

Σχεδιασμός Συμπαγών και Κοίλων Κυκλικών Διατομών έναντι Τέμνουσας και Λειτουργικότητας

Ν. Χ. Γιάννακας

Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Διδ. Πολ. Μηχ ΑΠΘ

Ι. Α. Τέγος

Καθηγητής. Τομέας Επιστήμης και Τεχνολογίας των Κατασκευών. ΑΠΘ.

Λέξεις κλειδιά: Τέμνουσα, Λειτουργικότητα, Διαστασιολόγηση, Κυκλική διατομή, Κοίλη κυκλική διατομή, Ρηγμάτωση

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Ως γνωστόν ο σχεδιασμός των κοίλων κυκλικών διατομών, όταν αυτές χρησιμοποιούνται ως βάθρα γεφυρών περιλαμβάνει υπολογιστικά κενά, τα οποία εντοπίζονται στον σχεδιασμό κυρίως έναντι τέμνουσας και καμπτικής ρηγμάτωσης. Ειδικότερα ο σχεδιασμός σε τέμνουσα εμφανίζει μεγάλη δυσκολία στον προσδιορισμό της αντοχής V_{Rd2} , ενώ ο σχεδιασμός έναντι λειτουργικότητας παρουσιάζει τη διπλή δυσκολία του καθορισμού εύρους ρωγμής αφενός και του προσδιορισμού των παραμορφώσεων αφετέρου, δεδομένου ότι οι Κανονισμοί είναι προσαρμοσμένοι στις απαιτήσεις των ορθογωνικών διατομών. Η εργασία περιλαμβάνει πειραματικό και αναλυτικό σκέλος. Οι συντάκτες αυτής της εργασίας έχοντας την πεποίθηση ότι το πρόβλημα δεν είναι δυνατόν να αντιμετωπιστεί αμιγώς αναλυτικώς, προχώρησαν σε ενδεικτική πειραματική διερεύνηση με την κατασκευή τεσσάρων δοκιμίων κοίλης κυκλικής διατομής, τα οποία μελετήθηκαν μέχρι αστοχίας, υπό μονότονη φόρτιση. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα αξιολόγησαν και αναλυτικές προσεγγίσεις των αντίστοιχων προβλημάτων και κατέληξαν σε προτάσεις διαστασιολόγησης, οι οποίες θέλουν να ελπίζουν ότι είναι δυνατόν να συμβάλλουν στην κάλυψη του υπάρχοντος κενού της διαστασιολόγησης των κοίλων κυκλικών διατομών.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι αλήθεια ότι τα τελευταία χρόνια η μεγάλη έμφαση εκ μέρους των κανονισμών δίνεται στην αντισεισμική ασφάλεια των κατασκευών, με αποτέλεσμα στις σχετικές μεθόδους διαστασιολόγησης να δεσπόζουν τα αντισεισμικά κριτήρια. Μολονότι δεν είναι αναμενόμενο, αυτό φαίνεται να έχει συνέπειες στους ελέγχους που αφορούν στην ομάδα δράσεων χωρίς το σεισμό, οι οποίοι φαίνεται ότι δεν τυχαίνουν της ίδιας προσοχής. Υπάρχουν προβλήματα διαστασιολόγησης φορέων σκυροδέματος, στα οποία θα πρέπει να ριφθεί περισσότερο φως και η ισχύουσα μέχρι σήμερα αντιμετώπισή τους δεν μπορεί να χαρακτηριστεί απολύτως ικανοποιητική. Τα προβλήματα αυτά εντοπίζονται κυρίως στις μεθόδους διαστασιολόγησης έναντι τέμνουσας και διάτρησης. Εις επίρρωσιν αυτού του ισχυρισμού αναφέρεται το γεγονός ότι οι κανονισμοί, ενώ δε διαφέρουν μεταξύ των όσον αφορά τη διαστασιολόγηση π.χ. σε κάμψη, ωστόσο διαφέρουν σημαντικά έναντι των δύο προαναφερθεισών καταπονήσεων.

Πλην τούτων, υπάρχει και η γεωμετρία των δομικών στοιχείων, η οποία υπεισέρχεται στα προηγούμενα. Υπάρχουν, ως γνωστόν, τα βραχεία στοιχεία για τα οποία δεν ισχύει η αρχή της επιπεδότητας των διατομών, αλλά και τα στοιχεία ειδικής διατομής με προεξάρχοντα τα στοιχεία κοίλης, ορθογωνικής ή κυκλικής διατομής. Οι κοίλες, ορθογωνικές ή δακτυλιοειδείς διατομές χρησιμοποιούνται σε στύλους, βάθρα γεφυρών, σωλήνες, σιλό, πύργους ψύξης, καπνοδόχους, πυλώνες, υδατόπυργους κ.λπ. Κοίλες διατομές σκυροδέματος στα βάθρα γεφυρών ενδείκνυται κατά τον Priestley (1998) όταν η εξωτερική διάμετρος υπερβαίνει τα 2.5 m. Οι κανονισμοί είναι

προσανατολισμένοι ως προς τους κανόνες διαστασιολόγησης με βάση την ορθογωνική διατομή. Όλες οι υπόλοιπες διατομές είναι οιονεί παραμελημένες.

Κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η διαστασιολόγηση των δακτυλιοειδών διατομών, ωστόσο αντιμετωπίζονται και συναφή προβλήματα συμπαγών κυκλικών διατομών. Τα προβλήματα διαστασιολόγησης των εν λόγω διατομών έναντι αστοχίας είναι γενικώς η καμπτική διαστασιολόγηση, η διαστασιολόγηση έναντι τέμνουσας, στρέψης και λυγισμού και η διαστασιολόγηση έναντι σεισμικής καταπόνησης. Ως προς την λειτουργικότητα, η αναζήτηση αντιστοιχών μεθόδων για τον προσδιορισμό εύρους ρηγματώσεων και προσδιορισμού βελών παραμορφώσεων οδηγεί στη διαπίστωση ότι όσον αφορά τους εγκυρότερους κανονισμούς είναι απλώς ενδεικτική, ενώ όσον αφορά τη βιβλιογραφία, στην οποία είναι δυνατόν να καταφύγει ο μελετητής, εντοπίζονται εργασίες, οι οποίες αφορούν κυρίως τον καθορισμό του ουδέτερου άξονα της διατομής υπό λειτουργική φόρτιση. Πρέπει να σημειωθεί ακόμα, ότι η κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας στη διαστασιολόγηση βάθρων γεφυρών, αφορά κυρίως το συνδυασμό δράσεων με σεισμό. Βεβαίως οι ισχυρές οπλίσεις που προκύπτουν για την αντισεισμική κάλυψη των μεσοβάθρων θεραπεύουν έμμεσα και τις λειτουργικές απαιτήσεις ένεκα ρηγμάτωσης, ωστόσο αυτό δε συμβαίνει πάντοτε.

