατακόρυφους οπλισμούς του υποστυλώματος, (ε) κινηματικές δεσμεύσεις μεταξύ των βαθμών ελευθερίας ώστε να εξασφαλιστεί η συμβιβαστότητα.

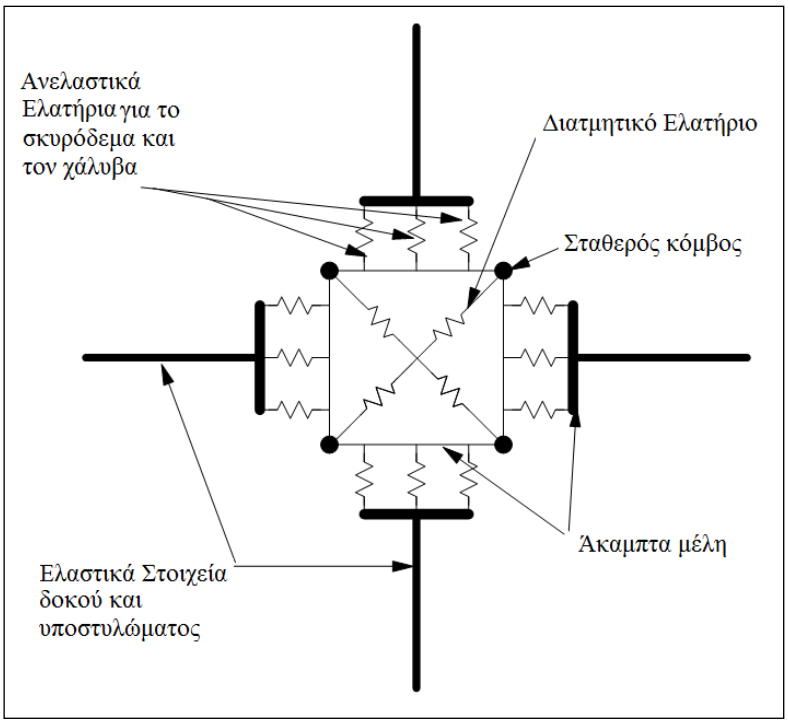


Σχήμα 2.57. Μοντέλο Fleury-Reynouard-Merabet (2000)

Για το σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο διανεμημένων ορθογώνιων ρωγμών (Merabet et al., 1995) ενώ για την αστοχία υιοθετήθηκε το κριτήριο αστοχίας του Ottosen (1975). Για το αρηγμάτωτο σκυρόδεμα υιοθετήθηκε πλαστική απόκριση με ισοτροπική κράτυνση. Για τον χάλυβα υιοθετήθηκε ένα απλό ελαστοπλαστικό μοντέλο με γραμμική ισοτροπική κράτυνση χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο Bauschinger. Τέλος για τη σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης, επίσης εφαρμόστηκε το μοντέλο των Eligehausen et al. (1983).

Μοντέλο Youssef-Ghobarah

Οι Youssef και Ghobarah (2001) πρότειναν ένα μοντέλο κατά το οποίο η σύνδεση προσομοιώνεται με τέσσερα άκαμπτα μέλη τα οποία περιέχουν τον κόμβο και ενώνονται αρθρωτά με τα διατμητικά ελατήρια που συνδέουν τις διαγωνίους (**Σχήμα 2.58**). Η επιρροή της ολίσθησης των ράβδων λόγω απώλειας συνάφειας και της σύνθλιψης του σκυροδέματος στην περίμετρο, προσομοιώνεται με τρία ελατήρια χάλυβα και τρία ελατήρια σκυροδέματος σε κάθε παρειά της σύνδεσης, που συνδέουν τις δοκούς και τα υποστυλώματα με το σώμα του κόμβου. Τα ελατήρια του σκυροδέματος αποτελούν μια εξιδανικευμένη προσέγγιση της σχέσης μεταξύ της αξονική δύναμης και της αξονικής μετατόπισης του θλιπτήρα του σκυροδέματος, ενώ τα ελατήρια του χάλυβα ακολουθούν μια σχέση τάσεως συνάφειας-ολίσθησης.

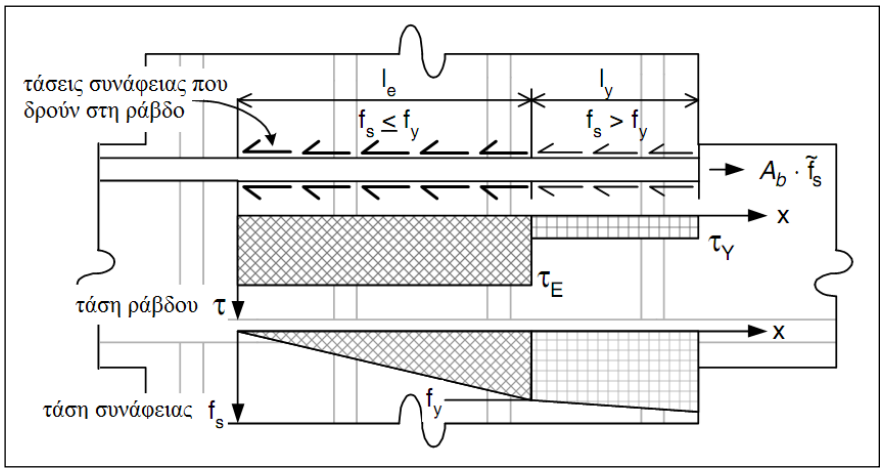


Σχήμα 2.58. Μοντέλο Youssef-Ghobarah (2001)

Για το σκυρόδεμα σε θλίψη χρησιμοποιείται το μοντέλο των Kent και Park (1971), ενώ για τη σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης το μοντέλο των Giuriani et al. (1969). Για την επίλυση της σχέσης συνάφειας - ολίσθησης που θα καθορίσει την περιβάλλουσα καμπύλη των ελατηρίων του χάλυβα, χρησιμοποιείται η μεθοδολογία προσομοίωσης του οπλισμού με ΠΣ, παρόμοια με αυτή του Filippou (1986). Για τα διατμητικά ελατήρια προτάθηκε ένα νέο υστερητικό μοντέλο υλικού που προσομοιώνει τη διατμητική συμπεριφορά του σκυροδέματος σε ανακυκλίσεις τέμνουσας και ροπής. Για τον καθορισμό της περιβάλλουσας της καμπύλης, χρησιμοποιήθηκε η τροποποιημένη θεωρία θλιπτικού πεδίου (Modified Compressive Field Theory) (Vecchio και Collins, 1986).

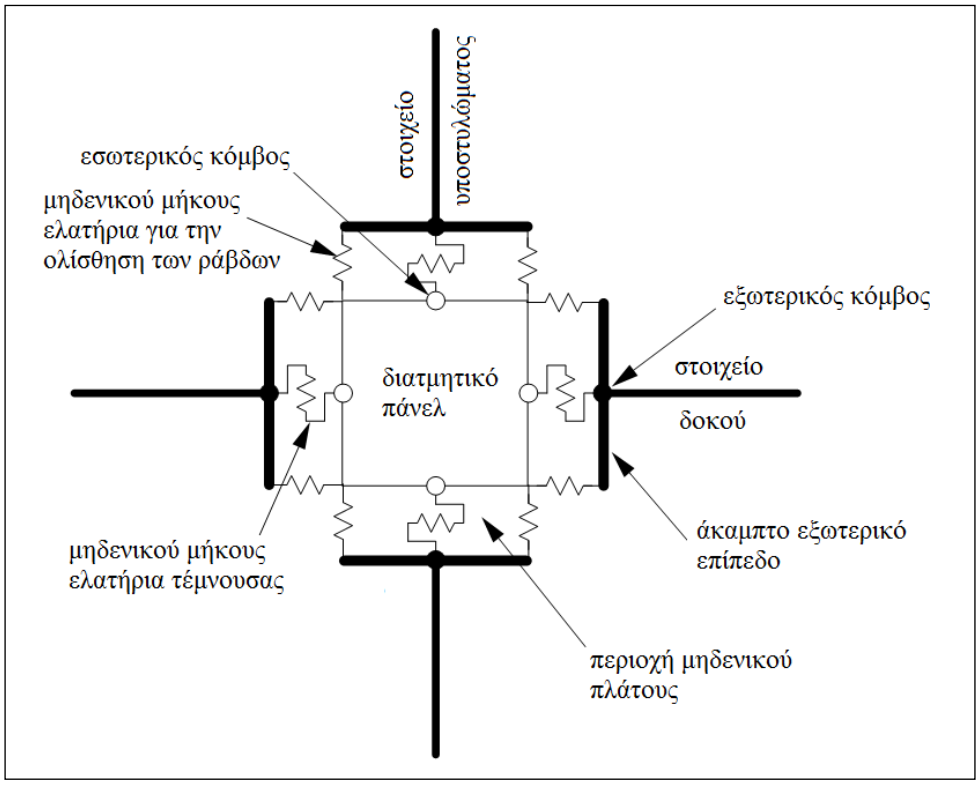
Μοντέλο Lowes-Altoontash

Ο σκοπός της έρευνας των Lowes et al. (2003) ήταν η ανάπτυξη και εφαρμογή στα πλαίσια του λογισμικού OpenSees (http://opensees.peer.berkeley.edu), ενός στοιχείου κόμβου, κατάλληλου για χρήση σε διδιάστατη πλαισιακή ανάλυση, που θα μπορεί να προβλέψει την ανελαστική απόκριση των κόμβων οπλισμένου σκυροδέματος υπό σεισμικές δράσεις. Το στοιχείο της σύνδεσης στο μοντέλο αυτό είναι δισδιάστατο και έχει τέσσερις εξωτερικούς κόμβους, ο καθένας με τρείς βαθμούς ελευθερίας, ώστε να είναι κινηματικά και στατικά συμβατό με δισδιάστατα ραβδωτά στοιχεία δοκών και υποστυλωμάτων που επίσης περιλαμβάνονται στο λογισμικό OpenSees. Επιπλέον περιλαμβάνει, οκτώ μηδενικού μήκους ελατήρια για την προσομοίωση της ολίσθησης των ράβδων λόγω απώλειας συνάφειας, τέσσερα εγκάρσια διατμητικά ελατήρια προσομοίωσης της ανελαστικότητας στην κρίσιμη ζώνη των συντρεχόντων στοιχείων και μια περιοχή (διατμητικό πάνελ) στο κέντρο του στοιχείου που παραμορφώνεται μόνο λόγω τέμνουσας (**Σχήμα 2.60**). Το διάστημα μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών κόμβων είναι στην πραγματικότητα μηδενικών διαστάσεων. Το διατμητικό πάνελ, προσομοιώνει την απώλεια αντοχής και δυσκαμψίας λόγω διατμητικής αστοχίας στον πυρήνα του κόμβου, τα ελατήρια της ολίσθησης την αντίστοιχη απώλεια λόγω της αστοχίας της αγκύρωσης. Τέλος τα διατμητικά ελατήρια αντιστοιχούν στην περιορισμένη δυνατότητα μεταφοράς τέμνουσας λόγω του μεγάλου ανοίγματος ρωγμών στις παρειές των δοκών και των υποστυλωμάτων με τον κόμβο. Οι τέσσερις εσωτερικοί κόμβοι έχουν μόνο έναν βαθμό ελευθερίας ο καθένας και συνδυάζοντας τους με τους δώδεκα βαθμούς ελευθερίας των εξωτερικών κόμβων προκύπτει η συνολική παραμόρφωση του στοιχείου.



Σχήμα 2.59. Εξιδανικευμένη κατανομή τάσεων συνάφειας και τάσεων ράβδου αγκυρωμένης εντός του κόμβου (Lowes et al., 2003)

Για τον καθορισμό της περιβάλλουσας διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης του διατμητικού πάνελ υιοθετήθηκε η τροποποιημένη θεωρία θλιπτικού πεδίου (Vecchio και Collins, 1986).



Σχήμα 2.60. Μοντέλο Lowes-Altoontash (2003)

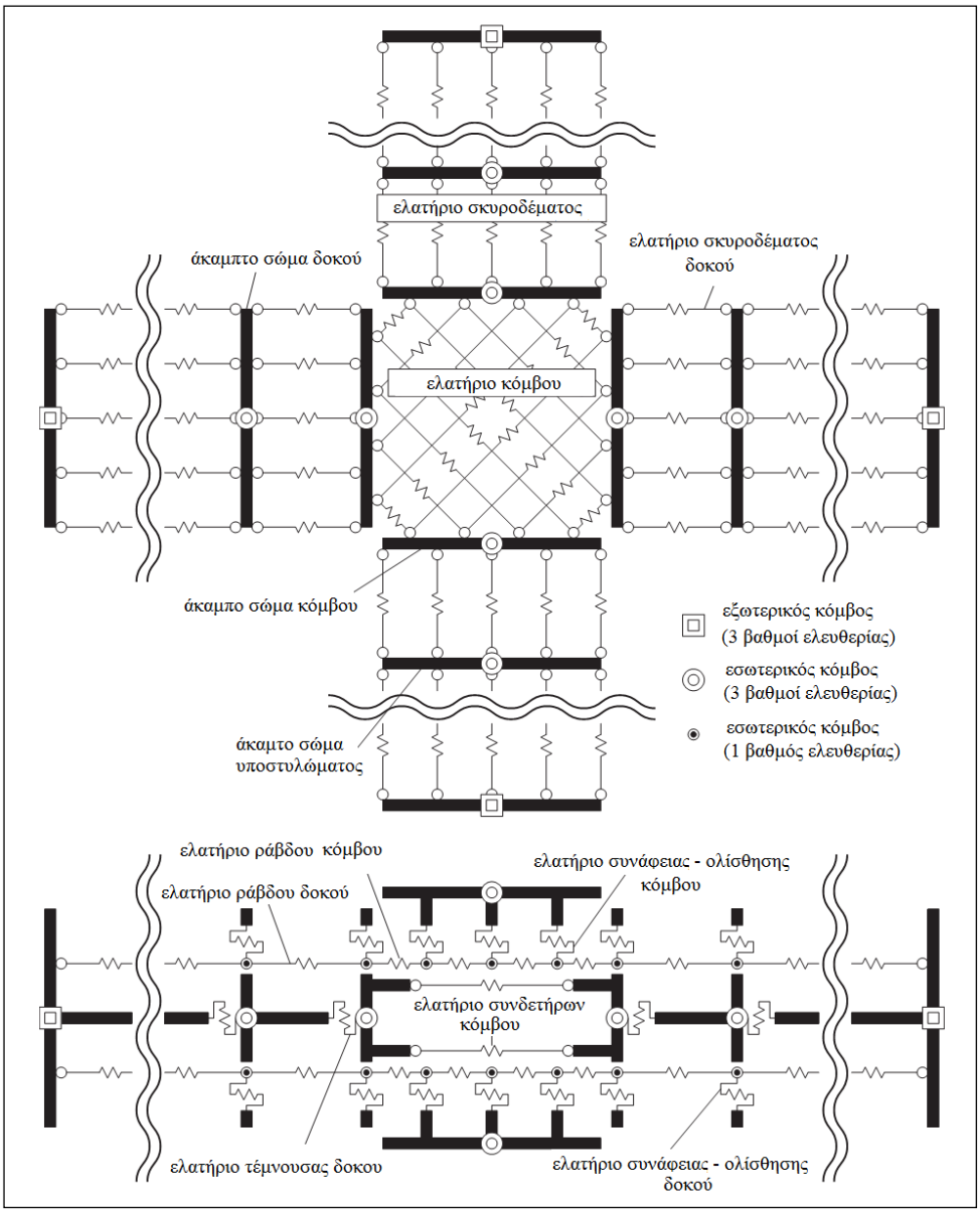
Ο εγκάρσιος οπλισμός του κόμβου και οι πλευρικές ράβδοι του υποστυλώματος θεωρείται ότι συνεισφέρουν στην αντοχή και τη δυσκαμψία της διατμητικής περιοχής. Για

τη βαθμονόμηση των παραμέτρων στο μονοδιάστατο υστερητικό υλικό του διατμητικού πάνελ, χρησιμοποιήθηκαν μόνο η γεωμετρία του κόμβου και οι βασικές ιδιότητες των υλικών. Το μοντέλο για την ολίσθηση των ράβδων προέκυψε θεωρώντας καθολική κατανομή για την περίπτωση ελαστικού χάλυβα ή μέση τάση συνάφειας (ισοκατανεμημένη) εντός του κόμβου, για ράβδο που έχει διαρρεύσει (**Σχήμα 2.59**). Η ολίσθηση καθορίζει τη σχετική μετακίνηση της ράβδου ως προς την παρειά της δοκού και είναι συνάρτηση της κατανομής των παραμορφώσεων κατά το μήκος της. Για τον καθορισμό της αντοχής συνάφειας μιας ελαστικής ράβδου σε εφελκυσμό, χρησιμοποιούνται ως βάση, τα πειραματικά αποτελέσματα των Eligehausen et al. (1983), ενώ για τον οπλισμό που έχει διαρρεύσει χρησιμοποιούνται και τα αποτελέσματα των Shima et al. (1987). Για θλιβόμενη ράβδο λαμβάνονται υπόψη και τα αποτελέσματα της έρευνας των Viwathanatepa et al. (1979).

Το μοντέλο Tajiri-Shiohara-Kusuhara

Στο **Σχήμα 2.61** φαίνεται το μοντέλο κόμβου που πρότειναν οι Tajiri et al. (2006). Το μακροστοιχείο σύνδεσης αντιπροσωπεύεται από τέσσερις εξωτερικούς κόμβους με δώδεκα συνολικά βαθμούς ελευθερίας. Αυτό το υπέρ-στοιχείο προσομοιώνει τον κόμβο καθώς και τις περιοχές πλαστικών αρθρώσεων των συντρεχουσών δοκών και υποστυλωμάτων.

Σε αυτόν τον τύπο διατύπωσης στοιχείου, η μη γραμμική απόκριση του κόμβου προσομοιώνεται με έναν αριθμό αξονικών ελατηρίων που συνδέουν άκαμπτα τμήματα. Τα ελατήρια αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά του σκυροδέματος, του χάλυβα και την απόκριση της ζώνης συνάφειας. Τα άκαμπτα τμήματα αποτελούν τμήματα σκυροδέματος που θεωρείται πως παραμένουν επίπεδα μετά την παραμόρφωση του κόμβου. Τα ελατήρια του σκυροδέματος στον κόμβο καθώς και στις περιοχές πλαστικών αρθρώσεων ακολουθούν μια τροποποιημένη σχέση τάσεων - παραμορφώσεων (Park et al., 1982) ενώ κατά την αποφόρτιση δεν λαμβάνεται υπόψη καμιά απομείωση στη δυσκαμψία. Για το χάλυβα υιοθετείται μια τροποποιημένη έκφραση του μοντέλου των Ramberg και Osgood (1943) και για τη σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης το μοντέλο των Morita και Kaku (1975). Η διάταξη των διαγώνιων ελατηρίων στον κόμβο λαμβάνει υπόψη τις διανεμημένες ρωγμές στον πυρήνα, επομένως δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιο ξεχωριστό εξειδικευμένο μοντέλο για το ρηγματωμένο σκυρόδεμα.



Σχήμα 2.61. Μοντέλο Tajiri-Shiohara-Kusuhara (2006)

2.4. ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΟΜΒΩΝ ΔΟΚΟΥ - ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ

2.4.1. Γενικά

Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα, το σημαντικό για ένα σωστό σχεδιασμό των κόμβων δοκού - υποστυλώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι να εξασφαλιστεί πως οι δοκοί θα αναπτύξουν τις καμπτικές αντοχές τους προτού επέλθει οποιαδήποτε διατμητική αστοχία στον κόμβο (Tsonos, 2007). Επιπλέον επιδιώκουμε ο κόμβος να παραμείνει κατά το δυνατόν χωρίς ζημιές, δηλαδή ελαστικός και αν αυτό δεν είναι δυνατό και ο κόμβος εισέλθει

τελικά στην ανελαστική περιοχή, να διατηρεί την αντοχή και τη δυσκαμψία του υπό μεγάλες ανακυκλίσεις. Για την επίτευξη αυτών των στόχων είναι απαραίτητη η σωστή όπλιση των κόμβων με τη διαμόρφωση κατάλληλων λεπτομερειών, όπως επίσης και η εξασφάλιση, μέσω ελέγχων, των μηχανισμών μεταφοράς τέμνουσας.

Σχετικά με την όπλιση των κόμβων, ως κύριοι οπλισμοί, πέραν των διαμήκων που προέρχονται από τις δοκούς και τα υποστυλώματα, θεωρούνται οι οριζόντιοι οπλισμοί, που συνήθως τοποθετούνται με τη μορφή κλειστών συνδετήρων. Οι συνδετήρες της κρίσιμης περιοχής του υποστυλώματος θα πρέπει να συνεχίζουν μέσα στον κόμβο και αν κρίνεται αναγκαίο και επιτρέπει τη σκυροδέτηση να γίνεται περεταίρω πύκνωση τους. Αυτοί θα πρέπει να είναι ικανοί να παραλάβουν την οριζόντια τέμνουσα και η τοποθέτηση τους δεν πρέπει σε καμιά περίπτωση να παραλείπεται. Πέραν των οριζόντιων συνδετήρων, αναγκαίοι είναι και επιπλέον κατακόρυφοι οπλισμοί με τη μορφή περιμετρικών κατακορύφων οπλισμών, οι οποίοι συνήθως καλύπτονται από τους υφιστάμενους οπλισμούς των υποστυλωμάτων. Σε επίπεδο λεπτομερειών όπλισης, θα πρέπει να περιορίζεται η διάμετρος των διαμήκων ράβδων της δοκού που αγκυρώνουν μέσα στο σώμα του κόμβου για δεδομένη διάσταση υποστυλώματος. Τέλος είναι δυνατή η τοποθέτηση στους κόμβους πρόσθετων οπλισμών διάταξης Χ καθώς και κλειστών κατακόρυφων συνδετήρων, αν και μια τέτοια πρακτική δεν εφαρμόζεται γενικά, τουλάχιστον στην Ελλάδα. Επίσης, έχει διερευνηθεί και η ενσωμάτωση οπλισμού ινών στη μάζα του σκυροδέματος του κόμβου.

2.4.2. Κανονιστικό πλαίσιο

2.4.2.1. Ευρωκώδικας 8 - Μέρος 1

Ο Ευρωκώδικας 8 κατατάσσει τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα κατασκευασμένα σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας, σε δύο κατηγορίες πλαστιμότητας, μεσαία (DCM) και υψηλή (DCH) ανάλογα με την ικανότητα τους για υστερητική απορρόφηση ενέργειας. Και οι δύο κατηγορίες σχεδιάζονται και διαστασιολογούνται με κατάλληλες λεπτομέρειες ώστε υπό επαναλαμβανόμενη ανακυκλιζόμενη φόρτιση να αναπτύξουν σταθερούς μηχανισμούς και να μπορούν να καταναλώσουν υψηλά ποσοστά υστερητικής ενέργειας χωρίς να υποστούν ψαθυρές μορφές αστοχίας.

Για κτίρια μεσαίας πλαστιμότητας (DCM) δίνονται οι παρακάτω οδηγίες για τους κόμβους δοκού -υποστυλώματος:

i. Ο εγκάρσιος οπλισμός περίσφιγξης που τοποθετείται στις κρίσιμες περιοχές του υποστυλώματος, θα συνεχίζει και μέσα στο σώμα του κόμβου.

ii. Στην περίπτωση που καταλήγουν δοκοί και στις τέσσερις πλευρές του κόμβου και το πλάτος της κάθε δοκού είναι τουλάχιστον ίσο με τα τρία-τέταρτα του αντίστοιχου πλάτους του υποστυλώματος επιτρέπεται η απόσταση του οπλισμού που αναφέρεται στο (i) να διπλασιάζεται, χωρίς όμως να ξεπερνά τα 150 mm.

iii. Τουλάχιστον μία πλευρική κατακόρυφη ράβδος, μεταξύ των γωνιακών ράβδων του υποστυλώματος, θα πρέπει να περνά μέσα από τον κόμβο.

Για κτίρια υψηλής πλαστιμότητας (DCH) δίνονται πιο εκτενείς διατάξεις για το σχεδιασμό και τον έλεγχο των κόμβων δοκού - υποστυλώματος:

i. Διατμητική δύναμη κόμβου

Οι παρακάτω απλοποιημένες σχέσεις δίδονται για τον υπολογισμό της οριζόντιας διατμητικής δύναμης του κόμβου:

(α) Εσωτερικοί κόμβοι

$$V_{jhd} = \gamma_{Rd}(A_{s1} + A_{s2})f_{yd} - V_{col} \tag{2.40}$$

(β) Εξωτερικοί κόμβοι

$$V_{jhd} = \gamma_{Rd}A_{s1}f_{yd} - V_{col} \tag{2.41}$$

όπου:
ο συντελεστής $\gamma_{Rd} \geq 1.2$

A_{s1}, A_{s2}, οι οπλισμοί της δοκού άνω και κάτω αντίστοιχα

V_{col}, η τέμνουσα του υποστυλώματος από την ανάλυση για σεισμικές δράσεις σχεδιασμού.

ii. Περιορισμός θλίψης στη θλιβόμενη διαγώνιο

Η θλίψη στο διαγώνιο θλιπτήρα σκυροδέματος, δεν πρέπει να ξεπερνά την αντοχή του σκυροδέματος υπό θλίψη με ταυτόχρονη δράση εγκάρσιου εφελκυσμού. Για να ικανοποιείται αυτή η απαίτηση πρέπει να ισχύει:

(α) για εσωτερικούς κόμβους

$$V_{jhd} \leq \eta\, f_{cd}\sqrt{1 - \frac{v_d}{\eta}}\; b_j h_c \tag{2.42}$$

(β) για εξωτερικούς κόμβους

$$V_{jhd} \leq 0.8\,\eta\, f_{cd}\sqrt{1 - \frac{v_d}{\eta}}\; b_j h_c \tag{2.43}$$

όπου:
$\eta = 0.6(1 - \frac{f_{ck}}{250})$, η f_{ck} σε MPa

$v_d = \frac{N_{Ed}}{f_{cd}A_c}$, η ανηγμένη αξονική δύναμη του άνω υποστυλώματος

και η τιμή του b_j ορίζεται ώς:

$$b_j = \min\,[b_c, (b_w + 0.5h_c)], \text{ αν } b_c > b_w \quad (2.44α)$$

$$b_j = \min\,[b_w, (b_c + 0.5h_c)], \text{ αν } b_c < b_w \quad (2.44β)$$

iii. Περιορισμός εφελκυστικής τάσης σκυροδέματος

Πέραν του περιορισμού της θλίψης στη θλιβόμενη διαγώνιο, θα πρέπει να δημιουργούνται επαρκείς συνθήκες περίσφιγξης στον κόμβο σε όλες τις διευθύνσεις ώστε να περιορίζεται η εγκάρσια διόγκωση του θλιπτήρα που επιφέρει εγκάρσιο εφελκυσμό, έτσι ώστε η μέγιστη διαγώνια εφελκυστική τάση του σκυροδέματος σ_{ct} να είναι μικρότερη της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος f_{ctd}. Κάτι τέτοιο μπορεί να εξασφαλιστεί με εγκάρσιους οριζόντιους οπλισμούς διαμέτρου ≥ 6 mm τοποθετημένους μέσα στο σώμα του κόμβου αν ισχύει:

$$\frac{A_{sh}f_{ywd}}{b_j h_{jw}} \geq \frac{(V_{jhd}/(b_j h_{jc}))^2}{f_{ctd} + v_d f_{cd}} - f_{ctd} \quad (2.45)$$

όπου:
A_{sh}, το συνολικό εμβαδόν οριζόντιων συνδετήρων

h_{jw}, απόσταση μεταξύ του άνω και του κάτω οπλισμού της δοκού

h_{jc}, απόσταση μεταξύ των οπλισμών του υποστυλώματος στις ακραίες στρώσεις

b_j, από τις σχέσεις 2.44

iv. Οριζόντιοι οπλισμοί (συνδετήρες)

Εναλλακτικά ως προς το (iii), μπορεί να τοποθετηθεί οριζόντιος οπλισμός, σε μορφή κλειστών συνδετήρων, σε τέτοια ποσότητα (εμβαδόν / πύκνωση) ώστε να διασφαλίζεται η ακεραιότητα και η λειτουργία του κόμβου ακόμα και μετά τη διαγώνια ρηγμάτωση. Οι οριζόντιοι συνδετήρες θα πρέπει να ικανοποιούν τη σχέση:

(α) για εσωτερικούς κόμβους

$$A_{sh}f_{ywd} \geq \gamma_{Rd}(A_{s1} + A_{s2})f_{yd}(1 - 0.8v_d) \quad (2.46)$$

(β) για εξωτερικούς κόμβους

$$A_{sh}f_{ywd} \geq \gamma_{Rd}(A_{s2})f_{yd}(1 - 0.8v_d) \quad (2.47)$$

Οι οριζόντιοι οπλισμοί που υπολογίζεται πως πρέπει να τοποθετηθούν μέσα στον κόμβο, κατανέμονται ομοιόμορφα μεταξύ των άνω και κάτω οπλισμών της δοκού (σε ύψος h_{jw}).

v. Κατακόρυφοι οπλισμοί

Επιπλέον των οριζόντιων οπλισμών, απαιτείται η ύπαρξη και κατακόρυφων οπλισμών μέσα στον κόμβο, συνήθως με τη μορφή ενδιάμεσων περιμετρικών ράβδων στο υποστύλωμα μεταξύ των γωνιακών ράβδων. Αν υπάρχουν ήδη πλευρικοί κατακόρυφοι οπλισμοί στο υποστύλωμα τότε προσμετρούνται. Ο έλεγχος που πρέπει να γίνει για το εμβαδόν του κατακόρυφου πλευρικού οπλισμού $A_{sv,i}$ είναι:

$$A_{sv,i} \geq \frac{2}{3}A_{sh}(\frac{h_{jc}}{h_{jw}}) \quad (2.48)$$

vi. Έλεγχος μήκους αγκύρωσης οπλισμού δοκου

Τέλος, απαιτείται να εξασφαλίζεται ότι οι άνω διαμήκεις οπλισμοί των δοκών αγκυρώνονται μέσα στο μήκος του κόμβου. Για δεδομένες διαστάσεις κόμβου, αυτή η απαίτηση ικανοποιείται μέσω περιορισμού της διαμέτρου των ράβδων.

2.4.2.2. Κανονισμός ACI (318M-08)

Ο Κανονισμός ACI 318 ενσωματώνει τις συστάσεις της επιτροπής ACI - ASCE Committee 352 σύμφωνα με τις οποίες οι κόμβοι ανήκουν σε δύο κατηγορίες:

(α) Κόμβοι τύπου 1 (joint type 1). Οι κόμβοι αυτοί ανήκουν σε πλαισιωτό δομητικό σύστημα σχεδιασμένο χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις πλαστιμότητας. Αυτό τυπικά αφορά πλαίσια σχεδιασμένα μόνο για κατακόρυφα φορτία και φορτία ανέμου ή σεισμού, όπου τα παραπάνω παραλαμβάνονται από άλλα τμήματα του Φέροντος Οργανισμού όπως τοιχώματα.

(β) Κόμβοι τύπου 2 (joint type 2). Είναι κόμβοι που συνδέουν στοιχεία με αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας, με ανάγκη για μεγάλη ενεργειακή απορρόφηση και διατήρηση αντοχής υπό ανακυκλιζόμενες ανελαστικές παραμορφώσεις. Αυτό αφορά κατά βάση πλαίσια σχεδιασμένα για σεισμικές δράσεις όπου δεν παρεμβάλλονται άλλα φέροντα σεισμικά στοιχεία (π.χ. τοιχώματα)

Ειδικές απαιτήσεις σχεδιασμού προβλέπονται για τους κόμβους τύπου 2 όπως περιγράφεται παρακάτω.

i. Όπλιση του κόμβου

Καθορίζεται ότι θα πρέπει να τοποθετούνται τουλάχιστον δύο στρώσεις οπλισμού, με τη μορφή κλειστών συνδετήρων, μέσα στο σώμα του κόμβου και μεταξύ του άνω και του κάτω διαμήκη οπλισμού των δοκών. Η αξονική απόσταση μεταξύ των συνδετήρων δεν πρέπει να ξεπερνά: (α) το ένα τέταρτο της μικρής διάστασης του υποστυλώματος, (β) έξι φορές τη διάμετρο των διαμήκων οπλισμών που περιβάλλουν και (γ) τα 150 mm. Η πλευρική απόσταση μεταξύ σκελών των συνδετήρων δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 300 mm.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται εγκάρσιος οπλισμός σπειροειδούς μορφής απαιτείται το ογκομετρικό ποσοστό ρ_s να ικανοποιεί τη σχέση:

$$\rho_s \geq 0.12 \frac{f_c}{f_{yk}} \tag{2.49}$$

Για κλειστούς ορθογωνικούς συνδετήρες, σε κάθε διεύθυνση, το σύνολο του εμβαδού, A_{sh}, θα πρέπει να είναι:

$$A_{sh} \geq 0.3 \frac{s\, h'' f_c}{f_{yh}} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1\right) \tag{2.50}$$

και επίσης

$$A_{sh} \geq 0.09 \frac{s\, h'' f_c}{f_{yh}} \tag{2.51}$$

όπου:
s, η αξονική απόσταση μεταξύ των συνδετήρων

h'', η διάσταση του πυρήνα του υπό περίσφιγξη υποστυλώματος κάθετα προς τον υπόψη εγκάρσιο οπλισμό , μετρώντας από την εξωτερική πλευρά των συνδετήρων

f_c, η αντοχή του σκυροδέματος του κόμβου σε θλίψη

A_g, η συνολική διατομή του υποστυλώματος

A_c, η διατομή του υπό περίσφιγξη πυρήνα του υποστυλώματος, μετρούμενη από τα έξω άκρα των συνδετήρων.

Ειδική πρόβλεψη για επιπλέον προσθήκη κατακόρυφου οπλισμού στον κόμβο δεν προβλέπεται, πέραν τη διάταξης για τα υποστυλώματα που απαιτεί μέγιστη απόσταση

διαμήκων ράβδων που δεν θα ξεπερνά τα 200 mm ή το 1/3 της διάστασης του υποστυλώματος στην υπόψη διεύθυνση.

ii. Διατμητική ένταση

Στην περίπτωση που ο κόμβος συμμετέχει σε δύο εγκάρσια πλαίσια, η διατμητική ένταση θα υπολογίζεται ανεξάρτητα για κάθε διεύθυνση. Η τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού του κόμβου, V_u, υπολογίζεται σε έναοριζόντιο επίπεδο στο μέσον του ύψους του κόμβου με βάση την ισορροπία ελευθέρου σώματος (**Σχήμα 2.62**)

Για τη διατμητική αντοχή του κόμβου θα πρέπει να ισχύει:

$$\phi\, V_n \geq V_u \tag{2.52}$$

όπου:
ϕ, συντελεστής μείωσης ικανότητας ίσος με 0.85

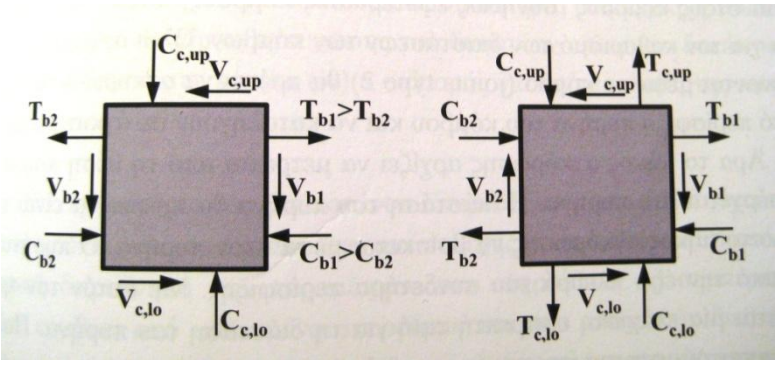
V_u, η δρώσα τέμνουσα σχεδιασμού

V_n, η ονομαστική αντοχή σε διάτμηση του κόμβου

Η διατμητική αντοχή V_n, δίδεται από τη σχέση:

$$V_n = 0.083\, \gamma \sqrt{f_c'}\, b_j h \quad (f_c' \text{ σε MPa}) \tag{2.53}$$

όπου b_j το ενεργό πλάτος του κόμβου που λαμβάνεται ως $b_j = (b_b + b_c)/2$, με b_b, b_c το πλάτος του υποστυλώματος και της δοκού αντίστοιχα.



Σχήμα 2.62. Διάγραμμα ελευθέρου σώματος για το σώμα του κόμβου, λόγω κατακορύφων φορτίων βαρύτητας και λόγω οριζόντιων σεισμικών δράσεων

Οι τιμές για το συντελεστή γ δίδονται στον παρακάτω πίνακα:

Κατάταξη /τύπος	εσωτερικός	εξωτερικός	γωνιακός
ενδιάμεσος	20	15	12
οροφής	15	12	8

Πίνακας 2.1. Τιμές συντελεστή γ στη σχέση (2.53)

iii. Αγκυρώσεις οπλισμών δοκών μέσα στο σώμα του κόμβου

Σε εσωτερικούς κόμβους, τίθεται περιορισμός στη διάμετρο των διαμήκων ράβδων των δοκών και των υποστυλωμάτων που περνούν διαμέσου του κόμβου με στόχο την προστασία της αγκύρωσης και τη διατήρηση των απαιτούμενων τάσεων συνάφειας σε χαμηλά επίπεδα. Έτσι πρέπει να ικανοποιούνται οι σχέσεις:

$$\frac{h_{column}}{d_b} \geq 20 \qquad (2.54\alpha)$$

$$\frac{h_{beam}}{d_b} \geq 20 \qquad (2.54\beta)$$

3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΟΡΕΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ANSYS

3.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η μελέτη φαινομένων της φύσης, όπως είναι η μελέτη φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα, με σύγχρονα υπολογιστικά μέσα, ακολουθεί δύο βασικά στάδια, τη μαθηματική διατύπωση του φαινομένου και την αριθμητική ανάλυση του μαθηματικού προσομοιώματος. Η μαθηματική διατύπωση βασίζεται σε ορισμένες παραδοχές γύρω από τις διαδικασίες που χαρακτηρίζουν το φαινόμενο, ενώ η αριθμητική ανάλυση χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους και τις δυνατότητες του υπολογιστή προκειμένου να δώσει λύση στη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος. Η εξεύρεση ακριβούς λύσης στις εξισώσεις που διέπουν τα περισσότερα φαινόμενα στη φύση αποτελεί επίπονη, δυσχερή και πολλές φορές αδύνατη διαδικασία. Στις περιπτώσεις αυτές οι προσεγγιστικές μέθοδοι επιλύσεως της μαθηματικής διατύπωσης αποτελούν μια πρόσφορη εναλλακτική αντιμετώπιση των προβλημάτων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να θεωρηθεί ως μια ειδική διατύπωση των μεθόδων Rayleigh-Ritz και ελαχιστοποίησης των σταθμικών υπολοίπων, η οποία όμως πλεονεκτεί σαφώς ως προς τις αρχικές διατυπώσεις των μεθόδων αυτών λόγω της μεγαλύτερης ευκολίας με την οποία αντιμετωπίζει πολύπλοκες γεωμετρίες και καταστατικές σχέσεις και του ευχερέστερου προγραμματισμού της στον Η/Υ. Η θεμελιώδης αρχή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στην αντικατάσταση του γεωμετρικά σύνθετου πεδίου του προβλήματος με ένα σύνολο απλών υπό-πεδίων τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. (Παπαδρακάκης, 2001)

Μετά τη διακριτοποίηση αυτή του φορέα, το πρόβλημα του συνεχούς επαναδιατυπώνεται έτσι ώστε να θεωρείται κάθε τέτοιο ΠΣ ξεχωριστά, γεγονός που επιτρέπει να αποσπάται από το σύμπλεγμα των στοιχείων του σύνθετου φορέα . Έτσι αφού μελετηθεί και καθορισθεί η μηχανική συμπεριφορά του κάθε επί μέρους στοιχείου ακολουθεί το τρίτο βήμα της διαδικασίας επίλυσης που είναι η σύνθεση του φορέα από τα επιμέρους ΠΣ, η κατάλληλη δηλαδή επανασύνδεση των στοιχείων προς σχηματισμό του διακριτοποιημένου φορέα. Το ότι πρόκειται για μια προσεγγιστική μέθοδο έγκειται προφανώς στο ότι ο αρχικός συνεχής φορέας, για να μπορέσει να επιλυθεί, μετατρέπεται σε ένα ασυνεχές σύμπλεγμα ΠΣ. Όσο περισσότερα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του ασυνεχούς μοντέλου υπολογισμού του αρχικού φορέα, τόσο ακριβέστερα μπορούν να θεωρηθούν γενικώς τα αποτελέσματα (εφόσον βέβαια και η συμπεριφορά των χρησιμοποιημένων στοιχείων περιγράφεται με ικανοποιητική ακρίβεια).

Το εποπτικό αυτό σκεπτικό αντιστοιχεί απόλυτα στο ακόλουθο μαθηματικό σκεπτικό. Ο βασικός στόχος μιας αριθμητικής μεθόδου είναι να αντικαταστήσει τις διαφορικές ή ολοκληρωτικές εξισώσεις που περιγράφουν το εκάστοτε πρόβλημα με ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων. Προφανώς, όσο πιο πολλές αλγεβρικές εξισώσεις χρησιμοποιούνται για να αντικαταστήσουν τις διαφορικές, τόσο περισσότερο θα πλησιάζει η προσεγγιστική επίλυση την αναλυτική λύση του αρχικού προβλήματος. Το πλήθος των ΠΣ έχει επομένως την αντιστοιχία του στο πλήθος των προς επίλυση αλγεβρικών εξισώσεων.

Τα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων ευρείας χρήσεως όπως το λογισμικό ANSYS, παρέχουν σημαντικές δυνατότητες στατικής και δυναμικής ανάλυσης, σύνθετης γεωμετρίας και καταστατικών σχέσεων ιδιοτήτων υλικού με τις οποίες είναι δυνατή η προσομοίωση μεγάλου αριθμού μηχανικών προβλημάτων. Αν και η χρήση τους δεν στοχεύει αποκλειστικά στην προσομοίωση κτιριακών έργων ή συνηθισμένων έργων πολιτικού μηχανικού, η αξιοποίηση τους έγκειται στο γεγονός ότι παρέχουν τη δυνατότητα προσομοίωσης και επίλυσης ειδικών κατασκευών σύνθετης γεωμετρίας και συνθηκών στατικής ή δυναμικής φόρτισης, με υλικά που συμπεριφέρονται με μη-γραμμικό ελαστικό ή/και ανελαστικό τρόπο και με ύπαρξη χρόνιων φαινομένων.

Ορισμένες σημαντικές ιδιότητες του προγράμματος ANSYS είναι οι εξής:

- Ενσωματώνει γραφικό περιβάλλον τόσο κατά τη δημιουργία του μοντέλου όσο και της προ/μετά διαχείρησης των αποτελεσμάτων, ενώ επιτρέπει και την εισαγωγή της γεωμετρίας από άλλα σχεδιαστικά πρότυπα.
- Δίδεται η δυνατότητα εύκολης προσομοίωσης φορέων με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία (solid modeling) χρησιμοποιώντας ιεραρχικές δομές και λειτουργίες Boole και τη θεωρία ασαφών συνόλων, για τον ορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, την εφαρμογή των φορτίων και την αυτοματοποιημένη δημιουργία τρισδιάστατης διακριτοποίησης.
- Παρέχονται πολλά διαφορετικά είδη ανάλυσης συζευγμένων και μή πεδίων όπως δομητική (structural) θερμική, ηλεκτρομαγνητική κλπ και υποκατηγορίες αυτών όπως στατική, ιδιομορφική (modal), εν χρόνω (transient), φασματική κλπ. Επίσης προσφέρονται διαφορετικές μέθοδοι επίλυσης των εξισώσεων, ενώ εκτεταμένες είναι και οι δυνατότητες μη-γραμμικής ανάλυσης.

3.2. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

3.2.1. Γενικά

Το σκυρόδεμα είναι δομικό υλικό αποτελούμενο απο αδρανή (χαλίκι, γαρμπίλι, άμμος) διαφόρων τύπων και κοκκομετρικής διαβάθμισης, τσιμέντο και νερό. Το τσιμέντο και το νερό αναμειγνυόμενα σχηματίζουν τον τσιμεντοπολτό ο οποίος με την πάροδο του χρόνου σκληρύνεται και συνδέει τα αδρανή που περιβάλλει, σχηματίζοντας μια λεπτότατα κρυσταλλική δομή, το πήγμα, κατα τη διάρκεια της χημικής αντιδράσης τσιμέντου και νερού (ενυδάτωση).

Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αποτελεί το πιο αντιπροσωπευτικό μέγεθος χαρακτηρισμού του υλικού (καθώς και το πλέον σημαντικό από πλευράς δομητικού σχεδιασμου), συναρτήσει του οποίου εκφράζονται οι άλλες βασικές μηχανικές ιδιότητες, όπως το μέτρο ελαστικότητας, η εφελκυστική αντοχή και η ανθεκτικότητα.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 - Μέρος 1-1, η αντοχή του σκυροδέματος υπό μονοαξονικό εφελκυσμό υπολογίζεται από τη σχέση (3.1).

$$f_{ctm} = 0.3\, {f_{ck}}^{2/3} \quad (f_{ck}\ \sigma\varepsilon\ MPa) \tag{3.1}$$

ενώ προσεγγιστική τιμή για το μέτρο ελαστικότητας στις 28 ημέρες δίδεται από τη σχέση (3.2).

$$E_{cm} = 22\left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3} \quad (f_{cm}\ \sigma\varepsilon\ MPa) \tag{3.2}$$

όπου
f_{ctm} η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος (MPa)

f_{ck} είναι η χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη του κυλίνδρου

$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)

E_{cm} το επιβατικό μέτρο ελαστικότητας (GPa)

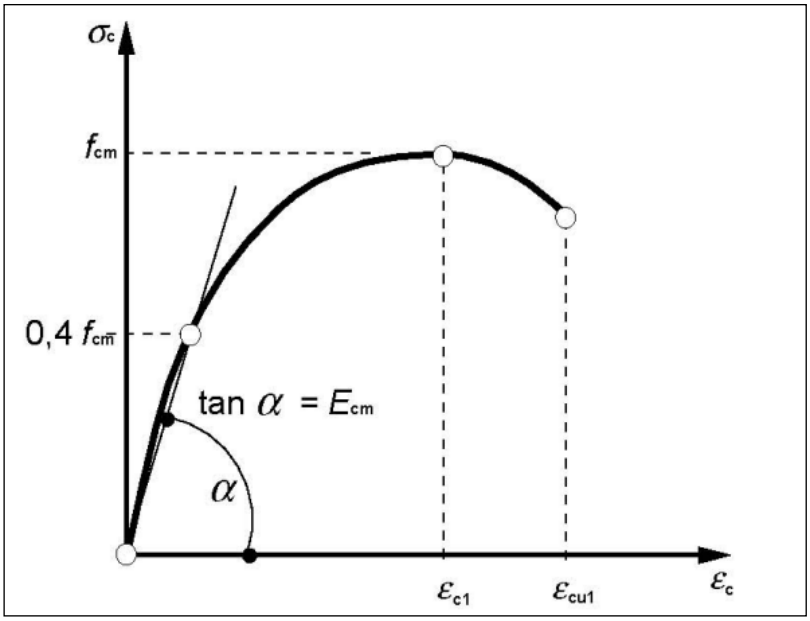
Η σχέση τάσεων (σ_c) -ανηγμένων παραμορφώσεων (ε_c) για βραχυχρόνια μονοαξονική θλίψη (**Σχήμα 3.1**) περιγράφεται σε απόλυτες τιμές από τη σχέση (3.3).

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta} \tag{3.3}$$

όπου
$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}$

$k = \frac{1.05 E_{cm} |\varepsilon_{c1}|}{f_{cm}}$

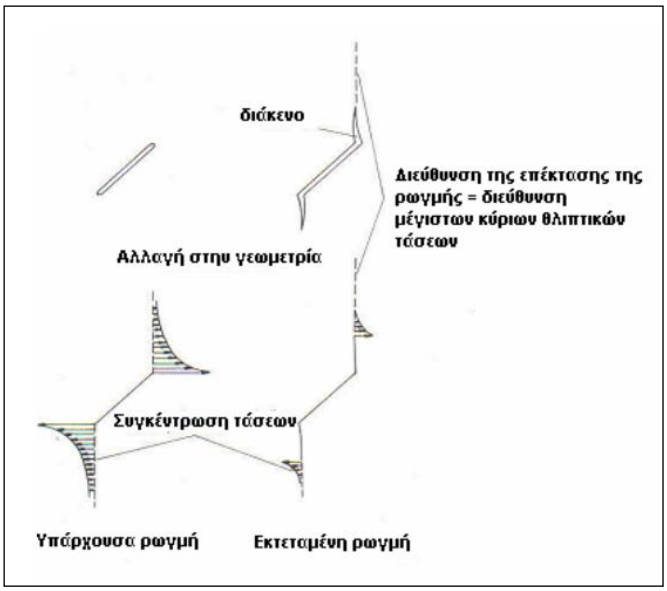
$\varepsilon_{c1} = 0.7 {f_{cm}}^{0.31}$, η ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη θλιπτική αντοχή και ισχύει για $|\varepsilon_c| < |\varepsilon_{cu1}|$, όπου ε_{cu1} είναι η ονομαστική ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας, ίση με 0.0035 για $f_{ck} \leq 50MPa$



Σχήμα 3.1. Καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος για μη-γραμμική ανάλυση

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος είναι μη-γραμμική σε όλη την καμπύλη τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων (**Σχήμα 3.1**). Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο στη (μάκρο - μικρό) ρηγμάτωση που υφίσταται το υλικό κατά τη διάρκεια της φόρτισης αλλά και πριν από αυτή (Kotsovos, 1984). Σε μικροσκοπικό επίπεδο παρατήρησης, οι ρωγμές στο σκυρόδεμα προϋπάρχουν της φόρτισης και οφείλονται στην "πολυφασική" φύση του υλικού (αδρανή - πάστα). Λόγω των διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων των επιμέρους φάσεων, προκαλούνται συγκεντρώσεις τάσεων στις διεπιφάνειες μεταξύ των συστατικών, όταν το υλικό επιπονείται από διάφορες έμμεσες δράσεις όπως ενδογενείς ή εξωγενείς θερμοκρασιακές μεταβολές, συστολή ξηράνσεως, κ.λπ. (Kotsovos, 1979). Κατα κάποιον τρόπον οι μικρορωγμές αποτελούν ένα πρόσθετο κύριο "συστατικό" του σκυροδέματος, καθώς συντελούν στη μικρή εφελκυστική αντοχή του αλλά και στη μη-γραμμική συμπεριφορά του. Με την επιβολή των φορτίων, οι προϋπάρχουσες μικρορωγμές σταδιακά πολλαπλασιάζονται και προεκτείνονται (**Σχήμα 3.2**) ώστε να ανακουφίσουν το υλικό από τις υψηλές εφλκυστικές τάσεις που προκαλούνται στις άκρες τους από το εντατικό πεδίο που

αναπτύσσεται από τη φόρτιση (Kotsovos, 1995) και ακολούθως ενώνονται και οδηγούν στην κατάρρευση του.



Σχήμα 3.2. Σχηματισμός ρωγμών στο σκυρόδεμα

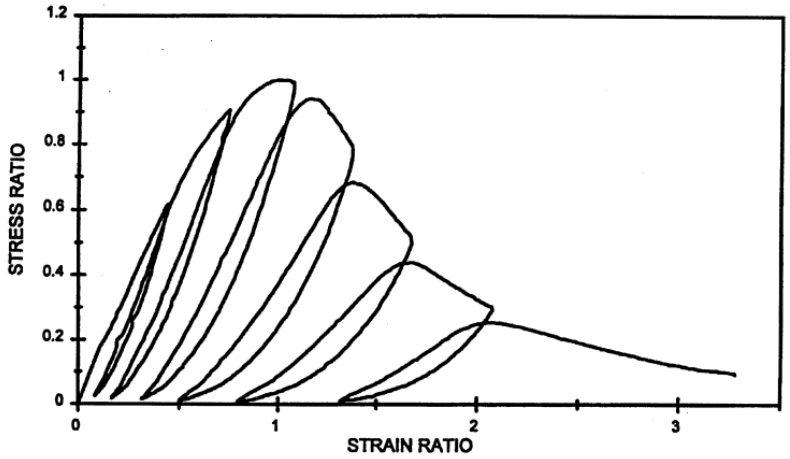
3.2.1.1. Συμπεριφορά προρηγματωμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη θλίψη

Κατά τη διάρκεια μιας φόρτισης όπως ο σεισμός, λόγω της ανακύκλισης των επιβαλλόμενων μετακινήσεων, στις κρίσιμες περιοχές των στοιχείων θα έχουμε πολύ συχνά εναλλαγή μεταξύ εφελκυόμενης και θλιβόμενης ζώνης των διατομών. Έτσι το σκυρόδεμα, το οποίο βρίσκεται στην εφελκυόμενη ζώνη της διατομής κατά την έναρξη της δράσης και ρηγματώνεται, όταν αλλάζει το πρόσημο της δράσης, βρίσκεται υπό θλίψη. Υπό κύκλους εφελκυσμού - θλίψης, παρατηρείται πως το σκυρόδεμα αρχίζει να αποκρίνεται σε θλίψη πολύ πριν κλείσει πλήρως η εφελκυστική ρωγμή, συμπεριφορά μη αναμενόμενη καθώς θα περιμέναμε πρώτα να κλείσει η ρωγμή και μετά να αρχίσει η παραλαβή θλιπτικών τάσεων. Δεδομένης της τραχείας επιφάνειας μιας ρωγμής σκυροδέματος με εξέχοντα τμήματα αδρανών κατά μήκος της αλλά και της ανυπαρξίας στη φύση μιας καθαρά αξονικής δράσεως με πλήρη απουσία διάτμησης, το φαινόμενο αυτό εξηγείται ποιοτικά. Λόγω μιας μικρής σχετικής μετακίνησης των επιφανειών της ρωγμής, οι εξοχές της επιφάνειας έρχονται σε επαφή αρκετά νωρίτερα από τον πλήρη μηδενισμό του ανοίγματος της.

3.2.1.2. Το σκυρόδεμα υπό ανακυκλιζόμενες δράσεις

Το σκυρόδεμα, όταν υποβάλλεται σε κύκλους θλιπτικών παραμορφώσεων, παρουσιάζει μείωση της απόκρισης με τον αριθμό των κύκλων. Η μείωση αυτή αυξάνεται

συναρτήσει του μεγέθους της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης και του πλήθους των ανακυκλίσεων. Για κύκλους με σταθερή επιβαλλόμενη παραμόρφωση ίση με αυή στη μέγιστη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (0.0020) παρατηρείται μείωση της αντοχής του σκυροδέματος κατά περίπου 20%. Αντίστοιχα, υπό κύκλους σταθερής επιβαλλόμενης θλιπτικής τάσεως, έχουμε πτώση της δυσκαμψίας του σκυροδέματος (**Σχήμα 3.3**). Ως γνωστόν η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος για συνήθεις ταχύτητες επιβολής παραμορφώσεων λόγω σεισμού εμφανίζεται κατά 20% μεγαλύτερη (Soroushian και Sim, 1986), έτσι συνδυάζοντας τα δύο φαινόμενα στον αντισεισμικό σχεδιασμό επιτρέπεται η χρήση των χαρακτηριστικών του σκυροδέματος για μονότονη φόρτιση.

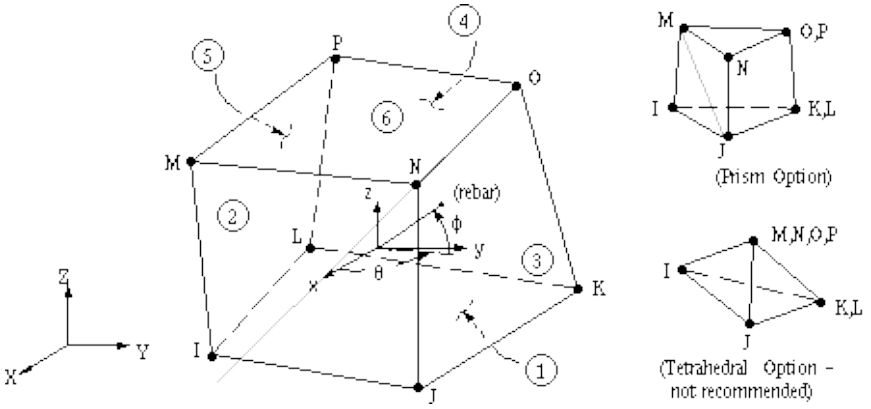


Σχήμα 3.3. Συμπεριφορά σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση

3.2.2. Καταστατική προσομοίωση του σκυροδέματος

Το ANSYS διαθέτει ένα τρισδιάστατο στερεό ισοπαραμετρικό στοιχείο οκτώ κόμβων, το SOLID65 (**Σχήμα 3.4**), για τη μόρφωση προσομοιωμάτων ΠΣ σκυροδέματος αλλά και άλλων ψαθυρών υλικών. Το προσομοίωμα λαμβάνει υπόψη του τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος (cracking) λόγω εφελκυστικών και αντίστοιχα τη θραύση (crushing) λόγω θλιπτικών τάσεων. Η συμπεριφορά του υλικού μπορεί να είναι μη-γραμμική ενώ μπορούν να ληφθούν υπόψη, εκτός από τη ρηγμάτωση και τη θραύση και οι πλαστικές παραμορφώσεις καθώς και οι παραμορφώσεις λόγω ερπυσμού. Το στοιχείο έχει τη δυνατότητα να ενσωματώνει στον όγκο ράβδους οπλισμού κατανεμημένες στο εσωτερικού του (smeared reinforcement) με προσανατολισμό σε τρείς τυχαίες διευθύνσεις, τροποποιώντας κατάλληλα το μητρώο δυσκαμψίας. Με αυτό τον τρόπο ο χάλυβας μπορεί να παραλαμβάνει αξονικά φορτία (θλιπτικά ή εφελκυστικά), όχι όμως διατμητικά, και να παραμορφώνεται πλαστικά. Εναλλακτικά και για μεγαλύτερη ευχέρεια και ακρίβεια οι οπλισμοί μπορούν να εισαχθούν

στο μοντέλο διακριτά, με ραβδωτά στοιχεία συνδεόμενα στους κόμβους των στοιχείων του σκυροδέματος διάταξη που υιοθετήθηκε και στην παρούσα, όπως θα περιγραφεί παρακάτω.



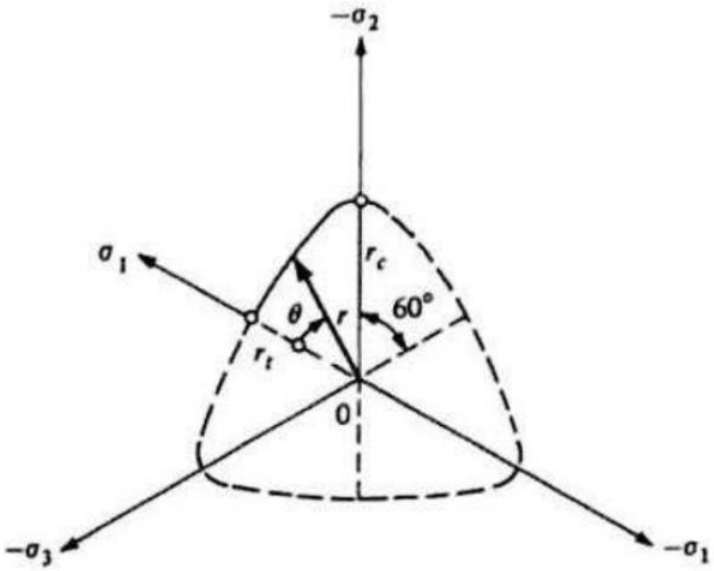
Σχήμα 3.4. Τρισδιάστατο στοιχείο σκυροδέματος SOLID65

3.2.2.1. Περιγραφή της αστοχίας του σκυροδέματος

Το στοιχείο SOLID65 έχει τη δυνατότητα να περιγράψει την αστοχία τόσο σε εφελκυσμό (crack) όσο και σε θλίψη (crush). Στον εφελκυσμό η συμπεριφορά του σκυροδέματος θεωρείται γραμμικά ελαστική και ορίζεται εισάγωντας την αντίστοιχη παράμετρο οριακής εφελκυστικής αντοχής (uniaxial cracking stress) στην ιδιότητα υλικού Concrete. Σε θλίψη η συμπεριφορά του σκυροδέματος ορίζεται εκτός της ιδιότητας υλικού Concrete, εισάγοντας μια μη-γραμμική καταστατική σχέση με βάση το υλικό Multilinear Kinematic Hardening. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει και την προσομοίωση της συμπεριφοράς του υλικού υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Για το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται ένα κριτήριο αστοχίας σε πολυαξονική κατάσταση τάσεων. Το ANSYS χρησιμοποιεί το κριτήριο των Willam και Warnke (1975) το οποίο εισάγεται με την ιδιότητα υλικού Concrete για το στοιχείο SOLID65. Το κριτήριο αυτό ορίζεται από πέντε παραμέτρους και αποτελεί εξέλιξη από τους ίδιους συγγραφείς ενός αρχικού τριπαραμετρικού μοντέλου ώστε να εφαρμόζεται εξίσου σε περιοχές χαμηλών και υψηλών θλιπτικών τάσεων. Η καμπύλη αστοχίας που παράγει το κριτήριο των πέντε παραμέτρων έχει καμπύλες γενέτειρες και μη - κυκλικές διατομές . Η επιφάνεια αστοχίας περιγράφεται σαν έλλειψη, κάθετα στον ισοτασικό άξονα (σ_m), όπου το εύρος της τ_m καθορίζεται από τα όρια της έλλειψης στις 0° και 60° κάθετα στο αποκλίνον επίπεδο της σ_m (**Σχήμα 3.5**). Τα όρια της έλλειψης ακολουθούν (σε κατάκλιση) τις σχέσεις (3.4) και (3.5) που ακολουθούν. Η γραμμική σχέση των μέσων συστατικών της τάσης σ_m, τ_m αντικαθίσταται από μια γενικότερη έκφραση, όπου τα εφελκυστικά και θλιπτικά ακραία επίπεδα δίνονται από τις σχέσεις (Chen, 1982):

$$\frac{\tau_{mt}}{f_c'} = \frac{r_t}{\sqrt{5}f_c'} = a_o + a_1\frac{\sigma_m}{f_c'} + a_2(\frac{\sigma_m}{f_c'})^2 \quad \text{,για } \theta = 0^\circ \quad (3.4)$$

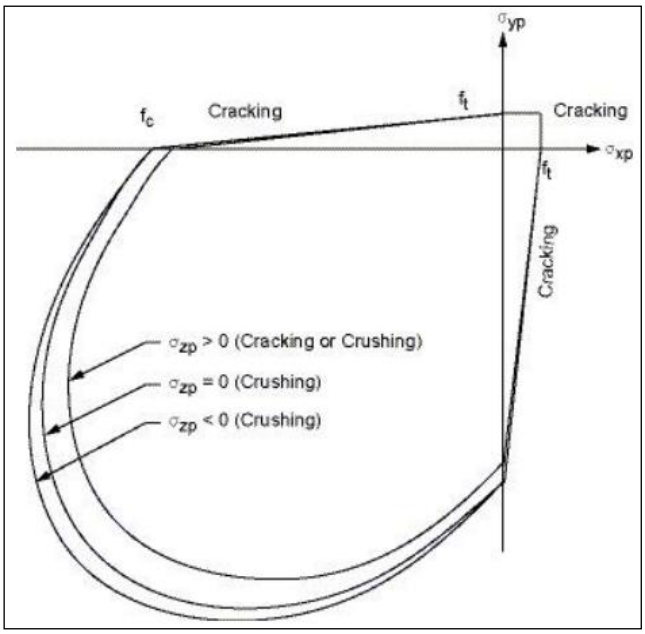
$$\frac{\tau_{mc}}{f_c'} = \frac{r_c}{\sqrt{5}f_c'} = b_o + b_1\frac{\sigma_m}{f_c'} + b_2(\frac{\sigma_m}{f_c'})^2 \quad \text{,για } \theta = 60^\circ \quad (3.5)$$



Σχήμα 3.5. Διατομή επιφάνειας αστοχίας στο αποκλίνον επίπεδο

Οι παράμετροι που πρέπει να εισαχθούν για να οριστεί στο ANSYS το κριτήριο αστοχίας είναι οι εξής:

- μονοαξονική εφελκυστική αντοχή (uniaxial tensile cracking stress)
- μονοαξονική θλιπτική αντοχή (uniaxial crushing stress)
- θλιπτική αντοχή υπό διαξονική εντάση (biaxial crushing stress)
- αντοχή σε υδροστατικό πεδίο τάσεων (ambient hydrostatic stress state), όπου ορίζονται οι επόμενες δύο παράμετροι
- διαξονική θλιπτική αντοχή στο παραπάνω υδροστατικό πεδίο τάσεων (uniaxial crushing stress under the ambient hydrostatic stress rate)
- μονοαξονική θλιπτική αντοχή στο παραπάνω υδροστατικό πεδίο τάσεων (uniaxial crushing stress under the ambient hydrostatic stress rate)



Σχήμα 3.6. Διδιάστατη επιφάνεια αστοχίας για εντατικές καταστάσεις διαξονικές ή σχεδόν διαξονικές (σ_2 = 0)

Αν οι πιο σημαντικές μη μηδενικές κύριες τάσεις είναι στις διευθύνσεις σ_{xp} και σ_{yp} οι τρείς επιφάνειες που εμφανίζονται είναι για σ_{zp} λίγο μεγαλύτερο του 0, σ_{zp} ίσο με το 0 και σ_{zp} λίγο μικρότερο του 0 (**Σχήμα 3.6**). Αν και οι τρείς επιφάνειες, που φαίνονται σαν προβολές στο επίπεδο σ_{xp} - σ_{yp}, είναι σχεδόν ίσες και η τρισδιάστατη επιφάνεια αστοχίας είναι συνεχής, ο τρόπος αστοχίας του υλικού είναι συνάρτηση του προσήμου του σ_{zp}. Για παράδειγμα, αν τα σ_{xp} και σ_{yp} είναι και τα δύο αρνητικά (θλίψη) και το σ_{zp} είναι θετικό (εφελκυσμός), προβλέπεται ρηγμάτωση κάθετα στη διεύθυνση του σ_{zp}. Αν, αντίθετα, το σ_{zp} είναι 0 ή αρνητικό, το υλικό θεωρείται πως αστοχεί σε σύνθλιψη (ANSYS Theory Reference, 1998). Μόλις οι τάσεις φτάσουν την επιφάνεια αστοχίας συμβαίνει μια απότομη πτώση και μηδενίζονται, ενώ στον εφελκυσμό μπορεί να οριστεί και "strain softening" μέσω της παραμέτρου tensile crack factor, της ιδιότητας υλικού Concrete.

