

Η επιρροή του ανοίγματος διατρήσεως στην αντοχή των πλακών

The effect of the ratio “a/d” on the punching shear strength of the slab

Κωνσταντίνος ΨΑΡΡΑΣ¹, Άνθος ΙΩΑΝΝΟΥ², Ιωακείμ ΣΥΜΕΟΥ³, Ιωάννης ΤΕΓΟΣ⁴

Λέξεις κλειδιά: Διάτρηση, Άνοιγμα διατρήσεως, κτήρια χωρίς δοκούς

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η Εργασία αποτελεί αδρομερή πειραματική έρευνα με στόχο την αναζήτηση και εις τη Διάτρηση τυχόν υπάρχουσας "κοιλιάδας", όμοιας με εκείνη που ανακάλυψε ο Κανί για τη Διάτμηση ή με άλλη διατύπωση, αναζήτηση τυχόν επιρροής του ανηγμένου ανοίγματος διατρήσεως εις την αντοχήν έναντι διατρήσεως. Προς τούτο κατασκευάστηκαν 6 δοκίμια καταλλήλως οπλισμένων πλακών εδραζομένων επί στύλων, τα οποία εφορτίσθησαν γύρωθεν του στύλου σε διάφορες αποστάσεις εκάστον, ώστε να αντιστοιχεί η κάθε φόρτιση σε έξι διάφορες τιμές σχετικού ανοίγματος διατρήσεως κυμαινόμενες από 0.55 μέχρι 4.00. Επιπλέον μέσω τριών άλλων δοκιμίων επιχειρήθηκε η βελτίωση της αντοχής έναντι διατρήσεως μέσω τοπικής χρήσεως ετοιμού τσιμεντοκονιάματος υψηλής επιτελεστικότητας γύρωθεν του στύλου στην περιοχή εντός της κρίσιμης περιμέτρου. Για όλες τις περιπτώσεις προέκυψαν διαγράμματα φορτίσεων - παραμορφώσεων βάσει των οποίων εξήχθησαν ενδιαφέροντα συμπεράσματα.

ABSTRACT: Punching shear is not treated with the same clarity as bending, shear or torsion, and this can be attributed to the development of the standards, as well as with to the differences among each code. Until the 70's, it was believed that the shear strength of a beam was related to the tensile strength of the concrete. Kani's experimental research proved that the shear strength of a beam is related to the position of the shear load. A similar phenomenon may be observed at the punching shear of a slab, which is not mentioned in the Standards. Consequently, 6 specimens of flat slabs were examined for punching shear loading, in line with six different values of the punching shear load.

¹ Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Μελετητής METE-ΣΥΣΜ Α.Ε., email: kpsarras@metesysm.gr

² Πολιτικός Μηχανικός

³ Πολιτικός Μηχανικός

⁴ Ομότιμος Καθηγητής, Σύμβουλος METE-ΣΥΣΜ Α.Ε., email: itegos@civil.auth.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μετά από μία μακράν περίοδο «καραντίνας», η οποία οφείλονταν στην, τότε, ανωριμότητα των Κανονισμών και, πιθανόν, της φοβίας που είχαν ενσπείρει οι σεισμοί της Alaska (1964), του Caracas (1967) και της Managua (1972), οι οποίοι, κυριολεκτικώς, κονιορτοποίησαν την αντισεισμική αξιοπιστία των κατασκευών χωρίς δοκούς, σήμερα αυτές γνωρίζουν «περίοδο ανθίσεως». Η διατρητική αστοχία μπορεί να χαρακτηριστεί ως η πλέον ψαθυρή και επικίνδυνη μορφή, συγκριτικά με τα άλλα είδη αστοχίας (κάμψης, τέμνουσας και στρέψης).

Είναι γνωστό ότι το πρόβλημα της διατρήσεως σε αντίθεση με τα άλλα προβλήματα καταπονήσεων των φορέων οπλισμένου σκυροδέματος (κάμψη, τέμνουσα, στρέψη, λυγισμός) δεν εμφανίζει την ίδια σαφήνεια στην αντιμετώπισή του με αυτή (των προαναφερθέντων). Έμμεση απόδειξη αυτού αποτελούν δύο δεδομένα: (α) το γεγονός ότι οι Ευρωπαϊκοί Κανονισμοί αλλάζουν από εκδόσεως εις έκδοσιν αναφορικώς με το κεφάλαιο της Διάτρησης και, (β) οι διαστασιολογήσεις με τους διάφορους Κανονισμούς δεν καταλήγουν σε παραπλήσια αποτελέσματα σε ελέγχους έναντι διατρήσεως.