Η πιο σημαντική διαπίστωση στα πλαίσια μιας βιβλιογραφικής αναδίφησης είναι ότι δεν υπάρχει μέθοδος προσδιορισμού της αντοχής V_{Rd2} των κοίλων διατομών για την διαστασιολόγηση έναντι τέμνουσας. Η εν λόγω αντοχή είναι δυνατόν να αποτελέσει κρίσιμη παράμετρο στη διαστασιολόγηση των κοίλων βάθρων των γεφυρών, γεγονός που επιτείνεται από την αναγκαιότητα του ικανοτικού τρόπου αντισεισμικής διαστασιολόγησης αυτών των στοιχείων. Υπό ορισμένες συνθήκες η αντοχή V_{Rd3} είναι δυνατόν να υπερισχύσει της αντίστοιχης V_{Rd2} , η οποία υπόκειται στην δυσμενή επιρροή των καμπύλων θλιπτήρων του λειτουργούντος δικτύματος. Στα πλαίσια ενός βασικού στόχου που έθεσε αυτή η εργασία και που είναι η ενημέρωση των μελετητών, παρατίθενται ανθολογημένα από τη διεθνή βιβλιογραφία στοιχεία, τα οποία κρίνονται χρήσιμα για μία κατά το δυνατόν πληρέστερη διαστασιολόγηση του είδους αυτών των διατομών. Ωστόσο την αιχμή της παρούσας εργασίας αποτελεί η αναλυτική και πειραματική διερεύνηση με αντικείμενο κατά κύριο λόγο την αντοχή V_{Rd2} και κατά δεύτερο την αντοχή V_{Rd1} έναντι τέμνουσας.

Το πειραματικό μέρος της εργασίας περιλαμβάνει έρευνα επί της αντοχής V_{Rd2} , της αντοχής V_{Rd1} και της ρηγμάτωσης μέσω δοκιμίων καταλλήλου όπλισης. Τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από αυτήν, επιβεβαίωσαν την κρισιμότητα της V_{Rd2} και της V_{Rd1} υπό τις ανωτέρω προϋποθέσεις.

2 ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

2.1 Μεγέθη ορθής έντασης

Η διαστασιολόγηση έναντι μεγεθών ορθής έντασης των κυκλικών, συμπαγών και κοίλων, κυκλικών διατομών γίνεται μέσω κατάλληλων νομογραφημάτων, τα οποία περιλαμβάνονται στα βοηθήματα των μελετητών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εμφανίζει η αντισεισμική διαστασιολόγηση των κοίλων διατομών.

Τα υποστυλώματα κοίλης κυκλικής διατομής παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα. Περιορισμοί που καθορίζονται από τον Priestley (1998) αφορούν την γεωμετρία, την όπλιση και την αξονική τους καταπόνηση.

Η απόκριση των κοίλων κυκλικών διατομών είναι ανεξάρτητη από τη διεύθυνση, με αντοχή, δυσκαμψία και πλαστιμότητα ίσες προς όλες τις διευθύνσεις. Μια αρχική εκτίμηση μπορεί να οδηγήσει στην προτίμηση του διπλού στρώματος όπλισης. Εντούτοις, σε αυτήν την παραλλαγή υπάρχουν μειονεκτήματα. Εάν η εσωτερική κυκλική σπείρα ενταθεί θα έχει την τάση να «αποσχιστεί» εξαιτίας των ισχυρών δυνάμεων εκτροπής, συντρίβοντας της εσωτερική επικάλυψη, η οποία καταπονείται πολυαξονικώς και όπως η εξωτερική υπόκειται εις αποφλοίωση, ωστόσο όχι τόσο ακίνδυνη, καθ' όσον την ακολουθεί η πλήρης απενεργοποίηση του πλέγματος των εσωτερικών όπλισμών, διαμήκων και εγκάρσιων, με επόμενο επακόλουθο την υπονόμηση του

μεταξύ των δύο σπειρών σκυροδέματος. Η εγκάρσια σύνδεση μεταξύ των δύο πλεγμάτων είναι απαραίτητη για την αποτροπή του παραπάνω ενδεχομένου, ωστόσο η απόδοση του σκυροδέματος μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού οπλισμού είναι δύσκολο να αποτιμηθεί.

Από ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων επί υποστυλωμάτων κοίλης κυκλικής διατομής προέκυψε ότι η κρίσιμη ανηγμένη παραμόρφωση είναι μεταξύ των τιμών 0.006 και 0.008. Έτσι, εάν η σχετική βράχυνση της εσωτερικής θλιβόμενης ίνας δεν προβλέπεται να ξεπεράσει την τιμή 0.005, μπορεί να αναμένεται ικανοποιητική πλάσטיμη απόκριση της κοίλης κυκλικής διατομής με απλή εξωτερική όπλιση. Αυτή η περίπτωση είναι οικονομικότερη σε σχέση με εκείνη της διπλής όπλισης (είτε στις κυκλικές είτε στις ορθογωνικές κοίλες διατομές).

Κρίσιμο σημείο του σχεδιασμού των κοίλων διατομών είναι η εκλογή του πάχους τους. Στα πολύ λεπτά πάχη, υπάρχει κίνδυνος να επέλθει τοπικός ύβωση, αν και η πιθανότητα αυτή είναι μικρή στις κυκλικές διατομές, όπου η ευνοϊκή πολυαξονική δράση του εσωτερικού κελύφους προσδίδει αυξημένη σταθερότητα. Ωστόσο καλό είναι να ισχύει:

$$t \geq D/12 \quad (1)$$

Όπου t = πάχος τοιχώματος κοίλης διατομής και D = η εξωτερική διάμετρος της κοίλης κυκλικής διατομής.

