

Αντισεισμικός σχεδιασμός πλακών-κεφαλοδέσμων πασσάλων

Seismic design of pile caps

Συμεών ΑΝΑΓΝΩΣΤΗΣ¹, Ιωάννης ΤΕΓΟΣ²

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Οι κεφαλόδεσμοι θα ήταν δυνατόν να χαρακτηριστούν ως τα “γνωστά – άγνωστα”, τουλάχιστον κατά την όπλιση, δομικά στοιχεία των κατασκευών. Η αντιμετώπισή τους από τους Έλληνες μελετητές, κυρίως έναντι της ομάδας δράσεων με το σεισμό, δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως ικανοποιητική. Και τούτο γιατί αντιμετωπίζονται ως κοινά επιφανειακά στοιχεία. Είναι γνωστό όμως ότι οι κεφαλόδεσμοι ανήκουν στα βραχεία στοιχεία, δηλαδή εκείνα τα οποία λειτουργούν με πολύ μικρές τιμές ανοίγματος διατμήσεως, γεγονός που επιβάλλει τη χρησιμοποίηση της μεθόδου θλιπτήρων – ελκυστήρων στη διαστασιολόγησή τους. Ήδη οι Αμερικανικοί Κανονισμοί (ACI 318-05) πρωτοπορούντες, έχουν θεσπίσει το όριο της κλίσεως των θλιπτήρων άνω της οποίας η εφαρμογή της μεθόδου χαρακτηρίζεται ως αναγκαία. Η μέθοδος των θλιπτήρων – ελκυστήρων στα υπόψη δομικά στοιχεία εμφανίζει μεγάλη ποικιλία και ενδιαφέρουσες παραλλαγές. Στην παρούσα εργασία υποδεικνύονται τρόποι εφαρμογής της για όλες τις περιπτώσεις κεφαλοδέσμων των εφαρμογών, κυρίως των γεφυρών. Σε ορισμένες ιδιάζουσες περιπτώσεις, επιστρατεύονται και πειραματικά αποτελέσματα προερχόμενα είτε από αντίστοιχες εργασίες των συγγραφέων της παρούσας, είτε από τη διεθνή βιβλιογραφία. Η εργασία απευθύνεται κυρίως στους μελετητές και αποβλέπει αφενός στη βελτίωση των αποτελεσμάτων αντισεισμικής διαστασιολόγησης και αφετέρου στην επισήμανση κάποιων εσφαλμένων πρακτικών αντιμετώπισης.

ABSTRACT : Pile caps are common yet “unknown” elements in terms of their structural behaviour. It is deemed that they are currently not adequately designed by Greek engineers because they are still considered as regular planar elements. However, pile caps are actually short elements featuring low shear span ratios, which requires strut-and-tie models for their design and detailing. American regulations (e.g. ACI 318-05) pioneer in this direction suggesting a lower limit for the strut inclination over which the application of strut-and-tie models should be enforced. A wide range of such models with interesting variations have been presented in the literature. In this study, strut-and-tie modeling guidelines are suggested for various pile cap applications, especially for bridge construction. In specific cases, experimental results (from previous studies by the Authors or the literature) are also mobilized to support analytical modeling. The present study addresses mainly to designers, aiming to improve existing seismic design practices for pile caps and underline various pitfalls.

¹ Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ., Εργαστήριο Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., email: anagnsim@civil.auth.gr

² Καθηγητής, Εργαστήριο Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πλάκες-κεφαλόδεσμοι είναι βραχεία επιφανειακά δομικά στοιχεία τα οποία συνδέουν τις κεφαλές των πασσάλων στους οποίους μεταβιβάζουν το φορτίο του υπερκείμενου κατακόρυφου στοιχείου. Στις πλάκες-κεφαλόδεσμους δεν ισχύει η αρχή της επιπεδότητας των διατομών του Bernoulli και επομένως δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται με τις μεθόδους ανάλυσης και τους κανόνες διαστασιολόγησης και κατασκευαστικής διαμόρφωσης όπλισης που ισχύουν για τα κοινά – “κανονικά” – επιφανειακά στοιχεία. Κατά κανόνα, οι πλάκες-κεφαλόδεσμοι κατασκευάζονται με μεγάλο πάχος σε σχέση με τη μεταξύ των πασσάλων απόσταση με αποτέλεσμα η τιμή του ανοίγματος διάτμησης a/d να είναι πολύ μικρή ($1 < a/d < 2$). Οι μικρές τιμές του ανοίγματος διάτμησης, η μη γραμμική κατανομή των παραμορφώσεων καθ’ ύψος της διατομής και η μη ομοιόμορφη κατανομή των θλιπτικών τάσεων κατά πλάτος της επιβάλλουν την εφαρμογή της μεθόδου θλιπτήρων – ελκυστήρων (strut-and-tie models) στην ανάλυση και τη διαστασιολόγηση αυτών των ιδιόμορφων, ως προς τη μηχανική συμπεριφορά, δομικών στοιχείων των κατασκευών.

Ήδη από το 2002, ο Αμερικανικός Κανονισμός (ACI 318-05) υπολαμβάνει ως όριο της κλίσης των θλιπτήρων στις πλάκες-κεφαλόδεσμους τη γωνία $\theta > 25^\circ$, άνω της οποίας η εφαρμογή της μεθόδου θλιπτήρων – ελκυστήρων (Appendix A – Strut-and-tie models) χαρακτηρίζεται ως αναγκαία για το σχεδιασμό τους. Επίσης, περιλαμβάνει διατάξεις κατασκευαστικής διαμόρφωσης των οπλισμών σε κεφαλόδεσμους που δέχονται σεισμικά φορτία. Γενικές διατάξεις για την εφαρμογή της μεθόδου θλιπτήρων – ελκυστήρων σε βραχεία στοιχεία ή σε περιοχές στοιχείων με μη γραμμική κατανομή των παραμορφώσεων υπάρχουν επίσης στον Πρότυπο Κώδικα της CEB (CEB/FIP Model Code 1990) και τον Ευρωκώδικα 2 (EN 1992-1-1). Οι Ελληνικοί Κανονισμοί (ΕΚΩΣ 2000 και ΕΑΚ 2000) και οι Ευρωκώδικες 2 και 8 (EN 1998-1, EN 1998-2, EN 1998-5) δεν περιλαμβάνουν καμία ρητή πρόβλεψη για τον υπολογισμό των πλακών-κεφαλοδέσμων, τόσο για κεντρική όσο και για σεισμική φόρτιση.

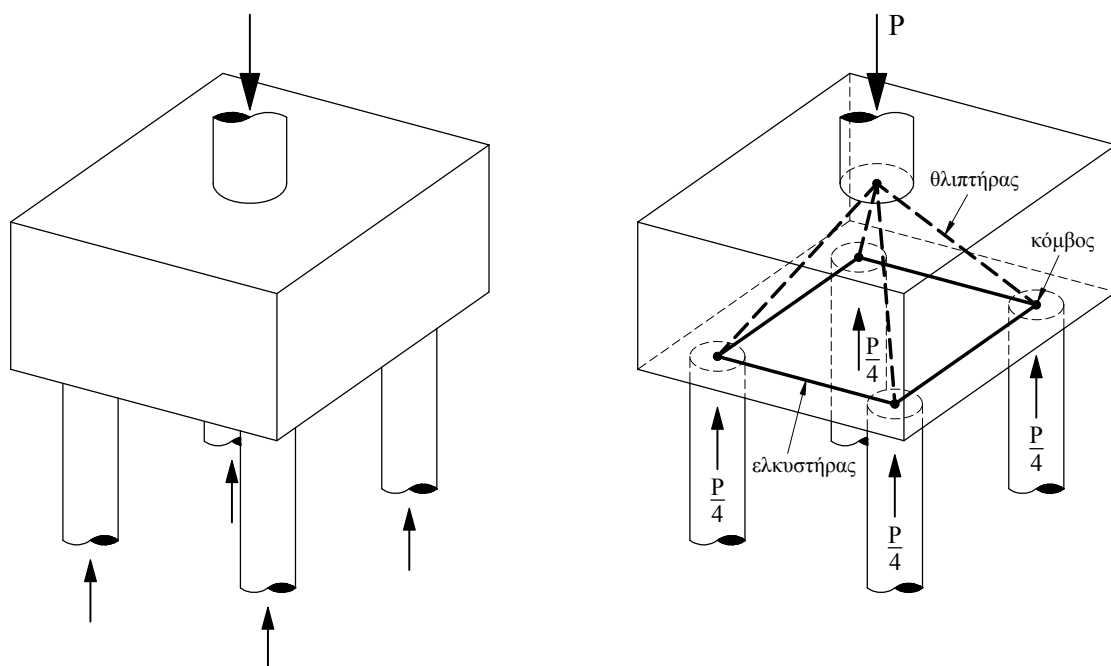
Η μέθοδος θλιπτήρων – ελκυστήρων λαμβάνει υπόψη τη γενικότερη ροή των δυνάμεων στο εσωτερικό των βραχέων στοιχείων (θεώρηση συνεχών πεδίων θλιπτικών και εφελκυστικών δυνάμεων) και δεν περιλαμβάνει ελέγχους αντοχής συγκεκριμένων διατομών. Το δομικό στοιχείο υπολαμβάνεται ως ιδεατό δικτύωμα το οποίο συντίθεται από ευθύγραμμους ιδεατούς θλιπτήρες (περιοχές που μεταφέρουν τις δυνάμεις σύνθλιψης του σκυροδέματος) και ελκυστήρες (οπλισμοί). Οι περιοχές του στοιχείου όπου οι θλιπτήρες (struts) και οι ελκυστήρες (ties) συγκλίνουν θεωρούνται ως κόμβοι (nodes). Οι δυνάμεις των στοιχείων του δικτύωματος προσδιορίζονται από την εξέταση των συνθηκών ισορροπίας. Ελέγχονται οι τάσεις των οπλισμών των ελκυστήρων και οι τάσεις του σκυροδέματος των θλιπτήρων και των κόμβων. Οι τάσεις αυτές δεν πρέπει να υπερβαίνουν τις οριακές τιμές που θέτουν, κατά περίπτωση, οι Κανονισμοί. Σημειωτέον ότι και στην περίπτωση των κεφαλοδέσμων, όπως και στις συγγενείς περιπτώσεις των βραχέων προβόλων και των υψίκορμων δοκών, απουσιάζουν οι συμβατικοί έλεγχοι λειτουργικότητας.

Ένας κεφαλόδεσμος πρέπει να είναι σε θέση να μεταφέρει με ασφάλεια τις δράσεις της ανωδομής στο έδαφος. Για τα φορτία βαρύτητας, αρκεί η αντοχή των θλιπτήρων και των ελκυστήρων του να είναι μεγαλύτερη από τις δυνάμεις των αντίστοιχων στοιχείων του ιδεατού δικτύωματος. Για το συνδυασμό δράσεων με το σεισμό, η αρχή σχεδιασμού παραμένει η ίδια

αλλά ο μηχανισμός μεταφοράς των δράσεων της ανωδομής στο έδαφος και αντίστροφα, είναι αρκετά πιο πολύπλοκος. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τρόποι εφαρμογής της μεθόδου θλιπτήρων – ελκυστήρων για την αντισεισμική μελέτη των πλακών-κεφαλοδέσμων που εφαρμόζονται κυρίως στις θεμελιώσεις των γεφυρών. Επίσης, επισημαίνονται κάποιες εσφαλμένες πρακτικές αντιμετώπισής τους και γίνονται συστάσεις για τη βελτίωση του τρόπου διαστασιολόγησης και του τρόπου διάταξης των οπλισμών τους. Μολονότι εκ του τίτλου προκύπτει ότι αντικείμενο της εργασίας είναι η παρουσίαση στοιχείων αναφορικά με την αντισεισμική μελέτη των κεφαλοδέσμων, ωστόσο, κρίθηκε αυτονόητη η παρουσίαση και θεμάτων κεντρικού υπολογισμού καθόσον στην επεξεργασία οποιουδήποτε θέματος δεν είναι δυνατόν κανείς να αρχίζει από το τέλος.

