

Πειραματική μελέτη της αντοχής σύμμικτων πλακών σκυροδέματος

Φ. Κ. Περδικάρης

Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ε. Σ. Μυστακίδης

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Κ. Σ. Παπαχρήστου

Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφιος Διδάκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Α. Δ. Γιαννόπουλος

Πολιτικός Μηχανικός, Μεταπτυχιακός Φοιτητής, ENPC, Paris, France

Λέξεις κλειδιά : σύμμικτες πλάκες, διαμήκης διάτμηση ,χαλυβδόφυλλο

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η διαδικασία πειραματικού προσδιορισμού της οριακής αντοχής σύμμικτων πλακών σκυροδέματος με χαλύβδινο προφίλ (χαλυβδόφυλλο). Η εργασία επικεντρώνεται στον υπολογισμό της αντοχής σε διαμήκη διάτμηση που απαιτεί σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 4 (EC4), τον πειραματικό προσδιορισμό των συντελεστών m και k . Τα πειράματα έγιναν με χαλυβδόφυλλα SYMDECK73 στα πλαίσια σχετικού ερευνητικού προγράμματος. Στην εργασία εμφανίζονται τα αποτελέσματα μιας 1^{15} σειράς δοκιμών με βάση τα οποία ορίστηκαν οι τελικές διαστάσεις των δοκιμών σύμμικτων πλακών που θα δοκιμάζονταν στο εργαστήριο για να υπολογιστούν οι τελικοί συντελεστές m και k .

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση σύμμικτων πλακών σκυροδέματος σε δομικά έργα έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια κυρίως ως αποτέλεσμα της εκρηκτικής αύξησης της χρήσης του χάλυβα γενικότερα ως υλικού για την κατασκευή του φέροντος οργανισμού των κτιριακών έργων. Το βασικό συστατικό των σύμμικτων πλακών είναι τα χαλύβδινα προφίλ (χαλυβδόφυλλα). Κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης τα χαλυβδόφυλλα χρησιμοποιούνται ως μεταλλότυπος και παραλαμβάνουν τα φορτία του νωπού σκυροδέματος, ενώ μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος συνεργάζονται με αυτό για την ανάλυση των πρόσθετων μόνιμων και κινητών φορτίων.

Σ' ένα σύμμικτο δομικό στοιχείο αναπτύσσεται σύμφωνα με τη θεωρία της ελαστικότητας ροή διατμητικών τάσεων που δρουν προς όλες τις κατευθύνσεις. Η ανάλυση αυτών των τάσεων σε δύο κάθετες συνιστώσες οδηγεί σε εγκάρσια (παράλληλα στη διατομή της πλάκας) και διαμήκη ροή διατμητικών τάσεων στον υπόψη φορέα. Προφανώς το ολοκλήρωμα της εγκάρσιας διατμητικής ροής είναι ισοδύναμο με την εγκάρσια εσωτερική κατακόρυφη δύναμη που είναι ίση με τη δρώσα τέμνουσα. Αντίστοιχα, το ολοκλήρωμα της διαμήκου ροής των διατμητικών τάσεων ισοδυναμεί με τη διαμήκη διατμητική δύναμη στη διεπιφάνεια χαλυβδόφυλλου-σκυροδέματος, η οποία απαιτείται για την εξασφάλιση του συμβιβαστού των παραμορφώσεων μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα. Η σύμμικτη δράση του φέροντος δομικού στοιχείου από χάλυβα και σκυρόδεμα είναι εφικτή μόνο όταν η αναπτυσσόμενη διαμήκης διατμητική δύναμη δεν υπερβαίνει την κρίσιμη οριακή τιμή πέραν της οποίας χάνεται η σύμμικτη λειτουργία σκυροδέματος-χαλυβδόφυλλου (Daniels et al. 1993). Στις σύμμικτες πλάκες που εξετάστηκαν, η μεταφορά της διαμήκου

διάτμησης επιτυγχάνεται μέσω εντυπωμάτων συγκεκριμένης γεωμετρίας που υπάρχουν στην επιφάνεια του χαλυβδόφυλλου.