Σημειωτέον ότι η Εγκύκλιος 39/99 στην παράγραφο 4.3(2) δίνει περιοριστικές τιμές του λόγου D_i/t , όπου D_i η εξωτερική διάμετρος, ανάλογες του συντελεστή συμπεριφοράς q του στοιχείου που δίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Λόγοι D_i/t της Ε39/99 κοίλα κυλινδρικά βάρη

Συντελεστής Συμπεριφοράς q	Λόγος D_i/t
$q > 1.5$	8
$1.5 \geq q > 1$	10
$q = 1$	15

Ο Priestley (1998) προτείνει έναν ακόμη περιορισμό για τον καθορισμό του πάχους των κυκλικών διατομών, ο οποίος σχετίζεται με το μέγεθος της επικάλυψης c_o , η οποία υπολογίζεται από την επιφάνεια του στοιχείου έως τη μέση γραμμή της εγκάρσιας όπλισης δίνεται από την ανίσωση:

$$t \geq 5c_o \quad (2)$$

Όσον αφορά τα όρια των ποσοστών των διαμήκων οπλισμών οι προτεινόμενοι από τον Priestley περιορισμοί είναι:

$$\frac{A_{sl}}{A_g} \geq 0.005 \quad \& \quad \frac{A_{sl}}{A_N} \leq 0.035 \quad (3)$$

όπου A_{sl} είναι το συνολικό εμβαδόν του διαμήκους χάλυβα, A_g το εμβαδόν της συμπαγούς διατομής και A_N το εμβαδόν της δακτυλιοειδούς διατομής. Τα ποσοστά αυτά λαμβανομένων υπόψη των παραπάνω συστάσεων που αφορούν το πάχος των δακτυλιοειδών διατομών παρατηρούμε ότι δε διαφέρουν ουσιωδώς από τα όρια που θέτει ο ΕΚΩΣ2000 για τα υποστυλώματα.

Όσον αφορά τις τιμές του ανηγμένου αξονικού φορτίου στύλων δακτυλιοειδούς διατομής, λύσεις με $0.1 \leq P / f'_c \cdot A_g \leq 0.15$ είναι πιο κατάλληλες από την άποψη της σεισμικής απόκρισης. Υψηλότερες τιμές του λόγου, εν συνδυασμό μάλιστα με υψηλά ποσοστά διαμήκους οπλισμού, θα πρέπει να υποβληθούν σε ειδική μελέτη, καθόσον απειλείται με αποδιοργάνωση η εσωτερική ίνα της διατομής.

Για τον εγκάρσιο οπλισμό καθορίζονται περιορισμοί για το βήμα του και το ογκομετρικό ποσοστό του. Το βήμα του εγκάρσιου οπλισμού πρέπει να είναι τόσο ώστε να αποφεύγεται ο λυγισμός του διαμήκους οπλισμού. Προτείνεται σχέση που περιέχει το λόγο της οριακής αντοχής του χάλυβα του διαμήκους οπλισμού προς το όριο διαρροής του (f_u / f_y).

$$s \leq \left[3 + 6 \left(\frac{f_u}{f_y} - 1 \right) \right] d_{bl} \quad (4)$$

Σύμφωνα με τις σύγχρονες προδιαγραφές που αφορούν τις γέφυρες, απαιτούνται ογκομετρικές αναλογίες ίσες με 0.005 ή μεγαλύτερες, όσον αφορά την εγκάρσια όπλιση. Αυτό έχει σκοπό από τη μία να επιτευχθεί περίσφιξη του σκυροδέματος και από την άλλη για να αποτραπεί ο λυγισμός των διαμήκων ράβδων. Αν σε υποστυλώματα πολύ μεγάλης διαμέτρου (π.χ. $D = 6$ m) τοποθετηθεί 0.5% της συμπαγούς διατομής ως όπλισμός περίσφιξης, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπερδιαστασιολόγηση. Κατά συνέπεια λαμβάνοντας υπόψη τις συγκριτικά χαμηλές πλαστικές στροφές που αναμένονται στα ψηλά βάθρα, οι οποίες θα είναι οι κρίσιμες για το λυγισμό των ράβδων, προτείνεται:

$$\rho_s \geq 0.003 f_{yl} / f_{yh} \geq 0.002 \quad \& \quad \rho_s = \frac{4A_{sp}}{Ds} \quad (5)$$

όπου A_{sp} είναι η επιφάνεια του εγκάρσιου συνδετήρα ή της σπείρας, f_{yl} και f_{yh} τα όρια διαρροής τους αντίστοιχα και s είναι η κατακόρυφη απόσταση του εγκάρσιου όπλισμού.

Τα αδρανειακά χαρακτηριστικά δηλαδή η δυσκαμψία της διατομής για την εκτίμηση της ιδιοπεριόδου του συστήματος καθώς και των μετατοπίσεων δεν θα πρέπει να αφορά την αρηγμάτωτη διατομή διότι με αυτό τον τρόπο υποτιμούνται σε μεγάλο βαθμό οι απαιτήσεις των μετατοπίσεων. Η ισοδύναμη δυσκαμψία της ρηγματωμένης διατομής δίνεται από τον τύπο:

$$I_e = \frac{M_N}{\varphi_y E_c} \quad (6)$$

όπου M_N είναι η ονομαστική τιμή της καμπτικής αντοχής, E_c είναι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος και φ_y η καμπυλότητα διαρροής. Η τελευταία μπορεί να ληφθεί, εφόσον ικανοποιούνται τα όρια των ποσοστών του χάλυβα, από την εξίσωση:

$$\varphi_y = 2.45 \varepsilon_y / D \quad (7)$$

όπου ε_y είναι η ανηγμένη παραμόρφωση διαρροής ($= f_y / E_s$) του διαμήκους όπλισμού και D είναι η διάμετρος της κυκλικής διατομής. Σημειώνεται ότι για μεγάλου ύψους υποστυλώματα, οι μετατοπίσεις πιθανόν να είναι ικανοποιητικού μεγέθους, ούτως ώστε να εξασφαλιστεί η ελαστική απόκριση.

Η ενεργός δυσκαμψία στην Εγκύκλιο 39/99 εκτιμάται από τη σχέση:

$$E_c J_{eff} = 300 M_{Rd} D \quad (8)$$

όπου d το ενεργό ύψος της διατομής και M_{Rd} η υπολογιστική καμπτική ροπή.

Με βάσει τις συστάσεις του Priestley προκύπτει για τις κυκλικές διατομές:

$$E_c J_{eff} = 200 M_{Rd} D \quad (9)$$

Η σχέση των συμπαγών κυκλικών διατομών θα ήταν δυνατόν να επεκταθεί και στις δακτυλιοειδείς, καθόσον η συνεισφορά του εσωτερικού ρηγματωμένου σκυροδέματος είναι αμελητέα.