Σε όσους ασχολήθηκαν σε βάθος στο πρόβλημα της Διατμήσεως και την ιστορία του, είναι γνωστό το παράδοξο της «κοιλιάδας» του Kani. Μέχρι τότε σύμφωνα με την κλασική θεωρία του Morsch, επιστεύετο ότι θα έπρεπε όλες οι δοκοί να αστοχούν για την ίδια τάση διατμήσεως, η οποία θεωρείται συνάρτηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Τούτο όμως στην πραγματικότητα δεν συμβαίνει. Αντίθετα ευρέθηκε πειραματικώς από τον Kani, ότι η διατμητική τάση αστοχίας είναι συνάρτηση της θέσεως του φορτίου που δημιουργεί η τέμνουσα (άνοιγμα διατμήσεως ή ακριβέστερα, του σχετικού ανοίγματος διατμήσεως, όταν αυτή η απόστασή μετρείται σε μονάδα του στατικού ύψους).

Οι συντάκτες της παρούσας εργασίας είχαν την πεποίθηση ότι κάτι τέτοιο θα πρέπει να συμβαίνει και για την διάτρηση, όπως στην διάτμηση. Κάτι που οι Κανονισμοί αγνοούν και παραβλέπουν. Ότι δηλαδή η αντοχή ανά μέτρο της κρίσιμης περιμέτρου διατρήσεως εξαρτάται από την τιμή του σχετικού ανοίγματος διατρήσεως, εκφραζομένου καταλλήλως. Την αλήθεια αυτής της υποθέσεως μόνο το πείραμα, η βασίλισσα των αποδείξεων (*regina probationum*), θα μπορούσε να καταδείξει.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Περιγραφή δοκιμίων

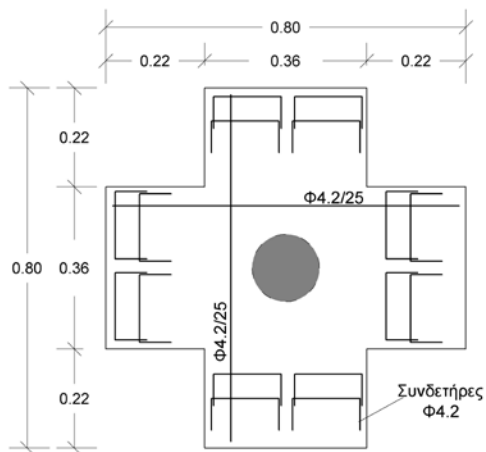
Για τις ανάγκες της Έρευνας, σχεδιάστηκαν έξι (6) δοκίμια πλακών, στα οποία η προσαγωγή του φορτίου διατρήσεως γινόταν για έξι διαφορετικές τιμές του σχετικού ανοίγματος διατρήσεως. Οι τιμές αυτές κλιμακώθηκαν από το 0.55 μέχρι το 4.00.

Επιπλέον για τον έλεγχο της αύξησης της διατρητικής αντοχής των πλακών με την χρήση κονιάματος υψηλής επιτελεστικότητας κατασκευάστηκαν τρία (3) δοκίμια, στα οποία στο εύρος της κρίσιμης ζώνης αντικαταστάθηκε το σκυρόδεμα με το προαναφερθέν κονίαμα. Το κονίαμα τοποθετήθηκε στο μισό πάχος $0.5h_f$ στη θλιβόμενη παρειά των πλακών.