Ο προσδιορισμός της διαμήκουσ διατμητικής αντοχής επιτυγχάνεται με κατάλληλη πειραματική διαδικασία που περιγράφεται στον Ευρωκώδικα 4 (EC4). Στην παρούσα εργασία περιγράφεται διεξοδικά η εφαρμογή της πειραματικής διαδικασίας που εφαρμόστηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

3. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΜΗΚΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΧΩΡΙΣ ΑΚΡΑΙΑ ΑΓΚΥΡΩΣΗ

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 4 , η αντοχή σε διαμήκη διάτμηση χωρίς ακραία αγκύρωση, $V_{l,Rd}$, υπολογίζεται από τη σχέση

$$V_{l,Rd} = \frac{bd_p}{\gamma_{vs}} \left[\left(\frac{A_p}{bL_s} \right) m + k \right], \quad (1)$$

όπου,

b = πλάτος σύμμικτης πλάκας,

d_p = απόσταση της πάνω παρειάς της πλάκας από το κέντρο βάρους της ενεργού διατομής του χαλυβδόφυλλου,

γ_{vs} = 1.25 (συντελεστής ασφαλείας),

A_p = εμβαδόν της διατομής του χαλυβδόφυλλου,

L_s = διατμητικό μήκος της πλάκας,

m, k = συντελεστές που προσδιορίζονται πειραματικά σύμφωνα με τον EC4.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Τα δοκίμια των σύμμικτων πλακών σκυροδέματος που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έχουν πλάτος 83 mm , πάχος 20 mm και μήκος 2.00, 2.40, 3.20 και 4.00 m (αντίστοιχα ανοίγματα $L = 1.92, 2.32, 3.12$ και 3.92 m). Τα πειράματα εκτελέστηκαν σε αμφιέριστες πλάκες ανοίγματος, L , που φορτίστηκαν σε κάμψη 4-σημείων με διατμητικό μήκος $L_s = L/4$ (βλ. Εικόνα 1). Στις διατομές επιβολής του φορτίου τοποθετήθηκαν κατά τη φάση της σκυροδέτησης των δοκιμίων των σύμμικτων πλακών λεπτά κατακόρυφα μεταλλικά ελάσματα προρηγμάτωσης ύψους 100 mm που καλύπτουν όλο το πλάτος των 83 mm της διατομής της πλάκας και μέχρι 25 mm πάνω από την υψηλότερη παρειά του χαλυβδόφυλλου. Τα ελάσματα προρηγμάτωσης διευκολύνουν τη διάνοιξη ρωγμής στις προκαθορισμένες θέσεις αφού έχουν ως αποτέλεσμα πρακτικά τον μηδενισμό της εφελκυστικής συνεισφοράς του σκυροδέματος στα σημεία αυτά. Το φορτίο εφαρμόζεται μονοτονικά αυξανόμενο μέχρι την απώλεια της φέρουσας ικανότητας («αστοχία») της πλάκας.



Εικόνα 1. Πειραματική διάταξη κάμψης 4-σημείων σε σύμμικτη αμφιέριστη πλάκα μήκους 2.40 m.

Κατά τη σκυροδέτηση ελήφθησαν δοκιμια σκυροδέματος για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Οι δοκιμές σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων σκυροδέματος έγιναν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος. Το πάχος του χαλυβδόφυλλου που χρησιμοποιήθηκε είναι 0.75 mm και η μέση τάση διαρροής του σε εφελκυσμό είναι 366 MPa.