2.2 Τέμνουσα

Ο ισχύων Ελληνικός Κανονισμός Όπλισμένου Σκυροδέματος 2000 για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας έναντι τέμνουσας συμπαγών διατομών παραθέτει την Γενική μέθοδο υπολογισμού, η οποία αναφέρεται και ως Εναλλακτική Μέθοδος. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, γίνεται μία επιλογή της κλίσης θ των θλιβόμενων διαγωνίων του σκυροδέματος και παρακάμπτεται ουσιαστικά η V_{Rd1} , η οποία είναι δύσκολο να προσδιοριστεί εξαιτίας της ασάφειας που υπάρχει για

τις κυκλικές και δακτυλιοειδείς διατομές ως προς το εμπλεκόμενο ποσοστό διαμήκους οπλισμού και την ενεργό διατομή του σκυροδέματος. Είναι αξιοσημείωτο, ότι για την περίπτωση της V_{Rd1} ούτε ο ΕΚΩΣ αλλά ούτε και ο πρόσφατος Γερμανικός Κανονισμός DIN 1045-1 περιλαμβάνουν στοιχεία για τον υπολογισμό της.

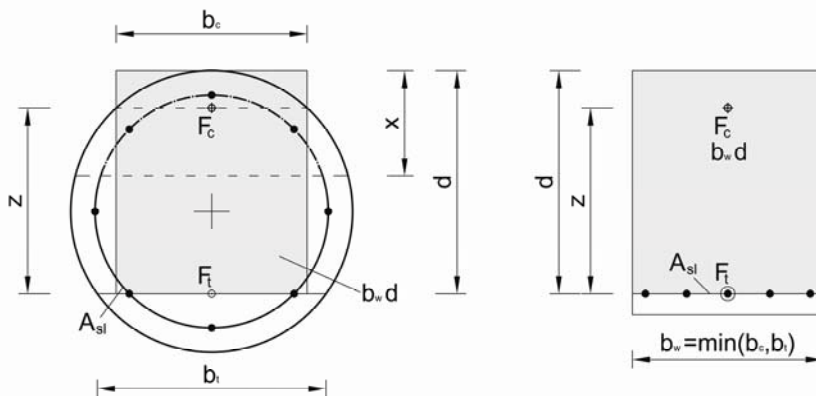
Αναφέρεται παρεμπιπτόντως ότι για τον έλεγχο διάτμησης, ο οποίος γίνεται υπό ικανοτικές συνθήκες βάσει της Ε39/99, υπάρχει διαφοροποίηση για περιοχές εντός και εκτός πλαστικής άρθρωσης. Στις διατομές εντός πλαστικής άρθρωσης λαμβάνεται υπόψη η αποφλοιωμένη διατομή του σκυροδέματος η οποία είναι ίση με $\pi d_{sp}^2/4$ όπου d_{sp} είναι η διάμετρος της σπείρας και ο μοχλοβραχίονας z λαμβάνεται ίσος προς $0.75 d_{sp}$ για την εκτίμηση της διατμητικής τάσης τ_0 . Ο έλεγχος σε διάτμηση εκτός πλαστικής άρθρωσης πραγματοποιείται λαμβάνοντας την πλήρη διατομή του σκυροδέματος ($\pi d^2/4$) και τον μοχλοβραχίονα z ίσο προς $0.75d$.

Η Επιτροπή Δομικών Κανονισμών (NABau) της Γερμανίας παραπέμπει για συμπαγείς κυκλικές διατομές στις ορθογωνικές και συστήνει να λαμβάνονται στην εξίσωση της $V_{Rd,1}$ ως ενεργό πλάτος b_w η μικρότερη τιμή από τις δύο χορδές που αντιστοιχούν στις θέσεις των συνισταμένων αφενός των τάσεων της θλιβόμενης ζώνης και αφετέρου των τάσεων του εφελκυόμενου πέλματος (F_t, F_c). Αυτό αντιστοιχεί στην περίπτωση στοιχείων συμπαγούς κυκλικής διατομής με συμμετρικό οπλισμό με $N = 0$ στο πλάτος b_c που αντιστοιχεί στο ύψος της συνισταμένης της θλιβόμενης ζώνης.

Ο έλεγχος πραγματοποιείται στην υποκατάστατη ορθογωνική διατομή με:

$$V_{Rd,ct} = [0.10\kappa(100\rho_l f_{ck})^{1/3} - 0.12\sigma_{cd}]b_w d \quad (10)$$

$$\text{Με: } b_w = \min \left\{ \begin{matrix} b_c \\ b_t \end{matrix} \right\}, \kappa = 1 + \sqrt{\frac{200}{d[\text{mm}]} \leq 2}, \rho_l = \frac{A_{sl,εφελ}}{b_w d} \leq 0.02, \sigma_{cd} = \frac{N_{Ed}}{A_c} = \frac{4 \cdot N_{Ed}}{\pi D^2}$$



Σχήμα 1. Καθορισμός του πραγματικού πλάτους b_w σύμφωνα με το NABau και της υποκατάστατης διατομής.

Πειραματικά αποτελέσματα από τους Bender και Mark (2006) έδειξαν ότι ο προσδιορισμός της $V_{Rd,1}$ με βάση την εξίσωση 5 οδηγεί σε μάλλον συντηρητικά αποτελέσματα του είδους αυτού της διατμητικής αντοχής. Σύμφωνα με τους ίδιους ερευνητές η $V_{Rd,1}$ για τις συμπαγείς κυκλικές διατομές θα πρέπει να υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{Rd,ct} = 0,14\kappa(100\rho_l f_{ck})^{1/3} D \cdot z - \lambda N_{Ed} \quad (11)$$

Όπου κ κατά το DIN 1045-1, $\rho_l = 1/2 A_{s,tot}/A_c$, D η διάμετρος της κυκλικής διατομής, z ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων, ο οποίος δεν επιτρέπεται να λαμβάνεται απλοποιητικά αλλά για τον προσδιορισμό του απαιτείται η εύρεση των θέσεων των συνισταμένων

των τάσεων της θλιβόμενης και εφελκόμενης ζώνης. N_{Ed} είναι η τιμή της ορθής δύναμης (η θλιπτική θεωρείται με αρνητικό πρόσημο) και λ είναι η κλίση του ιδεατού τόξου με ελκυστήρα που καταλήγει στη θέση της στήριξης, π.χ. για τον ΕΚΩΣ2000 $\lambda = 0.15d/h$.

Όσον αφορά την μέσω των θλιπτήρων του σκυροδέματος προσδιοριζόμενη αντοχή $V_{Rd,2}$ ισχύει η γενική σχέση:

$$V_{Rd,2} = V_{Rd,max} = \frac{b_w \cdot z \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad \& \quad \tau_{Rd,max} = \frac{\alpha_c \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (12)$$

όπου για την περίπτωση των συμπαγών κυκλικών διατομών b_w είναι το μήκος της αποτεμνόμενης χορδής στη θέση του ουδέτερου άξονα και z ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων, ο οποίος και εδώ, όπως στην περίπτωση της $V_{Rd,1}$ δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί προσεγγιστικώς.