ΠΛΑΚΕΣ-ΚΕΦΑΛΟΔΕΣΜΟΙ ΥΠΟ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Υπό κεντρική φόρτιση, το φορτίο του κατακόρυφου στοιχείου (στύλου) μεταβιβάζεται στους πασσάλους μέσω διαγώνιων θλιπτήρων οι οριζόντιες συνιστώσες των οποίων παραλαμβάνονται από τους οπλισμούς που λειτουργούν ως ελκυστήρες (Σχ. 1). Οι οπλισμοί των ελκυστήρων πρέπει να συγκεντρώνονται σε δέσμες πάνω από τους πασσάλους και να μην κατανέμονται ομοιόμορφα, όπως γίνεται συνήθως, σε όλο το πλάτος του κεφαλοδέσμου (Schlaich & Schäfer, 2001). Σύμφωνα με τα πειράματα των Blénot & Frémy (1967), του Clarke (1973) και των Suzuki et al. (1998), ένας κεφαλοδέσμος με τέσσερις πασσάλους παρουσιάζει έως και 20% μικρότερη αντοχή, όταν οι οπλισμοί του, αντί να είναι συγκεντρωμένοι πάνω από τους πασσάλους, είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι σε όλο το πλάτος του. Αυτό συμβαίνει γιατί οι θλιπτήρες εδράζονται απ' ευθείας στις κεφαλές των πασσάλων και ενεργοποιούν μόνο τους οπλισμούς που διέρχονται πάνω από αυτές.



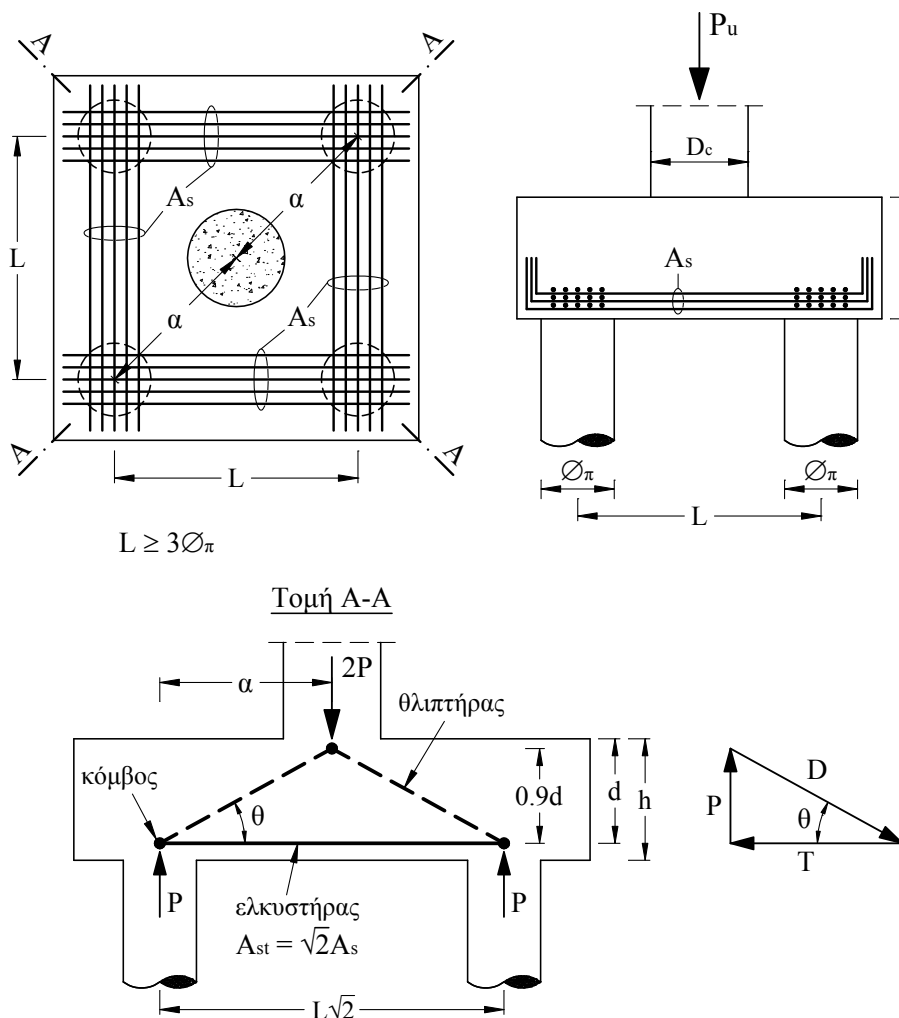
Σχήμα 1. Πλάκα-κεφαλοδέσμος με τέσσερις πασσάλους υπό κεντρική φόρτιση και ιδεατό χωρικό δίκτυμα μεταφοράς του φορτίου

Πλάκα-κεφαλόδεσμος με τέσσερις πασσάλους (σύστημα πασσάλων 2×2)

Ο κεφαλόδεσμος του Σχήματος 2 συνδέει τις κεφαλές ενός συστήματος πασσάλων 2×2 και έχει τετραγωνική διάταξη ελκυστήρων. Στην περίπτωση αυτή το ιδεατό χωρικό δικτύωμα θλιπτήρων – ελκυστήρων είναι στατικώς ορισμένο και οι δυνάμεις των στοιχείων του προκύπτουν από την εξέταση της ισορροπίας. Η φέρουσα ικανότητα του κεφαλόδεσμου με βάση των αντοχή των ελκυστήρων υπολογίζεται από τη σχέση :

$$P_T = 4 \left(\frac{0.9d}{\alpha} \right) \sqrt{2} A_s f_y \quad (1)$$

Σύμφωνα με πειραματικά αποτελέσματα από 30 ισχυρά οπλισμένα δοκίμια (Blénot & Frémy, 1967, Adebar et al., 1990, Αναγνώστης et al., 2003), η έκφραση της αντοχής V_{Rd2} της γενικής μεθόδου του Κανονισμού προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό και με σχετική ασφάλεια την αντοχή των κεφαλοδέσμων σε τέμνουσα. Οι λόγοι των πειραματικών προς τις υπολογιστικές αντοχές έχουν μέσο όρο 1.47 και συντελεστή διακύμανσης COV = 29%.



Σχήμα 2. Διάταξη οπλισμών και προσομοίωμα θλιπτήρων – ελκυστήρων για πλάκα-κεφαλόδεσμο με τέσσερις πασσάλους σε τετραγωνική διάταξη (σύστημα πασσάλων 2×2) υπό κεντρική φόρτιση

Την κύρια αιτία αστοχίας ενός ισχυρά οπλισμένου κεφαλόδεσμου δεν την αποτελεί η συντριβή αλλά η διαμήκης διάρρηξη του σκυροδέματος των θλιπτήρων του εξαιτίας του συνυπάρχοντος εγκάρσιου εφελκυσμού. Η αντοχή V_{Rd2} , αν και εκφράζει εντελώς διαφορετικό μηχανισμό αστοχίας, φαίνεται πως μπορεί να αποτελέσει ένα κριτήριο επάρκειας του πάχους ή του κεφαλόδεσμου. Η φέρουσα ικανότητα του κεφαλόδεσμου του Σχήματος 2 με βάση την αντοχή των θλιπτήρων του υπολογίζεται από τη σχέση :

$$P_s = 4 V_{Rd2} = 4 \frac{b_w (0.9d) v f_c}{(\cot \theta + \tan \theta)} \quad (2)$$

η οποία για $v \approx 0.575$, $b_w = \varnothing_\pi$ και $\tan \theta = 1 / \cot \theta = 0.9d / \alpha$ γίνεται :

$$P_s = 4 \left(\frac{0.9d}{\alpha} \right) \frac{0.518 \varnothing_\pi d f_c}{1 + 0.81 \left(\frac{d}{\alpha} \right)^2} \quad (3)$$

Στην περίπτωση που οι δύο αντοχές είναι ίσες, ο κεφαλόδεσμος παρουσιάζει ισορροπημένη αστοχία (balanced failure) κατά την οποία η διαρροή των ελκυστήρων και η αστοχία των θλιπτήρων συμβαίνουν συγχρόνως. Από την εξίσωση των δύο αντοχών (Εξ. 1 και Εξ. 3) και κατ' αναλογία με το αντίστοιχο και γνωστότερο καμπτικό πρόβλημα, προκύπτει το balanced μηχανικό ποσοστό οπλισμού ενός κεφαλόδεσμου με τέσσερις πασσάλους και περιμετρικούς ελκυστήρες :

$$\omega_{bal} = \frac{0.37}{1 + 0.81 \left(\frac{d}{\alpha} \right)^2} \quad (4)$$

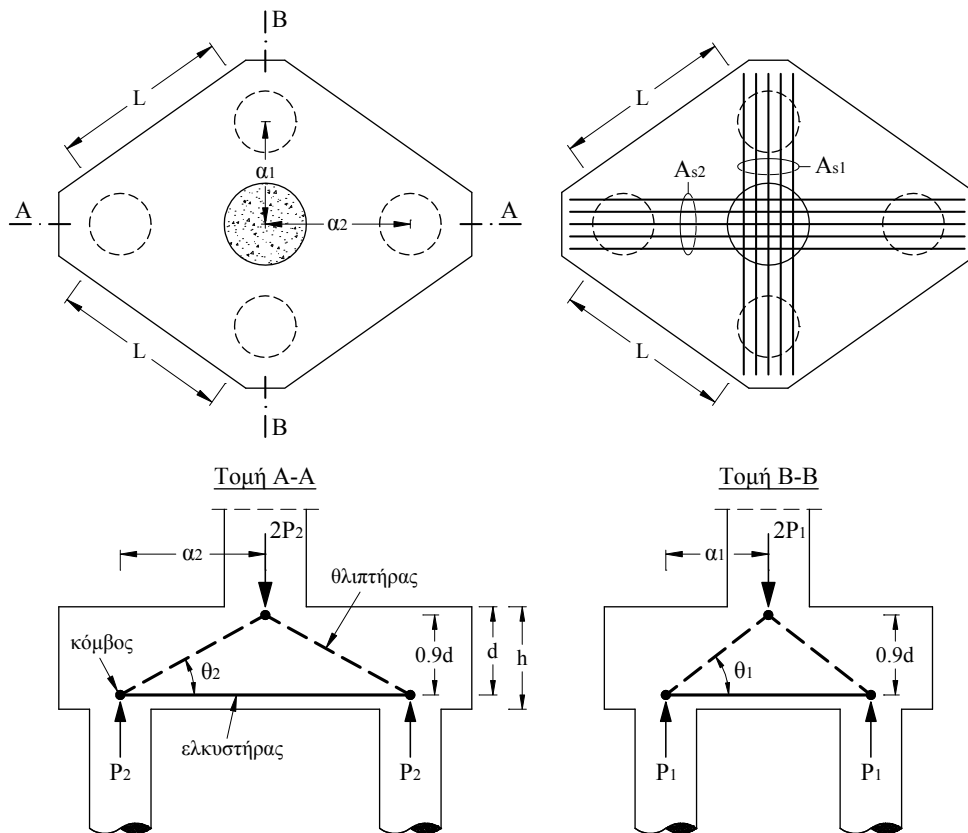
Το ω_{bal} εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία του κεφαλόδεσμου και αποτελεί παράμετρο – κλειδί για τον επιβεβλημένο από τους Αντισεισμικούς Κανονισμούς ικανοτικό σχεδιασμό των κεφαλοδέσμων. Ένας κεφαλόδεσμος με $\omega < \omega_{bal}$ παρουσιάζει διαρροή των ελκυστήρων (καμπτική αστοχία) πριν τη διάρρηξη των θλιπτήρων (διαμητική αστοχία). Το ω_{bal} εμπεριέχει επίσης στοιχεία οικονομικότητας γιατί δίνει τη δυνατότητα πλήρους εκμετάλλευσης των οπλισμών των ελκυστήρων.