Σε πολλές εφαρμογές επιλέγεται η απενεργοποίηση της δυνατότητας σύνθλιψης του σκυροδέματος θέτοντας f_c = -1.0 στην ιδιότητα υλικού Concrete, για να αποφευχθούν πρόωρες αστοχίες των στοιχείων στα σημεία επιβολής των φορτίων. Αυτή η επιλογή προτείνεται και στην παρούσα εργασία καθώς λόγω της μικρής αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό και του λόγου Poisson, η αστοχία σε εφελκυσμό προηγείται της αστοχίας σε θλίψη.

3.2.2.2. Περιγραφή του τρόπου σχηματισμού και μεταφοράς φορτίου μέσω των ρωγμών

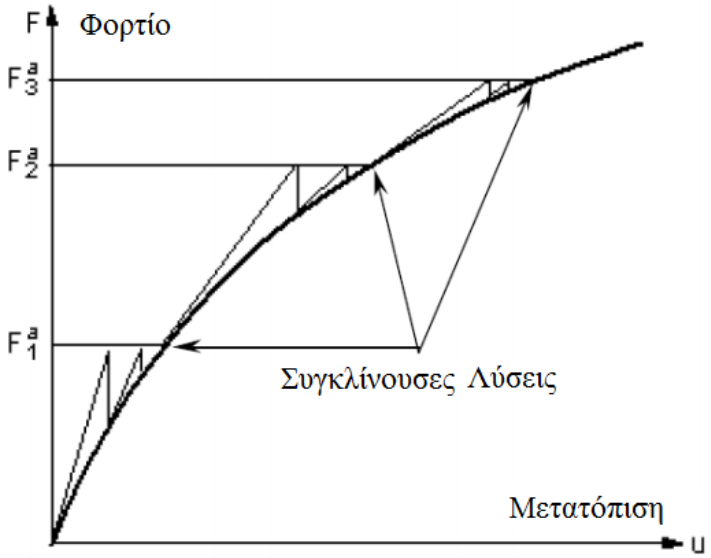
Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα σχηματισμού ρωγμών με κατάλληλη διαμόρφωση του μητρώου δυσκαμψίας του στοιχείου (διανεμημένες ρωγμές). Σε κάθε στοιχείο πραγματοποιείται έλεγχος ρηγμάτωσης και θραύσης στα οκτώ σημεία ολοκλήρωσης. Ρηγμάτωση ή θραύση ξεκινά όταν η μέγιστη ή η ελάχιστη (ή ο συνδυασμός τους κατά το κριτήριο Willam) κύρια τάση του στοιχείου, σε κάποιο σημείο ολοκλήρωσης, ξεπεράσει την εφελκυστική ή θλιπτική επιφάνεια αστοχίας του σκυροδέματος (το κριτήριο εξαρτάται από το αν η σ_2 είναι θετική ή όχι). Σχηματίζεται τότε μια ρηγματωμένη περιοχή εντός του στοιχείου με διεύθυνση κάθετη στην αντίστοιχη κύρια τάση, οι τάσεις ανακατανέμονται τοπικά, ενώ δημιουργείται μια αδύναμη περιοχή στη διεύθυνση της κύριας τάσης. Το στοιχείο είναι έτσι μη-γραμμικό και απαιτεί επαναληπτική διαδικασία επίλυσης. Το μέγεθος της διατμητικής τάσης που μεταφέρεται κατά μήκος της ρωγμής μπορεί να ποικίλει από πλήρη διατμητική μεταφορά έως μηδενική. Μέσω της ιδιότητας υλικού Concrete που αντιστοιχεί στο στοιχείο SOLID65, εισάγονται δύο συντελεστές μεταφοράς της διατμητικής τάσης, ένας για ανοικτή (β_t) και ένας για κλειστή (β_c) ρωγμή. Οι τιμές των συντελεστών κυμαίνονται από 0 έως 1, όπου το 0 αντιστοιχεί σε μηδενική μεταφορά και το 1 σε πλήρη μεταφορά τέμνουσας. Από τον Kachlakev (2001) προτείνονται ενδεικτικές τιμές β_t=0.3 και β_c=1, αλλά έγκυρες είναι και οι ενδιάμεσες τιμές έως β_t=0.2 και β_c=0.6. Καθώς οι τιμές των παραπάνω συντελεστών επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματα της ανάλυσης, ειδικά στην περίπτωση ανακυκλιζόμενης φόρτισης, ενώ επηρεάζουν επίσης και τη δυνατότητα σύγκλισης κατά την επαναληπτική διαδικασία, η επιλογή τους χρήζει διερεύνησης και σύγκρισης αποτελεσμάτων με πειραματικά αποτελέσματα. Έπειτα από το σχηματισμό μιας πρώτης ρωγμής, τάσεις εφαπτομενικές στο επίπεδο της ρωγμής μπορεί να προκαλέσουν τη δημιουργία και δεύτερης ή κατόπιν τρίτης ρωγμής στο εκάστοτε σημείο ολοκλήρωσης. Μετά τη σύνθλιψη το σκυρόδεμα θεωρείται πως έχει χάσει τη δυσκαμψία του προς όλες τις διευθύνσεις.

3.2.2.3. Διαδικασία μη-γραμμικής επίλυσης

Όπως είναι γνωστό, στην περίπτωση της γραμμικής ελαστικότητας κατά την επίλυση της εξίσωσης $P=K\cdot u$, κάθε αύξηση του διανύσματος των δυνάμεων P συνεπάγεται μια γραμμική αύξηση των μετακινήσεων u. Αντίθετα, σε μη-γραμμικά προβλήματα η σχέση $P=K\cdot u$ μετασχηματίζεται σε $\Delta P=K\cdot \Delta u$ όπου το K πια δεν είναι γραμμικός τελεστής αλλά είναι μεταβλητός, εξαρτώμενος από τη φόρτιση και Δu είναι μια στοιχειώδης μετακίνηση που οφείλεται στη στοιχειώδη μεταβολή της δύναμης ΔP. Δεδομένης της μεταβολής της δυσκαμψίας είναι φανερό πως σε κάθε διαδοχικό βήμα υπεισέρχεται ένα σφάλμα κατά τον

υπολογισμό των μετακινήσεων (**Σχήμα 3.7**). Έτσι προκύπτει ένα έλλειμμα ισορροπίας το οποίο ισοσκελίζεται με την εισαγωγή της ισοδύναμης P_{equiv} , διαδικασία που επαναλαμβάνεται έως ότου το σφάλμα γίνει αρκετά μικρό, τόσο ώστε να εμπίπτει στα προδιαγεγραμμένα κριτήρια σύγκλισης. Από αριθμητικής άποψης η διαδικασία αυτή περιγράφεται από τη μέθοδο Newton-Raphson η οποία μπορεί να είναι πλήρης ή τροποποιημένη υπό την έννοια ότι υπολογίζεται κάθε φορά ένα επικαιροποιημένο μητρώο δυσκαμψίας K ή χρησιμοποιείται το αρχικό σε κάθε βήμα αντίστοιχα. Η διαδικασία αυτή συνοψίζεται ως εξής (Παπαδρακάκης, 2001):

- επίλυση του συστήματος $\Delta P = K \cdot \Delta u$
- υπολογισμός μετακινήσεων Δu
- υπολογισμός των αντίστοιχων παραμορφώσεων $\Delta \varepsilon$
- θεώρηση ότι έστω η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων ήταν γραμμική ώστε να ισχύει $\varepsilon_{NL} = \varepsilon_L$
- υπολογισμός των αντίστοιχων τάσεων σ_{NL}
- υπολογισμός τάσεων εκτός ισορροπίας $\Delta\sigma = \sigma_L - \sigma_{NL}$
- δεδομένου ότι η δυσκαμψία $K = \int B^T D B dV$ και ότι $P = \int B^T \sigma dV$, εισαγωγή των τάσεων σ_{NL} και υπολογισμός του ισοδύναμου φορτίου P_{equiv}
- εισαγωγή τάσεων εκτός ισορροπίας $\Delta\sigma$ και υπολογισμός δύναμης εκτός ισορροπίας $\Delta P = P_{out\ of\ balance}$
- έλεγχος ότι η ανηγμένη δύναμη εκτός ισορροπίας $|\Delta P/P| <$ αποδεκτού ορίου σφάλματος το οποίο αποτελεί κριτήριο σύγκλισης.
- εάν δεν επιτυγχάνεται σύγκλιση τότε συνεχίζονται οι επαναλήψεις έως ότου συμπληρωθεί το μέγιστο αποδεκτό όριο επαναλήψεων οπότε και η ανάλυση θεωρείται αποκλίνουσα και τροποποιείται η διαδικασία (μικρότερο βήμα, αλλαγή αλγορίθμων επίλυσης, κ.λπ.).



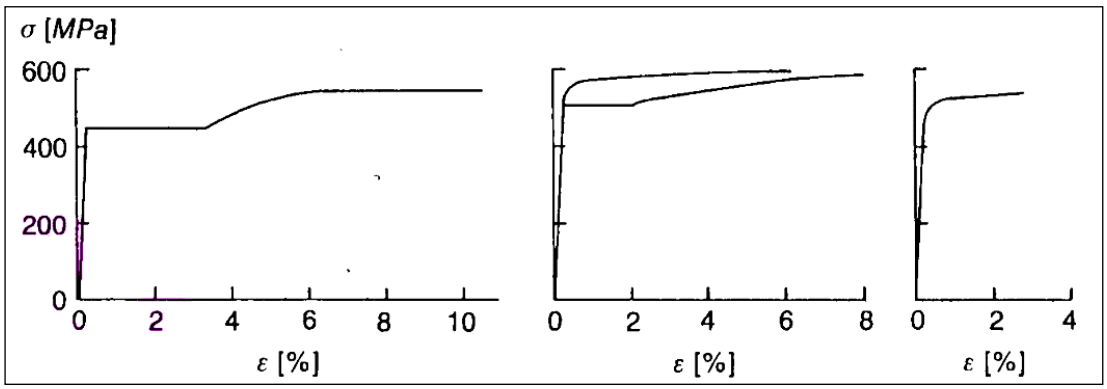
Σχήμα 3.7. Διαδικασία μη-γραμμικής επίλυσης

Στη μη-γραμμική ανάλυση ορίζουμε ένα μέγιστο και ένα ελάχιστο αριθμό βημάτων (substeps) κατά τα οποία εφαρμόζεται η δύναμη ή η εξαναγκασμένη μετατόπιση. Αν το μοντέλο συγκλίνει η μεταβολή της δύναμης που εφαρμόζεται θα αυξάνεται μέχρι το μέγιστο που επιτρέπεται. Αν η σύγκλιση είναι προβληματική η μεταβολή της δύναμης μειώνεται στο ελάχιστο που μπορεί.

3.3. ΧΑΛΥΒΑΣ

3.3.1. Γενικά

Ο χάλυβας χρησιμοποιείται στο οπλισμένο σκυρόδεμα υπό μορφή ράβδων κυκλικής διατομής με συνεισφορά καταρχήν σε μονοαξονική ένταση (αν και συνεισφέρει και μέσω της δράσης βλήτρου) (**Σχήμα 3.8**).

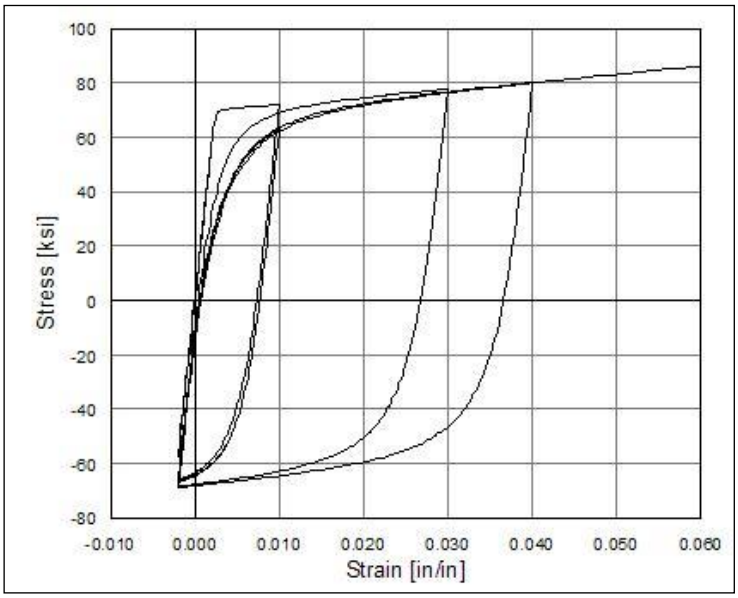


Σχήμα 3.8. Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος διαφορετικής κατεργασίας. (Fib Model Code 2010)

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 - Μέρος 1-1, το Μέτρο ελαστικότητας μπορεί να λαμβάνεται ίσο με E_s = 200 GPa έως το σημείο διαρροής εκτός αν υπάρχουν δεδομένα από δοκιμές εφελκυσμού. Η συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμού ορίζεται μέσω των παρακάτω ιδιοτήτων: όριο διαρροής (f_{yk} ή $f_{0,2k}$) , μέγιστη πραγματική αντοχή διαρροής ($f_{y,max}$), εφελκυστική αντοχή (f_t), πλαστιμότητα (ε_{uk} και f_t/f_{yk}).

3.3.1.1. Ο χάλυβας υπό ανακυκλιζόμενες δράσεις

Η συμπεριφορά του χάλυβα έναντι ανακυκλιζόμενων δράσεων είναι μη-γραμμική, και η δε μείωση της απόκρισης του σε αυξανόμενους κύκλους είναι πρακτικά μηδενική εφόσον δεν υπάρχουν φαινόμενα λυγισμού (**Σχήμα 3.9**). Παρ' όλα αυτά η συμπεριφορά του παρουσιάζει δύο χαρακτηριστικά, (α) παρατηρείται απώλεια του σαφούς ορίου διαρροής με την ανακύκλιση που αναφέρεται και ως φαινόμενο Bauschinger, (β) υπάρχει συσσώρευση παραμενουσών παραμορφώσεων στο χάλυβα με την πρόοδο των κύκλων, (γ) η ανακυκλιζόμενη συμπεριφορά δεν εμφανίζει την διγραμμικότητα του αρχικού κύκλου, (δ) σε μικρού εύρους ανακύκλιση εμφανίζει ισοτροπική κράτυνση, ενώ σε μεγάλες ανηγμένες παραμορφώσεις κινηματική κράτυνση.



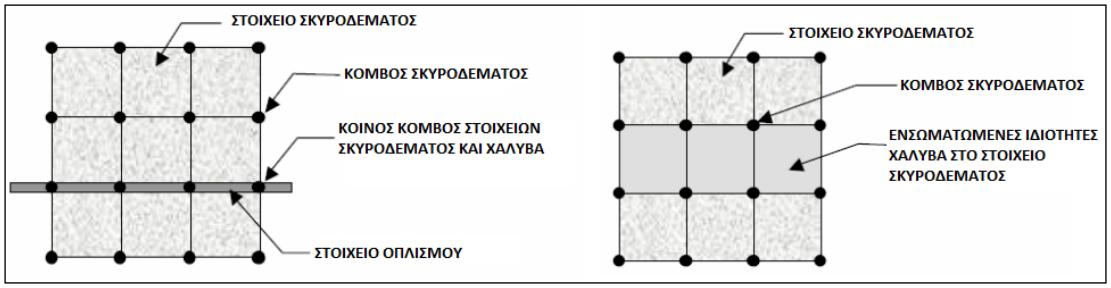
Σχήμα 3.9. Συμπεριφορά του χάλυβα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση (πηγή: OpenSees user manual)

Το αποτέλεσμα του χαρακτηριστικού (β) είναι σημαντικό στην απόκριση συνολικά των στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος καθώς παραμένουσες παραμορφώσεις στο χάλυβα σημαίνουν και παραμένον άνοιγμα ρωγμής στις κρίσιμες διατομές καθώς και στην πάκτωση των δοκών με τον κόμβο, πράγμα που μειώνει τη συμβολή του σκυροδέματος στη θλιβόμενη

ζώνη και μειώνει την αντίσταση των κρισίμων διατομών άρα και του καμπτόμενου στοιχείου.

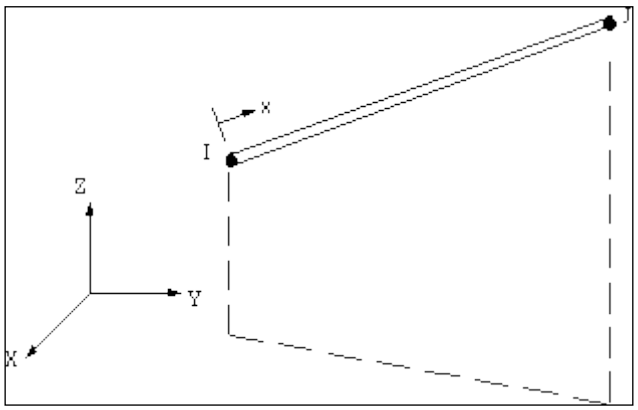
3.3.2. Καταστατική προσομοίωση του Χάλυβα

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα υπάρχουν δύο τρόποι προσομοίωσης του χάλυβα του οπλισμού στο ANSYS. Ο πρώτος είναι ο ορισμός του ως διανεμημένου στα στοιχεία σκυροδέματος (smeared reinforcement) και με διακριτή διεύθυνση λειτουργίας, μέσω των παραμέτρων του στοιχείου SOLID65. Ο δεύτερος τρόπος, πιο ακριβής και ευέλικτος προβλέπει τη διακριτή προσομοίωση του οπλισμού με ξεχωριστά ραβδωτά ΠΣ (**Σχήμα 3.10**).(Για πλέον λεπτομερή μικρόμοντέλα ο χάλυβας προσομοιώνεται με χωρικά ΠΣ)



Σχήμα 3.10. Τρόποι προσομοίωσης του οπλισμού (Tavarez, 2001)

Για τη διακριτή αυτή προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο LINK180 (που αντικατέστησε στις τελευταίες εκδόσεις του προγράμματος το παλαιότερο αντίστοιχο LINK8). Γενικά το ΠΣ δικτυώματος LINK180 (**Σχήμα 3.11**) χρησιμοποιείται για τη διακριτοποίηση γραμμικών στοιχείων που παραλαμβάνουν μονοαξονικά φορτία εφελκυσμού - θλίψης και διαθέτει τρείς μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο.



Σχήμα 3.11. Στοιχείο τρισδιάστατης ράβδου οπλισμού LINK180

Το στοιχείο ορίζεται από δύο κόμβους και το εμβαδόν της διατομής του καθώς και από τις ιδιότητες του υλικού που αντιπροσωπεύει. Μπορεί να υφίσταται πλαστικές παραμορφώσεις ενώ είναι κατάλληλο και για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του χάλυβα υπό ανακυκλιζόμενα φορτία μέσω της επιλογής ιδιοτήτων υλικού Kinematic Hardening Plasticity.

Τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε για το στοιχείο αυτό μετά από κάποια επίλυση είναι: αξονική τάση, αξονική παραμόρφωση, αξονική ελαστική και πλαστική παραμόρφωση, ισοδύναμη τάση από το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης, ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση.

3.4. ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

3.4.1. Γενικά

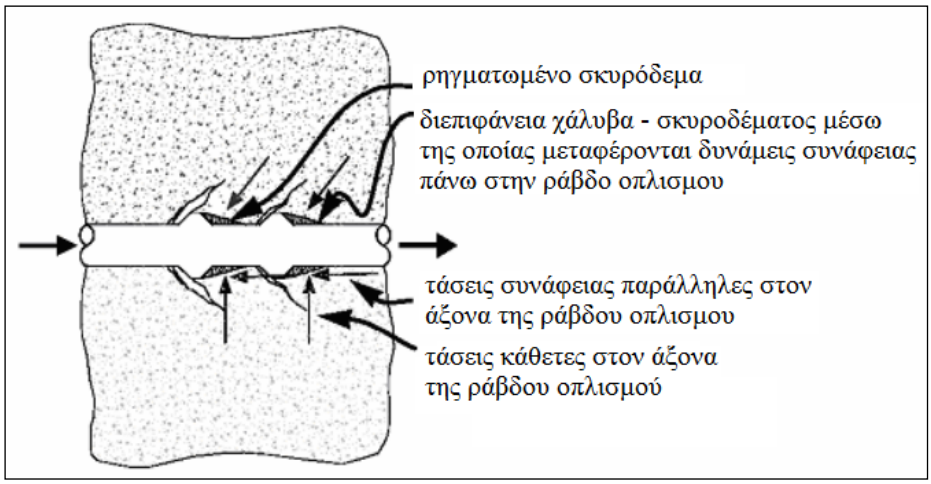
Είναι γνωστό ότι ο μηχανισμός της συνάφειας μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος είναι εκείνος χάρη στον οποίον τα δύο υλικά συναποτελούν το οπλισμένο σκυρόδεμα. Η μεταφορά της δύναμης από το χάλυβα στο περιβάλλον σκυρόδεμα θεωρείται ότι οφείλεται στα εξής φαινόμενα:

- Χημική συνοχή μεταξύ χάλυβα - σκυροδέματος
- Τριβή και αλληλεμπλοκή μεταξύ ράβδου και σκυροδέματος
- Μηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ των νευρώσεων του χάλυβα και του σκυροδέματος

Όσον αφορά τους χάλυβες με νευρώσεις, που πλέον χρησιμοποιούνται σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα, η αλληλεπίδραση της ράβδου με το σκυρόδεμα εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη μηχανική εμπλοκή των νευρώσεων με το περιβάλλον σκυρόδεμα (**Σχήμα 3.12**) ενώ οι άλλοι μηχανισμοί προσφέρουν λίγο στη συνάφεια (Eligehausen et al.,1983).

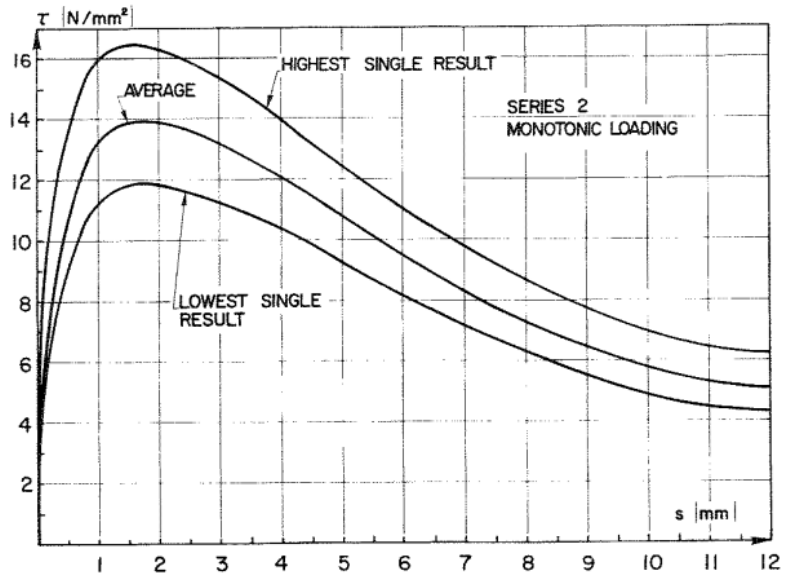
Μια βασική παραδοχή της θεωρίας του οπλισμένου σκυροδέματος είναι ότι η ολίσθηση μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος είναι μηδενική. Έτσι κατά τον υπολογισμό των διατομών οπλισμένου σκυροδέματος δεχόμαστε ότι η παραμόρφωση των ράβδων του οπλισμού ισούται με την παραμόρφωση των γειτονικών ινών σκυροδέματος. Σε πολλές αναλύσεις στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, ακόμα και με ΠΣ, αυτή η παραδοχή διατηρείται. Παρ' όλα αυτά όμως, ενώ κάτι τέτοιο είναι πολύ κοντά στην αλήθεια για τη στάθμη συνήθων δράσεων, όταν επιβάλλονται μεγάλου εύρους και μάλιστα ανακυκλιζόμενες παραμορφώσεις, η αντίσταση του μηχανισμού συνάφειας μειώνεται

σταδιακά σημαντικά. Επιπλέον σε τμήμα μιας ράβδου που πιθανόν έχει διαρρεύσει, υπάρχει πλήρης απώλεια συνάφειας.

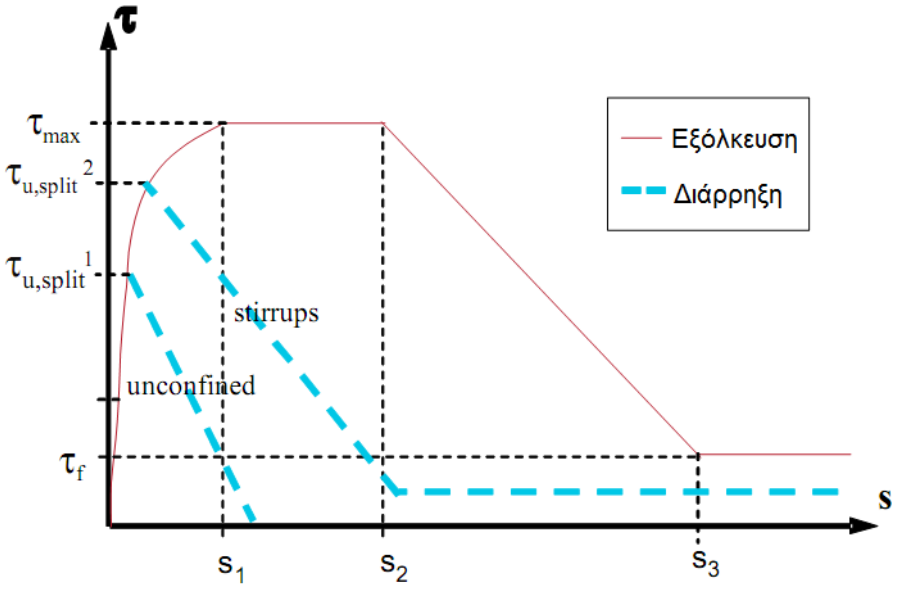


Σχήμα 3.12. Μεταφορά δυνάμεων μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος

Στην περίπτωση που υπάρχει ολίσθηση των ράβδων του οπλισμού, η τάση συνάφειας σχετίζεται με τη σχετική ολίσθηση μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος και η συμπεριφορά του μηχανισμού περιγράφεται καλύτερα από μια σχέση μεταξύ τοπικής τάσης συνάφειας τ, και σχετικής τοπικής ολίσθησης s της ράβδου (Rehm, 1961). Δύο είδη δοκιμών πραγματοποιούνται για τον καθορισμό της σχέσης τάσης συνάφειας – ολίσθησης. Η μία είναι δοκιμή εξόλκευσης (pull-out) και η σταδιακά αυξανόμενη δύναμη εφαρμόζεται στο άκρο της ράβδου που βρίσκεται μέσα σε ένα κύλινδρο σκυροδέματος. Στην άλλη δοκιμή ένα ζεύγος εξισορροπούμενων δυνάμεων εφαρμόζεται στα δύο άκρα μιας ράβδου που προεξέχει από ένα κύλινδρο σκυροδέματος. Σχέσεις τοπικής τάσης συνάφειας-τοπικής ολίσθησης υπό μονοτονική φόρτιση συναντώνται πολλές στη βιβλιογραφία, τόσο πειραματικές όσο και αναλυτικές. Ενδεικτικά τέτοιες σχέσεις φαίνονται στο **Σχήμα 3.13** και **Σχήμα 3.14**.



Σχήμα 3.13. Πειραματικά αποτελέσματα σχέσης τάσεως συνάφειας - ολίσθησης (Eligehausen et al.,1983)

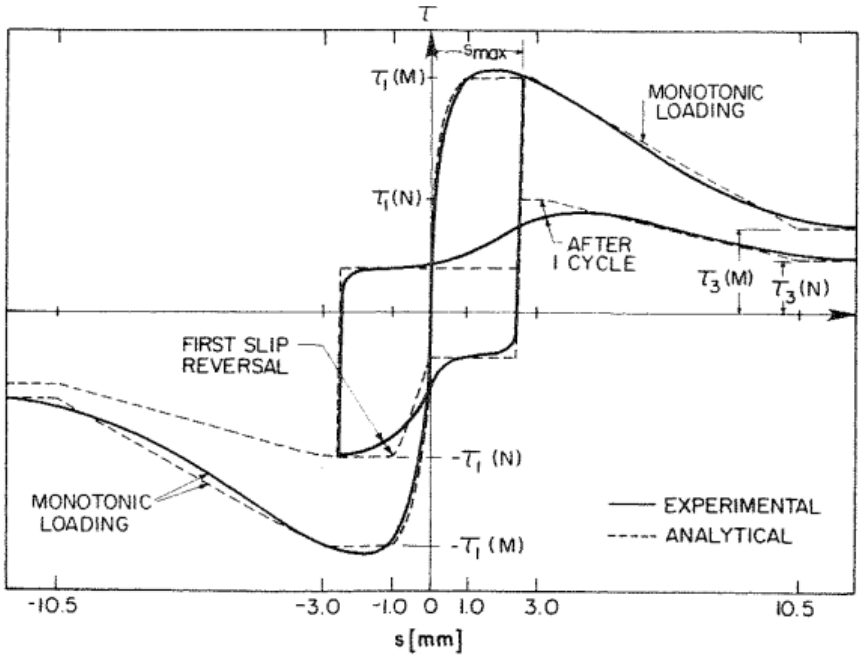


Σχήμα 3.14. Αναλυτική σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης (Fib Model Code 2010)

Οι τιμές των παραμέτρων σε μια σχέση τάσης συνάφειας - ολίσθησης εξαρτώνται γενικά από δύο παράγοντες, τη θέση της ράβδου (περιοχή καλής ή κακής συνάφειας) και την ύπαρξη περισφιγμένου ή απερίσφικτου σκυροδέματος, όπως φαίνεται ενδεικτικά παρακάτω (**Πίνακας 3.1**) με τιμές να αναφέρονται στο **Σχήμα 3.14**.

Ολίσθηση	Απερίσφικτο Σκυρόδεμα		Περισφιγμένο Σκυρόδεμα	
	Συνθήκες συνάφειας		Συνθήκες συνάφειας	
	Καλές	Όλες οι άλλες περιπτώσεις	Καλές	Όλες οι άλλες περιπτώσεις
s_1	0.6mm	0.6mm	1.0mm	
s_2	0.6mm	0.6mm	3.0mm	
s_3	1.0mm	2.5mm	καθαρή απόσταση μεταξύ νευρώσεων	
α	0.4		0.4	
τ_{max}	$2.0\sqrt{f_{ck}}$	$1.0\sqrt{f_{ck}}$	$2.5\sqrt{f_{ck}}$	$1.25\sqrt{f_{ck}}$
τ_f	$0.15\tau_{max}$		$0.40\tau_{max}$	

Πίνακας 3.1. Παράμετροι της σχέσης τάσεως συνάφειας - ολίσθησης (Fib Model Code 2010)



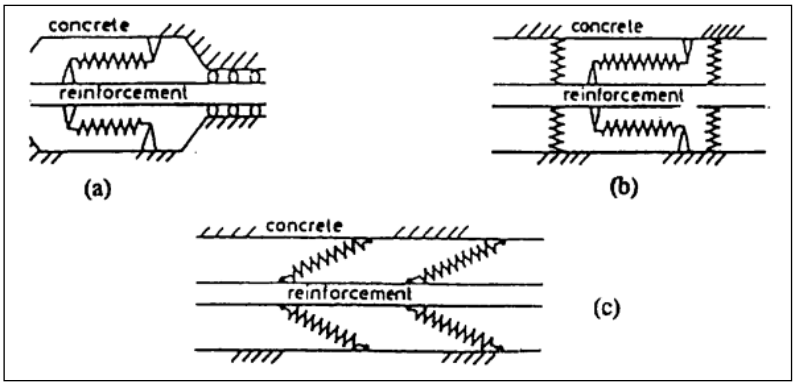
Σχήμα 3.15. Σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Eligehausen et al.,1983)

Υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, η τοπική τάση συνάφειας μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος μειώνεται δραστικά ακόμη και μετά από τον πρώτο κύκλο φόρτισης, ενώ απαιτείται επιβολή παραμορφώσεως μεγαλύτερης από εκείνην του προηγούμενου κύκλου για να αυξηθεί και πάλι η αντίσταση του μηχανισμού, που μάλιστα, εμφανίζεται πλέον απομειωμένη. Το φαινόμενο αυτό της ολίσθησης (slippage) κατά την επαναφόρτιση προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του προηγούμενου κύκλου φαίνεται χαρακτηριστικά στις αντίστοιχες σχέσεις συνάφειας - τοπικής ολίσθησης (**Σχήμα 3.15**) και επηρεάζει την

υστερητική απόκριση των στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τέτοια συμπεριφορά είναι αναμενόμενη στην περίπτωση για παράδειγμα ενός μεγάλου σεισμού, ο οποίος θα αναγκάσει τις κρίσιμες περιοχές των στοιχείων να αναπτύξουν τις μέγιστες αντιστάσεις τους.

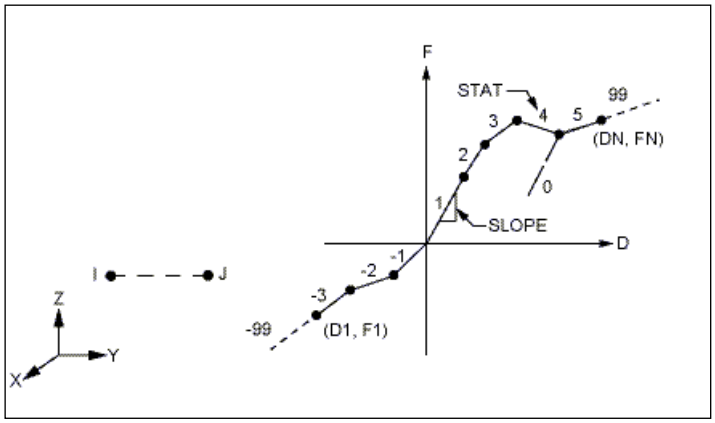
3.4.2. Καταστατική προσομοίωση της συνάφειας χάλυβα - σκυροδέματος

Για την προσομοίωση της συνάφειας στα πλαίσια μιας ανάλυσης ΠΣ έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία διάφοροι τρόποι και μοντέλα εκ των οποίων, σημαντικά, στη βάση της σχετικής απλότητας τους, είναι τα μοντέλα ελατηρίων (spring elements). Οι Hemmaty et al. (1991) διεξήγαγαν στα πλαίσια του προγράμματος ANSYS μια μελέτη πάνω στην προσομοίωση της συνάφειας χάλυβα και σκυροδέματος. Συγκεκριμένα περιγράφηκε η επαφή μεταξύ της ράβδου και του σκυροδέματος με μονοδιάστατα ελατήρια ικανά να ακολουθούν μια γενικευμένη μη-γραμμική σχέση δύναμης - μετατόπισης.



Σχήμα 3.16. Διαφορετικά μοντέλα ελατηρίων (Hemmaty et al. 1991)

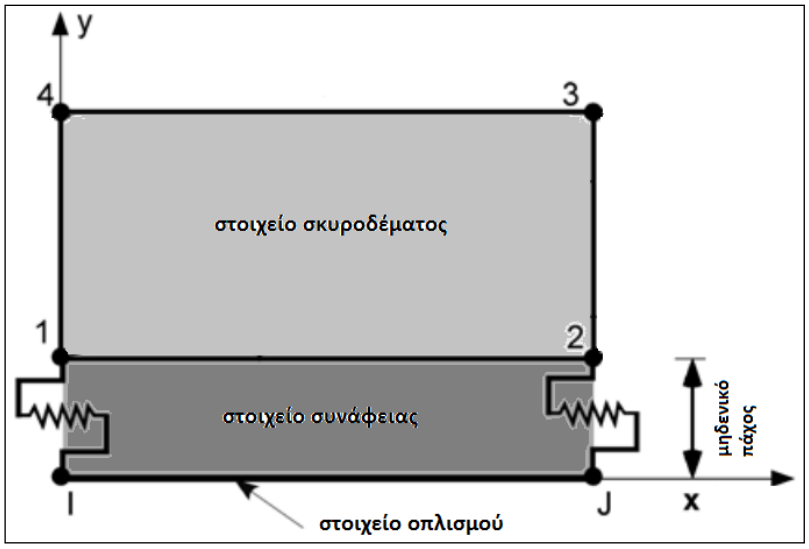
Η παραπάνω μεθοδολογία υιοθετείται και στην παρούσα εργασία με τη χρήση του στοιχείου COMBIN39.



Σχήμα 3.17. Περιγραφή του στοιχείου COMBIN39

Το στοιχείο αυτό είναι ένα μονοαξονικό μη-γραμμικό ελατήριο ικανό να παραλάβει φορτία θλίψης και εφελκυσμού, υιοθετώντας μια γενικευμένη καμπύλη δύναμης-παραμόρφωσης (**Σχήμα 3.17**). Υπάρχει επίσης επιλογή για "μη-συντηρητική" συμπεριφορά κατά την αποφόρτιση, κάτι που επιτρέπει την προσομοίωση της συνάφειας υπό ανακυκλιζόμενες δράσεις. Η λειτουργία μπορεί να αφορά έως και τρείς μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας, σε κάθε κόμβο. Εδώ χρησιμοποιείται μόνο ένας βαθμός ελευθερίας στη διεύθυνση του εκάστοτε διαμήκους οπλισμού.

Το στοιχείο COMBIN39 μπορεί να έχει μηδενικό μήκος (zero-length element) και συνδέει τους κόμβους των τρισδιάστατων στοιχείων του σκυροδέματος (SOLID65) με τους συμπίπτοντες κόμβους των στοιχείων του οπλισμού (LINK180) όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.18**.



Σχήμα 3.18. Συνδεσμολογία στοιχείων συνάφειας στους κοινούς κόμβους χάλυβα-σκυροδέματος

Η σχέση τάσεως συνάφειας - τοπικής ολίσθησης πρέπει να μετατραπεί σε σχέση δύναμης - παραμόρφωσης (F-D) για το ελατήριο. Η παραμόρφωση D του ελατηρίου είναι η σχετική ολίσθηση της ράβδου ενώ η τάση συνάφειας τ_{bm} μετατρέπεται σε δύναμη για το ελατήριο μέσω της σχέσης (3.6):

$$F_{\varepsilon\lambda} = \pi * \varnothing * \tau_{bm} * l_i \qquad (3.6)$$

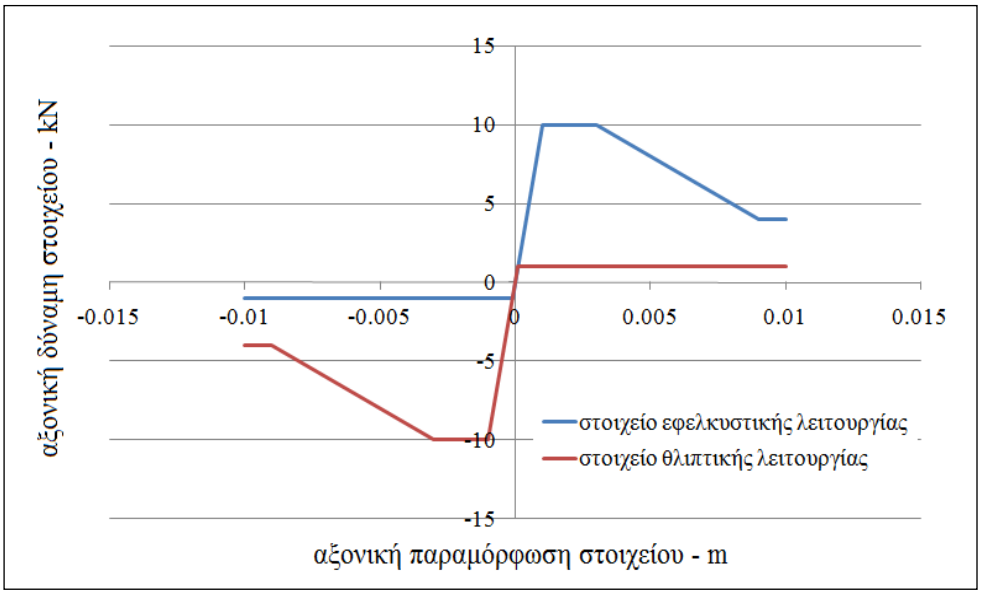
όπου:
$\varnothing$ η διάμετρος της ράβδου του οπλισμού

τ_{bm} η τάση συνάφειας στο αντίστοιχο σημείο της σχέσης που θα χρησιμοποιηθεί

l_i το μήκος του πεπερασμένου στοιχείου του οπλισμού

3.4.2.1. Προσομοίωση της ολίσθησης του οπλισμού κατά την ανακύκλιση

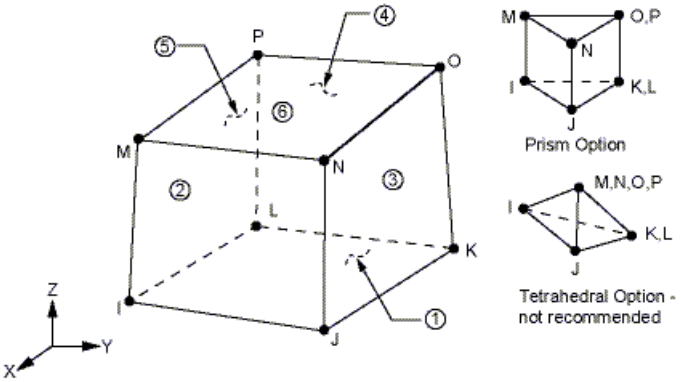
Για την προσομοίωση της ολίσθησης του οπλισμού (slippage) κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση επεκτείνεται η παραπάνω μέθοδος ως εξής. Σε κάθε κοινό κόμβο στοιχείου χάλυβα - στοιχείου σκυροδέματος τοποθετείται ένα επιπλέον ελατήριο. Το κάθε ένα από τα δύο ελατήρια έχει μια διακριτή κατεύθυνση λειτουργίας, το ένα ακολουθεί τη σχέση συνάφειας όταν θλίβεται και το άλλο όταν εφελκύεται. Σε εφελκυσμό και θλίψη αντίστοιχα, μετά την αποφόρτιση και κατά τη φόρτιση προς την αντίθετη κατεύθυνση, τα δύο ελατήρια ολισθαίνουν ακολουθώντας έναν ευθύγραμμο κλάδο με μια μικρή τιμή της τάσεως συνάφειας (**Σχήμα 3.19**).



Σχήμα 3.19. Ορισμός μη-γραμμικής καμπύλης στοιχείων συνάφειας για την προσομοίωση της ολίσθησης

3.5. ΠΛΑΚΕΣ ΕΠΙΒΟΛΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Για την αποφυγή τοπικής συγκέντρωσης τάσεων στα στοιχεία του σκυροδέματος, συνίσταται η επιβολή των φορτίων καθώς και των συνοριακών συνθηκών να γίνεται με τη βοήθεια μεταλλικών πλακών, θεωρούμενων ως πρακτικά απαραμόρφωτων. Οι πλάκες αυτές διακριτοποιούνται εδώ με χωρικά στοιχεία SOLID185 (**Σχήμα 3.20**) και ελαστική συμπεριφορά βάσει ιδιοτήτων χάλυβα.



Σχήμα 3.20. Τρισδιάστατο στοιχείο SOLID185

4. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ANSYS ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

4.1. ΓΕΝΙΚΑ

Πριν από την προσομοίωση ενός συνθετότερου μοντέλου, όπως αυτό ενός κόμβου δοκού - υποστυλώματος, που είναι και ο στόχος της παρούσης, κρίθηκε απαραίτητο να γίνει κάποια διερεύνηση της αξιοπιστίας του προγράμματος ANSYS στην προσομοίωση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος καθώς και η διερεύνηση της επιρροής ορισμένων παραμέτρων που αφορούν την περιγραφή της συμπεριφοράς του σκυροδέματος σε επίπεδο υλικού. Η διερεύνηση αυτή βασίστηκε σε προηγούμενη δημοσιευμένη εργασία των Cotsovos, Zeris, και Ali Abbas (2009) που αφορούσε την προσομοίωση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με διάφορα πακέτα ΠΣ, μεταξύ των οποίων και το ANSYS.

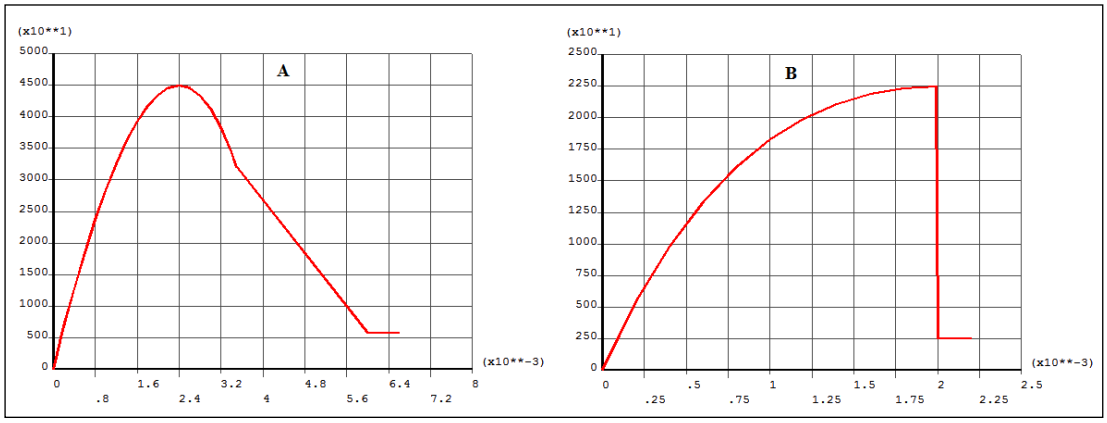
Παρακάτω γίνεται διερεύνηση δύο περιπτώσεων, που αφορούν τη συμπεριφορά δύο αμφιέριστων δοκών υπό στατική μονοτονική φόρτιση στο μέσον του ανοίγματος τους. Για τις δύο δοκούς υπάρχουν δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα: Η πρώτη από τις δύο δοκούς, μελετημένη πειραματικά από τους Hughes και Spiers (1982), χαρακτηρίζεται από πλάστιμη συμπεριφορά (Περίπτωση 1), ενώ η δεύτερη, μελετημένη πειραματικά από τους Bresler και Scordelis (1963), αστόχησε με ψαθυρό τρόπο (Περίπτωση 2).

Οι παράμετροι που διερευνούνται αφορούν κατά κύριο λόγο τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος σε επίπεδο υλικού μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής του (post-peak behavior), συγκεκριμένα η ύπαρξη ή μη φθιτού κλάδου στην καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων υπό θλίψη και το ποσοστό μεταφοράς διατμητικών δυνάμεων στην επιφάνεια μιας κλειστής και μιας ανοιχτής ρωγμής. Επιπλέον, για την ψαθυρή δοκό, διερευνάται και η επιρροή της τιμής της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος υιοθετώντας δύο τιμές που μπορούμε να πούμε γενικά πως αντιστοιχούν στην καθαρή μονοαξονική εφελκυστική αντοχή και στην εφελκυστική αντοχή υπό κάμψη. Τέλος, διερευνάται και η συμπεριφορά της δοκού αν απορρίψουμε την παραδοχή της πλήρους συνάφειας μεταξύ χάλυβα-σκυροδέματος και εισάγουμε στοιχεία που να περιγράφουν τη σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης (όπως περιγράφηκε στο Κεφ. 3.4).

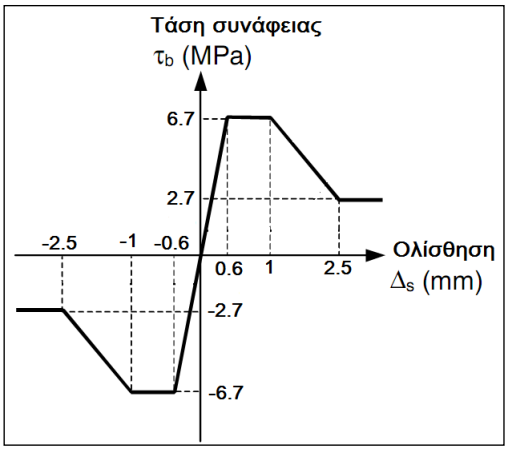
Για την πρώτη παράμετρο, χρησιμοποιούνται δύο καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων. Η πρώτη καμπύλη (καμπύλη Α) αποτελείται από έναν ανερχόμενο (έως ανηγμένη παραμόρφωση 0.0024) και ένα φθίτο κλάδο (έως παραμόρφωση 0.0035), ίδια με αυτή που προτείνεται από τη Fib (Model Code 10), απ' όπου η τάση συνεχίζει να μειώνεται

γραμμικά έως κάποια μικρή τιμή σε παραμόρφωση 0.006. Η δεύτερη καμπύλη (καμπύλη Β) είναι ίδια με την Α έως την παραμόρφωση 0.0020, απ' όπου η τάση πέφτει άμεσα και κατακόρυφα διατηρώντας μια μικρή τιμή (ψαθυρή συμπεριφορά). Για την πλάστιμη δοκό (Περίπτωση 1) χρησιμοποιήθηκε μόνο η καμπύλη Α ενώ για την ψαθυρή δοκό (Περίπτωση 2) διερευνήθηκαν και η Α και η Β (**Σχήμα 4.1**)

Για τη δεύτερη παράμετρο, όπως αναφέρθηκε στο Κεφ. 3.2, στο χαρακτηρισμό του υλικού του σκυροδέματος εισάγονται δύο συντελεστές μεταφοράς της διατμητικής τάσης, ένας για ανοικτή (β_t) και ένας για κλειστή (β_c) ρωγμή. Εδώ διερευνούνται δύο ζεύγη τιμών: β_c= 0.6, β_t = 0.2 και β_c= 1.0, β_t = 0.6. Σημειώνεται ότι ο συντελεστής β_c για την κλειστή ρωγμή δεν αναμένουμε να έχει επιρροή σε μια μονοτονική φόρτιση όπου ο σχηματισμός των ρωγμών είναι μονοσήμαντα προοδευτικός και δεν έχουμε "κλείσιμο" ρωγμών λόγω αλλαγής πρόσημου της φόρτισης.



Σχήμα 4.1. Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων σκυροδέματος, καμπύλη τύπου Α της Περίπτωσης 1 και καμπύλη τύπου Β της Περίπτωσης 2.



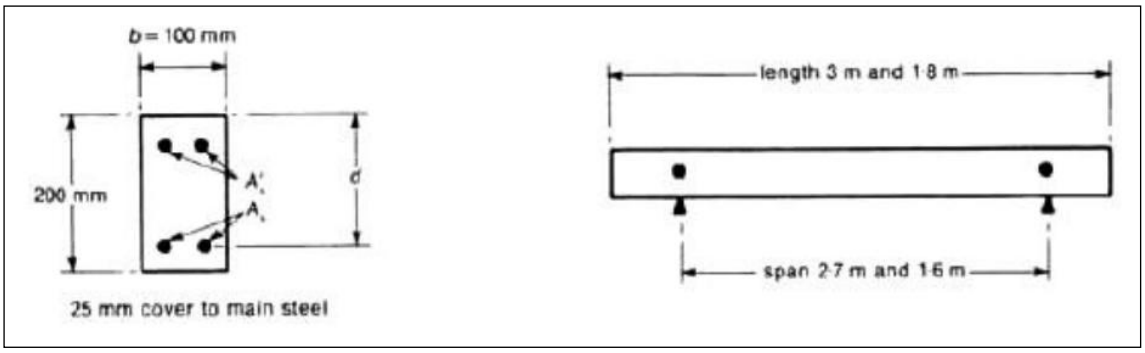
Σχήμα 4.2. Σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης που υιοθετείται για την ανάλυση

Για την προσομοίωση της συνάφειας μεταξύ χάλυβα-σκυροδέματος ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε στο Κεφ. 3.4. Για τη σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης υιοθετείται μια απλοποίηση της σχέσης που προτείνει η Fib (Model Code 10) με τιμές που αντιστοιχούν σε απερίσφικτο σκυρόδεμα και κακές συνθήκες συνάφειας (**Σχήμα 4.2**)

4.2. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1 - ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΛΑΣΤΙΜΗΣ ΔΟΚΟΥ

4.2.1. Περιγραφή στοιχείου και προσομοίωσης

Πρόκειται για μια αμφιέριστη δοκό ανοίγματος 2700 mm, διατομής 200 mm (ύψος) x 100 mm (πλάτος) οπλισμένη με δύο εφελκυόμενες ράβδους διαμέτρου 12 mm, δύο θλιβόμενες ράβδους διαμέτρου 6mm και συνδετήρες διαμέτρου 6mm σε αξονική απόσταση περίπου 180 mm (**Σχήμα 4.3**). Το μέτρο ελαστικότητας (E_s), το όριο διαρροής (f_y) και η οριακή αντοχή (f_u) τόσο του διαμήκους όσο και του εγκάρσιου οπλισμού είναι 206 GPa, 460 MPa και 560 MPa αντίστοιχα, με θλιπτική αντοχή κυλίνδρου σκυροδέματος (f_c) να ισούται με 45 MPa και εφελκυστική αντοχή (f_s) ίση με 3 MPa. Κατά τη διάρκεια του πειράματος η δοκός παρουσίασε πλάστιμη συμπεριφορά: η φέρουσα ικανότητα και η αντίστοιχη μετατόπιση στο μέσον ήταν 30 kN και 20 mm ενώ καταγράφηκε μέγιστη μετατόπιση στο μέσον ίση με 50 mm.

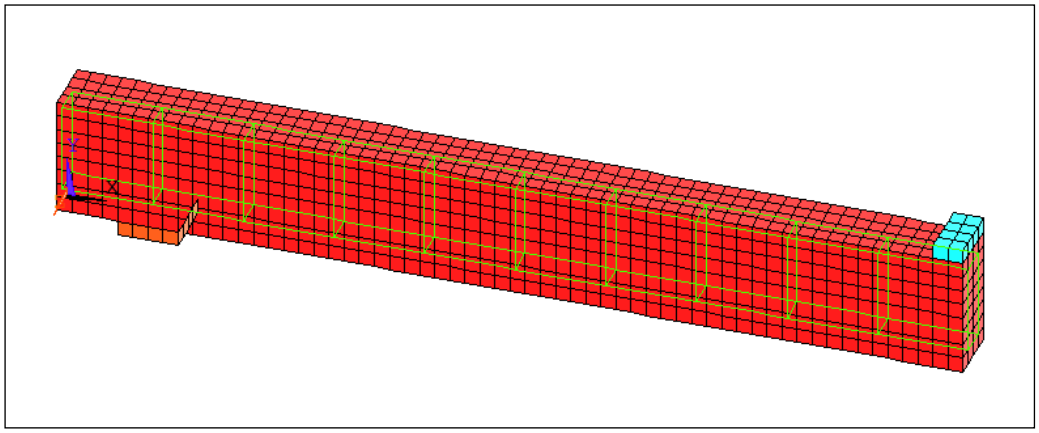


Σχήμα 4.3. Γεωμετρία και οπλισμός της πλάστιμης δοκού

Η ρηγμάτωση άρχισε στο μέσον της δοκού και επεκτάθηκε στο υπόλοιπο μήκος καθώς αυξανόταν το φορτίο (**Σχήμα 4.4**). Η αστοχία του στοιχείου οφείλεται στη διαρροή του διαμήκους εφελκυόμενου οπλισμού στο μέσον του ανοίγματος που είχε σαν αποτέλεσμα των σχηματισμό μεγάλων καμπτικών ρωγμών στην περιοχή και τελικά την αστοχία του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης.

Σχήμα 4.4. Ρηγμάτωση που προέκυψε κατά τη δοκιμή της πλάστιμης δοκού

Για την προσομοίωση της δοκού χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία ακμής 2.5 cm, ενώ λόγω συμμετρίας προσομοιώθηκε μόνο η μισή δοκός τοποθετώντας κατάλληλες συνοριακές συνθήκες (**Σχήμα 4.5**). Επιπλέον η απόσταση των συνδετήρων λήφθηκε 150 mm για λόγους ευκολίας στη διακριτοποίηση χωρίς αυτό να επηρεάζει τα αποτελέσματα. Το εξωτερικό φορτίο εφαρμόστηκε με μορφή εξαναγκασμένης μετατόπισης μέσω πλάκας φόρτισης. Όμοιες πλάκες χρησιμοποιήθηκαν και στη στήριξη της δοκού ώστε να αποφευχθεί η συγκέντρωση τάσεων τοπικά στο σκυρόδεμα.

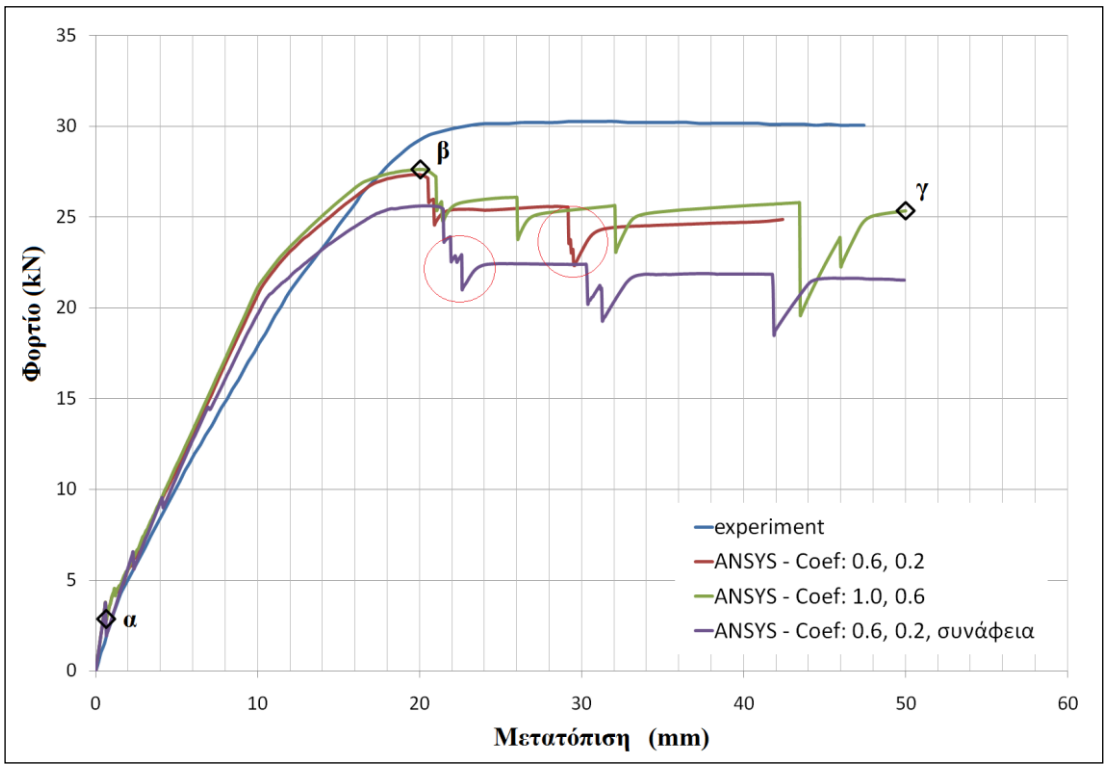


Σχήμα 4.5. Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων της δοκού στο ANSYS

4.2.2. Αποτελέσματα

Στο **Σχήμα 4.6**, με τη μορφή καμπύλων φορτίου - μετατόπισης στο μέσον του ανοίγματος, γίνεται σύγκριση της αριθμητικής πρόβλεψης της συμπεριφοράς της δοκού για τις διάφορες παραμέτρους καθώς και με τα πειραματικά αποτελέσματα. Όπως αναφέρθηκε, η δοκός πειραματικά παρουσίασε φέρουσα ικανότητα 30 kN με αντίστοιχη μετατόπιση 20 mm. Για την περίπτωση όπου βc= 0.6, βt = 0.2 η αριθμητική πρόβλεψη ήταν 27.4 kN και 19.8 mm αντίστοιχα. Με την προσθήκη των στοιχείων συνάφειας οι τιμές γίνονται 25.6 kN και 20.5 mm. Τέλος για βc= 1.0, βt = 0.6 οι τιμές είναι 27.6 kN και 20.1 mm. Η φέρουσα ικανότητα της δοκού καθώς και η δυσκαμψία της προσεγγίζονται πολύ ικανοποιητικά από το ANSYS ενώ δεν φαίνεται οι τιμές των συντελεστών μεταφοράς τέμνουσας να

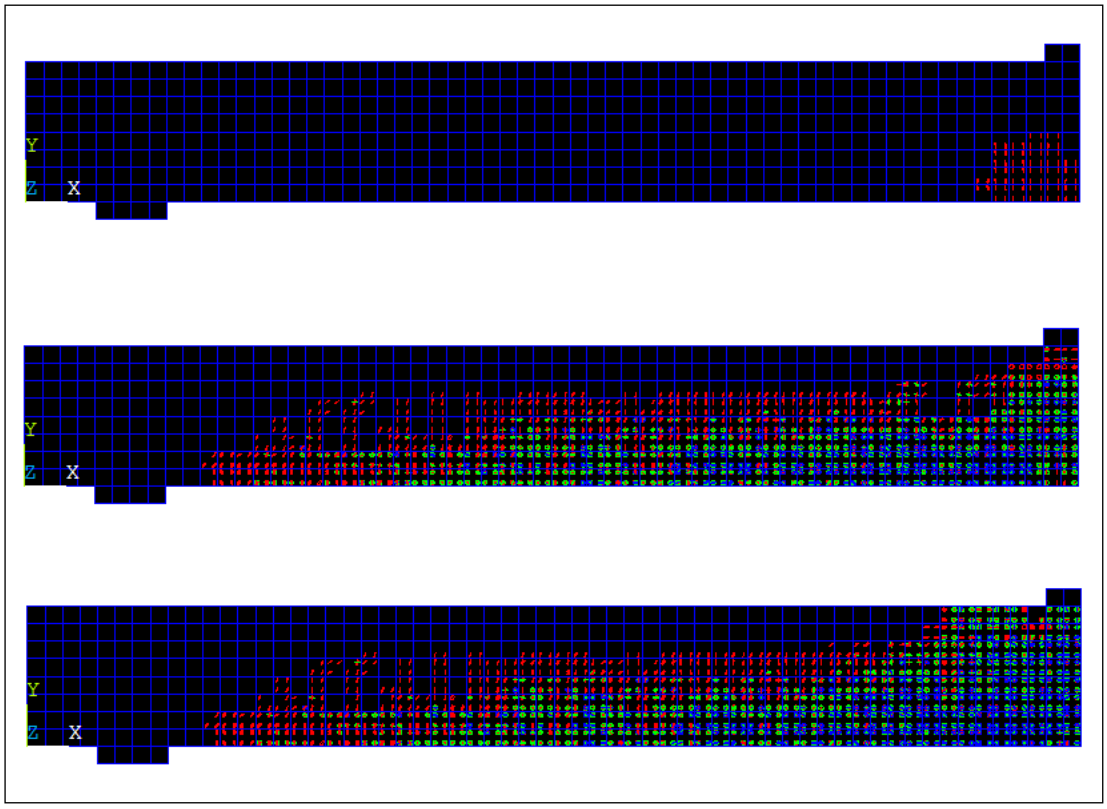
επηρεάζουν αυτά τα αποτελέσματα όπως αναμενόταν. Η προσθήκη στοιχείων συνάφειας αντίθετα, μειώνει σε μικρό βαθμό τη δυσκαμψία ενώ υποεκτιμά αρκετά τη φέρουσα ικανότητα. Αυτή η συμπεριφορά βέβαια εξαρτάται και από την επιλογή των τιμών για την καμπύλη τάσεως συνάφειας - ολίσθησης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκαν δυσμενείς τιμές τόσο ως προς την απουσία περίσφιγξης όσο και ως προς τις συνθήκες συνάφειας. Θεώρηση υψηλότερων αντοχών συνάφειας θα έδινε και καλύτερα αποτελέσματα για τη συγκεκριμένη δοκό. Τέλος, όσον αφορά την πλαστιμότητα της δοκού, η πρόβλεψη σε κάθε περίπτωση είναι καλή και όχι μακριά από την πραγματική συμπεριφορά.



Σχήμα 4.6. Σύγκριση καμπύλων φορτίου - μετατόπισης όπως προέκυψαν πειραματικά και από το ANSYS και παρουσίαση των σημείων ρηγμάτωσης.

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.6**, η ανάλυση, μετά την επίτευξη της φέρουσας ικανότητας παρουσιάζει ασταθή συμπεριφορά, με απότομη πτώση της αντοχής αμέσως μετά και διαδοχικές πτώσεις (σημειώνονται με κύκλο ενδεικτικά στο **Σχήμα 4.6**) και επανάκτηση κάθε φορά της αντοχής έπειτα. Η αριθμητική αυτή αστάθεια οφείλεται στην διαδοχική "καταστροφή" (μηδενισμού δηλαδή της δυσκαμψίας) στοιχείων σκυροδέματος λόγω ρηγμάτωσης σε τρείς διευθύνσεις σε κάθε σημείο ολοκλήρωσης. Είναι χαρακτηριστική των δυσκολιών αριθμητικής σύγκλισης που αντιμετωπίζει το ANSYS σε περιπτώσεις όπου η ρηγμάτωση είναι εκτεταμένη.