Τέλος όσον αφορά το $V_{Rd,3}$ ισχύει για τη Γενική Μέθοδο η σχέση:

$$V_{Rd,3} = V_{Rd,sy} = \frac{A_{sw}}{s \cdot b_w} f_{ywd} \cdot b_w \cdot z \cdot \cot \theta \quad (13)$$

όπου b_w και z όπως ορίστηκαν στην περίπτωση της $V_{Rd,2}$.

Είναι σημειωτέον ότι η Γενική Μέθοδος παρέχει το πλεονέκτημα της παράκαμψης του προσδιορισμού της $V_{Rd,1}$.

2.3 Παράδειγμα Υπολογισμού Μεσοβάθρου με την Γενική Μέθοδο κατά DIN 1045-1

Δίνονται:

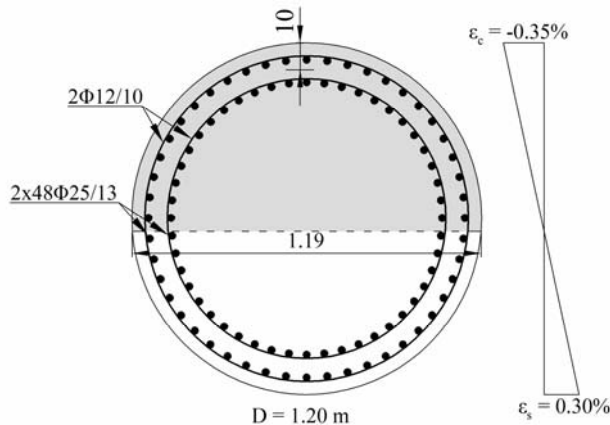
$D = 1.2 \text{ m}$, $A_c = 1.131 \text{ m}^2$, $d_1 = 0.1 \text{ m}$, $H = 9.8 \text{ m}$ (ύψος μεσοβάθρου), C 25/30 και S 500

$N_{Ed} = -7500 \text{ kN}$, $M_{Ed} = 7000 \text{ kNm}$, $V_{Ed} = 2000 \text{ kN}$

Διαστασιολόγηση

$\nu = -0.40$, $\mu = 0.31$, $\varepsilon_c / \varepsilon_s = -3.5/3.0 \text{ ‰}$, $\omega_t = 1.05$, $A_{st} = 471.2 \text{ cm}^2 \rightarrow 2 \times 48 \Phi 25/13$

$b_w = 1.19$, $z = 0.50 \text{ m}$



Σχήμα 2. Παράδειγμα υπολογισμού μεσοβάθρου

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w \cdot z} = \frac{2000 \cdot 10^{-3}}{1.19 \cdot 0.50} = 3.36 \text{ N/mm}^2, \quad \sigma_{cd} = \frac{7500 \cdot 10^{-3}}{1.131} = -6.6 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\tau_{Rd,c}}{\tau_{Ed}} = \frac{\beta_{ct} \cdot 0.1 \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot (1 + 1.2 \cdot \sigma_{cd} / f_{cd})}{\tau_{Ed}} = \frac{2.4 \cdot 0.1 \cdot 1.0 \cdot 25^{1/3} \cdot (1 + 1.2 \cdot 6.6 / 16.7)}{3.36} = 0.11$$

$$\cot \theta \leq \frac{1.2 - 1.4 \cdot \sigma_{cd} / f_{cd}}{1 - \tau_{Rd,c} / \tau_{Ed}} = \frac{1.2 - 1.4 \cdot 6.6 / 16.7}{1 - 0.11} = 2.06$$

$$\frac{A_{sw}}{s_w} = \frac{\tau_{Ed} \cdot b_w}{f_{yd} \cdot \cot \theta} = \frac{3.36 \cdot 1.19 \cdot 10^{-4}}{435 \cdot 2.06} = 44.6 \text{ cm}^2/\text{m} \rightarrow \text{Τοποθετούνται } 2\emptyset 12/10 \text{ (} 45.2 \text{ cm}^2/\text{m)}$$

$$\tau_{Rd,max} = \frac{a_c \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} = \frac{0.75 \cdot 16.7}{2.06 + 1/2.06} = 4.9 > 3.36 \text{ N/mm}^2$$

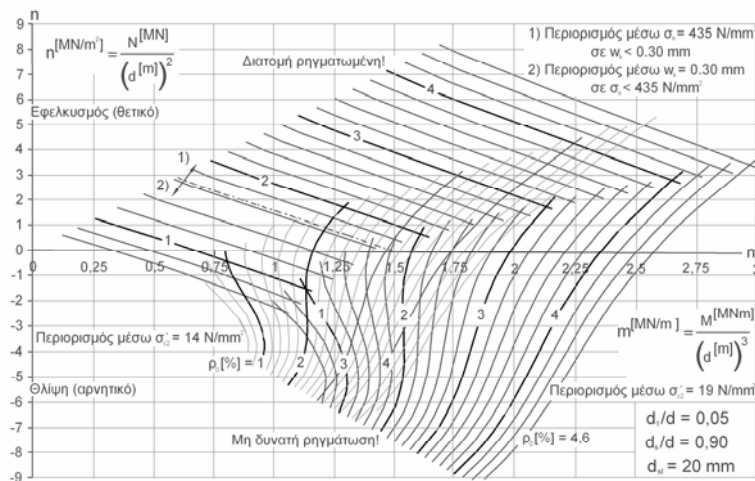
3 ΤΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Σε κυκλικές διατομές, συμπαγείς και κοίλες, αγνοείται από του μελετητές ο έλεγχος του εύρους ρηγματώσης. Ωστόσο για στοιχεία που καταπονούνται με προέχουσα κάμψη είναι δυνατόν αυτός ο έλεγχος, δεδομένων των περιορισμών χάρη της πλαστιμότητας για χαμηλά ανηγμένα αξονικά φορτία καθώς και σχετικώς χαμηλά ποσοστά διαμήκους οπλισμού να αποβεί κρίσιμος. Το πρόβλημα που παρουσιάζεται στην κατάσταση της λειτουργικότητας είναι ο προσδιορισμός του ουδέτερου άξονα της διατομής.

Τα αποτελέσματα πειραματικής έρευνας των Wiese, Curbach, Speck, Weiland, Eckfeld, Hampel (2004), με στόχο τη βαθμονόμηση των κανονισμών DIN 1045 και DIN 1045-1, έδειξαν ότι όσον αφορά την οριακή κατάσταση αστοχίας οι δύο κανονισμοί παρουσιάζουν πλήρη επάρκεια. Αναφορικώς με την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας προέκυψαν τα εξής:

α) Η θέση του ουδέτερου άξονα είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με τη βοήθεια της, γνωστής στους παλιούς μηχανικούς, μεθόδου του η , όπου η είναι η τιμή του λόγου E_c/E_s . Θεωρήθηκαν για το n δύο τιμές, ήτοι για τις βραχυχρόνιες δοκιμές ελήφθη $n = 7$ ενώ για πραγματικούς φορείς των εφαρμογών ελήφθη $n = 10$.