Η επιβολή του φορτίου στις πειραματικές δοκιμές των σύμμικτων πλακών σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια μεταλλικού πλαισίου αντίδρασης 3 m (πλάτος) x 3 m (μήκος) x 4 m (ύψος) σερβοϋδραυλικού συστήματος MTS με ενεργοποιητή φορτίου ± 250 kN, υδραυλική αντλία ισχύος 40 lpm και αυτόματο σύστημα καταγραφής μετρήσεων National Instruments. Για τη μέτρηση των αξονικών εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων σε επιλεγμένα σημεία του χαλυβδόφυλλου, τοποθετήθηκαν σε δοκίμια των σύμμικτων πλακών ηλεκτρομηκυνσιόμετρα τα οποία συνδέθηκαν με το σύστημα καταγραφής. Επίσης, στα δοκίμια των πλακών τοποθετήθηκαν συνολικά έξι (6) μηκυνσιόμετρα τύπου DCDT για τον προσδιορισμό του βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος και της σχετικής ολίσθησης μεταξύ χαλυβδόφυλλου και σκυροδέματος. Για τη μέτρηση του μέγιστου βέλους κάμψης τοποθετήθηκαν δύο (2) μηκυνσιόμετρα (E, F) στο μέσον του ανοίγματος και για τη σχετική ολίσθηση δύο (2) μηκυνσιόμετρα (A, B και C, D) στο κάθε άκρο της πλάκας (βλ. Σχήμα 1) με ειδικό σύστημα στήριξης (βλ. Εικόνα 2).



Σχήμα 1. Θέσεις μηκυνσιόμετρων στο δοκίμιο της πλάκας.



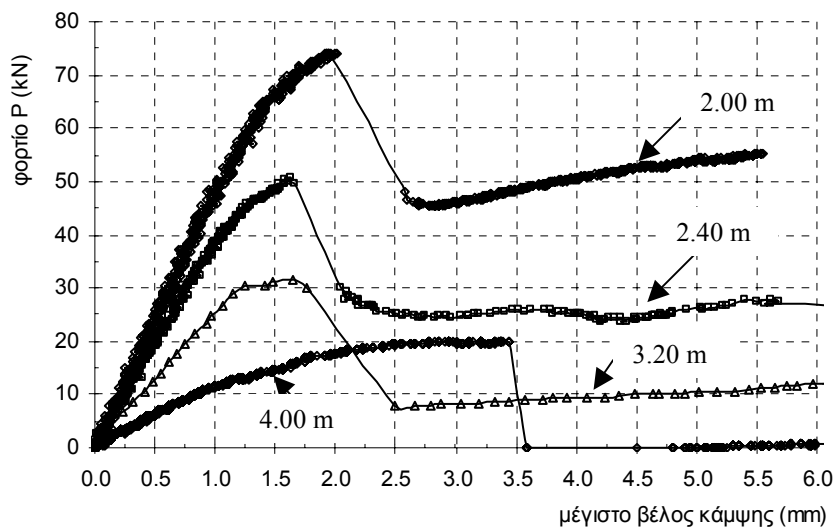
Εικόνα 2. Διάταξη μηχανομητρώων (A, B, C, D) προσδιορισμού οριζόντιας ολίσθησης στη πλάκα στις στηρίξεις της πλάκας.

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα γεωμετρικά στοιχεία των δοκιμών και τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Από την εκτέλεση των πειραμάτων στα δοκίμια των σύμμικτων πλακών προσδιορίστηκε η συνολική συμπεριφορά τους σε κάμψη και το διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης στο μέσον του ανοίγματος. Τα δοκίμια των σύμμικτων πλακών σκυροδέματος που υποβλήθηκαν σε κάμψη 4-σημείων εμφάνισαν παρόμοια μορφή αστοχίας, δηλαδή αστοχία που προήλθε από υπέρβαση του οριακού φορτίου πέραν του οποίου διακόπτεται η σύμμικτη λειτουργία του δομικού στοιχείου και έχουμε κατά μήκος ολίσθηση μεταξύ χαλυβδόφυλλου και σκυροδέματος. Τα δοκίμια εμφάνισαν έντονη ψαθυρή συμπεριφορά καθώς με την αστοχία της πλάκας σε ολίσθηση που παρατηρήθηκε στα πειράματα επέρχεται σημαντική πτώση της φέρουσας ικανότητας του δομικού στοιχείου. Τα διαγράμματα φορτίου σε συνάρτηση με το μέγιστο βέλος κάμψης για τα πειραματικά αποτελέσματα των τεσσάρων δοκιμών πλακών που περιλαμβάνονται στη παρούσα εργασία παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.