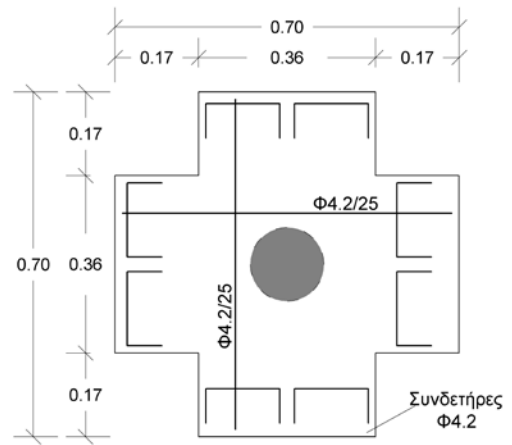
Από τις έξι πλάκες που κατασκευάστηκαν με συμβατικό σκυρόδεμα, οι πέντε είχαν μορφή σταυρού με πλάτος 0.36 m, ενώ η μία ήταν τετράγωνη με πλευρά 0.30 m, Σχ. 1. Τα ανοίγματα των πλακών είχαν τιμές από 0.30-0.80 m, με αυξανόμενο βήμα 0.10 m. Τα δοκίμια είχαν σχήμα σταυρού. Το πάχος της πλάκας του κάθε δοκιμίου ήταν 8 cm. Το υποστύλωμα της κάθε πλάκας ήταν κυκλικής διατομής διαμέτρου 15 cm και ύψους 15 cm. Αναφορικά με την όπλιση των δοκιμίων, τοποθετήθηκε πλέγμα οπλισμών τόσο στο εφελκόμενο όσο και στο θλιβόμενο πέλμα των πλακών Δ-1 έως Δ-9, και συγκεκριμένα Φ4.2/25 στο εφελκόμενο, και Φ4.2/50 στο θλιβόμενο. Στα δοκίμια Δ-3 έως Δ-6 τα άκρα των οπλισμών διαμορφώθηκαν έτσι ώστε να υπάρχουν κατάλληλες αγκυρώσεις για την καλύτερη συνάφεια των οπλισμών με το σκυρόδεμα. Η ποιότητα του σκυροδέματος ήταν C20/25 για όλα τα δοκίμια. Στα δοκίμια Δ-7 έως Δ-9 τοποθετήθηκε στρώση μη συρρικνούμενης τσιμεντοκονιάς πάχους $0.5 \cdot h_f$ στη θλιβόμενη ζώνη, όπου h_f είναι το πάχος της πλάκας, δηλαδή 8.0 cm. Τα δοκίμια Δ-7 έως Δ-9 είχαν την ίδια γεωμετρία με τα δοκίμια Δ-3 έως Δ-5, Σχ. 2. Αναφορικά με την όπλιση των υποστυλωμάτων, και στα 9 υποστύλωματα τοποθετήθηκε διαμήκης οπλισμός από 8Φ4.2, ενώ τοποθετήθηκε και εγκάρσιος οπλισμός σε μορφή σπείρας Φ4.2/50. Ο διαμήκης οπλισμός των υποστυλωμάτων αγκυρώθηκε εντός της πλάκας, σε βάθος 6 cm.

Η φόρτιση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στη μηχανή μονότονης φόρτισης (πρέσσα) του «Εργαστηρίου Πειραματικής Αντοχής των Υλικών και Κατασκευών» του Α.Π.Θ. Το φορτίο ασκήθηκε περιμετρικά μέσω παρεμβλημάτων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν πρίσματα από Οπλισμένο Σκυρόδεμα διαστάσεων 0.30-0.30-0.07 m, Σχ. 3. Το συνολικό φορτίο P επομένως το οποίο ασκούνταν σταδιακά από το έμβολο της διάταξης φόρτισης διαιρείται σε τέσσερα φορτία ίσα με P/4, ένα σε κάθε πλευρά της πλάκας. Εξυπακούεται ότι η μέτρηση η οποία ελήφθη υπ' όψιν σχετικά με τη φόρτιση, για την κατασκευή των διαγραμμάτων Φόρτισης – παραμόρφωσης (βύθισης), ήταν η συνολική δύναμη P του εμβόλου και όχι η P/4.

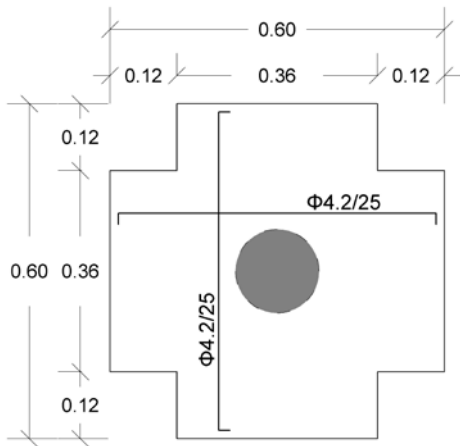
Η μέτρηση της βύθισης γινόταν σε κάθε περίπτωση μέσω βελομέτρου το οποίο τοποθετούνταν μεταξύ του κάτω πέλματος της πλάκας και της μεταλλικής κάτω πλάκας της διάταξης φόρτισης.