Αναπτύχθηκαν διαγράμματα για τον καθορισμό του εύρους ρωγμής ως βοηθητικά μέσα διαστασιολόγησης για ανηγμένες ροπές m και για ανηγμένες αξονικές δυνάμεις n . Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στα διαγράμματα είναι η ανηγμένη ενεργός διατομή του σκυροδέματος $A_{c,eff}/A_c$, η θέση του οπλισμού, εκφρασμένη μέσω της αναλογίας d_1/d ή d_s/d και τέλος, η διάμετρος του διαμήκους οπλισμού d_{sl} .



Σχήμα 3. Διάγραμμα καθορισμού εύρους ρηγματώσης

Σύμφωνα με το σκεπτικό που παρατέθηκε στην παράγραφο 2.1 σχετικώς με τη δυσκαμψία των κοίλων διατομών ως προς την αντίστοιχη των συμπαγών, έλεγχος σε ρηγμάτωση των κοίλων διατομών είναι δυνατόν να διεξαχθεί με βάση τα αντίστοιχα διαγράμματα των συμπαγών διατομών.

Όσον αφορά τον ελάχιστο οπλισμό ρηγμάτωσης κοίλων και συμπαγών διατομών για τις περιοχές υψηλών εφελκυστικών τάσεων ο Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος προβλέπει την σχέση 15.5. Ωστόσο επειδή αντικείμενο της παρούσης αποτελεί η διαστασιολόγηση στύλων και όχι δοκών κυκλικής διατομής, το πρόβλημα του ελάχιστου οπλισμού ακολουθεί αντισεισμικά και όχι λειτουργικά κριτήρια και ως εκ τούτου οι λειτουργικές απαιτήσεις κατά κανόνα υπερκαλύπτονται.

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

4.1 Στόχοι έρευνας - Δοκίμια

Με βάση τις επισημανθείσες στα προηγούμενα ελλείψεις των Κανονισμών ως προς τις τιμές των $V_{Rd,1}$ και $V_{Rd,2}$, καθώς και τον λειτουργικό έλεγχο της ρηγμάτωσης, καταστρώθηκε ένα πρόγραμμα πειραματικής έρευνας με στόχο μία πρώτη ανίχνευση απαντήσεων στα ερωτηματικά που προέκυψαν.

Το πρόγραμμα περιλάμβανε τρία δοκίμια κοίλης κυκλικής διατομής με γεωμετρικά στοιχεία και οπλισμούς που φαίνονται στο Σχήμα 4. Τα δοκίμια είχαν μεν όλα την ίδια γεωμετρία, αλλά διέφεραν κατά τους διαμήκεις και εγκάρσιους οπλισμούς καθώς και κατά την ποιότητα του σκυροδέματος. Στον Πίνακα 2 δίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, οι οπλισμοί και τα υλικά των δοκιμών:

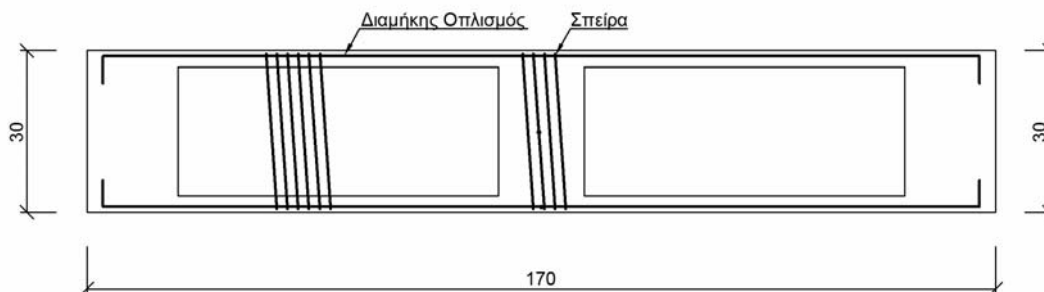
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά δοκιμών

Δοκίμιο	L [m]	D [mm]	t [m]	Διαμήκης Οπλισμός	Εγκάρσιος Οπλισμός	f_c [MPa]	f_y [MPa]	f_{yw} [MPa]
1	1.70	300	30	40Ø10	Ø4,2/20	19	520	760
2	1.70	300	30	16Ø10	-	35	520	760
3	1.70	300	30	8Ø10	Ø4,2/20	25	520	760

Οι στόχοι, οι οποίοι ετέθησαν προς διερεύνηση, είναι:

- Η εκτίμηση της $V_{Rd,1}$
- Η εκτίμηση της $V_{Rd,2}$
- Η εκτίμηση της $V_{Rd,3}$

Ειδικότερα ως προς το (α) στόχο αναφέρονται τα εξής: Υπήρξε σκόπιμη επιλογή χαμηλότερης ποιότητας σκυροδέματος, καθώς και υπερόπλιση, διαμήκως και εγκαρσώς, ούτως ώστε η αστοχία να κατευθυνθεί στους καμπύλους θλιπτήρες του ενεργούντος δικτύωματος. Με το δοκίμιο αυτό επίσης επιδιώχθηκε η αξιολόγηση του προτεινόμενου στα πλαίσια αυτής της εργασίας αναλυτικού προσομοιώματος.



Σχήμα 4. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οπλισμοί δοκιμών

4.2 Διάταξη Φόρτισης

Τα δοκίμια φορτίστηκαν σε κατάλληλη πρέσα ως αμφιέριστες δοκοί στατικού ανοίγματος 1.50 m. Η φόρτιση αποτελούνταν από ένα μοναχικό φορτίο στη μέση του δοκιμίου. Το σχετικό άνοιγμα διάτμησης (ενεργό) ήταν $\alpha = 0,50 \times 1,50 / 0,90 \times 0,30 \approx 3,0$, παραπλήσιο με εκείνο που έγιναν τα κλασσικά πειράματα της Στουτγκάρδης από τον Leonhardt. Μικρότερη τιμή για το α θα υπερτιμούσε τα αποτελέσματα αντοχής σε τέμνουσα. Στην Εικόνα 1 φαίνεται η διάταξη φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε με ένα από τα δοκίμια της εργασίας του οποίου ολοκληρώθηκε η φόρτιση. Όπως είναι δυνατό να παρατηρηθεί, η μοναχική φόρτιση προς αποφυγή τοπικής αστοχίας στο σημείο προσαγωγής της κατανέμεται σε ευρύτερη περιοχή μέσω καταλλήλου μεταλλικού δακτυλίου - παρεμβλήματος. Κατά περίπτωση πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις βέλους στο μέσο του δοκιμίου καθώς οι μετρήσεις εύρους ρωγμών. Επιπλέον στο τρίτο δοκίμιο τοποθετήθηκαν στους διαμήκεις και εγκάρσιους οπλισμούς ταινίες strain gages με στόχο τη μέτρηση των τάσεων αυτών για τις διάφορες φάσεις φόρτισης.