Πίνακας 1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών σύμμικτων πλακών.

Δοκίμιο πλάκας	Άνοιγμα α, L (mm)	Διαμητικό μήκος, L _s (mm)	Πλάτος, b (mm)	Στατικό ύψος, d _p (mm)	Εμβαδόν χαλυβδόφυλλου, A _p (cm ²)	A _p /(bL _s)
SLAB_2.00	2000	480	830	157,25	9,57	0,00240
SLAB_2.40	2400	580	830	157,25	9,57	0,00199
SLAB_3.20	3200	780	830	157,25	9,57	0,00148
SLAB 4.00	4000	980	830	157,25	9,57	0,00118



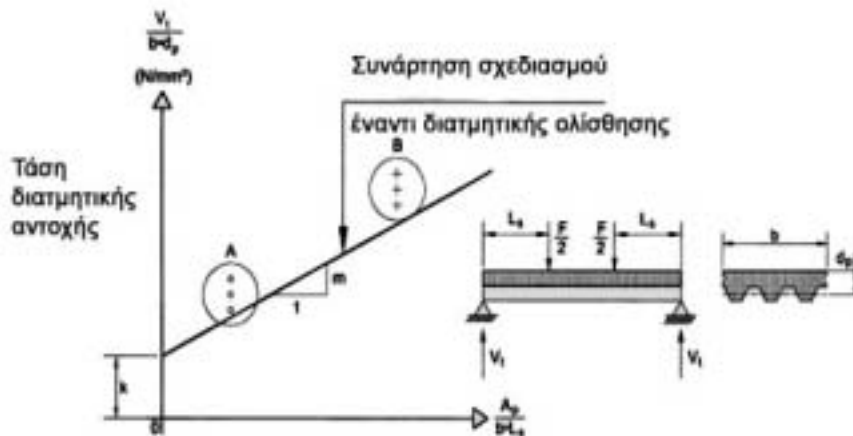
Σχήμα 2. Διάγραμμα συνολικού επιβαλλόμενου φορτίου σε συνάρτηση με το βέλος κάμψης στο μέσον του ανοίγματος της πλάκας για όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν.

6. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ m, k

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα και τα χαρακτηριστικά της διατομής της σύμμικτης πλάκας προσδιορίστηκε το διάγραμμα διατμητικής αντοχής σε ολίσθηση συναρτήσει της ανηγμένης παραμέτρου του οπλισμού που αντιστοιχεί στη διατομή του χαλυβδόφυλλου, με βάση το οποίο προσδιορίζονται οι συντελεστές m, k (βλ. Σχήμα 3). Η διατμητική αντοχή σε κατά μήκος ολίσθηση ορίζεται ως V_t/bd_p , όπου V_t είναι η αντίδραση (τέμνουσα) στη στήριξη για το μέγιστο φορτίο που πραγματοποιείται η ολίσθηση συμπεριλαμβανομένου του ίδιου βάρους της πλάκας και των εξαρτημάτων/δοκών πάνω στη πλάκα που είναι μέρος της πειραματικής διάταξης, b το πλάτος της πλάκας και d_p η απόσταση του κέντρου βάρους της ενεργούς διατομής του χαλυβδόφυλλου από την πάνω ίνα της πλάκας σκυροδέματος. Ως ανηγμένη παράμετρος του οπλισμού (χαλυβδόφυλλο) χρησιμοποιείται ο λόγος A_p/bL_s , όπου A_p είναι το εμβαδόν της ενεργούς διατομής του χαλυβδόφυλλου στην ανάληψη εφελκυσμού και L_s το διατμητικό μήκος για κάθε δοκίμιο πλάκας κατά μήκος του οποίου πραγματοποιείται η ολίσθηση μεταξύ χαλυβδόφυλλου και σκυροδέματος. Από τα σημεία που αντιστοιχούν στη πειραματικά προσδιορισθείσα κρίσιμη τάση διατμητικής αντοχής σε ολίσθηση εφαρμόζοντας γραμμική παρεμβολή προσδιορίζουμε την ευθεία της μορφής $y = mx + k$ για τον προσδιορισμό των συντελεστών m, k . Τα πειραματικά αποτελέσματα καθώςον αφορά στη τάση διατμητικής αντοχής σε κατά μήκος ολίσθηση του χαλυβδόφυλλου, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2