Αν και πρόκειται για πλάκες, στις περιμετρικές ζώνες των ελκυστήρων είθισται να τοποθετούνται και συνδετήρες οι οποίοι διατάσσονται ομοιόμορφα στη μεταξύ των οικείων πασσάλων περιοχή. Μέχρι σήμερα, οι συνδετήρες αυτοί τοποθετούνται εμπειρικά καθώς, λόγω της πολύ μικρής τιμής του a/d , δεν υπάρχει πρόβλημα V_{Rd3} ούτε στην τέμνουσα, ούτε στη διάτρηση (Τέγος, 1996). Ωστόσο, οι τοποθετούμενοι συνδετήρες σε συνεργασία με τους κάτω ευθύγραμμους οπλισμούς μεταξύ των πασσάλων δημιουργούν τις προϋποθέσεις για την ενεργοποίηση ενός συμπληρωματικού μηχανισμού θλιπτήρων – ελκυστήρων ο οποίος παραλαμβάνει μέρος του κεντρικού φορτίου και οδηγεί σε αύξηση της φέρουσας ικανότητας του κεφαλόδεσμου. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι η συνεισφορά του συμπληρωματικού μηχανισμού στη συνολική φέρουσα ικανότητα διπλασιάζεται, αν οι συνδετήρες και οι αντίστοιχοι κάτω ευθύγραμμοι οπλισμοί του κεφαλόδεσμου συγκεντρωθούν στα μέσα των

περιμετρικών ζωνών μεταξύ των πασσάλων και συγκεκριμένα στην περιοχή κάτω από το κατακόρυφο στοιχείο (Αναγνώστης et al., 2006).

Πλάκα-κεφαλόδεσμος με τέσσερις πασσάλους σε ρομβική διάταξη

Ο κεφαλόδεσμος του Σχήματος 3 διαστασιολογείται ώστε να μεταφέρει το κεντρικό φορτίο του υποστυλώματος σε ομάδα τεσσάρων πασσάλων που έχουν ρομβική διάταξη. Στην περίπτωση αυτή οι πάσσαλοι δεν βρίσκονται σε ίσες αποστάσεις από το κατακόρυφο στοιχείο και το ιδεατό χωρικό δικτύωμα θλιπτήρων – ελκυστήρων, εξαιρουμένης της περίπτωσης απείρου δυσκαμψίας κεφαλόδεσμου, δεν είναι στατικώς ορισμένο. Για να υπολογιστούν οι απαιτούμενοι οπλισμοί και το πάχος του κεφαλόδεσμου πρέπει να είναι γνωστές οι αντιδράσεις των πασσάλων. Η παραδοχή που γίνεται συνήθως σε κάθε περίπτωση μη στατικώς ορισμένου κεφαλόδεσμου είναι ότι οι αντιδράσεις όλων των πασσάλων του συστήματος είναι ίσες, ότι δηλαδή η δυσκαμψία του κεφαλόδεσμου είναι άπειρη οπότε το κεντρικό φορτίο ισοκατανέμεται στους πασσάλους. Σύμφωνα με πειραματικά αποτελέσματα (Adebar et al., 1990), η πραγματική κατανομή του φορτίου στους πασσάλους κατά την αστοχία δεν είναι ομοιόμορφη και οι πάσσαλοι που βρίσκονται κοντά στο κατακόρυφο στοιχείο δέχονται περισσότερο φορτίο από εκείνους που βρίσκονται μακριά από αυτό. Η παραδοχή της ομοιόμορφης κατανομής του φορτίου στις περιπτώσεις κεφαλοδέσμων που οι πάσσαλοι του συστήματος δεν ισαπέχουν από το κατακόρυφο στοιχείο δεν αποτελεί ασφαλή επιλογή σχεδιασμού, καθόσον η απειρία δυσκαμψίας του κεφαλόδεσμου σπανίως ισχύει απολύτως.

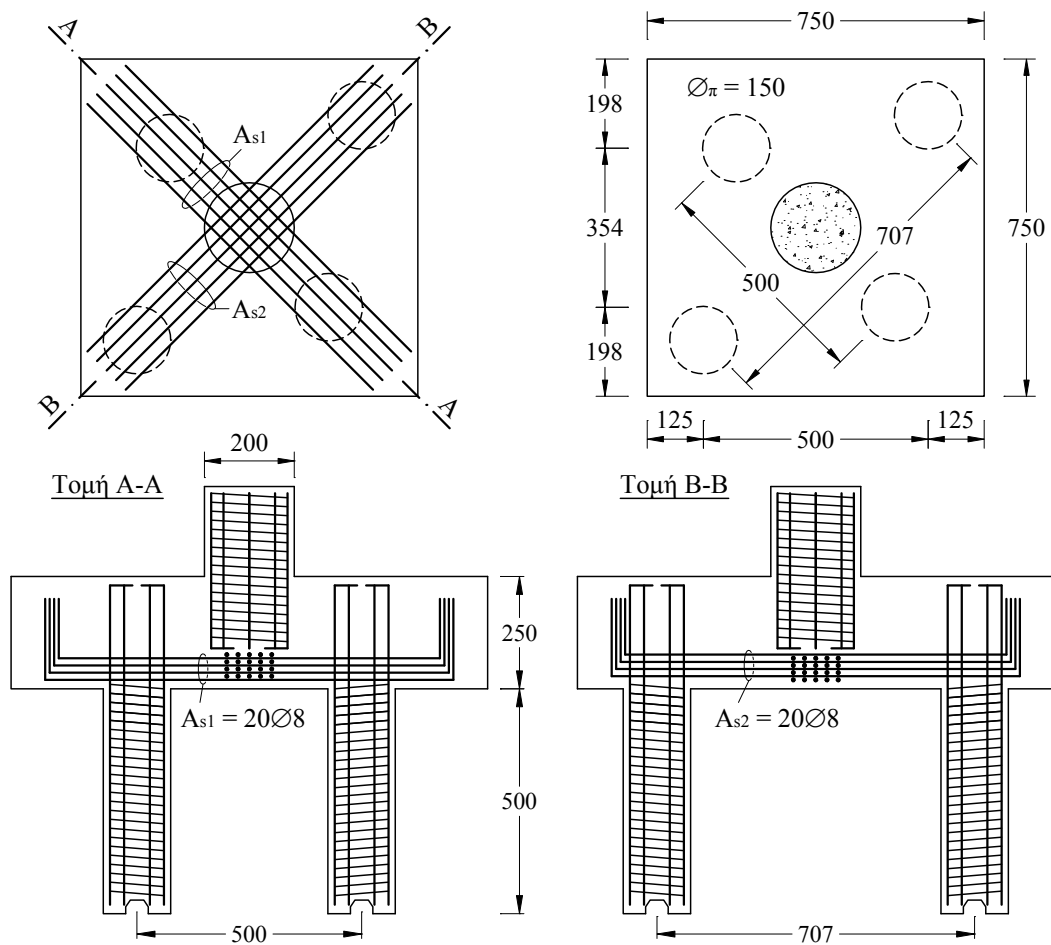


Σχήμα 3. Διάταξη οπλισμών και προσομοίωμα θλιπτήρων – ελκυστήρων για πλάκα-κεφαλόδεσμο με τέσσερις πασσάλους σε ρομβική διάταξη υπό κεντρική φόρτιση

Πειραματική έρευνα

Στο Σχήμα 4 φαίνεται η γεωμετρία και η διάταξη όπλισης ενός μη στατικώς ορισμένου κεφαλόδεσμου που εξετάστηκε στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Α.Π.Θ.. Το δοκίμιο κατασκευάστηκε υπό κλίμακα 1:3 και αποτελεί μέρος γενικότερης ερευνητικής εργασίας στην οποία εξετάζονται συμβατικές και μη συμβατικές διατάξεις οπλίσεως πλάκων-κεφαλοδέσμων. Το δοκίμιο εξετάστηκε υπό κεντρική φόρτιση και το φορτίο αστοχίας προέκυψε 1180 KN. Το δοκίμιο ήταν ισχυρά οπλισμένο ($\omega > \omega_{bal}$) με κρίσιμη την αντοχή των θλιπτήρων του. Οι υπολογιστικές αντοχές του δοκιμίου, τα πειραματικά αποτελέσματα κ.λπ. δίνονται στον Πίνακα 1.

Η κατανομή του φορτίου στους πασσάλους προσδιορίστηκε μέσω μετρήσεων βάσει ταινιών παραμόρφωσης (strain gages), που τοποθετήθηκαν σε κατάλληλες θέσεις στους ελκυστήρες και στους οπλισμούς των πασσάλων. Τόσο από τις παραμορφώσεις των ελκυστήρων όσο και από τις παραμορφώσεις των πασσάλων προέκυψε ότι οι πάσσαλοι κοντά στο υποστύλωμα δέχτηκαν το 62% του φορτίου αστοχίας (728 KN), ενώ οι πάσσαλοι μακριά από το υποστύλωμα δέχτηκαν το υπόλοιπο 38% του φορτίου (452 KN). Ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη αντίδραση των πασσάλων, διαπιστώθηκε ότι απέχει κατά πολύ από τη μονάδα ($P_1 / P_2 = 364 / 226 = 1.61$).



Σχήμα 4. Γεωμετρία και οπλισμοί δοκιμίου PC22 (Διαστάσεις σε mm)

Πίνακας 1. Πειραματικά αποτελέσματα και υπολογιστικές αντοχές δοκιμίου

Δοκίμιο	f_c , MPa	f_y , MPa	Φορτίο αστοχίας, KN	Φορτίο στους πασσάλους κοντά στο υποστύλωμα, KN (ποσοστό)	Φορτίο στους πασσάλους μακριά από το υποστύλωμα, KN (ποσοστό)	P_s Εξ. 3, KN	P_T Εξ. 1, KN
PC22	31.6	560	1180	728 (0.62)	452 (0.38)	831	1348

Με βάση διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα και για την περίπτωση των συνήθους ευκαμψίας πλακών-κεφαλόδεσμων, προτείνεται ως κριτήριο κατανομής του κεντρικού φορτίου ενός κεφαλόδεσμου στους πασσάλους του η κλίση των θλιπτήρων που καταλήγουν σ' αυτούς. Για τον κεφαλόδεσμο του Σχήματος 3 το ποσοστό του κεντρικού φορτίου P που καταλήγει στους κοντά στο υποστύλωμα πασσάλους είναι :

$$2P_1 = \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} P \quad (5)$$

ενώ το αντίστοιχο ποσοστό του κεντρικού φορτίου P που καταλήγει στους μακριά από το υποστύλωμα πασσάλους είναι :

$$2P_2 = \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} P \quad (6)$$

Υποληπτεύου ότι τα δύο τόξα με ελκυστήρα του κεφαλόδεσμου έχουν το ίδιο στατικό ύψος, οι παραπάνω σχέσεις παίρνουν τη μορφή :

$$2P_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} P \quad (7)$$

και

$$2P_2 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} P \quad (8)$$

όπου α_1 και α_2 είναι οι αποστάσεις των πασσάλων από τη βάση του εδραζόμενου στύλου (Σχ. 3). Από τις Εξισώσεις 7 και 8 προκύπτει ότι η κατανομή του κεντρικού φορτίου στους πασσάλους εξαρτάται μόνο από τις αποστάσεις των πασσάλων από το εδραζόμενο στοιχείο. Ωστόσο, υπάρχει ακόμα μία παράμετρος η οποία πρέπει να ληφθεί πολύ σοβαρά υπόψη και η οποία είναι η διάταξη των οπλισμών. Αν στην περίπτωση του κεφαλόδεσμου του Σχήματος 3 οι οπλισμοί διαταχθούν περιμετρικώς κατά τις πλευρές του ρόμβου (και όχι κατά τις διαγωνίους του) το σύστημα ισορροπεί μόνο για την περίπτωση που οι αντιδράσεις των πασσάλων είναι ίσες. Μόνο για την ακραία αυτή κατανομή του φορτίου η εξέταση της ισορροπίας των δύο τόξων καταλήγει στις ίδιες τάσεις περιμετρικώς τοποθετημένων οπλισμών. Για τη συγκεκριμένη διάταξη οπλισμών, αυτό αποτελεί "εκ των ων ουκ άνευ" συνθήκη γιατί τώρα ίσης διατομής οπλισμοί συνθέτουν τους ελκυστήρες και των δύο τόξων, ενώ για τη διάταξη οπλισμών του Σχήματος 3 ο ελκυστήρας κάθε τόξου διαθέτει τους οικείους

αυτού οπλισμούς. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η κατανομή δεν καθορίζεται από τις θέσεις των πασσάλων ως προς το κατακόρυφο στοιχείο αλλά από τη διάταξη των οπλισμών. Βεβαίως, στην οπλωσδήποτε ρεαλιστικότερη ανισοκατανομή των φορτίων, είτε θα πρέπει να γίνει δεκτή αποφόρτιση κατά μήκος των ελκυστήρων, είτε να υποληφθεί ακατάλληλη για την περίπτωση η περιμετρική διάταξη των οπλισμών των ελκυστήρων.