Στο **Σχήμα 4.7** παρουσιάζονται οι εικόνες ρηγμάτωσης της δοκού (χωρίς στοιχεία συνάφειας) σε διάφορες φάσεις: αρχική ρηγμάτωση (α), επίτευξη φέρουσας ικανότητας (β) , κατάρρευση (γ). Η ρηγμάτωση όπως προβλέπεται από το ANSYS ακολουθεί ικανοποιητικά αυτά που παρατηρήθηκαν κατά το πείραμα και προβλέπει σωστά την πραγματική συμπεριφορά της δοκού με αρχική ρηγμάτωση στο μέσον του ανοίγματος (α), προοδευτική ρηγμάτωση καθώς διαρρέει ο εφελκυόμενος οπλισμός (β) και τελικά αστοχία του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης (γ).



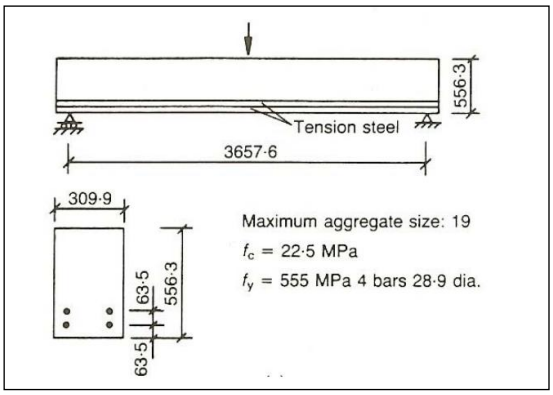
Σχήμα 4.7. Εικόνες ρηγμάτωσης δοκού για τις φάσεις α, β, γ

4.3. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2 - ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΨΑΘΥΡΗΣ ΔΟΚΟΥ

4.3.1. Περιγραφή στοιχείου και προσομοίωσης

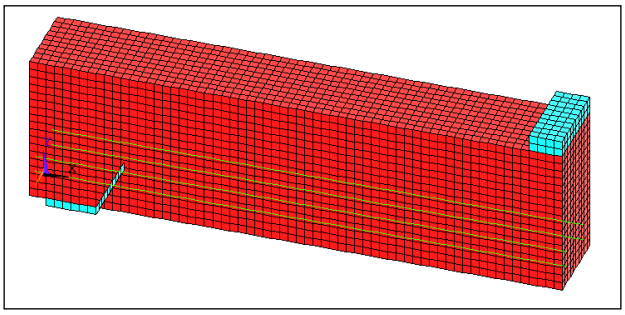
Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, πρόκειται για μια αμφιέριστη δοκό στην οποία ασκείται συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσον του ανοίγματος. Η δοκός έχει άνοιγμα 3658 mm, διατομή 558 mm (ύψος) x 310 mm (πλάτος) ενώ είναι οπλισμένη μόνο με τέσσερις διαμήκεις ράβδους διαμέτρου 29mm. (**Σχήμα 4.8**) Το μέτρο ελαστικότητας (E_s), το όριο διαρροής (f_y) και η οριακή αντοχή (f_u) του οπλισμού είναι 200 GPa, 555 MPa και 958 MPa αντίστοιχα, με θλιπτική αντοχή κυλίνδρου σκυροδέματος (f_c) να ισούται με 22.5 MPa,

ενώ η εφελκυστική αντοχή (f_{ct}) λαμβάνεται ίση με 2 MPa και 5 MPa ώστε να διερευνηθεί η επιρροή της.

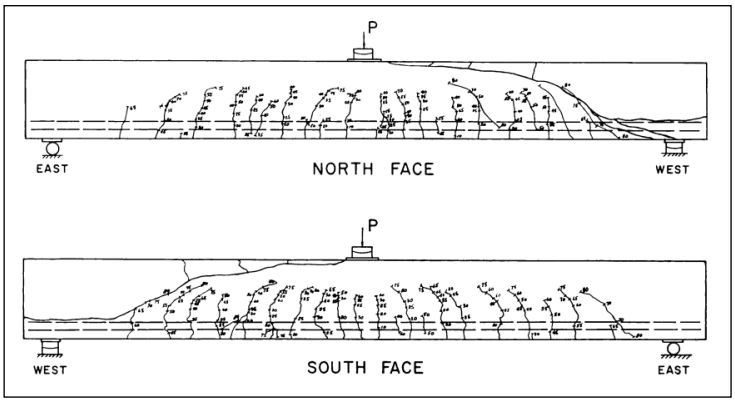


Σχήμα 4.8. Γεωμετρία και οπλισμοί ψαθυρής δοκου

Πειραματικά η δοκός βρέθηκε να αστοχεί ψαθυρά σε φορτίο περίπου 334 kN με αντίστοιχη μετατόπιση στο μέσον ίση με 6.6 mm. Η ρηγμάτωση συνέβη όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.10**. Η προσομοίωση της δοκού και η επιβολή των φορτίων έγινε όμοια με την περίπτωση της πλάστιμης δοκού (μέσω πλακών) αλλά η διακριτοποίηση έγινε με στοιχεία ακμής 3.1 cm. (**Σχήμα 4.9**).



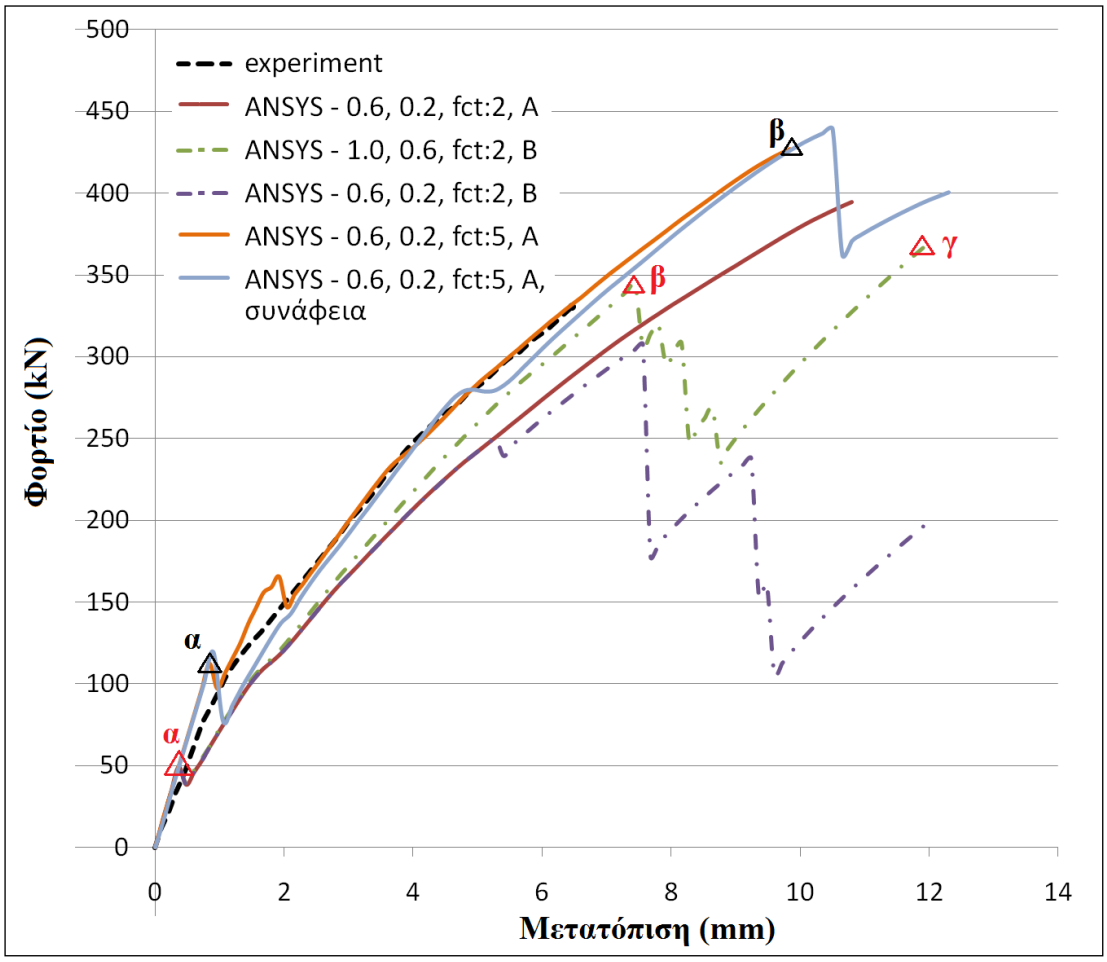
Σχήμα 4.9. Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων



Σχήμα 4.10. Πειραματική εικόνα ρηγμάτωσης δοκού κατά την αστοχία

4.3.2. Αποτελέσματα

Στο **Σχήμα 4.11**, με τη μορφή καμπύλων φορτίου - μετατόπισης στο μέσον του ανοίγματος, παρατίθενται τα αποτελέσματα των αναλύσεων του ANSYS μαζί με τα πειραματικά αποτελέσματα.

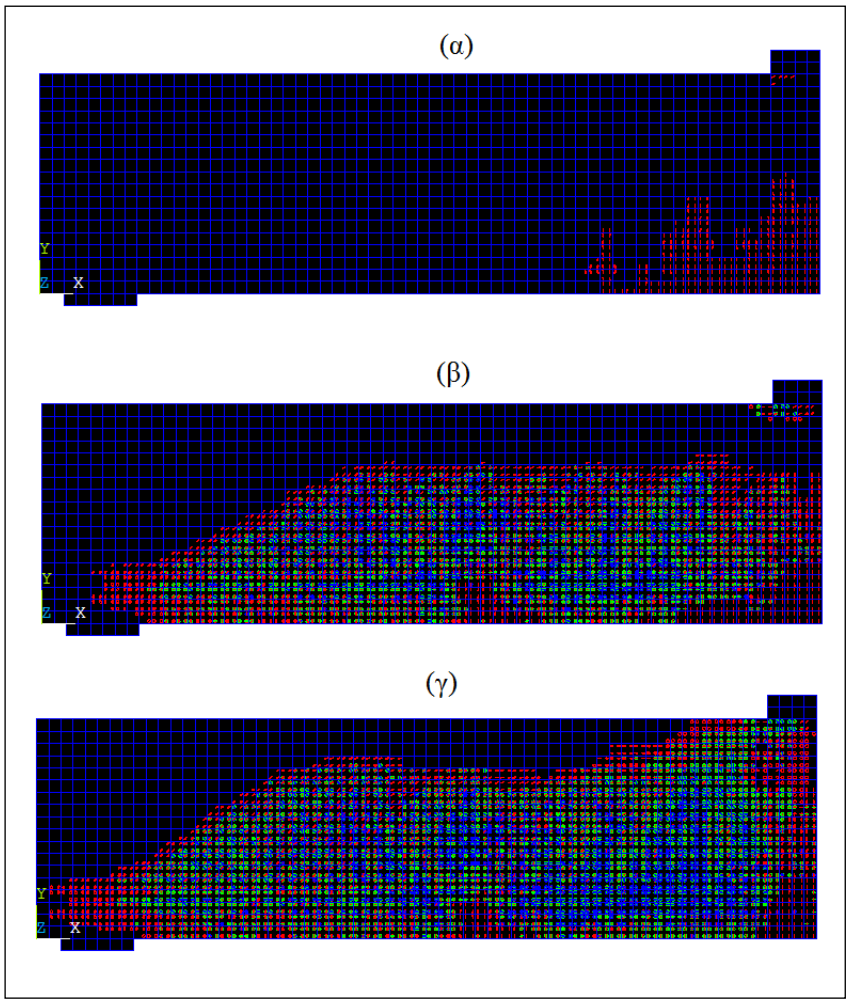


Σχήμα 4.11. Σύγκριση καμπύλων φορτίου - μετατόπισης από το πείραμα και από το ANSYS

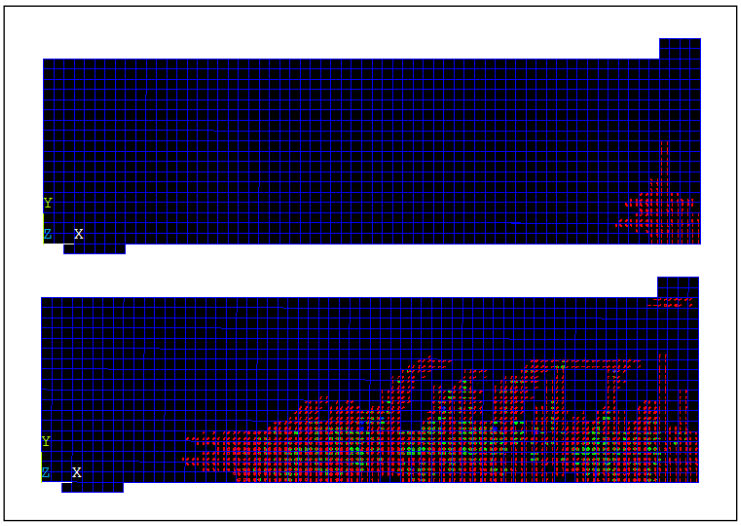
Σχετικά με την επιρροή των δύο διαφορετικών καμπυλών τάσεως - παραμορφώσεως για το σκυρόδεμα, Α και Β, στην παρούσα ανάλυση της ψαθυρής δοκού, φαίνεται πως η καμπύλη Β (χωρίς φθιτό κλάδο) προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική συμπεριφορά της δοκού σε επίπεδο διατμητικής αστοχίας η οποία στο **Σχήμα 4.11** εμφανίζεται ως κατακόρυφη πτώση της φέρουσας ικανότητας. Αντίθετα η καμπύλη Α φαίνεται να υπερεκτιμά σημαντικά την αντοχή της δοκού. Παρ' όλα αυτά όμως, η ανάλυση με την καμπύλη Β, αποτυγχάνει να προβλέψει σωστά τη συμπεριφορά της δοκού μετά την απώλεια της φέρουσας ικανότητας (πλήρης απώλεια αντοχής - κατάρρευση λόγω ψαθυρής αστοχίας)

καθώς η δοκός φαίνεται να επανακτά σε κάποιο βαθμό (ανάλογα και με την επιλογή συντελεστών μεταφοράς τέμνουσας) την αντοχή της, προσδίδοντας της επιπλέον πλαστιμότητα. Πιθανόν η συμπεριφορά αυτή του ANSYS οφείλεται από τη μια στη κράτυνση του χάλυβα αλλά κυρίως στο συντελεστή μεταφοράς τέμνουσας στην ανοικτή ρωγμή. Μικρότερες ακόμα τιμές του β_t θα αποτύπωναν πιο σωστά την ψαθυρή συμπεριφορά. Εντούτοις τα αποτελέσματα μετά την αναφερόμενη ως "διατμητική αστοχία" (έντονη πτώση της καμπύλης) είναι μη αξιόπιστα. Αντίθετα, η ανάλυση με την καμπύλη Α, ενώ όπως αναφέρθηκε υπερεκτιμά τη φέρουσα ικανότητα, προσεγγίζει καλύτερα την ψαθυρή συμπεριφορά εμφανίζοντας αστάθεια και μη-σύγκλιση μετά την επίτευξη της μέγιστης αντίστασης. Τέλος, η επιρροή των συντελεστών μεταφοράς τέμνουσας στη διεπιφάνεια της ρωγμής, πέραν από μια πτώση της δυσκαμψίας για μικρότερες τιμές τους, φαίνεται να είναι αμελητέα για την πριν την αστοχία κατάσταση. Όσον αφορά την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, στη συγκεκριμένη περίπτωση, η τιμή f_{ct} = 5 MPa που αντιστοιχεί στην αντοχή σε εφελκυσμό υπό κάμψη προσεγγίζει πολύ καλύτερα την πειραματική συμπεριφορά απ' ότι η χρήση της τιμής f_{ct} = 2 MPa της μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.11**, η καμπύλη για f_{ct} = 5 MPa βρίσκεται σχεδόν σε πλήρη ταύτιση με την πειραματική καμπύλη, χωρίς παρ' όλα αυτά να καταφέρνει και πάλι να προβλέψει σωστά τη φέρουσα ικανότητα. Η προσθήκη στοιχείων συνάφειας δεν φαίνεται να επηρεάζει γενικά τη συμπεριφορά της δοκού προ της αστοχίας.

Οι εικόνες ρηγμάτωσης της δοκού για διάφορες φάσεις: πρώτη ρηγμάτωση (σημείο (α)), διατμητική αστοχία (σημείο (β)), κατάρρευση (σημείο (γ)) και για τις δύο τιμές εφελκυστικής αντοχής φαίνονται στα **Σχήμα 4.12**, **Σχήμα 4.13** και σημειώνονται στο **Σχήμα 4.11**. Η ρηγμάτωση όπως προβλέπεται από το ANSYS για f_{ct} = 2 MPa και καμπύλη Β, βρίσκεται σε καλή συμφωνία με όσα παρατηρήθηκαν πειραματικά, πρέπει να σημειωθεί όμως πως η αντίστοιχη εικόνα ρηγμάτωσης δεν ταυτίζεται πλήρως με την πειραματική συμπεριφορά της δοκού σε επίπεδο καμπύλης φορτίου - μετατόπισης. Ενώ η εικόνα (β) και (γ) θα έπρεπε να συμβαίνουν πολύ κοντά και μάλιστα τη στιγμή όπου αστοχεί η δοκός ψαθυρά, η εικόνα (γ) συμβαίνει αργότερα στο σημείο (γ).. Για f_{ct} = 5 MPa και καμπύλη Α, παρ' ότι η προσέγγιση της πειραματικής καμπύλης είναι καλύτερη, η πρόβλεψη της ρηγμάτωσης είναι μάλλον χειρότερη καθώς αποτυγχάνει να απεικονίσει τη διατμητική ρωγμή που ξεκινά από το σημείο επιβολής της φόρτισης και φτάνει μέχρι το σημείο της στήριξης. Γενικά δεν έχουμε καλή συσχέτιση των σημείων της καμπύλης φορτίου - μετατόπισης με τα αντίστοιχα πειραματικά στάδια ρηγμάτωσης.



Σχήμα 4.12. Εικόνες ρηγμάτωσης ψαθυρής δοκού για f_{ct} = 2 MPa και σημεία (α), (β), (γ) όπως σημειώνονται στην καμπύλη φορτίου μετατόπισης



Σχήμα 4.13. Εικόνες ρηγμάτωσης ψαθυρής δοκού για f_{ct} = 5 MPa και σημεία (α), (β) όπως σημειώνονται στην καμπύλη φορτίου μετατόπισης (Σχήμα 4.11)

4.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικά, με βάση την παρούσα διερεύνηση, μπορούμε να πούμε πως το πρόγραμμα ANSYS είναι ικανό να προσομοιώσει με ικανοποιητική ακρίβεια στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος προβλέποντας σωστά τη φέρουσα ικανότητα, τη διαθέσιμη πλαστιμότητα, τον τρόπο ρηγμάτωσης και αστοχίας και το διάγραμμα φορτίου μετατόπισης. Ειδικά όσον αφορά μέλη με πλάστιμη συμπεριφορά η αριθμητική προσέγγιση είναι πολύ καλή. Η εισαγωγή στοιχείων συνάφειας στην ανάλυση έγινε επίσης με επιτυχία. Η επιλογή των τιμών για την καμπύλη τάσεως συνάφειας - ολίσθησης θα πρέπει να γίνεται με προσοχή και να όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματική συμπεριφορά, καθώς η ύπαρξη στοιχείων συνάφειας επηρεάζει γενικά και τη δυσκαμψία και τη φέρουσα ικανότητα. Η επιλογή συντελεστών μεταφοράς διατμητικών τάσεων σε ανοικτή και κλειστή ρωγμή δεν φαίνεται να επηρεάζει ιδιαίτερα τα αποτελέσματα των μονοτονικών αναλύσεων. Παρ' όλα αυτά για μια ανακυκλιζόμενη ανάλυση προτείνονται καλύτερα υψηλές τιμές, ιδίως για το συντελεστή βc.

Τέλος, σε στοιχεία με ψαθυρή συμπεριφορά, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων καθώς υπάρχει η τάση να υπερεκτιμάται σημαντικά η φέρουσα ικανότητα. Παρατηρήθηκε επίσης πως τιμές εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος κοντά στην καμπτική εφελκυστική αντοχή δίνουν πιο καλά αποτελέσματα για την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης, απ' ότι τιμές για μονοαξονική εφελκυστική αντοχή. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει και για την πρόβλεψη της κατανομής των ρωγμών. Όσον αφορά τη σύγκριση των καμπύλων σκυροδέματος Α, Β, μπορούμε να πούμε γενικά πως η καμπύλη τύπου Α είναι πιο κατάλληλη για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος ακόμα και σε ψαθυρά προβλήματα. Βέβαια, η διερεύνηση αυτών των καμπύλων έχει μεγαλύτερη αξία σε απλούστερα, μονοτονικά προβλήματα όπως αυτά των δοκών. Είναι πιθανόν σε ανακυκλιζόμενα προβλήματα να χρειασθεί η υιοθέτηση καμπύλης σκυροδέματος με τελείως πλαστικό κλάδο μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής για λόγους ισορροπίας της αριθμητικής επίλυσης (η πιθανότητα αυτή θα διερευνηθεί σε επόμενο Κεφάλαιο). Αξίζει τέλος να σημειωθεί, πως η ανάλυση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με το πρόγραμμα ANSYS φάνηκε να είναι ευαίσθητη σε αρκετές παραμέτρους, μεταξύ των οποίων και αυτές που εξετάστηκαν παραπάνω, ενώ η μεταβολή τους μπορεί να δώσει σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα, απαιτείται εντούτοις παραμετρική διερεύνηση και σύγκριση με αξιόπιστα πειραματικά αποτελέσματα πριν γίνουν δεκτά οποιαδήποτε αποτελέσματα.

5. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΟΜΒΩΝ

5.1. ΓΕΝΙΚΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για την αναλυτική διερεύνηση της συμπεριφοράς των κόμβων δοκού - υποστυλώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε το γενικό λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Η προσομοίωση και η ανάλυση έγινε σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 με χρήση μη-γραμμικών, χωρικών, ΠΣ. Αρχικά προσομοιώθηκαν, δύο μοντέλα κόμβων, που αναφέρονται από εδώ και στο εξής ως μοντέλα Α1 και Α2. Τα Α1 και Α2 έχουν πανομοιότυπα χαρακτηριστικά ως προς την όπλιση και τη γεωμετρία, ενώ διαφέρουν μόνο ως προς τις συνοριακές συνθήκες, ώστε το Α1 να αντιστοιχεί στην καταπόνηση ενός τυπικού εσωτερικού κόμβου και το Α2 στην καταπόνηση ενός εξωτερικού κόμβου. Επιπλέον, τα μοντέλα Α1 και Α2, προσομοιώνουν πραγματικά πειραματικά δοκίμια (αναφερόμενα ως δοκίμια Α1 και Α2) που εξετάστηκαν από τους Shiohara και Kusuhara (2006) στα πλαίσια πειραματικού προγράμματος για τη μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς κόμβων δοκού - υποστυλώματος και για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία. Αυτό έχει σαν σκοπό τη σύγκριση των αναλυτικών με τα πειραματικά αποτελέσματα για τα δύο αυτά προσομοιώματα, κάτι που θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο, ώστε να διαπιστωθεί η αξιοπιστία των προσομοιωμάτων στην πρόβλεψητης αντοχής, της δυσκαμψίας, της κατανομής των ρωγμών ρηγμάτωση, της πλαστιμότητας και της μορφής της αστοχίας των κόμβων. Μετά απο τεκμηρίωση της αξιοπιστίας της προσομοίωσης, διενεργήθηκε περεταίρω παραμετρική διερεύνηση της συμπεριφοράς των κόμβων αυτών, ως προς την επιρροή παραγόντων για τους οποίους δεν διαθέτουμε πειραματικά στοιχεία, όπως ο αριθμός κλειστών συνδετήρων στο σώμα του κόμβου, η ύπαρξη εγκάρσιας περίσφιξης και άλλα. Η αναλυτική περιγραφή του πειράματος των Shiohara και Kusuhara (2006), με παρουσίαση της πειραματικής διάταξης, της γεωμετρίας και όπλισης των δοκιμίων, των υλικών και του τρόπου φόρτισης γίνεται στο Κεφ. 5.2. Περιγραφή του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του λογισμικού ANSYS, για τα δύο δοκίμια γίνεται στο Κεφ. 5.3. Στο Παράρτημα Α, παρατίθεται ο έλεγχος των δύο δοκιμίων κόμβων Α1 και Α2 σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 και τον ACI 318 ώστε να υπάρξει σύγκριση μεταξύ των διατάξεων των Κανονισμών και των αποτελεσμάτων από την ανάλυση.

5.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

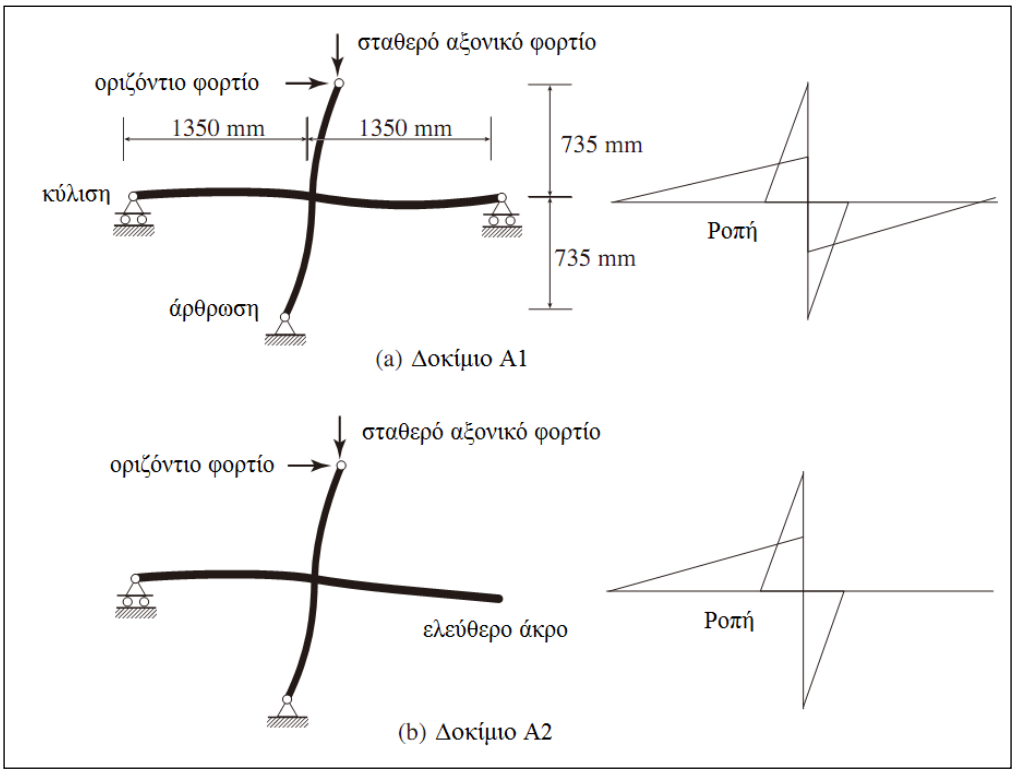
Οι Shiohara και Kusuhara (2006), δημοσίευσαν τα αποτελέσματα ενός πειραματικού προγράμματος που διεξήχθη στο Πανεπιστήμιο του Τόκυο με αντικείμενο τη διερεύνηση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς κόμβων δοκού υποστυλώματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Ο βασικός σκοπός του πειράματος αυτού ήταν η παροχή δεδομένων σε ερευνητές και μηχανικούς για τον έλεγχο και τη βαθμονόμηση μαθηματικών μοντέλων κόμβων, κυρίως μη-γραμμικών μοντέλων ΠΣ καθώς και υπερ-στοιχείων (macro elements).

Δοκιμάστηκαν Έξι δοκίμια κόμβων, κλίμακας 1/2 της πραγματικής, με εφαρμογή διαφόρων συνοριακών συνθηκών, έως την αστοχία, με εφαρμογή ελεγχόμενης μετατόπισης υπό ψευδο-στατική, ανακυκλιζόμενη φόρτιση και σταθερό αξονικό φορτίο. Το πειραματικό πρόγραμμα αποτελείται από τρείς σειρές δοκιμίων A, B, C. Στην παρούσα εργασία μόνο τα δοκίμια 1 και 2 της σειράς A εξετάστηκαν.

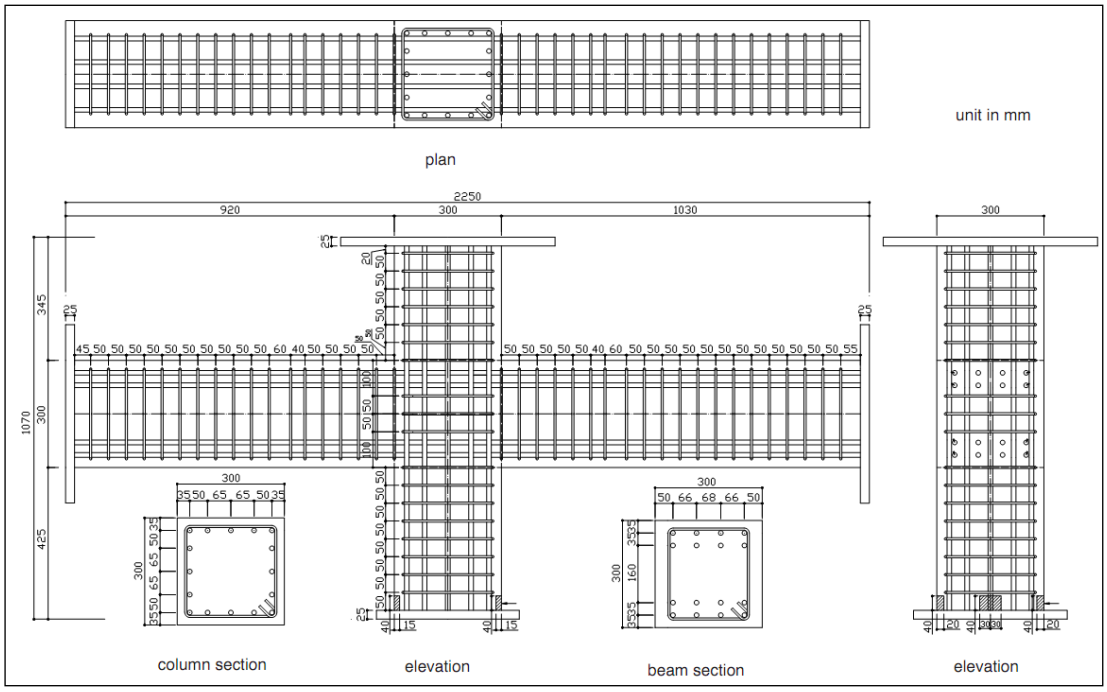
Κατά το πείραμα, διερευνήθηκαν (α) η συνολική συμπεριφορά του δοκιμίου σε επίπεδο αντοχής, δυσκαμψίας, τρόπου και αλληλουχίας αστοχίας, (β) η συμπεριφορά μεμονωμένα των δοκών και των υποστυλωμάτων, (γ) η συμπεριφορά του κόμβου καθ' αυτού, (δ) οι τοπικές τάσεις και παραμορφώσεις στους διαμήκεις οπλισμούς δοκών και υποστυλωμάτων καθώς και στους εγκάρσιους οπλισμούς που βρίσκονται εντός του κόμβου.

5.2.1. Γεωμετρία δοκιμίων, φόρτιση και οπλισμοί

Τα δοκίμια αποτελούσαν επίπεδα στοιχεία κόμβου δοκού υποστυλώματος χωρίς εγκάρσιες δοκούς ή πλάκα, θεωρητικά αποκομμένα από κάποιο πλαίσιο στα σημεία μηδενισμού των ροπών στις δοκούς και τα υποστυλώματα στο μέσον του ανοίγματος τους (ύψους). Οι διατομές των δοκών και των υποστυλωμάτων ήταν ίδιες και ίσες με 300 x 300 mm. Το καθαρό ύψος των υποστυλωμάτων έως το σημείο μηδενισμού των ροπών ήταν 575 mm ενώ το καθαρό μήκος των δοκών 1200 mm. Οι συνοριακές συνθήκες και ο τύπος της φόρτισης των δοκιμίων φαίνεται στο **Σχήμα 5.1**. Ο τρόπος φόρτισης του δοκιμίου A1 προσομοιώνε τις συνθήκες ενός εσωτερικού κόμβου, ενώ η φόρτιση του A2 αυτή ενός εξωτερικού κόμβου χωρίς όμως να λαμβάνεται υπόψη με ακρίβεια ρεαλιστικά η αγκύρωση του διαμήκους οπλισμού της δοκού. Στα δοκίμια ασκείτο σταθερό αξονικό φορτίο ίσο με 216 kN (~0.085 $A_c f_c$).



Σχήμα 5.1. Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση των δοκιμίων A1 και A2



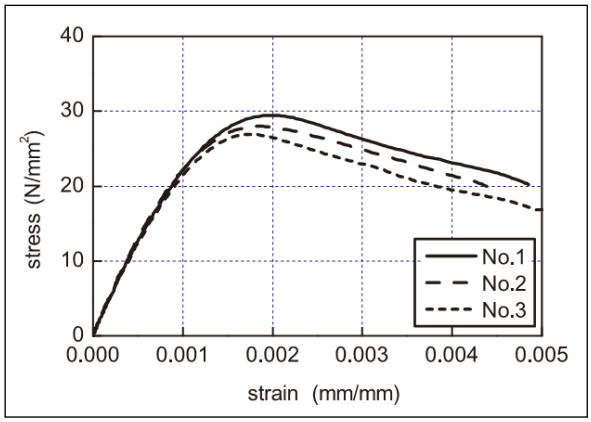
Σχήμα 5.2. Λεπτομέρειες όπλισης των δοκιμίων A1 και A2

Οι λεπτομέρειες όπλισης των δοκιμίων φαίνονται στο **Σχήμα 5.2**. Ο διαμήκης οπλισμός των δοκών αποτελείται από 8 ράβδους διατομής 127 mm^2, συμμετρικός πάνω και

κάτω, τοποθετημένος σε δύο στρώσεις. Ο διαμήκης οπλισμός των υποστυλωμάτων αποτελείται από 18 ράβδους διατομής 127 mm^2, ομοιόμορφα κατανεμημένες περιμετρικά. Ο εγκάρσιος οπλισμός είναι ίδιος τόσο στις δοκούς όσο και στα υποστυλώματα, έχει διατομή 32 mm^2 και τοποθετείται ανά 50 mm. Εντός του κόμβου τοποθετούνται τρείς τέτοιοι συνδετήρες.

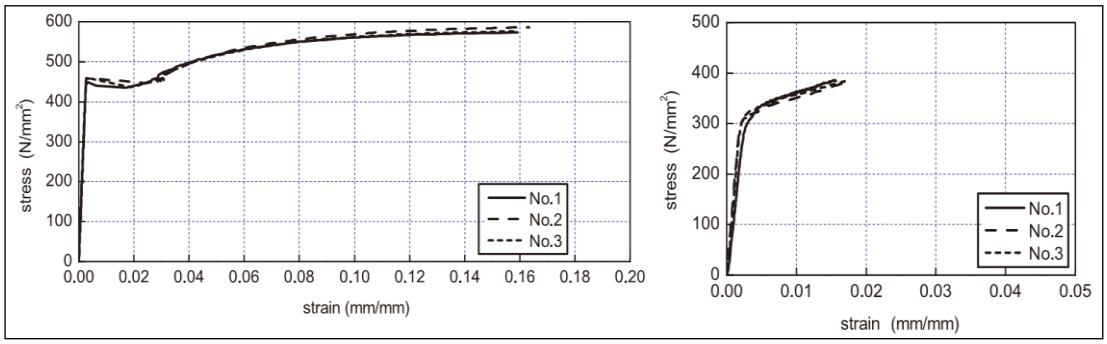
5.2.2. Μηχανικές ιδιότητες των υλικών

Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε είχε μέση θλιπτική αντοχή 28.3 MPa και εφελκυστική αντοχή 2.67 MPa ενώ το μέτρο ελαστικότητας ήταν 25.9 GPa. Η μέγιστη διάσταση αδρανούς ήταν 13mm. Η παραμόρφωση στη μέγιστη θλιπτική αντοχή εκτιμήθηκε ίση με ε_c = 0.00187. Η καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων του σκυροδέματος όπως προέκυψε από δοκιμές φαίνεται στο **Σχήμα 5.3**.



Σχήμα 5.3. Καμπύλη τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων σκυροδέματος

Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα οπλισμού φαίνονται παρακάτω (**Πίνακας 5.1)** ενώ οι καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων για το διαμήκη και τον εγκάρσιο οπλισμό φαίνονται στο **Σχήμα 5.4**.



Σχήμα 5.4. Καμπύλες τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων για το διαμήκη και τον εγκάρσιο οπλισμό

		Τύπος ράβδου	Ποιότητα χάλυβα	Διατομή ράβδου mm²
Διαμήκης οπλισμός	δοκός	D13	SD390	127
	υποστύλωμα		SD345	
Εγκάρσιος οπλισμός	δοκός	D6	SD295	32
	υποστύλωμα			
	κόμβος			

		Young's Modulus in GPa	Τάση διαρροής MPa	Παραμόρφωση στη διαρροή mm/mm	Οριακή αντοχή MPa	Παραμόρφωση στην οριακή αντοχή mm/mm
Διαμήκης οπλισμός	δοκός	176.0	456	0.00284	582	0.0101
	υποστύλωμα	176.3	357	0.00213	493	0.0126
Εγκάρσιος οπλισμός	δοκός	151.3	326	N/A	488	0.0109
	υποστύλωμα					
	κόμβος					

Πίνακας 5.1. Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα

5.2.3. Αντοχές των στοιχείων

Τα δοκίμια σχεδιάσθηκαν έτσι ώστε η μέγιστη καμπτική αντοχή του υποστυλώματος να είναι 25% μεγαλύτερη από αυτή της δοκού. Για τον τύπο φόρτισης του δοκιμίου Α1 καμιά πρώιμη αστοχία δεν συμβαίνει, πέραν από τη διαρροή του διαμήκους οπλισμού των δοκών.

Για το δοκίμιο Α1, η μέγιστη διατμητική απαίτηση του κόμβου ώστε οι δοκοί να πετύχουν την καμπτική τους αντοχή, εκτιμάται περίπου 10% μεγαλύτερη της αντοχής του κόμβου (σύμφωνα με τον Ιαπωνικό Κανονισμό AIJ, 1999).

Τα στοιχεία για την καμπτική και διατμητική αντοχή δοκών και υποστυλωμάτων καθώς και για τη διατμητική αντοχή του κόμβου φαίνονται παρακάτω (**Πίνακας 5.2)**.

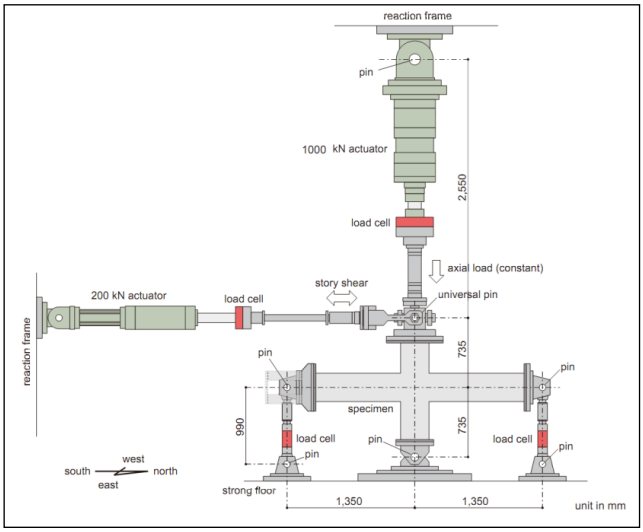
name of specimen		A1	A2
ροπή ρηγμάτωσης kN• m M_c	beam	14.9	
	column	26.2	26.2
ροπή διαρροής kN•m M_y	beam	89.5	
	column	99.3	99.3
ροπή αντοχής kN•m M_u	beam	97.8	
	column	112.6	112.6
άθροισμα ροπών Σ M'_y in kN•m	beam	196	98
	column	235	
άθροισμα ροπών Σ M'_u in kN•m	beam	214	107
	column	267	
Σ M'_y (column) / Σ M'_y(beam)		1.20	2.40
Σ M'_u (column) / Σ M'_u(beam)		1.25	2.50

Name of Specimen		A1	A2
Διατμητική αντοχή kN V_u	beam	152	
	column	223	
Τέμνουσα στην καμπτική αντοχή kN V_{mu}	beam	82	
	column	167	84
V_u /V_{mu}	beam	1.85	
	column	1.34	2.65
Τέμνουσα κόμβου κατά τη ρηγματωση του kN		315	N/A
Τέμνουσα κόμβου για την ανάπτυξη της αντοχής των δοκών kN V_{ju}		662	331
Μέγιστη διατμητική αντοχή κόμβου kN V_j		635	445
V_j /V_{ju}		0.96	1.34

Πίνακας 5.2. Καμπτική και διατμητική αντοχή στοιχείων

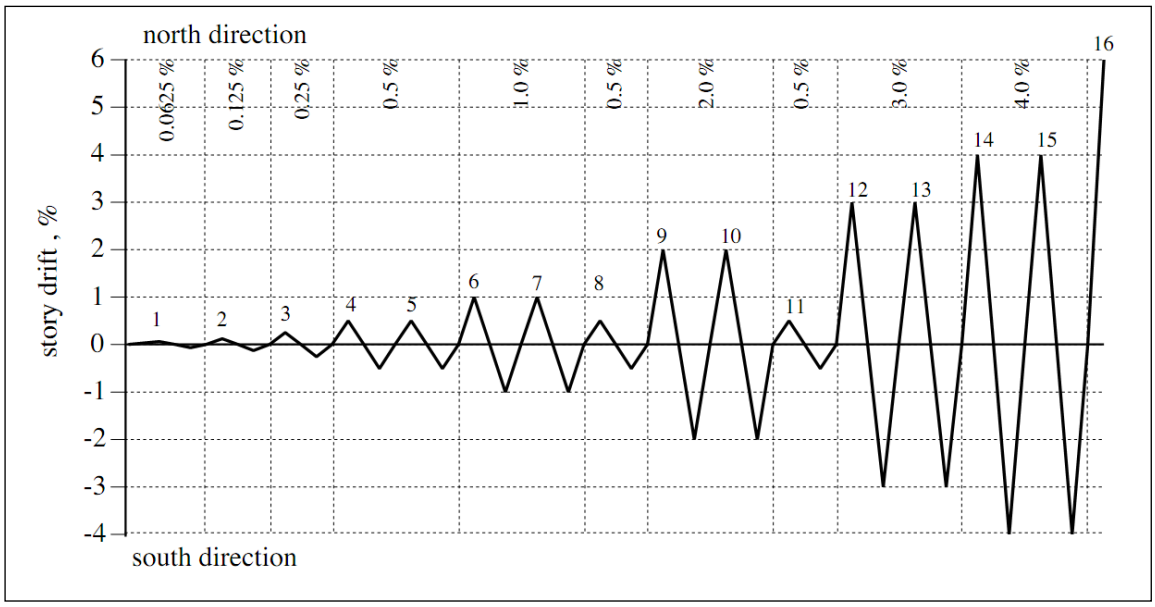
5.2.4. Πειραματική διάταξη και ιστορία της φόρτισης

Η πειραματική διάταξη για τον έλεγχο των δοκιμίων φαίνεται στο **Σχήμα 5.5**. Η συνδεσμολογία του σχήματος αφορά τις συνοριακές συνθήκες ενός εσωτερικού κόμβου.



Σχήμα 5.5. Πειραματική διάταξη για τον έλεγχο των δοκιμίων

Η χρονοϊστορία της φόρτισης (**Σχήμα 5.6**) είναι τέτοια ώστε να προσομοιωθούν οι κύκλοι φόρτισης που θα συνέβαιναν σε έναν ισχυρό σεισμό. Η επιβαλλόμενη μετακίνηση εκφράζεται σε όρους σχετικής μετάθεσης ορόφου % (storey drift), όπου storey drift = d_{top}/h, όπως περιγράφηκε και στη σχέση (2.39).



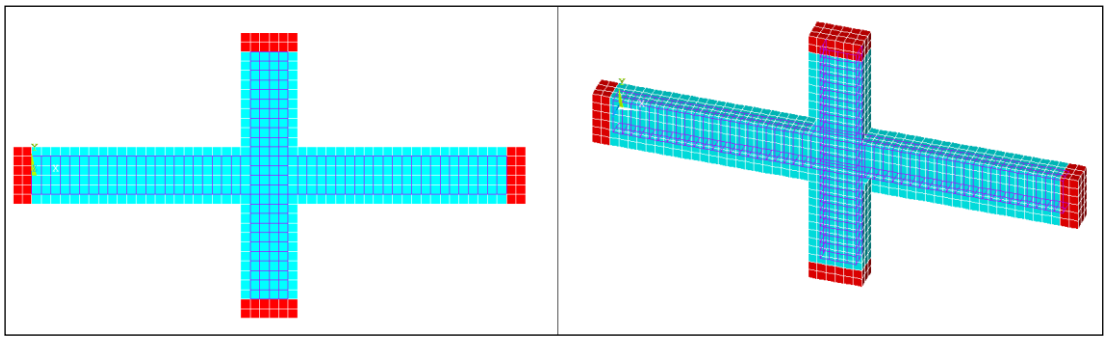
Σχήμα 5.6. Χρονοϊστορία επιβολής της φόρτισης

5.3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

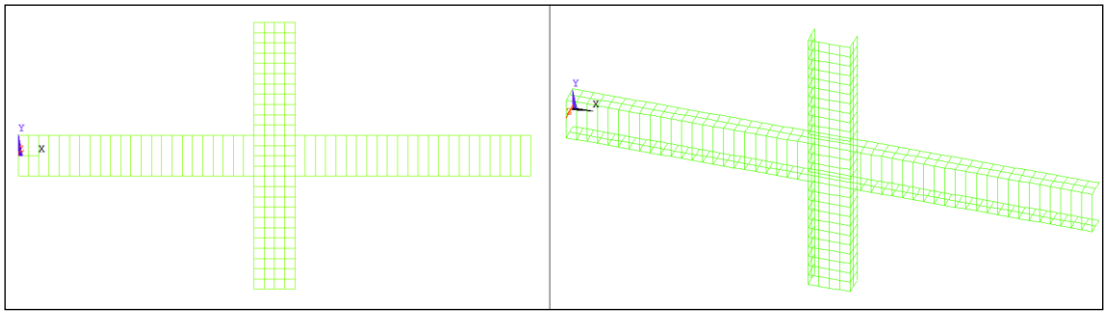
5.3.1. Διακριτοποίηση των δοκιμίων

Σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3, τα δοκίμια διακριτοποιούνται με τη χρήση τεσσάρων διαφορετικών τύπων ΠΣ. Το στοιχείο SOLID65 για το σκυρόδεμα, το στοιχείο LINK180 για τον οπλισμό, το στοιχείο COMBIN39 για την προσομοίωση της συνάφειας χάλυβα - σκυροδέματος και, τέλος, το στοιχείο SOLID185 για την επιβολή των συνοριακών συνθηκών και φορτίων. Καθώς τα δοκίμια Α1 και Α2, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, διαφέρουν μόνο ως προς τις συνοριακές συνθήκες, δεν υφίσταται κάποια διαφορά στον τρόπο διακριτοποίησης τους. Να σημειωθεί επίσης, πως για τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου που απαιτούσε η ανάλυση, προσομοιώθηκε μόνο ο μισός κόμβος, με χρήση της συμμετρίας εγκάρσια στο δοκίμιο. Ο συνολικός αριθμός των βαθμών ελευθερίας του προσομοιώματος ανέρχεται σε 9767.

Το προσομοίωμα συνολικά του κόμβου καθώς και η διακριτοποιήση των οπλισμών παρουσιάζονται παρακάτω (**Σχήμα 5.7** και **Σχήμα 5.8**). Όλα τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται έχουν διάσταση 0.05 m.



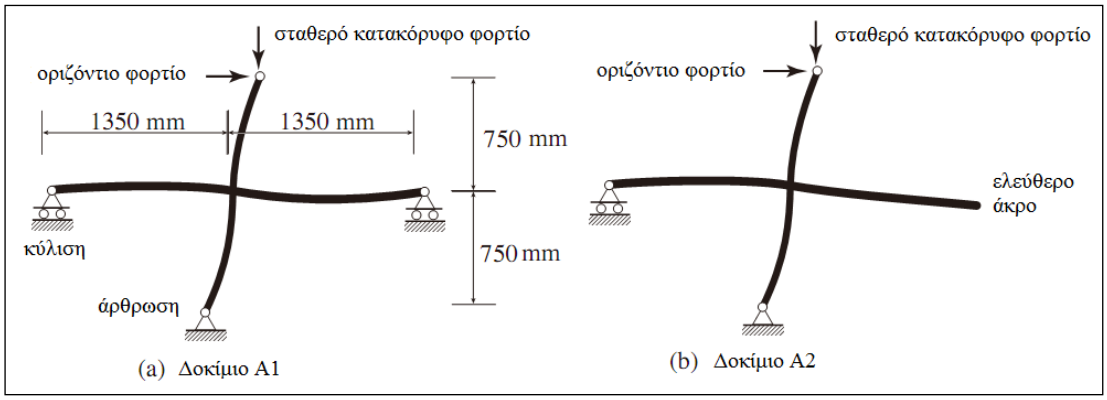
Σχήμα 5.7. Προσομομοίωμα κόμβου με πεπερασμένα στοιχεία



Σχήμα 5.8. Διακριτοποίηση των οπλισμών με στοιχεία LINK 180

5.3.2. Γεωμετρία και διατομές στοιχείων προσομοιώματος

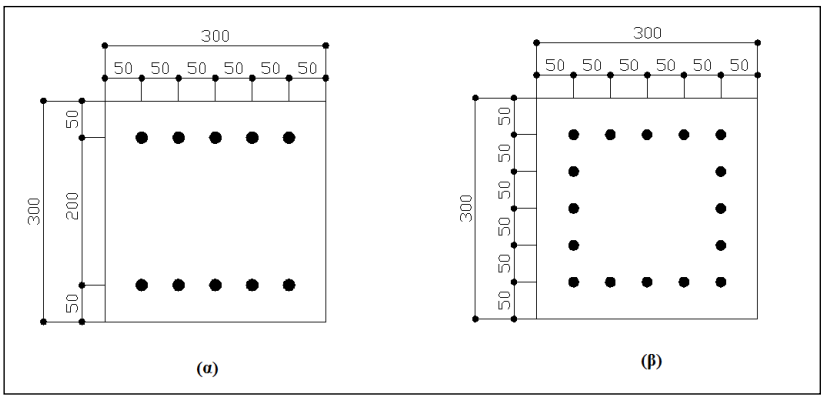
Η γεωμετρία του προσομοιώματος που υιοθετήθηκε για την ανάλυση φαίνεται στο **Σχήμα 5.9** και είναι πανομοιότυπη με αυτή των πειραματικών δοκιμίων (Κεφ. 5.2), με μόνη διαφορά το ύψος του υποστυλώματος που εδώ είναι 750 mm και όχι 735 mm για λόγους διακριτοποίησης.



Σχήμα 5.9. Γεωμετρία του προσομοιώματος A1 και A2

Στο **Σχήμα 5.10** φαίνεται η γεωμετρία των διατομών: (α) δοκού και (β) υποστυλώματος με τη θέση των ράβδων οπλισμού όπως υιοθετήθηκαν για την ανάλυση. Για

λόγους απλοποίησης, στη δοκό τοποθετήθηκε μία στάθμη οπλισμού, αντίθετα από τα πειραματικά δοκίμια (Κεφ. 5.2), ενώ λόγω της ελάχιστης διάστασης των ΠΣ ίσης με 50 mm αυξήθηκε αντίστοιχα και η επικάλυψη των ράβδων ενώ τροποποιήθηκαν οι αποστάσεις τους. Αυτές οι διαφορές λήφθηκαν υπόψη στην επιλογή του εμβαδού για τις ράβδους του οπλισμού, ώστε να μην επηρεαστούν οι αντοχές των στοιχείων, όπως θα αναφερθεί παρακάτω.



Σχήμα 5.10. Διατομή (α) δοκού και (β) υποστυλώματος για την ανάλυση

5.3.3. Ιδιότητες υλικών και παράμετροι για την ανάλυση

5.3.3.1. Σκυρόδεμα

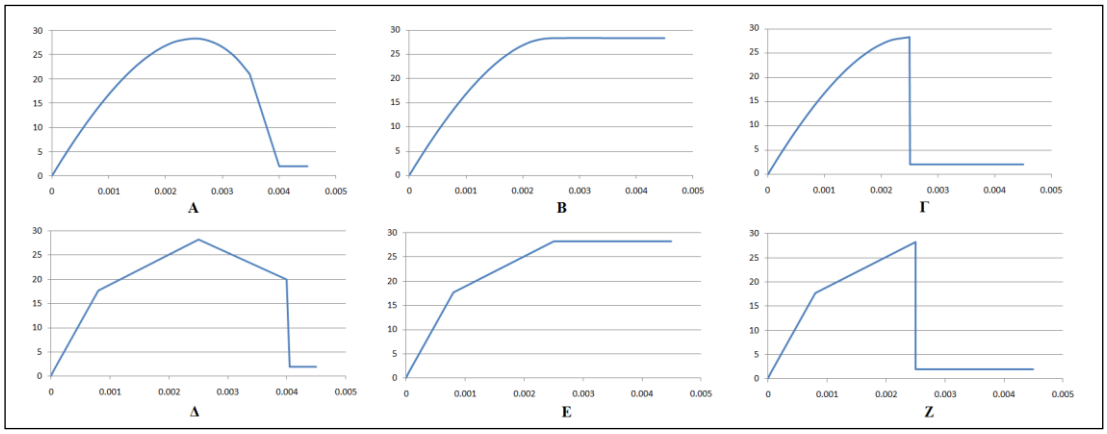
Για την προσομοίωση του σκυροδέματος, αποδείχθηκε απαραίτητη η διερεύνηση διαφόρων παραμέτρων που εισάγονται στην ανάλυση, όπως περιγράφηκε και στο Κεφάλαιο 4, καθώς η αριθμητική σύγκλιση κατά την επίλυση αποδείχθηκε ιδιαίτερα ευαίσθητη στη μεταβολή των τιμών των παραμέτρων αυτών.

Τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος που υιοθετήθηκαν από το πείραμα και διατηρήθηκαν σταθερά ήταν: η μονοαξονική θλιπτική αντοχή, ίση με 28.3 MPa, η μονοαξονική εφελκυστική αντοχή ίση με 2.67 MPa και το Μέτρο ελαστικότητας ίσο με 25.9 GPa. Το Μέτρο Poisson λαμβάνεται ίσο με 0.2. Επιπλέον, για την περιγραφή της θλιπτικής συμπεριφοράς του υλικού υπό ανακυκλιζόμενες δράσεις, μαζί με την επιλογή Concrete που διαθέτει το ANSYS και ελέγχει τη ρηγμάτωση, υιοθετήθηκε και το μοντέλο πλαστιμότητας Multilinear Kinematic Hardening.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα λοιπά χαρακτηριστικά του υλικού που προέκυψαν ως καταλληλότερα για την ανάλυση μέσα από διερευνητικές επιλύσεις:

i. Σχέση τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων σκυροδέματος

(α) Μορφή της καμπύλης



Σχήμα 5.11. Διαφορετικές καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος για την ανάλυση

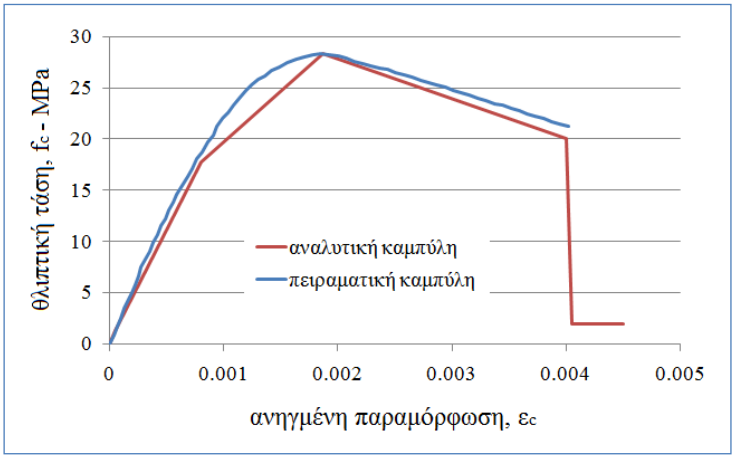
Κατά την ανάλυση διερευνήθηκαν οι παραπάνω μορφές για την καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων του σκυροδέματος σε θλίψη. Οι καμπύλες Α - Γ ακολουθούν μια μη-γραμμική σχέση τάσεων - παραμορφώσεων όπως αυτή που προτείνεται στον Ευρωκώδικα 2. Οι καμπύλες Δ - Ζ ακολουθούν μια απλούστερη πολύ - γραμμική συμπεριφορά. Για τις καμπύλες Α και Δ υιοθετείται φθιτός κλάδος μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής, για τις Β και Ε υιοθετείται τελείως πλαστικός κλάδος ενώ οι Γ και Ζ έχουν απολύτως ψαθυρή συμπεριφορά. Αποδείχθηκε πως από τη μορφή της καμπύλης του υλικού, προέκυπταν τόσο προβλήματα αριθμητικής σύγκλισης, όσο και προβλήματα στη διατύπωση των στοιχείων για μεγάλες τιμές συνολικής παραμόρφωσης (του στοιχείου). Συγκεκριμένα, οι μη-γραμμικές καμπύλες Α - Γ, σε συνδυασμό με το μοντέλο πλαστιμότητας Multilinear Kinematic Hardening εμφάνιζαν τα παραπάνω προβλήματα πολύ νωρίς στην ανάλυση, ανεξαρτήτως μορφής κλάδου μετά την επίτευξη της αντοχής και, έτσι, η εφαρμογή τους εγκαταλήφθηκε. Από τις καμπύλες Δ - Ζ, οι Δ και Ζ είχαν γενικά την καλύτερη συμπεριφορά κατά την ανάλυση και δεν παρουσίαζαν προβλήματα, αν και η καμπύλη Ζ λόγω της απουσίας φθιτού κλάδου προσέδιδε πιο ασταθή συμπεριφορά στο δοκίμιο, στις περιπτώσεις ανάπτυξης υψηλών τάσεων στο σκυρόδεμα (κόμβος Α1). Τελικώς, με βάση τα παραπάνω και για την παρούσα ανάλυση, υιοθετήθηκε η καμπύλη τύπου Δ. Αξίζει πάντως να σημειωθεί πως: (α) η επιλογή αυτή αφορά μόνο τη συγκεκριμένη ανάλυση και δεν εκφράζει κάποια γενικότητα ως προς την προσφορότερη μορφή καμπύλης που μπορεί να υιοθετείται σε αντίστοιχα προβλήματα, (β) η μορφή της καμπύλης μετά την επίτευξη της οριακής παραμόρφωσης

εξυπηρετεί στην αποφυγή προβλημάτων αριθμητικής σύγκλισης και δεν έχει φυσική σημασία.

(β) Παραμόρφωση στη μέγιστη τάση

Πειραματικά, η (μέση) παραμόρφωση του σκυροδέματος κατά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής δίδεται ίση με ε_o= 0.001875 ενώ για την ανάλυση διερευνήθηκε και η τιμή ε_o= 0.0025 η οποία τελικά και υιοθετήθηκε για λόγους σύγκλισης.

Στο **Σχήμα 5.12** φαίνεται ενδεικτικά μια πειραματική καμπύλη για σκυρόδεμα ηλικίας 88 ημερών όπως προέκυψε από δοκιμές πριν τη διενέργεια των πειραμάτων των κόμβων, μαζί με την αντίστοιχη καμπύλη που υιοθετήθηκε για στην ανάλυση.



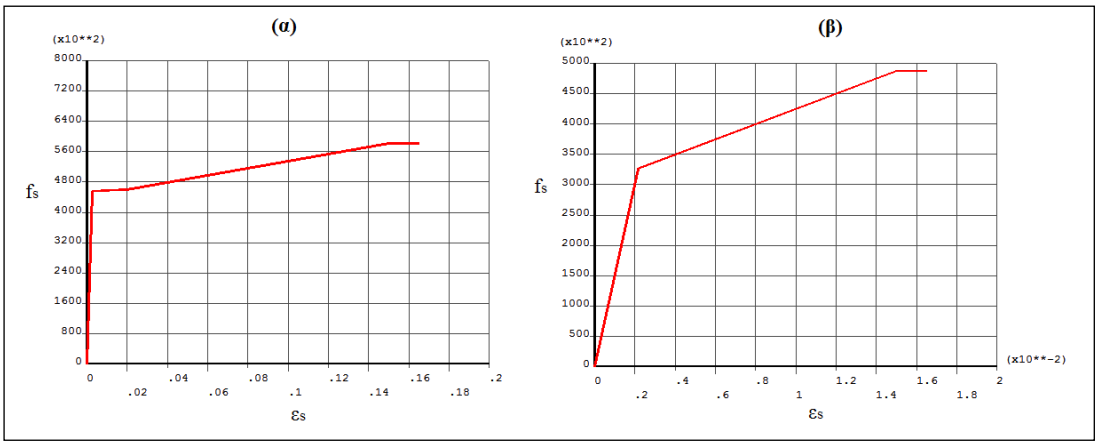
Σχήμα 5.12. Σχέση τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος για την ανάλυση

ii. Συντελεστές απομείωσης της τέμνουσας β_c, β_t

Οι τιμές για τους συντελεστές απομείωσης της τέμνουσας που μεταφέρεται στην επιφάνεια κλειστών και ανοικτών ρωγμών ελήφθησαν 0.6 και 0.2, αντίστοιχα. Μεγαλύτερες ή μικρότερες τιμές και για τους δύο συντελεστές παρατηρήθηκε πως δημιουργούσαν προβλήματα σύγκλισης.

5.3.3.2. Χάλυβας

Οι εξιδανικευμένες καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων για το χάλυβα, που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση φαίνονται στο παρακάτω σχήμα: (α) για τους διαμήκεις οπλισμούς και (β) για τους συνδετήρες. Όλα τα χαρακτηριστικά του χάλυβα: Μέτρο Ελαστικότητας, τάση διαρροής, παραμόρφωση διαρροής, τάση θραύσης, οριακή παραμόρφωση, για κάθε περίπτωση (διαμήκεις οπλισμοί δοκών, υποστυλωμάτων, συνδετήρες) είναι τα ίδια με τα πειραματικά, όπως παρουσιάστηκαν (**Πίνακας 5.1**).



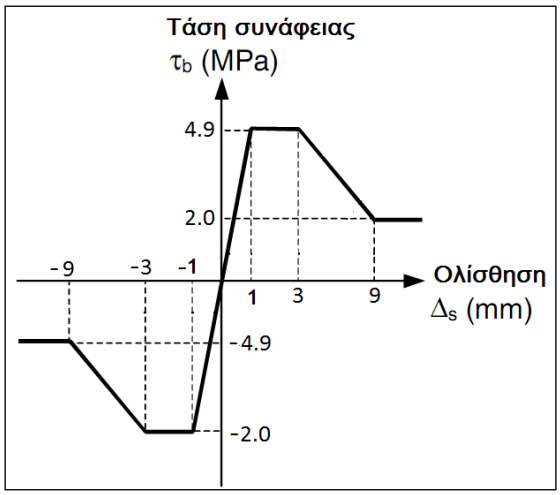
Σχήμα 5.13. Σχέση τάσεων παραμορφώσεων (α) για τους διαμήκεις και (β) για τους εγκάρσιους οπλισμούς

Ο λόγος Poisson λαμβάνεται ίσος με 0.2. Το μοντέλο υλικού που υιοθετείται είναι το μοντέλο πλαστιμότητας Multilinear Kinematic Hardening που διαθέτει το ANSYS και το οποίο λαμβάνει υπόψη του το φαινόμενο Bauschinger.

5.3.3.3. Συνάφεια χάλυβα - σκυροδέματος

Για την προσομοίωση της συνάφειας μεταξύ χάλυβα - σκυροδέματος ακολουθήθηκε η διαδικασία που αναπτύχθηκε στο Κεφ. 3.4.2. Για τη σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης υιοθετείται μια απλοποίηση της σχέσης που προτείνεται από τη Fib (Model Code 10), με γραμμικό αύξοντα κλάδο (**Σχήμα 5.14**). Επιπλέον γίνονται οι εξής παραδοχές: (α) η αντοχή της συνάφειας μεταξύ χάλυβα - σκυροδέματος λαμβάνεται ίδια για ράβδο υπό θλίψη και εφελκυσμό, (β) επικρατούν παντού στο δοκίμιο οι ίδιες συνθήκες που καθορίζουν την ποιότητα της συνάφειας. Για τη βαθμονόμηση των τιμών της ολίσθησης στη σχέση που φαίνεται στο **Σχήμα 5.13** χρησιμοποιούνται οι προτεινόμενες τιμές για περισφιγμένο σκυρόδεμα (**Πίνακας 3.1**). Η καθαρή απόσταση μεταξύ των νευρώσεων για τους χάλυβες, που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα είναι 9 mm. Για τη μέγιστη τιμή της τάσεως συνάφειας υιοθετήθηκε η τιμή 4.9 MPa, με βάση την αντίστοιχη μέση τιμή που παρατηρήθηκε στο πείραμα.