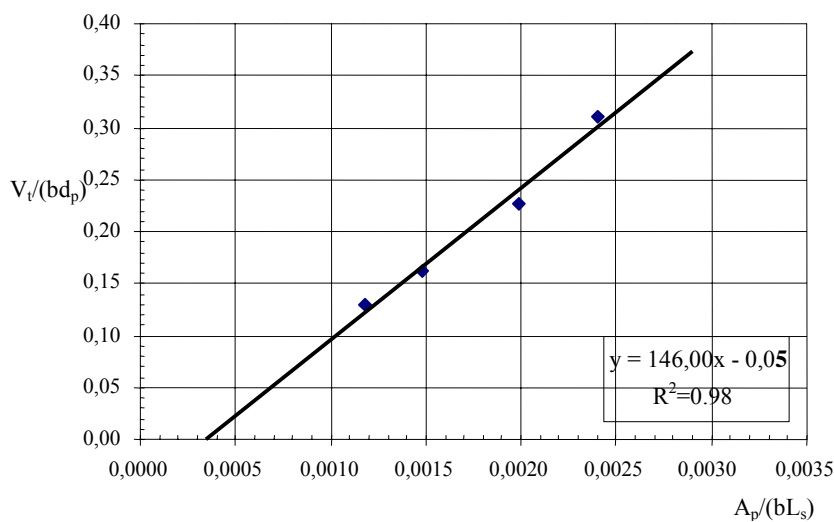
Πίνακας 2. Πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών σύμμικτων πλακών.

Δοκίμιο πλάκας	Φορτίο αστοχίας, $P=2V_p$ (kN)	Ίδιο βάρος πλάκας, G (kN/m)	Τέμνουσα ιδίου βάρους, V_G (kN)	Τέμνουσα λόγω εξαρτημάτων διάταξης, V_Q (kN)	Συνολική τέμνουσα, V (kN)	Τάση διατμητικής αντοχής, $V_t/(bd_p)$, (MPa)
SLAB_2.00	74,10	3,2785	3,2785	0,25	40,58	0,31090
SLAB_2.40	50,56	3,2785	3,9342	0,25	29,46	0,22575
SLAB_3.20	31,52	3,2785	5,2456	0,25	21,26	0,16286
SLAB_4.00	20,00	3,2785	6,5570	0,25	16,81	0,12877



Σχήμα 3. Διάγραμμα V_t/bd_p σε συνάρτηση με A_p/bL_s για τη μέθοδο m-k.