Η προβλεπόμενη από τις Εξισώσεις 5 και 6 κατανομή του φορτίου για τα πειραματικά δοκίμια των Adebar et al. (1990), καθώς και για το δοκίμιο της παρούσας εργασίας, δίνονται στον Πίνακα 2. Στον ίδιο Πίνακα δίνονται επίσης οι αποστάσεις των πασσάλων από το υποστύλωμα και οι γωνίες των θλιπτήρων που καταλήγουν σ' αυτούς. Το προτεινόμενο κριτήριο κατανομής φαίνεται να προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τα πειραματικά αποτελέσματα. Οι διαφορές των προβλέψεων από τις πραγματικές κατανομές κυμαίνονται από 3% έως 14%. Τα πειραματικά αποτελέσματα προφανώς αναφέρονται σε κεφαλόδεσμούς των οποίων οι πάσσαλοι είναι πάσσαλοι αιχμής, ωστόσο, η παρούσα αναλυτική προσέγγιση αφορά τη συνήθη κατάσταση πασσάλων των οποίων η φέρουσα ικανότητα συντίθεται από δράσεις τριβών και αιχμής.

Πίνακας 2. Σύγκριση των προβλέψεων του προτεινόμενου κριτηρίου κατανομής του φορτίου στους πασσάλους με τα πειραματικά αποτελέσματα

Δοκίμιο	θ_1 ($^\circ$)	θ_2 ($^\circ$)	α_1 , m	α_2 , m	Φορτίο αστοχίας, KN	Πειραματικά αποτελέσματα		Προτεινόμενο κριτήριο κατανομής του φορτίου	
						Φορτίο στους πασσάλους κοντά στο υποστύλωμα, KN (ποσοστό)	Φορτίο στους πασσάλους μακριά από το υποστύλωμα, KN (ποσοστό)	$\frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_1 + \tan\theta_2}$	$\frac{\tan\theta_2}{\tan\theta_1 + \tan\theta_2}$
- Adebar et al. (1990)									
B	38	24	0.45	0.78	2189	1575 (0.72)	614 (0.28)	0.64	0.36
C	39	19	0.45	1.01	2892	2303 (0.80)	589 (0.20)	0.70	0.30
D	38	24	0.45	0.78	3222	2205 (0.68)	1017 (0.32)	0.64	0.36
E	39	25	0.45	0.78	4709	3243 (0.69)	1466 (0.31)	0.64	0.36
F	38	24	0.45	0.78	3026	2059 (0.68)	965 (0.32)	0.64	0.36
- Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ.									
PC22	36	26	0.25	0.354	1180	728 (0.62)	452 (0.38)	0.60	0.40

Πλάκα-κεφαλόδεσμος με εννέα πασσάλους (σύστημα πασσάλων 3×3)

Ο κεφαλόδεσμος του Σχήματος 5 περιλαμβάνει τέσσερις πασσάλους στα μέσα των πλευρών της περιμέτρου του, τέσσερις γωνιακούς πασσάλους και έναν κεντρικό πάσσαλο, κάτω ακριβώς από το κατακόρυφο στοιχείο. Το χωρικό δικτύωμα θλιπτήρων – ελκυστήρων προδήλως δεν είναι στατικώς ορισμένο και υπό κεντρική φόρτιση οι αντιδράσεις των

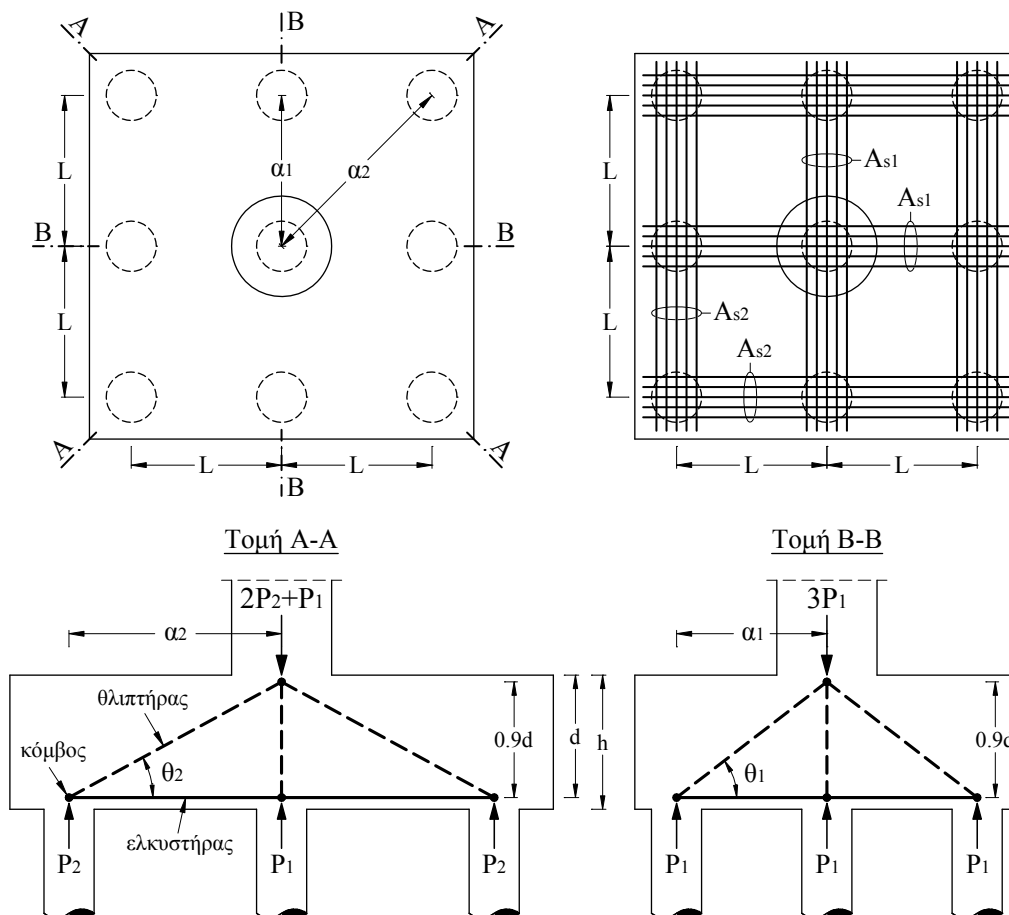
πασσάλων δεν είναι δυνατόν να είναι ίσες όταν ο κεφαλόδεσμος διαθέτει κάποιο βαθμό ευκαμψίας. Λόγω θέσης, ο κεντρικός πάσσαλος είναι αναμενόμενο να δέχεται περισσότερο φορτίο από τους υπόλοιπους πασσάλους, παρά το γεγονός ότι ο κατακόρυφος θλιπτήρας που καταλήγει στην κεφαλή του δεν φαίνεται να δημιουργεί κάποια απαίτηση οπλισμού.

Η παραδοχή ότι ο κεντρικός πάσσαλος αναδέχεται τουλάχιστον την ίδια φόρτιση με τους τέσσερις πασσάλους που βρίσκονται στα μέσα των πλευρών του κεφαλόδεσμου (Σχ. 5, Τομή B-B), κρίνεται ως συντηρητική. Μια πιο συντηρητική, όχι όμως ρεαλιστική, προσέγγιση θα ήταν να αγνοηθεί ο κεντρικός πάσσαλος και το σύνολο του φορτίου να κατανομηθεί στους υπόλοιπους οκτώ πασσάλους (μεγιστοποίηση απαιτούμενων οπλισμών και πάχους κεφαλόδεσμου). Με βάση το προτεινόμενο κριτήριο κατανομής του φορτίου, είναι :

$$P_1 = 0.128 P \quad (9)$$

$$P_2 = 0.09 P \quad (10)$$

όπου P_1 είναι η αντίδραση των πασσάλων που απέχουν α_1 από το κατακόρυφο στοιχείο, P_2 είναι η αντίδραση των πασσάλων που απέχουν α_2 και P είναι το συνολικό κεντρικό φορτίο του κεφαλόδεσμου (Σχ. 5). Είναι επίσης :



Σχήμα 5. Διάταξη οπλισμών και προσομοίωμα θλιπτήρων – ελκυστήρων για πλάκα-κεφαλόδεσμο με εννέα πασσάλους (σύστημα πασσάλων 3×3) υπό κεντρική φόρτιση

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \sqrt{2} \quad (11)$$

Οι απαιτούμενοι οπλισμοί στους εσωτερικούς ελκυστήρες υπολογίζονται από τη σχέση :

$$A_{s1} = \frac{P_1}{\tan \theta_1 f_y} = 1.10 \left(\frac{\alpha_1}{d} \right) \frac{P_1}{f_y} \quad (12)$$

και οι απαιτούμενοι οπλισμοί στους περιμετρικούς ελκυστήρες υπολογίζονται από τη σχέση :

$$A_{s2} = \frac{P_2}{\sqrt{2} \tan \theta_2 f_y} = 0.79 \left(\frac{\alpha_2}{d} \right) \frac{P_2}{f_y} \quad (13)$$

Για τη συγκεκριμένη κατανομή του φορτίου η σχέση των απαιτούμενων οπλισμών στους ελκυστήρες προκύπτει :

$$A_{s1} = \sqrt{2} A_{s2} \quad (14)$$

Αν, ωστόσο, θεωρηθεί ομοιόμορφη η κατανομή του ίδιου φορτίου P στον κεφαλόδεσμο του Σχήματος 5, οι αντιδράσεις των πασσάλων είναι $P_1 = P_2 = 0.11P$ και απαιτείται η ίδια διατομή οπλισμού σε όλους τους ελκυστήρες ($A_{s1} = A_{s2}$). Συνολικά όμως απαιτείται 6% περισσότερος οπλισμός από αυτόν που απαιτείται στην πρώτη, πιο ρεαλιστική, περίπτωση κατανομής του φορτίου (κατανομή με κριτήριο την κλίση των θλιπτήρων). Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι, αφενός, η παραδοχή της ομοιόμορφης κατανομής του φορτίου στους πασσάλους δεν συμβαδίζει με τα πειραματικά αποτελέσματα και αφετέρου, οδηγεί σε πιο δαπανηρές λύσεις από αυτές που προκύπτουν για κατανομή που προσεγγίζει την πραγματική συμπεριφορά των στοιχείων αυτών.