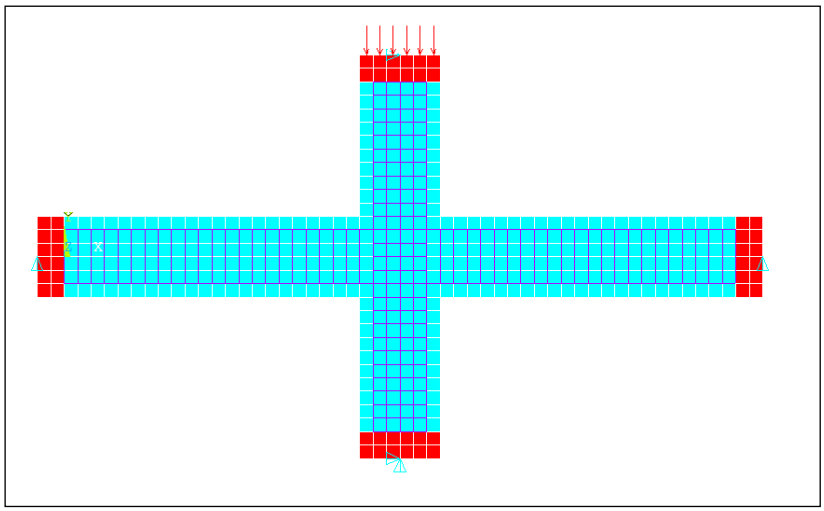
Στο προσομοίωμα του κόμβου Α1, τοποθετούνται στοιχεία συνάφειας σε όλους τους διαμήκεις οπλισμούς δοκού και υποστυλώματος ενώ σε αυτό του κόμβου Α2 μόνο στους διαμήκεις οπλισμούς της δοκού. Σε κάθε περίπτωση οι οπλισμοί συνδετήρων θεωρείται πως έχουν τέλεια συνάφεια, χωρίς δυνατότητα ολίσθησης με το περιβάλλον σκυρόδεμα.



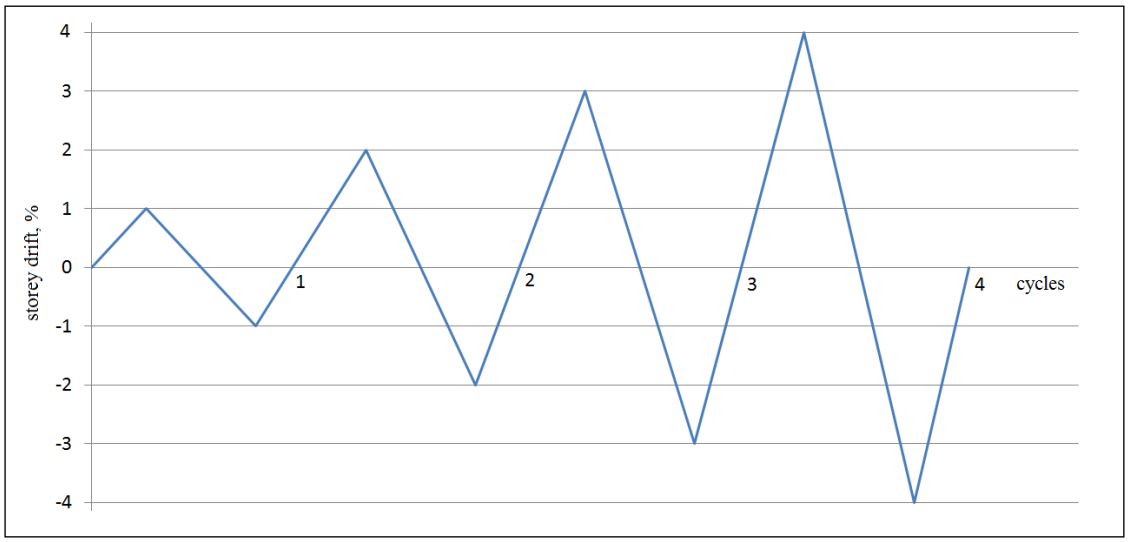
Σχήμα 5.14. Σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης για την ανάλυση των δοκιμίων Α1, Α2

5.3.4. Επιβολή της φόρτισης

Μέσω των πλακών φόρτισης, επιβάλλονται στα προσομοιώματα των δοκιμίων οι συνοριακές συνθήκες που περιγράφηκαν νωρίτερα. Στο **Σχήμα 5.15** φαίνονται οι συνοριακές συνθήκες για τον εσωτερικό κόμβο Α1 οι οποίες εφαρμόζονται στο μέσον κάθε πλάκας φόρτισης. Στο υποστύλωμα ασκείται σταθερό αξονικό φορτίο ίσο με 216 kN με τη μορφή κατανεμημένης πίεσης στην άνω πλάκα φόρτισης. Για την εφαρμογή των συνθηκών συμμετρίας, εμποδίζεται η μετατόπιση κατά τον άξονα Z, των κόμβων των ΠΣ στην εσωτερική πλευρά του δοκιμίου, με την εφαρμογή κατάλληλης συνοριακής συνθήκης (symmetry boundary condition). Η ανακυκλιζόμενη φόρτιση επιβάλλεται με τη μορφή εξαναγκασμένης οριζόντιας (κατά τον άξονα X) μετατόπισης των σημείων της κορυφής του δοκιμίου. Για τις βασικές αναλύσεις, υιοθετήθηκε μια απλούστερη, σε σχέση με το πείραμα (**Σχήμα 5.6**), χρονοϊστορία φόρτισης για την αποφυγή προβλημάτων σύγκλισης αλλά και για λόγους απλότητας και οικονομίας υπολογιστικού χρόνου. Οι κύκλοι φόρτισης γενικά των δοκιμίων κατά την ανάλυση φαίνονται στο **Σχήμα 5.16**. Συγκεκριμένα για την ανάλυση του δοκιμίου Α1, όπου προέκυπτε αδυναμία σύγκλισης πριν την ολοκλήρωση της χρονοϊστορίας της φόρτισης όπως θα αναφερθεί εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο, προστέθηκε ένας ακόμη κύκλος με στοχευόμενη σχετική μετάθεση ορόφου ίση με 0.5% για καλύτερη εποπτεία της συμπεριφοράς και πληρότητα αποτελεσμάτων.



Σχήμα 5.15. Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση για την ανάλυση



Σχήμα 5.16. Κύκλοι φόρτισης των δοκιμίων κατά την ανάλυση

5.3.5. Μη-γραμμική επίλυση

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο Κεφ. 3.2.2, για τη παρούσα ανάλυση, ο ελάχιστος και ο μέγιστος αριθμός βημάτων κατά την επίλυση λαμβάνεται 100 και 1000 αντίστοιχα. Ως κριτήριο σύγκλισης για την επαναληπτική διαδικασία, υιοθετείται η Infinite norm και μόνο για το έλεγχο της δύναμης με ανοχή σφάλματος 10%. Η ανάλυση γίνεται σε Η/Υ Fujitsu Lifebook N-series (Windows 7) με επεξεργαστή Intel(R) Core(TM) i7 στα 2.67 GHz και 6.0 GB RAM. Ο χρόνος που διαρκεί τυπικά η ανάλυση είναι περίπου 1 ώρα.

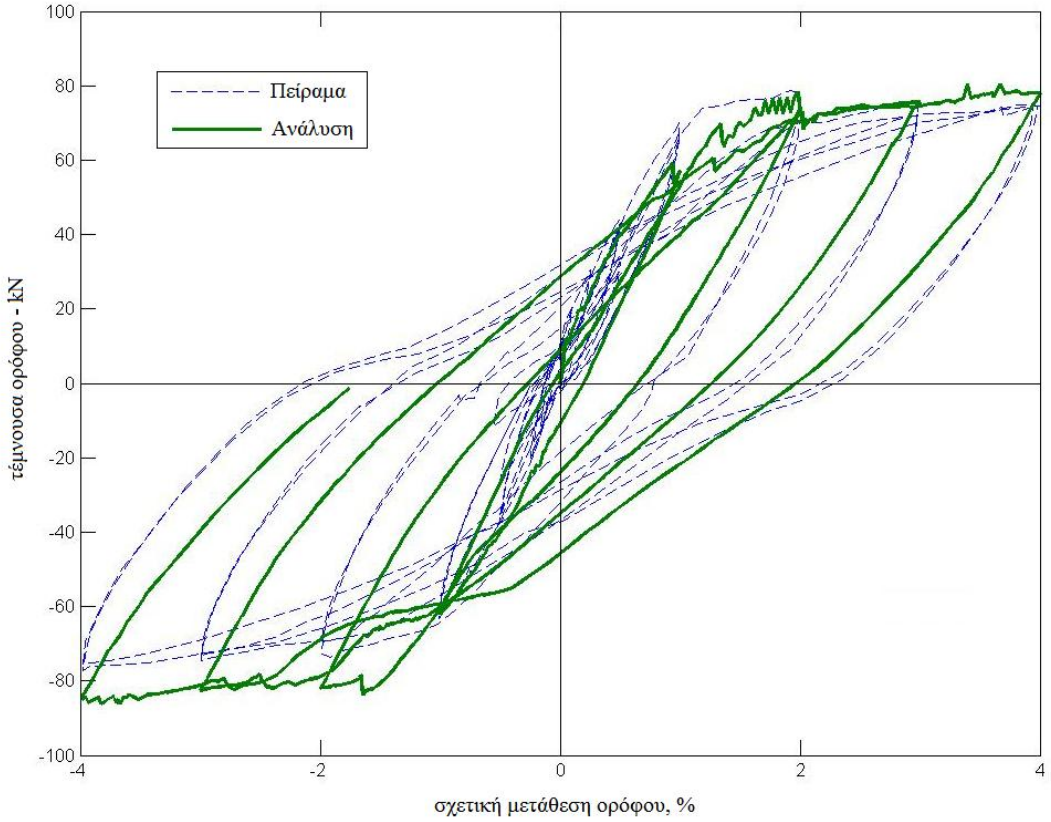
6. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

6.1. ΔΟΚΙΜΙΟ Α2 - ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΣ ΚΟΜΒΟΣ

6.1.1. Κυρίως ανάλυση

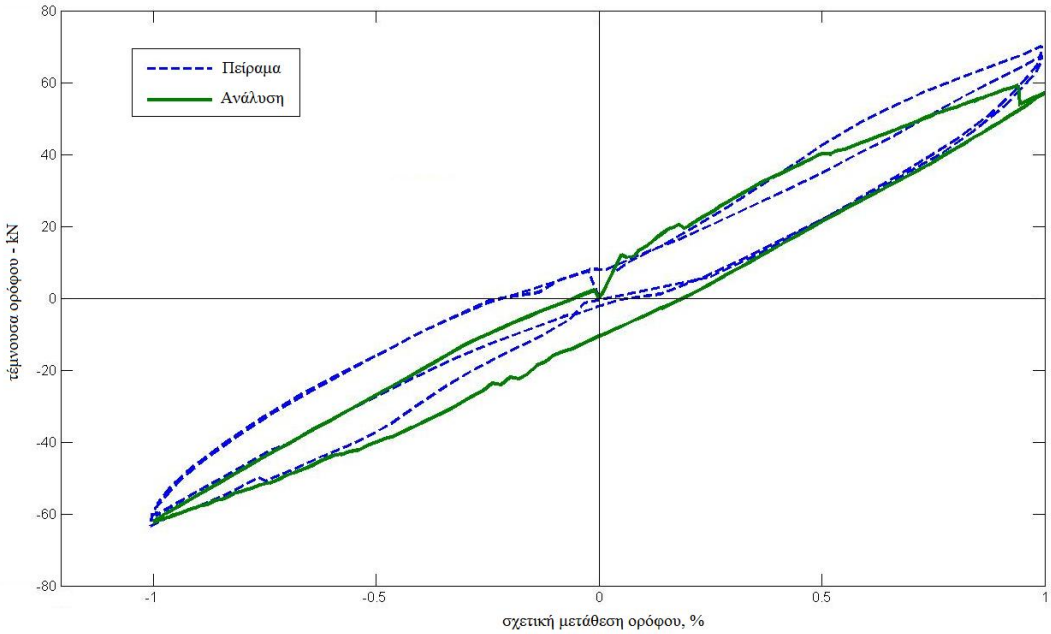
6.1.1.1. Σύγκριση αναλυτικών - πειραματικών αποτελεσμάτων

Παρακάτω γίνεται σύγκριση των αναλυτικών με τα πειραματικά αποτελέσματα, υπό τη μορφή καμπυλών τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου για ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Λεπτομερώς όλα τα πειραματικά αποτελέσματα περιγράφονται αλλού (Shiohara και Kusuhara, 2006). Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται μόνο αυτά για τα οποία γίνεται σύγκριση με την ανάλυση ενώ στο Παράρτημα Β παρατίθενται τα αντίστοιχα πρωτότυπα πειραματικά αποτελέσματα όπως δημοσιεύθηκαν από τους ερευνητές και για λόγους πληρότητας.

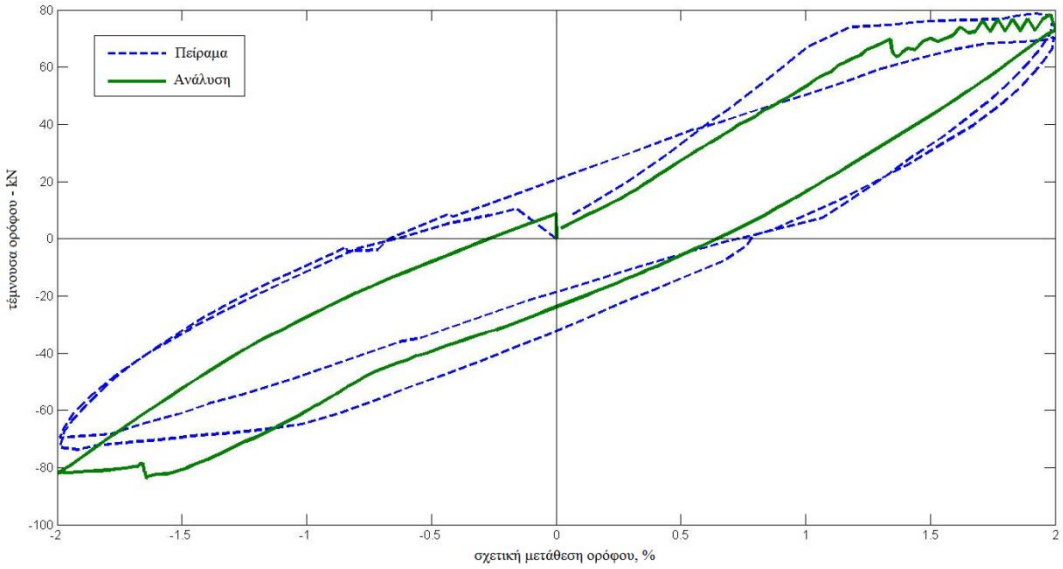


Σχήμα 6.1. Σχέση τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου όπως προέκυψαν από το πείραμα (διακεκομμένη γραμμή) και την ανάλυση (συνεχής γραμμή) για το δοκίμιο Α2

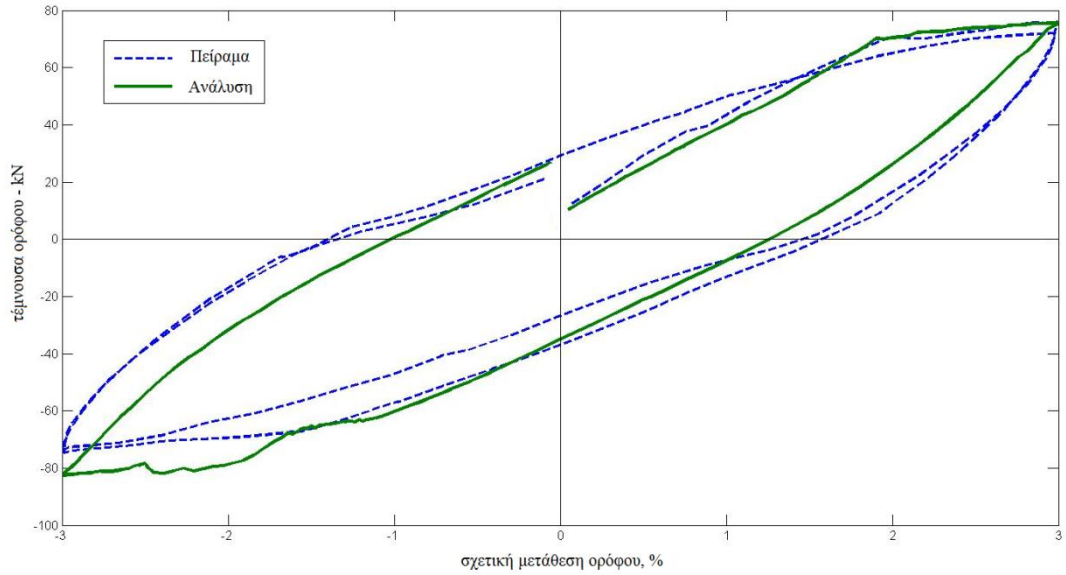
Στα παρακάτω σχήματα γίνεται η ίδια σύγκριση για τους μεμονωμένους υστερητικούς κύκλους που αντιστοιχούν σε σχετική μετάθεση ορόφου: 1%, 2%, 3% και 4% αντίστοιχα (**Σχήμα 6.2**, **Σχήμα 6.3**, **Σχήμα 6.4**, **Σχήμα 6.5**).



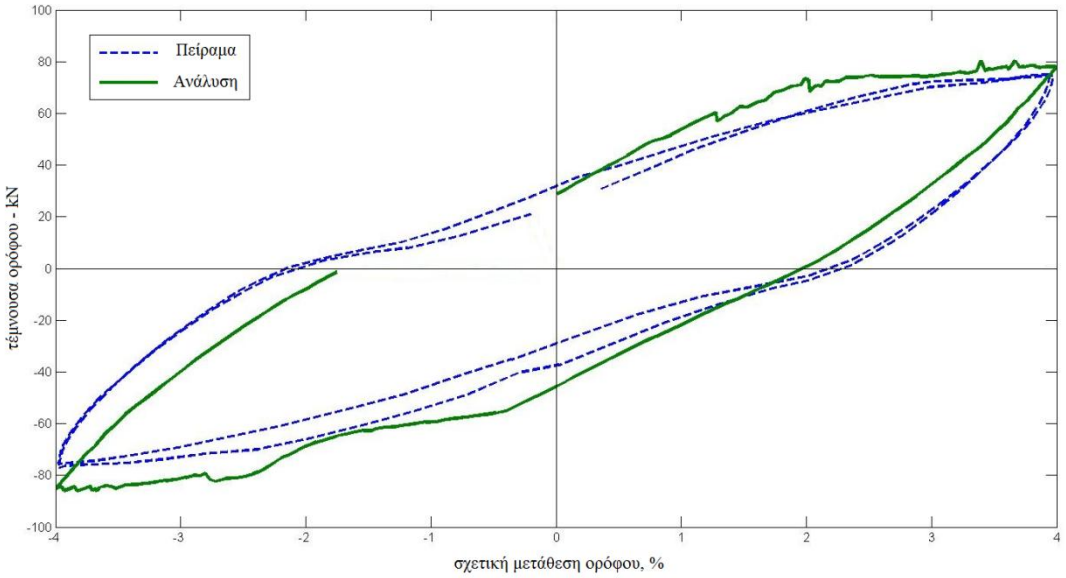
Σχήμα 6.2. Σύγκριση υστερητικών κύκλων δοκιμίου Α2 για σχετική μετάθεση ορόφου 1%



Σχήμα 6.3. Σύγκριση υστερητικών κύκλων δοκιμίου Α2 για σχετική μετάθεση ορόφου 2%



Σχήμα 6.4. Σύγκριση υστερητικών κύκλων δοκιμίου Α2 για σχετική μετάθεση ορόφου 3%



Σχήμα 6.5. Σύγκριση υστερητικών κύκλων δοκιμίου Α2 για σχετική μετάθεση ορόφου 4%

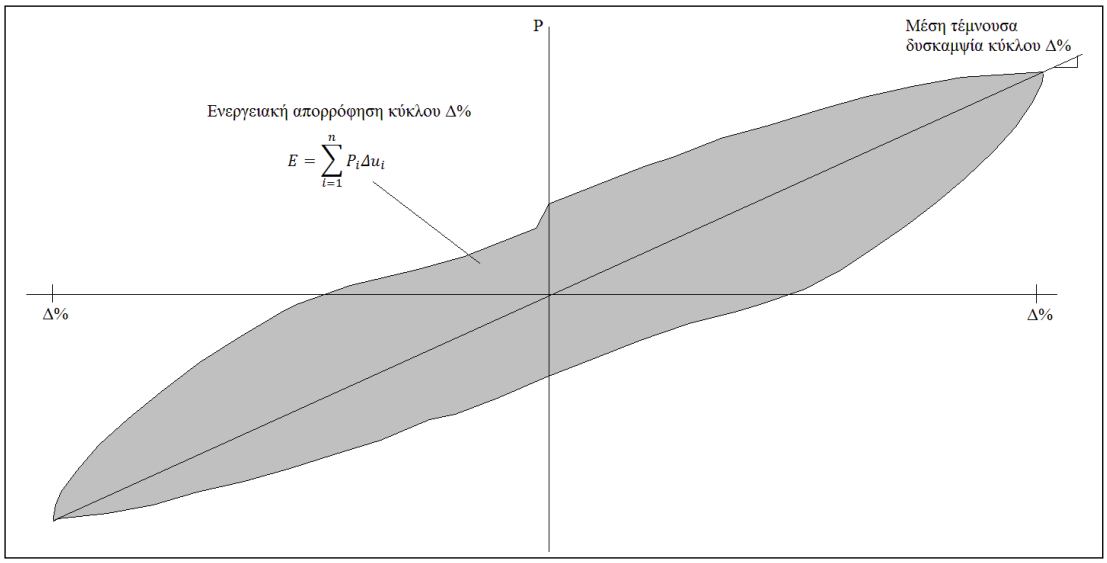
Να σημειωθεί πως στη χρονοϊστορία φόρτισης του πειραματικού δοκιμίου, για τις παραπάνω στοχευόμενες τιμές σχετικής μετάθεσης ορόφου, επιβαλλόντουσαν δύο διαδοχικοί κύκλοι όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5.6**, οπότε στη σύγκριση παρατίθενται και οι δύο για λόγους εποπτείας.

Οι μέγιστες τιμές τέμνουσας ορόφου που καταγράφηκαν πειραματικά και στην παρούσα ανάλυση φαίνονται παρακάτω (**Πίνακας 6.1)**:

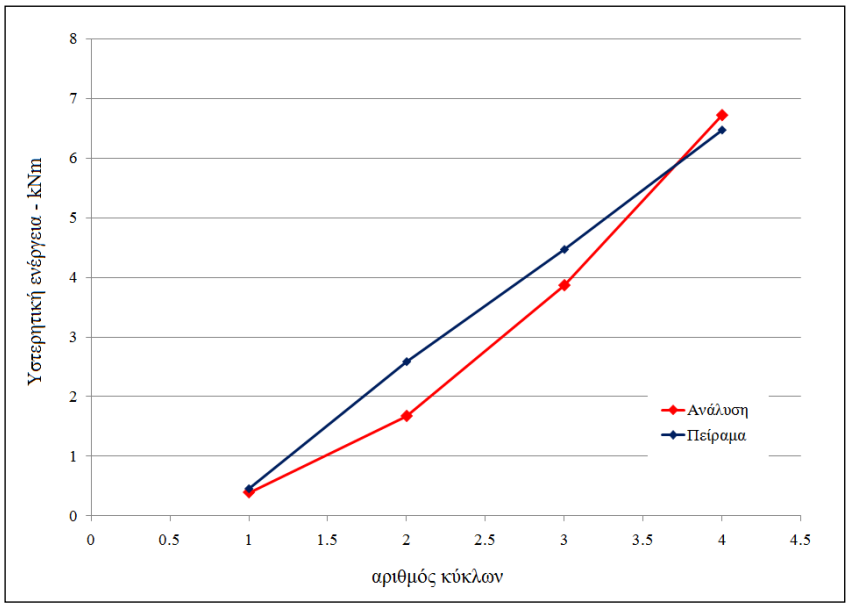
	Μέγιστη Τέμνουσα Ορόφου (kN)	
	Πείραμα	**Ανάλυση**
+	**77.9**	**80.5**
-	**-77.1**	**-85.9**

Πίνακας 6.1. Μέγιστες τιμές τέμνουσας ορόφου του δοκιμίου Α2 για το πείραμα και την ανάλυση

Πέραν της αντοχής στο **Σχήμα 6.7**. γίνεται σύγκριση της απορροφούμενης, σε κάθε κύκλο υστερητικής ενέργειας, όπως αυτή προέκυψε από το εμβαδόν που περικλείεται από τις καμπύλες τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου για το πείραμα και την ανάλυση (**Σχήμα 6.6**)



Σχήμα 6.6. Ορισμός της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας και ενεργειακής απορρόφησης



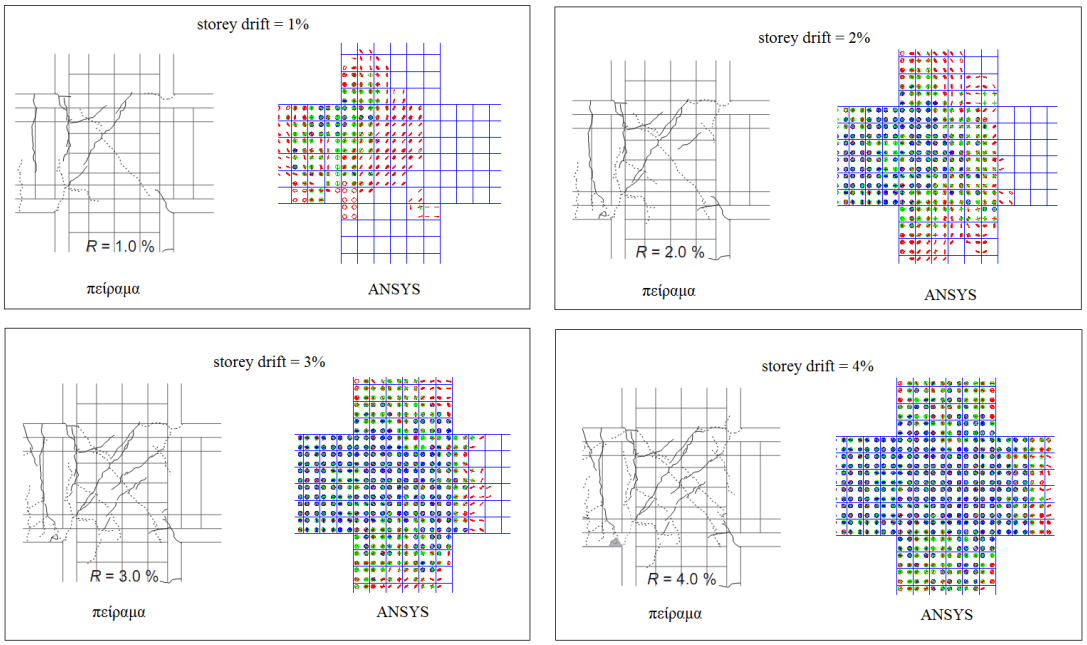
Σχήμα 6.7. Απορροφούμενη υστερητική ενέργεια για το δοκίμιο Α2

Με εξαίρεση το 2ο κύκλο φόρτισης, που αντιστοιχεί σε σχετική μετάθεση ορόφου ± 2%, η απόκλιση των αναλυτικών τιμών της απορροφώμενης υστερητικής ενέργειας από τις αντίστοιχες πειραματικές διαπιστώνεται πως δεν ξεπερνά το 15%.

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει πως υπάρχει γενικά ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων αναλυτικών προβλέψεων τόσο για τη φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου όσο και των άλλων χαρακτηριστικών της συμπεριφοράς υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση όπως η ενεργειακή απορρόφηση σε κάθε κύκλο.

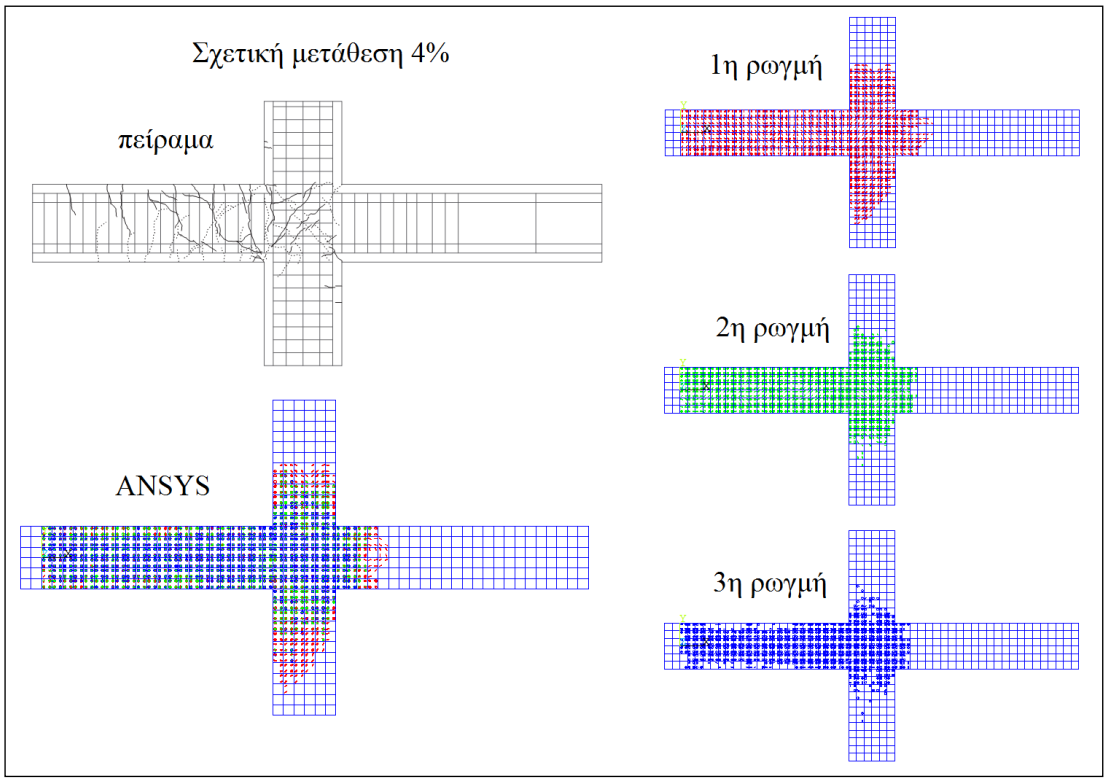
Οι κατανομές των ρωγμών, όπως καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος και από την ανάλυση συγκρίνονται παρακάτω, για το σώμα του κόμβου στο 1, 2, 3 και 4% της σχετικής μετάθεσης ορόφου (**Σχήμα 6.8**) και συνολικά για το δοκίμιο στο 4% της σχετικής μετάθεσης ορόφου (**Σχήμα 6.9**). Η τελική κατανομή της ρηγμάτωσης προβλέπεται σωστά από την ανάλυση τόσο όσον αφορά το σώμα του κόμβου όσο και της δοκού, ενώ καλή είναι η συμφωνία με το πείραμα και σε κάθε κύκλο φόρτισης ξεχωριστά. Πάντως όσον αφορά το υποστύλωμα, φαίνεται πως η ανάλυση, συγκρινόμενη με το πείραμα, προβλέπει πολύ πιο εκτεταμένη εμφάνιση ρωγμών, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο **Σχήμα 6.9**. Η υπερεκτίμιση της επέκτασης των ρωγμών από το ANSYS είναι ένα σημαντικό πρόβλημα της προσομοίωσης που εμφανίζεται και σε άλλες αναλύσεις πέραν της παρούσης, όπως θα αναφερθεί παρακάτω.

Σύμφωνα με τη σχέση (2.45), ο Ευρωκώδικας 8 απαιτεί για την αποφυγή της διαγώνιας ρηγμάτωσης στο σώμα του κόμβου $V_{jh} \leq 260.32\ kN$ (Παράρτημα Α). Από την ανάλυση διαπιστώνουμε πως η πρώτη διαγώνια ρηγμάτωση στο σώμα του κόμβου συμβαίνει προσεγγιστικά σε σχετική μετάθεση ορόφου 0.7%, στον πρώτο κύκλο φόρτισης και για θετική φορά. Τότε, η διατμητική δύναμη του κόμβου υπολογίστηκε μέσω της σχέσης (2.8), να είναι $V_{jh} = 250.3\ kN$. Για τον εξωτερικό κόμβο, σύμφωνα με την παρούσα ανάλυση, η σχέση (2.45) δίνει ικανοποιητική πρόβλεψη για την έναρξη της διαγώνιας ρηγμάτωσης.



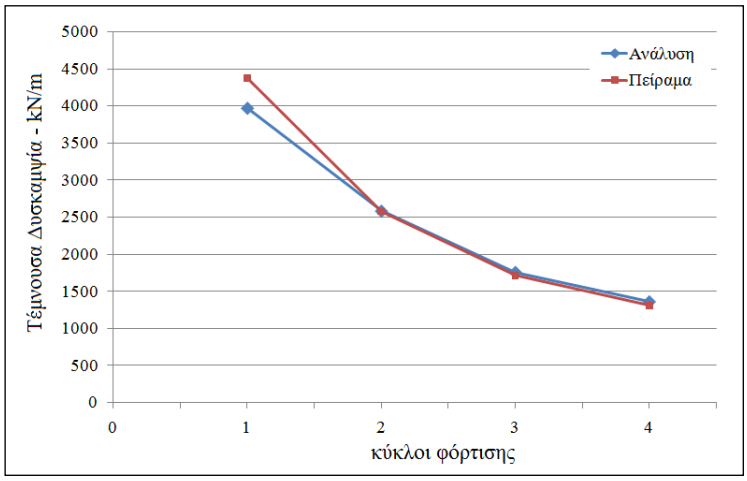
Σχήμα 6.8. Κατανομή της ρηγμάτωσης στο σώμα του κόμβου, δοκίμιου Α2

Στη εικόνα ρηγμάτωσης του ANSYS, τα τρία διαφορετικά χρώματα απεικονίζουν αντίστοιχα ρωγμές (στα σημεία ολοκλήρωσης κάθε στοιχείου), που σχηματίζονται προοδευτικά στη διεύθυνση των τριών κυρίων τάσεων. Το κόκκινο αντιστοιχεί στην πρώτη ρωγμή, το πράσινο στη δεύτερη και το μπλε στην τρίτη (**Σχήμα 6.9**).



Σχήμα 6.9. Συνολική ρηγμάτωση του δοκιμίου Α2 στο 4% της σχετικής μετάθεσης ορόφου (πειραματική καταγραφή και αναλυτική πρόβλεψη)

Η συγκριτική μεταβολή της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για την ανάλυση και το πείραμα φαίνεται στο **Σχήμα 6.10**. Η μέση τέμνουσα δυσκαμψία για κάθε κύκλο (**Σχήμα 6.6**), ορίζεται ως η κλίση της γραμμής που συνδέει τα σημεία μέγιστης μετατόπισης και αντίστοιχης αντίστασης για θετική και αρνητική κατεύθυνση φόρτισης, σε κάθε κύκλο.

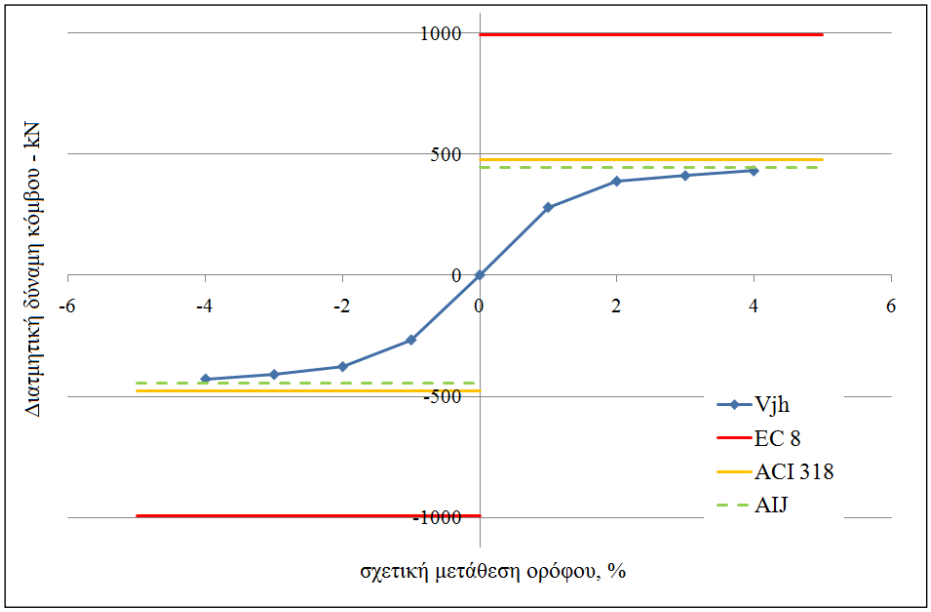


Σχήμα 6.10. Μεταβολή της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας κόμβου Α2

Τέλος, πέραν των χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν παραπάνω, η προσομοίωση προβλέπει σωστά και τη συμπεριφορά του κόμβου σε επίπεδο αστοχίας. Όπως και στο πειραματικό δοκίμιο, η δοκός αναπτύσσει τη μέγιστη καμπτική αντοχή της, χωρίς να προκύπτει προηγουμένως διατμητική αστοχία στο σώμα του κόμβου, όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια.

6.1.1.2. Διατμητική δύναμη και διατμητική παραμόρφωση κόμβου

Με βάση τη σχέση (2.8), υπολογίσθηκε η διατμητική δύναμη που εισάγεται στον κόμβο στα σημεία μέγιστης σχετικής μετακίνησης του δοκιμίου σε κάθε κύκλο φόρτισης. Η καμπύλη που προκύπτει, καθώς και οι οριακές τιμές αντοχής για τη διατμητική δύναμη του κόμβου σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8, τον ACI 318 (Παράρτημα A) και τον AIJ (**Πίνακας 5.2** και Shiohara 2006), φαίνονται παρακάτω.



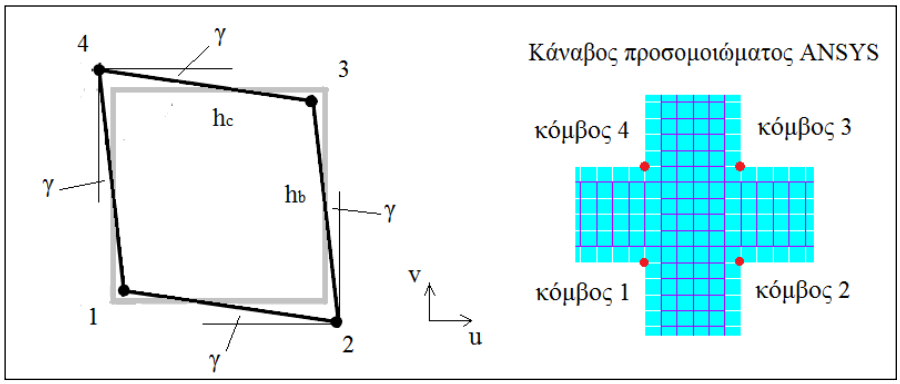
Σχήμα 6.11. Διατμητική απαίτηση κόμβου A2 και σύγκριση με τις προβλεπόμενες τιμές αντοχής των Κανονισμών EC8, ACI, AIJ

Για τις ίδιες τιμές ακραίων μετατοπίσεων του δοκιμίου, υπολογίστηκε και η διατμητική παραμόρφωση του σώματος του κόμβου από τα αναλυτικά αποτελέσματα του ANSYS όπως δείχνεται στο **Σχήμα 6.12**. Τα σημεία 1 έως 4 ορίζουν το σώμα του κόμβου στις παρειές των συντρεχόμενων δοκών και υποστυλωμάτων. Με βάση τις οριζόντιες **u** και κατακόρυφες **v**, μετακινήσεις των σημείων αυτών, ορίζουμε τη διατμητική παραμόρφωση γ ως εξής:

$$\gamma_{i1} = \frac{v_3 - v_4}{h_c}, \gamma_{i2} = \frac{u_2 - u_3}{h_b}, \gamma_{i3} = \frac{v_1 - v_2}{h_c}, \gamma_{i4} = \frac{u_1 - u_4}{h_b}$$

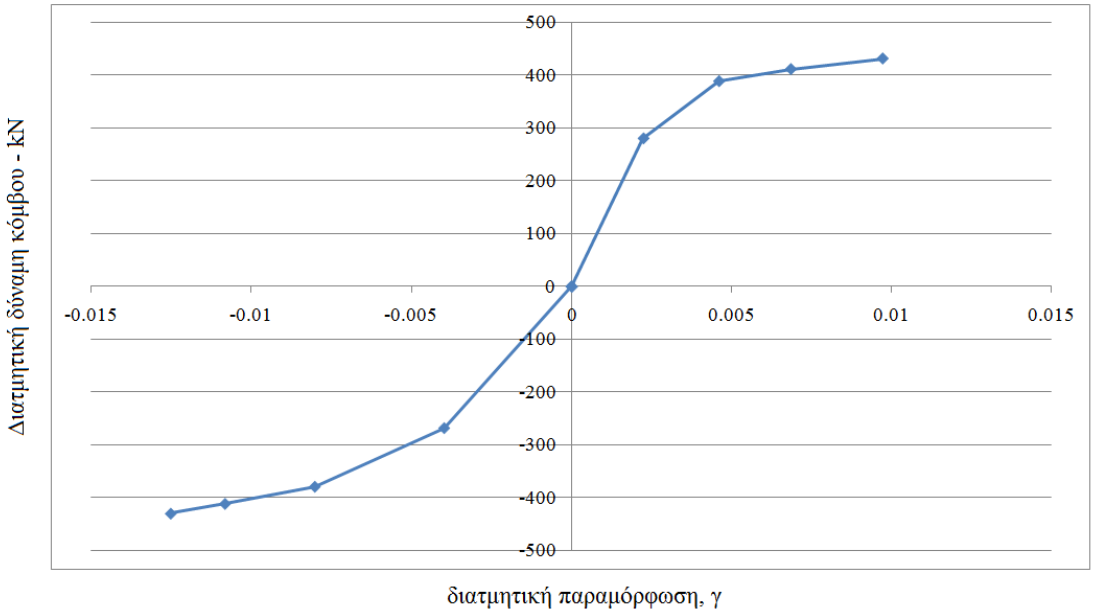
$\gamma = \frac{\gamma_{i1}+\gamma_{i2}+\gamma_{i3}+\gamma_{i4}}{4}$,

όπου h_c και h_b το ύψος της διατομής του υποστυλώματος και της δοκού αντίστοιχα.



Σχήμα 6.12. Διατμητική παραμόρφωση του σώματος του κόμβου

Η αναλυτική πρόβλεψη της καμπύλης διατμητικής δύναμης (V_{jh}) (με βάση τη σχέση 2.8) - διατμητικής παραμόρφωσης (γ) του κόμβου, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.13** στις μέγιστες τιμές της σχετικής μετάθεσης ορόφου κάθε κύκλου.



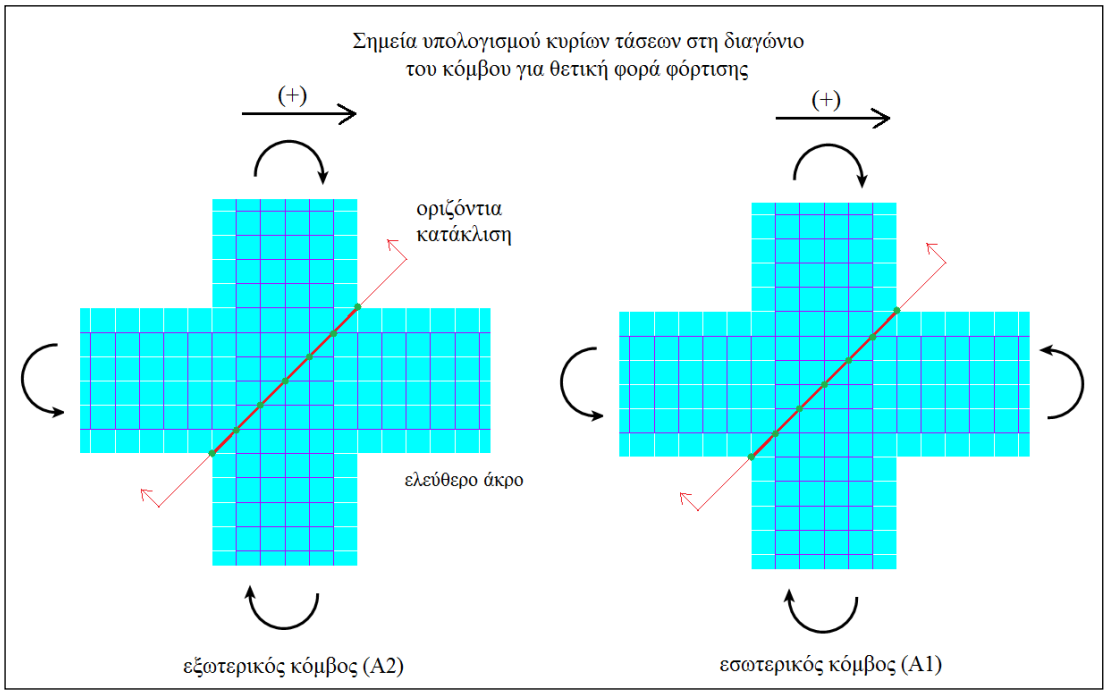
Σχήμα 6.13. Περιβάλλουσα καμπύλη διατμητικής δύναμης - διατμητικής παραμόρφωσης κόμβου Α2

6.1.1.3. Κύριες τάσεις του σκυροδέματος στο σώμα του κόμβου

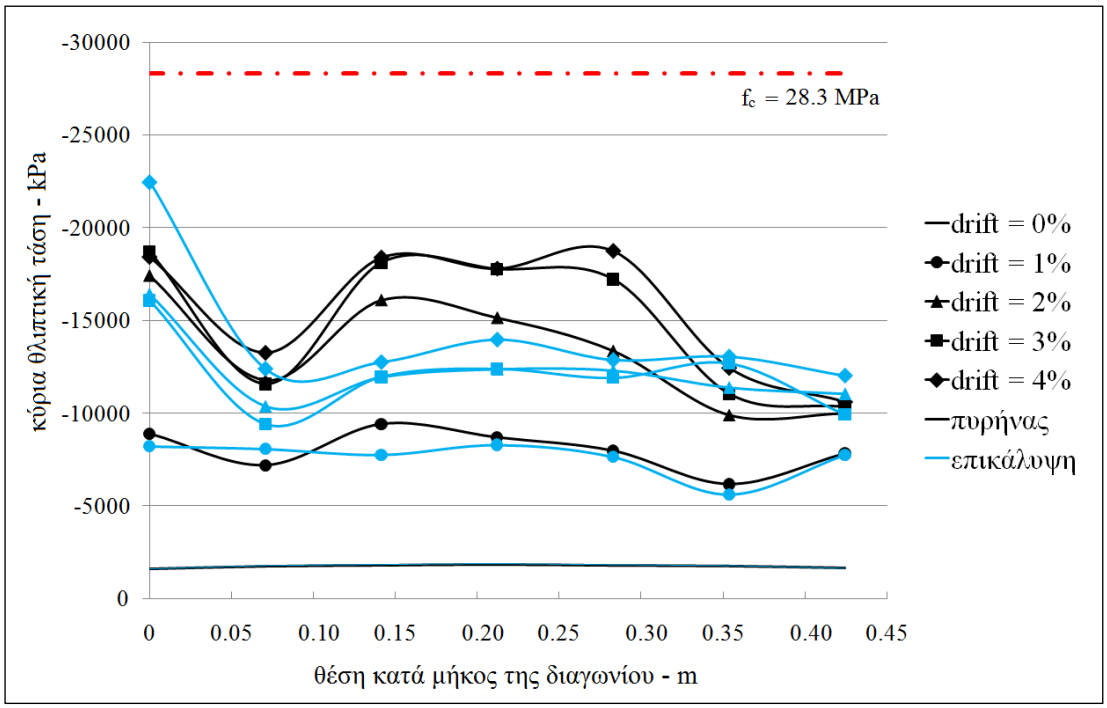
i. Κύρια θλιπτική τάση - σ_3 (<0)

Οι τιμές της κύριας θλιπτικής τάσης που προβλέπονται αναλυτικά, στα σημεία της διαγωνίου του σώματος του κόμβου, κατά το σχηματισμό του θλιπτήρα σκυροδέματος φαίνονται στο **Σχήμα 6.15**. Υπολογίζονται ως η μέση τιμή της κύριας θλιπτικής τάσης (σ_3 - 3rd principal stress) στους αντίστοιχους κόμβους των ΠΣ του σκυροδέματος σε κάθε θέση (**Σχήμα 6.14**). Παρατίθενται τόσο οι τιμές για τους κόμβους των ΠΣ που βρίσκονται στον πυρήνα του κόμβου όσο και για τους κόμβους των ΠΣ σκυροδέματος της επικάλυψης, εκτός των συνδετήρων. Παρατηρούμε πως στον πυρήνα του κόμβου αναπτύσσονται σημαντικά υψηλότερες θλιπτικές τάσεις απ' ότι στην επικάλυψη.

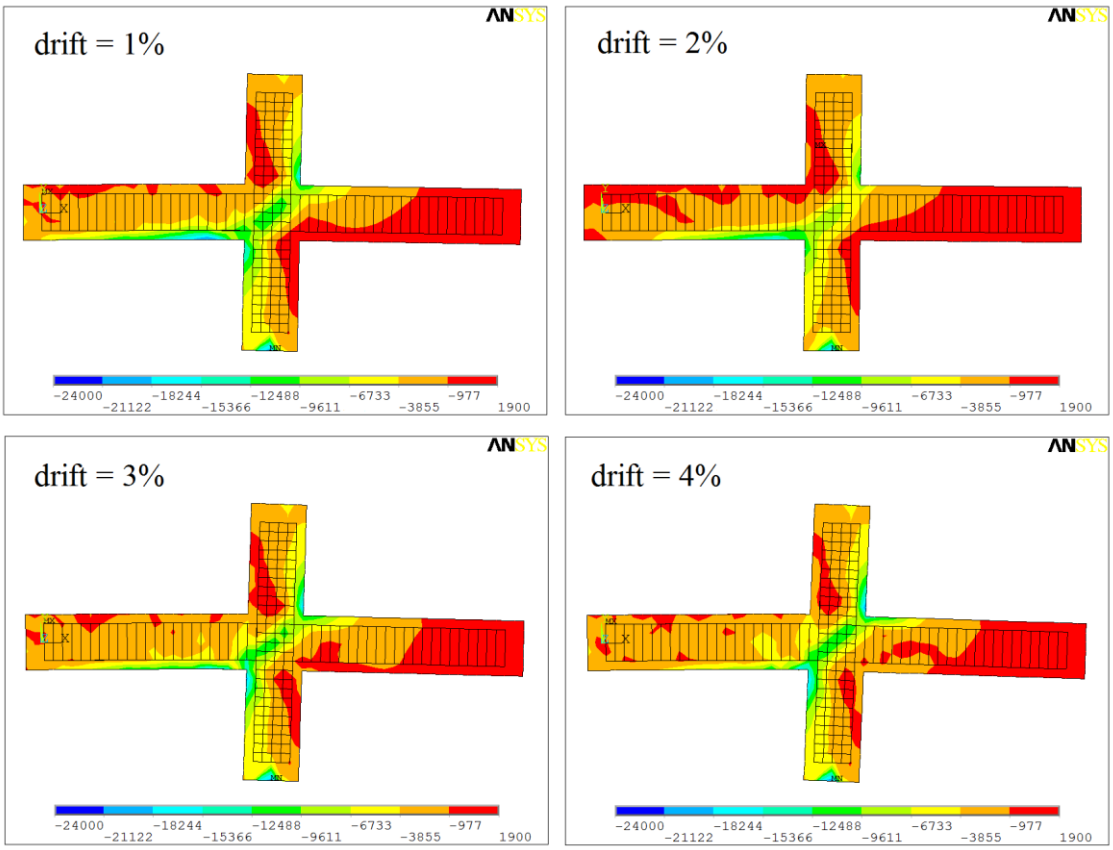
Η κατανομή της κύριας θλιπτικής τάσης σ_3 (3rd principal stress) στο δοκίμιο κατά τις ακραίες θετικές τιμές της σχετικής μετάθεσης ορόφου κάθε κύκλου φόρτισης, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.16**. Είναι φανερός ο σχηματισμός του μηχανισμού διαγώνιου θλιπτήρα σκυροδέματος στο σώμα του κόμβου για τη μεταφορά των φορτίων.



Σχήμα 6.14. Θέσεις υπολογισμού κυρίων τάσεων στη διαγώνιο του κόμβου

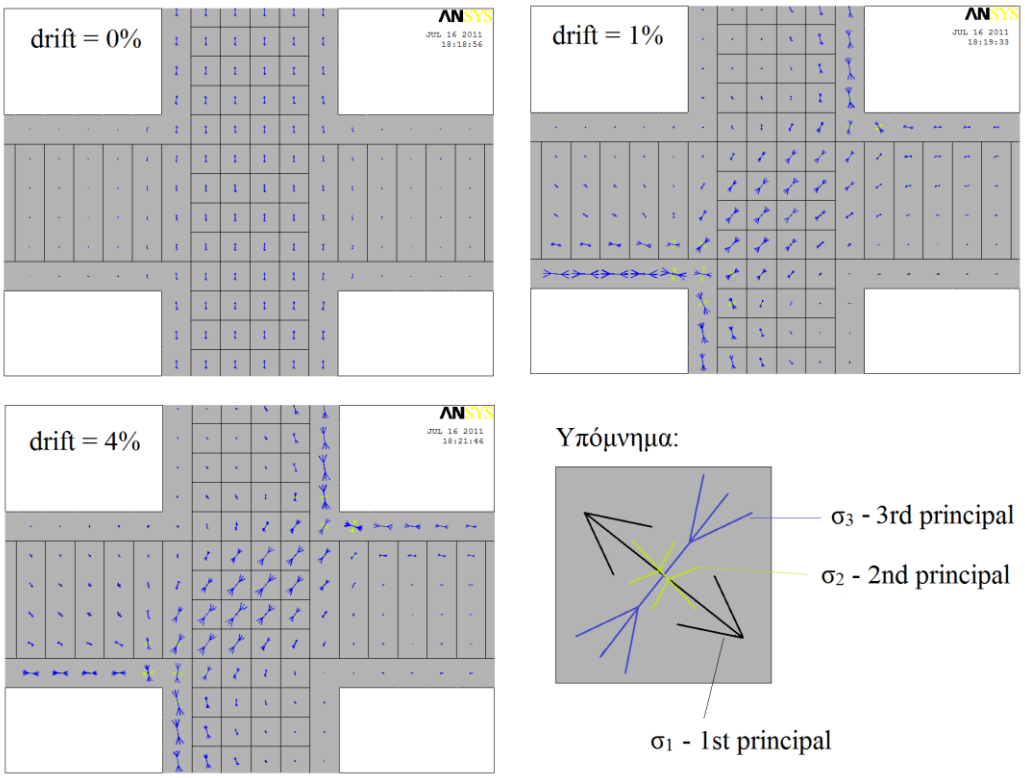


Σχήμα 6.15. Κύρια θλιπτική τάση στα σημεία της κύριας διαγωνίου για τον κόμβο Α2



Σχήμα 6.16. Κατανομή της κύριας θλιπτικής τάσης στο δοκίμιο Α2 και σχηματισμός του διαγώνιου θλιπτήρα σκυροδέματος

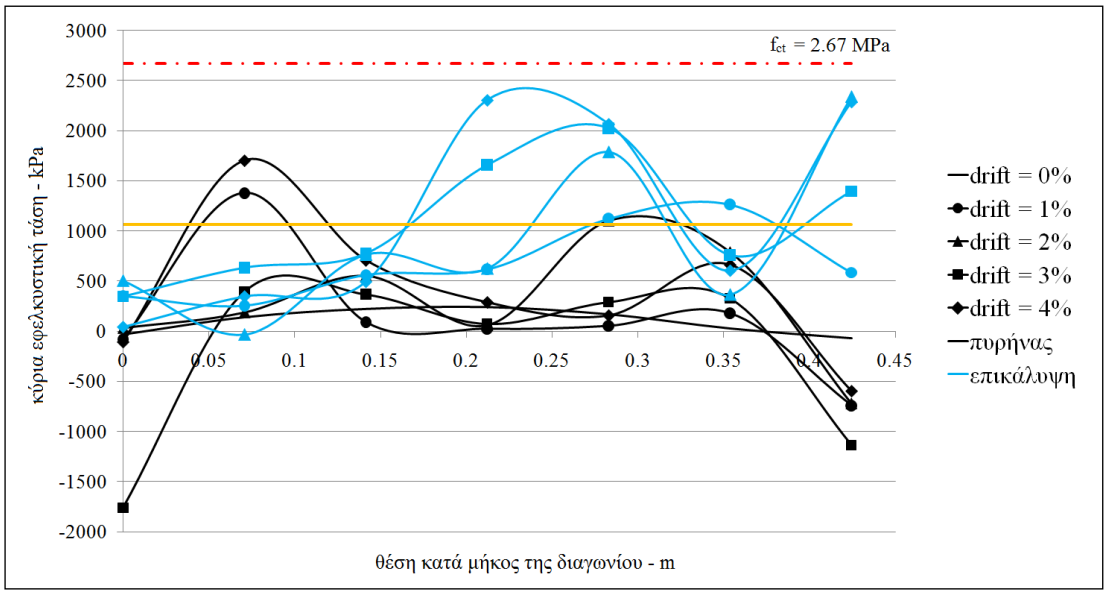
Στο **Σχήμα 6.17** φαίνονται οι τροχιές των κυρίων τάσεων μέσω διανυσμάτων στο κέντρο κάθε ΠΣ σκυροδέματος για ακραίες θετικές τιμές της σχετικής μετάθεσης ορόφου. Το μέγεθος του διανύσματος είναι ανάλογο με το μέγεθος της αντίστοιχης τάσης, και για αυτό διακρίνονται τα διανύσματα της κύριας θλιπτικής τάσης (σ_3) αλλά όχι τα κάθετα σε αυτά, διανύσματα της κύριας εφελκυστικής τάσης (σ_1). Στο υπόμνημα φαίνονται τα διανύσματα των κυρίων τάσεων ενός ΠΣ σκυροδέματος της διαγωνίου με καθολική κλίμακα μεγεθών, όπου διακρίνεται η κύρια εφελκυστική τάση με διεύθυνση κάθετη σε αυτή της κύριας θλιπτικής. Η κλίση της κύριας θλιπτικής τάσης στο διαγώνιο θλιπτήρα σκυροδέματος είναι 45°, λόγω και της γεωμετρίας του κόμβου, με ίδιες διαστάσεις δοκών και υποστυλωμάτων. Αρχικά, πριν την επιβολή οριζόντιας φόρτισης η τροχιές είναι κατακόρυφες, όπως αναμενόταν λόγω του αξονικού φορτίου του υστυλώματος.



Σχήμα 6.17. Τροχιές κυρίων τάσεων μέσω διανυσμάτων στα κέντρα των ΠΣ

ii. Κύρια εφελκυστική τάση - σ_1 (> 0)

Οι τιμές της κύριας εφελκυστικής τάσης που ασκείται κάθετα στα σημεία της κύριας διαγωνίου του σώματος του κόμβου, κατά το σχηματισμό του θλιπτήρα σκυροδέματος φαίνονται στο **Σχήμα 6.18** για τις ίδιες τιμές σχετικής μετατόπισης όπως παραπάνω. Όπως αναμενόταν, παρατηρείται ότι οι εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα της επικάλυψης είναι μεγαλύτερες από αυτές που αναπτύσσονται στον πυρήνα του κόμβου.



Σχήμα 6.18. Κύρια εφελκυστική τάση κάθετα στα σημεία της κύριας διαγωνίου για τον κόμβο Α2

Η οριζόντια γραμμή ορίζει το όριο της κύριας εφελκυστικής τάσης κατά την πρώτη ρηγμάτωση όπως προκύπτει από τη σχέση (2.29β). Με βάση της εικόνες της ρηγμάτωσης που προέκυψαν από την ανάλυση (**Σχήμα 6.8**) για τις αντίστοιχες τιμές της σχετικής μετάθεσης ορόφου, προκύπτει πως η σχέση (2.29β) προσεγγίζει ικανοποιητικά την τιμή της κύριας εφελκυστικής τάσης που απαιτείται για την έναρξη της ρηγμάτωσης στο σώμα του κόμβου.

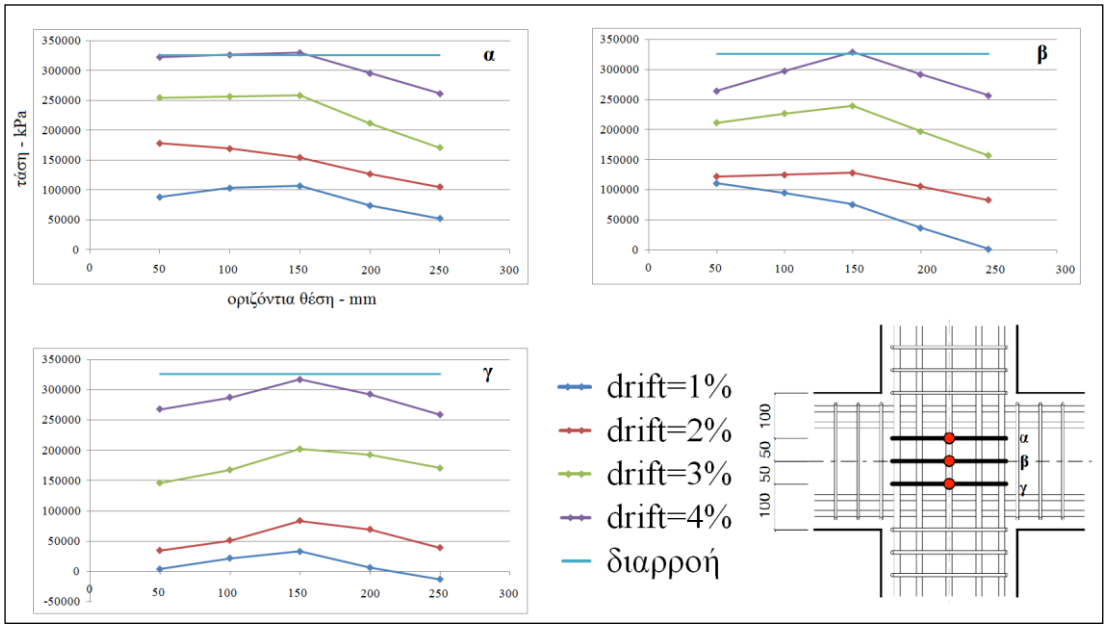
6.1.1.4. Τάσεις στους εγκάρσιους και διαμήκεις οπλισμούς

i. Τάσεις συνδετήρων

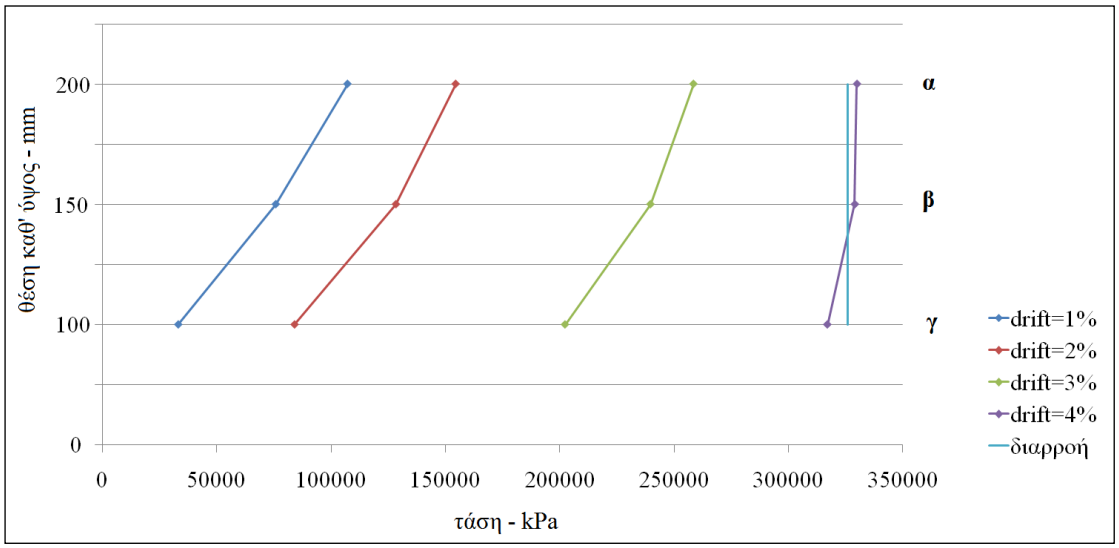
Στο **Σχήμα 6.19** φαίνονται οι τιμές της τάσης κατά μήκος των τριών συνδετήρων του κόμβου για χαρακτηριστικές της σχετικής μετάθεσης ορόφου. Στο **Σχήμα 6.20** περιγράφεται η μεταβολή της τάσης των συνδετήρων καθ' ύψος του σώματος του κόμβου όπως υπολογίστηκε στο μέσον κάθε ΠΣ οπλισμού (σημειώνεται με κόκκινη κουκίδα στο **Σχήμα 6.19**).

Όπως παρατηρείται, οι εγκάρσιοι οπλισμοί που βρίσκονται εντός του σώματος του κόμβου, παραμένουν ελαστικοί κατά τους τέσσερις κύκλους φόρτισης, εκτός από τους δύο άνω συνδετήρες (α), (β), οι οποίοι διαρρέουν οριακά στο τέλος του τέταρτου κύκλου που αντιστοιχεί σε σχετική μετάθεση ορόφου ίση με 4%. Επιπλέον, από την κατανομή των τάσεων κατά μήκος των καθ' ύψος συνδετήρων (**Σχήμα 6.19**) είναι φανερή η τάση

εγκάρσιας διόγκωσης του σκυροδέματος στη θέση του διαγώνιου θλιπτήρα η οποία γίνεται μέγιστη στο μέσον του κόμβου / συνδετήρα. Στο Σχήμα 6.20 είναι χαρακτηριστική η προοδευτική αύξηση των εφελκυστικών τάσεων καθ' ύψος του σώματος του κόμβου, που καλούνται να παραλάβουν οι συνδετήρες, συναρτήσει της αύξησης της σχετικής μετάθεσης ορόφου.