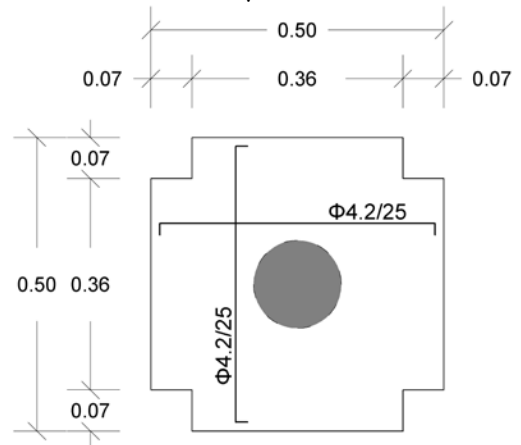
Δοκίμιο Δ-1



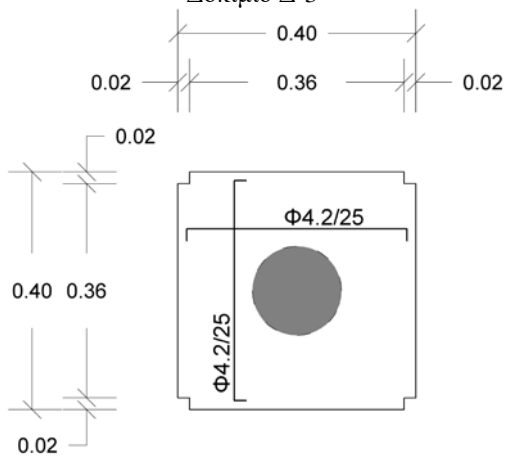
Δοκίμιο Δ-2



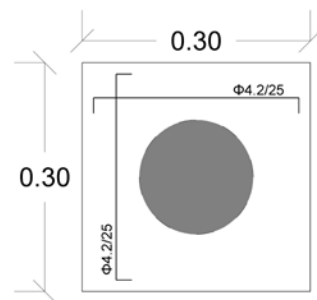
Δοκίμιο Δ-3



Δοκίμιο Δ-4

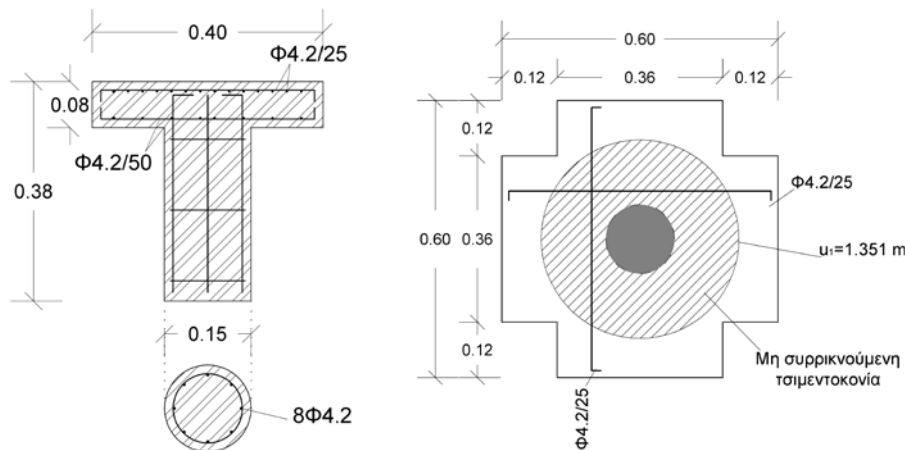


Δοκίμιο Δ-5



Δοκίμιο Δ-6

Σχήμα 1. Χαρακτηριστικά δοκιμίων



Σχήμα 2. Χαρακτηριστική τομή δοκιμίου (αριστερά). Τοποθέτηση μη συρρικνούμενου τσιμεντοκονιάματος (δεξιά)

Πειραματικά αποτελέσματα

Από την μέχρις αστοχίας κεντρική μονότονη φόρτιση των δοκιμίων προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Δοκίμιο Δ-1: Στην περίπτωση αυτή η τιμή του σχετικού ανοίγματος διατρήσεως είναι 4.0 και η πειραματικώς ευρεθείσα τιμή της αντοχής είναι 130 kN. Η παρουσία του κώνου διατρήσεως είναι εμφανής, μολονότι για μεγάλες τιμές του σχετικού ανοίγματος διατρήσεως προηγείται η αστοχία από κάμψη, και ακολουθεί η αστοχία από διάτρηση, Σχ. 4.

Δοκίμιο Δ-2: Το σχετικό άνοιγμα διατρήσεως είχε τιμή 3.4, και η μετρηθείσα τιμή της αντοχής είναι 115 kN. Η μορφή της αστοχίας ήταν παρόμοια με αυτή του δοκιμίου Δ-1.

Δοκίμιο Δ-3: Το σχετικό άνοιγμα διατρήσεως ήταν ίσο με 2.7, ενώ το μέγιστο φορτίο που παρέλαβε η πλάκα ήταν 120 kN, αστοχώντας από διάτρηση, χωρίς να εμφανίζεται καμπτική αστοχία.

Δοκίμιο Δ-4: Το σχετικό άνοιγμα διατρήσεως ήταν ίσο με 2.0, ενώ το μέγιστο φορτίο που παρέλαβε η πλάκα ήταν 120 kN, αστοχώντας από διάτρηση, χωρίς να εμφανίζεται καμπτική αστοχία.