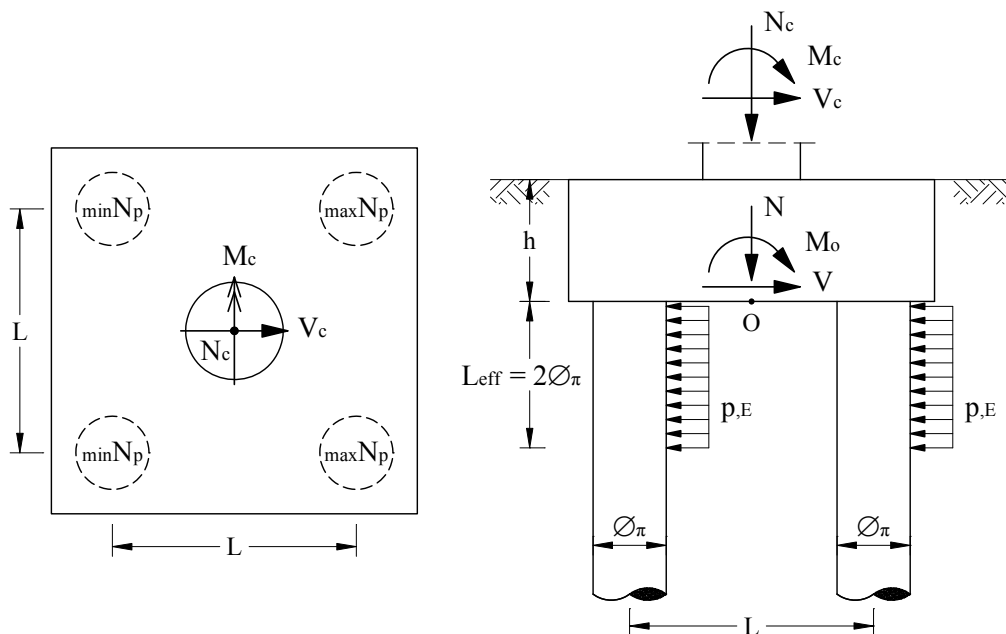
ΠΛΑΚΕΣ-ΚΕΦΑΛΟΔΕΣΜΟΙ ΥΠΟ ΑΞΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟ

Στην περίπτωση του σεισμού, ο κεφαλόδεσμος καλείται να μεταφέρει στους πασσάλους την αξονική δύναμη N_c , τη ροπή M_c και την τέμνουσα V_c του υπερκείμενου κατακόρυφου στοιχείου. Η μεταβίβαση της σεισμικής ροπής κάμψης του κατακόρυφου στοιχείου στους πασσάλους μέσω της στρεπτικώς καταπονούμενης πλάκας αποτελεί κρίσιμο πρόβλημα κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό των πλακών-κεφαλοδέσμων (Τέγος, 1996). Σύμφωνα με τους Αντισεισμικούς Κανονισμούς και την Ε39/99 (1999), σε θεμελίωση με πασσάλους πρέπει εν γένει να εξασφαλίζεται (μέσω ελέγχου με ικανοτικές δράσεις) ότι οι πάσσαλοι και ο κεφαλόδεσμος παραμένουν στην ελαστική περιοχή και ότι η τυχόν ανελαστική συμπεριφορά και οι σεισμικές βλάβες περιορίζονται στο κατακόρυφο στοιχείο. Αυτή η απαίτηση για ικανοτική ιεράρχηση των αντοχών του συστήματος βάθρο – κεφαλόδεσμος – πάσσαλοι στοχεύει στην αποφυγή σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων στις κεφαλές των πασσάλων. Ο σχεδιασμός του συστήματος πρέπει να προβλέπει πλαστικές αρθρώσεις σε θέσεις εμφανείς και προσπελάσιμες για έλεγχο και τυχόν επισκευή.

Σε αντιδιαστολή με την κεντρική φόρτιση, κατά τη διάρκεια του σεισμού οι πάσσалоι βρίσκονται υπό τριπλή εντατική καταπόνηση. Η ροπή M_p και η τέμνουσα V_p των πασσάλων αλλάζουν πρόσημο σε κάθε αλλαγή της φοράς της σεισμικής δράσης. Η αξονικές δυνάμεις N_p των πασσάλων παρουσιάζουν μεγάλο εύρος τιμών και δεν είναι σπάνια η περίπτωση που, παρά την ισχυρή επιρροή των φορτίων βαρύτητας, εμφανίζουν ετερόσημες τιμές αξονικής δύναμης. Ο μηχανισμός μεταφοράς των δράσεων από το υποστύλωμα στους πασσάλους και αντίστροφα, σε έναν κεφαλόδεσμο με ετερόσημες αντιδράσεις πασσάλων είναι ιδιαίτερα πολύπλοκος και απαιτείται εκτεταμένη πειραματική και αναλυτική έρευνα. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι ελάχιστη έρευνα έχει γίνει διεθνώς μέχρι σήμερα για κεφαλόδεσμους υπό σεισμική φόρτιση (Τέγος και Τσώνος, 1990, 1994, Shirato et al., 2002).

Πλάκα-κεφαλόδεσμος με τέσσερις πασσάλους (σύστημα πασσάλων 2x2)

Ο κεφαλόδεσμος του Σχήματος 6 καταπονείται με τις δράσεις $M_c - N_c$ και V_c του κατακόρυφου στοιχείου. Για συντελεστή συμπεριφοράς $q = 1$ οι M_c και V_c είναι αυτές που προκύπτουν από την ανάλυση για το σεισμικό συνδυασμό δράσεων. Για $q > 1$ οι M_c και V_c είναι αυτές που αναπτύσσονται στη βάση του κατακόρυφου στοιχείου όταν στη θέση αυτή σχηματίζεται πλαστική άρθρωση (ικανοτικές δράσεις). Πρέπει να ελέγχονται οι τιμές που προκύπτουν από δύο αντίθετες φορές της σεισμικής δράσης. Η αντίδραση του εδάφους στην οριζόντια μετακίνηση του συστήματος εκδηλώνεται με παθητικές πιέσεις p_E στις περιοχές των πασσάλων κάτω από τον κεφαλόδεσμο³ (Σχ. 6).



Σχήμα 6. Δράσεις στο σύστημα πλάκα-κεφαλόδεσμος – πάσσалоι (σύστημα 2x2) υπό κατακόρυφη φόρτιση και σεισμό

³ Η αλληλεπίδραση και οι "γκρίζες περιοχές" ("shadow zones") μεταξύ των πασσάλων έχουν σαν αποτέλεσμα τη μη ομοιόμορφη κατανομή των παθητικών πιέσεων του εδάφους στους πασσάλους.

Προσεγγιστικά, θεωρούμε ομοιόμορφη κατανομή αυτών των παθητικών πιέσεων στο ενεργό ύψος των πασσάλων ($L_{\text{eff}} = 2\varnothing_{\pi}$) και έχουμε :

$$p_{,E} = \frac{V}{8\varnothing_{\pi}^2} \quad (15)$$

όπου V είναι η τέμνουσα δύναμη στη βάση του κεφαλόδεσμου. Οι παθητικές πιέσεις $p_{,E}$ ενισχύουν τη ροπή M_o στη βάση του κεφαλόδεσμου και επιβαρύνουν τους πασσάλους με πρόσθετο, εναλλασσόμενο προσήμου, αξονικό φορτίο. Οι παθητικές πιέσεις και οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται πάνω από τη βάση του κεφαλόδεσμου αγνοούνται. Οι δράσεις N , M_o και V στη βάση του κεφαλόδεσμου (σημείο O) υπολογίζονται από τις σχέσεις :

$$N = N_c + G_{I.B.} \quad (16)$$

$$M_o = M_c + V_c h + V\varnothing_{\pi} \quad (17)$$

$$V = V_c \quad (18)$$

όπου $G_{I.B.}$ είναι το ίδιο βάρος του κεφαλόδεσμου. Το μέγιστο θλιπτικό αξονικό φορτίο των πασσάλων στην προκειμένη περίπτωση υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\max N_p = \frac{N}{4} + \frac{M_o}{2L} \quad (19)$$

ενώ το ελάχιστο θλιπτικό ή το εφελκυστικό αξονικό φορτίο των πασσάλων υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\min N_p = \frac{N}{4} - \frac{M_o}{2L} \quad (20)$$

Στις Εξισώσεις 19 και 20 η θλίψη λαμβάνεται θετική. Η ροπή που αναπτύσσεται στην κεφαλή κάθε πασσάλου είναι :

$$M_p = 2 p_{,E} \varnothing_{\pi}^3 = 0.25 V \varnothing_{\pi} \quad (21)$$

και η τέμνουσα δύναμη κάθε πασσάλου είναι :

$$V_p = 2 p_{,E} \varnothing_{\pi}^2 = \frac{V}{4} \quad (22)$$

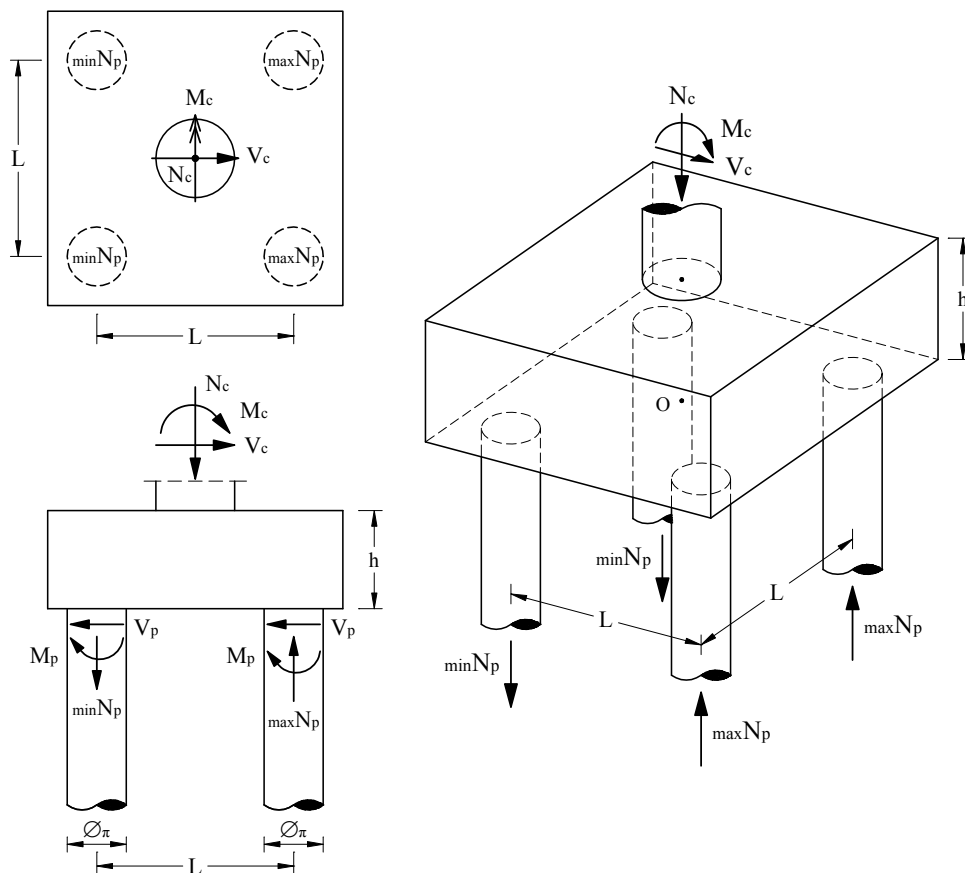
Αν για το σεισμικό συνδυασμό δράσεων οι αντιδράσεις των πασσάλων $\max N_p$ και $\min N_p$ προκύψουν ομόσημες, δηλαδή όλοι οι πάσσαλοι έχουν θλιπτικό αξονικό φορτίο, το προτεινόμενο προσομοίωμα θλιπτήρων – ελκυστήρων είναι όμοιο με την περίπτωση που έχουμε κεντρική φόρτιση (Σχ. 2). Με τη $\max N_p$ ελέγχεται η επάρκεια της διατομής του κεφαλόδεσμου ($\max N_p \leq V_{Rd2}$) και οι απαιτούμενοι οπλισμοί των ελκυστήρων υπολογίζονται από τη σχέση :

$$A_s = \frac{\max N_p}{\sqrt{2} \tan \theta f_y} = 0.79 \left(\frac{\alpha}{d} \right) \frac{\max N_p}{f_y} \quad (23)$$