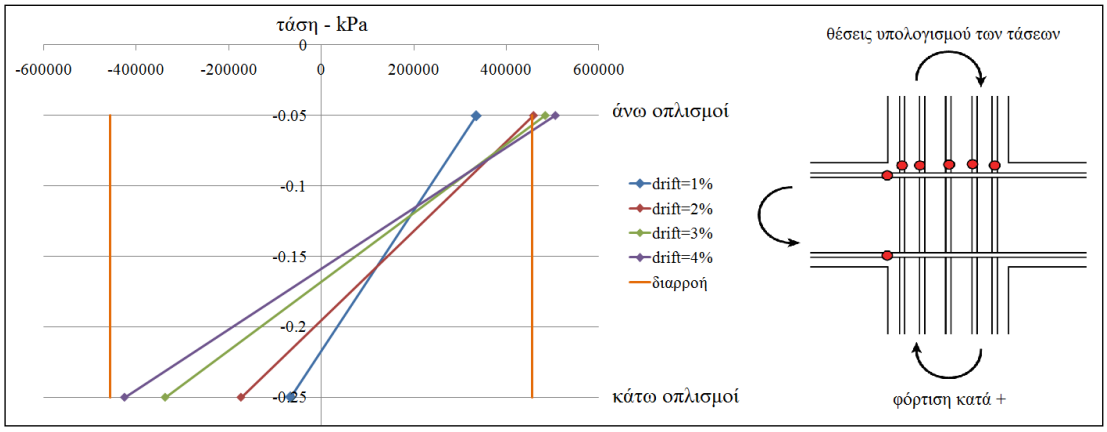
Σχήμα 6.19. Μεταβολή των τάσεων κατά μήκος των συνδετήρων του κόμβου Α2



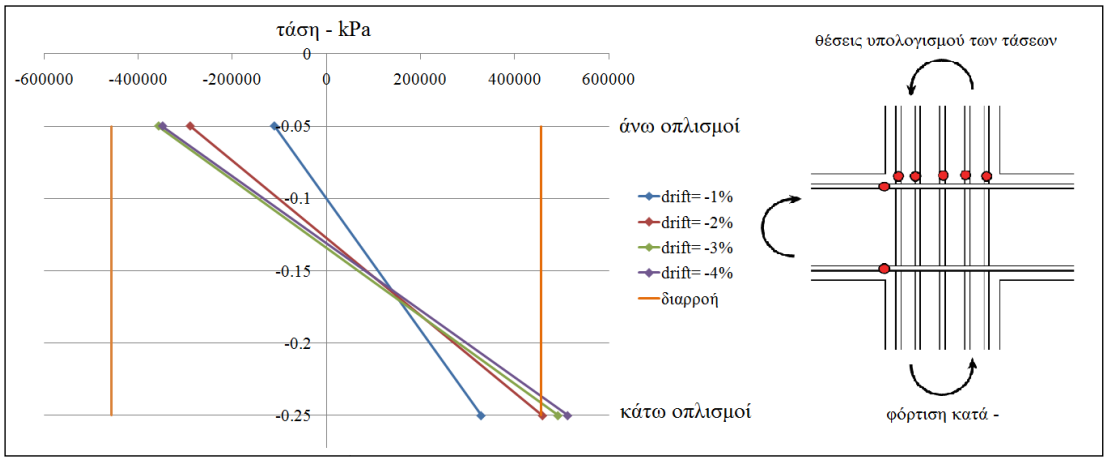
Σχήμα 6.20. Μεταβολή των τάσεων των συνδετήρων καθ' ύψος του κόμβου

ii. Τάσεις και παραμορφώσεις διαμήκων οπλισμών δοκού

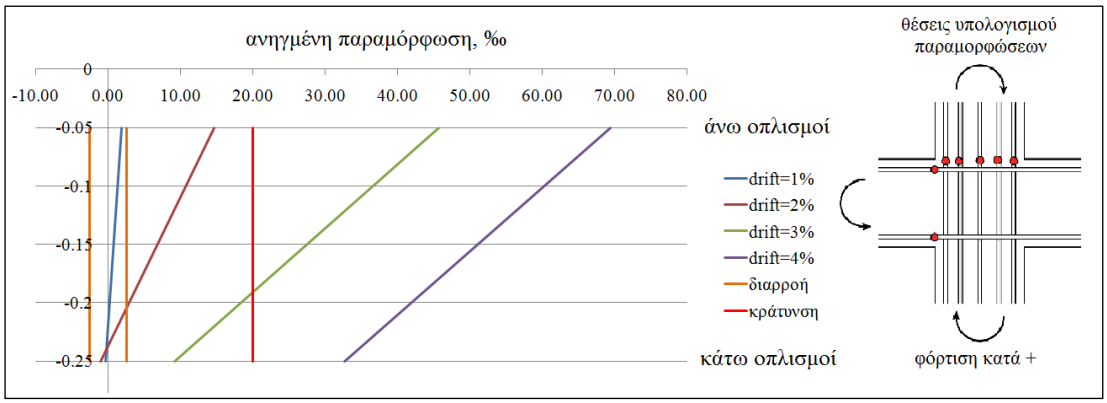
Παρακάτω αποτυπώνεται η μεταβολή των τάσεων με την αύξηση του φορτίου, στους άνω και κάτω διαμήκεις οπλισμούς της δοκού αριστερά (**Σχήμα 6.21**, **Σχήμα 6.22**). Στα επόμενα σχήματα φαίνονται οι αντίστοιχες τιμές της ανηγμένης παραμόρφωσης (**Σχήμα 6.23** και **Σχήμα 6.24**).



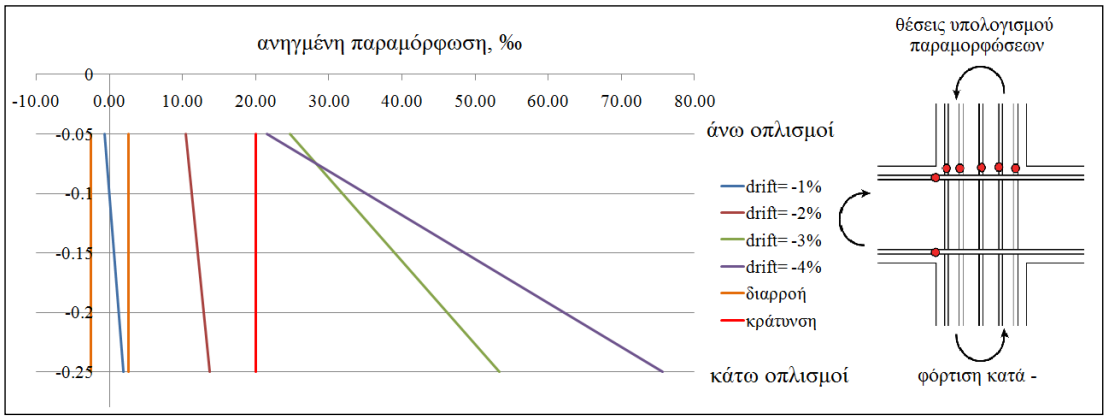
Σχήμα 6.21. Τάση στους άνω και κάτω οπλισμούς της δοκού αριστερά για φόρτιση κατά (+)



Σχήμα 6.22. Τάση στους άνω και κάτω οπλισμούς της δοκού αριστερά για φόρτιση κατά (-)



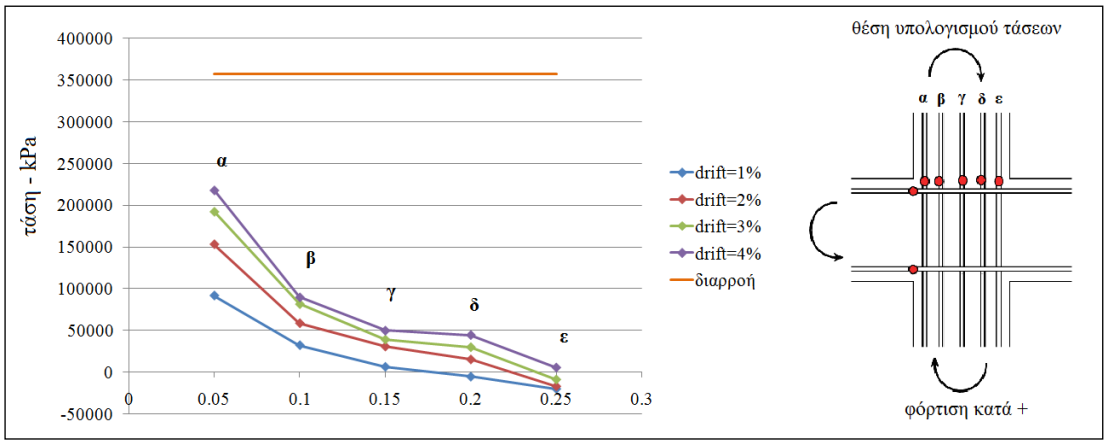
Σχήμα 6.23. Παραμόρφωση στους άνω και κάτω οπλισμούς της δοκού αριστερά για φόρτιση κατά (+)



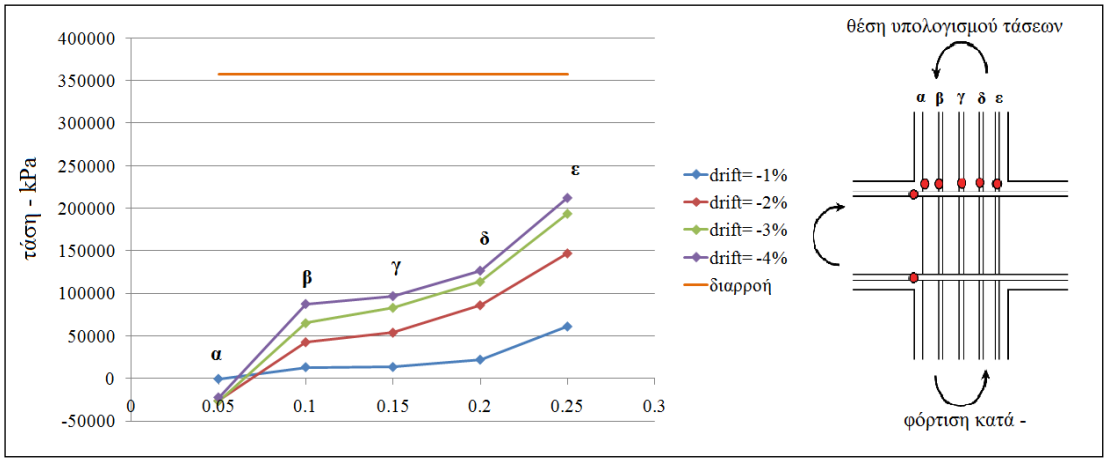
Σχήμα 6.24. Παραμόρφωση στους άνω και κάτω οπλισμούς της δοκού αριστερά για φόρτιση κατά (-)

iii. Τάσεις διαμήκων οπλισμών άνω υποστυλώματος

Η εξέλιξη των τάσεων στους κατακόρυφους οπλισμούς, στην άνω παρειά του υποστυλώματος, αποτυπώνεται στα παρακάτω σχήματα για τις θετικές και αρνητικές μέγιστες τιμές της σχετικής μετάθεσης ορόφου (**Σχήμα 6.25** και **Σχήμα 6.26**). Παρατηρούμε πως οι κατακόρυφοι οπλισμοί του υποστυλώματος παραμένουν στην ελαστική περιοχή όλους τους κύκλους φόρτισης.



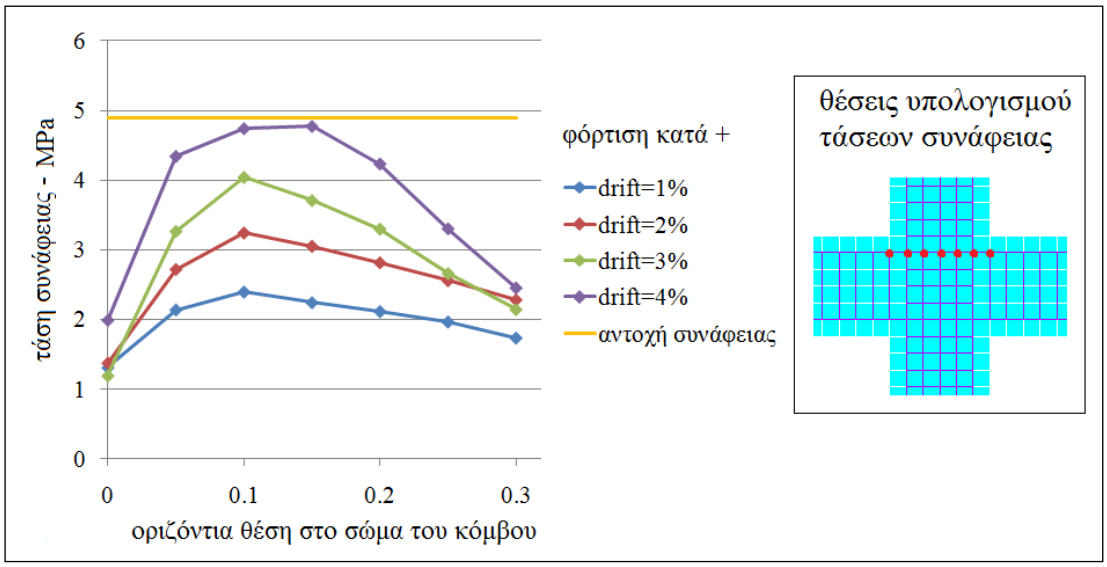
Σχήμα 6.25. Τάση στους οπλισμούς του άνω υποστυλώματος για φόρτιση κατά (+)



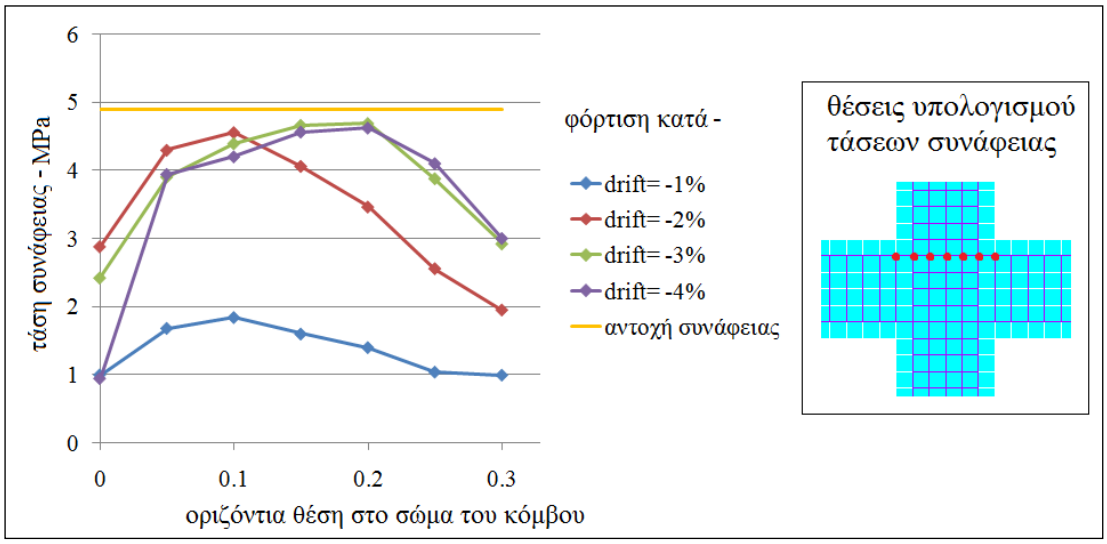
Σχήμα 6.26. Τάση στους οπλισμούς του άνω υποστυλώματος για φόρτιση κατά (-)

6.1.1.5. Τάσεις συνάφειας οπλισμών δοκού εντός του κόμβου

Η κατανομή της τάσης συνάφειας των άνω διαμήκων οπλισμών της δοκού εντός του κόμβου, φαίνεται στο **Σχήμα 6.27** για ράβδους υπό εφελκυσμό και στο **Σχήμα 6.28** για ράβδους υπό θλίψη. Αξίζει να σημειωθεί πως ο τρόπος προσομοίωσης της συνάφειας - χάλυβα σκυροδέματος (Κεφάλαιο 3), φαίνεται να δίνει μια ρεαλιστική κατανομή των τάσεων συνάφειας που αναπτύσσονται εντός του κόμβου. Ενδιαφέρον έχει επίσης η ανεπάρκεια του μήκους του σώματος του κόμβου για πλήρη αγκύρωση της ευθύγραμμης ράβδου, κάτι που φαίνεται από την τιμή της τάσης στο σημείο 0.3 οριζόντια. Σε έναν πραγματικό εξωτερικό κόμβο, χωρίς δεξιά αφόρτιστη δοκό και άρα "απεριόριστο" μήκος αγκύρωσης, η τάση αυτή θα έπρεπε να παραληφθεί με κατάλληλη καμπύλη αγκύρωση εντός του κόμβου.

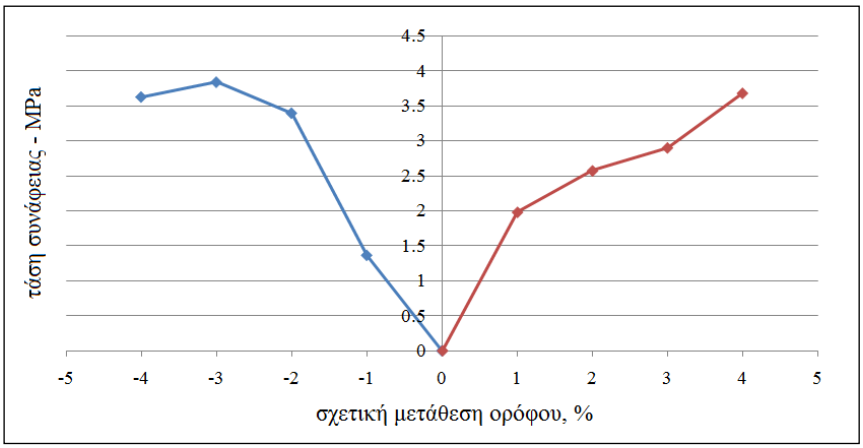


Σχήμα 6.27. Κατανομή των τάσεων συνάφειας στους άνω οπλισμούς της δοκού μέσα στο σώμα του κόμβου Α2 για φόρτιση κατά (+)



Σχήμα 6.28. Κατανομή των τάσεων συνάφειας στους άνω οπλισμούς της δοκού μέσα στο σώμα του κόμβου Α2 για φόρτιση κατά (-)

Στο παρακάτω σχήμα δίδεται η μεταβολή της μέσης τάσης συνάφειας, των άνω διαμήκων οπλισμών της δοκού εντός του κόμβου, συναρτήσει της σχετικής μετάθεσης ορόφου και θετικές και αρνητικές τιμές (**Σχήμα 6.29**).



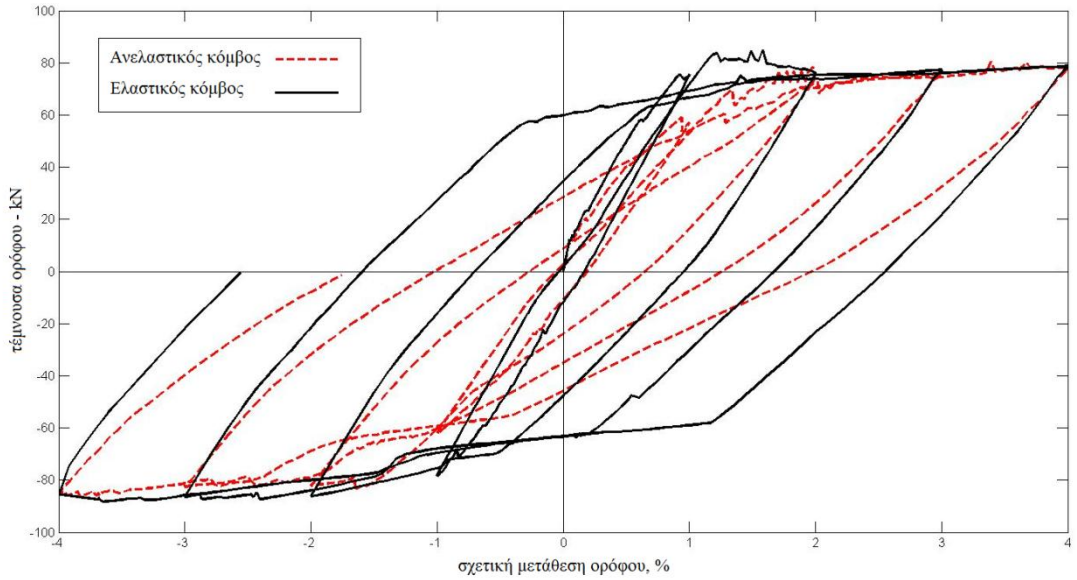
Σχήμα 6.29. Μεταβολή της μέσης τάσης συνάφειας των άνω οπλισμών της δοκού εντός του κόμβου συναρτήσει της σχετικής μετάθεσης ορόφου

6.1.2. Ανάλυση με ελαστικό σκυρόδεμα στο πάνελ του κόμβου

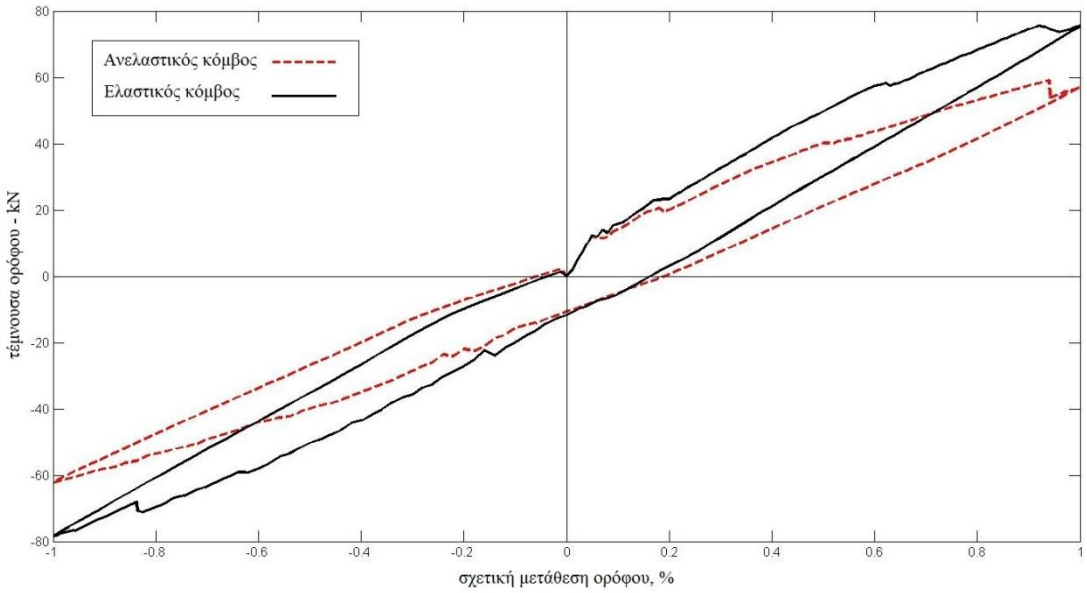
Για τη διερεύνηση της επιρροής της ρηγμάτωσης, αλλά και των άλλων παραμέτρων που συντελούν στη μη-γραμμική συμπεριφορά του κόμβου όπως η ολίσθηση των ράβδων του οπλισμού, στη συνολική δομητική απόκριση, έγινε επίλυση του δοκιμίου Α2 προσομοιώνοντας το σώμα του κόμβου με ελαστικό σκυρόδεμα.

Στα σχήματα που ακολουθούν γίνεται σύγκριση των προβλέψεων των δύο αναλύσεων υπό τη μορφή καμπύλων τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου, συνολικά και για μεμονωμένους υστερητικούς κύκλους που αντιστοιχούν σε σχετική μετάθεση ορόφου: 1%, 2%, 3% και 4% αντίστοιχα (**Σχήμα 6.30**, **Σχήμα 6.31**, **Σχήμα 6.32**, **Σχήμα 6.33**, **Σχήμα 6.34**)

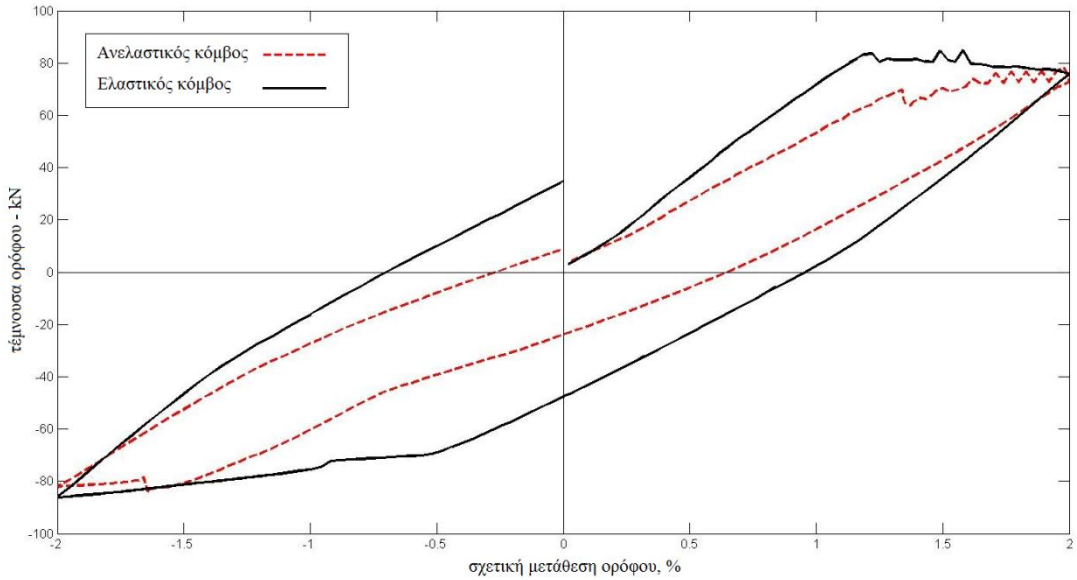
Από τη σύγκριση αυτή, γίνεται φανερή η αρνητική επιρροή των ανελαστικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος του κόμβου στη συνολική δομητική συμπεριφορά του στοιχείου, τόσο από πλευράς δυσκαμψίας όσο και εύρους υστερητικών βρόχων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση και στο βαθμό που στον κόμβο αυτό δεν έχουμε διατμητική αστοχία, δεν παρατηρείται αντίστοιχη αύξηση στη συνολική αντοχή από την ελαστική επίλυση, πέραν του πρώτου κύκλου φόρτισης.



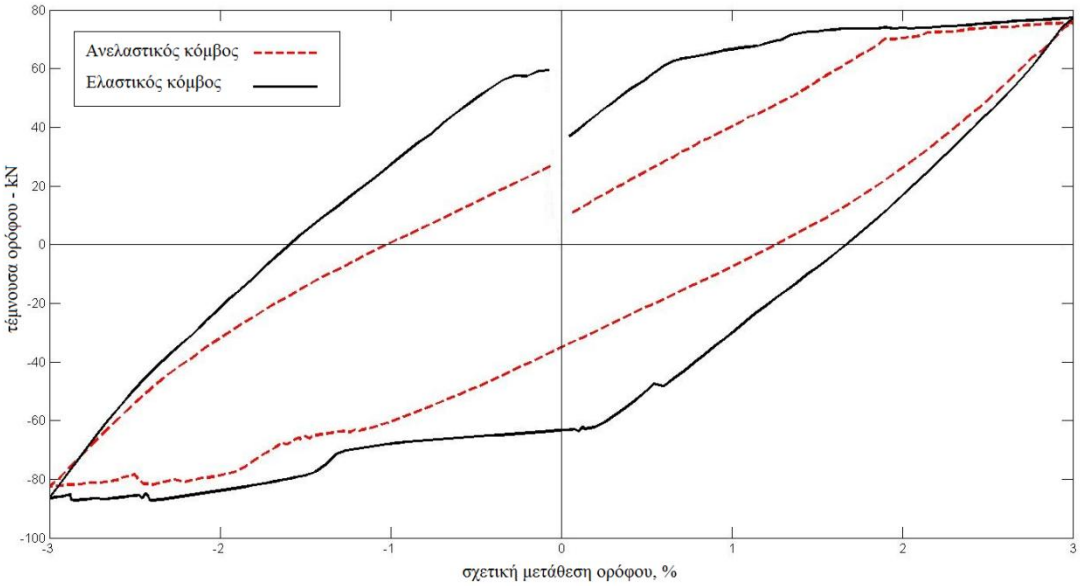
Σχήμα 6.30. Σχέση τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου όπως προέκυψαν από την ανάλυση (διακεκομμένη γραμμή) και την ανάλυση με ελαστικό κόμβο (συνεχής γραμμή) για το δοκίμιο Α2



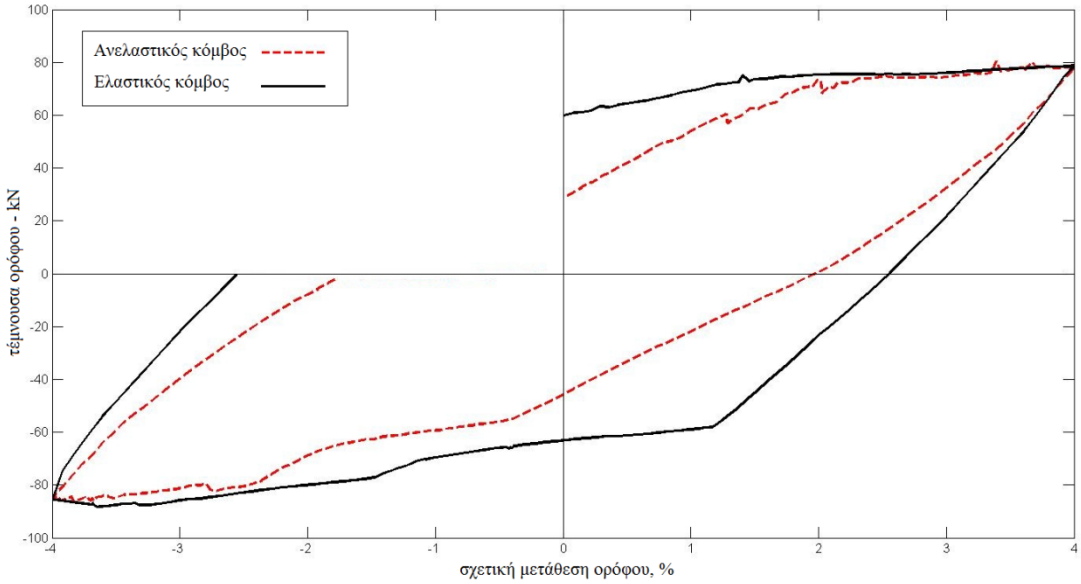
Σχήμα 6.31. Σύγκριση υστερητικών κύκλων για ελαστικό - ανελαστικό κόμβο δοκιμίου Α2 για σχετική μετάθεση ορόφου 1%



Σχήμα 6.32. Σύγκριση υστερητικών κύκλων για ελαστικό - ανελαστικό κόμβο δοκιμίου Α2 για σχετική μετάθεση ορόφου 2%

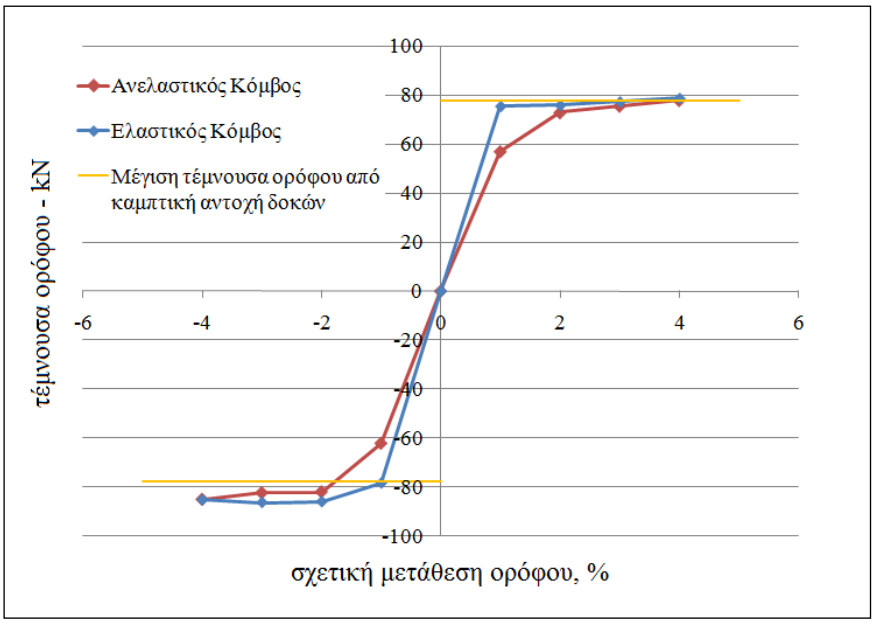


Σχήμα 6.33. Σύγκριση υστερητικών κύκλων για ελαστικό - ανελαστικό κόμβο δοκιμίου Α2 για σχετική μετάθεση ορόφου 3%



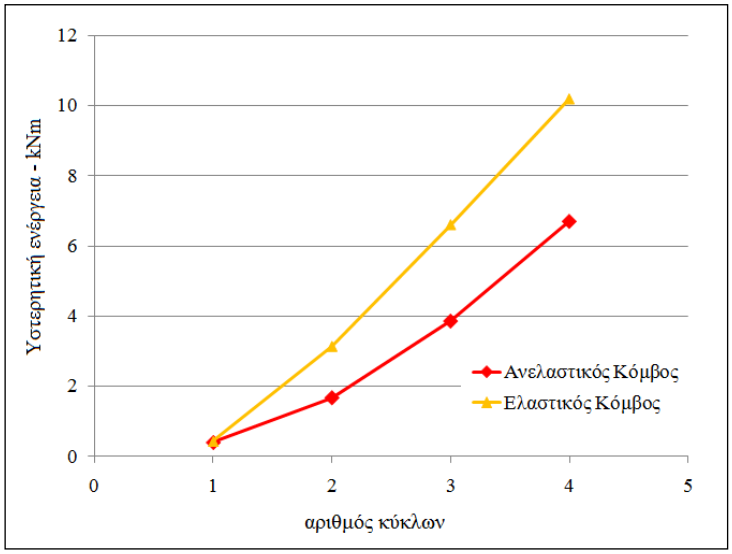
Σχήμα 6.34. Σύγκριση υστερητικών κύκλων για ελαστικό - ανελαστικό κόμβο δοκιμίου Α2 για σχετική μετάθεση ορόφου 4%

Η περιβάλλουσα καμπύλη τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου που προκύπτει από την ανάλυση για ελαστικό και ανελαστικό κόμβο φαίνεται στο **Σχήμα 6.35**, ενώ γίνεται σύγκριση και με τη μέγιστη τιμή τέμνουσας ορόφου που μπορεί να αναπτυχθεί με βάση την καμπτική αντοχή της δοκού. Η υπέρβαση της αντοχής αυτής στις αρνητικές τιμές της σχετικής μετάθεσης ορόφου, δικαιολογείται λόγω του προσεγγιστικού τρόπο υπολογισμού της ροπής αντοχής της δοκού αλλά πιθανόν και στην υπερεκτίμησή της από το προσομοίωμα για αυτή τη φορά φόρτισης. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, ο συγκεκριμένος κόμβος, τόσο πειραματικά όσο και από τις προβλέψεις της ανάλυσης δεν εμφανίζει διατμητική αστοχία πριν την ανάπτυξη της οριακής καμπτικής αντοχής της δοκού, κάτι που φαίνεται στο **Σχήμα 6.35** για την ανάλυση με ανελαστικό κόμβο. Πρέπει να σημειωθεί ότι με τον όρο διατμητική αστοχία του κόμβου ορίζεται ένας συνδυασμός φαινομένων: διαγώνια ρηγμάτωση, διαρροή των συνδετήρων του κόμβου, τοπική θλιπτική αστοχία στον πυρήνα και πτώση της τέμνουσας ορόφου. Όπως αναμενόταν, οι τιμές της τέμνουσας ορόφου που αναπτύσσονται για την ανάλυση με ελαστικό κόμβο, ταυτίζονται, τουλάχιστον για θετική φορά φόρτισης, με τις προβλεπόμενες από τη στατική επίλυση με βάση την καμπτική αντοχή της δοκού.



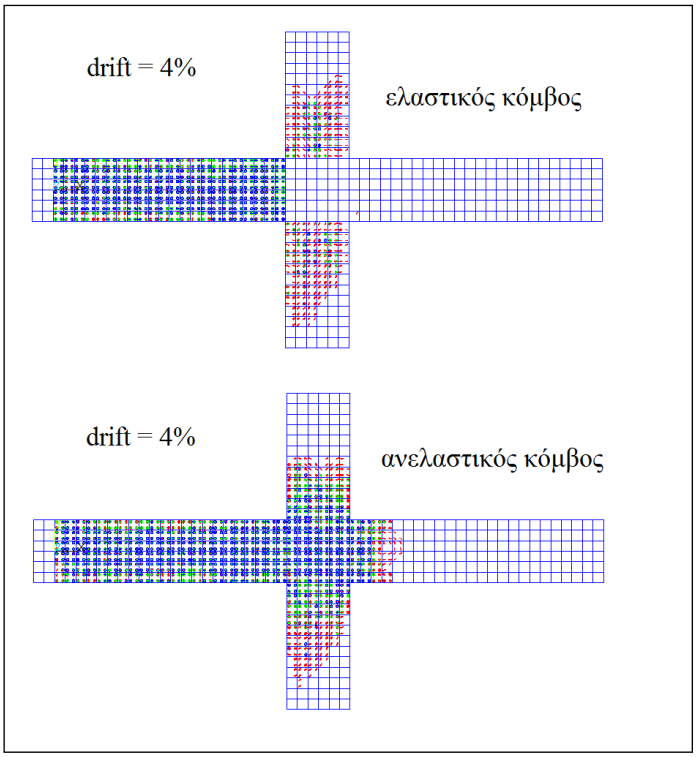
Σχήμα 6.35. Περιβάλλουσα τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου δοκιμίου Α2

Η απορροφούμενη υστερητική ενέργεια σε κάθε κύκλο φόρτισης για την ανάλυση με ελαστικό κόμβο συγκρίνεται με την αντίστοιχη απορρόφηση για κόμβο με ανελαστική συμπεριφορά. Είναι φανερή η μειωμένη ικανότητα για απορρόφηση ενέργειας του ανελαστικού κόμβου καθώς και η διεύρυνση της απόκλισης με τον ελαστικό, συναρτήσει της αύξησης των επιβαλλόμενων μετατοπίσεων.



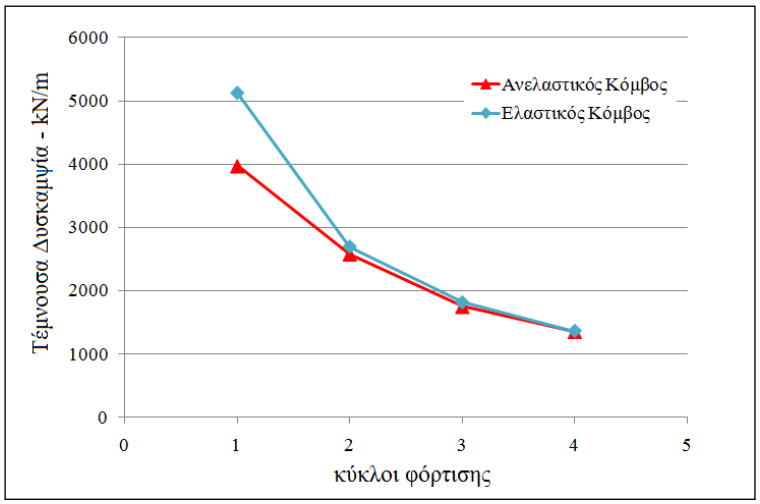
Σχήμα 6.36. Σύγκριση απορροφούμενης υστερητικής ενέργειας δοκιμίου Α2 για ελαστικό και ανελαστικό κόμβο

Στο **Σχήμα 6.37** γίνεται σύγκριση της εικόνας ρηγμάτωσης του δοκιμίου Α2 για την περίπτωση ελαστικής και ανελαστικής συμπεριφοράς του κόμβου, στο 4% της σχετικής μετάθεσης ορόφου. Μπορεί να φανεί πως πέρα από το σώμα του κόμβου, οι δύο εικόνες ρηγμάτωσης δεν είναι πανομοιότυπες. Στον ανελαστικό κόμβο έχουμε ρηγμάτωση και στη δεξιά (αφόρτιστη δοκό), στην παρειά του κόμβου λόγω αστοχίας της συνάφειας κάτι που δεν συμβαίνει για τον ελαστικό κόμβο αφού οι διαμήκεις οπλισμοί της δοκού αγκυρώνουν πλήρως στο σώμα του. Επίσης στην ανάλυση με ανελαστικό κόμβο παρατηρείται πιο εκτεταμένη ρηγμάτωση στο υποστύλωμα, με περισσότερες δεύτερες (πράσινο χρώμα) ρωγμές.



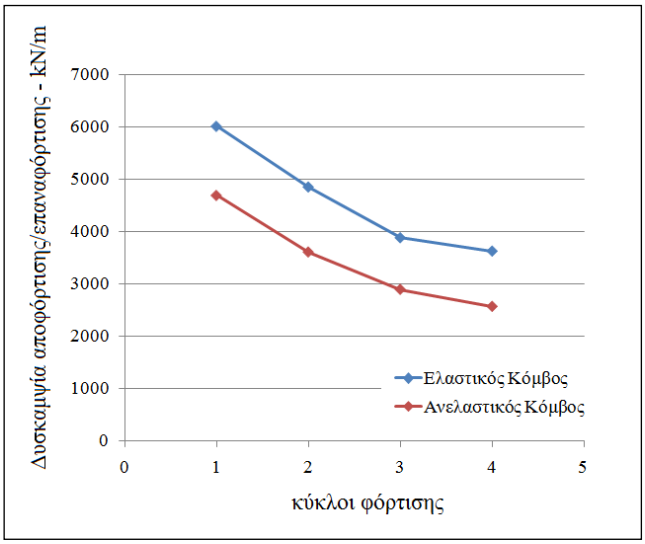
Σχήμα 6.37. Ρηγμάτωση δοκιμίου Α2 για ελαστική και ανελαστική συμπεριφορά κόμβου

Παρακάτω στο **Σχήμα 6.38** φαίνεται η μεταβολή της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας, όπως ορίστηκε και για το **Σχήμα 6.10**, συναρτήσει αυξανόμενων κύκλων φόρτισης.



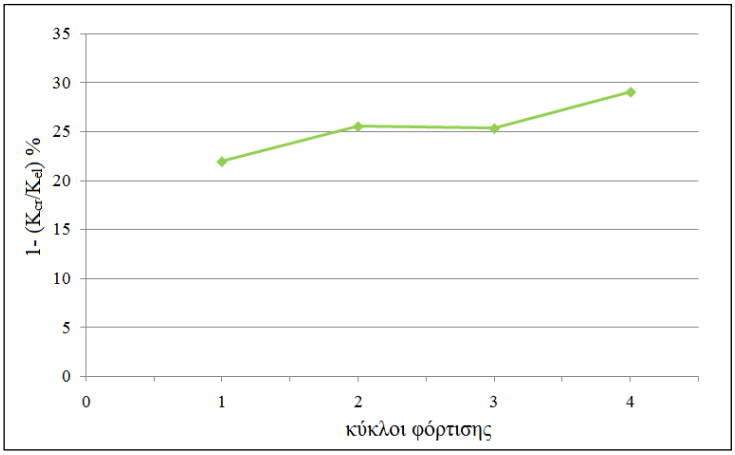
Σχήμα 6.38. Σύγκριση της μεταβολής της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας του δοκιμίου Α2 για ελαστικό και ανελαστικό κόμβο

Όπως είναι φανερό από τη σύγκριση των υστερητικών κύκλων στο **Σχήμα 6.30**, η δυσκαμψία φόρτισης - αποφόρτισης - επαναφόρτισης, για την ανάλυση με ελαστικό κόμβο, είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης δυσκαμψίας που αναπτύσσει ο ανελαστικός κόμβος. Η διαφορά αυτή δεν μπορεί να αποτυπωθεί ξεκάθαρα μέσω της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας λόγω του ορισμού της (**Σχήμα 6.6**). Επομένως υπολογίζεται η δυσκαμψία αποφόρτισης / επαναφόρτισης ως η κλίση της ευθείας που συνδέει την κορυφή κάθε κύκλου στις θετικές τιμές σχετικής μετάθεσης ορόφου με το αντίστοιχο σημείο μηδενισμού της τέμνουσας ορόφου (**Σχήμα 6.39**).



Σχήμα 6.39. Δυσκαμψία αποφόρτισης / επαναφόρτισης για ελαστικό και ανελαστικό κόμβο

Στο **Σχήμα 6.40** φαίνεται η μεταβολή της διαφοράς μεταξύ της δυσκαμψίας του δοκιμίου με ελαστικό και ανελαστικό κόμβο συναρτήσει των κύκλων φόρτισης. Παρατηρείται πως, όχι μόνο η δυσκαμψία που αναπτύσσει ο πραγματικός κόμβος είναι μικρότερη κατά 25% κατά μέσο όρο από την αντίστοιχη δυσκαμψία για ελαστικό κόμβο, αλλά αυτή η διαφορά αυξάνεται με τους κύκλους φόρτισης και την αύξηση του εύρους των επιβαλλόμενων μετατοπίσεων.



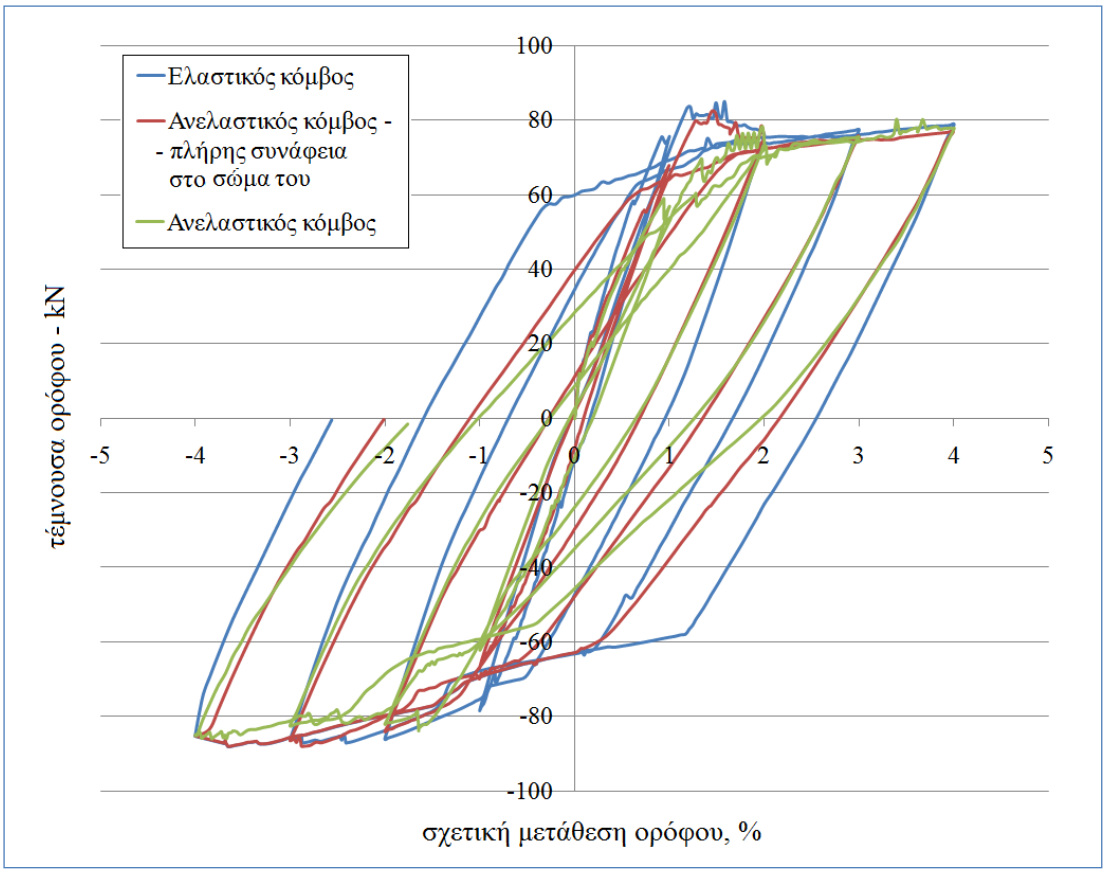
Σχήμα 6.40. Αύξηση της διαφοράς μεταξύ της δυσκαμψίας ελαστικού - ανελαστικού κόμβου συναρτήσει των κύκλων φόρτισης

6.1.3. Ανάλυση με πλήρη αγκύρωση των οπλισμών της δοκού στο σώμα του κόμβου

Στο **Σχήμα 6.41**, γίνεται παράθεση των υστερητικών βρόχων για επίλυση με ελαστικό και με ανελαστικό κόμβο όπως παραπάνω (**Σχήμα 6.30**) με την καμπύλη που προκύπτει από την ανάλυση για κόμβο όπου επιτρέπεται η ρηγμάτωση και η μη-γραμμική συμπεριφορά του σκυροδέματος, αλλά θεωρείται πως οι διαμήκεις ράβδοι της δοκού έχουν πλήρη συνάφεια χωρίς ολίσθηση μέσα στο σώμα του κόμβου.

Από τη σύγκριση ελαστικού κόμβου (μπλε γραμμή) και ανελαστικού κόμβου με πλήρη συνάφεια εντός του κόμβου (κόκκινη γραμμή), γίνεται φανερή η επιρροή της διαρροής των οπλισμών και από πλευράς σκυροδέματος, μόνο της ρηγμάτωσης του, στη δυσκαμψία του δοκιμίου, όπως αναλύθηκε και παραπάνω. Επιπλέον, από τη σύγκριση με τον ανελαστικό κόμβο (πράσινη γραμμή), διαπιστώνουμε την επιρροή της απομείωσης συνάφειας και της επακόλουθης ολίσθησης των ράβδων της δοκού εντός του κόμβου, στη στένωση (pinching) των υστερητικών βρόχων αλλά και στην περεταίρω μείωση της δυσκαμψίας κυρίως στους κλάδους επαναφόρτισης. Με βάση τα παραπάνω επιβεβαιώνεται πως η καθολική ανελαστική απόκριση του κόμβου καθορίζεται κυρίως από αυτά τα δύο φαινόμενα, τη ρηγμάτωση και ανελαστική καταστατική συμπεριφορά του σκυροδέματος σε

θλίψη και τη διαρροή και ολίσθηση των ράβδων του οπλισμού λόγω απώλειας της συνάφειας.



Σχήμα 6.41. Σύγκριση υστερητικών βρόχων δοκιμίου Α2 συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων προσομοίωσης

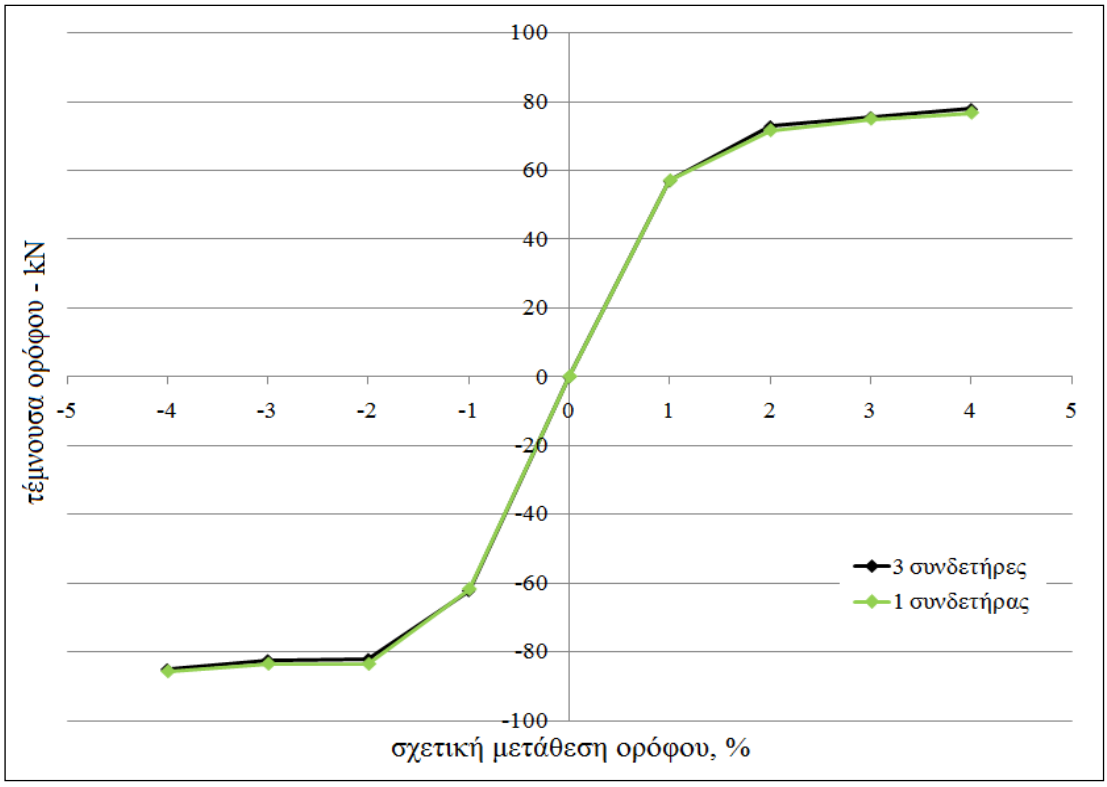
Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί πως, τουλάχιστον όσον αφορά την προσομοίωση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενες δράσεις, με το πρόγραμμα ANSYS, η παραδοχή πλήρους συνάφειας μεταξύ χάλυβα - σκυροδέματος δεν αποδίδει ρεαλιστικά την πραγματική συμπεριφορά. Αυτό φαίνεται από την παραπάνω σύγκριση για την περίπτωση που αγνοούμε τη σχέση συνάφειας - ολίσθησης μόνο μέσα στο σώμα του κόμβου αλλά και ποιό έντονα σε διερευνητικές αναλύσεις που έγιναν με πλήρη συνάφεια για όλους τους οπλισμούς του δοκιμίου που όμως δεν παρατίθενται εδώ.

6.1.4. Ανάλυση του ανελαστικού κόμβου με θεώρηση μικρότερου αριθμού συνδετήρων στον κόμβο

Όπως έχει αναφερθεί, στο σώμα του κόμβου για το πειραματικό δοκίμιο Α2 είχε τοποθετηθεί εγκάρσιος οπλισμός υπό τη μορφή τριών κλειστών οριζόντιων συνδετήρων

(**Σχήμα 5.2**) και αυτό προσομοιώθηκε και στην αρχική ανάλυση της παρούσης (**Σχήμα 5.8**). Για τη διερεύνηση της επιρροής του αριθμού των συνδετήρων στη συμπεριφορά του κόμβου, αφαιρέθηκαν από το προσομοίωμα οι δύο συνδετήρες καθ' ύψος εκατέρωθεν του μεσαίου διατηρώντας μόνο το μεσαίο συνδετήρα και έγινε σύγκριση σε όρους περιβάλλουσας τέμνουσας ορόφου, τάσεως συνδετήρων, κυρίων τάσεων στο σώμα του κόμβου. Σκοπός της παραμετρικής αυτής ανάλυσης, ήταν να διερευνηθεί η συμπεριφορά ενός κόμβου που προσομοιώνει τις διατάξεις όπλισης ενός υφιστάμενου στοιχείου, σχεδιασμένου με παλαιότερους Κανονισμούς.

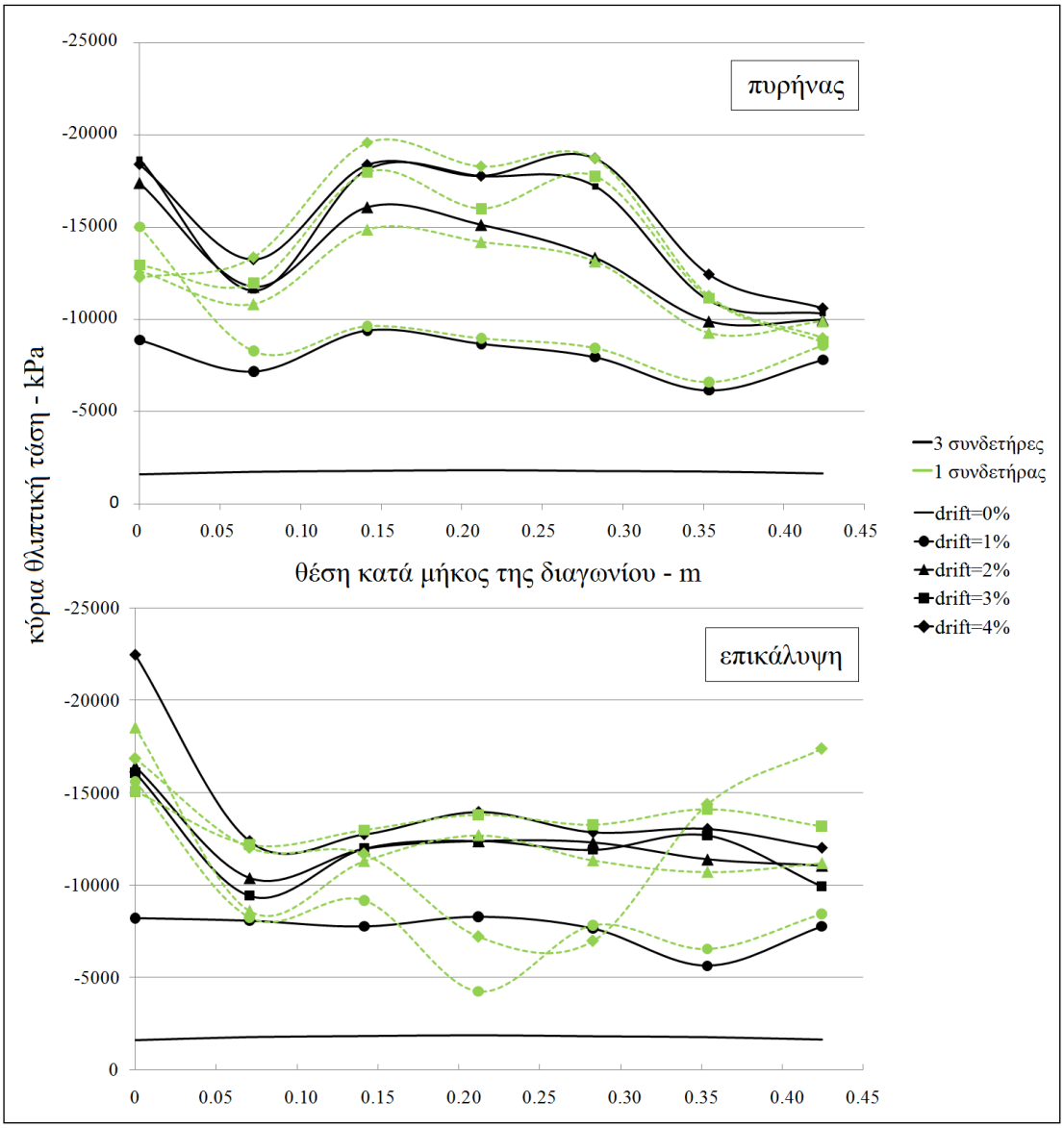
Στο **Σχήμα 6.42** γίνεται η σύγκριση της περιβάλλουσας καμπύλης τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου για τις δύο επιλύσεις. Δεν παρατηρείται καμία απομείωσης αντίστασης λόγω της μείωσης του αριθμού των συνδετήρων.



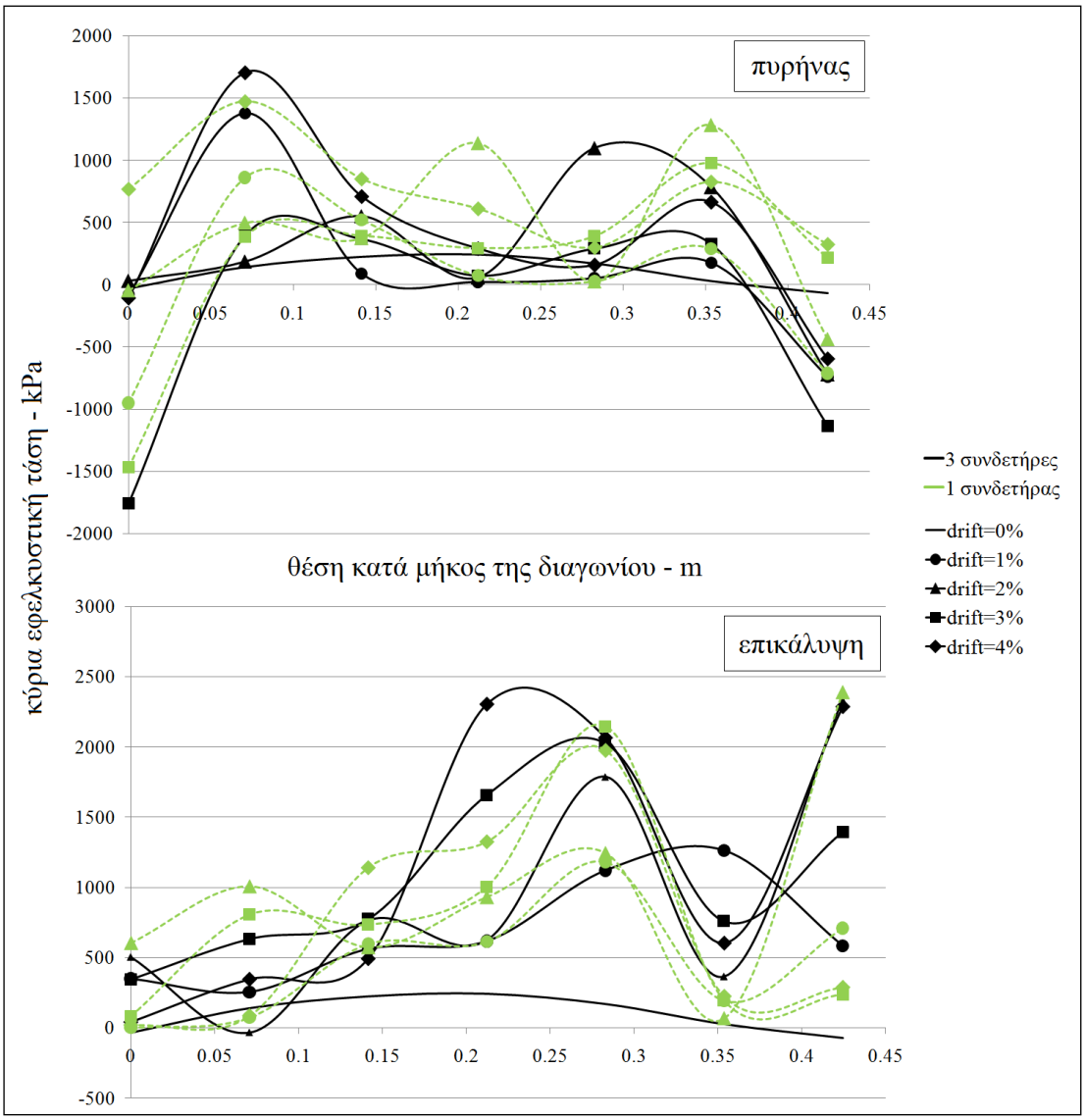
Σχήμα 6.42. Περιβάλλουσα τέμνουσας ορόφου για την προσομοίωση με ένα συνδετήρα

Στο **Σχήμα 6.43** και **Σχήμα 6.44**, φαίνονται αντίστοιχα η κύρια θλιπτική τάση κατά μήκος της κύριας διαγωνίου κατά το σχηματισμό του θλιπτήρα σκυροδέματος και η κύρια εφελκυστική τάση κάθετα στο διαγώνιο θλιπτήρα σύμφωνα με το **Σχήμα 6.14**. Η σύγκριση γίνεται για τα ΠΣ σκυροδέματος στον πυρήνα του κόμβου και για τα ΠΣ της επικάλυψης. Στο σκυρόδεμα της επικάλυψης παρατηρούμε μια έντονη πτώση της κύριας θλιπτικής τάσης, για σχετική μετάθεση ορόφου ίση με 4%, που είναι και η μέγιστη τιμή μετατόπισης

που επιβάλλεται κατά την ανάλυση. Η πτώση αυτή πιθανόν οφείλεται στην πιο έντονη ρηγμάτωση του σκυροδέματος της επικάλυψης λόγω της μείωσης των συνδετήρων. Αντίθετα, στο σκυρόδεμα του πυρήνα, δεν παρατηρείται αντίστοιχη πτώση για την ίδια τιμή ακραίας σχετικής μετατόπισης, γεγονός που συνηγορεί στο ότι πως δεν έχουμε πτώση της συνολικής αντοχής του δοκιμίου μιας και ο διαγώνιος θλιπτήρας παραμένει ουσιαστικά άθικτος. Από τη σύγκριση της κύριας εφελκυστικής τάσης κάθετα στο θλιπτήρα, στον πυρήνα του κόμβου, δεν προκύπτει κάποια ξεκάθαρη αύξηση της τιμής της, όπως θα αναμενόταν, λόγω της μείωσης του εγκάρσιου οπλισμού και δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα.