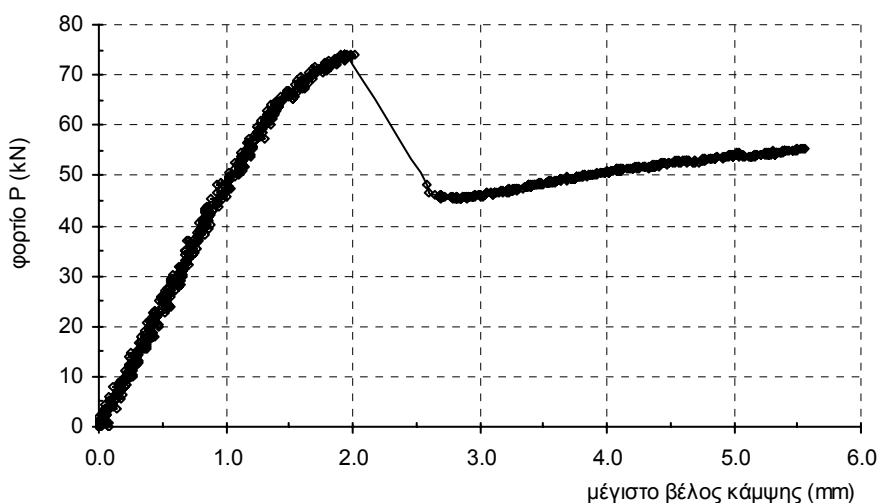
Για τα μήκη των σύμμικτων πλακών που εξετάζονται στην παρούσα εργασία η εξίσωση είναι της μορφής $y = 146.00x - 0.05$ (Σχ. 4) και οι συντελεστές m , k (βλ. εξίσωση 1) με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα είναι $m=146$ MPa και $k = -0.05$ MPa. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι συντελεστές m , k έχουν μονάδες τάσης.



Σχήμα 4. Διάγραμμα μεθόδου m-k με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα.

7. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΠΛΑΚΑΣ ΜΗΚΟΥΣ 2.00 m

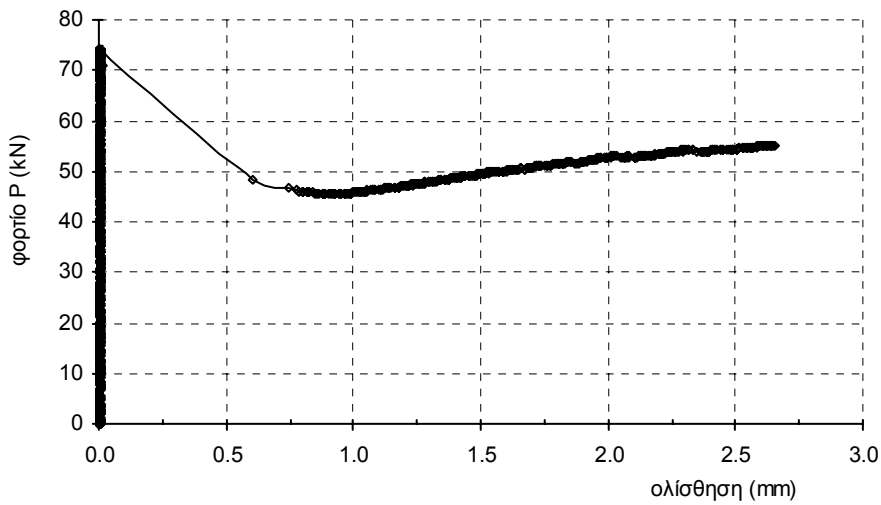
Προκειμένου να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός αστοχίας και η συμπεριφορά του δοκιμίου κατά την επιβολή του φορτίου εξετάζεται πιο λεπτομερώς η περίπτωση του δοκιμίου της σύμμικτης πλάκας μήκους 2.00 m. Το φορτίο υπεβλήθη με σταθερό ρυθμό φόρτισης ελέγχοντας την μετακίνηση του κατακόρυφου εμβόλου μέσω του ψηφιακού ελεγκτή του σερβοϋδραυλικού συστήματος. Η αστοχία του δοκιμίου, η οποία προήλθε από την ολίσθηση του χαλυβδόφυλλου σε σχέση με το σκυρόδεμα, πραγματοποιήθηκε σε φορτίο 74.10 kN. Κατά την αστοχία, λόγω υπέρβασης της διατμητικής αντοχής σε κατά μήκος ολίσθηση, σημειώθηκε μείωση του επιβαλλόμενου φορτίου κατά περίπου 20 kN (Σχ. 5). Οι ρωγμές δημιουργήθηκαν, όπως ήταν αναμενόμενο, στις θέσεις που είχαν τοποθετηθεί τα ελάσματα προρηγμάτωσης.