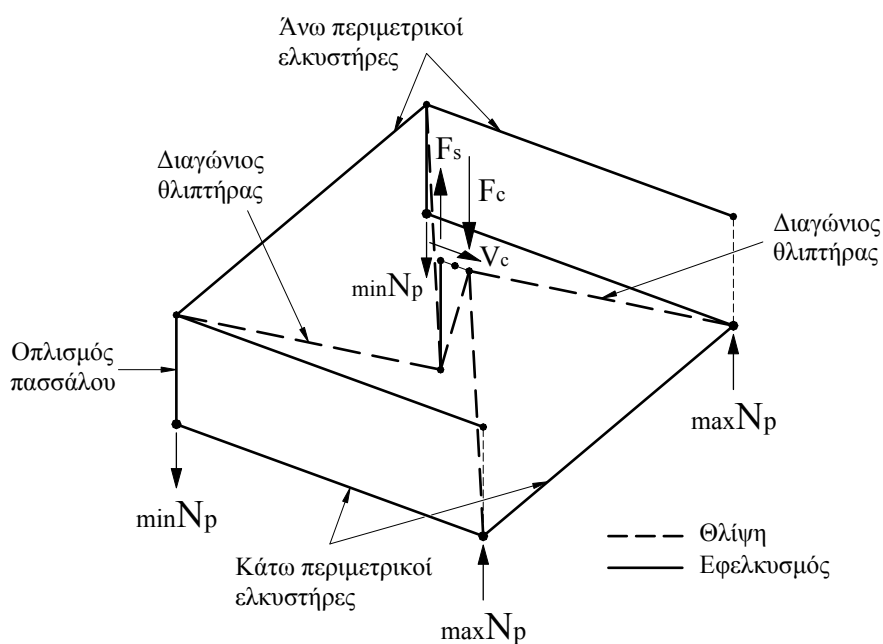
Αν οι αντιδράσεις προκύψουν ετερόσημες (Σχ. 7), δηλαδή έχουμε και πασσάλους υπό εφελκυσμό, ο κεφαλόδεσμος πρέπει να οπλιστεί με περιμετρικούς ελκυστήρες και πάνω και κάτω. Στην περίπτωση αυτή είναι αναγκαία η αγκύρωση των διαμήκων οπλισμών των πασσάλων στο ύψος των άνω ελκυστήρων. Το προσομοίωμα θλιπτήρων – ελκυστήρων που προτείνεται για την περίπτωση αυτή φαίνεται στο Σχήμα 8. Με τη $\max N_p$ ελέγχεται η επάρκεια της διατομής του κεφαλόδεσμου και υπολογίζονται, από την Εξίσωση 23, οι απαιτούμενοι οπλισμοί στους κάτω περιμετρικούς ελκυστήρες. Οι απαιτούμενοι οπλισμοί στους άνω περιμετρικούς ελκυστήρες υπολογίζονται από τη σχέση :

$$A_s^{over} = \frac{\min N_p}{\sqrt{2} \tan \theta f_y} = 0.79 \left(\frac{\alpha}{d} \right) \frac{\min N_p}{f_y} \quad (24)$$

Πάντως, οπωσδήποτε επιβάλλεται ως ποσοστό ελάχιστου οπλισμού άνω πέλματος το προτεινόμενο για τις πλάκες 1.5‰ των Κανονισμών και οι με βάση αυτό προκύπτοντες οπλισμοί δέον να τοποθετούνται κατά το μάλλον ή ήττον στις περιμετρικές ζώνες.



Σχήμα 7. Πλάκα-κεφαλόδεσμος με ετερόσημες αντιδράσεις πασσάλων υπό κατακόρυφη φόρτιση και σεισμό (σύστημα πασσάλων 2×2)

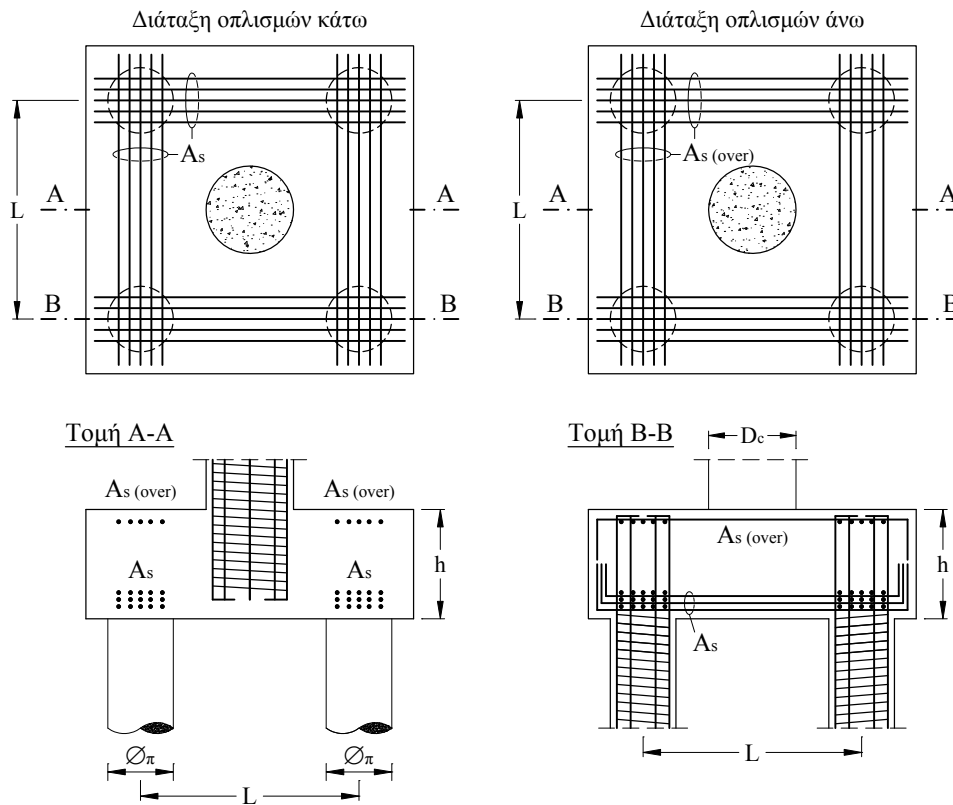


Σχήμα 8. Το προτεινόμενο προσομοίωμα θλιπτήρων – ελκυστήρων για πλάκα-κεφαλόδεσμο με ετερόσημες αντιδράσεις πασσάλων υπό κατακόρυφη φόρτιση και σεισμό (σύστημα πασσάλων 2x2)

Σύμφωνα με γεωτεχνικά κριτήρια η αξονική απόσταση L των πασσάλων δεν πρέπει να είναι μικρότερη από τρεις φορές τη διάμετρό τους ($L \geq 3\varnothing_{\pi}$), καθόσον για μικρότερες αποστάσεις υπάρχει το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης⁴. Το μέγιστο ανηγμένο αξονικό φορτίο των πασσάλων επιδιώκεται, μέσω κατάλληλης εκλογής διαμέτρου, να είναι κοντά στο 0.40 ($\max v_p \cong 0.40$). Το κριτήριο αυτό σχετίζεται με την απαίτηση της E39/99 και του Ευρωκώδικα 8 για το ελάχιστο μηχανικό ποσοστό του οπλισμού περίσφιξης μιας διατομής με σπειροειδείς συνδετήρες.

Οι Gavaise et al. (2005), μελετώντας το πρόβλημα του ελάχιστου κόστους κατασκευής των γεφυρών που σχεδιάζονται για σεισμικές δράσεις, παρουσίασαν μεταξύ άλλων και μία αναλογία για τα γεωμετρικά στοιχεία του συστήματος κεφαλόδεσμος – πάσσαλοι για την οποία ελαχιστοποιείται το κόστος του. Για $\max v_p = 0.42$, $L = 3\varnothing_{\pi}$ και λόγο $h / L = 0.50$, προκύπτει το ελάχιστο κόστος κατασκευής, όσον αφορά τον όγκο του σκυροδέματος και το βάρος του χάλυβα, μιας πλάκας-κεφαλόδεσμου ενός συστήματος πασσάλων 2x2. Η διάταξη κύριας όπλισης ενός κεφαλόδεσμου με τέσσερις πασσάλους που σχεδιάζεται με τη μέθοδο θλιπτήρων – ελκυστήρων φαίνεται στο Σχήμα 9. Βεβαίως, υπάρχουν και, τρόπος του λέγειν, δευτερεύοντες ως προς τους προηγούμενους οπλισμοί, οι οποίοι εντάσσονται σε δύο κατηγορίες. Οι μεν συνίστανται σε πλέγματα άνω και κάτω μεταξύ των ενισχυμένων ζωνών και οι δε σε πλευρικούς γύρωθεν και περιμετρικώς του κεφαλόδεσμου οι οποίοι απαιτούνται αφενός μεν ως επιδερμικοί οπλισμοί αλλά ενίοτε και ως κύριοι οπλισμοί στην περίπτωση για $L / h < 2$, οπότε και η λειτουργία του στοιχείου ανταποκρίνεται προς τις υψίκορμες δοκούς.

⁴ Κατά την οριζόντια διεύθυνση, το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης παύει να υφίσταται όταν οι αξονικές αποστάσεις των πασσάλων είναι αρκετά μεγαλύτερες ($L > 6\varnothing_{\pi}$).



Σχήμα 9. Η προτεινόμενη διάταξη όπλισης για πλάκα-κεφαλόδεσμο με ετερόσημες αντιδράσεις πασσάλων υπό κατακόρυφη φόρτιση και σεισμό (σύστημα πασσάλων 2×2)

Πλάκα-κεφαλόδεσμος με εννέα πασσάλους (σύστημα πασσάλων 3×3)

Ο κεφαλόδεσμος του Σχήματος 10 καταπονείται με τις δράσεις $M_c - N_c$ και V_c του κατακόρυφου στοιχείου. Στην περίπτωση αυτή, και πάντα κατά προσέγγιση, οι παθητικές πιέσεις του εδάφους στις κεφαλές των πασσάλων είναι :

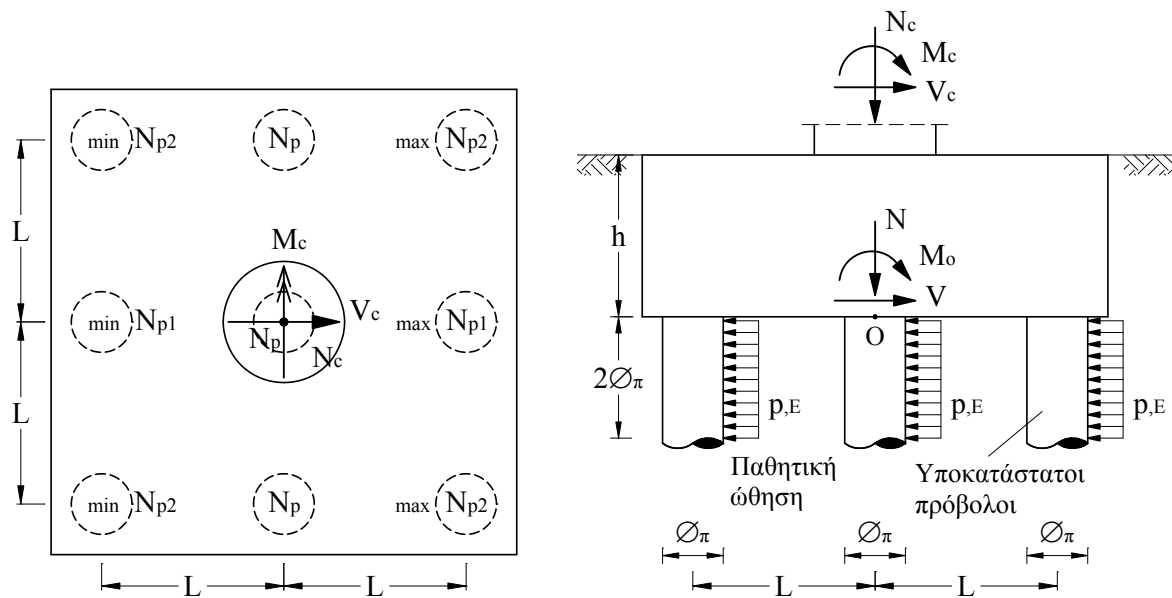
$$p_{,E} = \frac{V}{18 \varnothing_{\pi}^2} \quad (25)$$