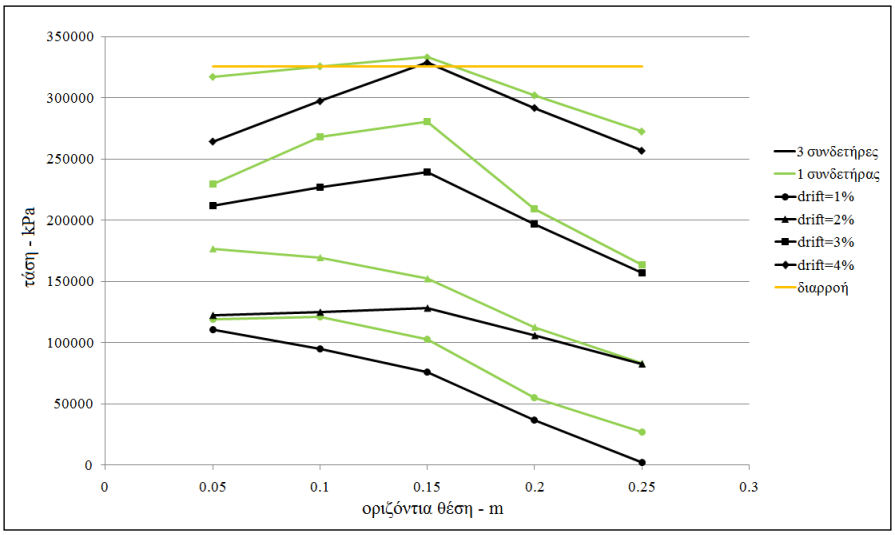
Σχήμα 6.43. Κύρια θλιπτική τάση στα σημεία της κύριας διαγωνίου για διαφορετικό αριθμό συνδετήρων



Σχήμα 6.44. Κύρια εφελκυστική τάση στα σημεία της κύριας διαγωνίου για διαφορετικό αριθμό συνδετήρων

Παρακάτω συγκρίνονται οι τάσεις που αναπτύσσονται κατά μήκος του μεσαίου συνδετήρα του κόμβου για τις δύο επιλύσεις. Όπως αναμενόταν, στην περίπτωση που ο μεσαίος συνδετήρας είναι ο μοναδικός στο σώμα του κόμβου, παραλαμβάνει και μεγαλύτερη ένταση που όμως δεν φαίνεται να τείνει να καλύψει την απώλεια των άλλων δύο (για παρόμοια συνολική αντίσταση του σώματος του κόμβου). Το γεγονός αυτό συνηγορεί στην καθοριστική σημασία που έχει ο θλιπτήρας σκυροδέματος στην αντίσταση του κόμβου Α2. Πάντως έχουμε μια μέση αύξηση 20% στην τάση που παραλαμβάνει ο μεσαίος (μοναδικός στο σώμα του κόμβου) συνδετήρας, ενώ υπάρχει μια τάση να συνεισφέρει μεγαλύτερο μήκος του, κατά πλάτος με αποτέλεσμα να διαρρέει όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.44** για σχετική μετατόπιση 4%. Συμπεραίνουμε πως μεγαλύτερο τμήμα του κόμβου

ρηγματώνεται ενώ οι ρωγμές που δημιουργούνται φαίνεται πως δεν ξανακλείνουν κατά την ανακύκλιση.



Σχήμα 6.45. Μεταβολή των τάσεων κατά μήκος του μεσαίου συνδετήρα του κόμβου

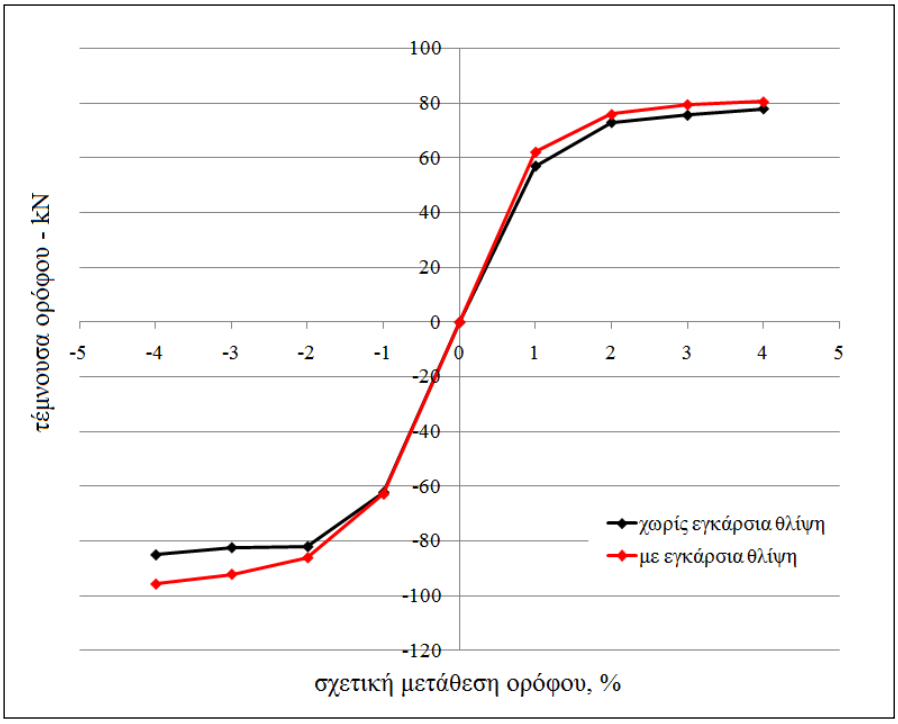
Από τους διάφορους Κανονισμούς, προβλέπονται συνδετήρες στο σώμα του κόμβου με σκοπό γενικά τον περιορισμό της κύριας εφελκυστικής τάσης και την αποφυγή της ρηγμάτωσης, την περίσφιγξη του διαγώνιου θλιπτήρα σκυροδέματος και τη λειτουργία μηχανισμού δικτυώματος για τη μεταφορά της τέμνουσας δύναμης. Μάλιστα, σύμφωνα με τις οδηγίες σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8 αλλά και του ACI 318 (Παράρτημα A) απαιτείται πολλαπλάσιο εμβαδό συνδετήρων από αυτό που είχε τοποθετηθεί και στο αρχικό δοκίμιο που εξετάστηκε πειραματικά.

Καταρχάς, από την παρούσα ανάλυση, ακόμη και η περεταίρω μείωση του αριθμού των συνδετήρων δεν φάνηκε να επηρεάζει τη φέρουσα ικανότητα του κόμβου τουλάχιστον μέχρι το 4% της σχετικής μετάθεσης ορόφου. Ως εκ τούτου, για το συγκεκριμένο κόμβο ο διαγώνιος θλιπτήρας σκυροδέματος φαίνεται να μπορεί να μεταφέρει τις διατμητικές δυνάμεις που ασκούνται χωρίς την ταυτόχρονη συνεισφορά του λεγόμενου μηχανισμού δικτυώματος. Αυτό επιβεβαιώνεται καθώς με τη μείωση του αριθμού των συνδετήρων (οπότε ο μηχανισμός δικτυώματος δεν θα μπορούσε να σχηματισθεί) δεν υπάρχει και αντίστοιχη αύξηση των τάσεων που μεταφέρονται απ' το διαγώνιο θλιπτήρα (**Σχήμα 6.43**, drift=1%, 2%, 4%). Όσον αφορά τη ρηγμάτωση, δεν παρατηρείται διαφορά στις προβλέψεις της ανάλυσης με ένα μονό συνδετήρα, ούτε ως προς τη σχετική μετατόπιση αρχικής ρηγμάτωσης ούτε και ως προς τη συνολική εικόνα ενώ όπως αναφέρθηκε δεν διαπιστώνουμε και σημαντική αλλαγή στην κύρια εφελκυστική τάση.

Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί πως για τη διατήρηση της ακεραιότητας του θλιπτήρα σκυροδέματος, για το συγκεκριμένο κόμβο, αρκεί ακόμα και το μισό ή μικρότερο ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού από αυτό που προβλέπουν οι Κανονισμοί, τουλάχιστον για τιμές σχετικής μετάθεσης ορόφου έως 4%. Η εικόνα της ρηγμάτωσης που δεν παρουσίασε διαφορά μεταξύ του κόμβου με έναν και τρείς συνδετήρες, πιθανόν να περιοριζόταν με την τοποθέτηση του προβλεπόμενου από τους Κανονισμούς εμβαδού συνδετήρων, κάτι που όμως δεν διερευνήθηκε εδώ. Τέλος, ο λεγόμενος μηχανισμός δικτυώματος, όπως ορίστηκε στο Κεφ. 2.2.4, δεν φαίνεται να συνεισφέρει στην παραλαβή της τέμνουσας, τουλάχιστον όσο είναι ακέραιος και λειτουργεί ο διαγώνιος θλιπτήρας σκυροδέματος.

6.1.5. Ανάλυση με επιβολή εγκάρσιας θλίψης στον κόμβο

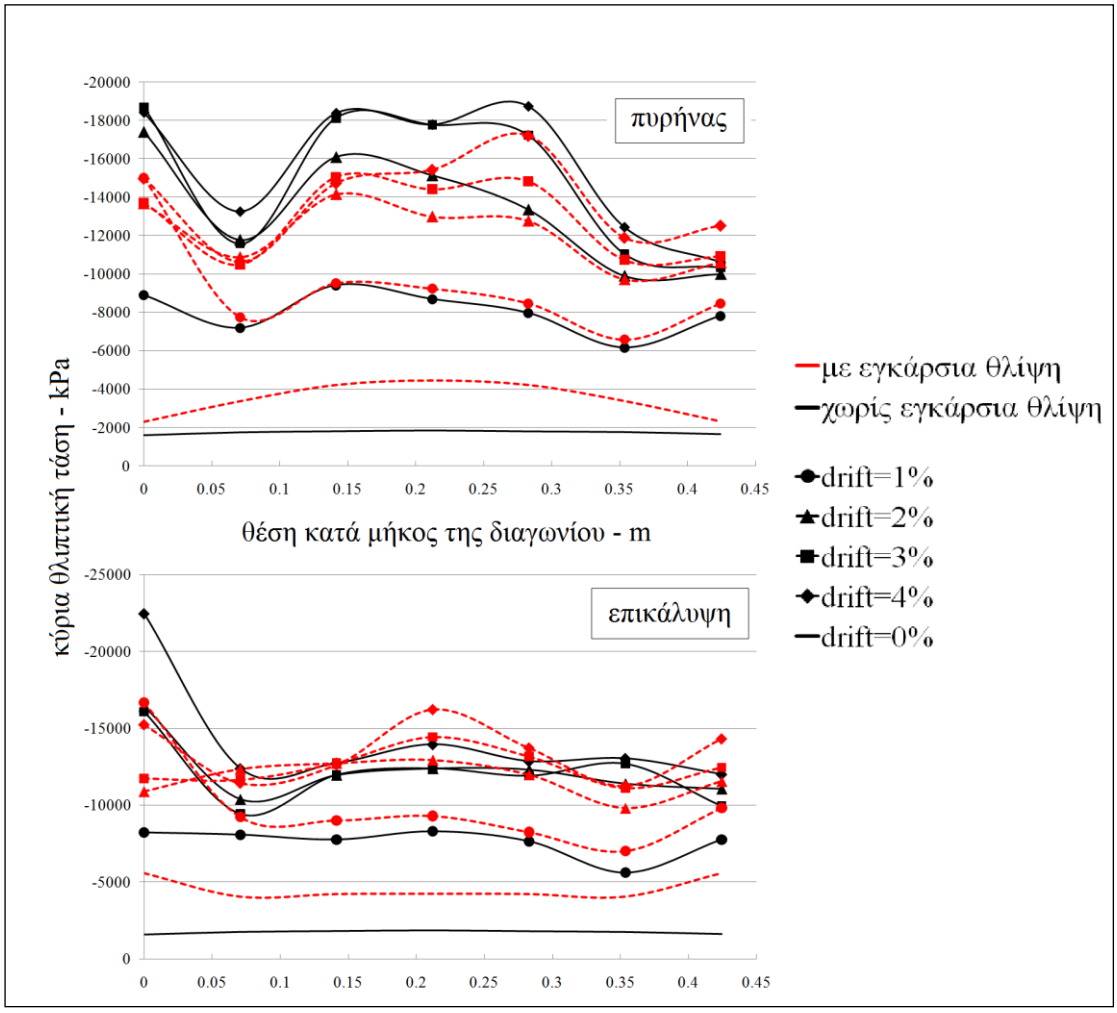
Παρακάτω παρουσιάζεται η διερεύνηση της συμπεριφοράς του κόμβου Α2, στην περίπτωση που ασκείται μια ομοιόμορφη εγκάρσια θλιπτική τάση σε όλο το σώμα. Η εγκάρσια αυτή θλιπτική τάση μπορεί να προσομοιώνει είτε μια σχετική εγκάρσια περίσφιγξη που προσφέρει η ύπαρξη δοκών εγκαρσίως είτε την περίσφιγξη που μπορεί να προκαλείται τεχνητά μέσω κάποιας επέμβασης. Για την ανάλυση, ασκείται στο σώμα του κόμβου κατανεμημένο θλιπτικό φορτίο ίσο με $0.2Af_c$, όπου A το εμβαδόν της παρειάς του κόμβου και f_c η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.



Σχήμα 6.46. Περιβάλλουσα τέμνουσας ορόφου για την προσομοίωση με εγκάρσια θλίψη

Η αντοχή του δοκιμίου λόγω της επιβολής της εγκάρσιας θλίψης παρουσιάζει αύξηση της τάξης του 5-10% σε κάθε κύκλο φόρτισης, όπως φαίνεται και στην περιβάλλουσα καμπύλη τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου.

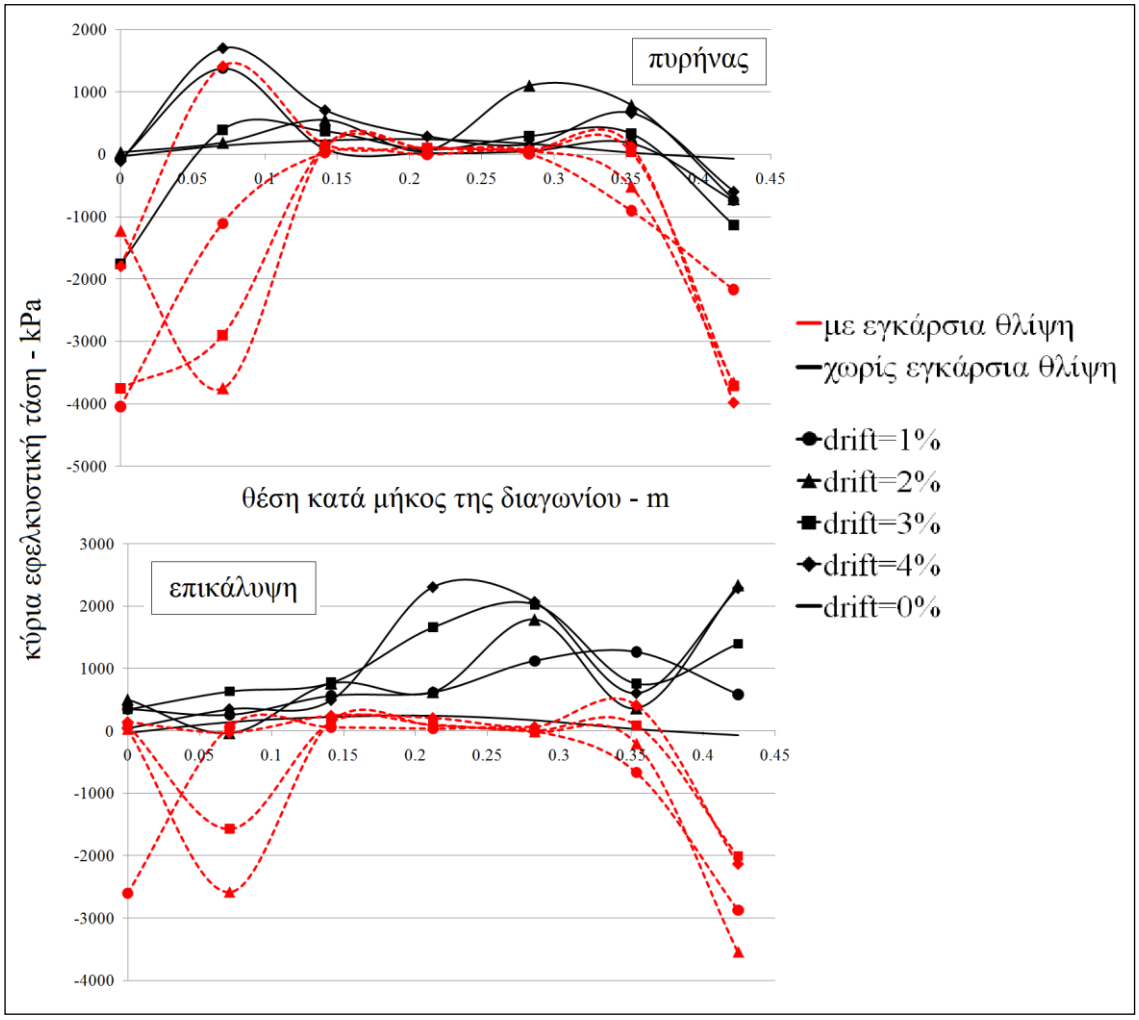
Η κύρια θλιπτική τάση στην κύρια διαγώνιο του κόμβου κατά το σχηματισμό του διαγώνιου θλιπτήρα σκυροδέματος, εμφανίζει αρκετά μικρότερες τιμές στο σκυρόδεμα του πυρήνα, σε σχέση με την αντίστοιχη του πρωτότυπου κόμβου χωρίς εγκάρσια θλίψη (**Σχήμα 6.47**).



Σχήμα 6.47. Κύρια θλιπτική τάση στα σημεία της κύριας διαγωνίου για προσομοίωση με εγκάρσια θλίψη

Όσον αφορά την κύρια εφελκυστική τάση που αναπτύσσεται κάθετα στο διαγώνιο θλιπτήρα σκυροδέματος, η τιμή της περιορίζεται σημαντικά, τουλάχιστον στο κέντρο του διαγώνιου θλιπτήρα, όπου η εντατική κατάσταση είναι πιο ξεκάθαρη (**Σχήμα 6.48**). Πάντως, η κατανομή των ρωγμών που προέκυψε από την ανάλυση δεν παρουσίασε διαφορά ούτε ως

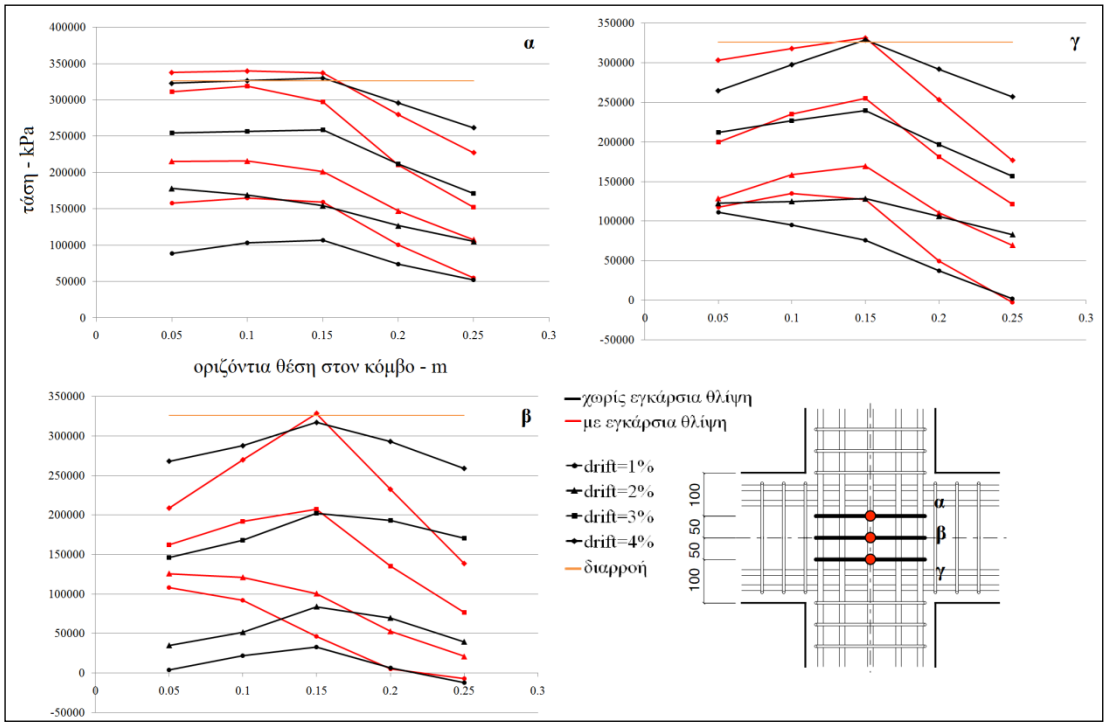
προς τη σχετική μετατόπιση αρχικής ρηγμάτωσης εντός του κόμβου ούτε και στη συνολική εικόνα, εκτός από το γεγονός ότι άλλαξε η διεύθυνση σχηματισμού των ρωγμών, καθώς λόγω της εγκάρσιας θλίψης άλλαξε και η διεύθυνση των κυρίων τάσεων.



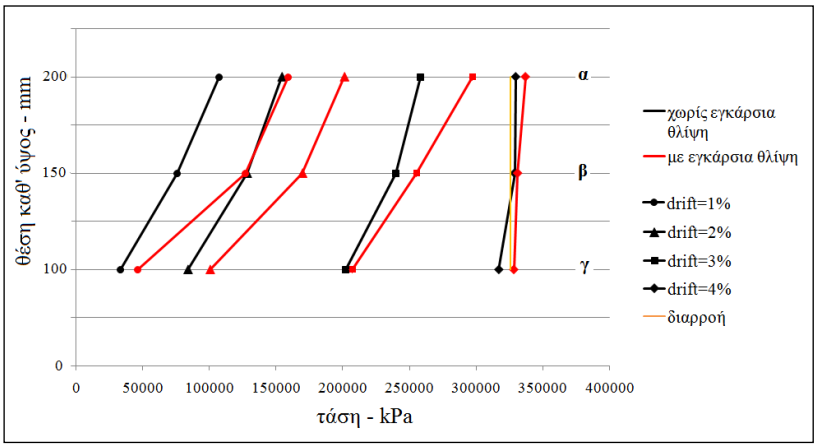
Σχήμα 6.48. Κύρια εφελκυστική τάση κάθετα στα σημεία της κύριας διαγωνίου για προσομοίωση με εγκάρσια πρόθλιψη

Η σύγκριση των τάσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος των τριών συνδετήρων του κόμβου για τις διάφορες τιμές της σχετικής μετάθεσης ορόφου, φαίνεται στο **Σχήμα 6.49**. Η αντίστοιχη εξέλιξη των τάσεων καθ' ύψος, στο μεσαίο σημείο κάθε συνδετήρα, φαίνεται στο **Σχήμα 6.50**. Από αυτό το σχήμα προκύπτει μια σημαντική αύξηση της έντασης που αναπτύσσεται στον εγκάρσιο οπλισμό, κυρίως στις αρχικές τιμές της σχετικής μετάθεσης ορόφου. Άρα υπάρχει αύξηση της (αρχικής) διόγκωσης του κόμβου λόγω αύξησης της δεύτερης κύριας τάσης σ_2 που εδώ λόγω της πρόθλιψης είναι αρνητική.

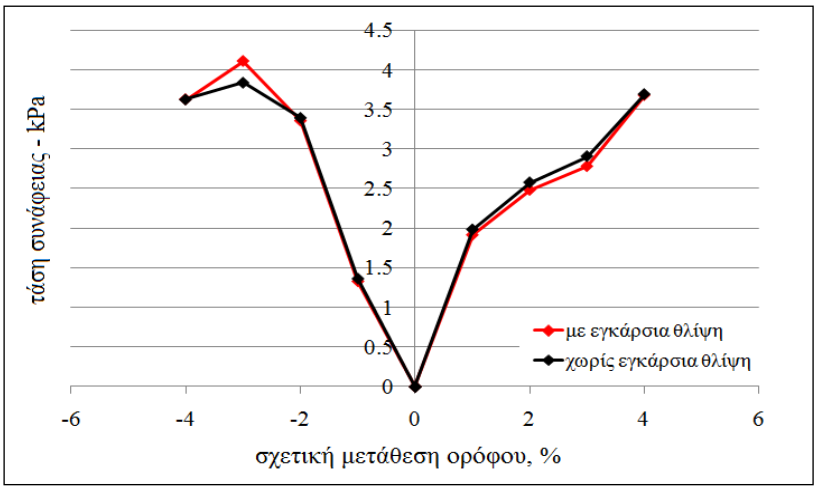
Από τη σύγκριση της εξέλιξης των τάσεων συνάφειας στους άνω διαμήκεις οπλισμούς της δοκού εντός του κόμβου (**Σχήμα 6.51**) δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια ευαισθησία στην αύξηση της σ_2. Πρέπει εν τούτοις να σημειωθεί ότι το φαινομενολογικό μοντέλο που υιοθετείται για την προσομοίωση της συνάφειας μεταξύ χάλυβα - σκυροδέματος, δεν είναι σε θέση να λαμβάνει υπόψη άμεσα την επιρροή της εγκάρσιας θλίψης και περίσφιγξης στη σχέση τάσεως συνάφειας - ολίσθησης, παρά μόνο έμμεσα, μέσω της αλλαγής των αντίστοιχων τιμών στα στοιχεία συνάφειας.



Σχήμα 6.49. Μεταβολή των τάσεων κατά μήκος των συνδετήρων του κόμβου Α2 για προσομοίωση με εγκάρσια πρόθλιψη



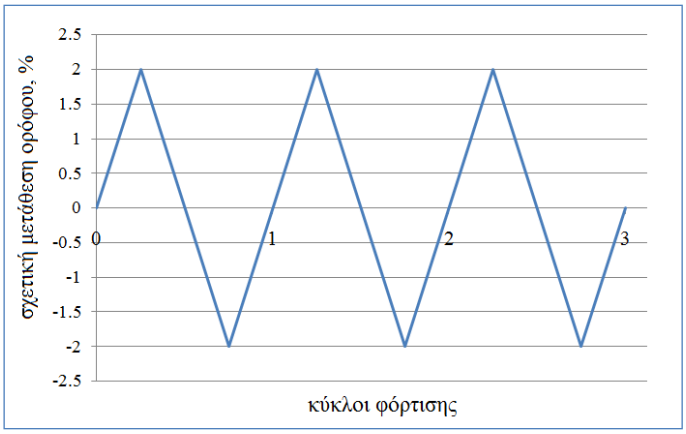
Σχήμα 6.50. Μεταβολή των τάσεων των συνδετήρων καθ' ύψος του κόμβου Α2 για προσομοίωση με εγκάρσια πρόθλιψη



Σχήμα 6.51. Μεταβολή της μέσης τάσης συνάφειας των άνω οπλισμών της δοκού εντός του κόμβου συναρτήσει της σχετικής μετάθεσης ορόφου, για προσομοίωση με εγκάρσια πρόθλιψη

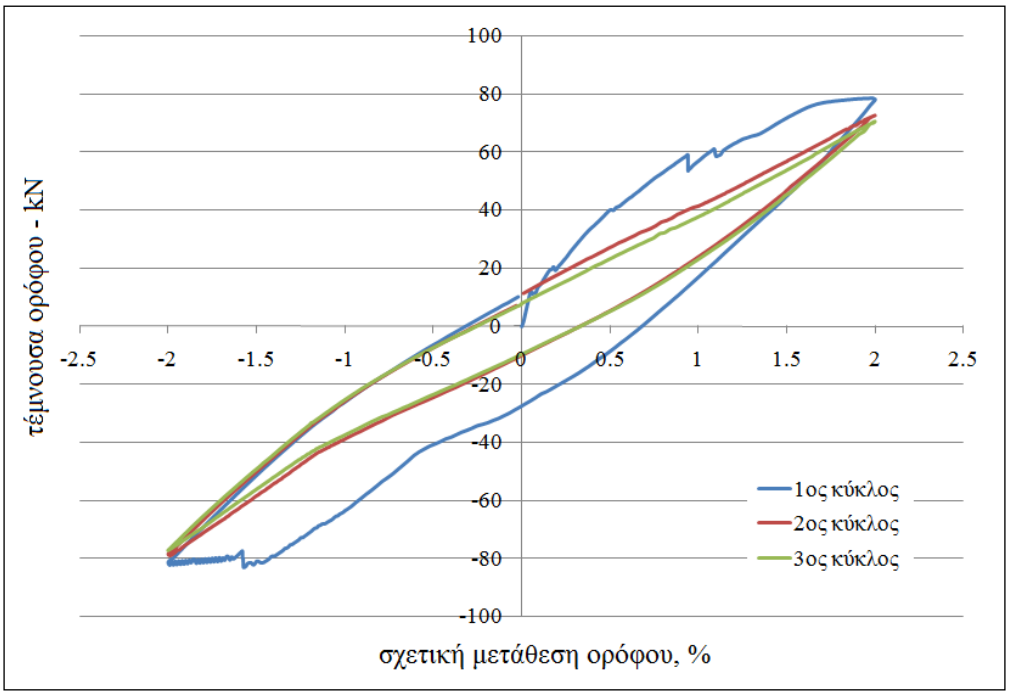
6.1.6. Ανάλυση για σταθερούς κύκλους φόρτισης μεγάλου εύρους

Για τη διερεύνηση της δυνατότητας της ανάλυσης να προσομοιώσει την απώλεια αντοχής ενός δοκιμίου που υποβάλλεται σε μεγάλο σταθερό εύρος ανακυκλίσεων, έγινε επίλυση με στοχευόμενη μετακίνηση ίση με το 2% της σχετικής μετάθεσης ορόφου και τρείς κύκλους φόρτισης (**Σχήμα 6.52**). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται παρακάτω σε όρους καμπύλης τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου, αντοχής, δυσκαμψίας και απορρόφησης υστερητικής ενέργειας.



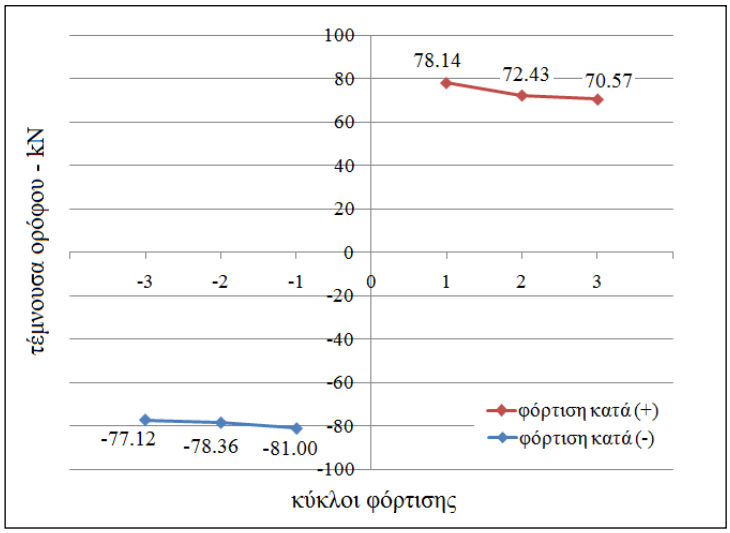
Σχήμα 6.52. Χρονοϊστορία ανάλυσης για σταθερούς κύκλους φόρτισης

Από την καμπύλη τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου, είναι εμφανής η στένωση των υστερητικών βρόχων μετά τον πρώτο κύκλο φόρτισης που όμως περιορίζεται σημαντικά μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου κύκλου (**Σχήμα 6.53**).



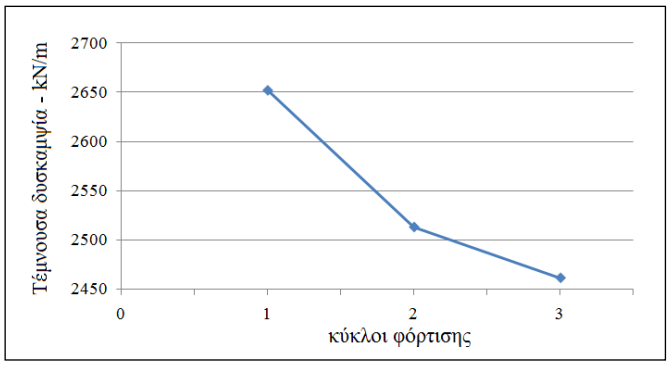
Σχήμα 6.53. Καμπύλη τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου για σταθερούς κύκλους φόρτισης

Στο **Σχήμα 6.54** φαίνεται η προοδευτική μείωση της συνολικής αντοχής του δοκιμίου συναρτήσει των σταθερών κύκλων για φόρτιση κατά (+) και κατά (-). Επιπλέον, πέραν της αντοχής, διακριτή είναι και η σταδιακή πτώση της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας του κόμβου (**Σχήμα 6.55**) καθώς και της δυνατότητας για απορρόφηση υστερητικής ενέργειας (**Σχήμα 6.56**).

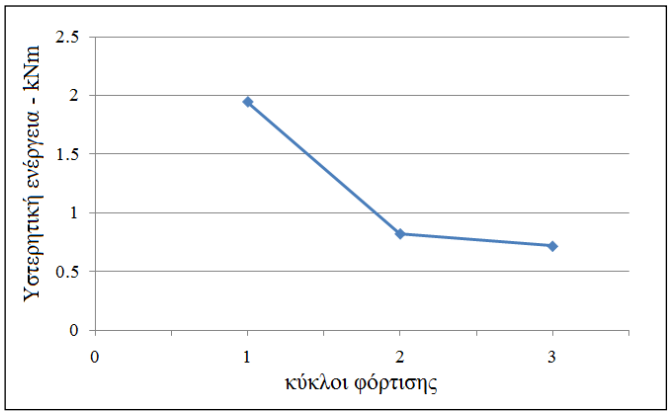


Σχήμα 6.54. Πτώση της αντοχής του δοκιμίου για σταθερούς κύκλους φόρτισης

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται πως το προσομοίωμα, μπορεί να προβλέψει την πτώση της αντοχής, δυσκαμψίας και απορροφούμενης ενέργειας που διαπιστώνεται από τα πειράματα για ένα στοιχείο που υποβάλλεται σε σταθερές, σχετικά μεγάλου εύρους ανακυκλίσεις.



Σχήμα 6.55. Μεταβολή της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας για σταθερούς κύκλους φόρτισης



Σχήμα 6.56. Μεταβολή της απορροφούμενης υστερητικής ενέργειας για σταθερούς κύκλους φόρτισης

6.2. ΔΟΚΙΜΙΟ Α1 - ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΚΟΜΒΟΣ

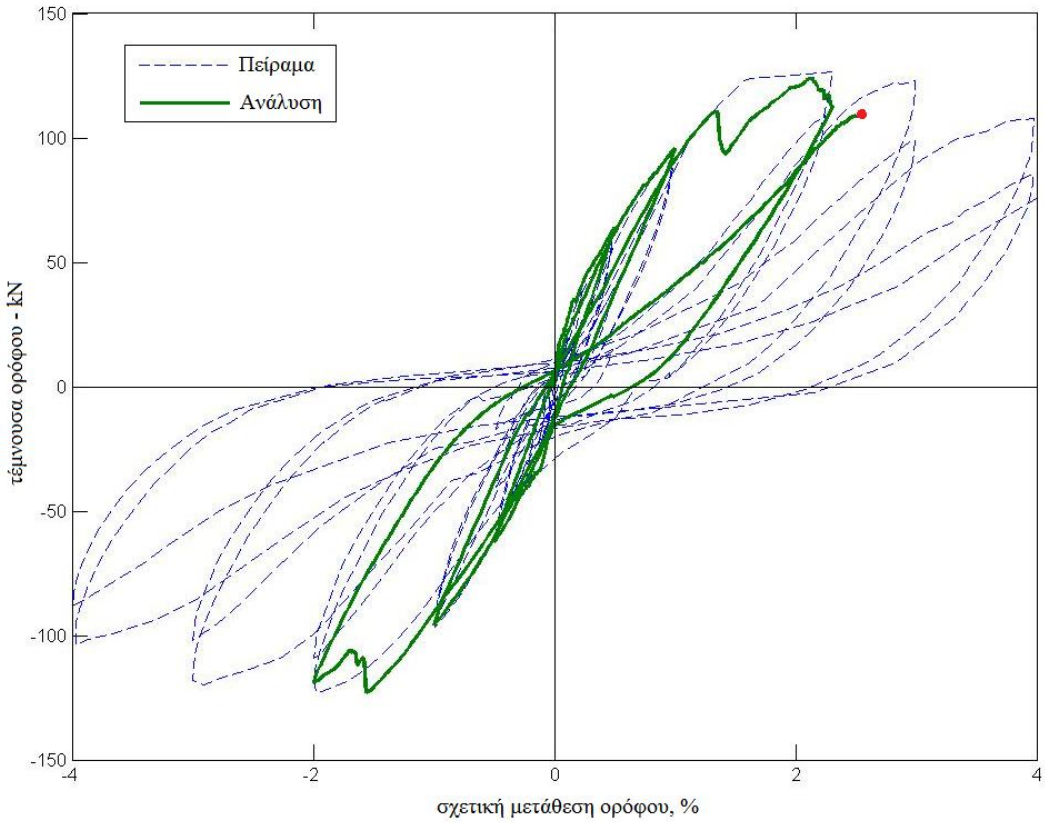
6.2.1. Κυρίως ανάλυση

Γενικά, η πειραματική συμπεριφορά του εσωτερικού κόμβου Α1, χαρακτηρίστηκε από εκτεταμένη ρηγμάτωση και, αργότερα, αποφλοίωση του σκυροδέματος του πυρήνα, ήδη από μικρές τιμές της σχετικής μετάθεσης ορόφου. Επιπλέον, έντονη ήταν και η ολίσθηση των διαμήκων ράβδων μέσα στο σώμα του κόμβου λόγω της καταστροφής της συνάφειας η οποία τοπικά γίνεται πλήρης.

Η προσομοίωση αποτυπώνει σωστά τη συμπεριφορά αυτή, όπως θα φανεί και παρακάτω, όμως δεν καθίσταται δυνατό να ολοκληρωθεί η ανάλυση με επιβολή της πλήρους χρονοϊστορίας της φόρτισης έως τη μέγιστη σχετική μετατόπιση, καθώς προκύπτουν προβλήματα αδυναμίας σύγκλισης. Στον τέταρτο κύκλο φόρτισης, για θετική φορά και τιμή 2.5% της σχετικής μετάθεσης ορόφου (**Σχήμα 6.57**), όλα πλέον τα σημεία ολοκλήρωσης των ΠΣ του σκυροδέματος εντός του κόμβου έχουν ρηγματωθεί κατά τις τρείς κύριες διευθύνσεις, με αποτέλεσμα να μην μπορεί πλέον να επιτευχθεί αριθμητική σύγκλιση. Προβλήματα αριθμητικής αστάθειας κατά την ανάλυση προκύπτουν και στον προηγούμενο κύκλο φόρτισης, με στιγμιαία πτώση της αντοχής που φαίνεται στο **Σχήμα 6.57** τόσο για θετική όσο και αρνητική φορά φόρτισης.

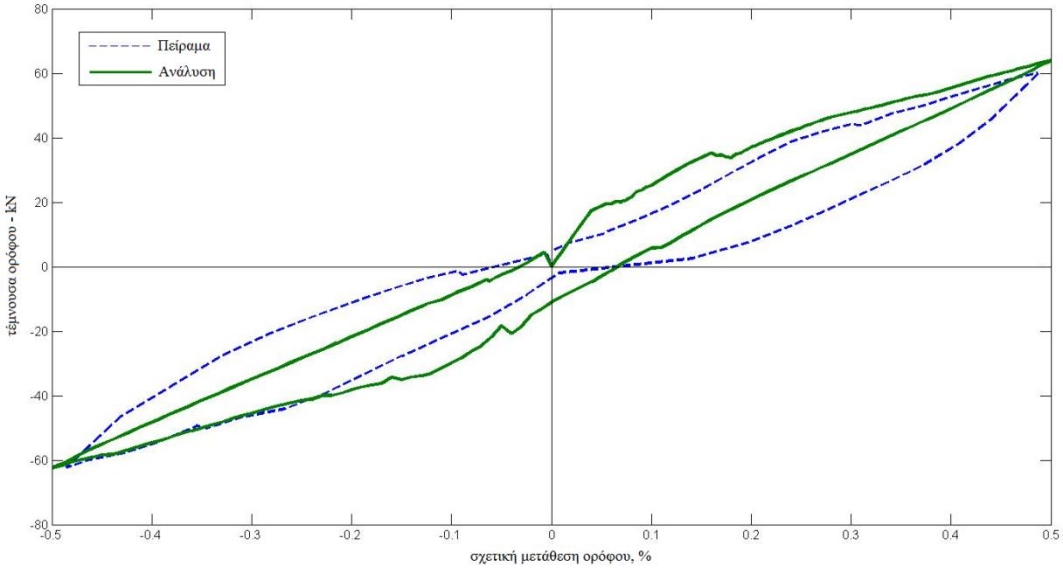
6.2.1.1. Σύγκριση αναλυτικών - πειραματικών αποτελεσμάτων

Στο **Σχήμα 6.57** γίνεται σύγκριση των αναλυτικών με τα πειραματικά αποτελέσματα, υπό τη μορφή καμπυλών τέμνουσας - σχετικής μετάθεσης ορόφου για την ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

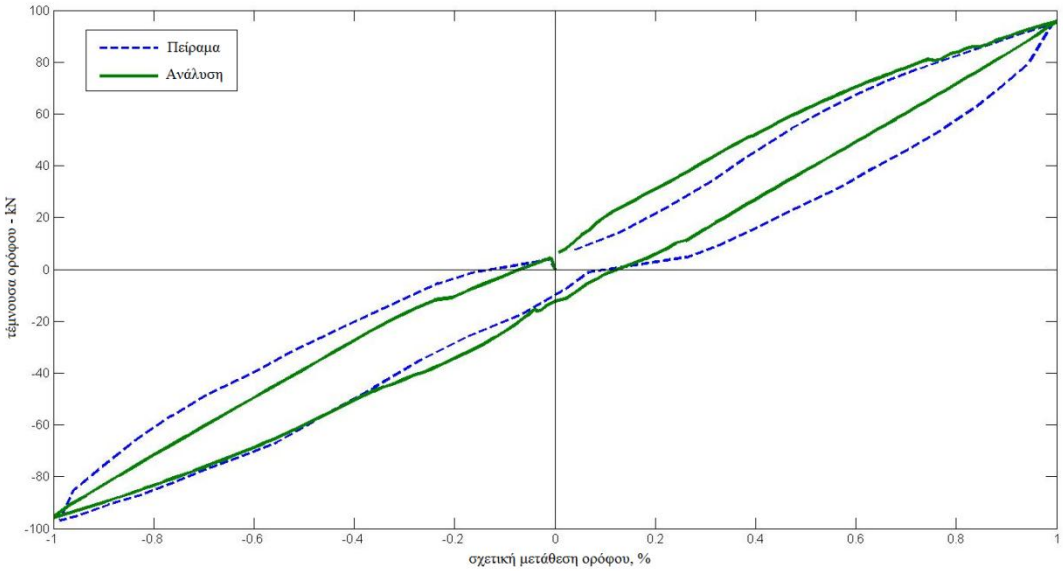


Σχήμα 6.57. Σχέση τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου όπως προέκυψαν από το πείραμα (διακεκομμένη γραμμή) και την ανάλυση (συνεχής γραμμή) για το δοκίμιο Α1

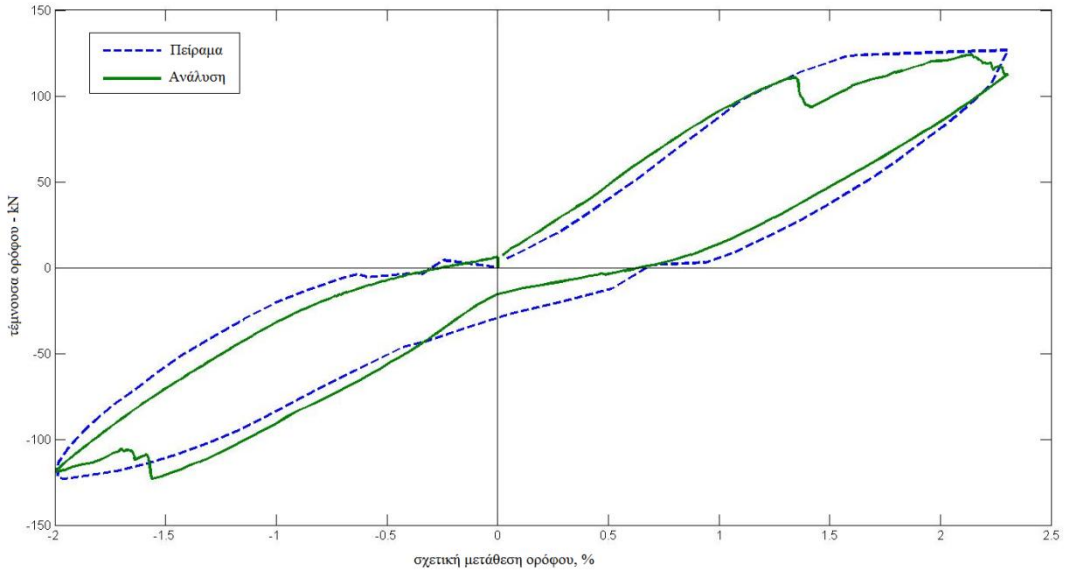
Στη συνέχεια γίνεται η ίδια σύγκριση για μεμονωμένους υστερητικούς κύκλους που αντιστοιχούν σε σχετική μετάθεση ορόφου: 0.5%, 1%, και 2% αντίστοιχα (**Σχήμα 6.58**, **Σχήμα 6.59**, **Σχήμα 6.60**)



Σχήμα 6.58. Σύγκριση υστερητικών κύκλων δοκιμίου Α1 για σχετική μετάθεση ορόφου 0.5%



Σχήμα 6.59. Σύγκριση υστερητικών κύκλων δοκιμίου Α1 για σχετική μετάθεση ορόφου 1%



Σχήμα 6.60. Σύγκριση υστερητικών κύκλων δοκιμίου Α1 για σχετική μετάθεση ορόφου 2%

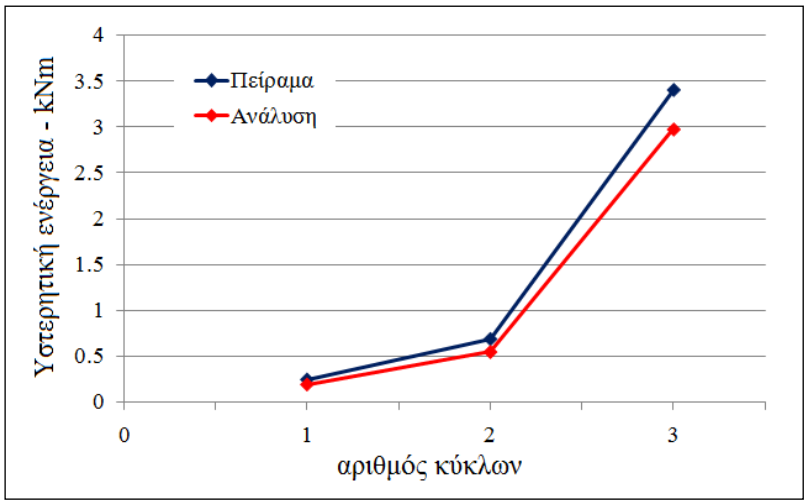
Οι μέγιστες τιμές τέμνουσας ορόφου που παρατηρήθηκαν στο πείραμα και στην ανάλυση φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

	Μέγιστη Τέμνουσα ορόφου (kN)	
	Πείραμα	**Ανάλυση**
+	**126.57**	**124.033**
-	**-122.8**	**-122.938**

Πίνακας 6.2. Μέγιστες τιμές τέμνουσας ορόφου του δοκιμίου Α1 για το πείραμα και την ανάλυση

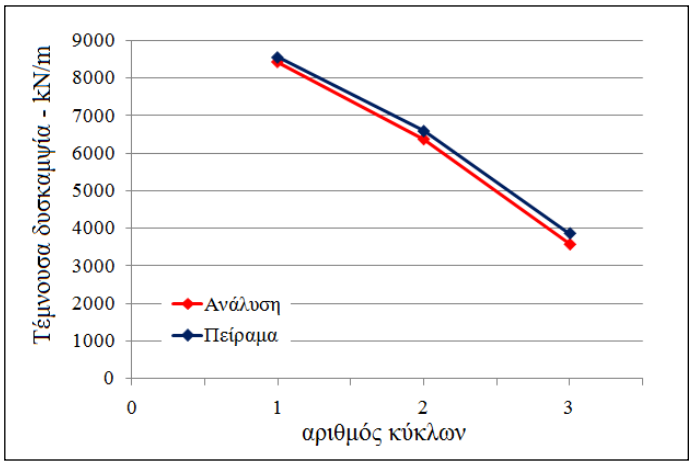
Στο **Σχήμα 6.61**. γίνεται σύγκριση της απορροφούμενης υστερητικής ενέργειας, για τους τρείς κύκλους φόρτισης, όπως προέκυψε από το πείραμα και την ανάλυση.

Καθώς η ανάλυση δεν συνεχίζει πέρα απ' τον τρίτο κύκλο φόρτισης, δεν μπορεί να γίνει σύγκριση των προβλέψεων για μεγάλες τιμές της σχετικής μετάθεσης ορόφου που παρουσιάζουν και μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Παρ' όλα αυτά, για τον τρίτο κύκλο φόρτισης που αντιστοιχεί στο 2% της σχετικής μετάθεσης ορόφου, η συσχέτιση με τα πειραματικά αποτελέσματα σε καθολικό επίπεδο είναι αρκετά καλή, δεδομένης τη αριθμητικής αστάθειας που προκύπτει.



Σχήμα 6.61. Απορροφούμενη υστερητική ενέργεια για το δοκίμιο Α1

Η μεταβολή της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για την ανάλυση και το πείραμα φαίνεται στο **Σχήμα 6.62**. Τόσο η μεταβολή της δυσκαμψίας όσο και οι τιμές της προβλέπονται ικανοποιητικά. Παρατηρείται πως, ήδη στο 2% σχετιμή μετάθεση ορόφου, έχουμε πτώσης της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας του δοκιμίου της τάξης του 50%.

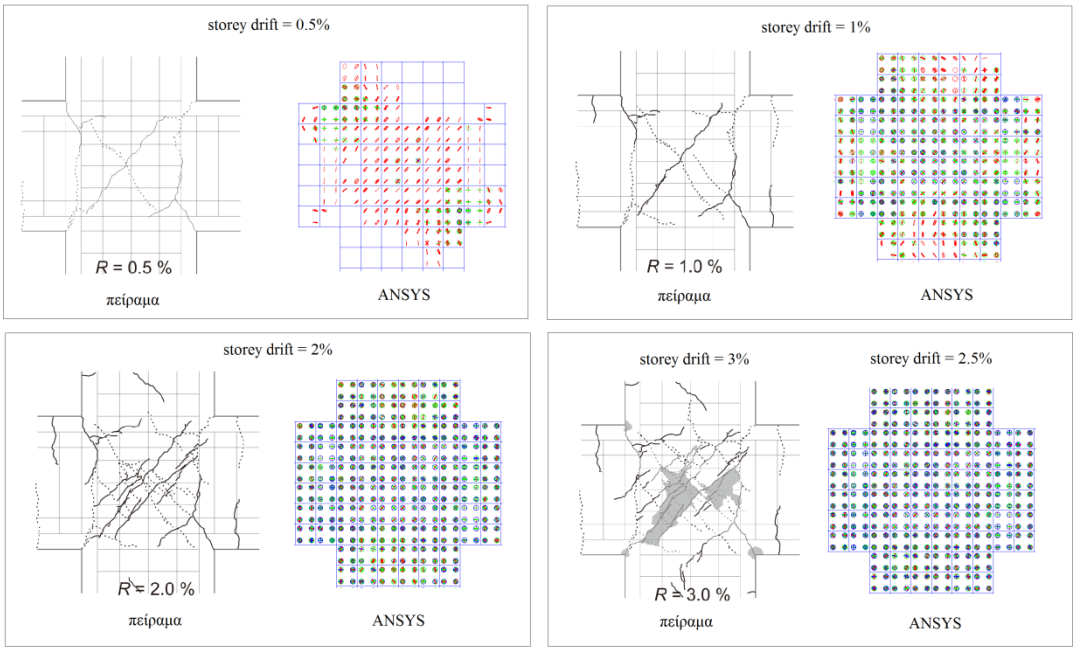


Σχήμα 6.62. Μεταβολή της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας για το δοκίμιο Α1

Οι εικόνες της ρηγμάτωσης που προέκυψαν από το πείραμα και την ανάλυση φαίνονται παρακάτω, για το σώμα του κόμβου στο 0.5, 1 και 2% της σχετικής μετάθεσης ορόφου ενώ παρατίθεται και η εικόνα της ανάλυσης στο 2.5% με την πειραματική εικόνα στο 3% (**Σχήμα 6.63**). Για τις τελικές τιμές παρατίθενται και οι συνολικές εικόνες των δοκιμίων (**Σχήμα 6.64**).

Είναι φανερή η έκταση της διαγώνιας ρηγμάτωσης του κόμβου και προς τις δύο διευθύνσεις, ήδη από το 0.5% της σχετικής μετάθεσης ορόφου, ενώ στην τιμή 3% για το πειραματικό δοκίμιο, έχουμε και αποφλοίωση της επικάλυψης. Στην ανάλυση παρατηρείται χαρακτηριστικά πως για τιμή 2.5% η ρηγμάτωση όλων των ΠΣ του σκυροδέματος είναι καθολική και κατά τις τρείς κύριες διευθύνσεις.

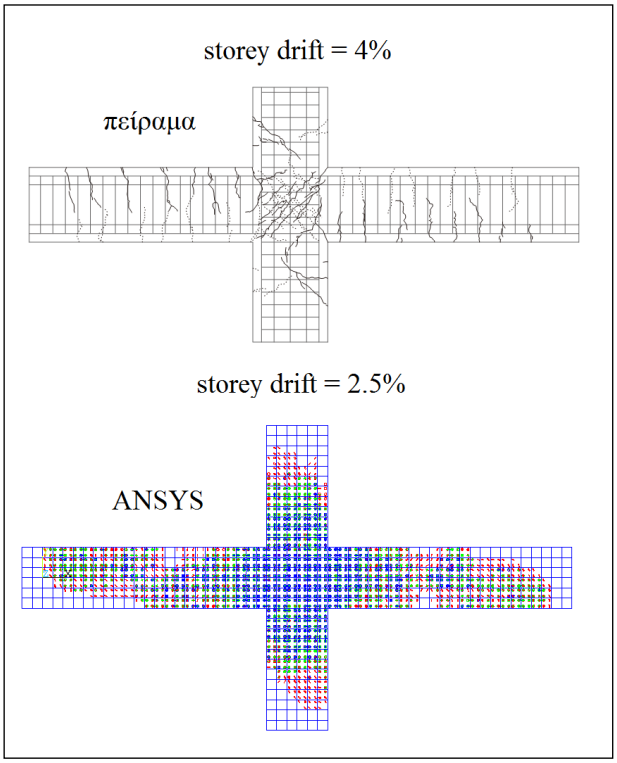
Σύμφωνα με τη σχέση (2.45), ο Ευρωκώδικας 8 απαιτεί για την αποφυγή της διαγώνιας ρηγμάτωσης στο σώμα του κόμβου $V_{jh} \leq 260.32\ kN$ (Παράρτημα Α). Από την παρούσα ανάλυση προκύπτει πως η πρώτη διαγώνια ρηγμάτωση στο σώμα του κόμβου συμβαίνει περίπου στο 0.35% της σχετικής μετάθεσης ορόφου, στο πρώτο κύκλο φόρτισης για θετική φορά. Η διατμητική δύναμη του κόμβου σε αυτό το σημείο υπολογίστηκε μέσω της σχέσης (2.4), να είναι $V_{jh} = 435.46\ kN$. Επομένως, για τον εσωτερικό κόμβο, η σχέση (2.45) μάλλον υποεκτιμά την οριακή, πριν τη διαγώνια ρηγμάτωση, τιμή της διατμητικής δύναμης του κόμβου. Αντίθετα, για τον εξωτερικό κόμβο, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η πρόβλεψη είναι καλύτερη.



Σχήμα 6.63. Εικόνες ρηγμάτωσης για το σώμα του κόμβου του δοκίμιου Α1

Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί πως μέχρι το σημείο όπου έχουμε αναλυτικές προβλέψεις, η αναλυτική προσομοίωση προσεγγίζει ικανοποιητικά το πραγματικό πρόβλημα σε μια σειρά παραμέτρους. Παρ' όλα αυτά, τα αριθμητικά προβλήματα σύγκλισης που προκύπτουν, στην περίπτωση του εσωτερικού κόμβου, λόγω της εκτεταμένης ρηγμάτωσης, δεν καθίσταται δυνατό να ξεπεραστούν. Για τον εσωτερικό κόμβο όπου οι δυνάμεις που

εισάγονται σε σχέση με τον εξωτερικό είναι πολύ μεγαλύτερες για δεδομένη σχετική μετατόπιση και η βλάβη που προκύπτει σημαντικότερη, η παρούσα ανάλυση με το πρόγραμμα ANSYS συναντά δυσκολίες. Υπάρχει ανάγκη μελλοντικά για περεταίρω μελέτη του τρόπου προσομοίωσης και κυρίως για προσπάθεια βελτίωσης του τρόπου προσέγγισης της συμπεριφοράς του σκυροδέματος σε ανακύκλιση.



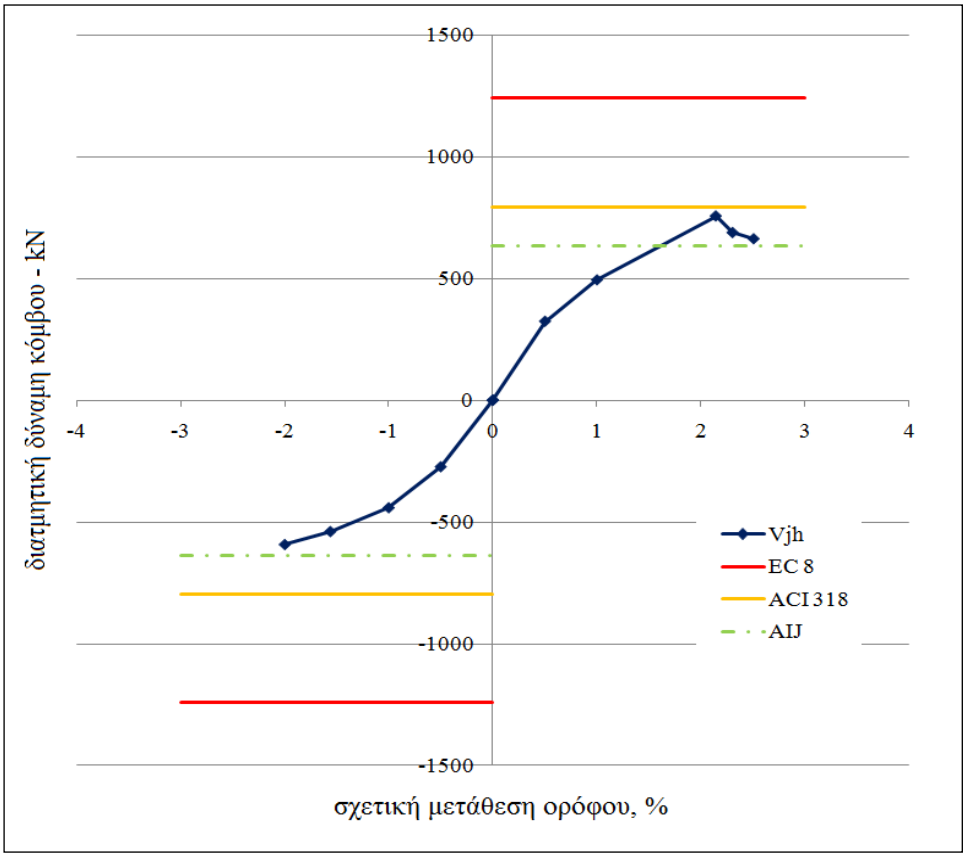
Σχήμα 6.64. Ρηγμάτωση συνολικά του δοκιμίου Α1 στο 4% της σχετικής μετάθεσης ορόφου για το πείραμα και στο 2.5% της ανάλυσης

Επιπλέον, ενώ με βάση τις μέγιστες τιμές της τέμνουσας ορόφου που αναπτύσσονται στην ανάλυση και στο πείραμα (**Πίνακας 6.2**) η φέρουσα ικανότητα προβλέπεται σωστά, δεν συμβαίνει το ίδιο και με την αλληλουχία της αστοχίας. Πειραματικά, προέκυψε διαρροή των διαμήκων οπλισμών της δοκού στον κύκλο φόρτισης με στοχευόμενη μετακίνηση το 2% της σχετικής μετάθεσης ορόφου, ακολουθούμενη από διατμητική αστοχία του κόμβου (ήτοι: έντονη διαγώνια ρηγμάτωση, διαρροή συνδετήρων, τοπική σύνθλιψη σκυροδέματος, πτώση της τέμνουσας ορόφου). Λόγω της αριθμητικής αστάθειας που παρατηρείται στην ανάλυση, στον κύκλο αυτό (**Σχήμα 6.60**), με απότομη πτώση της αντοχής με έπειτα επανάκτηση της έως τη μέγιστη μετατόπιση, αναλυτικά δεν παρατηρήθηκε η διαρροή των διαμήκων οπλισμών.

Πάντως αξίζει να σημειωθεί πως παρά τα αριθμητικά προβλήματα κατά την επίλυση, οι υστερητικοί βρόχοι που προκύπτουν από την προσομοίωση, προσεγγίζουν πολύ καλά τη μορφή των πειραματικών βρόχων, ειδικά όσον αφορά το σύνθετο φαινόμενο της στένωσης (pinching). Επιβεβαιώνεται εν μέρει και με αυτό τον τρόπο η επιτυχής προσομοίωση της συμπεριφοράς λόγω της προσθήκης του φαινομένου της συνάφειας - ολίσθησης μεταξύ χάλυβα - σκυροδέματος για το ανακυκλιζόμενο πρόβλημα.

6.2.1.2. Διατμητική δύναμη κόμβου

Από τη σχέση (2.8), υπολογίζεται η διατμητική δύναμη που εισάγεται στον κόμβο και η καμπύλη που προκύπτει, όπου συγκρίνονται με τις οριακές τιμές αντοχής για τη διατμητική δύναμη του κόμβου σύμφωνα με τους Ευρωκώδικα 8, ACI 318 (Παράρτημα Α) και AIJ.



Σχήμα 6.65. Διατμητική δύναμη κόμβου Α1 και σύγκριση με τις προβλεπόμενες τιμές αντοχής των Κανονισμών (Ευρωκώδικας 8, ACI, AIJ)

Παρακάτω φαίνονται διάφορες χαρακτηριστικές τιμές για τη διατμητική δύναμη του κόμβου και υπολογίζεται ο λόγος της προβλεπόμενης απ' την ανάλυση δύναμης προς τη δύναμη που προκύπτει από τη σχέση (2.8) για διαρροή των δοκών και την αντίστοιχη V_{c0} (

Δοκίμιο		**A1**
Μέγιστη τιμή Vjh από την ανάλυση (kN)		757.4
Διατμητική Αντοχή $V_{jh, R}$ (kN)	Ευρωκώδικας 8	1242.5
	ACI 318	794.7
	AIJ	635
Διατμητική Δύναμη Κόμβου στην διαρροή των δοκών $V_{jh, y}$ (kN)		778.77
Διατμητική Δύναμη Κόμβου στην οριακή αντοχή των δοκών $V_{jh, u}$ (kN)		874.45
Vjh / Vjh, y		0.97

Πίνακας 6.3. Χαρακτηριστικές τιμές διατμητικής δύναμης κόμβου A1 και σύγκριση

6.2.1.3. Σχολιασμός των διαπιστώσεων του Shiohara (2001, 2003)

Στο Κεφ. 2.2.6.4, έγινε αναφορά στο μηχανισμό που προτείνεται από το Shiohara (2001, 2003) για την αιτιολόγηση της παρατηρούμενης σε πολλούς κόμβους απομείωσης της τέμνουσας ορόφου συναρτήσει αυξανόμενων κύκλων φόρτισης. Συνοπτικά αναφέρεται πως, λόγω της ελλειπούς αγκύρωσης των διαμήκων οπλισμών της δοκού εντός του κόμβου, προκύπτει απώλεια της συνάφειας και ολίσθηση των ράβδων. Αυτό έχει ως συνέπεια την αλλαγή, εντός και στις παρειές του κόμβου, της εντατικής κατάστασης των οπλισμών της θλιβόμενης ζώνης της δοκού από θλίψη σε εφελκυσμό (**Σχήμα 2.17**). Επακόλουθα έχουμε αύξηση του βάθους της θλιβόμενης ζώνης στην παρειά της δοκού ώστε να μπορεί να ισορροπήσει τις αυξημένες εφελκυστικές δυνάμεις, μείωση του μοχλοβραχίονα των εσωτερικών δυνάμεων και άρα μείωση της καμπτικής αντίστασης.

Έχει ενδιαφέρον πως ο μηχανισμός αυτός, όπως περιγράφηκε παραπάνω, επιβεβαιώνεται και από την παρούσα ανάλυση. Πράγματι, από το **Σχήμα 6.76** που αφορά τις τάσεις στους διαμήκεις οπλισμούς της δοκού παρατηρούμε πως η εντατική κατάσταση των ράβδων είναι εφελκυστική και στις δύο παρειές του κόμβου, παρ' ότι η μία βρίσκεται στη θλιβόμενη ζώνη της δοκού (**Σχήμα 2.17**). Το ίδιο παρατηρείται τόσο στους άνω όσο και

στους κάτω οπλισμούς της δοκού αλλά και στο υποστύλωμα. Αντίστοιχα, από την κατανομή των τάσεων συνάφειας στο εσωτερικό του κόμβου (**Σχήμα 6.80**, **Σχήμα 6.81**), βλέπουμε πως για τιμές της σχετικής μετάθεσης ορόφου μεγαλύτερες του 2%, έχει επιτευχθεί η μέγιστη αντοχή της τάσης συνάφειας και υπάρχει ελεύθερη ολίσθηση των ράβδων στο αντίστοιχο μήκος. Με βάση τα παραπάνω, εξετάζοντας την κατανομή της κύριας θλιπτικής τάσης στο δοκίμιο Α1 (**Σχήμα 6.67**) είναι φανερή η αύξηση του βάθους της θλιβόμενης ζώνης με αντίστοιχη διεύρυνση του πλάτους του διαγώνιου θλιπτήρα σκυροδέματος μεταξύ των τιμών 1% και 2% της σχετικής μετάθεσης ορόφου. Αυτό παρουσιάζεται και σε αντιπαραβολή με την προβλεπόμενη από το Shiohara (2001, 2003) συμπεριφορά στο **Σχήμα 6.69**. Από την καμπύλη τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου στο **Σχήμα 6.87** διαπιστώνεται η συνεπακόλουθη πτώση της συνολικής αντοχής στις αντίστοιχες τιμές της μετατόπισης λόγω μείωσης του μοχλοβραχίονα των εσωτερικών δυνάμεων των δοκών.