Σχήμα 5. Διάγραμμα συνολικού επιβαλλόμενου φορτίου σε συνάρτηση με το βέλος κάμψης στο μέσον του ανοίγματος της σύμμικτης πλάκας μήκους 2.00 m.

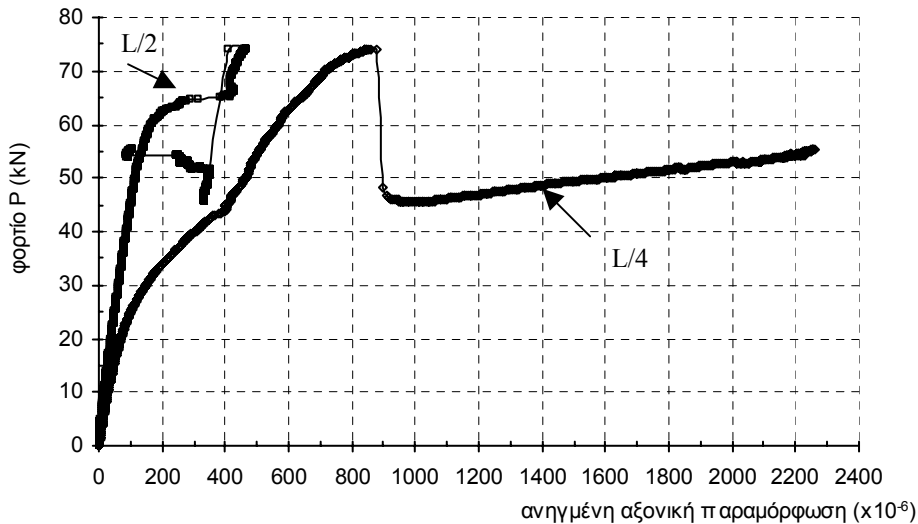
Η συμπεριφορά του δοκιμίου της πλάκας σε κάμψη είναι μη-γραμμική προφανώς λόγω της αρχικής ρηγμάτωσης του σκυροδέματος στα σημεία επιβολής του φορτίου και την εν συνεχεία προώθηση του μετώπου της ρωγμής προς το πάνω μέρος της πλάκας, αρκετά χαμηλότερα από το μέγιστο φορτίο οπότε και πραγματοποιείται η κατά μήκος ολίσθηση και η απότομη μείωση της φέρουσας ικανότητάς της (βλέπε Σχ. 5).

Στο διάγραμμα επιβαλλόμενου φορτίου-σχετικής ολίσθησης γίνεται αντιληπτό ότι η ολίσθηση πραγματοποιείται στο μέγιστο φορτίο οπότε έχουμε και τελική αστοχία του δοκιμίου (βλ. Σχ. 6). Μέχρι τη μέγιστη τιμή του φορτίου δεν παρατηρήθηκε σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια των δύο υλικών.



Σχήμα 6. Διάγραμμα συνολικού επιβαλλόμενου φορτίου σε συνάρτηση με τη σχετική ολίσθηση στη δεξιά πλευρά του δοκιμίου της σύμμικτης πλάκας.