Οι δράσεις N , M_o και V στη βάση του κεφαλόδεσμου υπολογίζονται από τις Εξισώσεις 16 έως 18. Το μέγιστο θλιπτικό αξονικό φορτίο των πασσάλων που βρίσκονται στα μέσα των πλευρών του κεφαλόδεσμου υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\max N_{p1} = 0.128 N + 0.40 \frac{M_o}{2L} \quad (26)$$

Για τη δύναμη N και το πρόσθετο αξονικό φορτίο λόγω της σεισμικής ροπής M_o εφαρμόζεται το κριτήριο κατανομής που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα. Το μέγιστο θλιπτικό αξονικό φορτίο των γωνιακών πασσάλων υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\max N_{p2} = 0.09 N + 0.30 \frac{M_o}{2L} \quad (27)$$



Σχήμα 10. Δράσεις στο σύστημα πλάκα-κεφαλόδεσμος – πάσσαλοι (σύστημα 3×3) υπό κατακόρυφη φόρτιση και σεισμό

Το ελάχιστο θλιπτικό ή το εφελκυστικό αξονικό φορτίο των πασσάλων που βρίσκονται στα μέσα των πλευρών του κεφαλόδεσμου υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\min N_{p1} = 0.128 N - 0.40 \frac{M_o}{2L} \quad (28)$$

και το ελάχιστο θλιπτικό ή το εφελκυστικό αξονικό φορτίο των γωνιακών πασσάλων υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\min N_{p2} = 0.09 N - 0.30 \frac{M_o}{2L} \quad (29)$$

Οι πάσσαλοι της εσωτερικής σειράς η οποία είναι κάθετη στην εξεταζόμενη διεύθυνση του σεισμού δεν επηρεάζονται από τη σεισμική φόρτιση και οι αντιδράσεις τους είναι :

$$N_p = 0.128 N \quad (30)$$

Αν και οι εννέα αντιδράσεις των πασσάλων προκύψουν θλιπτικές, το προτεινόμενο προσομοίωμα θλιπτήρων – ελκυστήρων είναι, εξαιρέσει της υπάρχουσας ασυμμετρίας, όμοιο με την περίπτωση που έχουμε κεντρική φόρτιση (Σχ. 5). Με τις $\max N_{p1}$ και $\max N_{p2}$ ελέγχεται η επάρκεια της διατομής του κεφαλόδεσμου ($\max N_p \leq V_{Rd2}$) και οι απαιτούμενοι οπλισμοί των ελκυστήρων υπολογίζονται από τις Εξισώσεις 12 και 13.

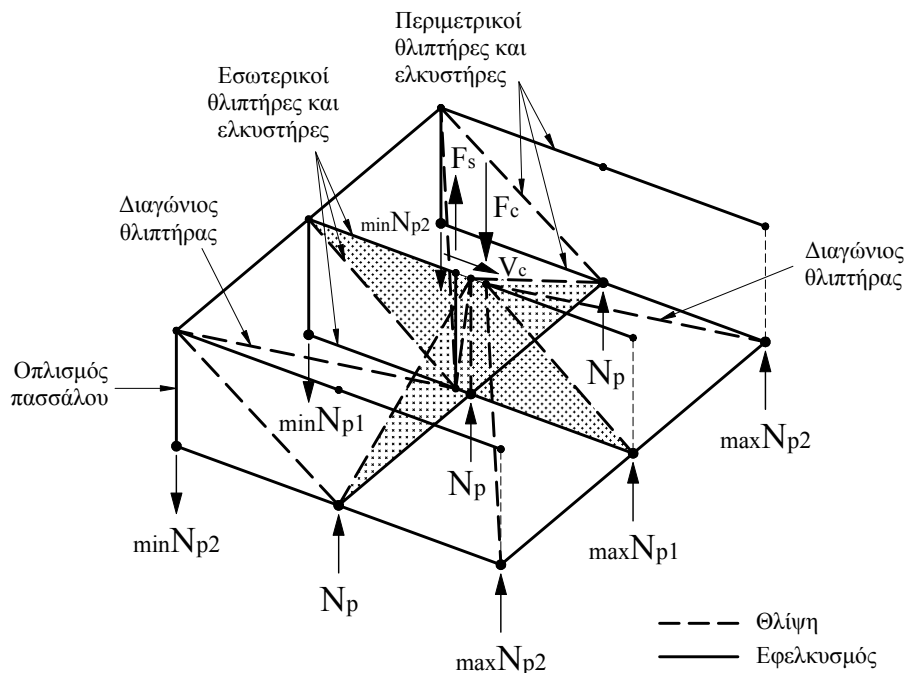
Αν οι αντιδράσεις των πασσάλων που αποφορτίζονται προκύψουν εφελκυστικές, ο κεφαλόδεσμος πρέπει να οπλιστεί με περιμετρικούς και εσωτερικούς άνω και κάτω ελκυστήρες. Στην περίπτωση αυτή είναι αναγκαία η αγκύρωση των διαμήκων οπλισμών των

πασσάλων στο ύψος των άνω ελκυστήρων. Το προσομοίωμα θλιπτήρων – ελκυστήρων που προτείνεται για την περίπτωση αυτή φαίνεται στο Σχήμα 11. Με τις $\max N_{p1}$ και $\max N_{p2}$ ελέγχεται η επάρκεια της διατομής του κεφαλόδεσμου και υπολογίζονται, από τις Εξισώσεις 12 και 13 αντίστοιχα, οι απαιτούμενοι οπλισμοί στους κάτω εσωτερικούς και περιμετρικούς ελκυστήρες. Οι απαιτούμενοι οπλισμοί στους άνω εσωτερικούς και περιμετρικούς ελκυστήρες υπολογίζονται, αντίστοιχα, από τις σχέσεις :

$$A_{s1}^{over} = \frac{\min N_{p1}}{\tan \theta_1 f_y} = 1.10 \left(\frac{\alpha_1}{d} \right) \frac{\min N_{p1}}{f_y} \quad (31)$$

$$A_{s2}^{over} = \frac{\min N_{p2}}{\sqrt{2} \tan \theta_2 f_y} = 0.79 \left(\frac{\alpha_2}{d} \right) \frac{\min N_{p2}}{f_y} \quad (32)$$

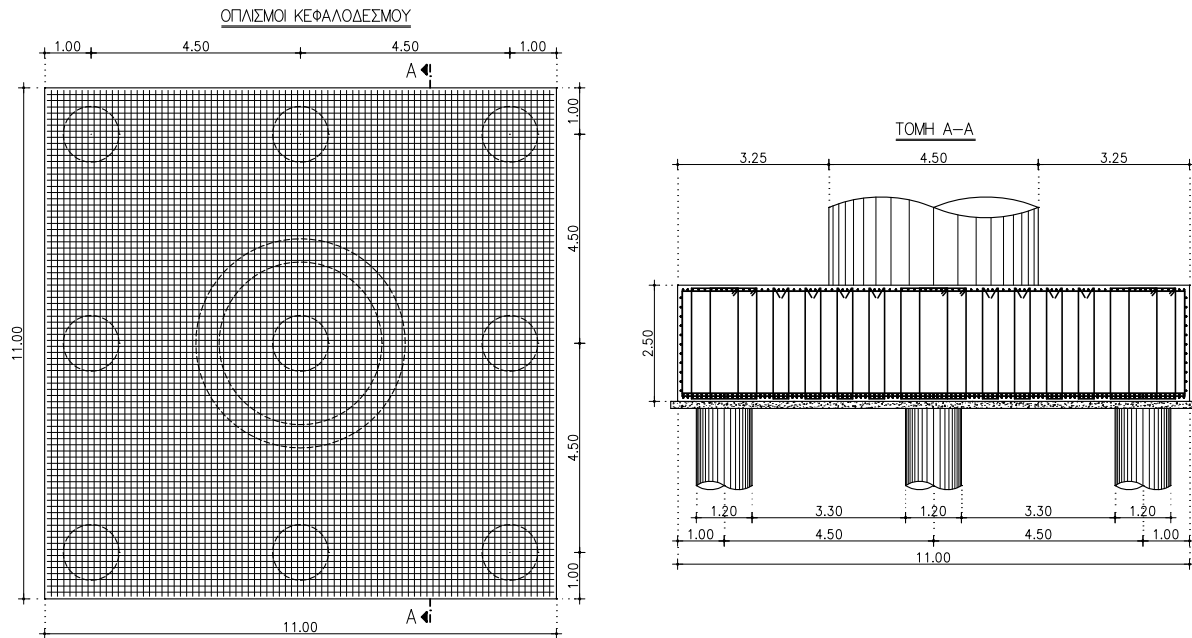
Η διάταξη κύριας όπλισης του κεφαλόδεσμου, τόσο για τους κάτω όσο και για τους άνω ελκυστήρες, είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 5. Η τελική όπλιση του κεφαλόδεσμου περιλαμβάνει και τους οπλισμούς άνω και κάτω εσωτερικών πλεγμάτων καθώς και τους πλευρικούς οπλισμούς γύρωθεν στις περιμετρικές έδρες του κεφαλόδεσμου.



Σχήμα 11. Το προτεινόμενο προσομοίωμα θλιπτήρων – ελκυστήρων για πλάκα-κεφαλόδεσμο με ετερόσημες αντιδράσεις πασσάλων υπό κατακόρυφη φόρτιση και σεισμό (σύστημα πασσάλων 3×3)

Στο Σχήμα 12 φαίνεται η γεωμετρία και η διάταξη όπλισης ενός κεφαλόδεσμου εννέα πασσάλων (σύστημα 3×3) που αντιμετωπίστηκε συμβατικά με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων SOFiSTiK. Οι άνω και κάτω ευθύγραμμοι οπλισμοί είναι ομοιόμορφα διατεταγμένοι σε όλο το πλάτος του κεφαλόδεσμου και στο εσωτερικό του

υπάρχουν διάσπαρτοι συνδετήρες. Στη συμβατική αυτή λύση απαιτήθηκαν 170 κιλά χάλυβα (κύριοι οπλισμοί μόνο) για κάθε κυβικό μέτρο σκυροδέματος.