Εικόνα 1. Διάταξη φόρτισης δοκιμίων

4.3 Αποτελέσματα

Η εργαστηριακή εξέταση του τρίτου δοκιμίου δεν κατέστη δυνατόν να ολοκληρωθεί μέχρι το χρόνο της προθεσμίας για την αποστολή των εργασιών. Ωστόσο τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν στο συνέδριο.

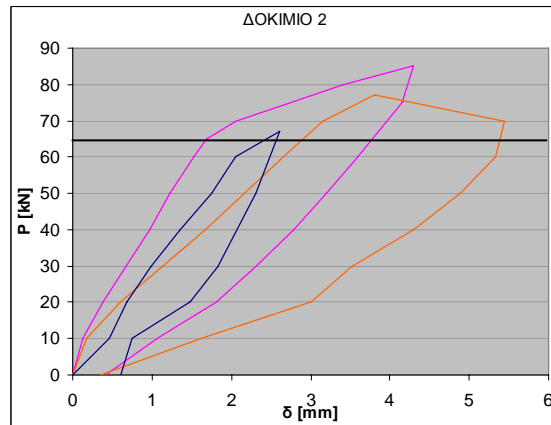
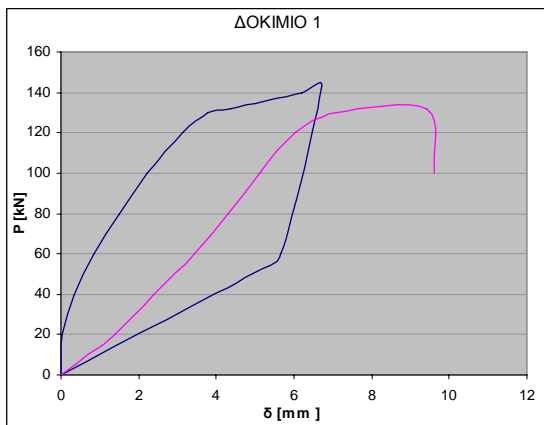
Το πρώτο δοκίμιο εμφάνισε αδιόρατη καμπτική ρηγμάτωση, η οποία διαγνώστηκε όχι οπτικώς αλλά μέσω κυρίως των ενδείξεων του βελομέτρου. Με την πρόοδο της φόρτισης εμφανίστηκαν αρχικώς λοξές ρωγμές ελαχίστου εύρους μόλις ορατές. Η αστοχία στο δοκίμιο αυτό εκδηλώθηκε απότομα και με, ως έγγιστα, εκρηκτικό τρόπο, Εικόνα 2. Η τιμή της τέμνουσας αστοχίας αυτού του δοκιμίου ευρέθηκε σχεδόν ίση με την αναλυτική τιμή που προέκυψε από το προσομοίωμα, το οποίο περιγράφεται κατωτέρω.

Το δεύτερο δοκίμιο εμφάνισε τη λοξή ρηγμάτωση του τύπου που διακρίνει τους φορείς, οι οποίοι στερούνται οπλισμού διάτμησης. Δηλαδή μικρή κλίση ως προς τον άξονα των δοκιμίων ρωγμών και εμφάνισή των ολίγον προ της αστοχίας. Η υπολογιστική αντοχή με βάση την παράγραφο 2.2 προέκυψε 64 kN.

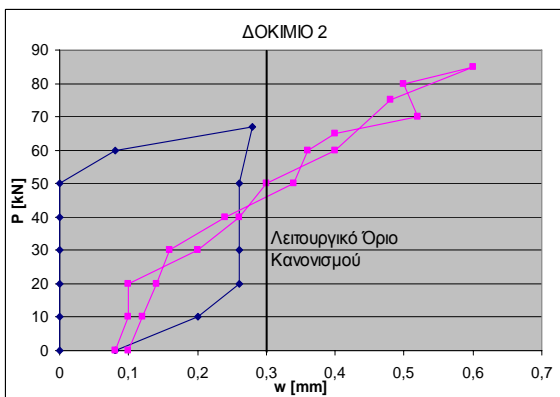
Στο σχήμα 5 δίνονται για τα δύο δοκίμια τα διαγράμματα φορτίσεων – βελών για ορισμένους κύκλους φορτίσεων. Στο σχήμα 6 δίνεται το διάγραμμα φόρτισης – ρηγμάτωσης.



Εικόνα 2. Εικόνα αστοχίας δοκιμίου 1. Αστοχία από ανεπάρκεια των καμπύλων θλιπτήρων του σκυροδέματος



Σχήμα 5. Διαγράμματα φορτίσεων - βελών



Σχήμα 6. Διαγράμματα φόρτισης – εύρους ρηγμάτωσης

5 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΠΡΟΣΜΟΙΩΜΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ V_{Rd2}

Εάν V_{Ed} η ενεργούσα εξωτερική τέμνουσα υπάρχει, σύμφωνα με το Σχήμα 7 μία δίδυμη διατμητική ροή $\tau_{Ed} \cdot t_{eff,i}$, η οποία είναι συμμετρική ως προς τον άξονα της δακτυλιοειδούς διατομής και διατρέχουσα τα δύο ημικύκλια της περιμέτρου εξισορροπεί τελικώς την V_{Ed} . Ολοκληρώνοντας κατά μήκος των δύο ημιπεριφερειών της μέσης γραμμής του ενεργού πλάτους $t_{eff,i}$, προκύπτουν οι σχέσεις:

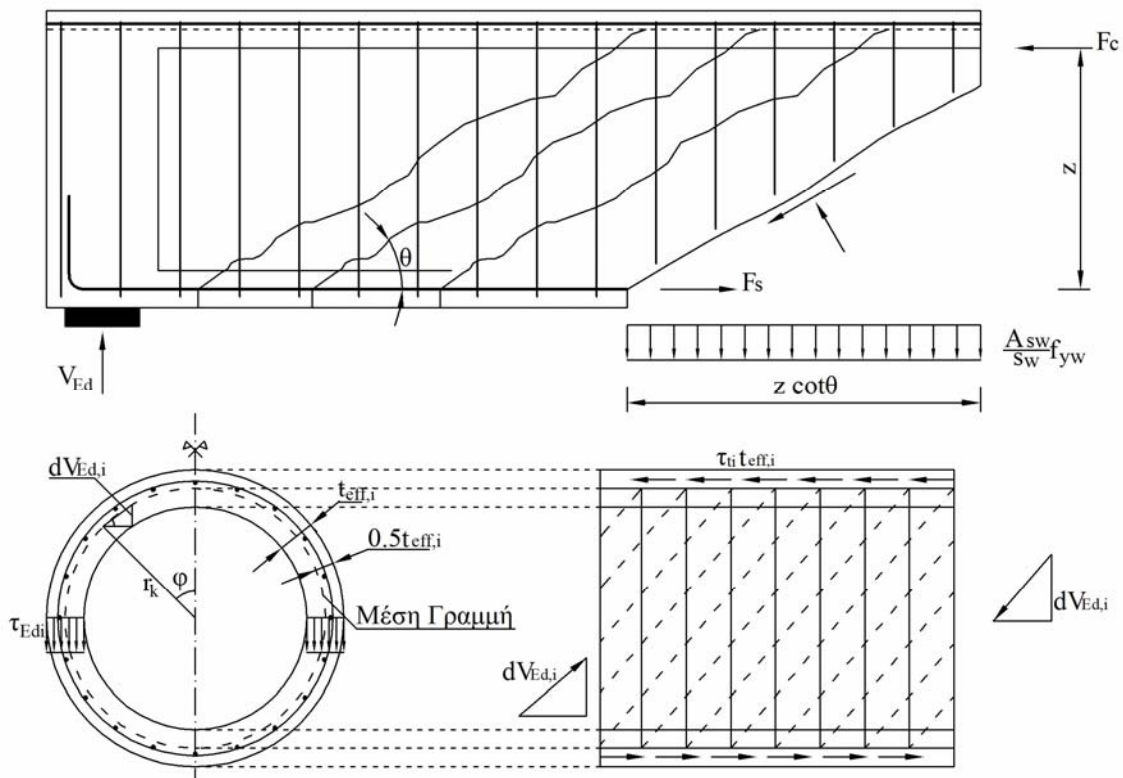
$$dV_{Ed,i} = \tau_{Ed,i} \cdot t_{eff,i} \cdot \sin \varphi \cdot ds = \tau_{Ed,i} \cdot t_{eff,i} \cdot r \cdot \sin \varphi d\varphi$$

$$V_{Ed} = 2\tau_{Ed,i} \cdot t_{eff,i} \cdot r \int_0^{\pi} \sin \varphi \cdot d\varphi = 4\tau_{Ed,i} \cdot t_{eff,i} \cdot r_k \rightarrow V_{Ed} = \frac{4\pi r}{\pi r} \tau_{Ed,i} \cdot t_{eff,i} \cdot r_k = \frac{2\tau_{Ed}}{\pi r}$$

Η τελευταία σχέση συνδέει την από εξωτερικά φορτία προερχόμενη τέμνουσα με μία πλασματική στρέψη, η οποία θα καταπονούσε τη διατομή, εάν η καταπόνηση των δύο ημιπεριφερειών της μέσης γραμμής της διατομής ήταν αντισυμμετρική αντί συμμετρική. Αντικαθιστώντας την τιμή της πλασματικής αυτής στρέψης με την $\tau_{Rd,max}$, η οποία εκφράζει την αντοχή των θλιπτήρων του ιδεατού δικτυώματος της στρέψης, προκύπτει τελικώς για τη ζητούμενη αντοχή V_{Rd2} η τιμή:

$$V_{Rd2} = \frac{2v \cdot f_{cd} \cdot t \cdot d_k}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (14)$$

όπου $d_k = 2r_k$ είναι η διάμετρος της μέσης γραμμής της δακτυλιοειδούς διατομής.



Σχήμα 7. Διατμητική ροή σε κοίλες κυκλικές διατομές

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία εκπονήθηκε με δύο κύριους στόχους: (α) τη συγκέντρωση όλων των αναγκαίων πληροφοριών που αφορούν τη διαστασιολόγηση κυκλικών, συμπαγών και κοίλων, διατομών, κυρίως δε αυτών που αφορούν την τέμνουσα. (β) Μία πρώτη εκτίμηση των αντοχών V_{Rd1} και V_{Rd2} με αντίστοιχη πρόταση αναλυτικού προσομοιώματος για την V_{Rd2} , η οποία αποτελεί και τη δυσκολότερη παράμετρο του προβλήματος, δεδομένου ότι ο υπολογισμός της V_{Rd1} είναι δυνατόν να παρακαμφθεί με την εφαρμογή της Γενικής Μεθόδου.

Ως συμπεράσματα της εργασίας αναφέρονται τα εξής:

1. η κατατιθέμενη στην Εργασία πρόταση διαστασιολόγησης κυκλικών, συμπαγών και κοίλων, διατομών είναι πλήρης.
2. Το προτεινόμενο αναλυτικό προσομοίωμα επιβεβαιώνεται και πειραματικώς, ωστόσο αναγνωρίζεται ότι απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός δοκιμών για τη βαθμονόμησή του.

7 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- 1) Bender m. και Mark.P. 2006. Zur Querkraftbemessung bei Kreisquerschnitten. Beton- und Stahlbetonbau, 101 Jahrgang, Heft 2: 87-93
- 2) DIN1045-1: 2001-07: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Beuth Verlag
- 3) Neuser J, Häusler F., 2005. Querkraftnachweis runder Querschnitte nach DIN 1045-1. Beton- und Stahlbetonbau, 100 Jahrgang, Heft 11: 956-960
- 4) Normenausschuss Bauwesen (NABau), 2005. Auslegungsfragen zur DIN 1045-1 (Stand 22.07.)
- 5) ΟΑΣΠ – ΣΠΜΕ, 2000, Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000 – ΕΚΩΣ 2000
- 6) Οδηγίες για την Αντισεισμική Μελέτη Γεφυρών 39/99, 2000 Ενημερωτικό Δελτίο Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Τεύχος 2097
- 7) Priestley M.J.N., 1998. Seismic Design Issues For Hollow Bridge Piers, Report No 98/01
- 8) Wiese H., Curbach M., Speck K., Weiland S., Eckfeld L., Hampel T. 2004. Ribbreitennachweis für Kreisquerschnitte, Beton- und Stahlbetonbau 99, Heft 4