Στο δοκίμιο μήκους 2.00 m για να μετρήσουμε την ανηγμένη αξονική εφελκυστική παραμόρφωση στο χαλυβδόφυλλο τοποθετήσαμε τρία (3) ηλεκτρομηκυσσιόμετρα, εκ των οποίων τα δύο (2) τοποθετήθηκαν στις θέσεις $L_s = L/4$ και ένα (1) στο μέσον του ανοίγματος της πλάκας. Ο σκοπός της τοποθέτησης των ηλεκτρομηκυσσιόμετρων ήταν ο υπολογισμός των τάσεων στο χαλυβδόφυλλο στα σημεία επιβολής του φορτίου, όπου τοποθετήθηκαν τα μεταλλικά ελάσματα προρηγμάτωσης και αναμένεται η αρχική ρηγμάτωση στο σκυρόδεμα και στο μέσον του ανοίγματος όπου αναμένεται συμπεριφορά περισσότερο κοντά σ' αυτήν της σύμμικτης αρηγμάτωτης διατομής.



Σχήμα 5. Διάγραμμα συνολικού επιβαλλόμενου φορτίου σε συνάρτηση με την ανηγμένη αξονική εφελκυστική παραμόρφωση στις θέσεις $L/4$ και $L/2$ του δοκιμίου.

Με βάση τις μετρήσεις των ανηγμένων εφελκυστικών παραμορφώσεων στο χαλυβδόφυλλο, τη στιγμή της ολίσθησης η παραμόρφωση στο χαλυβδόφυλλο είναι περίπου 460 με, ενώ στο μέσον του ανοίγματος σχεδόν διπλάσια (850 με), που σημαίνει ότι η τάση στο χαλυβδόφυλλο είναι περίπου 92 MPa και 170 MPa, αντίστοιχα.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο Σχήμα 2 που είναι δυνατή η σύγκριση της συμπεριφοράς των δοκιμών σύμμικτων πλακών που δοκιμάστηκαν στο εργαστήριο, είναι εμφανές ότι τα δοκίμια εμφανίζουν γενικά παρόμοια ψαθυρή συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, στη μέγιστη τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου, για το οποίο χάνεται η σύμμικτη λειτουργία της πλάκας, αρχίζει η κατά μήκος ολίσθηση του χαλυβδόφυλλου σε σχέση με τη πλάκα σκυροδέματος και η φέρουσα ικανότητα της πλάκας εμφανίζει παρόμοια απότομη μείωση περίπου ίση με 20 kN. Ο τρόπος αστοχίας που παρατηρήθηκε στα πειράματα ορίζεται από τον Ευρωκώδικα 4 ως ψαθυρός αφού το φορτίο αστοχίας δεν υπερβαίνει κατά 10% το φορτίο για το οποίο παρατηρείται η ολίσθηση και το μέγιστο βέλος κάμψης είναι μικρότερο της προκαθορισμένης τιμής του $L/50$. Με βάση, τις τιμές των συντελεστών m και k που προσδιορίστηκαν από την τάση διατμητικής αντοχής και την τάση του χαλυβδόφυλλου τη στιγμή της ολίσθησης (μέγιστο φορτίο) στα σημεία επιβολής του φορτίου ($L/4$) και στο μέσον του ανοίγματος ($L/2$) που υπολογίστηκε από τις μετρήσεις των ανηγμένων αξονικών παραμορφώσεων στο χαλυβδόφυλλο, συμπεραίνουμε ότι η τιμή του συντελεστή m φαίνεται να αντιστοιχεί στην εφελκυστική τάση του χαλυβδόφυλλου κάπου μεταξύ του σημείου επιβολής των φορτίων και του μέσου του ανοίγματος της πλάκας.

9. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

BRITISH STANDARD BS 5950-4:1994, "Structural Use of Steelwork in Building, Part 4: Code of Practice for Design of Composite Slabs with Profiled Sheeting.

Daniels BJ, Crisinel M. 1993 "Composite Slab Behavior and Strength Analysis, Part I and II: Comparisons with Test Results and Parametric Analysis", J. Struct. Eng., ASCE, 119(1), 36-49.

EUROPEAN STANDARD EC4 (prEN 1994-1-1), Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1: General rules and rules for buildings.