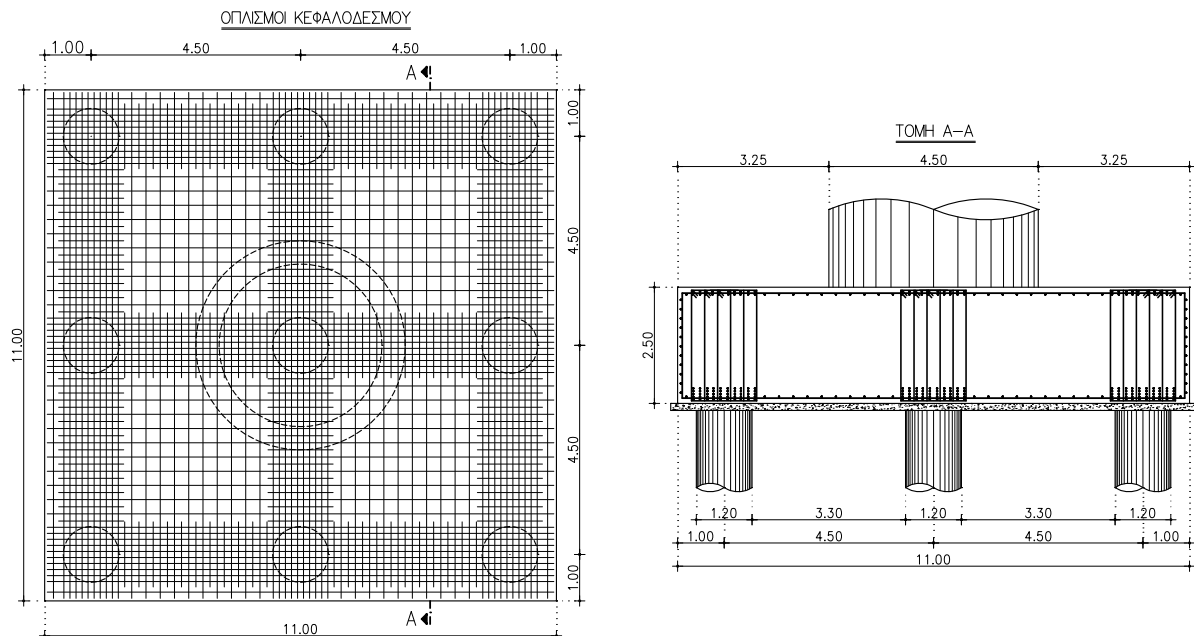


Σχήμα 12. Γεωμετρία και διάταξη όπλισης ενός κεφαλόδεσμου συστήματος πασσάλων 3×3 που αντιμετωπίζεται συμβατικά (αναλογία χάλυβα / σκυροδέματος = 170 Kg / m³)

Ο κεφαλόδεσμος του Σχήματος 12 υπολογίστηκε για τις ίδιες δράσεις με τη μέθοδο θλιπτήρων – ελκυστήρων και οι απαιτούμενοι οπλισμοί των άνω και κάτω ελκυστήρων διατάχθηκαν πάνω από τις κεφαλές των πασσάλων. Τοποθετήθηκαν επίσης εσωτερικοί οπλισμοί ανάρτησης (συνδετήρες και ευθύγραμμοι άνω και κάτω οπλισμοί) με διατομή κοντά στο ένα τρίτο της διατομής των κάτω ελκυστήρων. Η διάταξη όπλισης που προέκυψε από την αντιμετώπιση του κεφαλόδεσμου με τη μέθοδο θλιπτήρων – ελκυστήρων φαίνεται στο Σχήμα 13. Στη λύση αυτή, για την ίδια γεωμετρία κεφαλόδεσμου και τις ίδιες δράσεις κατακόρυφου στοιχείου, απαιτήθηκαν 110 κιλά χάλυβα για κάθε κυβικό μέτρο σκυροδέματος, δηλαδή τα 2/3 περίπου της ποσότητας οπλισμού της συμβατικής λύσης. Εκτός τούτου, οι συγγραφείς της παρούσας ισχυρίζονται ότι η δεύτερη διάταξη όπλισης παρέχει μεγαλύτερη ασφάλεια από την πρώτη παρά τη δραστική μείωση των οπλισμών, καθώς εναρμονίζεται με την πραγματική ροή των δυνάμεων από τη βάση του στύλου στους πασσάλους.

Στη συμβατική λύση, οι μεταξύ των πασσάλων κάτω ευθύγραμμοι οπλισμοί παραμένουν κατά το μάλλον ή ήττον ανενεργοί γιατί οι θλιπτήρες εδράζονται σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα στις ανένδοτες στηρίξεις των πασσάλων. Από την άλλη πλευρά, οι διάσπαρτοι συνδετήρες στο εσωτερικό του κεφαλόδεσμου οδηγούν σε αύξηση της φέρουσας ικανότητάς του. Η αύξηση αυτή όμως δεν προέρχεται από τη συμμετοχή των συνδετήρων σε μηχανισμούς διάτμησης ή διάτρησης, όπως θα μπορούσε "συμβατικά" να σκεφτεί κάποιος, αλλά από τη λειτουργία τους ως οπλισμός εσωτερικής ανάρτησης. Το γεγονός ότι δεν αναφέρονται αστοχίες τέτοιων στοιχείων είναι δυνατόν να οφείλεται είτε στη μη ορατή θέση

που βρίσκονται, είτε στην υπερόπλισή τους, η οποία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αφενός δεν είναι ορθολογικώς κατανομημένη και αφετέρου έχει συνέπειες στην οικονομικότητα της λύσης. Όμως, το βασικό μειονέκτημα της συμβατικής λύσης είναι ότι το αποτέλεσμά της δεν είναι επαρκώς ελεγχόμενο.



Σχήμα 13. Η διάταξη όπλισης που προκύπτει για υπολογισμό του κεφαλόδεσμου του Σχήματος 12 με τη μέθοδο θλιπτήρων – ελκυστήρων (αναλογία χάλυβα / σκυροδέματος = $110 \text{ Kg} / \text{m}^3$)

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα ερευνητική – ενημερωτική εργασία αντιμετωπίζεται επαγωγικώς το πρόβλημα των “γνωστών – αγνώστων” κεφαλόδεσμων πασσάλων. Κίνητρο της εργασίας απετέλεσε το έλλειμμα ορθολογικής αντιμετώπισης που διαπιστώνεται στις συμβατικές αντιμετώπισεις των μελετών. Το έλλειμμα αυτό διαπιστώθηκε στο πλαίσιο εμβαθύνσεως στους μηχανισμούς αναλήψεως κατακορύφων και οριζοντίων δράσεων από τους κεφαλόδεσμους, η οποία εμβάθυνση στηρίχθηκε σε αναλυτικά και, κυρίως, πειραματικά αποτελέσματα. Ως κύρια συμπεράσματα της εργασίας είναι δυνατόν να αναφερθούν τα εξής :

α) Πρέπει να εφαρμόζεται κατά το δυνατόν η μέθοδος των θλιπτήρων – ελκυστήρων και εν ανάγκη το ύψος του κεφαλόδεσμου να ρυθμίζεται ούτως ώστε το δομικό στοιχείο να υπάγεται στο πεδίο εφαρμογής αυτής της λύσης (κλίση θλιπτήρων $\theta > 25^\circ$).

β) Οι συνδετήρες δεν συνιστούν για τους κεφαλόδεσμους οπλισμό έναντι τέμνουσας ούτε, πολλώ μάλλον, διατρήσεως, η οποία δεν έχει θέση στο πρόβλημα, αλλά οπλισμούς αναρτήσεως οι οποίοι σε συνεργασία με τους οπλισμούς του κάτω πλέγματος συνεισφέρουν στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας του κεφαλόδεσμου.

γ) Οι εσωτερικοί οπλισμοί του κάτω πλέγματος είναι δυνατόν να συνεισφέρουν στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει ανάλογη ποσότητα συνδετήρων στις ενισχυμένες ζώνες οι οποίοι θα αναρτήσουν το φορτίο του αντίστοιχου θλιπτήρα από το πάνω πέλμα και από εκεί αυτό θα κατευθυνθεί στους τελικούς αποδέκτες του, δηλαδή στους πασσάλους.

δ) Οι άνω οπλισμοί των αντισεισμικών κεφαλοδέσμων εντός και εκτός των ενισχυμένων ζωνών θα πρέπει να ικανοποιούν την απαίτηση του ελάχιστου ποσοστού οπλισμού μεταβάσεως από το αρρηγμάτωτο Στάδιο Ι στο ρηγματωμένο Στάδιο ΙΙ.

ε) Η διαστασιολόγηση βάσει των σύγχρονων υπολογιστικών προγραμμάτων, όταν δεν αντιμετωπίζει το πρόβλημα ως πρόβλημα θλιπτήρων – ελκυστήρων, προκύπτει κατά κανόνα αντικοινομική και δεν διακρίνεται για το ορθολογικόν των αποτελεσμάτων οπλίσεως που καταλήγει.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν θερμά τον Πολιτικό Μηχανικό Παπαδόπουλο Ηλία και τη μελετητική εταιρία ΜΕΤΕ ΣΥΣΜ Α.Ε. για την παραχώρηση της μελέτης και των κατασκευαστικών σχεδίων του κεφαλοδέσμου αναφοράς του Σχήματος 12.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ACI Committee 318 (2005), "Building Code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and Commentary (318R-05)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 430 pp.
- Adebar, P., Kuchma, D. and Collins, M.P. (1990), "Strut-and-tie models for the design of pile caps: An experimental study", ACI Structural Journal, Vol. 87, No. 1, pp. 81-92.
- Blévoit, J., and Frémy, R. (1967), "Semelles sur pieux", Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, Vol. 20, No. 230, pp. 223-295.
- CEB (1993), "CEB/FIP Model Code 1990", Bulletin d' Information CEB, 213/214, Lausanne.
- CEN (2002), "EN 1998-5, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects", Brussels, 45 pp.
- CEN (2003), "EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings", Brussels, 224 pp.
- CEN (2004), "EN 1998-1, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings", Brussels, 229 pp.
- CEN (2004), "EN 1998-2, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 2: Bridges", Brussels, 145 pp.
- Clarke, J.L. (1973), "Behavior and design of pile caps with four piles", Cement and Concrete Association, London, Report No. 42.489, 19 pp.
- Gavaise, E., Papaefthimiou, K., Tzaveas, T., Stylianidis, K., and Tegos, I. (2005), "The problem of minimum cost for structural members of earthquake resistant bridges", Fifth world conference on earthquake resistant engineering structures (ERES V), Skiathos, Greece, pp. 485-496.

- Schlaich, J., and Schäfer, K. (2001), "Konstruieren im Stahlbetonbau (Detailing of reinforced concrete)", Betonkalender 90, Teil II, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, pp. 311-492.
- Shirato, M., Fukui, J., Masui, N., and Kosa, K. (2002), "Towards unifying ultimate limit state of shear for pile caps", Proceedings of the first fib congress : Concrete structures in the 21st century, Osaka, Japan, pp. 163-172.
- Suzuki, K., Otsuki, K., and Tsubata, T. (1998), "Influence of bar arrangement on ultimate strength of four-pile caps", Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 20, pp. 195-202.
- Αναγνώστης, Σ.Κ., Τέγος, Ι.Α., και Παπανικολάου, Κ.Β. (2003), "Πειραματική και αναλυτική μελέτη πλακών κεφαλοδεσμων πασσάλων υπό κεντρική φόρτιση", 14ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Κως, Τόμος Α, σελ. 413-420.
- Αναγνώστης, Σ.Κ., Τέγος, Ι.Α., και Παπανικολάου, Κ.Β. (2006), "Μη συμβατικές διατάξεις οπλίσεως πλακών κεφαλοδέσμων", 15ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη, Τόμος Γ, σελ. 3-17.
- Εγκύκλιος Ε39/99 (1999), "Οδηγίες για την αντισεισμική μελέτη γεφυρών".
- ΟΑΣΠ / ΣΠΜΕ (2006), "Ελληνικός Κανονισμός οπλισμένου σκυροδέματος (ΕΚΩΣ 2000)" και "Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ 2000)".
- Τέγος, Ι.Α. (1996), "Κανόνες αντισεισμικής διαστασιολογήσεως πασσαλοδέσμων σκυροδέματος", 12ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Λεμεσός, Κύπρος, σελ. 85-96.
- Τέγος, Ι.Α., και Τσώνος, Α.Γ. (1990), "Αντισεισμική μελέτη δοκών - κεφαλοδέσμων πασσάλων σε θεμελιώσεις βάθρων γεφυρών", 9ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Καλαμάτα, σελ. 103-110.
- Τσώνος, Α.Γ., και Τέγος, Ι.Α. (1994), "Η επιρροή των διαμήκων πλευρικών οπλισμών των υπίκορμων δοκών-πασσαλοδέσμων στη βελτίωση της αντισεισμικής τους συμπεριφοράς", 11ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Κέρκυρα, σελ. 69-78.