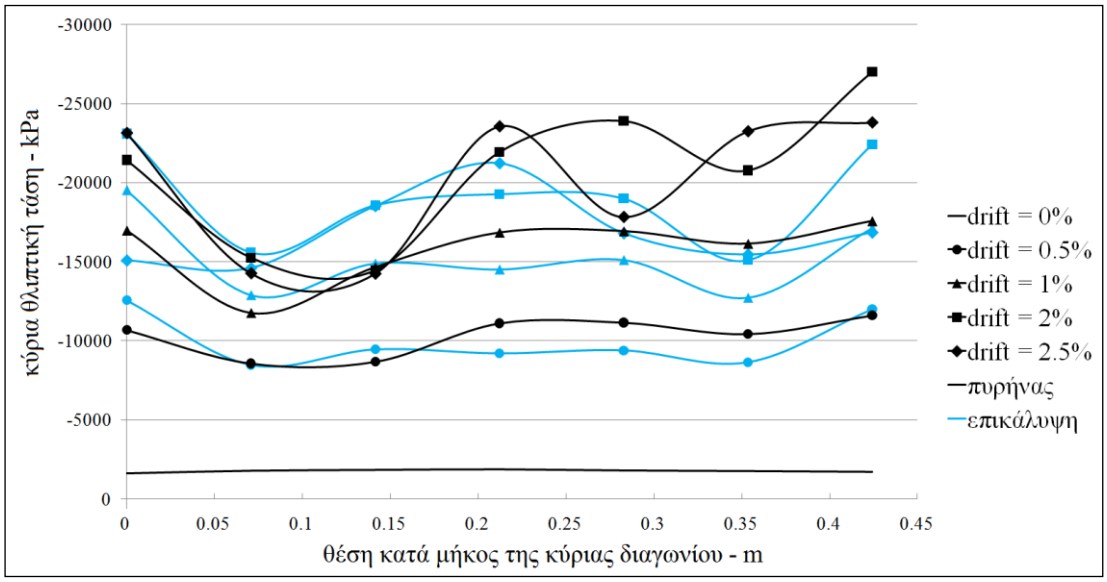
Στο ίδιο πλαίσιο, όπως περιγράφεται στο Κεφ. 2.2.6.2, ο Shiohara (2001, 2003) κάνει και μια άλλη διαπίστωση, ότι δηλαδή η τέμνουσα ορόφου δεν είναι ανάλογη με τη διατμητική δύναμη που αναπτύσσεται στον κόμβο και ότι ενώ η πρώτη από κάποιο σημείο και μετά μειώνεται, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, η άλλη αυξάνεται μονοτονικά. Έτσι, η αύξηση των διατμητικών παραμορφώσεων του κόμβου και η πτώση της τέμνουσας ορόφου μετά την αύξηση της μετατόπισης πέραν ενός σημείου, δεν είναι αποτέλεσμα της απομείωσης της διατμητικής δύναμης του κόμβου.

Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνεται μόνο μερικώς στην παρούσα ανάλυση. Πράγματι αν συγκρίνουμε το **Σχήμα 6.65** και το **Σχήμα 6.87** για αρνητική φορά φόρτισης, διαπιστώνουμε πως ενώ η διατμητική δύναμη του κόμβου αυξάνεται μονοτονικά έως το -2% της σχετικής μετάθεσης ορόφου, η τέμνουσα του ορόφου αρχίζει να μειώνεται ήδη από μια μικρότερη τιμή. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο και για θετική φορά φόρτισης όπου τόσο η τέμνουσα ορόφου όσο και η διατμητική δύναμη του κόμβου παρουσιάζουν πτώση μετά από την ίδια τιμή μετατόπισης. Πάντως, δεδομένων των αριθμητικών προβλημάτων που ανακύπτουν στην ανάλυση και της αστάθειας ειδικά για θετική φορά φόρτισης με αδυναμία πρόβλεψης της διαρροής των οπλισμών, τα συμπεράσματα που προκύπτουν για το συγκεκριμένο ζήτημα δεν κρίνονται ως απολύτως αξιόπιστες. Για την αναλυτική επιβεβαίωση των παραπάνω απαιτούνται και άλλες αναλύσεις και περεταίρω διερεύνηση.

6.2.1.4. Κύριες τάσεις σκυροδέματος στο σώμα του κόμβου

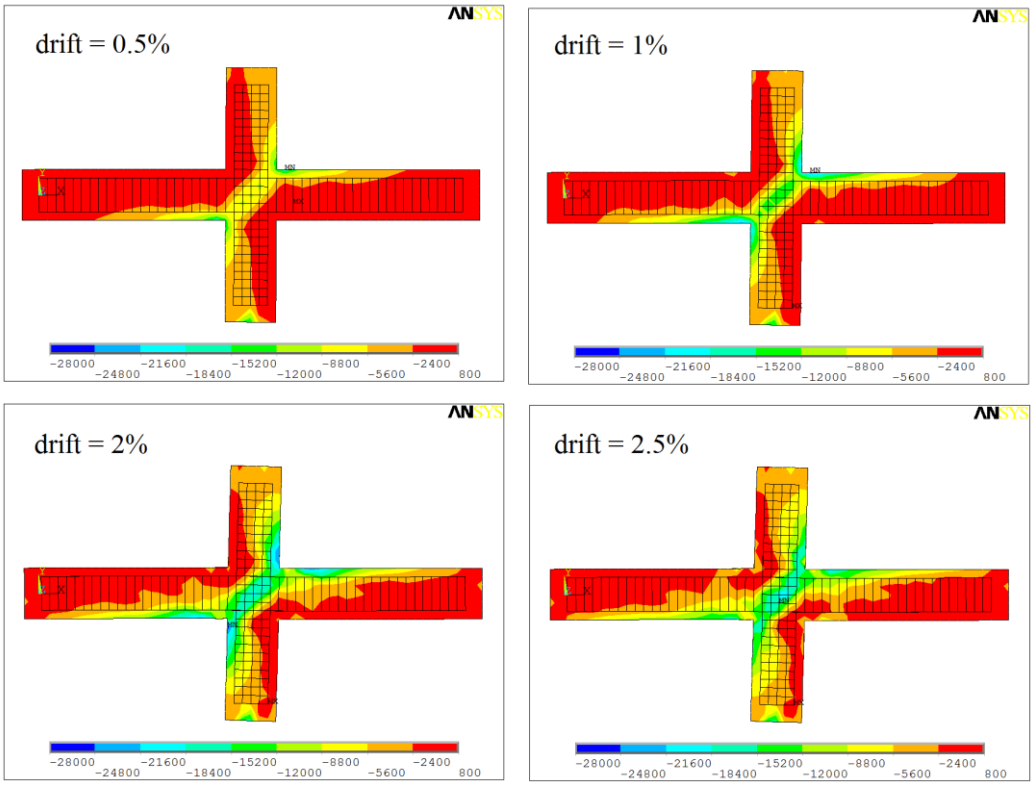
i. Κύρια θλιπτική τάση - σ_3 (< 0)

Η μεταβολή των τιμών της κύριας θλιπτικής τάσης κατά μήκος της κύριας διαγωνίου του σώματος του κόμβου για θετική φορά φόρτισης φαίνονται στο **Σχήμα 6.66**. Δίδονται οι τιμές για τους κόμβους των στοιχείων του πυρήνα καθώς και για τους κόμβους των στοιχείων του σκυροδέματος της επικάλυψης. Η κατανομή της κύριας θλιπτικής τάσης (σ_3-3rd principal stress) συνολικά στον κόμβο A1 στις ακραίες τιμές της σχετικής μετάθεσης ορόφου κάθε κύκλου φόρτισης, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.67**.

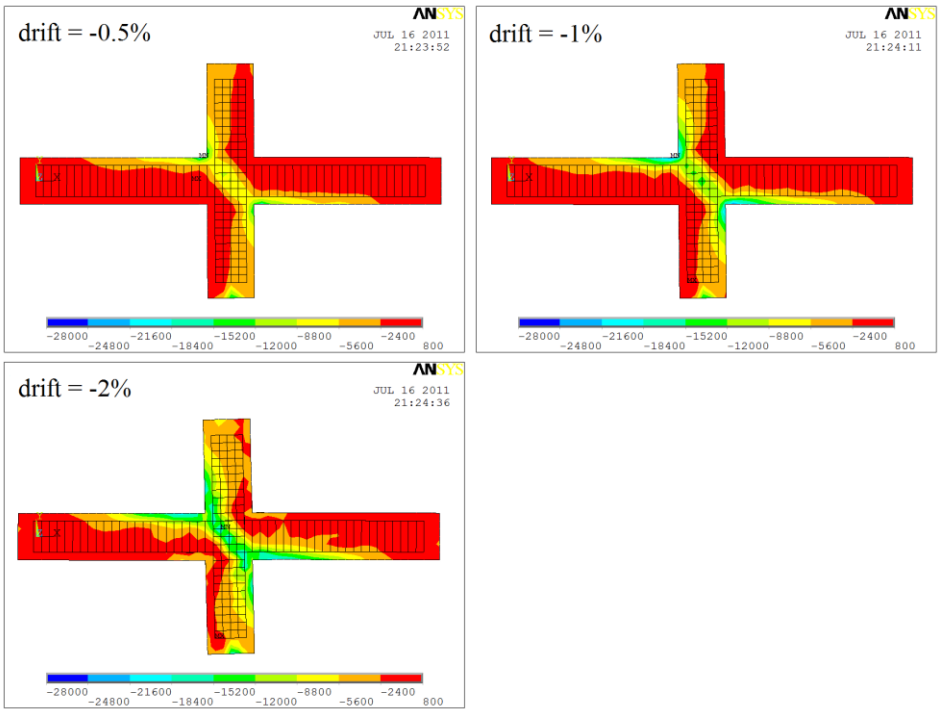


Σχήμα 6.66. Κύρια θλιπτική τάση στα σημεία της κύριας διαγωνίου για τον κόμβο A1

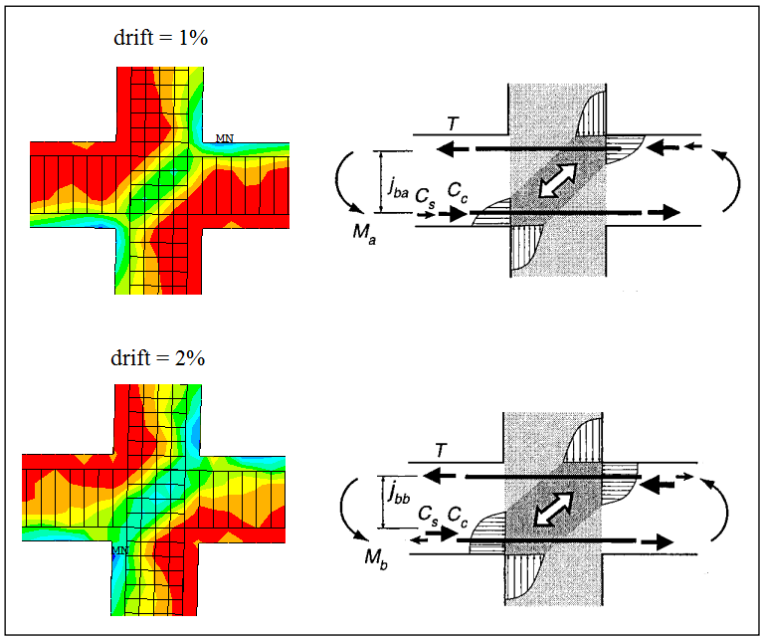
Στο **Σχήμα 6.70** φαίνεται η διεύθυνση των τροχιών των κυρίων τάσεων για θετικές τιμές της σχετικής μετάθεσης ορόφου. Για το σχήμα ισχύουν αντίστοιχα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για τον εξωτερικό κόμβο (δοκίμιο A2). Όπως αναμενόταν η κλίση του διανύσματος της κύριας θλιπτικής τάσης στη διαγώνιο του κόμβου, κατά το σχηματισμό του θλιπτήρα σκυροδέματος είναι 45°.



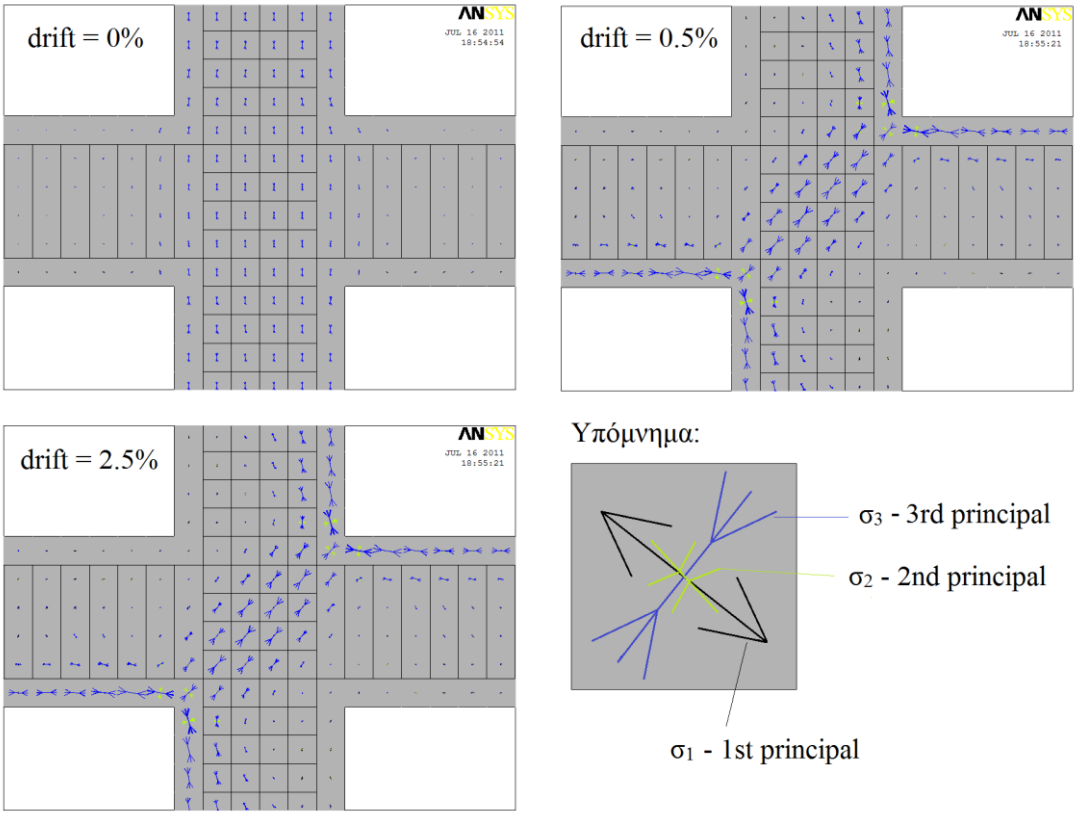
Σχήμα 6.67. Κατανομή της κύριας θλιπτικής τάσης στο δοκίμιο Α1 για θετική φορά φόρτισης



Σχήμα 6.68. Κατανομή της κύριας θλιπτικής τάσης στο δοκίμιο Α1 για αρνητική φορά φόρτισης



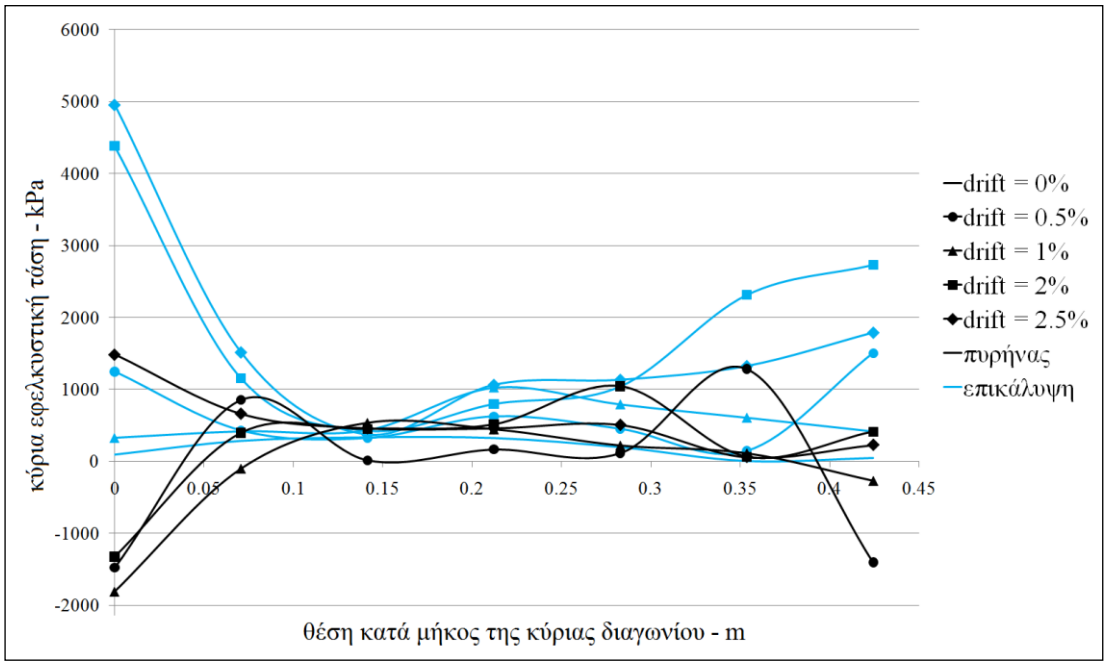
Σχήμα 6.69. Αύξηση του βάθους της θλιβόμενης ζώνης λόγω απώλειας της αγκύρωσης



Σχήμα 6.70. Τροχιές κύριων τάσεων για τον κόμβο του δοκιμίου Α1

ii. Κύρια εφελκυστική τάση - σ_1 (> 0)

Οι τιμές της κύριας εφελκυστικής τάσης κάθετα στα σημεία της κύριας διαγωνίου του σώματος του κόμβου, κατά το σχηματισμό του θλιπτήρα σκυροδέματος φαίνονται στο **Σχήμα 6.71** για θετική φορά φόρτισης.



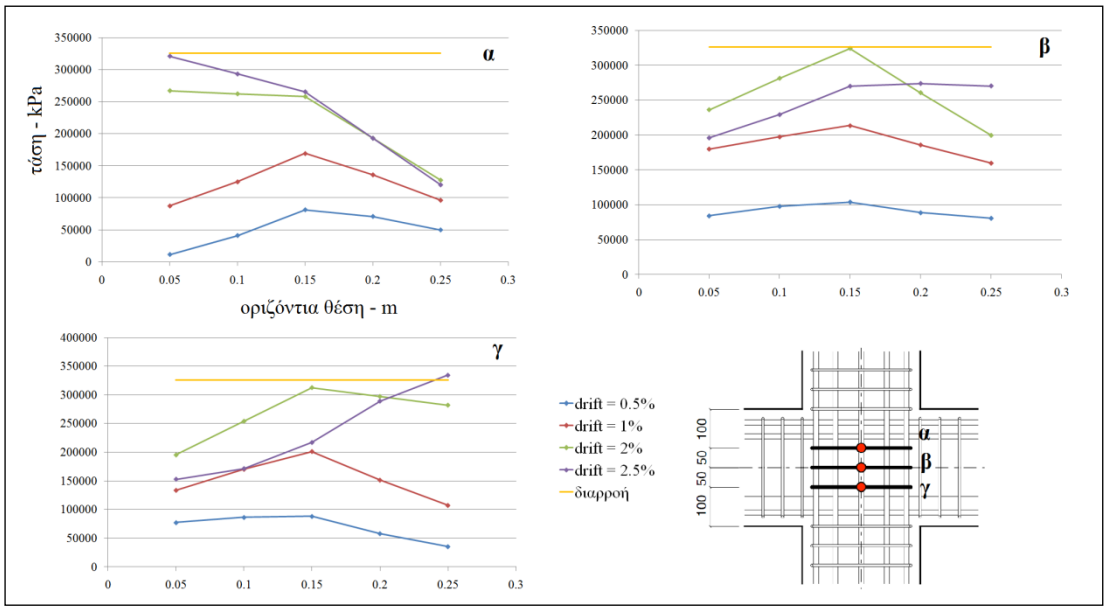
Σχήμα 6.71. Κύρια εφελκυστική τάση κάθετα στα σημεία της κύριας διαγωνίου για τον κόμβο A1

6.2.1.5. Τάσεις εγκάρσιων και διαμήκων οπλισμών

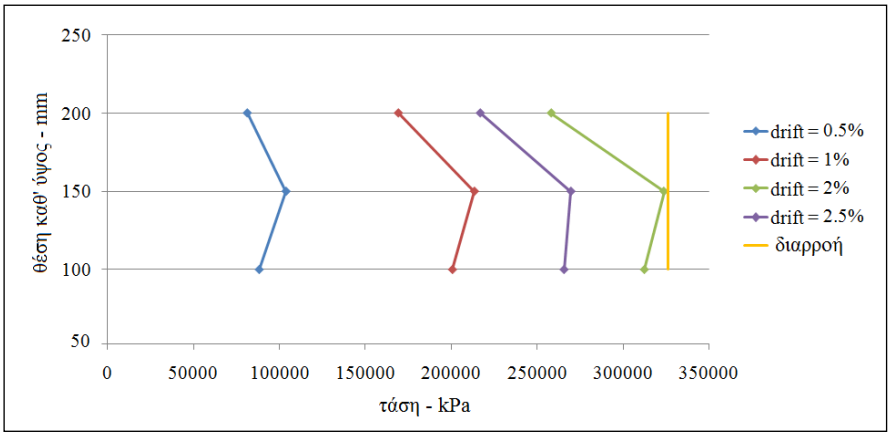
i. Τάσεις συνδετήρων

Στο **Σχήμα 6.72** φαίνεται η μεταβολή της τάσης κατά μήκος των τριών συνδετήρων του κόμβου για χαρακτηριστικές της σχετικής μετάθεσης ορόφου. Στο **Σχήμα 6.73** περιγράφεται η μεταβολή της τάσης των συνδετήρων καθ' ύψος του σώματος του κόμβου όπως υπολογίστηκε στο μέσον κάθε συνδετήρα.

Στο 2% της σχετικής μετάθεσης ορόφου ο μεσαίος συνδετήρας του κόμβου διαρρέει οριακά ενώ οι άλλοι δύο παραμένουν ελαστικοί. Στο σημείο απώλειας της σύγκλισης (2.5%), η κατανομή των τάσεων στους συνδετήρες υποδηλώνει μάλλον την εκτεταμένη αποδιοργάνωση των στοιχείων του σκυροδέματος στο σώμα του κόμβου.



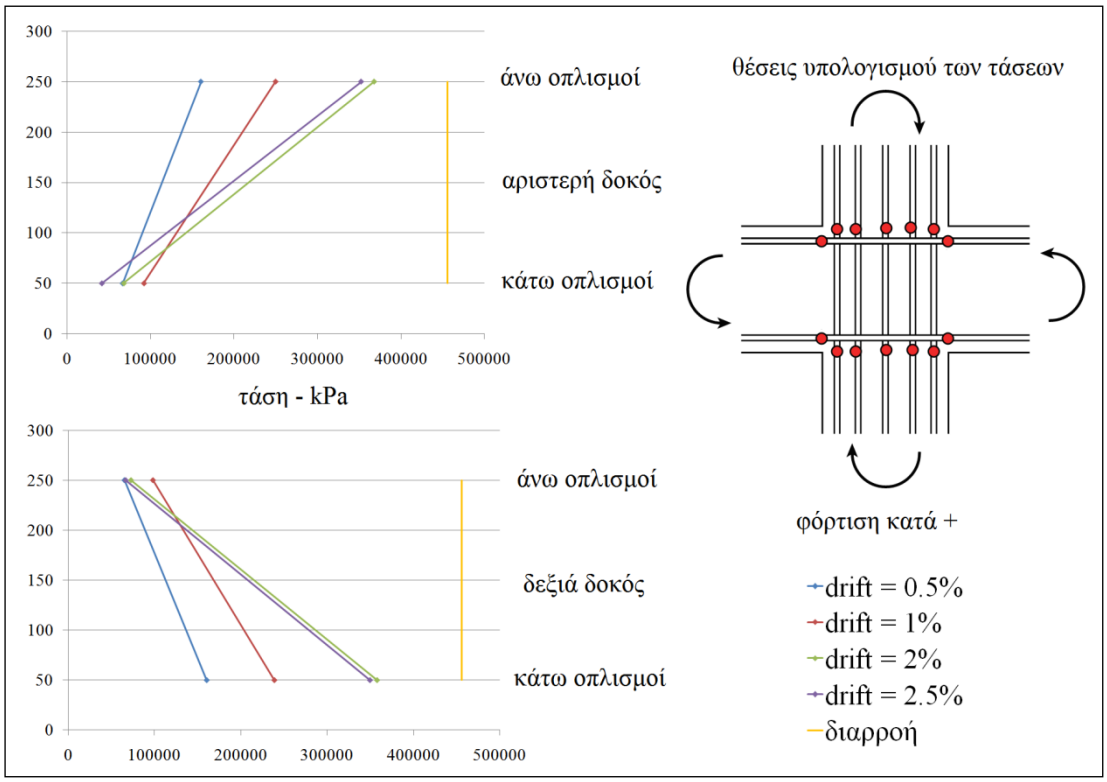
Σχήμα 6.72. Μεταβολή των τάσεων κατά μήκος των συνδετήρων του κόμβου Α1



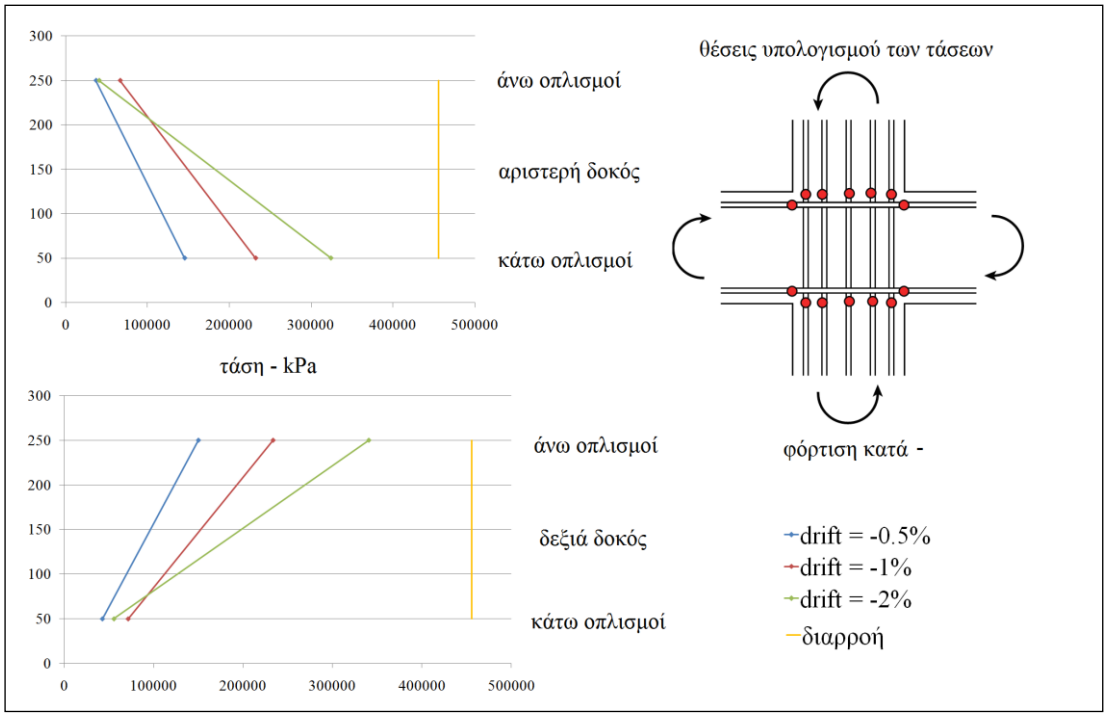
Σχήμα 6.73. Μεταβολή των τάσεων των συνδετήρων καθ' ύψος του κόμβου Α1

ii. Τάσεις διαμήκων οπλισμών δοκού

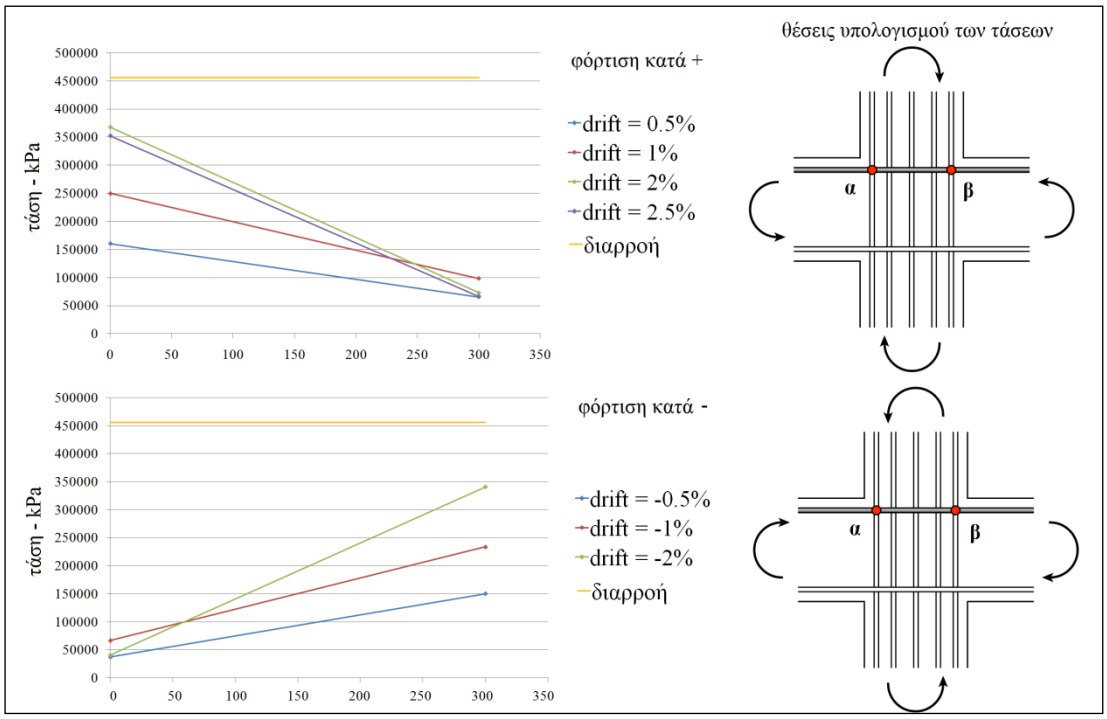
Στα παρακάτω σχήματα αποτυπώνεται η μεταβολή των τάσεων, στους άνω και κάτω διαμήκεις οπλισμούς της δοκού για θετική και αρνητική φορά φόρτισης (**Σχήμα 6.74** και **Σχήμα 6.75**). Στο **Σχήμα 6.76** φαίνεται σχηματικά η μεταβολή των τάσεων των άνω διαμήκων ράβδων της δοκού εντός του κόμβου, υπολογίζοντας τις τάσεις στα άκρα των οπλισμών στις παρειές για την ίδια φορά φόρτισης. Σε κάθε περίπτωση και για το λόγο που αναφέρθηκε παραπάνω, οι διαμήκεις οπλισμοί της δοκού δεν διαρρέουν. Από τα σχήματα αυτά είναι φανερή η ανεπαρκής αγκύρωση των οπλισμών μέσα στο σώμα του κόμβου καθώς το άκρο της ράβδου που βρίσκεται στη θλιβόμενη ζώνη στην αντίστοιχη παρειά της δοκού παραμένει πάντα σε εφελκυσμό.



Σχήμα 6.74. Τάση στους άνω και κάτω οπλισμούς της δοκού για φόρτιση κατά (+)

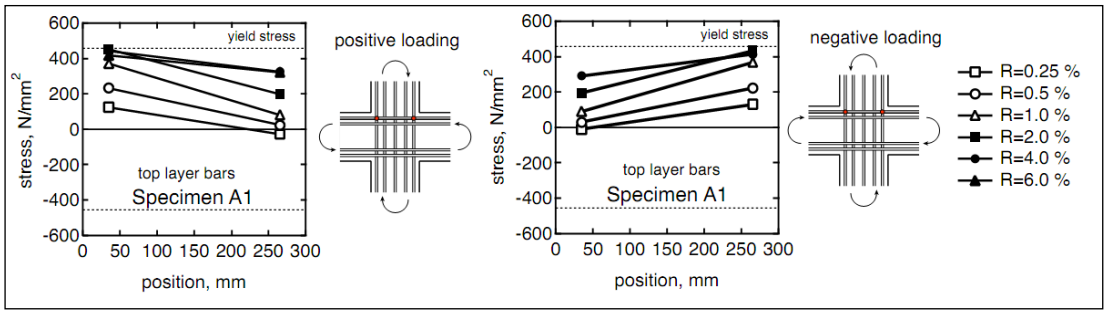


Σχήμα 6.75. Τάση στους άνω και κάτω οπλισμούς της δοκού για φόρτιση κατά (-)



Σχήμα 6.76. Τάσεις στα άκρα των άνω οπλισμών της δοκού εκατέρωθεν του κόμβου όπως προέκυψαν από την ανάλυση

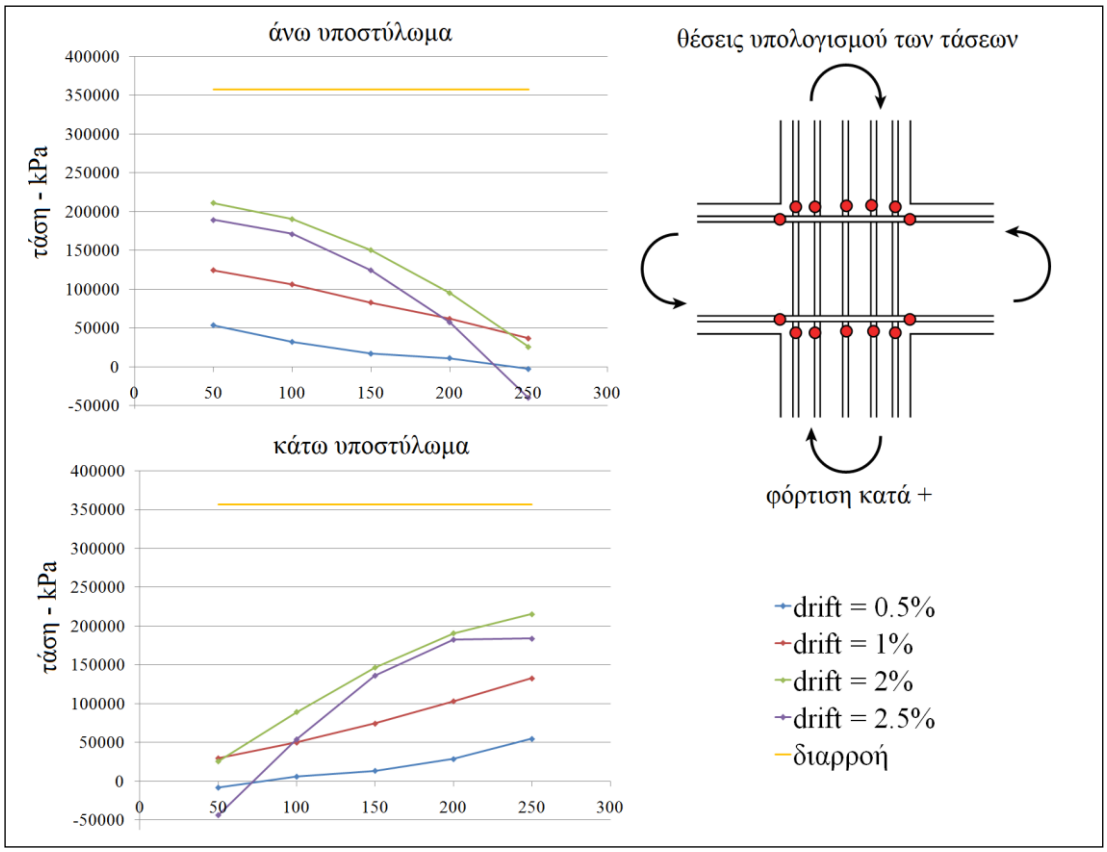
Γενικά τόσο στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων αυτού του δοκιμίου όσο και στον κόμβο Α2, δεν έγινε σύγκριση τάσεων διαμήκων οπλισμών μεταξύ πειράματος και ανάλυσης καθώς η θέση των ράβδων και ο αριθμός των στρώσεων ήταν διαφορετικά σε κάθε περίπτωση (**Σχήμα 5.2**, **Σχήμα 5.10**). Πάντως, για την επιβεβαίωση της εικόνας που προκύπτει από το **Σχήμα 6.76**, παρατίθεται εδώ, στο **Σχήμα 6.77** η αντίστοιχη εικόνα που προκύπτει πειραματικά. Από την ποιοτική σύγκριση παρατηρούμε πως η συμπεριφορά των διαμήκων ράβδων, με παραλαβή εφελκυστικής εντατικής κατάστασης στο σύνολο του μήκους της ράβδου μέσα στον κόμβο, επιβεβαιώνεται και πειραματικά.



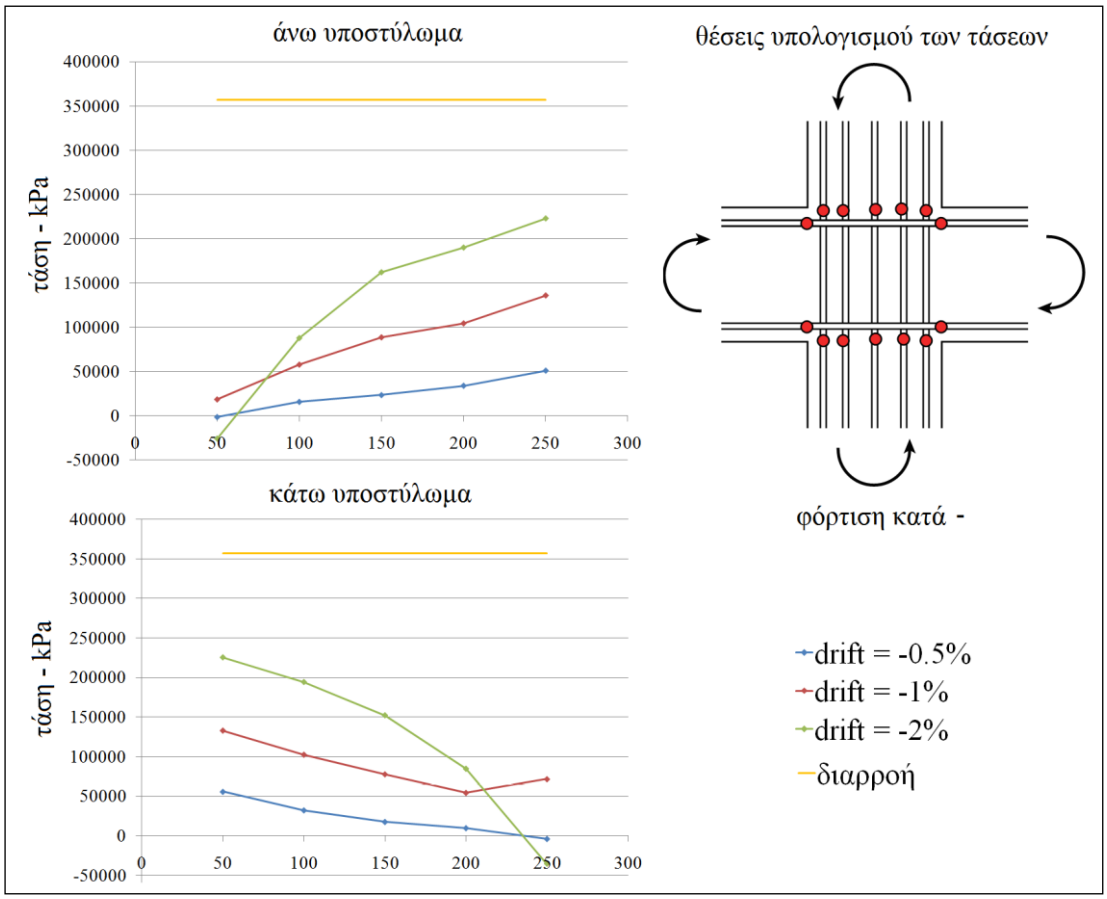
Σχήμα 6.77. Τάσεις στα άκρα της άνω στρώσης οπλισμών της δοκού εκατέρωθεν του κόμβου όπως προέκυψαν από το πείραμα

iii. Τάσεις διαμήκων οπλισμών άνω υποστυλώματος

Η εξέλιξη των τάσεων στους κατακόρυφους οπλισμούς του υποστυλώματος, αποτυπώνεται στο **Σχήμα 6.78** και το **Σχήμα 6.79** για τις θετικές και αρνητικές μέγιστες τιμές της σχετικής μετάθεσης ορόφου. Η μεταβολή της εντατικής κατάστασης των ράβδων, από εφελκυσμό - θλίψη, σε πλήρη εφελκυσμό μέσα στο σώμα του κόμβου, λόγω ανεπαρκούς μήκους αγκύρωσης παρατηρείται και για το υποστύλωμα. Οι οπλισμοί σε κάθε περίπτωση, έως το σημείο για το οποίο έχουμε αναλυτικά αποτελέσματα παραμένουν ελαστικοί.



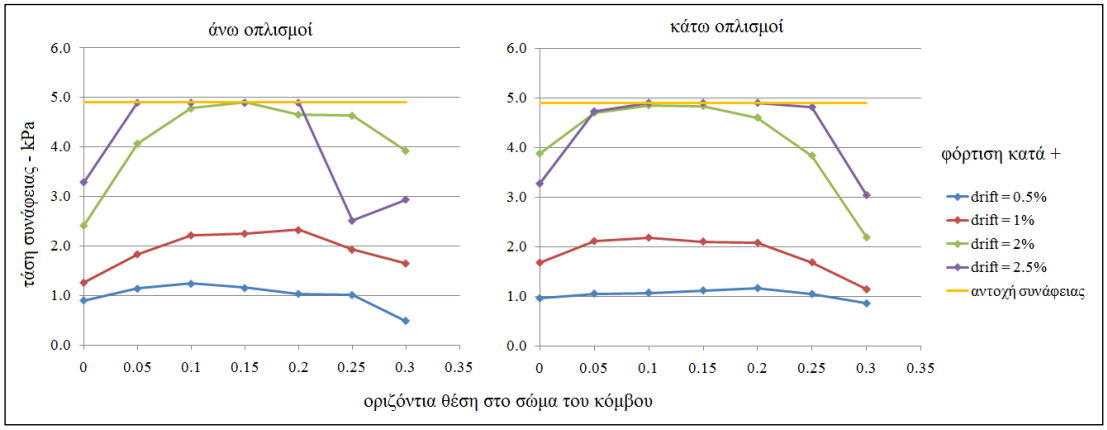
Σχήμα 6.78. Τάση στους οπλισμούς του υποστυλώματος για φόρτιση κατά (+)



Σχήμα 6.79. Τάση στους οπλισμούς του υποστυλώματος για φόρτιση κατά (-)

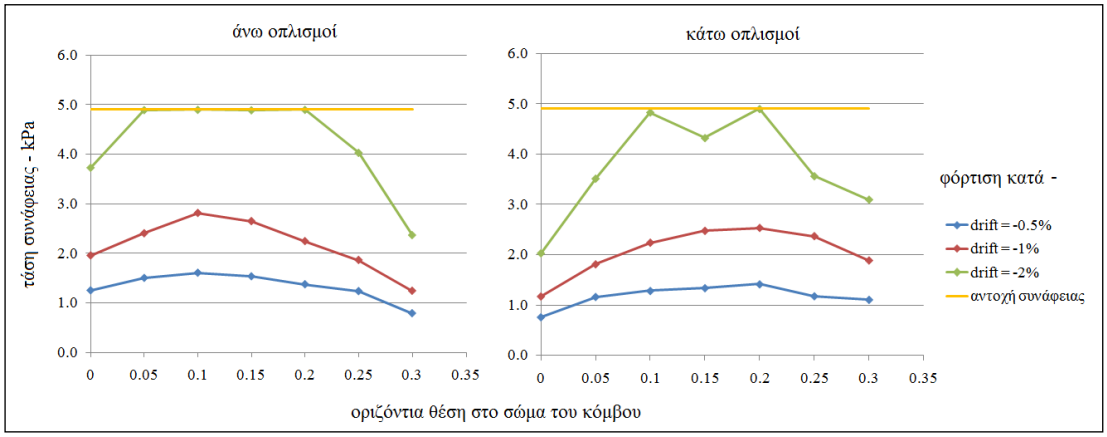
6.2.1.6. Τάσεις συνάφειας οπλισμών δοκού εντός του κόμβου

Η κατανομή της τάσης συνάφειας στους άνω και κάτω διαμήκεις οπλισμούς της δοκού εντός του κόμβου, φαίνεται στο **Σχήμα 6.80** και το **Σχήμα 6.81**.



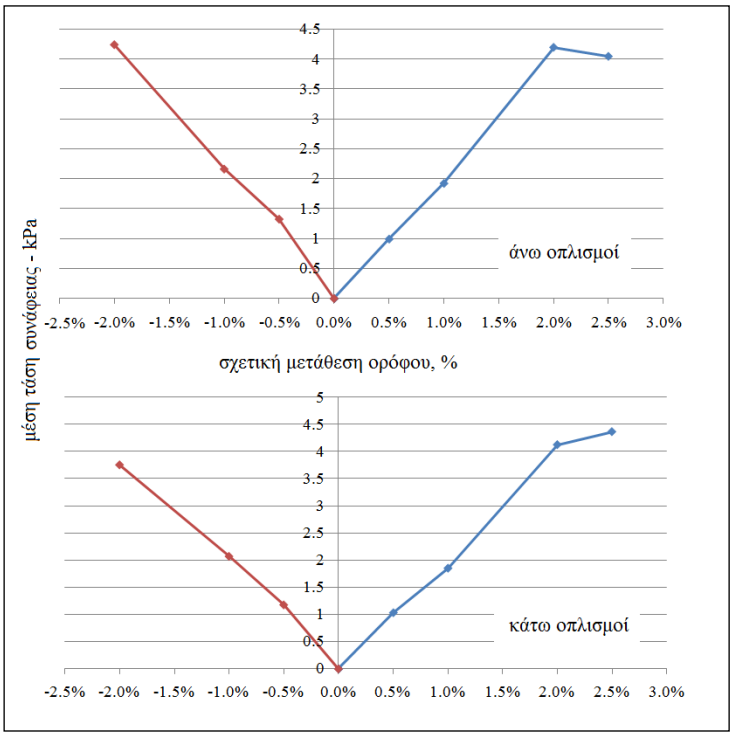
Σχήμα 6.80. Κατανομή των τάσεων συνάφειας στους οπλισμούς της δοκού μέσα στο σώμα του κόμβου Α1 για φόρτιση κατά (+)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μέγιστη αντοχής συνάφειας στο σώμα του κόμβου εξαντλείται σύμφωνα με την ανάλυση για τιμές της σχετικής μετάθεσης ορόφου μεγαλύτερες του 2% και στις δύο κατευθύνσεις φόρτισης.



Σχήμα 6.81. Κατανομή των τάσεων συνάφειας στους οπλισμούς της δοκού μέσα στο σώμα του κόμβου Α1 για φόρτιση κατά (-)

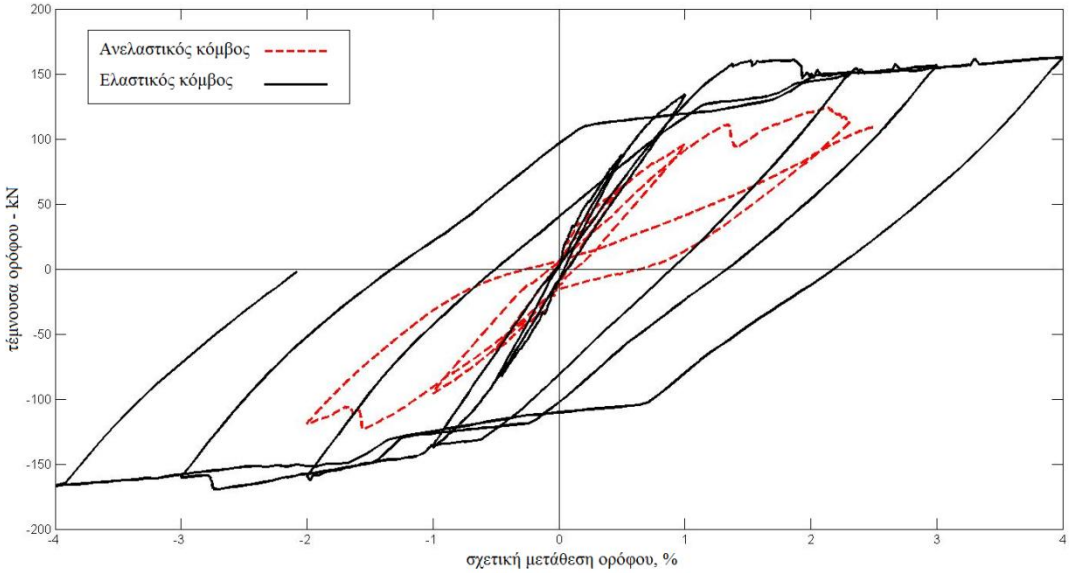
Παρακάτω δίδεται η μεταβολή της μέσης τάσης συνάφειας, των άνω και κάτω διαμήκων οπλισμών της δοκού εντός του κόμβου, συναρτήσει της σχετικής μετάθεσης ορόφου και θετικές και αρνητικές τιμές.



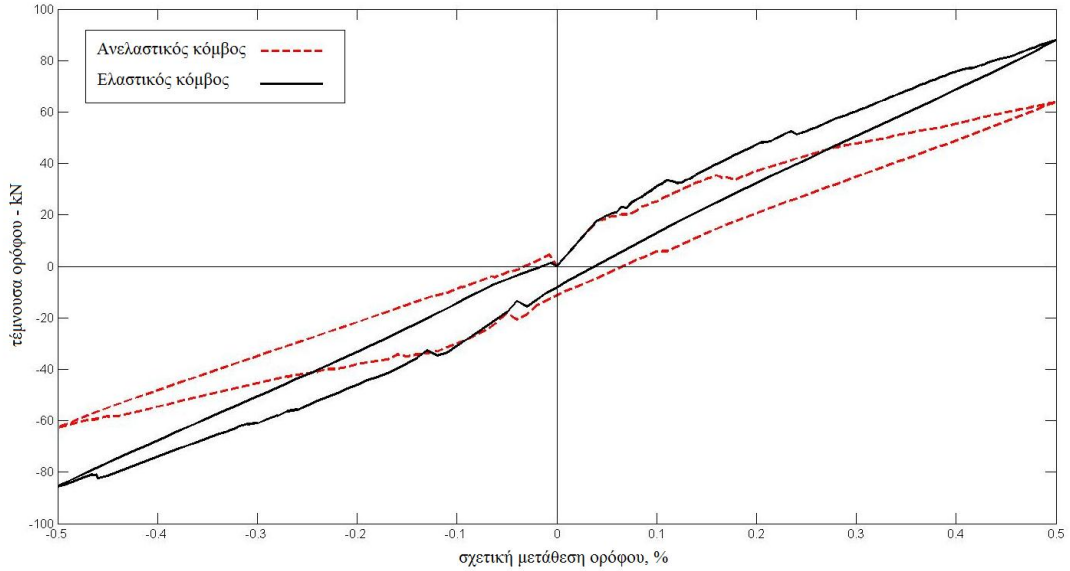
Σχήμα 6.82. Μεταβολή της μέσης τάσης συνάφειας οπλισμών της δοκού εντός του κόμβου συναρτήσει της σχετικής μετάθεσης ορόφου

6.2.2. Ανάλυση με ελαστικό σκυρόδεμα στο πάνελ του κόμβου

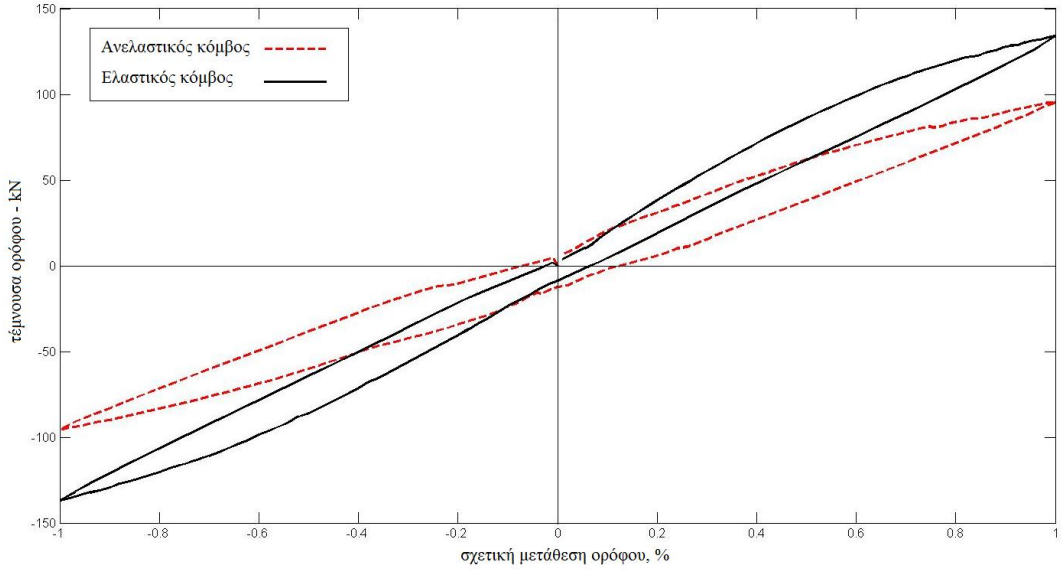
Από την ανάλυση για ελαστικό σκυρόδεμα μέσα στον κόμβο προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα, όπου παρατίθενται και οι αντίστοιχες συγκρίσεις με την αρχική ανάλυση. Σε αυτή την ανάλυση δεν παρατηρήθηκαν αριθμητικά προβλήματα σύγκλισης.



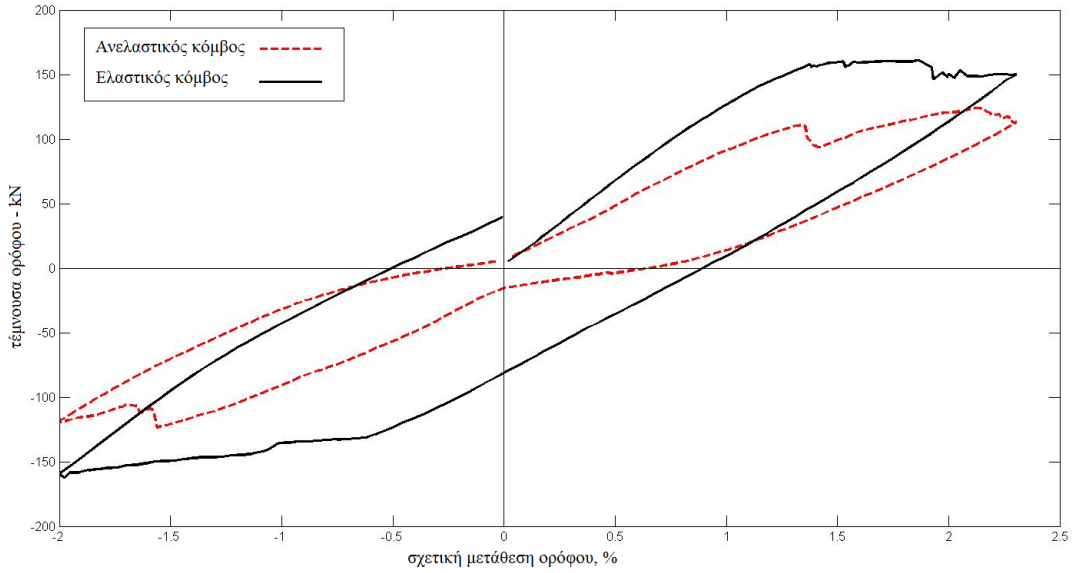
Σχήμα 6.83. Σχέση τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου όπως προέκυψαν από την ανελαστική ανάλυση (διακεκομμένη γραμμή) και την ανάλυση με ελαστικό σκυρόδεμα κόμβου (συνεχής γραμμή) για το δοκίμιο Α1



Σχήμα 6.84. Σύγκριση προβλέψεων των υστερητικών κύκλων για ελαστικό - ανελαστικό κόμβο δοκιμίου Α1 για σχετική μετάθεση ορόφου 0.5%



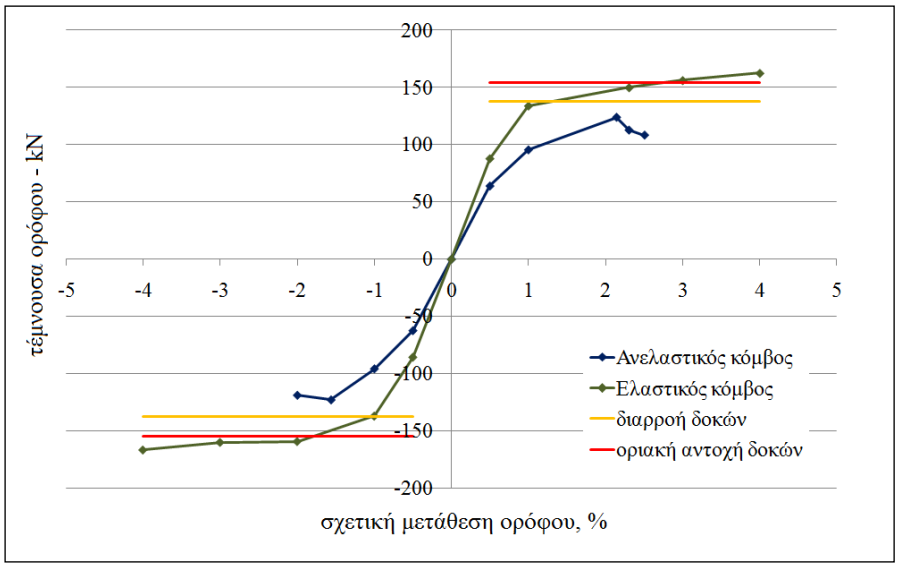
Σχήμα 6.85. Σύγκριση προβλέψεων των υστερητικών κύκλων για ελαστικό - ανελαστικό κόμβο δοκιμίου Α1 για σχετική μετάθεση ορόφου 1%



Σχήμα 6.86. Σύγκριση προβλέψεων υστερητικών κύκλων για ελαστικό - ανελαστικό κόμβο δοκιμίου Α1 για σχετική μετάθεση ορόφου 2%

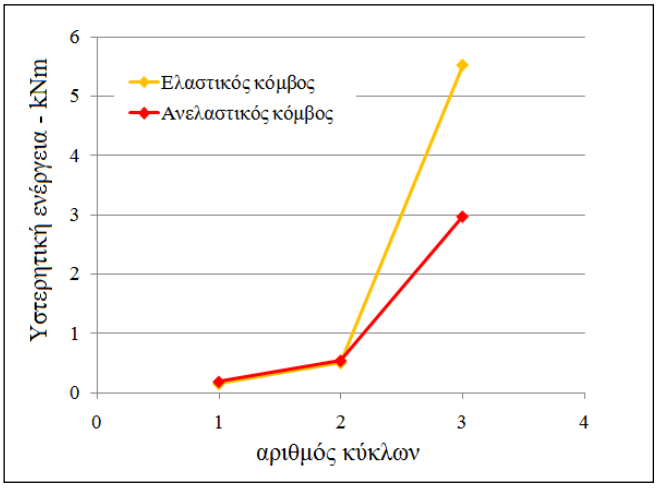
Η δυσμενής επιρροή της ανελαστικής απόκρισης του σώματος του κόμβου στη συνολική δομητική συμπεριφορά είναι ιδιαίτερα εμφανής για την περίπτωση του εσωτερικού κόμβου και μάλιστα καθοριστική για όλες της παραμέτρους που εξετάζονται: φέρουσα ικανότητα, δυσκαμψία, ενεργειακή απορρόφηση. Επιπλέον, από την ελαστική επίλυση, όπου δεν προέκυψαν προβλήματα αριθμητικής σύγκλισης, επιβεβαιώνεται το

γεγονός πως είναι η εκτεταμένη αποδιοργάνωση των στοιχείων του σκυροδέματος στο σώμα του κόμβου που προκαλούν την αστάθεια στην αρχική μη-γραμμική ανάλυση.



Σχήμα 6.87. Περιβάλλουσα τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου δοκιμίου Α1

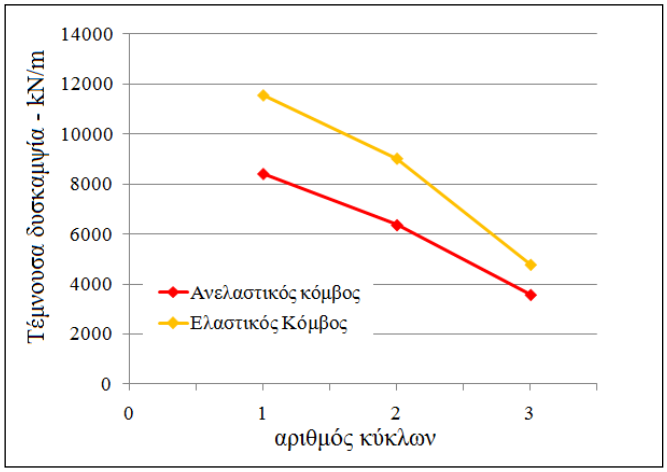
Η περιβάλλουσα καμπύλη τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου για τις δύο αναλύσεις και η σύγκριση τους με τις τιμές στη διαρροή και την οριακή αντοχή των δοκών φαίνονται στο **Σχήμα 6.87**. Για τον ανελαστικό κόμβο, η ανάλυση προβλέπει την πτώση της συνολικής αντοχής πριν από τη διαρροή των δοκών για τους λόγους που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Αντίθετα, οι μέγιστες τιμές της τέμνουσας ορόφου που αναπτύσσονται για την ανάλυση με ελαστικό κόμβο, ταυτίζονται με τις προβλεπόμενες από τη στατική επίλυση, με βάση την καμπτική αντοχή της δοκού.



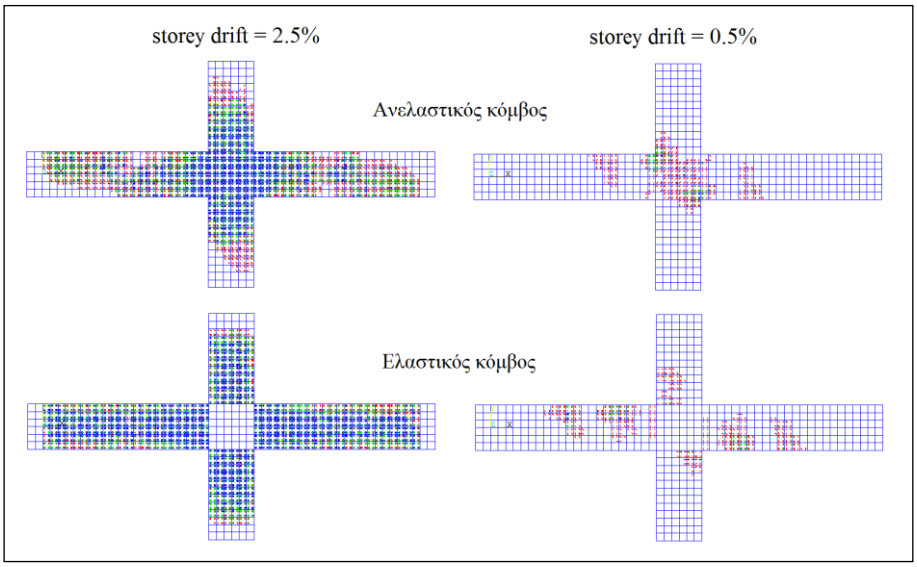
Σχήμα 6.88. Σύγκριση απορροφούμενης υστερητικής ενέργειας δοκιμίου Α1 για ελαστικό και ανελαστικό κόμβο

Σχετικά με την απορροφούμενη υστερητική ενέργεια (**Σχήμα 6.88**), όπως αναμενόταν η διαφορά μεταξύ των δύο αναλύσεων στους πρώιμους κύκλους είναι αμελητέα, αυξάνεται όμως σημαντικά μετά τη διαρροή των δοκών στον ελαστικό κόμβο.

Αντίθετα, η διαφορά στη μέση τέμνουσα δυσκαμψία είναι έντονη ήδη από τον πρώτο κύκλο, κυρίως λόγω της εκτεταμένης ρηγμάτωσης του κόμβου και της ανεπαρκούς αγκύρωσης, με επακόλουθη ολίσθηση των διαμήκων οπλισμών της δοκού στον ανελαστικό κόμβο.



Σχήμα 6.89. Σύγκριση της μεταβολής της μέσης τέμνουσας δυσκαμψίας του δοκιμίου A1 για ελαστικό και ανελαστικό κόμβο



Σχήμα 6.90. Ρηγμάτωση δοκιμίου A1, ελαστική και ανελαστική συμπεριφορά κόμβου

Τέλος, στο παραπάνω **Σχήμα 6.90** γίνεται μια σύγκριση της κατανομής των ρωγμών του δοκιμίου A1 για την περίπτωση ελαστικής και ανελαστικής συμπεριφοράς του κόμβου,

σε σχετική μετάθεση ορόφου 0.5% και 2.5%. Παρατηρούμε την εντονότερη ρηγμάτωση των δοκών αλλά και των υποστυλωμάτων στην περίπτωση του ελαστικού κόμβου καθώς σε αυτή την περίπτωση μπορούν να αναπτύξουν τις μέγιστες αντοχές τους

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

7.1. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ANSYS

Η μέθοδος που υιοθετήθηκε στην παρούσα εργασία στα πλαίσια του γενικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, για την τρισδιάστατη, μη-γραμμική προσομοίωση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος (Κεφ. 3), αποδείχθηκε πως προσεγγίζει ικανοποιητικά το φυσικό (πειραματικό) πρόβλημα σε μια ποικιλία περιπτώσεων. Τόσο η διερευνητική ανάλυση βαθμονόμησης των απλών αμφιέριστων δοκών υπό μονοτονική φόρτιση (Κεφ. 4), όσο και η ανάλυση των δοκιμίων των κόμβων υπό ανακυκλιζόμενη δράση (Κεφ. 6), φάνηκε να δίνει γενικά, αξιόπιστα αποτελέσματα τόσο σε ολικό όσο και σε τοπικό επίπεδο.