Δοκίμιο Δ-5: Η τιμή του σχετικού ανοίγματος διατρήσεως ήταν 1.25. Η τελική αντοχή της πλάκας ήταν 170 kN. Αρχικά η τιμή της αντοχής έφτασε μέχρι τα 150 kN, εμφανίζοντας μία πτώση 40 kN, όμως μετά η αντοχή επανήλθε μέχρι την τελική της τιμή. Καθώς το άνοιγμα διατρήσεως είχε μικρή τιμή, ένα μέρος των θλιπτήρων εδράστηκε κατευθείαν στην στήριξη, και έτσι η ένταση στη θλιβόμενη ζώνη μειώθηκε. Η συνολική επομένως φέρουσα ικανότητα της πλάκας έναντι διατρήσεως ήταν σημαντικά αυξημένη, καθώς στην αμιγώς έναντι διατρήσεως φέρουσα ικανότητα προστίθεται και το μέρος της αντοχής που παραλαμβάνεται άμεσα από τον στύλο μέσω των προαναφερθέντων θλιπτήρων.

Δοκίμιο Δ-6: Η τιμή του σχετικού ανοίγματος διατρήσεως ήταν 0.55. Η πειραματικώς μετρηθείσα αντοχή της πλάκας ήταν 370 kN. Η αστοχία προήλθε από διατμητική αστοχία του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα να βυθιστεί το υποστύλωμα εντός της πλάκας.

Δοκίμιο Δ-7: Η τιμή του σχετικού ανοίγματος διατρήσεως ήταν 2.7, και η μέγιστη αντοχή σε διάτρηση ήταν 180 kN. Η παρουσία της αυξημένης εις το διπλάσιον του C25/30 αντοχή του μη συρρικνούμενου τσιμεντοκονιάμματος αύξησε την αντοχή κατά 33% σε σχέση με το δοκίμιο Δ-3, που είχε την ίδια γεωμετρία.

Δοκίμιο Δ-8: Η τιμή του σχετικού ανοίγματος διατρήσεως ήταν 2.0, και η μέγιστη αντοχή σε διάτρηση ήταν 200 kN. Η προσθήκη του μη συρρικνούμενου τσιμεντοκονιάμματος αύξησε την αντοχή κατά 40% σε σχέση με το δοκίμιο Δ-4, που είχε την ίδια γεωμετρία.

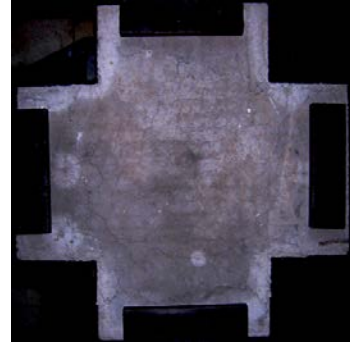
Δοκίμιο Δ-9: Η τιμή του σχετικού ανοίγματος διατρήσεως ήταν 1.25, και η μέγιστη αντοχή σε διάτρηση ήταν 310 kN. Η προσθήκη του μη συρρικνούμενου τσιμεντοκονιάμματος αύξησε την αντοχή κατά 45% σε σχέση με το δοκίμιο Δ-5, που είχε την ίδια γεωμετρία.



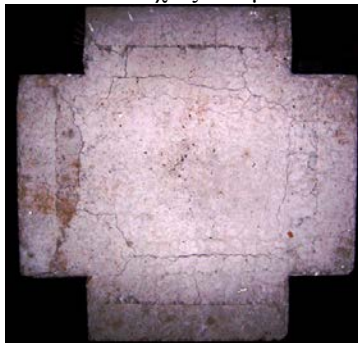
Σχήμα 3. Διάταξη φόρτισης



Εικόνα αστοχίας δοκιμίου Δ-1



Εικόνα αστοχίας δοκιμίου Δ-2



Εικόνα αστοχίας δοκιμίου Δ-3



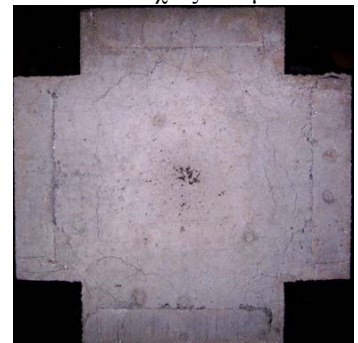
Εικόνα αστοχίας δοκιμίου Δ-4



Εικόνα αστοχίας δοκιμίου Δ-5



Εικόνα αστοχίας δοκιμίου Δ-6



Εικόνα αστοχίας δοκιμίου Δ-7



Εικόνα αστοχίας δοκιμίου Δ-8



Εικόνα αστοχίας δοκιμίου Δ-9

Σχήμα 4. Εικόνες αστοχίας δοκιμίων

Εύρεση ροπών αντοχής

Υπολογίστηκαν στην παρούσα οι ροπές αντοχής των δοκιμίων, για την εξαγωγή διαγραμμάτων τα οποία σχετίζουν το άνοιγμα διατρήσεως με τη ροπή αντοχής, καθώς και με το οριακό φορτίο της αντοχής σε διάτρηση.

Το άνοιγμα διατρήσεως ευρίσκεται μέσω της σχέσεως:

$$a = 0.5 \cdot L - 0.5 \cdot 0.13 - 0.67 \cdot 0.07 \quad (1)$$

Όπου L είναι το μήκος της πλευράς του δοκιμίου, 0.13 είναι το ισοδύναμο με τετράγωνο μήκος της πλευράς του κυλινδρικού υποστυλώματος.

Ο όρος 0.67 εκφράζει τα $2/3$ του πλάτους φόρτισης (πλάτος του παρεμβολομένου για τη φόρτιση πρίσματος οπλισμένου σκυροδέματος, Σχ. 3, το οποίο είναι 0.07 m, κάνοντας την παραδοχή ότι το φορτίο κατανέμεται τριγωνικά εντός του πλάτους αυτού.

Το σχετικό άνοιγμα διατρήσεως δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha = a/d \quad (2)$$

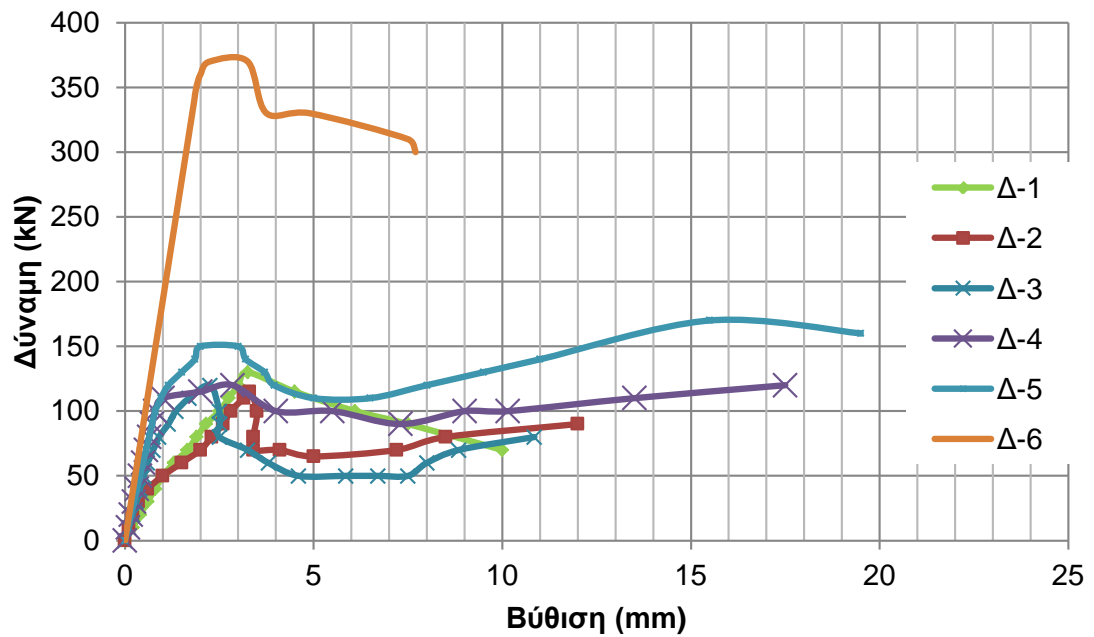
Ενώ η ροπή αντοχής (εκφρασμένη σε $\text{kN}\cdot\text{m}$), δίνεται από τη σχέση:

$$m = a \cdot P_{\text{οριακό}} / [\pi \cdot (0.13 + 2 \cdot a)] \quad (3)$$

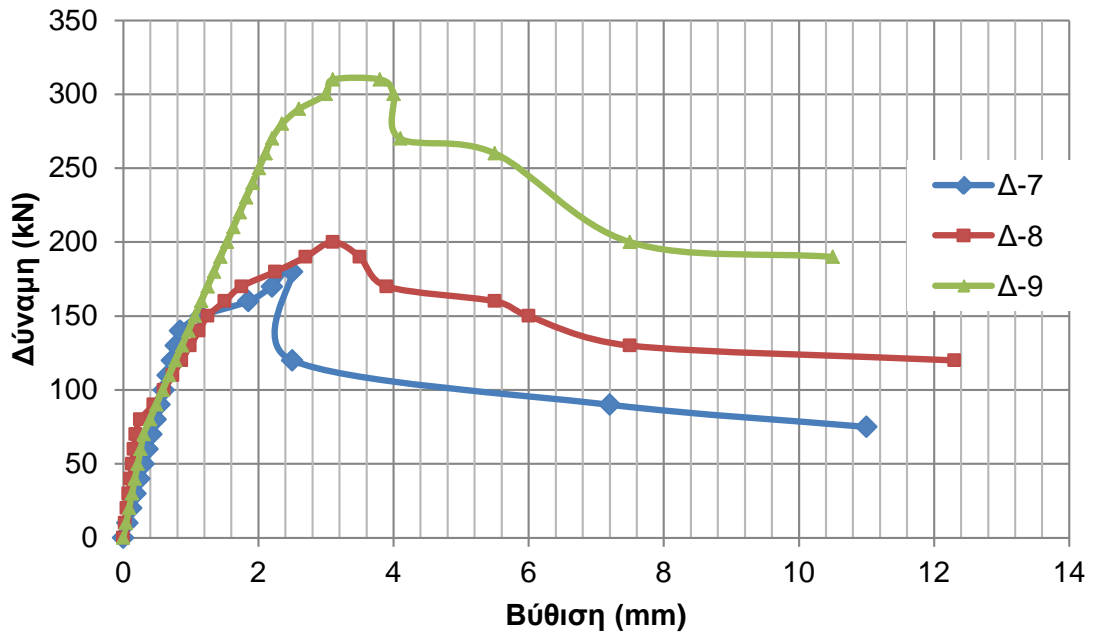
Με βάση τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ο Πίνακας 1.

Πίνακας 1. Φορτίο αντοχής σε διάτρηση, άνοιγμα διατρήσεως και ροπή αντοχής δοκιμίων

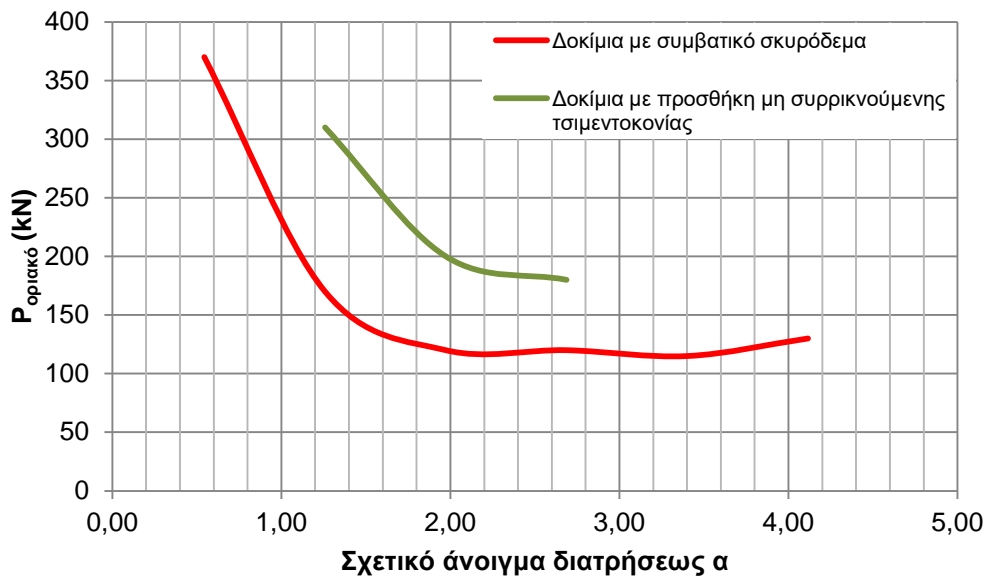
Δοκίμιο	Ροριακό (kN)	L (m)	a (m)	Σχετικό άνοιγμα διατρήσεως (a)	M _{Rd} (kN·m/m)
Δ-1	130	0,8	0,29	4,00	16,88
Δ-2	115	0,7	0,24	3,40	14,38
Δ-3	120	0,6	0,19	2,69	14,19
Δ-4	120	0,5	0,14	1,97	12,99
Δ-5	170	0,4	0,09	1,26	15,57
Δ-6	370	0,3	0,04	0,55	21,76
Δ-7	180	0,6	0,19	2,69	21,29
Δ-8	200	0,5	0,14	1,97	21,64
Δ-9	310	0,4	0,09	1,26	28,39



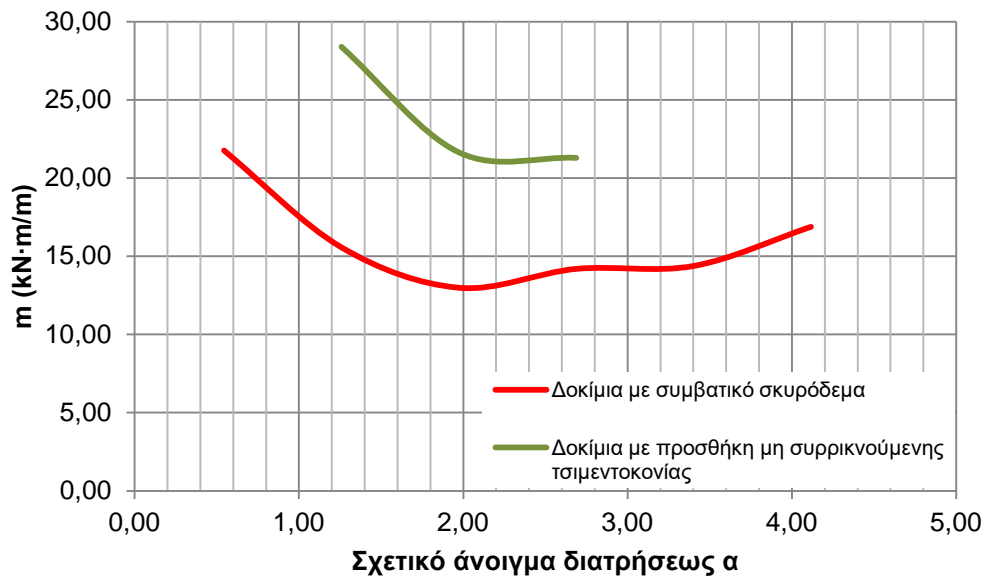
Σχήμα 5. Διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης για τα δοκίμια Δ-1 έως Δ-6



Σχήμα 6. Διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης για τα δοκίμια Δ-7 έως Δ-9



Σχήμα 7. Σχέση σχετικού ανοίγματος διατρήσεως και οριακού φορτίου αντοχής σε διάτρηση



Σχήμα 8. Σχέση σχετικού ανοίγματος διατρήσεως και ροπής αντοχής

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παραπάνω διερεύνηση είχε ως στόχο την εξέταση της επιρροής του ανοίγματος διατρήσεως στην αντοχή της έδρασης πλάκας επί υποστυλώματος αφενός, καθώς επίσης και τη διερεύνηση της επιρροής των κονιαμάτων υψηλής επιτελεστικότητας στην αντοχή σε διάτρηση αφετέρου. Κατασκευάστηκαν προς τούτο 9 δοκίμια. Όλα τα δοκίμια αστόχησαν σε διάτρηση, και αυτό επιβεβαιώνεται από την εικόνα αστοχίας των πλακών. Ως κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας αναφέρονται τα εξής:

1) Από τη σχέση του σχετικού ανοίγματος διατρήσεως με τη ροπή αντοχής, είναι φανερή η δημιουργία «Κοιλιάδας διατρήσεως» αντίστοιχης προς την «Κοιλιάδα του Καπί», ενώ από τη σχέση του σχετικού ανοίγματος διατρήσεως με το οριακό φορτίο αντοχής είναι φανερό πως για άσκηση διατρητικού φορτίου σε απόσταση πέραν της κρίσιμης περιμέτρου, η αντοχή σε διάτρηση παραμένει σταθερή. Για μικρό άνοιγμα διατρήσεως η αντοχή είναι σημαντικά αυξημένη.

2) Η τοποθέτηση τοπικώς μη συρρικνούμενου τσιμεντοκονιάματος στην θλιβόμενη ζώνη των πλακών αύξησε την αντοχή σε διάτρηση σημαντικά, χωρίς την διεύρυνση του πάχους της πλάκας (μύκητα). Αυτό το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο, καθώς η θλιπτική αντοχή αυτού του είδους των κονιαμάτων είναι ιδιαίτερα υψηλή. Η τοποθέτηση αυτού του κονιάματος γίνεται τοπικά, σε πάχος

ίσο με το μισό του πάχους της πλάκας, σε ένα εύρος ίσο με την κρίσιμη περίμετρο σε διάτρηση.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

CEN Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels: European committee for standardization (2004)

G. N. J. Kani, “Basic Facts Concerning Shear Failure”, ACI, Volume 63, Issue 6, (1966)

Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000, ΟΑΣΠ (2000)