Ο τρόπος προσομοίωσης της συνάφειας μεταξύ χάλυβα - σκυροδέματος, με ειδικά μη-γραμμικά ελατήρια στους κοινούς κόμβους των στοιχείων των δύο υλικών, αποδείχθηκε πως προσφέρει μια ρεαλιστική προσέγγιση του πραγματικού φαινομένου. Σε απλά μονοτονικά προβλήματα όπως αυτά των αμφιέριστων δοκών, όπου το φαινόμενο της ολίσθησης των ράβδων του οπλισμού (με επαρκή αγκύρωση) δεν είναι τόσο σημαντικό για τη συνολική απόκριση, η υπόθεση πλήρους συνάφειας μεταξύ χάλυβα - σκυροδέματος μπορεί να αποτελεί μια αποδεκτή παραδοχή. Αντίθετα, όπως αποδείχθηκε από τις αναλύσεις που έγιναν, σε κόμβους, η ίδια παραδοχή οδηγεί σε σημαντικά λανθασμένη πρόβλεψη της καθολικής απόκρισης, στην περίπτωση του πιο σύνθετου προβλήματος της προσομοίωσης κόμβων υπό ανακυκλιζόμενη ένταση. Επομένως, η επιλογή που έγινε για εισαγωγή της σχέσης τάσεως συνάφειας - ολίσθησης των οπλισμών στην ανάλυση, κρίνεται σκόπιμη και αναγκαία. Συνίσταται λοιπόν, για την προσομοίωση αντίστοιχων προβλημάτων με το πρόγραμμα ANSYS, να λαμβάνεται υπόψη η συμπεριφορά της συνάφειας χάλυβα - σκυροδέματος, ενώ πρόσφορο για αυτό τρόπο, αποτελεί η μέθοδος που προτείνεται εδώ, καθώς συνδυάζει ρεαλιστικά αποτελέσματα με απλότητα στον τρόπο διατύπωσης.

Όσον αφορά τους συντελεστές απομείωσης της ικανότητας μεταφοράς τέμνουσας στη διεπιφάνεια ανοικτών (β_t) και κλειστών (β_c) ρωγμών, οι τιμές 0.2 και 0.6 αντίστοιχα, αποδείχθηκαν προσφορότερες για την ανάλυση τόσο στις δοκούς όσο και στους κόμβους που εξετάστηκαν.

Η επιλογή της κατάλληλης καμπύλης για την περιγραφή του σκυροδέματος σε θλίψη, αποδείχθηκε να είναι μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την πορεία της ανάλυσης. Για το μονοτονικό πρόβλημα, όπου το υλικό σε θλίψη μπορεί να προσομοιωθεί

με το μοντέλο Multilinear Elastic, προκρίνεται η χρήση μιας ακριβούς μη-γραμμικής καμπύλης με φθιτό κλάδο μετά την επίτευξη της μέγιστης αντοχής. Αντίθετα, για το σκυρόδεμα υπό ανακυκλιζόμενες δράσεις όπου χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή της συμπεριφοράς σε θλίψη το μοντέλο πλαστιμότητας Kinematic Hardening, χρειάστηκε, για την αποφυγή αριθμητικών προβλημάτων, η υιοθέτηση μιας απλούστερης πολύ-γραμμικής καμπύλης και ,πάλι όμως, με φθιτό κλάδο. Η καμπύλη σκυροδέματος με τελείως πλαστικό κλάδο μετά την επίτευξη της αντοχής, που συχνά χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία σε αντίστοιχες προσομοιώσεις, φάνηκε να δημιουργεί ζητήματα ως προς τη διατύπωση των στοιχείων, στην παρούσα ανάλυση. Πάντως, σχετικά με την επιλογή της καμπύλης σκυροδέματος, από την παρούσα εργασία δεν θεωρείται πως εξήχθη κάποιο γενικό συμπέρασμα αν και καταγράφηκαν οι διαφορετικές παράμετροι που φαίνεται να επηρεάζουν τη συμπεριφορά. Συνίσταται για κάθε άλλη προσομοίωση να γίνεται αντίστοιχη διερεύνηση βαθμονόμησης με πειραματικά δεδομένα.

Πρέπει να σημειωθεί πως στις διάφορες επιλύσεις που έγιναν στα πλαίσια της παρούσης, προέκυψαν συχνά αρκετά προβλήματα αριθμητικής σύγκλισης, ειδικά στην περίπτωση προσομοίωσης των κόμβων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Απαιτήθηκε σημαντικός αριθμός διερευνητικών αναλύσεων και εξέταση της επιρροής πολλών διαφορετικών παραμέτρων ώστε να παρακαμφθούν πολλά από αυτά, ενώ άλλα, που είχαν αιτίες σε πιο βασικά χαρακτηριστικά του τρόπου προσομοίωσης του προγράμματος ANSYS δεν έγινε δυνατό να ξεπεραστούν. Χαρακτηριστικά αναφέρεται η αδυναμία σύγκλισης κατά την ανάλυση του δοκιμίου A1 μετά από την πλήρη ρηγμάτωση των στοιχείων σκυροδέματος του κόμβου. Επιπλέον, από τη διερεύνηση του συνδυασμού, με βάση τα στοιχεία SOLID 65, του μοντέλου σκυροδέματος Concrete και του μοντέλου μη-γραμμικότητας Kinematic Hardening, προέκυψαν σε κάποιες περιπτώσεις προβλήματα ως προς τη διατύπωση των στοιχείων (error in element formulation). Στη βάση αυτή, προτείνεται η περεταίρω διερεύνηση του τρόπου και των δυνατοτήτων της προσομοίωσης του σκυροδέματος με το λογισμικό ANSYS. Επιθυμητή είναι μελλοντικά και η μελέτη για τη βελτίωση αυτής της προσομοίωσης τόσο σε επίπεδο προσομοιωμάτων υλικού και κριτηρίου αστοχίας όσο και προσέγγισης της διαδικασίας της ρηγμάτωσης καθώς και των προβλημάτων σύγκλισης που προκύπτουν λόγω αυτής.

Συγκεντρωτικά, μπορεί να ειπωθεί πως το λογισμικό ANSYS αποτελεί ένα αρκετά αξιόπιστο εργαλείο για τη μελέτη στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, σε ένα ευρύ πεδίο προβλημάτων. Ειδικά για την προσομοίωση φορέων οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη ένταση, περίπτωση για την οποία

υπάρχουν γενικά φτωχές αναφορές στη βιβλιογραφία, η παρούσα εργασία έδειξε πως το πρόγραμμα ANSYS, μπορεί να δώσει ρεαλιστικές προβλέψεις. Παρ' όλα αυτά, η περιπλοκότητα στη σύνθεση του προσομοιώματος και η επίπονη παραμετρική διερεύνηση που γενικά απαιτείται για μια αξιόπιστη ανάλυση, περιορίζουν το εύρος εφαρμογής της μεθόδου περισσότερο σε ερευνητικά παρά σε πρακτικά προβλήματα.

7.2. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ

Η ανελαστική συμπεριφορά, που αποδεδειγμένα θα συμβεί σε ένα τυπικό κόμβο οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενες δράσεις μεγάλου εύρους, αποδείχθηκε στην παρούσα εργασία πως επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη συνολική δομητική απόκριση του στοιχείου. Οι κυριότεροι μηχανισμοί που ορίζουν αυτή τη συμπεριφορά φάνηκε να είναι: η διαγώνια ρηγμάτωση και μη-γραμμική συμπεριφορά του σκυροδέματος, μαζί με την απώλεια αγκύρωσης και επακόλουθη ολίσθηση των διαμήκων ράβδων που περνούν μέσα από το σώμα του κόμβου. Η δυσμενής επιρροή της ανελαστικής απόκρισης, επηρεάζει μια σειρά από παραμέτρους, με κυριότερες τις: δυσκαμψία, ενεργειακή απορρόφηση αλλά και συνολική αντοχή σε όρους τέμνουσας ορόφου, όπως φάνηκε στο δοκίμιο Α1. Έτσι, η παραδοχή άκαμπτου ελαστικού κόμβου που υιοθετείται συνήθως κατά την ανάλυση ραβδωτών φορέων δεν είναι ρεαλιστική. Υπάρχει λοιπόν η ανάγκη για βελτίωση των εφαρμοζόμενων μεθόδων με την εισαγωγή της πραγματικής συμπεριφοράς του κόμβου στην ανάλυση, ειδικά στις περιπτώσεις μη-γραμμικών ανελαστικών αναλύσεων. Βέβαια όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η χρήση τέτοιου επιπέδου προσομοιωμάτων για κτίρια είναι απαγορευτική.

Από τη διερεύνηση της επιρροής του αριθμού των συνδετήρων στο σώμα του κόμβου φάνηκε, τουλάχιστον για το δοκίμιο Α2, το εμβαδόν των οριζοντίων συνδετήρων να μην επιδρά στη συνολική απόκριση. Ενδιαφέρον έχει πως με τη διατήρηση μόνο του μεσαίου από τους τρείς συνδετήρες του κόμβου - που να σημειωθεί ήταν ήδη λιγότεροι απ' όσους απαιτούν οι Κανονισμοί (Παράρτημα Α), δεν είχαμε μεταβολή στη μέγιστη αντοχή και στη μορφή συμπεριφοράς του δοκιμίου. Σε επίπεδο κυρίων τάσεων, ενώ θα αναμενόταν με βάση τη λογική του μηχανισμού του δικτυώματος η αφαίρεση των συνδετήρων να αυξήσει τις δυνάμεις που καλείται να παραλάβει ο διαγώνιος θλιπτήρας, δεν παρατηρήθηκε κάτι τέτοιο. Γενικώς, πρέπει να σημειωθεί πως η συνεισφορά των συνδετήρων στην αύξηση της διατμητικής αντοχής, ειδικά για εσωτερικούς κόμβους, έχει αμφισβητηθεί σε αρκετές περιπτώσεις, τόσο από αποτελέσματα πειραμάτων στις ΗΠΑ και την Ιαπωνία όσο και από διάφορους ερευνητές (Durrani και Wight, 1985, Shiohara, 2004 κ.α.). Ως εκ τούτου, ο εγκάρσιος οπλισμός στο σώμα του κόμβου, καλείται κατά βάση να παραλάβει τις

εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται κάθετα στο διαγώνιο θλιπτήρα περιορίζοντας τη συνεπαγόμενη ρηγμάτωση και παραμόρφωση του σώματος του κόμβου. Να σημειωθεί πάντως, πως η παραμετρική διερεύνηση της επιρροής του εγκάρσιου οπλισμού στη συμπεριφορά του κόμβου ήταν αρκετά περιορισμένη και ενδεικτική. Περισσότερες αναλύσεις, με εξέταση πέραν της μείωσης (έως πλήρους απομάκρυνσης) και της αύξησης της ποσότητας, καθώς και της εφαρμογής διαφορετικών διατάξεων, για παράδειγμα τετράτμητων συνδετήρων μπορεί να δώσει πιο αξιόπιστα συμπεράσματα για κάποια βελτίωση των απαιτήσεων σχεδιασμού.

Η άσκηση εγκάρσιας πρόθλιψης στο σώμα του κόμβου, αποδείχθηκε αναλυτικά πως οδηγεί και σε μια αύξηση της συνολικής αντοχής του δοκιμίου της τάξης του 10%. Για την αύξηση αυτή ασκήθηκε σχετικά υψηλό θλιπτικό φορτίο ($0.2A_{jc}f_c$). Επομένως είναι μάλλον αμφίβολη η δυνατότητα ύπαρξης μιας αντίστοιχης ευεργετικής συνεισφοράς στην πράξη από την παρουσία εγκάρσιων δοκών όταν μάλιστα αυτές βρίσκονται υπό κάμψη. Αντίθετα, η ύπαρξη χαλύβδινων ινών οπλισμού (με αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος στο σώμα του κόμβου), όταν διογκώνεται ο κόμβος, τείνει να προσφέρει μια οιονεί περίσφιξη που μπορεί να δώσει αποτελέσματα όπως τα παραπάνω.

Στην παρούσα ανάλυση, με την προσομοίωση της συνάφειας χάλυβα - σκυροδέματος, πέραν της καλύτερης προσέγγισης της συνολικής απόκρισης των δοκιμίων όπως ειπώθηκε παραπάνω, έγινε δυνατή και η επιβεβαίωση ορισμένων μηχανισμών που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Shiohara, 2001, 2003) και τείνουν να εξηγήσουν τη συμπεριφορά του κόμβου κατά τη διατμητική αστοχία. Συγκεκριμένα για τον εσωτερικό κόμβο Α1 στον οποίο είχαμε τα χαρακτηριστικά μιας διατμητικής αστοχίας, φάνηκε η αλληλουχία των φαινομένων που οδηγούν στη μείωση της τέμνουσας ορόφου συναρτήσει της σχετικής μετάθεσης ορόφου.

Στον τρίτο κύκλο φόρτισης για τιμή 2% της σχετικής μετάθεσης ορόφου, έχουμε: i) επίτευξη της μέγιστης αντοχής συνάφειας για τις άνω διαμήκεις ράβδους της δοκού που διέρχονται μέσα από τον κόμβο, ii) διαρροή του εγκάρσιου οπλισμού που βρίσκεται μέσα στο σώμα του κόμβου και iii) πτώση της τέμνουσας ορόφου. Ήδη από προηγούμενους κύκλους παρατηρείται η αλλαγή στην εντατική κατάσταση του διαμήκους οπλισμού με ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων καθ' όλο το μήκος τους εντός του κόμβου, ακόμα και στη θλιβόμενη ζώνη της δοκού, λόγω του ανεπαρκούς μήκους αγκύρωσης. Με την επίτευξη της οριακής αντοχής συνάφειας, είναι φανερή η αύξηση του βάθους της θλιβόμενης ζώνης στις παρειές των δοκών με επακόλουθη μείωση της ροπής και άρα της καμπτικής αντίστασης. Στο μηχανισμό αυτό θεωρείται πως οφείλεται η έναρξη της πτώσης της τέμνουσας ορόφου,

κάτι που επιβεβαιώνεται τόσο πειραματικά όσο και από την παρούσα ανάλυση. Ταυτόχρονα, επιβεβαιώνεται εν μέρει η άποψη ότι η διατμητική δύναμη του κόμβου και η τέμνουσα ορόφου δεν είναι ανάλογες και ότι ενώ η τέμνουσα ορόφου αρχίζει να φθίνει, η διατμητική δύναμη στον κόμβο με αύξηση της σχετικής μετατόπισης αυξάνεται μονοτονικά. Αυτό φαίνεται από τη σύγκριση των καμπύλων των δύο αυτών παραμέτρων για αρνητική φορά φόρτισης. Αντίθετα όμως δεν παρατηρήθηκε το ίδιο για θετική φόρα φόρτισης όπου τόσο η διατμητική δύναμη του κόμβου όσο και η τέμνουσα ορόφου μειώνονται αναλογικά μετά το σημείο όπου έχουμε αστοχία της συνάφειας. Πάντως, την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με αυτή τη συμπεριφορά δυσχεραίνει η αριθμητική αστάθεια και τα προβλήματα σύγκλισης που δημιουργούνται σε εκείνο το στάδιο της επίλυσης, οπότε περεταίρω διερεύνηση είναι αναγκαία πριν οποιαδήποτε γενίκετση. Σε κάθε περίπτωση, η ικανότητα αγκύρωσης των διαμήκων οπλισμών μέσα στο σώμα του κόμβου και η αντοχή συνάφειας, αναδεικνύονται ως ο πιο σημαντικός ίσως παράγοντας που καθορίζει τη διατμητική αντίσταση του κόμβου και, άρα, τη συνολική συμπεριφορά.

7.3. ΣΧΟΛΙΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΩΝ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ

Όπως έχει αναφερθεί, αποτέλεσμα του ότι δεν υπάρχει κοινή αντίληψη ως προς τη σεισμική συμπεριφορά των κόμβων και ένα κοινώς παραδεκτό μοντέλο λειτουργίας, είναι και η διαφορετική αντιμετώπιση στο σχεδιασμό των κόμβων από διάφορους σύγχρονους Κανονισμούς. Στην παρούσα εργασία, εφαρμόστηκαν οι διατάξεις του Ευρωπαϊκού Αντισεισμικού Κανονισμού (Ευρωκώδικας 8 /2004) και του Αμερικάνικου Κανονισμού ACI 318, για τον υπολογισμό των διαφόρων παραμέτρων σχεδιασμού των δοκιμίων που προσομοιώθηκαν αναλυτικά (Παράρτημα Α), ενώ έγιναν και οι αντίστοιχες συγκρίσεις. (Πρακτικά έγινε σύγκριση και με τον Ιαπωνικό Κανονισμό (AIJ /1999) με τον οποίο έχουν υπολογιστεί οι αντοχές των πειραματικών δοκιμίων από τους ερευνητές). Να σημειωθεί πως ο AIJ ακολουθεί στο ζήτημα των κόμβων τη λογική σχεδιασμού του ACI και επομένως δίνει πολύ κοντινά αποτελέσματα κατά τον υπολογισμό των αντοχών) Από τη μελέτη αυτή επιβεβαιώθηκε η σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο Κανονισμών (Ευρωκώδικας 8 - ACI 318) στο ζήτημα του σχεδιασμού των κόμβων, ενώ εντοπίστηκαν και σημεία όπου η λογική των Κανονιστικών διατάξεων δεν συμφωνεί πλήρως με την παρατηρούμενη, τόσο πειραματική όσο και αναλυτική συμπεριφορά. Συνοπτικά ως προς το υπόβαθρο των Κανονισμών πρέπει να επαναληφθεί πως, ο Ευρωκώδικας 8 βασίζεται στο θεωρητικό μοντέλο των Paulay και Priestley (1992) ενώ ο ACI 318 χρησιμοποιεί περισσότερο εμπειρικές σχέσεις. Οι βασικές διαφορές που διαπιστώθηκαν, σε επίπεδο σχεδιασμού,

αφορούν: i) τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής του κόμβου και ii) το ποσοστό των οριζόντιων συνδετήρων που απαιτούνται στην περιοχή του κόμβου.

Ο Ευρωκώδικας 8, υιοθετώντας τη λογική του διαγώνιου θλιπτήρα σκυροδέματος και του μηχανισμού δικτυώματος για την παραλαβή της τέμνουσας (μοντέλο Paulay και Priestley, 1992), απαιτεί τον περιορισμό της διατμητικής δύναμης του κόμβου (που πάντως είναι κοινώς παραδεκτό πως προκύπτει μέσω της σχέσης (2.4), (2.8)) ώστε να εξασφαλίζεται η αποφυγή αστοχίας του διαγώνιου θλιπτήρα ενώ απαιτεί τον περιορισμό της διαγώνιας ρηγμάτωσης μέσω οπλισμού συνδετήρων. Στην περίπτωση που δεν μπορεί να αποφευχθεί η διαγώνια ρηγμάτωση, προβλέπεται ικανός οπλισμός συνδετήρων σύμφωνα με το μηχανισμό δικτυώματος, ικανός να παραλάβει τη δρώσα τέμνουσα δύναμη συναρτήσει της αξονικής. Η εξίσωση της διάτμησης στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση ακολούθως οδηγεί και σε απαίτηση για κατακόρυφους οπλισμούς επιδερμικά.

Από τα παραπάνω πάντως, δεν προκύπτει ξεκάθαρα ποιά είναι η διατμητική ικανότητα του κόμβου και δημιουργείται σύγχυση ως προς τη μέγιστη διατμητική δύναμη που μπορεί να παραλάβει ένας κόμβος στην περίπτωση που δεν ικανοποιούνται οι σχέσεις 2.45 ή 2.46-2.47 για τον εγκάρσιο οπλισμό. Αν θεωρήσουμε πως ο περιορισμός που τίθεται για τη διατμητική δύναμη του κόμβου μέσω των σχέσεων 2.42 ή 2.43, εκφράζει και τη διατμητική αντοχή του κόμβου, στην περίπτωση που έχει τοποθετηθεί ο απαιτούμενος εγκάρσιος οπλισμός για το σχηματισμό μηχανισμού δικτυώματος, η αντοχή μάλλον υπερεκτιμάται. Επιπλέον, το εμβαδό των συνδετήρων που απαιτούνται για το σχηματισμό μηχανισμού δικτυώματος υπερβαίνει το απαιτούμενο από τον ACI 318 και, στην περίπτωση του παρόντος κόμβου (δοκίμιο A2) και αυτό που φαίνεται να απαιτείται τόσο πειραματικά όσο και αναλυτικά για την επίτευξη της μέγιστης αντοχής του κόμβου. Ενδεικτικά αναφέρεται πως για εσωτερικό κόμβο, το εμβαδό των συνδετήρων που προβλέπει ο Ευρωκώδικας 8 για το σχηματισμό μηχανισμού δικτυώματος (σχέση 2.46) είναι δεκαπλάσιο (Παράρτημα Α) από το εμβαδό που απαιτεί ο ACI 318 για τον ίδιο κόμβο (σχέση 2.50). Πάντως, η διατμητική δύναμη του κόμβου που προκύπτει αν λύσουμε ως προς αυτή (V_{jh}), από τη σχέση (2.45), δίνει μια ρεαλιστική πρόβλεψη της τιμής κατά την αρχική διαγώνια ρηγμάτωση για έναν εξωτερικό κόμβο ενώ υποεκτιμά την αντίστοιχη τιμή για εσωτερικό κόμβο, σύμφωνα με όσα προέκυψαν από την παρούσα ανάλυση. Ενδιαφέρον θα έχει να εξεταστεί αναλυτικά, στην περίπτωση που τοποθετηθεί το ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού που προβλέπει η παραπάνω σχέση, πότε και για ποιά τιμή της διατμητικής δύναμης του κόμβου θα δημιουργθεί διαγώνια ρηγμάτωση, καθώς επίσης και αν το εμβαδό των συνδετήρων που θα απαιτείται δημιουργεί κατασκευαστικά προβλήματα.

Τέλος, όσον αφορά τον Αμερικάνικο Κανονισμό ACI 318, φαίνεται πως η μεθοδολογία σχεδιασμού που υιοθετεί, παρ' ότι βασίζεται σε περισσότερο εμπειρικές σχέσεις, προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική συμπεριφορά και είναι πιο σαφής ως προς την αναμενόμενη υπολογιστική αντοχή. Τόσο για τον εσωτερικό κόμβο Α1 όσο και για τον εξωτερικό Α2, η διατμητική αντοχή, όπως υπολογίστηκε (Παράρτημα Α) από τη σχέση (2.53), ήταν σε καλή συμφωνία με τις οριακές τιμές που προέκυψαν από την παρούσα ανάλυση. Σχετικά με το προβλεπόμενο ποσοστό συνδετήρων στον κόμβο έγινε αντίστοιχη αναφορά, παραπάνω.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ACI Committee 318: Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-08).

2. ACI-ASCE Committee 352: "Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures (ACI 352R-91).

3. Alath S. and Kunnath S. K., "Modeling inelastic shear deformations in RC beam-column joints", 10th Conference on Engineering Mechanics, pp. 822-825, University of Colorado, Boulder, 1995.

4. ANSYS Inc., ANSYS Release 13, User's Manual, 2010.

5. ANSYS Theory Reference, Seventh Edition, Swanson Analysis Systems, 1998.

6. B. Bresler and A.C. Scordelis, "Shear Strength of Reinforced Concrete Beams", ACI Journal, 60, 51-74, 1963.

7. Chen W. F., Plasticity in Reinforced Concrete, J. Ross Publishing, Fort Lauderdale, 2007.

8. Cotsovos D. M., Kotsovos M. D., "Cracking of RC beam / column joints: Implications for practical structural analysis and design", The Structural Engineer, pp 33-39, June 2008.

9. Cotsovos D. M., Zeris C. A., and Ali Abbas A., "Finite Element Modelling of Structural Concrete" Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2009), Rhodes, Greece, 22–24 June 2009.

10. Durrani, A.J. and Wight, J.K., "Behavior of Interior Beam-to-Column Connections Under Earthquake-Type Loading", ACI Structural Journal 82 (3): 343-350, 1985.

11. Eligehausen, R., Popov, E. P., and Bertero, V. V., "Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations", Rep. No. UCB/EERC-83/23, University of California, Berkeley, 1983.

12. El-Metwally S. E. and Chen W. F., "Moment rotation modeling of reinforced-concrete beam-column connections", ACI Structural Journal, 85(4):384-384, 1988.

13. Elmorsi M., Kianoush M. R. and Tso W. K., "Nonlinear analysis of cyclically loaded reinforced concrete structures", ACI Structural Journal, 95(6):725-739, 1998.

14. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, pr EN 1998-1: Dec. 2004.

15. FIB (CEB-FIP): Model Code 10, First complete draft, Volumes 1 and 2, April - May 2010.

16. Filippou F.C., Popov E.P. and Bertero V.V., "Effects of Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints", Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, August 1983.

17. Fleury F., Reynouard J. M. and Merabet O., "Multi-component model of reinforced concrete joints for cyclic loading", Journal of Engineering Mechanics ASCE, 126(8): 804-811, 2000.

18. G. Hughes and D.M. Spiers, "An investigation on the beam impact problem, Cement and Concrete Association", Technical Report 546, 1982.

19. Giberson M. F., "Two nonlinear beams with definitions of ductility", Journal of the Structural Division, ASCE, 95(ST2): 137-157, 1969.

20. Giuriani E., Plizzari G., and Schumm C., "Role of stirrups and residual tensile strength of cracked concrete on bond", Journal of Structural Engineering, ASCE, 117(1):1–18, 1969.

21. Hakuto, S., Park, R., and Tanaka, H., "Effect of deterioration of bond of beam bars passing through interior beam-column joints on flexural strength and ductility", ACI Struct. J., 96(5), 858–864, 1999.

22. Hemmaty Y., De Roeck G., Vandewalle L., "Finite Element modeling of reinforced concrete taking into consideration bond-slip", 5th ANSYS Int. Conf., Pittsburgh, Penn, USA, 1991.

23. Kachlakev D., Miller T., Yim S. and Chansawat K., "Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates", Civil and Environmental Engineering, DepartmentCalifornia Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2001.

24. Karayiannis C.G., Sirkelis G.M., "Effectiveness of RC Beam-Column connections strengthening using Carbon-FRP Jackets", 12th European Conf. On Earthquake Engineering, paper ref. 549, 2002.

25. Kent D. C. and Park R., "Flexural members with confined concrete", Journal of the Structural Division, ASCE, 97(ST7):1969–1990, 1971.

26. Kitayama K., Otani S. and Aoyama H., "Development of design criteria for RC interior beam-column joints", Design of Beam-Column Joints for Seismic Reistance , ACI, SP123, 97-122, 1991.

27. Kotsovos M. D. "Concrete. A brittle-fracturing material". Materials & Structures (RILEM), Vol. 17, pp.107-115, 1984.

28. Kotsovos M. D. and Pavlovic M. N., "Structural concrete: finite-element analysis for limit-state design". Thomas Telford (London), pp. 550, 1995.

29. Kotsovos M. D., "Fracture processes of concrete under generalized stress states". Materials & Structures (RILEM), Vol. 12, pp. 431-437, 1979.

30. Lowes L. N. and Altoontash A., "Modeling reinforced concrete beam-column joints subjected to cyclic loading", Journal of Structural Engineering, ASCE, 129 (12): 1686-1697, 2003.

31. Lowes L. N., Mitra N., and Altoontash A., "A beam-column joint model for simulating the earthquake response of reinforced concrete frames", PEER Report 2003/10, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Enginnering, University of California, Berkeley, 2003.

32. Manfredi, G., Verderame, G.M., Lignola, G.P., "A F.E.M. model for the evaluation of the seismic behavior of internal joints in reinforced concrete frames", The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, Beijing, China, 2008.

33. Merabet O., Djerroud M., Heinfling G. and Reynouard J. M., " Intégration d' un modele elastoplastique fissurable pour le béton dans le code Aster", Technical Report No. INSA/1/943/001, Lyon, France, 1995.

34. Mitra N., "An analytical study of reinforced concrete beam-column joint behavior under seismic loading", PhD thesis, Departement of Civil Engineering, University of Washington, Seattle, Washington, 2007.

35. Moehle J., "Beam-Column Connections", presentation from: "peer.berkeley.edu", University of California, Berkeley, 2006.

36. Morita S. and Kaku T., "Bond slip relationship under repeated loading", Transactions of the AIJ, 229:15–24, 1975.

37. NZS 3101: The Design of Concrete Structures. Standards New Zealand, Wellington, 1995.

38. OpenSees User Manual, http://opensees.berkeley.edu/OpenSees

39. Ottosen, N. S., "Failure and Elasticity of Concrete", Dan. Atom. Energy Comm. Res. Establ. Riso Eng. Dept. Riso-M-1801, Roskilde, Denmark, July, 1975.

40. Pampanin, S., Calvi, G.M. & Moratti, M., "Seismic Behaviour of R.C. Beam-Column Joints Designed for Gravity Loads", 12th ECEE, London, paper n. 726, 2002.

41. Park, R., Pauley, T., "Reinforced Concrete Structures". John Wiley & Sons, New York, 1975.

42. Pauley, T., Priestley, M.J.N., "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings". John Wiley and Sons, New York, 1992.

43. Rajaram P., Murugesan A. and Thirugnanam G. S., "Experimental Study on behavior of Interior RC Beam Column Joints Subjected to Cyclic Loading", International Journal of Applied Engineering, Dingigul, Vol 1, pp 49-58, 2010.

44. Ramberg W. and Osgood W. R., "Description of stress strain curves by three parameters", Technical Report 902, National advisory committee on aeronautics, 1943.

45. Rehm G., "On the Basic Laws of Bond Between Steel and Concrete", Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses fuer Stajlbeton, Heft 138, Berlin, 1961.

46. Sharma A., Reddy G.R., Eligehausen R. and Vaze K.K., "Strength and ductility of RC beam-column joints of non -safety related structures and recommendations by national

standards", Nuclear Engineering and Design, Volume 241, Issue 5, Pages 1360-1370, May 2011.

47. Shiohara H. and Kusuhara F., "Benchmark Test for Validation of Mathematical Models for Non-linear and Cyclic Behavior of R/C Beam-column Joints.", http://www.rcs.arch.t.u-tokyo.ac.jp/shiohara/benchmark/, 2006.

48. Shiohara, H., "New Model for Shear Failure of R/C Beam-Column Joints." Proc. of Structural Congress 2003, ASCE, Seattle, June 2003.

49. Shiohara, H., "New Model for Shear Failure of RC Interior Beam-Column Connections," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 2, February, 2001, pp. 152-160, 2001.

50. Soroushian P., and Sim J., "Axial Behavior of Reinforced Concrete Columns under Dynamic Loads", ACI Journal, Proceedings V.83, No.6,Nov.-Dec., pp. 1018-1025, 1986.

51. Tajiri S., Shiohara H. and Kusuhara F., "A new macroelement of reinforced concrete beam column joint for elasto-plastic plane frame analysis", 8th National Conference of Earthquake Engineering, San Francisco, California, No.1, 2006.

52. Tavarez, F.A., "Simulation of Behavior of Composite Grid Reinforced Concrete Beams Using Explicit Finite Element Methods", Master's Thesis, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, 2001.

53. Tsonos, A.G., "Cyclic load behaviour of reinforced concrete beam-column subassemblages of modern structures", ACI Structural Journal 104 (4), 468–478, 2007.

54. Vecchio F. J. and Collins M. P., "The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear", ACI Structural Journal, 83(22):219–231, 1986.

55. Walker, S., "Seismic Performance of Existing Reinforced Concrete Beam-Column Joints", M.S. Thesis. Seattle: University of Washington, 2001.

56. William K. J. and Warnke E. D., "Constitutive model for the triaxial behavior of concrete", in: Proc. of the Int. Association for Bridge and Structural Engineering, ISMES, Bergamo, Vol. 19, p. 174, 1975.

57. Zaid, S., Shiohara, H., Otani, S., "Test of a joint reinforcing detail, improving joint capacity of r/c interior beam - column joint", The 1st Japan-Korea Joint Seminar on Earthquake Engineering for Building Structures, Seoul National University, Seoul, Korea, 1999.

58. Καραγιάννης Χ. Γ., "Σχεδιασμός Κατασκευών από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα Έναντι Σεισμού", Εκδ. Σοφία, Θεσσαλονίκη, 2008.

59. Παπαδρακάκης Μ., "Ανάλυση φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων", Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2001.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

1. Διατμητική αντοχή κόμβου Α2

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8:

Σύμφωνα με τη σχέση 2.43, για τη διατήρηση της ακεραιότητας του διαγώνιου θλιπτήρα σκυροδέματος απαιτείται:

$$V_{jhd} \leq 0.8\,\eta\, f_{cd} \sqrt{1-\frac{v}{\eta}}\; b_j h_c$$

όπου,

$$\eta = 0.6\left(1-\frac{f_{ck}}{250}\right) = 0.6\left(1-\frac{28.3}{250}\right) = 0.532$$

$$v = \frac{N_E}{f_c A_c} = \frac{216}{28300\;0.3^2} = 0.08481$$

$$0.8\,\eta\, f_{cd} \sqrt{1-\frac{v}{\eta}}\; b_j h_c = 0.8 * 0.53208 * 28300 * \sqrt{1-\frac{0.08481}{0.532}} * 0.3^2 = 994\; kN \Longrightarrow$$

$$\Longrightarrow V_{jh,d} \leq 994\; kN$$

Για τον περιορισμό της διαγώνιας εφελκυστικής τάσης, κάθετα στο θλιπτήρα του σκυροδέματος, ώστε να μην ξεπερνά την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, απαιτείται με βάση τη σχέση (2.45) για το δεδομένο εμβαδό συνδετήρων που έχει τοποθετηθεί στο σώμα του κόμβου:

$$\frac{A_{sh} f_{yw}}{b_j h_{jw}} \geq \frac{(V_{jh}/(b_j h_{jc}))^2}{f_{ct}+\nu f_c} - f_{ct}$$

$$\frac{A_{sh} f_{ywd}}{b_j h_{jw}} = \frac{0.000192*326000}{0.2*0.3} = 1043.2\; (MPa)$$

$$\frac{(V_{jh}/(b_j h_{jc}))^2}{f_{ctd}+\nu f_{cd}} - f_{ctd} = \frac{(V_{jh}/(0.2*0.3))^2}{2670+0.08481*28300} - 2670 = \frac{{V_{jh}}^2}{18.25} - 2760$$

$${V_{jh}}^2 \leq 67765.9 \Longrightarrow V_{jh} \leq 260.32\; kN$$

Στην περίπτωση που δεν ικανοποιείται η παραπάνω απαίτηση, για τη διασφάλιση της ακεραιότητας του κόμβου μετά τη διαγώνια ρηγμάτωση πρέπει να τοποθετηθεί εμβαδό συνδετήρων σύμφωνα με τη σχέση (2.47):

$A_{sh} f_{yw} \geq \gamma_{Rd}(A_{s2}) f_{yd}(1 - 0.8v)$

όπου,

$1 - 0.8v = 1 - 0.8 * 0.08481$ =0.9322

$\Longrightarrow A_{sh} \geq \frac{1.25*0.0010048*456000*0.9322}{326000} \geq 0.00164\, m^2$

<u>Σύμφωνα με τον ACI 318</u>

Η ονομαστική αντοχή σε διάτμηση για γωνιακό κόμβο (γ=12) δίδεται από τη σχέση (2.53) ως εξής:

$V_n = 0.083\, \gamma \sqrt{f_c'} b_j h = 0.083 * 12 * \sqrt{28.3} * 0.3^2 * 10^3 \Longrightarrow$

$\Longrightarrow V_n = 476.87\, kN$

Επιπλέον, η σχέση (2.50) ορίζει ότι το ελάχιστο εμβαδό A_{sh} των οριζόντιων κλειστών συνδετήρων που τοποθετούνται στο σώμα του κόμβου πρέεπι να είναι μεγαλύτερο από:

$A_{sh} \geq 0.3 \frac{s\, h'' f_c}{f_{yh}} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1\right) = 0.3 \frac{0.05*0.2*28300}{326000} (\frac{0.3^2}{0.2^2} - 1) \Longrightarrow$

$\Longrightarrow A_{sh} \geq 0.0003255\, m^2$

ενώ στο δοκίμιο έχουν τοποθετηθεί συνδετήρες συνολικού εμβαδού $A_{sh} = 0.000192\, m^2$

Χαρακτηριστικές τιμές διατμητικής δύναμης κόμβου Α2

Διατμητική δύναμη κόμβου στη διαρροή της δοκού

$V_{jh,\, y}$ = 388.87 kN

Διατμητική δύναμη κόμβου στην οριακή αντοχή της δοκού

$V_{jh,\, u}$ = 445.14 kN

ο υπολογισμός γίνεται με βάση τη σχέση (2.8).

2. Διατμητική αντοχή κόμβου Α1

<u>Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8</u>

Σύμφωνα με τη σχέση (2.42), για τη διατήρηση της ακεραιότητας του διαγώνιου θλιπτήρα σκυροδέματος απαιτείται:

$$V_{jh} \leq \eta\, f_c \sqrt{1-\frac{v}{\eta}}\; b_j h_c$$

όπου,

$\eta = 0.532$

$v = 0.08481$

$$\eta\, f_c \sqrt{1-\frac{v}{\eta}}\; b_j h_c = 0.8 * 0.53208 * 28300 * \sqrt{1-\frac{0.08481}{0.532}} * 0.3^2 = 1242kN \Longrightarrow$$

$$\Longrightarrow V_{jh} \leq 1242\ kN$$

για τον περιορισμό της διαγώνιας εφελκυστικής τάσης, κάθετα στο θλιπτήρα του σκυροδέματος προβλέπεται ότι και παραπάνω για τον εξωτερικό κόμβο.

Στην περίπτωση που δεν ικανοποιείται η παραπάνω απαίτηση, για τη διασφάλιση της ακεραιότητας του κόμβου μετά τη διαγώνια ρηγμάτωση πρέπει να τοποθετηθεί εμβαδό συνδετήρων σύμφωνα με τη σχέση (2.46):

$$A_{sh} f_{yw} \geq \gamma_{Rd}(A_{s1} + A_{s2}) f_{yd}(1 - 0.8v)$$

όπου,

$1 - 0.8v = 0.9322$

$$\Longrightarrow A_{sh} \geq \frac{1.25*(2*0.0010048)*456000*0.9322}{326000} \geq 0.00328\ m^2$$

<u>Σύμφωνα με τον ACI 318</u>

Η ονομαστική αντοχή σε διάτμηση για εσωτερικό κόμβο (γ=20) δίδεται από τη σχέση (2.53) ως εξής:

$$V_n = 0.083\, \gamma \sqrt{f_c'}\, b_j h = 0.083 * 20 * \sqrt{28.3} * 0.3^2 * 10^3 \Longrightarrow$$

$$\Longrightarrow V_n = 794.7\ kN$$

το απαιτούμενο συνολικό εμβαδό συνδετήρων είναι το ίδιο όπως και για τον εξωτερικό κόμβο.

Χαρακτηριστικές τιμές διατμητικής δύναμης κόμβου Α1

Διατμητική δύναμη κόμβου στη διαρροή της δοκού

$V_{jh,\,y}$= 778.77 kN

Διατμητική δύναμη κόμβου στην οριακή αντοχή της δοκού

$V_{jh,\ u}$= 874.45 kN

ο υπολογισμός γίνεται με βάση τη σχέση (2.4).

Συνοψίζοντας:

Δοκίμιο		**A1**	**A2**
Διατμητική Αντοχή V_{jh} (kN)	Ευρωκώδικας 8	1242	994
	ACI 318	794.7	476.78
Διατμητική Δύναμη Κόμβου στη διαρροή των δοκών $V_{jh,\ y}$ (kN)		778.77	388.87
Διατμητική Δύναμη Κόμβου στην οριακή αντοχή των δοκών $V_{jh,\ u}$ (kN)		874.45	445.14

Απαιτούμενο εμβαδό οριζόντιων συνδετήρων στο σώμα του κόμβου (m^2)		
Δοκίμιο	**A1**	**A2**
Ευρωκώδικας 8 ($A_{sh,1}$)	0.00328	0.00164
ACI 318 ($A_{sh,2}$)	0.0003255	0.0003255
τοποθετημένο (A_{sh})	0.000192	0.000192
$A_{sh}/A_{sh,2}$	0.59	0.59
$A_{sh}/A_{sh,1}$	0.06	0.12
$A_{sh,2}/A_{sh,1}$	0.10	0.20

3. Καμπτικές αντοχές στοιχείων

Οι τιμές των καμπτικών αντοχών των δοκών και των υποστυλωμάτων των δοκιμίων Α1 και Α2 όπως υπολογίστηκαν για τις διατομές του προσομοιώματος (Σχήμα 5.10) παρουσιάζονται παρακάτω: (τα δύο δοκίμια έχουν πανομοιότυπη όπλιση)

i. Δοκός

Ροπή διαρροής: $M_{y,b}$ = 92.2 kNm (89.5 kNm)

Ροπή αντοχής: $M_{u,b}$ = 103.5 kNm (97.8 kNm)

ii. Υποστύλωμα

Ροπή διαρροής: $M_{y,c}$ = 97.1 kNm (99.3 kNm)

Ροπή αντοχής: $M_{u,c}$ = 108.1 kNm (112.6 kNm)

όπου, σε παρένθεση, αναφέρεται η αντίστοιχη τιμή αντοχής που είχε υπολογιστεί για τις διατομές των πειραματικών δοκιμίων. Οι τιμές αυτές, μαζί με τις αθροιστικές τιμές αντοχών για τις δοκούς και τα υποστυλώματα καθώς με τους λόγους των αντοχών συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα:

Δοκίμιο		**Α1**	**Α2**
Ροπή Διαρροής M_y (kNm)	δοκός	92.2	
	υποστύλωμα	97.1	
Ροπή Αντοχής M_u (kNm)	δοκός	103.5	
	υποστύλωμα	108.1	
Άθροισμα ροπών διαροής ΣM_y (kNm)	δοκοί	209	103.74
	υποστυλώματα	242.8	242.8
Άθροισμα ροπών αντοχής ΣM_u (kNm)	δοκοί	233	116.5
	υποστυλώματα	270.3	270.3
$\Sigma M_{y,c} / \Sigma M_{y,b}$		1.16	2.34
$\Sigma M_{u,c} / \Sigma M_{u,b}$		1.16	2.32

4. Χαρακτηριστικές τιμές τέμνουσας ορόφου

Από τη στατική επίλυση για τις συνοριακές συνθήκες κάθε δοκιμίου και με βάση τις αντίστοιχες τιμές καμπτικής αντίστασης των δοκών, υπολογίζουμε τις παρακάτω χαρακτηριστικές τιμές της τέμνουσας ορόφου:

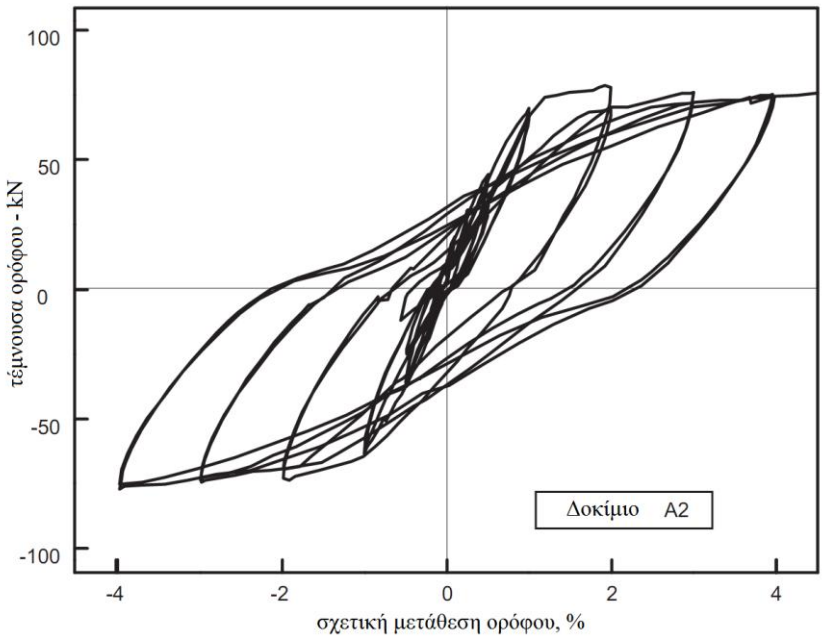
Δοκίμιο	**Α1**	**Α2**
Τέμνουσα ορόφου στη διαρροή των δοκών, $V_{c,y}$ (kN)	137.6	69.3
Τέμνουσα ορόφου στην οριακή αντοχή των δοκών, $V_{c,u}$ (kN)	154.5	77.8

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

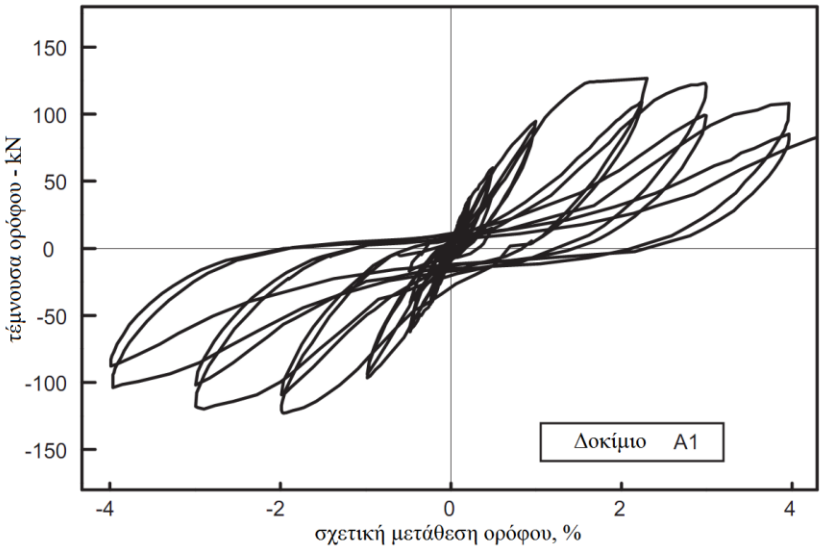
ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Παρακάτω, και για λόγους πληρότητας, παρατίθενται κάποια πειραματικά αποτελέσματα (αυτά που κρίθηκαν χρήσιμα σε σχέση με την παρούσα εργασία), για τα δοκίμια κόμβων Α1 και Α2, όπως παρουσιάζονται από τους ερευνητές στην αντίστοιχη εργασία (Shiohara και Kusuhara, 2006).

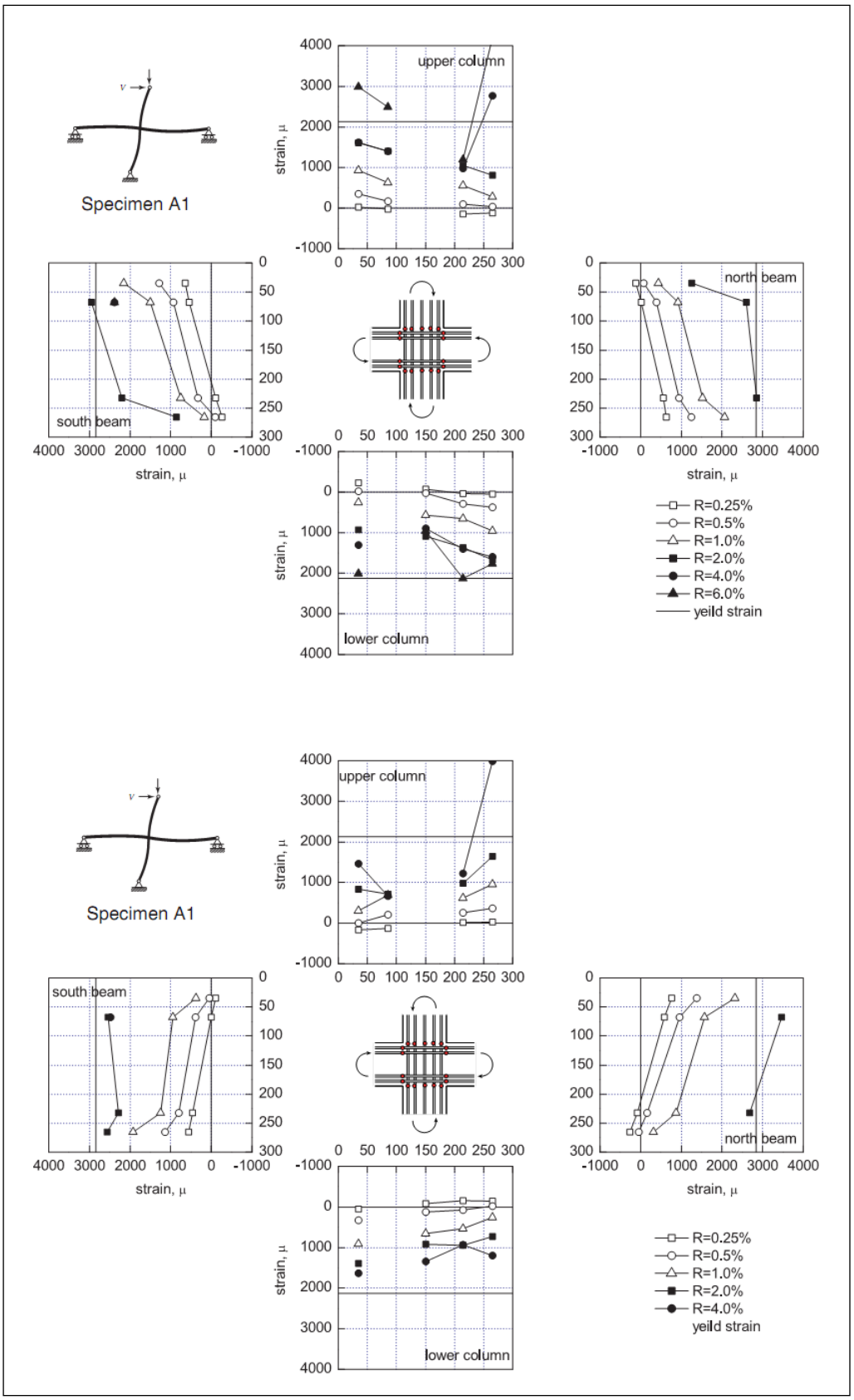
Καμπύλη τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου για τον κόμβο Α2:



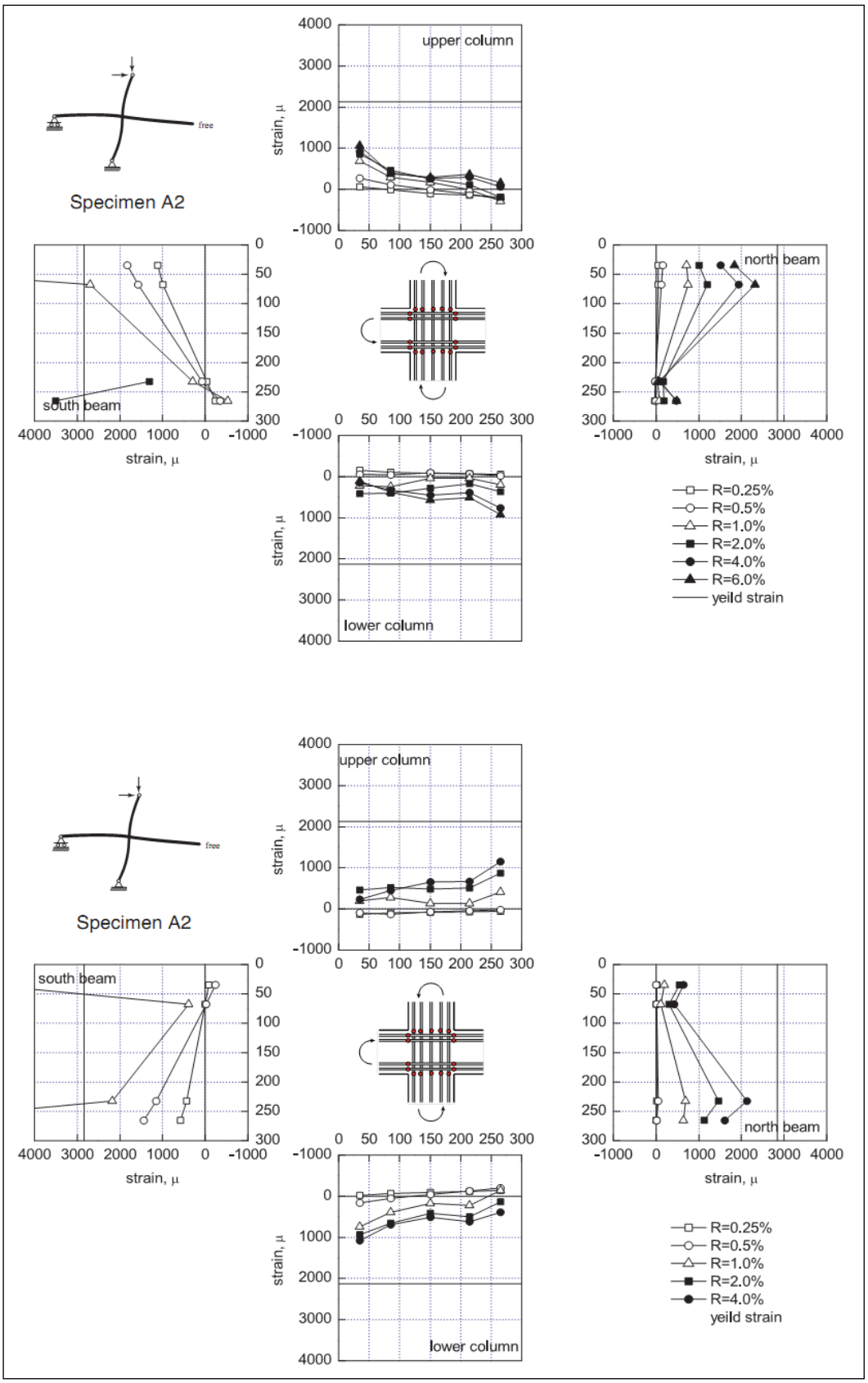
Καμπύλη τέμνουσας ορόφου - σχετικής μετάθεσης ορόφου για τον κόμβο Α1:



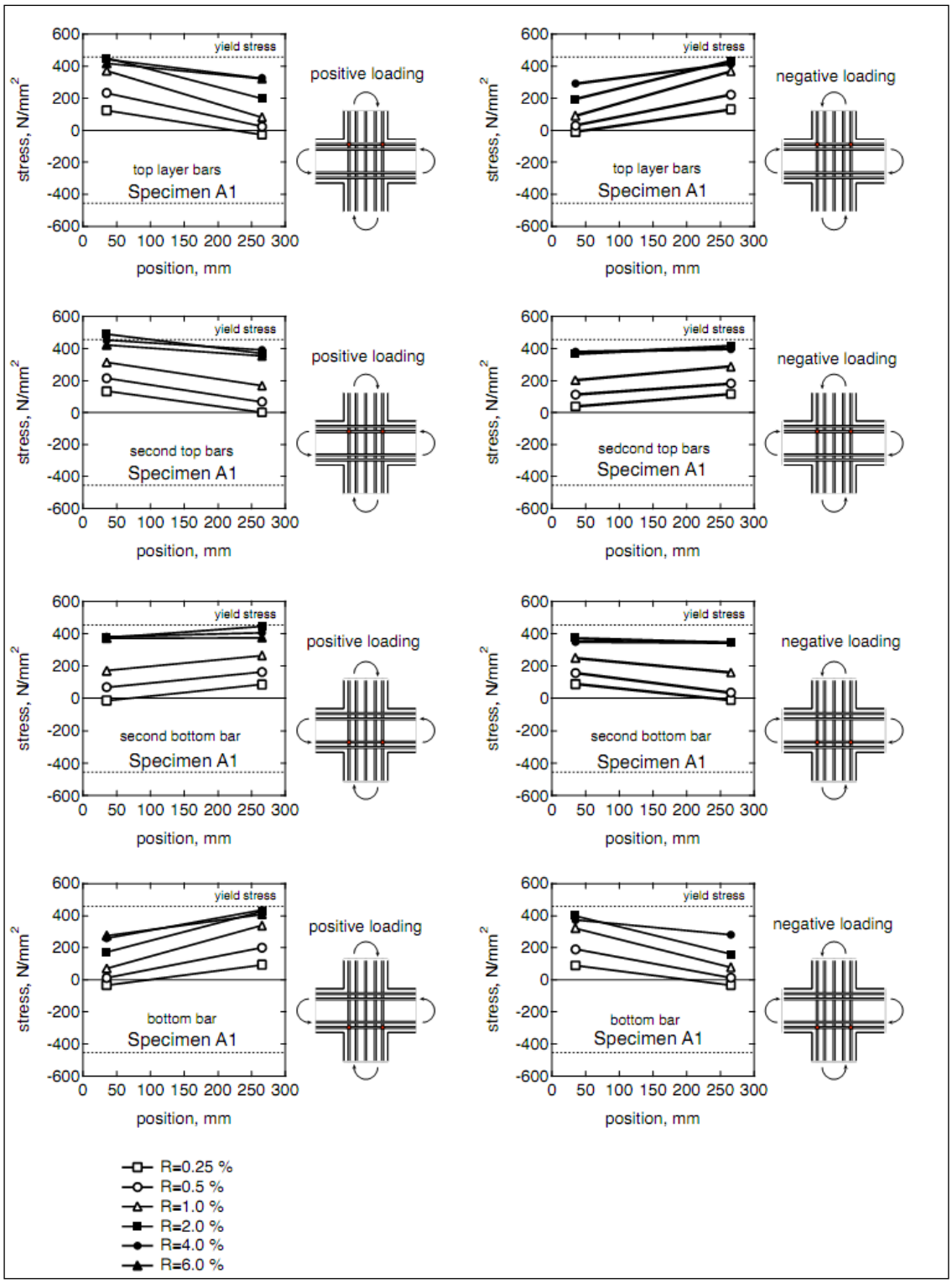
Ανηγμένες παραμορφώσεις διαμήκων οπλισμών δοκού και υποστυλώματος, στις παρειές του κόμβου για θετική και αρνητική φορά φόρτισης, του δοκιμίου A1:



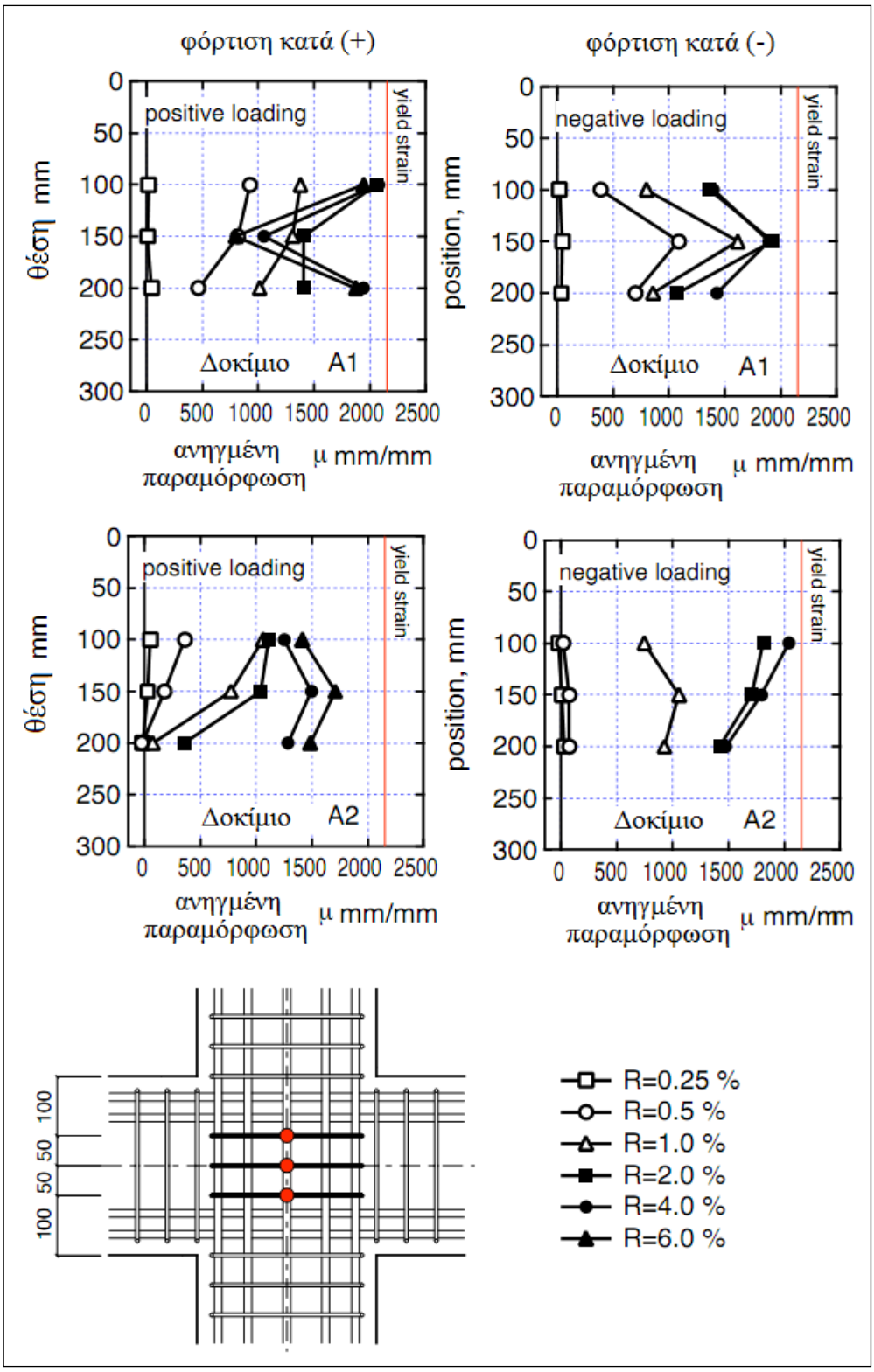
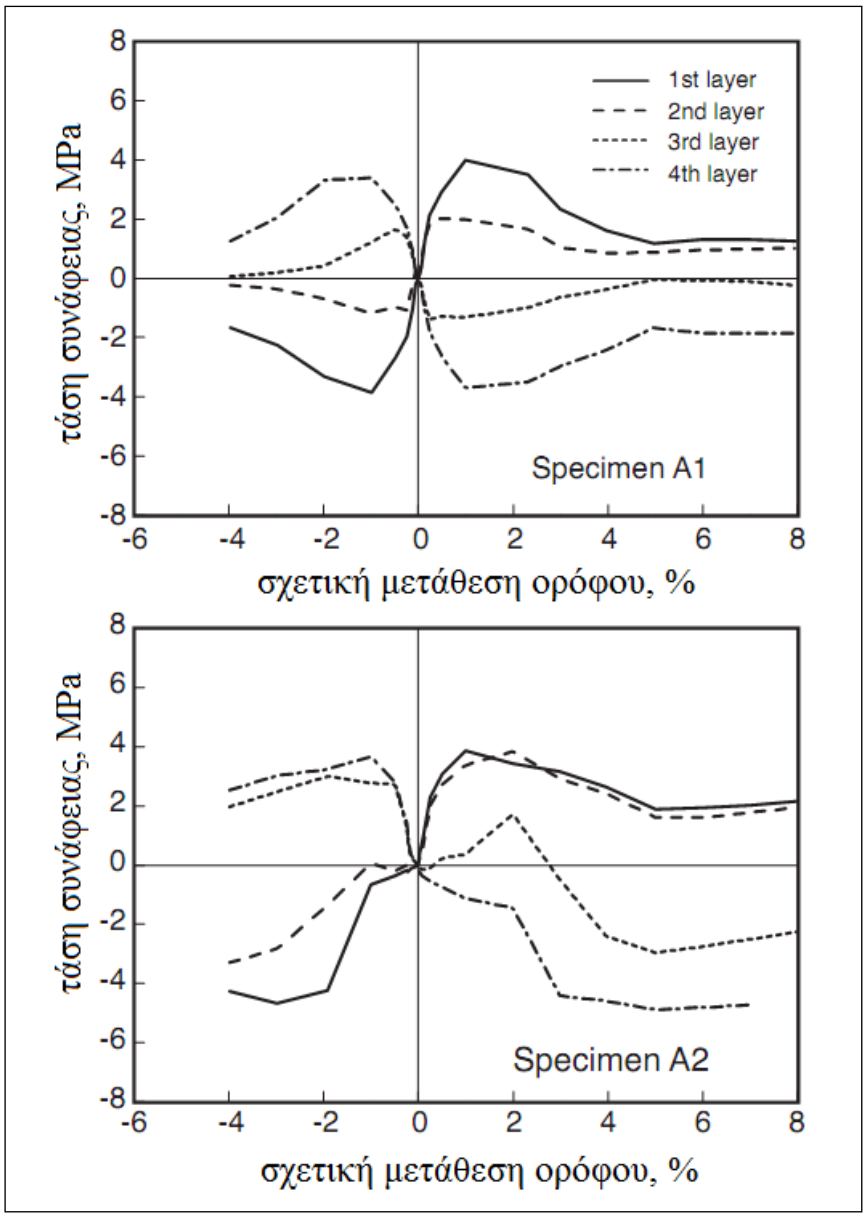
Ανηγμένες παραμορφώσεις διαμήκων οπλισμών δοκού και υποστυλώματος, στις παρειές του κόμβου για θετική και αρνητική φορά φόρτισης, του δοκιμίου Α2:



Τάσεις διαμήκων οπλισμών δοκού (δύο στρώσεις) στις παρειές εκατέρωθεν του κόμβου Α1 για θετική και αρνητική φορά φόρτισης:



Ανηγμένη παραμόρφωση του μεσαίου σημείου των καθ' ύψος συνδετήρων των κόμβων A1 και A2, για θετική και αρνητική φορά φόρτισης:



Τάση συνάφειας που αναπτύσσεται, κατά μήκος των διαμήκων οπλισμών της δοκού (δύο στρώσεις άνω και δύο κάτω) εντός του κόμβου: