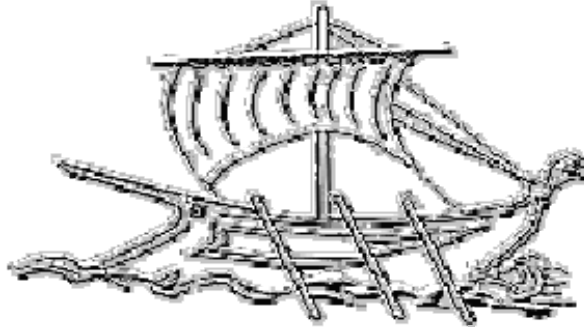


ΑΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ Β΄
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ



ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ
ΡΟΠΗΣ ΚΑΜΨΗΣ & ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ
ΣΥΔΕΧΟΥΣ ΔΟΚΟΥ Ο/Σ ΜΕ Ή ΧΩΡΙΣ
ΧΡΗΣΗ FRPs

Πτυχιακή εργασία

του

Ξουρή Αθανάσιου - Χρυσοβαλάντη

Επιβλέπον καθηγητής
Δημάκος Κωνσταντίνος

Ευχαριστίες

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είναι αποτέλεσμα μιας πολύμηνης προσπάθειας που έλαβε χώρο στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος, στον κλάδο των Δομικών Έργων, του ΑΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ. Εμπεριέχει τόσο θεωρητικό όσο και πειραματικό μέρος, για τα οποία διενεργήθηκε εκτενές πρόγραμμα μελέτης συμπεριφοράς δοκών σε ενισχυμένη ή μη ενισχυμένη κατάσταση.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθούν και να δοθούν ιδιαίτερες ευχαριστίες στις εταιρείες Lafarge και Sika, για την ουσιαστική βοήθεια τους στην διεκπεραίωση του πειραματικού μέρους της εργασίας, καθώς η ανιδιοτελής χορήγηση νωπού συμπυκνωμένου σκυροδέματος και σύνθετων υλικών, αντίστοιχα, συνέβαλε σε ένα πολύ σημαντικό βαθμό στην ολοκλήρωση της μελέτης.

Επίσης, αξίζει να δοθούν ευχαριστίες στους εργαστηριακούς συνεργάτες, Δρίβα Δημήτρη, Δημητράκη Γιώργο και Μπαλακίτσα Γιώργο, καθώς και στους εργαστηριακούς βοηθούς, Τσότρα Κώστα, Νικολάου Αλέξη, Παγώνα Βασίλη και Ρώσση Άννα για την αμέριστη βοήθεια τους στο κάθε βήμα προς την ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος, οι πιο θερμές ευχαριστίες πρέπει να αποδοθούν στον καθηγητή, κ. Κωνσταντίνο Δημάκο, ο οποίος είναι ο εμπνευστής του θέματος και ο επιβλέπων των εργασιών καθ' όλη την πορεία της παρούσας πτυχιακής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

I. ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
II. ΓΕΝΙΚΑ	4
III. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	
i. Γενικά	5 - 6
ii. Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα σύνθετων υλικών	6 - 7
iii. Κανόνες εφαρμογής Σύνθετων Υλικών	7 - 8
iv. Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο πειραματικό μέρος	9 - 17
v. Πολυμερή υγρής και ξηρής εφαρμογής	17 - 18
IV. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	
1. Γενικά	18 - 21
2. Virgin Δοκοί	21 - 34
i. Διάταξη πειράματος	21
ii. Κατανομή φορτίων – Τελικό σκαρίφημα δοκών	22
iii. Επίλυση συνεχούς δοκού με τη μέθοδο CLAPEYRON	23 - 24
iv. Αντιδράσεις στηρίξεων	25 - 26
v. Εντατικά μεγέθη στη διατομή	26
vi. Διαγράμματα εντατικών μεγεθών	27
vii. Αναμενόμενος μηχανισμός κατάρρευσης	28
viii. Υπολογισμός Οριακής Ροπής Διατομής	29 - 31
ix. Διαστασιολόγηση έναντι τέμνουσας	32 - 34
3. Ενισχυμένοι Δοκοί	35 - 45
i. Γενικά	35
ii. Σκαρίφημα Ενισχυμένων Δοκών	36
iii. Μηχανισμοί πλήρους συνεργασίας	37 - 43
a. Διαρροή εφελκυόμενου χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος	37 - 39
b. Διαρροή εφελκυόμενου χάλυβα, θραύση σύνθετων υλικών	39 - 42
c. Σύνθλιψη σκυροδέματος	43
iv. Ενίσχυση σε διάτμηση	43 - 45
V. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	39 - 66
1. Γενικά	46
2. Διαδικασία, Μετρήσεις – Αποτελέσματα	39 - 66
i. Virgin Δοκοί	46 - 56
ii. Ενισχυμένοι Δοκοί	57 - 65
iii. Αποτελέσματα	66 - 67
VI. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	68

I. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως **θέμα** τον θεωρητικό υπολογισμό της μέγιστης ροπής κάμψης και τέμνουσας συνεχούς δοκού οπλισμένου σκυροδέματος με ή χωρίς χρήση συνθέτων υλικών, πιο συγκεκριμένα ινοπλισμένων πολυμερών (Fibre Reinforced Polymers – FRPs).

Παράλληλα με την παρούσα εργασία στο ίδιο εργαστήριο λάμβανε χώρα και μια δεύτερη, η οποία είχε ως θέμα τον πειραματικό υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών με χρήση FRPs. Οπότε, με συνδυασμό των δυο, θα παρατεθεί πλήρης θεωρητική και πειραματική διερεύνηση.

Έτσι, **σκοπός** της εργασίας είναι η θεωρητική και πειραματική διερεύνηση της αποτελεσματικότητας που παρέχει αυτή η νέα τεχνική ενίσχυσης, που έχει ως βάση το συνένωση σύνθετων υλικών με στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος.

Τα **ζητούμενα αποτελέσματα** της εργασίας είναι:

1. Εύρεση της $maxM$ (μέγιστης ροπής κάμψης) σε ελαφρά οπλισμένη συνεχή δοκό Ο/Σ δύο ανοιγμάτων
2. Εύρεση της $maxQ$ (μέγιστο διατμητικό φορτίο) σε ελαφρά οπλισμένη συνεχή δοκό δύο ανοιγμάτων
3. Εύρεση των ανωτέρω μεγεθών στην ίδια συνεχή δοκό με ενίσχυση αυτής με χρήση FRPs

Για τη μελέτη της συγκεκριμένης τεχνικής διενεργήθηκε εκτενές θεωρητικό και πειραματικό πρόγραμμα στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος.

Στα πλαίσια του παραπάνω προγράμματος κατασκευάστηκαν έξι δοκοί ορθογωνικής διατομής, δύο εκ των οποίων ενισχύθηκαν με ινοπλισμένα πολυμερή και άλλες τέσσερις, οι οποίες μελετήθηκαν ως virgin beam (=παρθένα δοκός). Τα έξι δοκάρια οπλίσθηκαν με έξι κλωβούς ίδια διάταξης και σκυροδετήθηκαν όλα μαζί την ίδια ημέρα με υλικό μιας σκυροδέτησης. Έτσι, έχουμε σαν αποτέλεσμα έξι πανομοιότυπα δοκάρια ίδιας σύστασης και ίδιου οπλισμού. Ακόμα, από την ίδια σκυροδέτηση λήφθηκαν δοκίμια (κύβοι ακμής 15 εκ. και κύλινδροι βάσης 15 και ύψους 30 εκ.) από τα οποία θα υπολογισθεί η ακριβής αντοχή του σκυροδέματος.

Έπειτα από ένα απαραίτητο διάστημα ωρίμανσης του σκυροδέματος οι έξι δοκοί υποβλήθηκαν σε κάμψη αυξανόμενου φορτίου. Μετρήσεις και αποτελέσματα ακολουθούν στην συνέχεια της εργασίας.

II. ΓΕΝΙΚΑ

Ο βασικός στόχος κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό μιας κατασκευής, είναι η δημιουργία ενός φορέα που να εξασφαλίζει τόσο μεγάλη αντοχή όσο και μεγάλη πλαστιμότητα κατά τη σεισμική δράση. Ως **πλαστιμότητα** ορίζεται η ικανότητα ενός φορέα να παραμορφώνεται πέρα από το όριο διαρροής χωρίς να παρουσιάζεται σημαντική μείωση στην αντοχή και στη δυσκαμψία του (Pauley & Priestley 1996). Ωστόσο, η ανάπτυξη αντισεισμικών κανονισμών πάνω στη φιλοσοφία αυτή άρχισε να γίνεται στην Ελλάδα μετά από τα μέσα της δεκαετίας του 1980. Ως εκ τούτου, πολλές κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, πριν από το 1985, έχουν σχεδιαστεί λαμβάνοντας υπ' όψιν κυρίως τα κατακόρυφα φορτία και τις φορτίσεις λόγω ανέμου με ελλειπή ή μηδαμινή εφαρμογή αντισεισμικού κανονισμού.

Σαν αποτέλεσμα οι κατασκευές λειτουργούσαν χωρίς να εξασφαλίζεται η πλαστική συμπεριφορά του φορέα κατά τη σεισμική δράση, ενώ οποιαδήποτε αστοχία μπορεί να είναι ψαθυρή και να οδηγήσει σε κατάρρευση. Η αναβάθμιση ή ενίσχυση των φερόντων στοιχείων των υφιστάμενων κατασκευών αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα για την επιστήμη του Πολιτικού Μηχανικού. Στην παρούσα εργασία τα φέροντα στοιχεία της κατασκευής που εξετάζονται για ενίσχυση είναι οι δοκοί.

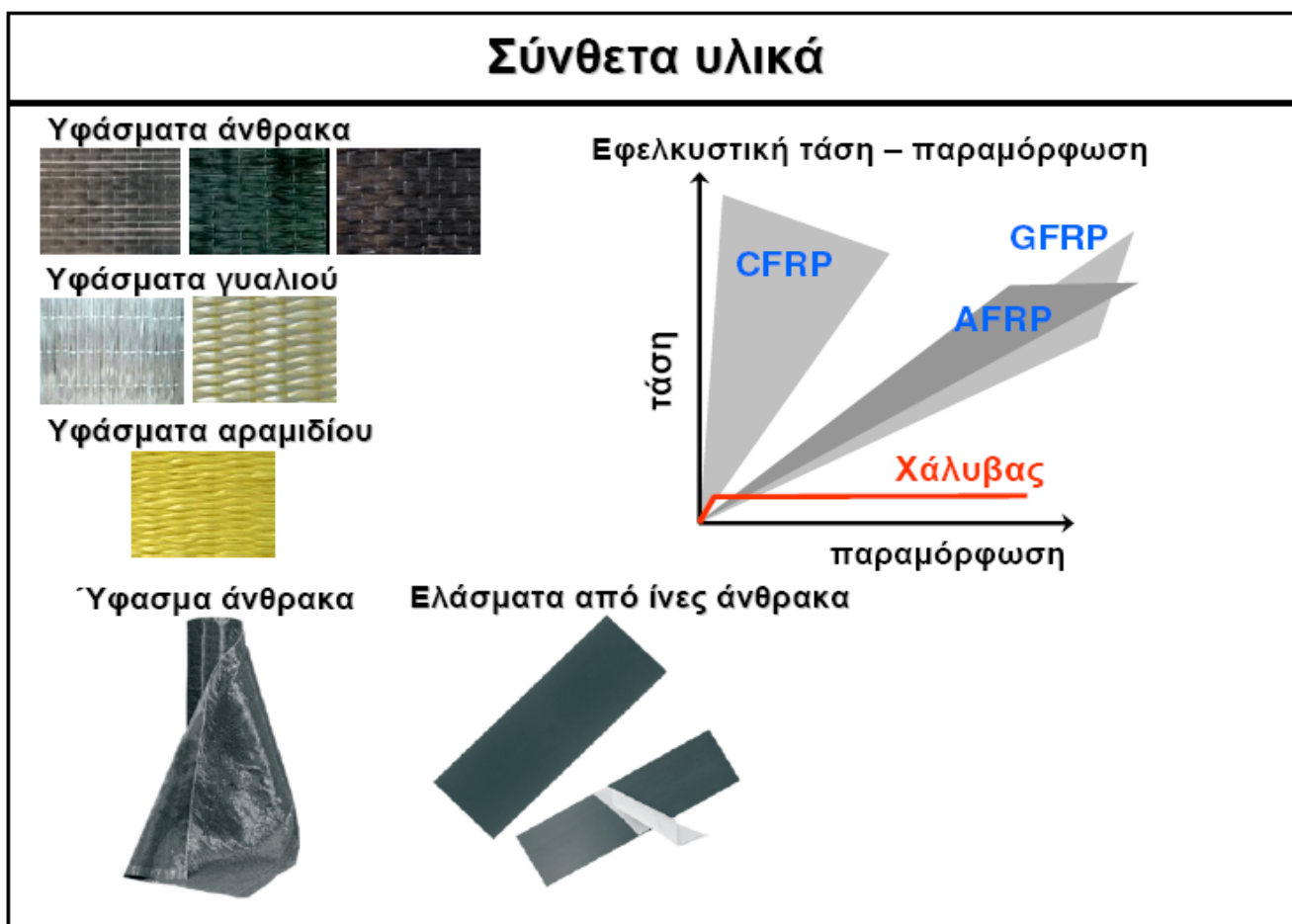
Ο πιο διαδεδομένος τρόπος αναβάθμισης δοκών είναι η ενίσχυση με χρήση μεταλλικών ελασμάτων. Σε αυτήν την περίπτωση η αύξηση επιτυγχάνεται με προσκόλληση των ελασμάτων στις καταπονούμενες περιοχές των δοκών. Ωστόσο, το τελευταίο επίτευγμα της επιστήμης στο πεδίο της αναβάθμισης των ανεπαρκών κατασκευών είναι οι ενισχύσεις με χρήση συνθέτων υλικών. Η τεχνική ενίσχυσης με σύνθετα υλικά χωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά τις ενισχύσεις μέσω περίσφιγξης, είτε με μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών ή FRP (Fiber Reinforced Polymers), είτε με μανδύες ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα ή TRM (Textile Reinforced Mortar).

III. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

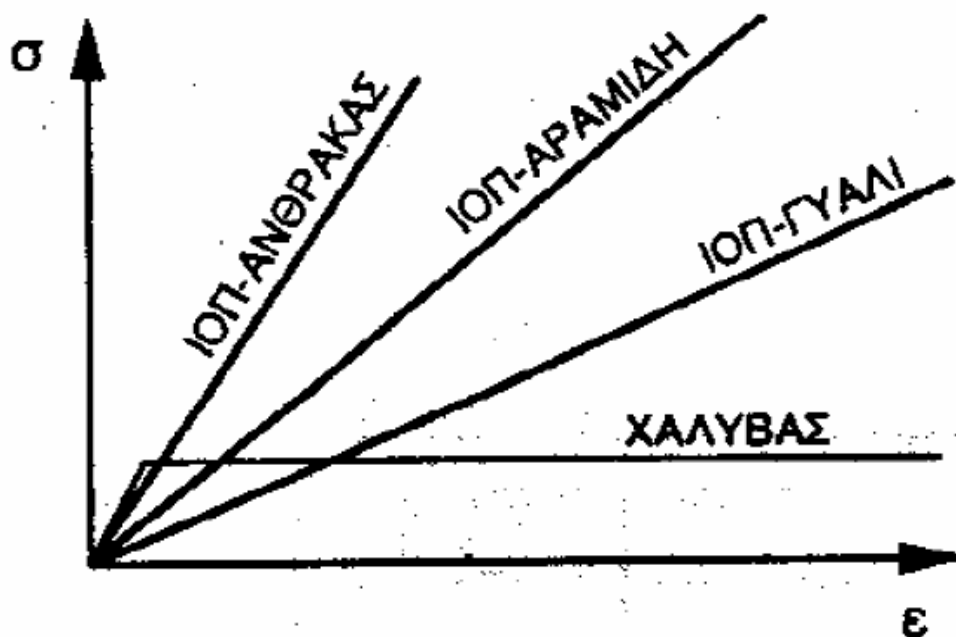
i. Γενικά

Η εφαρμογή των συνθέτων υλικών, στο πεδίο των τεχνικών έργων και ειδικότερα στο πεδίο των ενισχύσεων/επισκευών, έχει αναπτυχθεί παγκοσμίως την τελευταία εικοσαετία. Η τεχνική της ενίσχυσης δομικών στοιχείων με σύνθετα υλικά παρουσιάζει μεγάλες προοπτικές με αποτέλεσμα την έξαρση των εφαρμογών τόσο σε πραγματικές κατασκευές όσο και σε ερευνητικό επίπεδο.

Τα σύνθετα υλικά αρχικά χρησιμοποιήθηκαν ευρέως και αποκλειστικά σε τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η ναυσιπλοΐα, η αεροναυπηγική, η αεροδιαστημική, τα είδη ηλεκτρονικών συσκευών και τα αθλητικά είδη. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει αλλάξει η εικόνα αυτή καθώς ένα μεγάλο ποσοστό της παγκόσμιας παραγωγής, που αγγίζει το 25%, κατά το έτος 2002, απορροφάται στο πεδίο των τεχνικών έργων.



Η μέθοδος ενίσχυσης με σύνθετα υλικά (ινοπλισμένα πολυμεροί – FRPs) στηρίζεται στην χρήση ινών κυρίως άνθρακα και γυαλιού και σπανιότερα αραμιδίου, σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη ή κάποιο είδος ρητινούχου κονιάματος. Διατίθενται σε μορφή σχετικά δύσκαμπτων “λωρίδων” (πάχους της τάξης του 1 mm) ή εύκαμπτων “υφασμάτων” (πάχους της τάξης 0.1 – 0.4 mm) με ίνες σε μια (κατά κανόνα) ή περισσότερες διευθύνσεις. Βασικά χαρακτηριστικά τους είναι η εξαιρετικά μεγάλη εφελκυστική αντοχή (σε συνδυασμό με μέτρο ελαστικότητας E_f που μπορεί να είναι από 30 – 600 GPa, ανάλογα με τις απαιτήσεις της μελέτης), το χαμηλότερο βάρος (περίπου το 1/4 του χάλυβα) και η ανθεκτικότητα σε διάρκεια (εξαιρετική για υλικά από ίνες άνθρακα και μέτρια – καλή για υλικά με ίνες γυαλιού, οι οποίες προσβάλλονται από το αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος – αν τυχόν είναι σε άμεση επαφή – αλλά και από ορισμένα οξείδια).



Σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης για σύνθετα υλικά σε εφελκυσμό

ii. Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά τυγχάνουν ευρείας χρήσης λόγω των πολύ ελκυστικών ιδιοτήτων τους. Τα κυριότερα **πλεονεκτήματα** των συνθέτων υλικών είναι η ανθεκτικότητα σε διάβρωση και η εξαιρετικά υψηλή

εφελκυστική αντοχή τους (πολλαπλάσια του κοινού χάλυβα) που συνδυάζεται με το χαμηλό τους βάρος. Συν τοις άλλοις η εκτεταμένη βιομηχανική παραγωγή των συνθέτων υλικών εξασφαλίζει τη διαθεσιμότητά τους σε πολύ μεγάλα μήκη και σε εύκαμπτη μορφή. Έτσι διασφαλίζεται η διάρκεια της ενίσχυσης, η ευκολία και η ταχύτητα στην εφαρμογή της καθώς και η ανάπτυξη πλήρους αντοχής σε μικρό χρονικό διάστημα. Επίσης σημαντικό πλεονέκτημα της τεχνικής είναι η εφαρμογή της σε δυσπρόσιτα τμήματα των κατασκευών επιφέροντας σχετικά μικρή όχληση. Το πιο σημαντικό είναι ότι η εφαρμογή της μεθόδου είναι πολύ φιλική προς το περιβάλλον και τον χρήστη.

Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στην ενίσχυση δομικών στοιχείων έχουν πολύ μικρό πάχος με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αύξηση στην περίμετρο του ενισχυμένου στοιχείου και να μη δημιουργούνται αντιαισθητικές προσθήκες στη αρχιτεκτονική του κτηρίου, όπως συμβαίνει στην περίπτωση ενίσχυσης με μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος.

Ωστόσο η χρήση των συνθέτων υλικών στον τομέα των ενισχύσεων/επισκευών παρουσιάζει κάποια σημαντικά **μειονεκτήματα**. Το σημαντικότερο μειονέκτημά τους είναι η πτωχή συμπεριφορά τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Ένα ακόμη μειονέκτημα των συνθέτων υλικών συνίσταται στην έλλειψη πλαστιμότητας σε αντίθεση με το χάλυβα. Όμως το γεγονός ότι παρέχουν υψηλή παραμορφωσιμότητα μπορεί να συνεισφέρει στην αύξηση της πλαστιμότητας ενός δομικού στοιχείου σε πολλές περιπτώσεις. Τέλος, το υψηλό κόστος στην παραγωγή των συνθέτων υλικών θεωρείται ένας ανασταλτικός παράγοντας στη χρήση των συνθέτων υλικών, ο οποίος όμως μετριάζεται λόγω της ταχύτητας και της ευκολίας στην εφαρμογή τους.

iii. Κανόνες εφαρμογής σύνθετων υλικών

Οι κανόνες που διέπουν την εφαρμογή των σύνθετων υλικών συνοψίζονται παρακάτω :

- Απαιτείται επιμελημένη προετοιμασία της επιφάνειας όπου πρόκειται να γίνει επικόλληση των σύνθετων υλικών (αφαίρεση χαλαρών τμημάτων, πλήρωση ρωγμών, εξασφάλιση επιπέδου και “υγιούς” υποστρώματος). Στην περίπτωση επικόλλησης εύκαμπτων “υφασμάτων”, η εφαρμογή των υλικών θα πρέπει να γίνεται έτσι ώστε οι ίνες να έχουν τη μεγαλύτερη δυνατή τάνιση.
- Για την ανάλυση των πρόσθετων εντατικών μεγεθών (π.χ. ροπή κάμψης, τέμνουσα, αξονική δύναμη) τα σύνθετα υλικά δρουν ως

εφελκόμενος οπλισμός παραλαμβάνοντας δυνάμεις μόνο κατά τη διεύθυνση των ινών.

- Αν χρησιμοποιούνται εύκαμπτα υφάσματα (π.χ. ανθρακονήματα ή υαλοϋφάσματα) οι υπολογισμοί θα πρέπει να γίνονται βάση της ονομαστικής διατομής των υφασμάτων και όχι του “τελειωμένου” σύνθετου υλικού, λόγω της σχετικής αβεβαιότητας ως προς τον βαθμό εμποτισμού της ρητίνης (η οποία εφαρμόζεται επί τόπου).
- Στην οριακή κατάσταση φέρουσας ικανότητας ο οπλισμός ενίσχυσης (συνθέτων υλικών) δεν “διαρρέει”, όπως ο χάλυβας αλλά παραμορφώνεται ελαστικά, φθάνοντας σε μεγάλη παραμόρφωση (ανηγγμένη μήκυνση). Η παραμόρφωση αυτή εξαρτάται βασικά από την ικανότητα του υποστρώματος (σκυρόδεμα, τοιχοποιία) να μεταφέρει (μέσω διάτμησης) τις εφελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα σύνθετα υλικά, και είναι, κατά κανόνα, μικρότερη από τη μέγιστη παραμόρφωση (θραύσης) των συνθέτων υλικών, ϵ_{fu} .
- Η καλή αγκύρωση των οπλισμών ενίσχυσης (στα άκρα τους) είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εξασφάλιση της ικανότητας ανάληψης σημαντικών δυνάμεων από τα σύνθετα υλικά.
- Ο βαθμός ενίσχυσης (π.χ. για την περίπτωση ενίσχυσης στοιχείου σε κάμψη, ο λόγος της ροπής αντοχής μετά την ενίσχυση προς την αρχική) θα πρέπει να περιορίζεται έτσι ώστε, σε περίπτωση “αστοχίας” των οπλισμών ενίσχυσης (π.χ. πυρκαγιά), το στοιχείο να αναλαμβάνει ασφαλώς τουλάχιστον τα μόνιμα φορτία.

Είδος ρητίνης	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Επιμήκυνση θραύσης (%)	Πυκνότητα (gr/cm ³)
Εποξειδική	55-130	1.0-4.5	4.0-14.0 <5.0	1.20-1.30
Πολυεστερική	35 - 104	2.1-4.1	3.5-5.5	1.10-1.46
Βινυλεστερική	73-81	3.0-3.6		1.12-1.32

Πίνακας 1. Μηχανικές ιδιότητες ρητινών

iv. Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο πειραματικό μέρος

Υφασμα SikaWrap - 150 C/30

Το SikaWrap®-150 C/30 είναι ένα συρραμμένο ύφασμα άνθρακα μονής διευθύνσεως, χαμηλού βάρους, για ξηρή μέθοδο εφαρμογής.

Χρησιμοποιείται για ενίσχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, τοιχοποιίας και ξύλου για αύξηση της καμπτικής και διατμητικής φέρουσας ικανότητας.

Εφαρμογές

Ενίσχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, τοιχοποιίας και ξύλου για αύξηση της καμπτικής και διατμητικής φέρουσας ικανότητας.

Πιθανοί λόγοι χρήσης του υφάσματος:

- Βελτίωση της σεισμικής απόκρισης κατασκευών φέρουσας τοιχοποιίας
- Συμπλήρωση οπλισμού
- Αναβάθμιση της αντοχής και πλαστιμότητας των υποστυλωμάτων
- Αύξηση της φέρουσας ικανότητας δομικών στοιχείων
- Αλλαγή χρήσης κτιρίων
- Αποκατάσταση αρχικών σχεδιαστικών ή κατασκευαστικών ατελειών
- Προσεισμική ενίσχυση
- Βελτίωση για το σχεδιασμό στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας
- Δομητική αναβάθμιση για συμμόρφωση με τους εν ισχύ κανονισμούς

Χαρακτηριστικά / Πλεονεκτήματα

- Κατασκευασμένο με πλεγμένες ίνες ώστε να έχει σταθερότητα το ύφασμα (θερμική διαδικασία)
- Πολλαπλές εφαρμογές για κάθε απαίτηση δομητικής ενίσχυσης
- Ευκολία μορφοποίησης ακολουθώντας τη γεωμετρία του δομικού μέλους (δοκούς, υποστυλώματα, καπνοδόχους, στύλους, τοίχους, σιλό)
- Υφάσματα διαθέσιμα σε διάφορα πλάτη για μεγάλη ευκολία κατά την εφαρμογή
- Χαμηλής πυκνότητας για ελαχιστοποίηση επιπρόσθετου βάρους
- Οικονομική αντιμετώπιση συγκρινόμενο με παραδοσιακές τεχνικές

Τεχνικά χαρακτηριστικά

- Βάρος Υφάσματος : $155 \text{ g/m}^2 + 5 \text{ g/m}^2$
- Σχεδιαστικό Πάχος Υφάσματος: 0.086 mm (βασισμένο σε συνολικό περιεχόμενο άνθρακα)
- Πυκνότητα Ινών 1.81 g/cm^3

Ιδιότητες ινών

- Εφελκυστική αντοχή: $3'800 \text{ N/mm}^2$ (ονομαστική).
- Μέτρο ελαστικότητας: $242'000 \text{ N/mm}^2$ (ονομαστική).
- Οριακή παραμόρφωση (σε εφελκυσμό): 1.55% (ονομαστική)

Ινοπλισμένων πολυμερών

- Εφελκυστική αντοχή: 200 kN/m πλάτους ανά στρώση
- Μέτρο ελαστικότητας: 16.0 kN/mm^2 (βασισμένο σε τυπικό πάχος Ινοπλισμένου Πολυμερούς 1.0 mm).
- Σημείωση:
- Οι ανωτέρω τιμές είναι χαρακτηριστικές και ενδεικτικές μόνο Οι ιδιότητες του Ινοπλισμένου Πολυμερούς (Σύνθετου υλικού) που λαμβάνεται από δοκιμές εφελκυσμού εξαρτώνται από την ρητίνη εμποτισμού / επικόλλησης που χρησιμοποιείται καθώς και τις διαδικασίες που ακολουθούνται στη διάρκεια των δοκιμών.
- Εφαρμόστε μειωτικούς συντελεστές σύμφωνα με τους σχετικούς κανονισμούς σχεδιασμού

Σχεδιασμός

Παραμόρφωση σχεδιασμού: $\text{Max. } 0.6\%$ (Η τιμή αυτή εξαρτάται από το είδος της φόρτισης και πρέπει να προσαρμόζεται σύμφωνα με τους σχετικούς κανονισμούς σχεδιασμού).

Εφελκυστική αντοχή: (θεωρητική εφελκυστική αντοχή για τον σχεδιασμό):

- για παραμόρφωση 0.4% : 64 kN/m πλάτος ($=20 \text{ kN/30cm}$)
- για παραμόρφωση 0.6% : 100 kN/m πλάτος ($=30 \text{ kN/30cm}$)

Κατανάλωση

Ξηρή Εφαρμογή:

- Εμποτισμός της πρώτης στρώσης συμπεριλαμβάνοντας το αστάρωμα: ~ 0.5 - 0.9 kg/m² (Sikadur®-330).
- Εμποτισμός των επόμενων στρώσεων: ~ 0.3 kg/m² (Sikadur®-330).

Εποξειδική Ρητίνη Sikadur®-330

Η Sikadur®-330 είναι 2 συστατικών, θιξοτροπική εποξειδική ρητίνη εμποτισμού / συγκόλλησης, χωρίς διαλύτες.

Εφαρμογές

- Ρητίνη εμποτισμού για τα υφάσματα δομητικών ενισχύσεων SikaWrap®, με την ξηρή μέθοδο εφαρμογής
- Ρητίνη ασταρώματος για το υγρό σύστημα εφαρμογής
- Δομητικό υλικό συγκόλλησης για την επικόλληση των ελασμάτων Sika® CarboDur® σε επίπεδες επιφάνειες

Χαρακτηριστικά / Πλεονεκτήματα

- Εύκολη στην ανάμιξη και εφαρμογή με μυστρί και ρολό εμποτισμού
- Παράγεται για τη μέθοδο εφαρμογής εμποτισμού με το χέρι
- Εξαιρετική συμπεριφορά εφαρμογής σε κατακόρυφες επιφάνειες και επιφάνειες οροφής
- Πολύ καλή πρόσφυση σε πολλά διαφορετικά υποστρώματα
- Υψηλής απόδοσης μηχανικές ιδιότητες
- Δεν απαιτείται ξεχωριστό αστάρωμα
- Χωρίς διαλύτες

Εγκρίσεις / Πρότυπα

Σύμφωνα με τις απαιτήσεις του:

- SOCOTEC (France): Cahier des charges Sika® CarboDur, SikaWrap®.
- Road and Bridges Research Institute (Poland): IBDiM No AT/2003-04-336.

Εμφάνιση – Χρώμα

Ρητίνη, συστατικό Α: πάστα
Σκληρυντής, συστατικό Β: πάστα
Χρώμα: Συστατικό Α: λευκό
Συστατικό Β: γκρι Μίγμα
Α+Β: ανοικτό γκρι

Τεχνικά χαρακτηριστικά

- Χημική Βάση	Εποξειδική ρητίνη.
- Θερμοκρασία Λειτουργίας	-40°C έως+45°C
- Εφελκυστική Αντοχή	30 N/mm ² (7 ημέρες στους +23°C)
- Μέτρο Ελαστικότητας	Καμπτικό: 3800 N/mm ² (7 ημέρες στους +23°C) Εφελκυστικό: 4500 N/mm ² (7 ημέρες στους +23°C)
- Επιμήκυνση Θραύσης	0.9% (7 ημέρες στους +23°C)

Διάταξη συστήματος

Αστάρι υποστρώματος - Sikadur®-330.

Ρητίνη εμποτισμού / διάστρωσης - Sikadur®-330.

Ύφασμα δομητικής ενίσχυσης τύπου SikaWrap® ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις.

Ποιότητα υποστρώματος

Το υπόστρωμα πρέπει να είναι υγιές και επαρκούς εφελκυστικής αντοχής ώστε να εξασφαλίζει ελάχιστη αντοχή εξολκεύσεως 1.0 N/mm² ή όπως απαιτείται από τις προδιαγραφές σχεδιασμού.

Η επιφάνεια πρέπει να είναι στεγνή και απαλλαγμένη από όλους τους ρύπους, όπως λάδια, λιπαρές ουσίες, βαφές και υλικά επιφανειακής ωρίμανσης κ.α.

Η επιφάνεια που επικολλάται πρέπει να είναι επίπεδη (μέγιστη απόκλιση 2 mm ανά 0.3 m μήκους), χωρίς ανισοσταθμίες και εξάρσεις μεγαλύτερες των 0.5 mm στο καλούπι. Εξογκώματα μπορεί να αφαιρούνται με μηχανισμούς αμμοβολής ή απότριψης.

Περσφυγμένες γωνίες πρέπει να επιδέχονται απότμηση με ελάχιστη

ακτίνα 20 mm (εξαρτάται από τον τύπο του υφάσματος SikaWrap®) ή όπως προδιαγράφεται στη μελέτη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με εξομάλυνση των γωνιών ή στοκαρίσματα με ρητινοκονιάματα Sikadur®.

Προετοιμασία υποστρώματος

Υποστρώματα σκυροδέματος και τοιχοποιίας πρέπει να προετοιμάζονται μηχανικά χρησιμοποιώντας αμμοβολή ή εξοπλισμό εκτράχυνσης, ώστε να αφαιρεθεί η τσιμεντοεπιδερμίδα, χαλαρά και σαθρά τμήματα και να επιτευχθεί προφίλ επιφάνειας ανοικτής δομής.

Υποστρώματα δομικής ξυλείας πρέπει να πλανάρωνται και εκτραχύνονται.

Όλα οι σκόνες, χαλαρά και σαθρά τμήματα πρέπει να απομακρύνονται τελείως από όλες τις επιφάνειες πριν την εφαρμογή του Sikadur®-330 κατά προτίμηση με βούρτσα και βιομηχανική σκούπα. Ευπαθή τμήματα σκυροδέματος/τοιχοποιίας πρέπει να απομακρύνονται και επιφανειακές ατέλειες όπως φωλιές, οπές και διάκενα πρέπει να αποκαλυφθούν πλήρως.

Επισκευές σε υποστρώματα, γεμίσματα οπών/διάκενων και επιφανειακή επιπεδότητα πρέπει να επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας το Sikadur®-41 ή μίγματα του Sikadur®-30 και χαλαζιακής άμμου (αναλογία ανάμιξης συστατικών 1 : 1 μέγιστη κατά βάρος).

Δομικές πρόσφυσης πρέπει να πραγματοποιούνται ώστε να επιβεβαιώνεται η επαρκής προετοιμασία του υποστρώματος.

Ρωγμές εύρους μεγαλύτερου των 0.25 mm πληρώνονται με Sikadur®-52 ή άλλη κατάλληλη ενέσιμη ρητίνη Sikadur®.

Συνθήκες εφαρμογής

Θερμοκρασία Υποστρώματος	+10°C ελάχιστη / +35°C μέγιστη
Θερμοκρασία Περιβάλλοντος	+10°C ελάχιστη / +35°C μέγιστη
Υγρασία Υποστρώματος	< 4% μκβ. Μέθοδο δοκιμής: Υγρόμετρο Sika-Tramex.

Οδηγίες εφαρμογής

Ανάμιξη : Συστατικό A : Συστατικό B = 4 : 1 κατά βάρος. Όταν χρησιμοποιούνται χύμα υλικά, η ορθή αναλογία ανάμιξης πρέπει να διασφαλίζεται με ακριβές ζύγισμα και ακριβή δοσομέτρηση κάθε συστατικού.

Χρόνος ανάμιξης

Έτοιμες προς ανάμιξη συσκευασίες: Αναμίξτε τα συστατικά A+B μαζί για τουλάχιστον 3 λεπτά με αναδευτήρα προσαρτημένο σε ηλεκτρικό αναμικτήρα χαμηλής ταχύτητας (μέγιστο. 600 στροφές ανά λεπτό) μέχρις ότου το υλικό να αποκτήσει λεία υφή και ομοιόμορφο γκρι χρώμα.

Αποφύγετε κατά τη διάρκεια της ανάμιξης τον εγκλεισμό του αέρα. Στη συνέχεια αδειάστε όλο το μίγμα σε ένα καθαρό δοχείο και ανακατέψτε ξανά για περίπου 1 λεπτό σε χαμηλές ταχύτητες ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο εγκλωβισμός αέρα. Ανακατέψτε μόνο την ποσότητα η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσα στο χρόνο εργασιμότητας.

Χύμα συσκευασία, μη προζυγισμένες συσκευασίες: Πρώτα, ανακατέψτε επιμελώς κάθε συστατικό. Προσθέστε τα συστατικά στις σωστές αναλογίες μέσα σε κατάλληλο δοχείο ανάμιξης και αναδέψτε προσεκτικά χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρικό αναμικτήρα χαμηλής ταχύτητας όπως προηγουμένως για τις προζυγισμένες συσκευασίες.

Μέθοδος εφαρμογής – Εργαλεία

Προετοιμασία:

Πριν την εφαρμογή επιβεβαιώστε την περιεχόμενη υγρασία του υποστρώματος, τη σχετική υγρασία και το σημείο δρόσου.

Κόψτε το ύφασμα SikaWrap® στις επιθυμητές διαστάσεις, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του μελετητή.

Εφαρμογή ρητίνης:

Εφαρμόστε την ρητίνη Sikadur®-330 στο προετοιμασμένο υπόστρωμα με μυστρί, ρολό ή βούρτσα.

Τοποθέτηση και διάστρωση υφάσματος:

Τοποθετήστε το ύφασμα SikaWrap® με την κατάλληλη διεύθυνση πάνω στη ασταρωμένη με Sikadur®-330 επιφάνεια. Εργαστείτε με προσοχή με το ύφασμα πάνω στη ρητίνη χρησιμοποιώντας το πλαστικό ρολό εμποτισμού Sika παράλληλα με την διεύθυνση των ινών μέχρι να συμπιεστεί η ρητίνη ανάμεσα στην πλέξη των ινών και κατανεμηθεί ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια του υφάσματος. Όταν διαστρώνετε αποφύγετε την υπερβολική άσκηση δύναμης, ώστε να παρεμποδίσετε τσακίσματα και πτυχώσεις του υφάσματος SikaWrap®.

Πρόσθετες Στρώσεις Υφάσματος:

Για πρόσθετες στρώσεις του υφάσματος SikaWrap®, επαλείψτε με ρητίνη Sikadur®-330 την τελευταία εφαρμοσμένη στρώση “νωπό σε νωπό” ή το περισσότερο μέσα σε διάστημα 1 ώρας (στους 23°C) και επαναλάβετε τη διαδικασία διάστρωσης.

Εάν δεν είναι δυνατή η εφαρμογή μέσα σε διάστημα 1 ώρας, θα πρέπει να υπάρξει χρονικό διάστημα αναμονής τουλάχιστον 12 ωρών πριν την εφαρμογή της επόμενης.

Επιστρώσεις:

Εάν ακολουθεί τσιμεντοειδούς βάσης επίστρωση (επίχρισμα) πάνω στο ύφασμα SikaWrap®, θα πρέπει μια πρόσθετη επάλειψη ρητίνης μέγιστης κατανάλωσης 0.5 kg/m² να εφαρμοστεί πάνω στην τελική επιφάνεια. Η επίπαση με χαλαζιακή άμμο όσο είναι νωπή η ρητίνη, θα λειτουργήσει ως μηχανική αγκύρωση για την τελική επίστρωση (επίχρισμα).

Αλληλοεπικαλύψεις

Κάθετα στη διεύθυνση των ινών:

- Οι αλληλοεπικαλύψεις του υφάσματος SikaWrap® πρέπει να είναι τουλάχιστον 100 mm (σύμφωνα με τον τύπο του υφάσματος SikaWrap®) ή όπως αυτές προδιαγράφονται στη μελέτη δομητικής ενίσχυσης.

Παράλληλα στη διεύθυνση των ινών:

- Μονής διευθύνσεως υφάσματα: όταν τοποθετούνται αρκετές στρώσεις υφάσματος μονής διευθύνσεως SikaWrap®, πλευρά / πλευρά (παράλληλα στη διεύθυνση των ινών) δεν απαιτείται αλληλοεπικάλυψη, εκτός εάν αυτό προδιαγράφεται στη μελέτη δομητικής ενίσχυσης.

- Πολλών διευθύνσεων υφάσματα: η αλληλοεπικάλυψη κατά την διεύθυνση του στημονιού πρέπει να είναι τουλάχιστον 100 mm (σύμφωνα με τον τύπο του υφάσματος SikaWrap®) ή όπως προδιαγράφεται στη μελέτη δομητικής ενίσχυσης.

Χρόνος εργασιμότητας

Θερμοκρασία	Χρόνος
+10°C	90 λεπτά (5 kg)
+35°C	30 λεπτά (5 kg)

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Οριακή εφελκυστική παραμόρφωση αστοχίας (%)
<u>Άνθρακας</u>			
Υψηλής αντοχής	215-235	3500-4800	1,4-2,0
Υπερ-υψηλής αντοχής	215-235	3500-6000	1,5-2,3
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	350-500	2500-3100	0,5-0,9
Υπέρ-υψηλού μέτρου ελαστικότητας	500-700	2100-2400	0,2-0,4
<u>Γυαλί</u>			
E	70-75	1900-3000	3,0-4,5
Z	70-75	1900-3000	3,0-4,5
S	85-90	3500-4800	4,5-5,5
<u>Αραμίδιο</u>			
Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας	70-80	3500-4100	4,3-5,0
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	115-130	3500-4000	2,5-3,5

Πίνακας 2. Τυπικές ιδιότητες ινών

ΙΔΙΟΤΗΤΑ (20 ⁰ C)	Εποξειδική ρητίνη	Σκυρόδεμα	Χάλυβας
Πυκνότητα(kg/m ³)	1100-1700	2350	7800
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	0.5-20	20-50	205
Μέτρο διάτμησης (GPa)	0.2-8	8-21	80
Λόγος Poisson	0.3-0.4	0.2	0.3

Εφελκυστική αντοχή (MPa)	9-30	1-4	200-600
Διατμητική αντοχή(MPa)	10-30	2-5	150-400
Θλιπτική αντοχή(MPa)	55-110	25-150	200-600
Οριακή παραμόρφωση σε εφελκυσμό (%)	0.5-5	0.015	20-25
Ενέργεια θραύσης (Jm ⁻²)κατά προσέγγιση	200-1000	100	10 ⁵ -10 ⁶
Συντελεστής θερμικής διαστολής(10 ⁻⁶ /°C)	25-100	11-13	10-15
Υδατοαπορροφητικότητα 7ημ. 25 °C(% κ.β)	0.1-3	5	0
Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (°C)	50-80	---	---

Πίνακας 3. Σύγκριση τυπικών ιδιοτήτων εποξειδικών ρητινών, σκυροδέματος και χάλυβα

v. Πολυμερή υγρής και ξηρής εφαρμογής

- Υγρής εφαρμογής

- Φύλλα(sheets)η υφάσματα (fabrics)αποτελούμενα από συνεχείς ίνες μιας κυρίως διεύθυνσης χωρίς μήτρα
- Υφάσματα αποτελούμενα από συνεχείς ίνες σε δυο κατευθύνσεις χωρίς μήτρα
- Φύλλα η υφάσματα με συνεχείς ίνες μιας διεύθυνσης προεμποτισμένα με ρητίνη σε μη σκληρυμένη μορφή

- Φύλλα η υφάσματα με συνεχείς ίνες σε δυο κατευθύνσεις προεμποτισμένα με ρητίνη σε μη σκληρυμένη μορφή

- Συνεχείς ίνες χωρίς μήτρα, συγκεντρωμένες σε μορφή νήματος το όποιο εμποτίζεται με ρητίνη ενώ τυλίγεται στο υπο ενίσχυση δομικό μέλος.

Τα πολυμερή υγρής εφαρμογής χρησιμοποιούνται κυρίως σε μανδύες υποστρωμάτων και διατμητική ενίσχυση δοκών.

- Ξηρής εφαρμογής

- Προκατασκευασμένα ευθύγραμμα ελάσματα (strips)τα οποία επικολλούνται μέσω ρητίνης .Διατίθενται συνήθως σε μορφή ρόλων.

- Προκατασκευασμένοι ράβδοι(bars)κυκλικής η ορθογώνιας διατομής οι οποίες τοποθετούνται σε επιφανειακές εγκοπές και γεμίζονται με ρητίνες η πολυμερικό κονίαμα.

- Προκατασκευασμένα κελύφη, μανδύες η γωνίες τα οποία επικολλούνται με ρητίνη.

Τα πολυμερή ξηρής εφαρμογής προτιμούνται για ενίσχυση σε επίπεδες επιφάνειες, όπως καμπτική ενίσχυση δοκών και πλακών αλλά και σε περιπτώσεις απαίτησης μεγάλου σχετικά πάχους

IV. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Γενικά

- Υπερστατικοί δοκοί

Όπως είναι γνωστό, όταν οι άγνωστες αντιδράσεις μιας δοκού μπορούν να προσδιορισθούν με εφαρμογή των εξισώσεων της στατικής ισορροπίας και μόνο, τότε λέμε ότι η δοκός είναι **στατικά ορισμένη** ή **ισοστατική**. Οι εξισώσεις της στατικής ισορροπίας για τη γενική φόρτιση είναι τρεις

$$\Sigma P_x = 0 \quad , \quad \Sigma P_y = 0 \quad , \quad \Sigma M = 0$$

Σε αρκετές όμως περιπτώσεις το πλήθος των αγνώστων αντιδράσεων είναι μεγαλύτερο από τον αριθμό των διατιθέμενων εξισώσεων

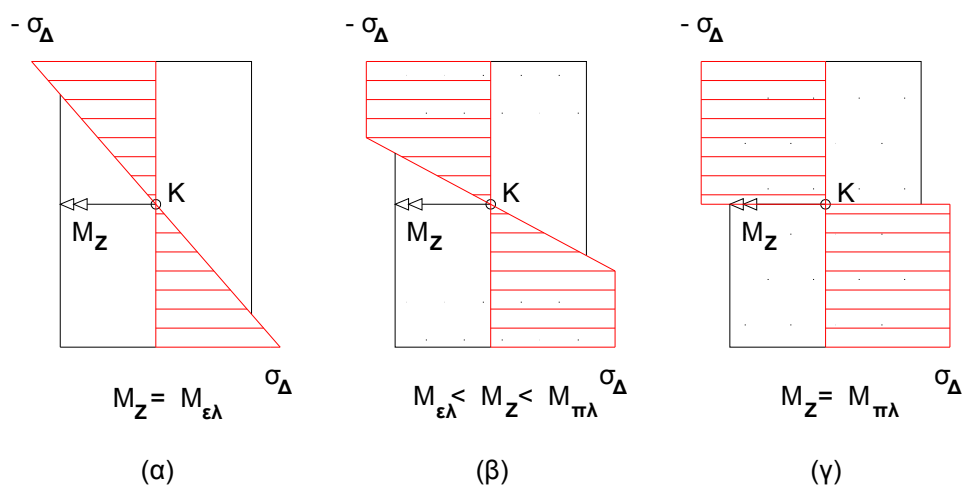
ισορροπίας. Οι δοκοί αυτοί (ή και φορείς γενικότερα) ονομάζονται **υπερστατικοί ή στατικά αόριστοι**.

Η διαφορά του αριθμού των αγνώστων αντιδράσεων στις στηρίξεις από τις διατιθέμενες εξισώσεις ισορροπίας, ονομάζεται **βαθμός υπερστατικότητας ή βαθμός στατικής αοριστίας** ή απλά **βαθμός αοριστίας**.

Έστω k το πλήθος των αγνώστων αντιδράσεων. Τότε , ο **βαθμός στατικής αοριστίας** προσδιορίζεται αφαιρώντας από το πλήθος k των αγνώστων αντιδράσεων το 3 για τη γενική φόρτιση , (ή το 2 για την κατακόρυφη). Ο βαθμός υπερστατικότητας $k - 3$ (ή $k - 2$) δηλώνει τις επιπλέον εξισώσεις που πρέπει να προσδιορίσουμε.

- **Πλαστική κάμψη**

Όταν σε μια δοκό αυξάνονται τα εγκάρσια φορτία , αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται και η ροπή κάμψης M_Z . Αν η τιμή της ροπής κάμψης γίνει μεγαλύτερη από την $M_{ελ}$ (= μέγιστη ελαστική ροπή που μπορεί να φέρει μια δοκός, μέχρις ότου εμφανιστεί η τάση διαρροής σ_{Δ} στις εξωτερικές μόνο ίνες της διατομής) , τότε θα εισέλθουν στην πλαστική περιοχή και άλλες ίνες (εκτός των εξωτερικών).



Ελαστική, ελαστοπλαστική και πλαστική κάμψη

Το φαινόμενο αυτό θα συνεχιστεί από έξω προς τα μέσα. Από το διάγραμμα των τάσεων – επιμηκύνσεων παρατηρούμε ότι οι τάσεις στις ίνες που έχουν εισέλθει στην πλαστική περιοχή, **παραμένουν σταθερές** και ίσες με την τάση διαρροής σ_{Δ} . Με περαιτέρω αύξηση της ροπής

κάμψης, ολοένα και περισσότερες ίνες από έξω προς τα μέσα θα φτάνουν στο όριο διαρροής και θα γίνονται πλαστικές, μέχρις ότου όλη η διατομή μεταβεί στην πλαστική περιοχή (σχήμα γ).

Η τιμή αυτή της ροπής κάμψης που προκάλεσε την πλήρη πλαστικοποίηση της διατομής ονομάζεται ροπή κατάρρευσης ή **πλαστική ροπή** ($M_{\pi\lambda}$). Προφανώς δεν είναι δυνατόν να αυξήσουμε άλλο την τιμή της ροπής κάμψης, διότι η τιμή της πλαστικής ροπής $M_{\pi\lambda}$ αντιπροσωπεύει την **οριακή αντοχή** της δοκού σε κάμψη.

Το φαινόμενο αυτό θα συμβεί μόνο στο σημείο του μήκους της δοκού που παρατηρείται η μέγιστη καμπτική ροπή M_{\max} .

- **Πλαστική άρθρωση**

Όταν τελικά σε όλες τις εφελκόμενες ίνες της διατομής (που βρίσκονται από το ένα μέρος της ουδέτερης γραμμής) αναπτυχθεί τάση ίση με την τάση διαρροής σε εφελκυσμό και σε όλες τις άλλες στο άλλο μέρος με την τάση διαρροής σε θλίψη, τότε το σημείο εκείνο συμπεριφέρεται κατά κάποιο τρόπο σαν άρθρωση, που ονομάζεται **πλαστική άρθρωση**.

Το κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα της πλαστικής άρθρωσης, είναι ότι η **ροπή κάμψης που μεταφέρει παραμένει σταθερή**, ανεξάρτητα από την αύξηση ή όχι του εξωτερικού φορτίου (ή ροπής). Οι πλαστικές αρθρώσεις εμφανίζονται στα σημεία της μέγιστης καμπτικής ροπής. Έτσι, σε δοκούς πρωτοπαρατηρούνται στα σημεία της φόρτισης, είτε σε κάποια αντίδραση. Σε περίπτωση κατανεμημένου φορτίου η πιθανή θέση των πλαστικών αρθρώσεων προσδιορίζεται σχετικά δύσκολα και γι' αυτό εξετάζονται διάφορα πιθανά σημεία.

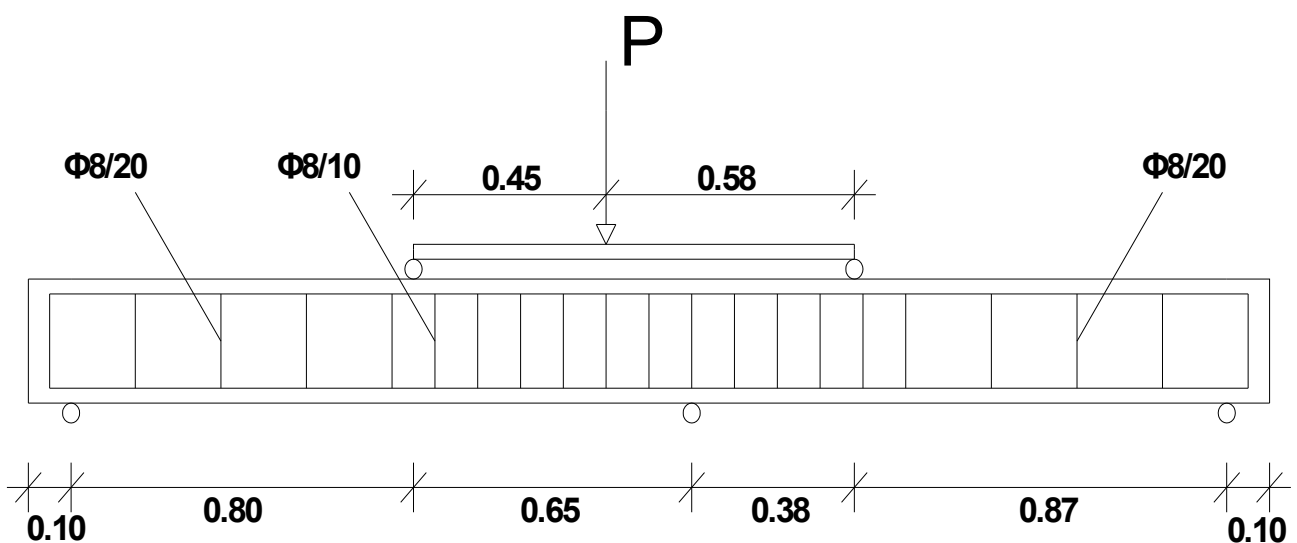
- **Μηχανισμός κατάρρευσης υπερ. Δοκών**

Όταν σε ένα φορέα δημιουργηθούν πλαστικές αρθρώσεις ώστε αυτός να παρουσιάζει τη **μεγαλύτερη δυνατή ικανότητα φόρτισης**, τότε ορισμένα τμήματα του μεταξύ των πλαστικών αυτών αρθρώσεων μπορεί να μετατοπιστούν χωρίς περαιτέρω αύξηση του φορτίου. Τα τμήματα αυτά δηλαδή, συμπεριφέρονται τότε σαν **μηχανισμοί**, αφού οι πλαστικές αρθρώσεις επιτρέπουν μια ελευθερία κίνησης. Στις συνθήκες αυτές το σχήμα του παραμορφωμένου φορέα, αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα μεταξύ κάθε ζεύγους αρθρώσεων. Το εξωτερικό φορτίο που απαιτείται για να συμπεριφερθεί ο φορέας σαν μηχανισμός, ονομάζεται

οριακό φορτίο ή φορτίο κατάρρευσης. Σε υπερστατικές κατασκευές αυτό οδηγεί σε μείωση του βαθμού αοριστίας κατά ένα.

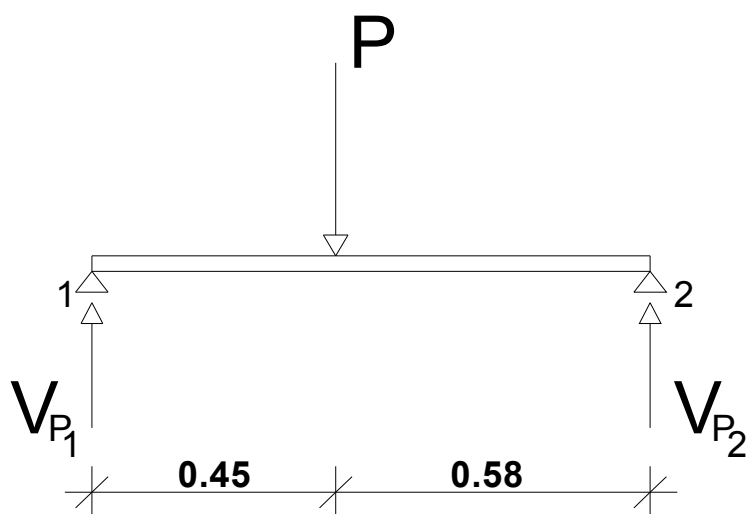
2. Virgin Δοκοί

i. Διάταξη πειράματος



Σημείωση : Η αρχική διάταξη του πειράματος βρισκόταν σε πλήρη συμμετρία. Η υποβολή όμως σε κάμψη της πρώτης virgin δοκού σε συνδυασμό με το $\max P=150$ kN που δύναται να δώσει η μηχανή κάμψης δεν επέφεραν το προσδοκώμενο αποτέλεσμα (δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων – κατάρρευση της δοκού). Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα, και μετά από δοκιμές, τη μεταποίηση της αρχικής συμμετρικής διάταξης σε μια έκκεντρη όπως φαίνεται στο σχήμα.

ii. Κατανομή φορτίων – Τελικό σκαρίφημα δοκών

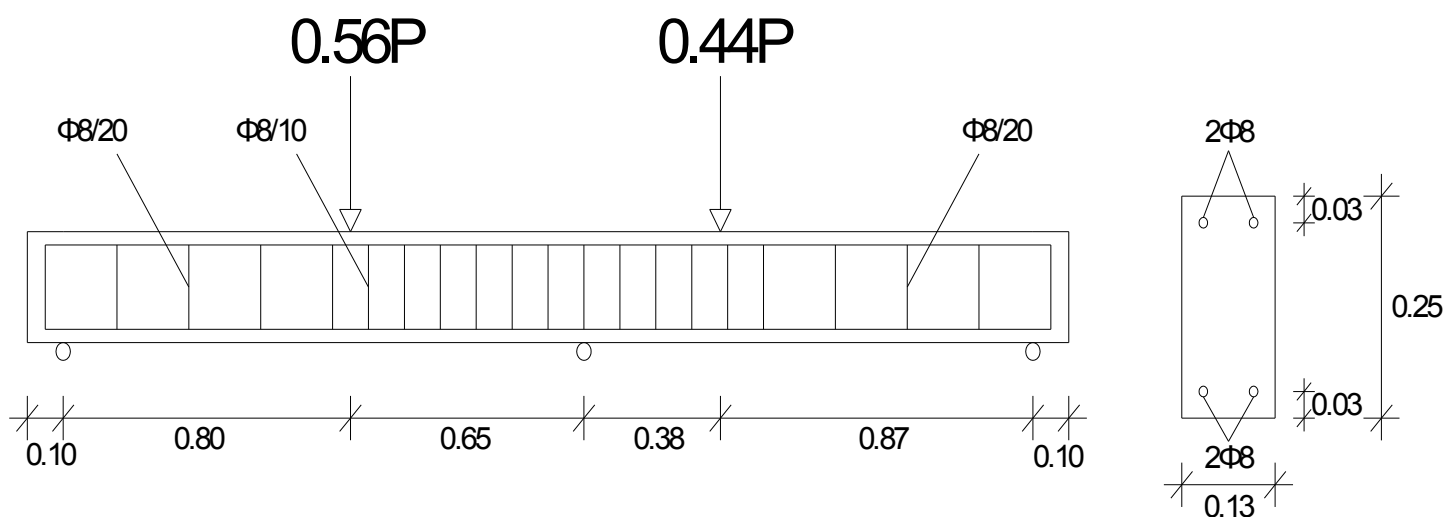


Υπολογισμός αντιδράσεων:

$$\begin{aligned} \text{Για } \Sigma M_1 = 0 &\Rightarrow V_{P2} \cdot 1.03 - P \cdot 0.45 = 0 \\ &\Rightarrow V_{P2} = 0.44P \end{aligned}$$

Οπότε, $V_{P1} = 0.56P$

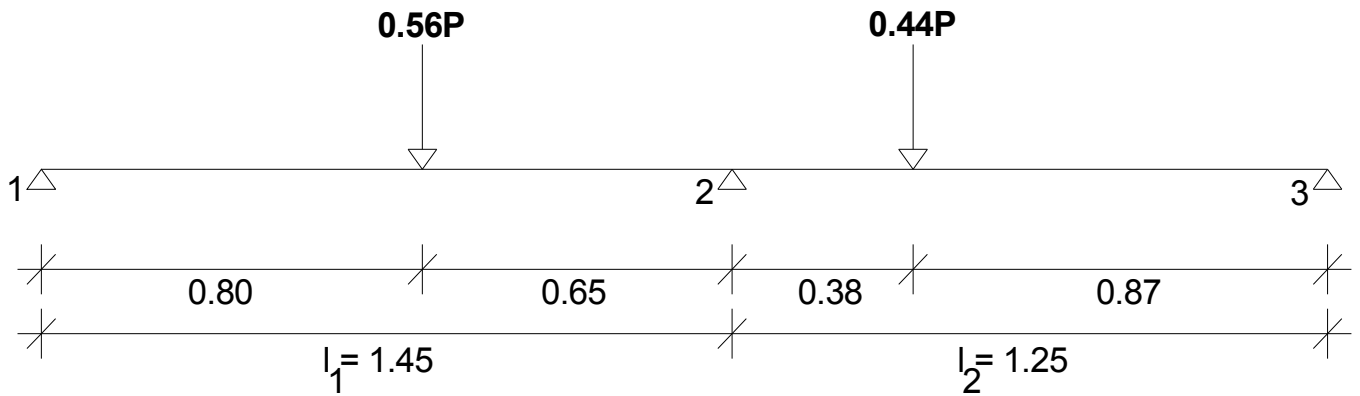
Έτσι, το τελικό σκαρίφημα των δοκών είναι το εξής :



Σημείωση : Η επιλογή της συγκεκριμένης κατανομής φορτίων έγινε για λόγους που θα παρατεθούν στη συνέχεια.

iii. Επίλυση συνεχούς δοκού με τη μέθοδο CLAPEYRON

- Στατικό μοντέλο



- Εξίσωση CLAPEYRON για το σημείο 2

Είναι,

$$M_1 \cdot l_1' + 2M_2 \cdot (l_1' + l_2') + M_3 \cdot l_2' = -R_1 \cdot l_1' - L_2 \cdot l_2'$$

Αλλά, $M_1 = M_3 = 0$

Οπότε, $2M_2 \cdot (l_1' + l_2') = -R_1 \cdot l_1' - L_2 \cdot l_2'$

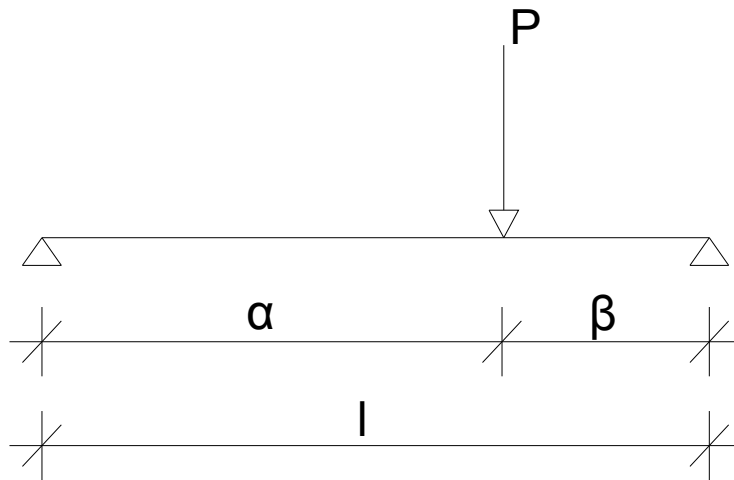
- Ανηγγμένα μήκη l_1' και l_2'

Είναι,

$$l_1' = l_1 \cdot I_c / I_1 = l_1 = 1.45 \text{ m}$$

και $l_2' = l_2 \cdot I_c / I_2 = l_2 = 1.25 \text{ m}$

- Φορτικοί συντελεστές R και L



Είναι, $L = \frac{1}{l^2} \cdot P \cdot \alpha \beta \cdot (\beta + l)$ και $R = \frac{1}{l^2} \cdot P \cdot \alpha \beta \cdot (\alpha + l)$

Οπότε, $L_2 = \frac{1}{1.25^2} \cdot 0.44P \cdot 0.38 \cdot 0.87 \cdot (0.87 + 1.25) \Rightarrow L_2 = 0.197P$
 $R_1 = \frac{1}{1.45^2} \cdot 0.56P \cdot 0.80 \cdot 0.65 \cdot (0.80 + 1.45) \Rightarrow R_1 = 0.312P$

- Άρα συνολικά είναι,

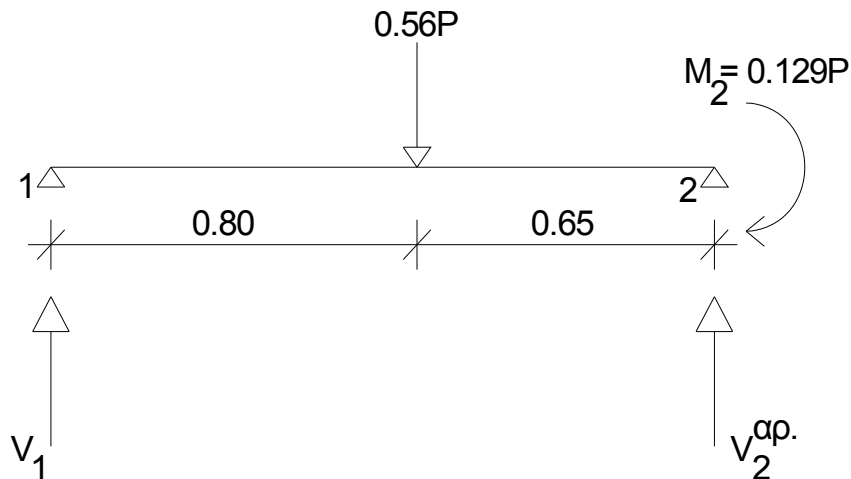
$$2M_2 \cdot (l_1' + l_2') = -R_1 \cdot l_1' - L_2 \cdot l_2' \Rightarrow$$

$$2M_2 \cdot (1.45 + 1.25) = -0.312P \cdot 1.45 - 0.197P \cdot 1.25$$

Άρα, $M_2 = -0.129P$

iv. Αντιδράσεις στηρίξεων

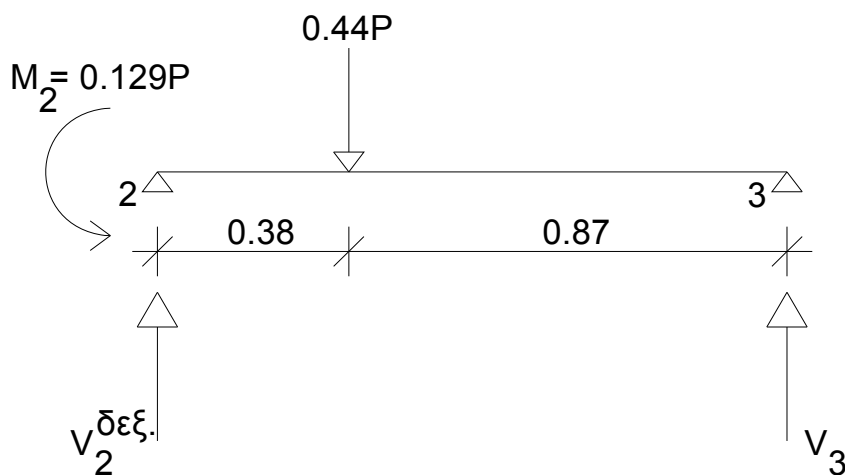
- Τμήμα 1 - 2



$$\begin{aligned} \text{Για } \Sigma M_2 = 0 &\Rightarrow 0.129P + V_1 \cdot 1.45 - 0.56P \cdot 0.65 = 0 \\ &\Rightarrow V_1 = 0.162P \end{aligned}$$

$$\text{Για } \Sigma P_x = 0 \Rightarrow 0.56P - V_1 - V_2 = 0 \Rightarrow V_2^{\text{αρ.}} = 0.398P$$

- Τμήμα 2 - 3



$$\begin{aligned} \text{Για } \Sigma M_2 = 0 &\Rightarrow 0.129P + V_3 \cdot 1.25 - 0.44P \cdot 0.38 = 0 \\ &\Rightarrow V_3 = 0.031P \end{aligned}$$

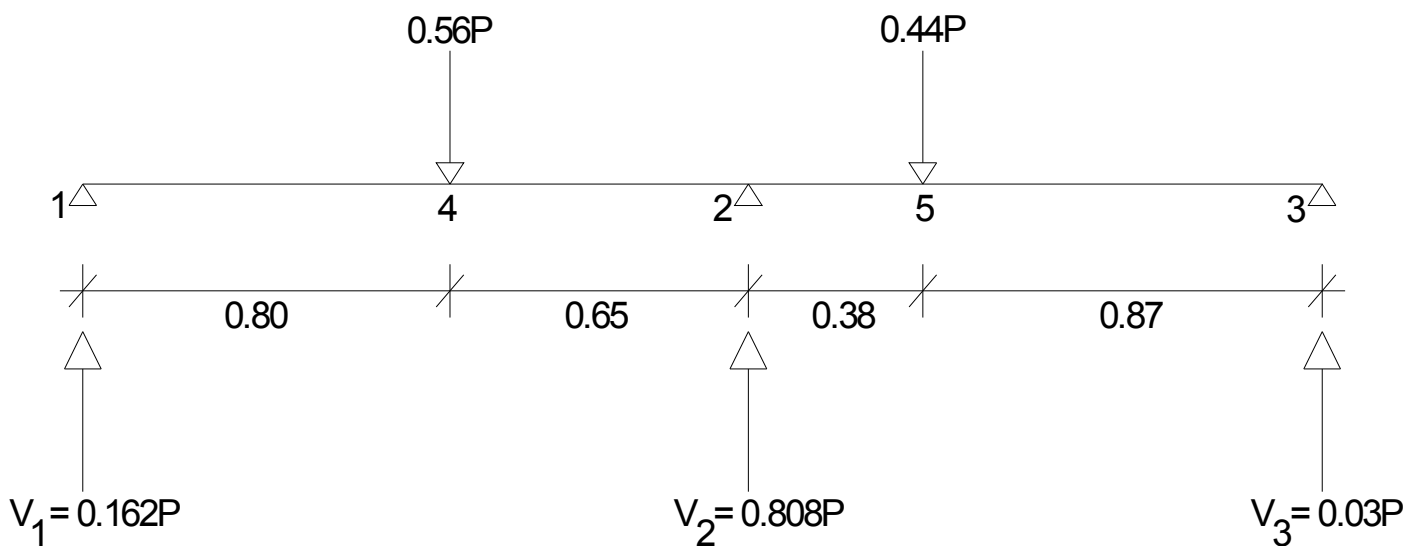
$$\text{Για } \Sigma P_X = 0 \Rightarrow 0.44P - V_3 - V_2^{\delta\alpha\zeta} = 0 \Rightarrow V_2^{\delta\alpha\zeta} = 0.41P$$

Άρα συνολικά έχουμε, $V_1 = 0.162P$

$$V_2 = V_2^{\alpha\rho} + V_2^{\delta\alpha\zeta} = 0.808P$$

και $V_3 = 0.031P$

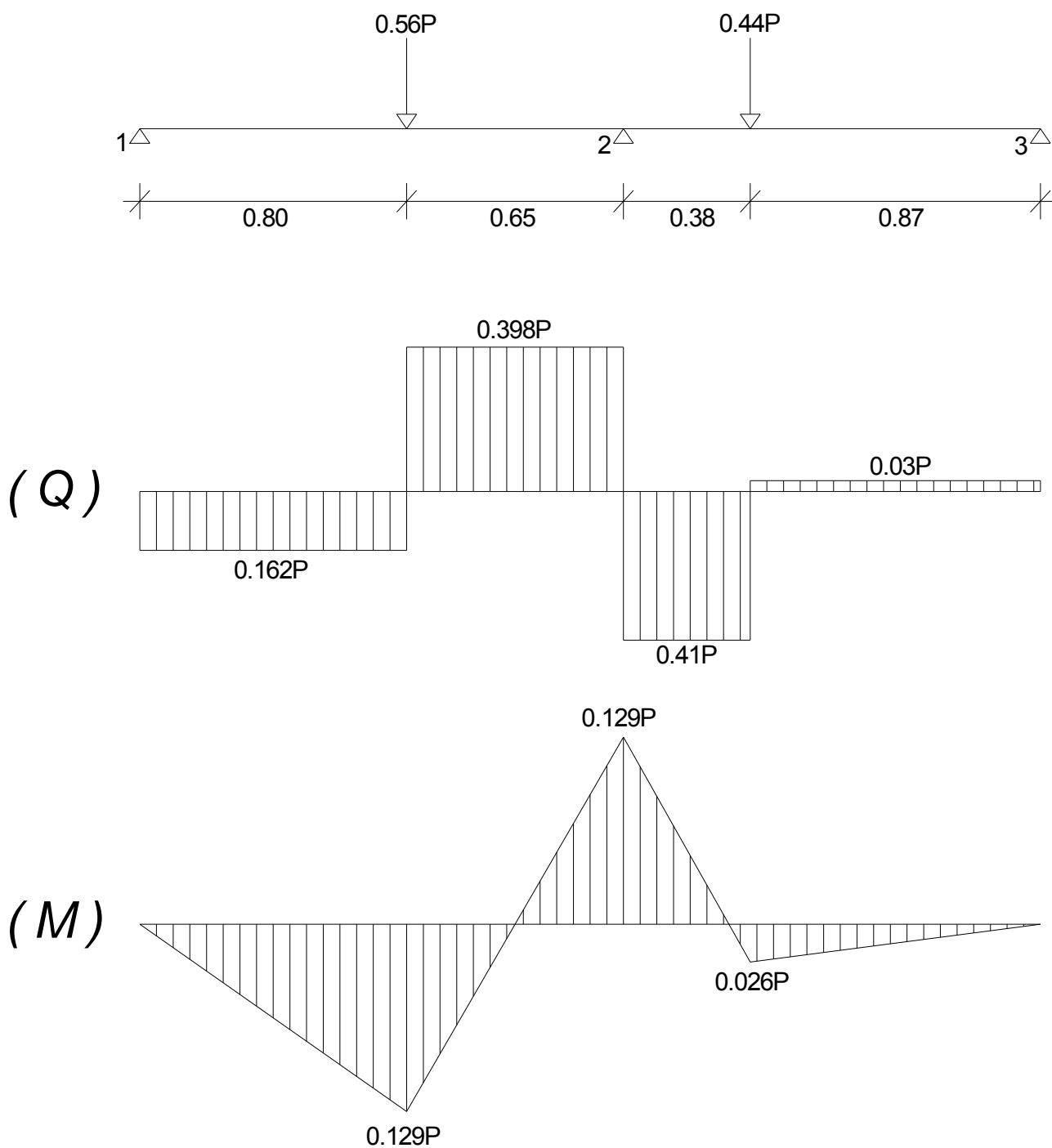
ν. Εντατικά μεγέθη στη διατομή



- Τέμνουσες Q : $Q_1 = Q_4^{\alpha\rho} = V_1 = 0.162P$
 $Q_4^{\delta\alpha\zeta} = Q_2^{\alpha\rho} = 0.162P - 0.56P = -0.398P$
 $Q_2^{\delta\alpha\zeta} = Q_5^{\alpha\rho} = -0.391P + 0.792P = 0.41P$
 $Q_5^{\delta\alpha\zeta} = 0.401P - 0.44P = 0.03P = Q_3$

- Ροπές κάμψης M : $M_1 = 0$
 $M_4 = V_1 \cdot 0.80 = 0.129P$
 $M_2 = V_1 \cdot 1.45 - 0.56P \cdot 0.65 = -0.129P$
 $M_3 = 0$
 $M_5 = V_1 \cdot 0.87 = 0.026P$

vi. Διαγράμματα εντατικών μεγεθών

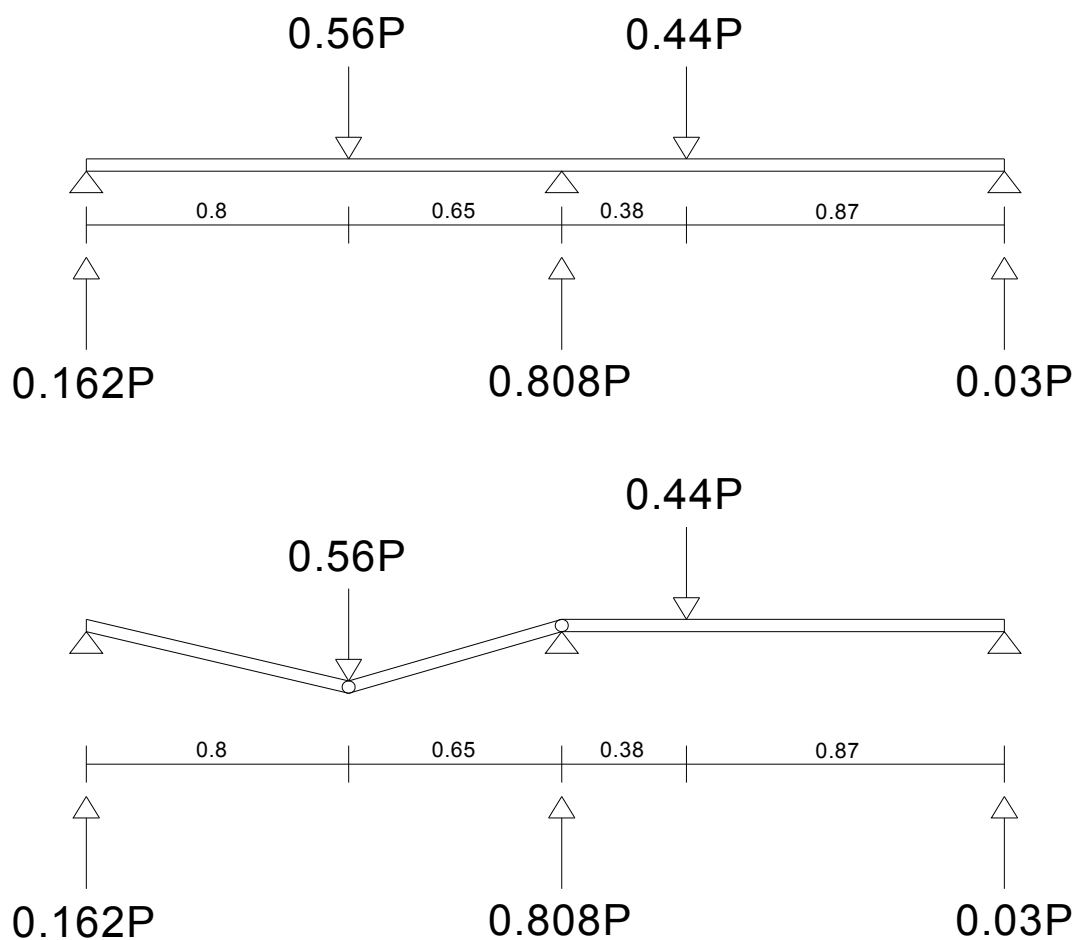


Σημείωση : Η κατανομή των φορτίων έγινε κατά τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε την ταυτόχρονη ανάπτυξη δύο ίδιων μεγίστων ροπών στα σημεία όπου αναμένεται και οι δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων.

vii. Αναμενόμενος μηχανισμός κατάρρευσης

Σύμφωνα με τη θεωρία των πλαστικών αρθρώσεων, οι πλαστικές αρθρώσεις εμφανίζονται στα σημεία της μέγιστης καμπτικής ροπής. Πράγμα που σημαίνει ότι σε δοκούς πρωτοπαρατηρούνται είτε στα σημεία της φόρτισης, είτε σε κάποια αντίδραση.

Έτσι, για την περίπτωση της δικής μας κατανομής φορτίων, ο αναμενόμενος μηχανισμός κατάρρευσης της δοκού είναι η δημιουργία δύο πλαστικών αρθρώσεων στα σημεία ανάπτυξης των μεγίστων ροπών όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

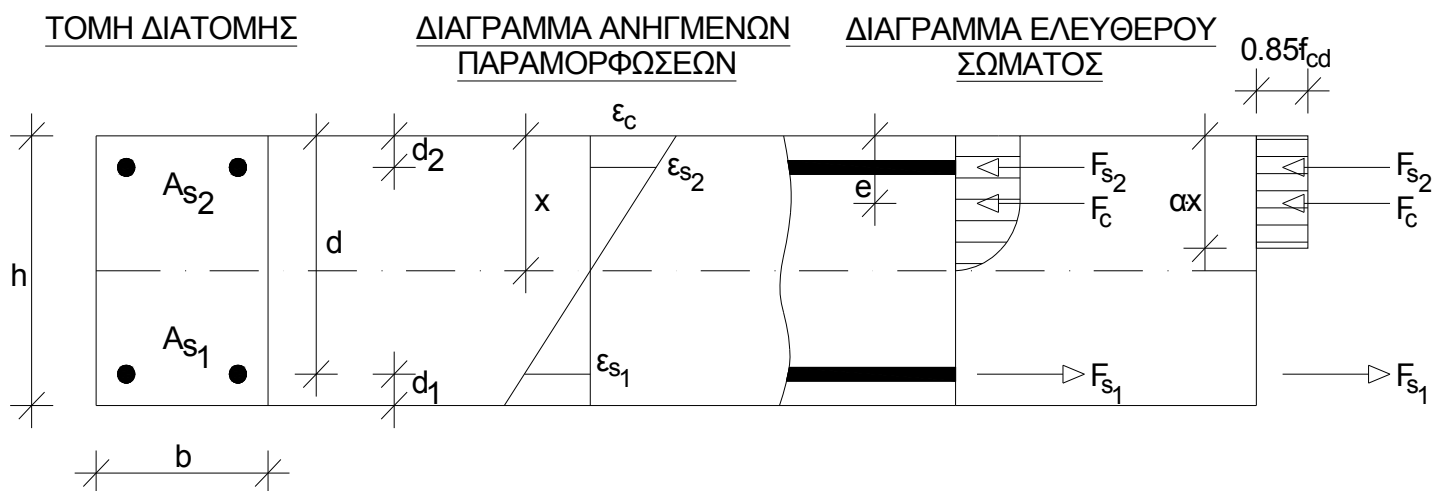


Το εξωτερικό φορτίο που απαιτείται για να δημιουργηθούν οι πλαστικές αρθρώσεις ονομάζεται οριακό φορτίο ή φορτίο κατάρρευσης. Αντίστοιχα η ροπή που πρέπει να αυξηθεί ονομάζεται **οριακή ροπή της διατομής**.

viii. Υπολογισμός Οριακής Ροπής Διατομής

Σκυρόδεμα : C16/20 $\Rightarrow f_{ck} = 16 \text{ MPa}$

Οπλισμός : B500c $\Rightarrow f_y = 550 \text{ MPa}$



Έχουμε, $b = 0.13 \text{ m}$
 $h = 0.25 \text{ m}$
 $d = 0.22 \text{ m}$
 $d_1 = d_2 = 0.03 \text{ m}$
 $A_{s1} = A_{s2} = 2\Phi 8 = 101 \text{ mm}^2$

• Παραμορφώσεις

Μετά από δοκιμές θέτουμε:

παραμόρφωση εφελκόμενου χάλυβα $\varepsilon_{s1} = 7.5 \text{ ‰}$

παραμόρφωση σκυροδέματος $\varepsilon_c = 1.75 \text{ ‰}$

Έτσι έχουμε,

$$\varepsilon_c / \varepsilon_{s1} = x / d - x \Rightarrow 1.75 / 7.5 = x / d - x \Rightarrow$$

$$x = 0.0416 \text{ m}$$

$$\varepsilon_c / \varepsilon_{s2} = x / x - d_2 \Rightarrow 1.75 / \varepsilon_{s2} = 0.0416 / 0.0416 - 0.03 \Rightarrow$$

$$\varepsilon_{s2} = 0.49 \text{ ‰}$$

- **Τάσεις**

Για παραμόρφωση $\varepsilon_{s1} = 7.5 \text{ ‰}$ ο εφελκυόμενος χάλυβας έχει διαρρεύσει, ενώ για παραμόρφωση $\varepsilon_{s2} = 0.49 \text{ ‰}$ ο θλιβόμενος χάλυβας βρίσκεται ακόμα στην ελαστική περιοχή.

Έτσι,

$$\sigma_{s1} = 550 \text{ MPa}$$

$$\text{και } \sigma_{s2} = E \cdot \varepsilon_{s2} = 200 \text{ GPa} \cdot 0.49 \text{ ‰} \Rightarrow \sigma_{s2} = 98 \text{ MPa}$$

- **Φορτία**

Για, $A_{s1} = A_{s2} = 2\Phi 8 = 101 \text{ mm}^2$

$$\sigma_{s1} = 550 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s2} = 98 \text{ MPa}$$

έχουμε,

$$F_{s1} = \sigma_{s1} \cdot A_{s1} = 550 \text{ N/mm}^2 \cdot 101 \text{ mm}^2 \Rightarrow F_{s1} = 55.55 \text{ kN}$$

$$\text{και, } F_{s2} = \sigma_{s2} \cdot A_{s2} = 98 \text{ N/mm}^2 \cdot 101 \text{ mm}^2 \Rightarrow F_{s2} = 9.9 \text{ kN}$$

Για την F_c έχουμε,

$$F_c = (a \cdot x) \cdot b \cdot (0.85 \cdot f_{ck}) = (0.62 \cdot 0.0416) \cdot 0.13 \cdot (0.85 \cdot 16)$$

$$\Rightarrow F_c = 46.6 \text{ kN}$$

Συνολικά είναι,

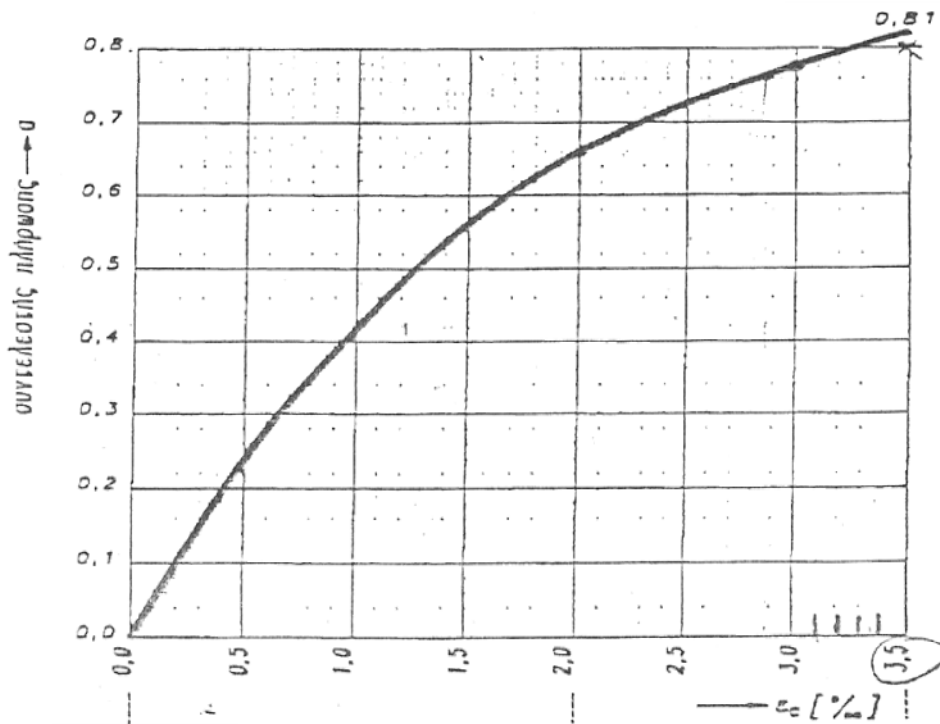
$$\Sigma F_x = 55.55 - 9.9 - 46.6 = 0.05 \text{ kN} \cong 0$$

- **Οριακή ροπή M_{rd}**

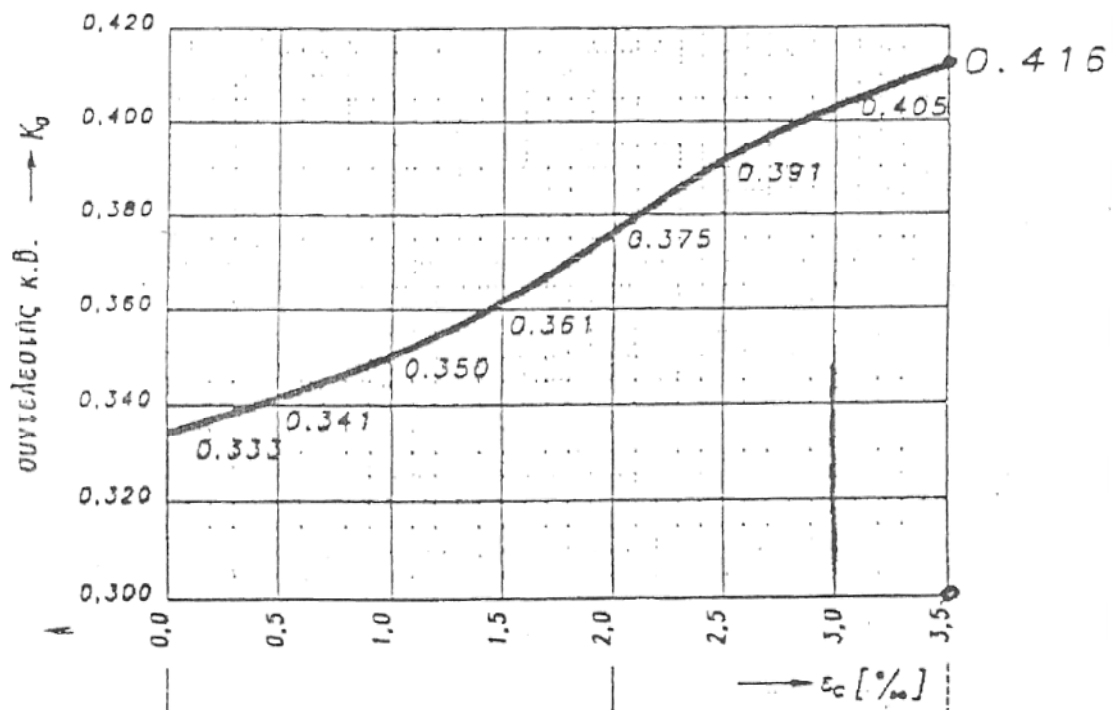
Είναι,

$$\begin{aligned} M_{rd} &= F_{s2} \cdot (h - d_1 - d_2) + F_c \cdot (h - d_1 - k_a \cdot x) \\ &= 9.9 \cdot (0.25 - 0.03 - 0.03) + 46.6 \cdot (0.25 - 0.03 - 0.37 \cdot 0.0416) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow M_{rd} = 11.42 \text{ kNm}$$



Μεταβολή του συντελεστή πλήρωσεως α συναρτήσει της παραμόρφωσης ϵ_c του σκυροδέματος



Τιμή του K_α σύμφωνα με την παραμόρφωση ϵ_c του σκυροδέματος

ix. Διαστασιολόγηση έναντι τέμνουσας

Ο υπολογισμός της θεωρητικής οριακής ροπής κάμψης μας έδωσε $M_{rd} = 11.42 \text{ kNm}$, ενώ παράλληλα από τη στατική επίλυση της δοκού υπολογίσαμε $M_{max} = 0.129P$.

Οπότε,

$$P_{max} = 11.42 / 0.129 \Rightarrow \\ \mathbf{P_{max} = 88.53 \text{ kN}}$$

Αντίστοιχα, η μέγιστη δύναμη που πρέπει να παραλάβουν οι συνδετήρες στην κρίσιμη περιοχή είναι,

$$V_{sd} = 0.41 \cdot P_{max} = 0.41 \cdot 88.53 \Rightarrow \\ \mathbf{V_{sd} = 36.3 \text{ kN}}$$

- **Τέμνουσα δύναμη αντοχής άοπλης διατομής**

Είναι,

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1.2 + 40 \rho l) + 0.15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d$$

με, $\tau_{Rd} = 0.22$ για C16/20 (διατμητική αντοχή ανάλογα με την ποιότητα του σκυροδέματος)

$$\text{Ορθή τάση } \sigma_{cp} = 0$$

$$k = 1.6 - d = 1.6 - 0.22 = 1.38 > 1$$

$$\rho l = A_{sl} / b_w \cdot d = (\pi \cdot 0.008^2 / 4) \cdot 2 / 13 \cdot 22 = 0.0035 < 0.02 \quad \text{Δεκτό}$$

Οπότε,

$$V_{Rd1} = [0.22 \cdot 1000 \cdot 1.38 \cdot (1.2 + 40 \cdot 0.0035) + 0] \cdot 0.13 \cdot 0.22 \Rightarrow \\ \mathbf{V_{Rd1} = 11.64 \text{ kN}}$$

Έχουμε, $V_{sd} = 36.3 \text{ kN} > V_{Rd1} = 11.64 \text{ kN}$

Άρα, πρέπει να υπολογισθεί διατμητικός οπλισμός για τη διατομή.

- **Μέγιστη επιτρεπόμενη δύναμη που μπορεί να παραληφθεί χωρίς θραύση του κορμού**

Είναι,

$$V_{Rd2} = 0.5 \cdot v \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0.9 \cdot d$$

με, $v = 0.7 - f_{ck} / 200 \geq 0.50 \Rightarrow v = 0.7 - 16 / 200 = 0.62 > 0.50$ Δεκτό

Έχουμε,

$$V_{Rd2} = 0.5 \cdot 0.62 \cdot 16000 / 1.5 \cdot 0.13 \cdot 0.9 \cdot 0.22 = 85.11 \text{ kN}$$

Οπότε,

$$V_{Rd2} = 85.11 \text{ kN} > V_{sd} = 36.3 \text{ kN}$$

Άρα, οι διαστάσεις της δοκού επαρκούν.

- **Τέμνουσα δύναμη που θα παραλάβουν οι συνδετήρες**

Είναι,

$$V_{sd1} \equiv V_{sd3} \equiv V_{Rd3}$$

και

$$V_{Rd3} = V_{cd} = V_{wd}$$

όπου, V_{cd} = Τέμνουσα που αναλαμβάνει το σκυρόδεμα

V_{wd} = Τέμνουσα που αναλαμβάνουν οι συνδετήρες

Για υπολογισμό δράσεων χωρίς σεισμό είναι, $V_{cd} = V_{Rd1} = 11.64 \text{ kN}$

Οπότε,

$$V_{wd} = V_{Rd3} - V_{cd} = 36.3 - 11.64 \Rightarrow \\ V_{wd} = 24.66 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \text{Οπλισμός : } (A_{sw} / S_w) &= V_{wd} / 0.9 \cdot d \cdot f_{yd} \\ &= 24.66 / (0.9 \cdot 0.22 \cdot 500 / 1.15 \cdot 1000) \\ &= 0.00029 \text{ m}^2/\text{m} = 2.9 \text{ cm}^2/\text{m} \end{aligned}$$

Έλεγχοι :

- Μέγιστη απόσταση συνδετήρων

Είναι, $V_{Rd2} = 85.11 \text{ kN}$
 $V_{sd} = 36.3 \text{ kN}$
 $0.2 \cdot V_{Rd2} = 17.02 \text{ kN}$
 $2/3 \cdot V_{Rd2} = 56.74 \text{ kN}$

Έτσι,

$$0.2 \cdot V_{Rd2} < V_{sd} < 2/3 \cdot V_{Rd2}$$

Οπότε, για τη μέγιστη απόσταση σκελών συνδετήρων έχουμε:

$$\text{maxs} = 0.6 \cdot d \leq 30 \Rightarrow \text{maxs} = 13.2 < 30$$

Άρα, ο δίτητος οπλισμός Φ8/10 (10.06 cm²/m) υπερεπαρκεί για τη διατομή μας .

- **Μη κρίσιμη περιοχή**

Για την μη κρίσιμη περιοχή έχουμε:

$$V_{sd} = 0.162 P_{\text{max}} = 0.162 \cdot 88.53 \text{ kN} \Rightarrow$$
$$V_{sd} = 14.34 \text{ kN} > V_{Rd1} = 11.64 \text{ kN}$$

Ακόμα,

$$V_{Rd2} = 85.11 \text{ kN} > V_{sd} = 14.34 \text{ kN}$$

Είναι,

$$V_{wd} = V_{Rd3} - V_{cd} = 14.34 - 11.64 \Rightarrow V_{wd} = 2.7 \text{ kN}$$

Οπλισμός : $(A_{sw} / S_w) = V_{wd} / 0.9 \cdot d \cdot f_{yd}$
 $= 2.7 / (0.9 \cdot 0.22 \cdot 500 / 1.15 \cdot 1000)$
 $= 0.000031 \text{ m}^2/\text{m} = 0.31 \text{ cm}^2/\text{m}$

Έλεγχοι :

- Μέγιστη απόσταση συνδετήρων

Είναι, $V_{Rd2} = 85.11 \text{ kN}$
 $V_{sd} = 14.34 \text{ kN}$
 $0.2 \cdot V_{Rd2} = 17.02 \text{ kN}$
 $2/3 \cdot V_{Rd2} = 56.74 \text{ kN}$

Έτσι, $V_{sd} < 0.2 \cdot V_{Rd2}$

Άρα, επιλέγουμε Φ8/20

3. Ενισχυμένοι Δοκοί

i. Γενικά

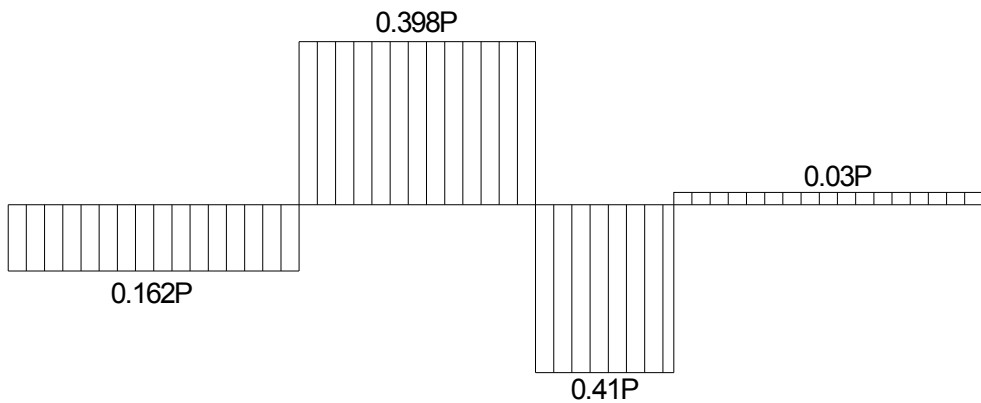
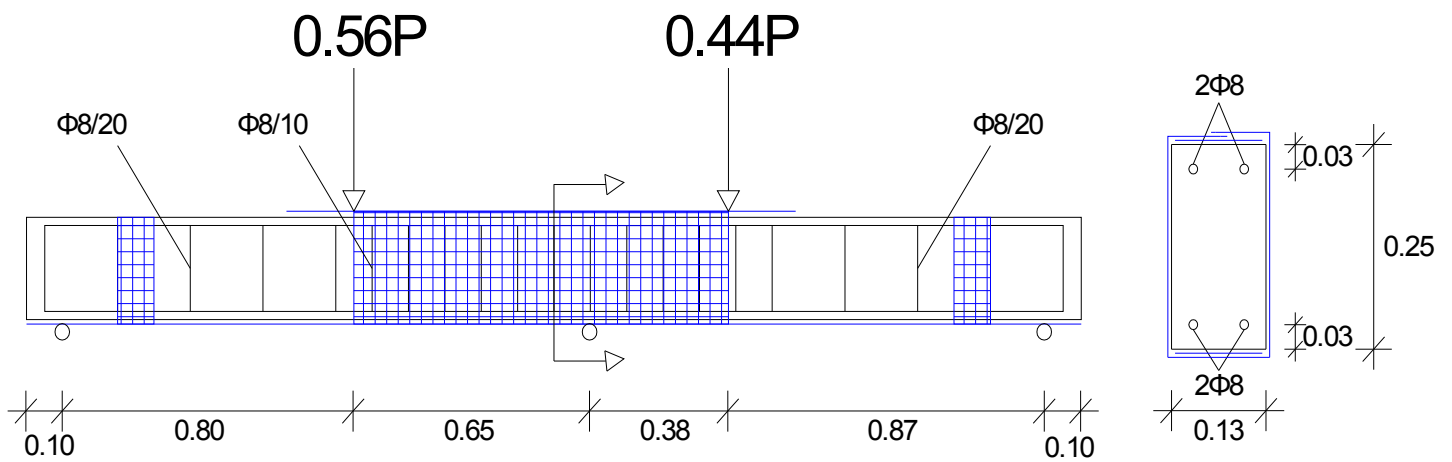
Στο θεωρητικό μέρος οι υπολογισμοί έγιναν θεωρώντας πως οι δοκοί θα ενισχυθούν με μονής διεύθυνσης υφάσματα από άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα επιλέχτηκε το ύφασμα SikaWrap – 150 C/30 με σχεδιαστικό πάχος υφάσματος 0.086 mm και μέτρο ελαστικότητας $E_f = 242$ GPa (αναλυτικά στοιχεία για τα υφάσματα και τις συγκολλητικές ουσίες που χρησιμοποιήθηκαν θα παρατεθούν στη συνέχεια).

Οι υπολογισμοί θα γίνουν με μηχανισμούς πλήρους συνεργασίας μεταξύ σκυροδέματος και σύνθετων υλικών και όχι μηχανισμούς που σχετίζονται με πρόωρες αστοχίες, όπως αποκολλήσεις των σύνθετων υλικών. Έτσι, το ενισχυμένο στοιχείο μπορεί να μελετηθεί ως ένα σύμμικτο στοιχείο, στο οποίο υπάρχει πλήρης συνεργασία μεταξύ του σκυροδέματος και των εξωτερικών οπλισμών. Όλοι οι υπόλοιποι μηχανισμοί αντιστοιχούν σε απώλεια της πλήρους συνεργασίας και αναλύονται ξεχωριστά.

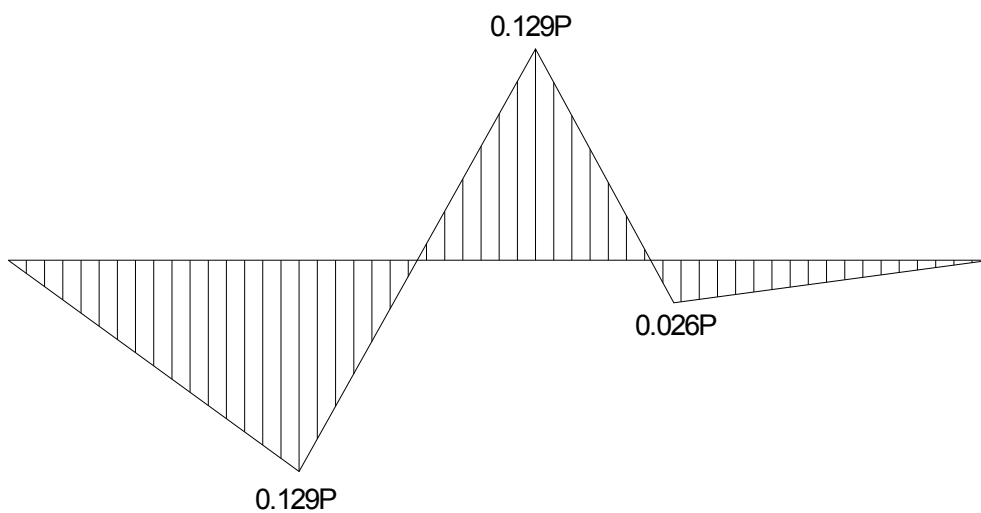
Για την ενίσχυση σε κάμψη, οι μηχανισμοί πλήρους συνεργασίας είναι τρεις, εκ των οποίων ο ένας δεν θα μελετηθεί αφού αναφέρεται σε θραύση του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη που προηγείται οποιασδήποτε αστοχίας και αντιστοιχεί σε ψαθυρή αστοχία που δεν είναι αποδεκτή.

Για την ενίσχυση σε διάτμηση, οι μηχανισμοί αστοχίας κατά την οριακή κατάσταση λόγω τέμνουσας είναι επίσης τρεις. Στην περίπτωση των δοκών μας ο οπλισμός διάτμησης είναι υπερεπαρκής στην κρίσιμη περιοχή, που σημαίνει ότι **δεν αναμένεται κατάρρευση λόγω διάτμησης** ανάμεσα στις φορτίσεις. Εντούτοις, στην κρίσιμη περιοχή έγινε περίσφιξη της δοκού με μια στρώση SikaWrap – 150 C/30. Έτσι, θα γίνει υπολογισμός σύμφωνα με τον πρώτο μηχανισμό αστοχίας (θραύση των σύνθετων υλικών), ώστε να υπολογισθεί η αύξηση του φορτίου που θα μπορούσε να παραλάβει η δοκός.

ii. Σκαρίφημα Ενισχυμένων Δοκών



(Q)



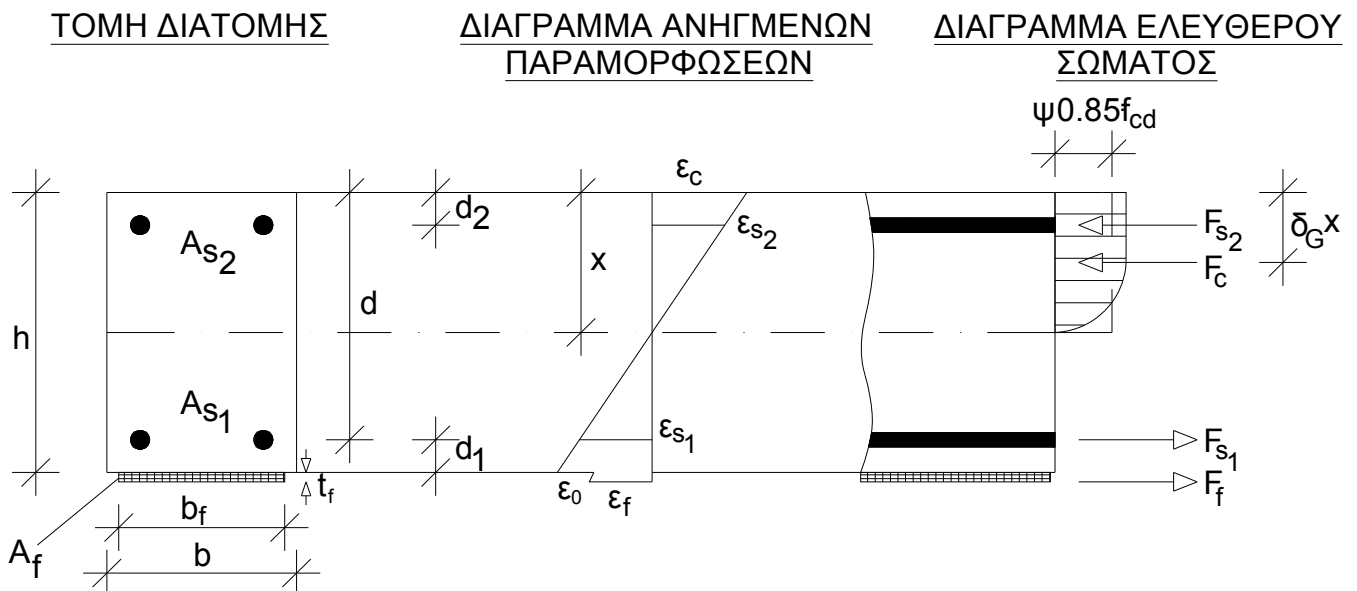
(M)

Σημείωση : Η ενίσχυση των δοκών με χρήση FRPs υπολογίστηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα υφάσματα να παραλάβουν τα μέγιστα διατμητικά φορτία και τις μέγιστες ροπές κάμψης που αναπτύσσονται, σύμφωνα με τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών.

iii. Μηχανισμοί πλήρους συνεργασίας

a. Διαρροή εφελκυόμενου χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος

Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, ο οποίος είναι και ο πλέον επιθυμητός, πρώτα διαρρέει ο διαμήκης οπλισμός σε εφελκυσμό και ακολούθως υφίσταται σύνθλιψη το σκυρόδεμα στη θλιβόμενη ζώνη, χωρίς να υπάρχει αστοχία ή κάποιου είδους αποκόλληση στα σύνθετα υλικά. Ο υπολογισμός της ροπής αντοχής στην κρίσιμη διατομή του μέλους γίνεται βάσει ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων και του συμβιβαστού των παραμορφώσεων



Υπολογισμός ύψους θλιβόμενης ζώνης, x , από ισορροπία εσωτερικών δυνάμεων:

$$F_c + F_{s2} = F_{s1} + F_f$$

$$0.85\psi \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x + A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \quad (1)$$

όπου, $\psi = 0.8$

$\delta_G = 0.4$

f_{cd} = θλιπτική αντοχή σκυροδέματος = 20 MPa

x = ύψος θλιβόμενης ζώνης

f_{yd} = τάση διαρροής χάλυβα

A_f = εμβαδόν διατομής συνθέτων υλικών

ε_0 = αρχική παραμόρφωση στην ακραία εφελκυόμενη ίνα = 0 αφού η δοκός μας κατά τη διάρκεια της ενίσχυσης δεν βρίσκεται σε ένταση

ε_c = οριακή παραμόρφωση σκυροδέματος = 0.0035

ε_{s2} και ε_f είναι οι παραμορφώσεις του θλιβόμενου χάλυβα και των σύνθετων υλικών αντίστοιχα, οι οποίες δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις (συμβιβαστό των παραμορφώσεων):

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_c \cdot (x - d_2) / x \quad (2)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \cdot [(h - x) / x] - \varepsilon_0 \quad (3)$$

Σημείωση: Η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος κατά τον θεωρητικό υπολογισμό των ενισχυμένων δοκών λήφθηκε $f_{cd} = 20$ MPa, διότι μετά τη σκυροδέτηση και τη θραύση των δοκιμίων βρήκαμε πως το σκυρόδεμά μας ήταν C20/25.

Υπολογισμός ροπής αντοχής :

$$M_{rd} = A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot (d - \delta_G \cdot x) + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot (h - \delta_G \cdot x) + A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} \cdot (\delta_G \cdot x - d_2) \quad (4)$$

Ο τρόπος ενίσχυσης που επιλέχθηκε είναι μια στρώση υφάσματος SikaWrap – 150 C/30 στο επάνω και μια στο κάτω πέλμα της δοκού, τα οποία θα παραλάβουν τις μέγιστες ροπές που αναπτύσσονται.

Οπότε,

$$E_f = 242 \text{ GPa}$$

$$E_s = 200 \text{ GPa}$$

$$A_f = 100\text{mm} \cdot 0.086\text{mm} = 8.6\text{mm}^2$$

$$A_{s1} = A_{s2} = 101\text{mm}^2$$

$$f_{yd} = 550 \text{ MPa}$$

$$b = 130\text{mm}$$

Έτσι, από (1) =>

$$0.85 \cdot 0.80 \cdot 20\text{MPa} \cdot 130\text{mm} \cdot x + 101\text{mm}^2 \cdot 200\text{GPa} \cdot \varepsilon_c \cdot (x - d_2) / x = 101\text{mm}^2 \cdot 550\text{MPa} + 8.6\text{mm}^2 \cdot 242\text{GPa} \cdot \varepsilon_c \cdot [(h - x) / x] - \varepsilon_0$$

Οπότε, $x = 40.49 \text{ mm}$

Προϋποθέσεις για την εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων είναι ότι ο εφελκυόμενος χάλυβας έχει πράγματι διαρρεύσει και ότι η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά είναι μικρότερη της οριακής $\varepsilon_{f,lim} = 0.006$ (αυτής δηλαδή που αντιστοιχεί στη θραύση ή αποκόλληση τους), δηλαδή :

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \cdot [(h-x)/x] - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{f,lim} \quad (5)$$

Είναι,

$$\varepsilon_f = 0.0035 \cdot (250\text{mm} - 40.94\text{mm}) / 40.94\text{mm} - 0 = 0.0179$$

Οπότε,

$$\varepsilon_f = 0.0179 \gg \varepsilon_{f,lim}$$

Έτσι, παρατηρούμε πως η παραμόρφωση των συνθέτων υλικών για να ισοροπήσουν οι εσωτερικές δυνάμεις είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της οριακής. Για να μειωθεί η παραμόρφωση αυτή θα πρέπει να μεγαλώσει το ύψος της θλιβόμενης ζώνης, πράγμα που επιτυγχάνεται με την αύξηση του εμβαδού των συνθέτων υλικών. Κάτι τέτοιο όμως θα επιφέρει μεγάλη αύξηση της οριακής ροπής που δεν είναι επιθυμητό. Έτσι, για να μην προβούμε σε αυτήν την αλλαγή θα κάνουμε τους υπολογισμούς με τον δεύτερο μηχανισμό πλήρους συνεργασίας.

b. Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα, θραύση συνθέτων υλικών

Ο μηχανισμός αστοχίας κατά τον οποίο μετά τη διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα ακολουθεί θραύση των σύνθετων υλικών χρησιμοποιείται όταν το εμβαδόν της διατομής των σύνθετων υλικών είναι πάρα πολύ μικρό, όπως στην δική μας περίπτωση.

Η ανάλυση της κρίσιμης διατομής στην περίπτωση αυτή γίνεται όπως παραπάνω, δηλαδή ισχύουν οι εξισώσεις (1) – (5), με τις εξής τροποποιήσεις:

1. Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση στο σκυρόδεμα δεν είναι κατ' ανάγκη ίση με την οριακή
2. Η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά ισούται με την οριακή
3. Οι συντελεστές ψ και δ_G δίνονται από τις σχέσεις:

$$\psi = 1000\varepsilon_c (0.5 - 1000 \varepsilon_c / 12) \quad \text{για } \varepsilon_c \leq 0.002 \quad (6)$$

$$\psi = 1 - 2/3000 \varepsilon_c \quad \text{για } 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035$$

και $\delta_G = 8 - 1000\varepsilon_c / 4(6 - 1000\varepsilon_c) \quad \text{για } \varepsilon_c \leq 0.002 \quad (7)$

$$\delta_G = [1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 4) + 2] / [2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 2)] \quad \text{για } 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035$$

Υπολογισμός οριακής αντοχής :

1^η Δοκιμή : Έστω $\varepsilon_c = 0.0035$ και $\varepsilon_f = 0.006$

- Από (3) $\Rightarrow \varepsilon_c / x = \varepsilon_f / (h - x) \Rightarrow 0.0035 / x = 0.006 / (250 - x) \Rightarrow$
 $x = 92.11 \text{ mm}$
- Από (2) $\Rightarrow \varepsilon_{s2} = \varepsilon_c \cdot (x - d_2) / x = 0.0035 \cdot (92.11 - 30) / 92.11 \Rightarrow$
 $\varepsilon_{s2} = 0.00236$

Άρα, ο θλιβόμενος χάλυβας δεν διαρρέει

Οπότε, $F_{s2} = 101 \text{ mm}^2 \cdot 200 \text{ GPa} \cdot 0.00236 \Rightarrow$
 $F_{s2} = 47.67 \text{ kN}$

- Είναι, $\varepsilon_c / x = \varepsilon_{s1} / (h - x - d_1) \Rightarrow 0.0035 / 92.11 = \varepsilon_{s1} / (250 - 92.11 - 30) \Rightarrow$
 $\varepsilon_{s1} = 0.00486$

Άρα, ο εφελκυσμένος χάλυβας διαρρέει

Οπότε, $F_{s1} = 550 \text{ MPa} \cdot 101 \text{ mm}^2 \Rightarrow F_{s1} = 55.55 \text{ kN}$

- $F_f = 8.6 \text{ mm}^2 \cdot 242 \text{ GPa} \cdot 0.006 = 12.49 \text{ kN}$
- $F_c = 0.85 \cdot 0.80 \cdot 20 \text{ MPa} \cdot 130 \text{ mm} \cdot 92.11 \text{ mm} = 162.85 \text{ kN}$
- $\Sigma F_X = 162.85 + 47.67 - 12.49 - 55.55 \neq 0$

2^η Δοκιμή : Έστω $\varepsilon_c = 0.00142$ και $\varepsilon_f = 0.006$ (μετά από διαδοχικούς ελέγχους)

- Από (3) $\Rightarrow \varepsilon_c / x = \varepsilon_f / (h - x) \Rightarrow 0.00142 / x = 0.006 / (250 - x) \Rightarrow$
 $x = 47.84 \text{ mm}$
- Από (2) $\Rightarrow \varepsilon_{s2} = \varepsilon_c \cdot (x - d_2) / x = 0.00142 \cdot (47.84 - 30) / 47.84 \Rightarrow$
 $\varepsilon_{s2} = 0.00053$

Άρα, ο θλιβόμενος χάλυβας δεν διαρρέει

Οπότε, $F_{s2} = 101 \text{ mm}^2 \cdot 200 \text{ GPa} \cdot 0.00053 \Rightarrow$
 $F_{s2} = 10.70 \text{ kN}$

- Είναι, $\varepsilon_c/x = \varepsilon_{s1}/(h-x-d_1) \Rightarrow 0.00142/47.84 = \varepsilon_{s1}/(250-47.84-30) \Rightarrow$
 $\varepsilon_{s1} = 0.00486$

Άρα, ο εφελκόμενος χάλυβας διαρρέει

Οπότε, $F_{s1} = 550\text{MPa} \cdot 101\text{mm}^2 \Rightarrow F_{s1} = 55.55 \text{ kN}$

- $F_f = 8.6\text{mm}^2 \cdot 242 \text{ GPa} \cdot 0.006 = 12.49 \text{ kN}$
- Για $\varepsilon_c = 0.00142 < 0.002$ είναι,

$$\psi = 1000\varepsilon_c (0.5 - 1000 \varepsilon_c / 12)$$

$$= 1000 \cdot 0.00142 \cdot (0.5 - 1000 \cdot 0.00142 / 12) \Rightarrow \psi = 0.542$$

Οπότε, $F_c = 0.85 \cdot 0.542 \cdot 20 \text{ MPa} \cdot 130 \text{ mm} \cdot 47.84 \text{ mm} = 57.30 \text{ kN}$

- $\Sigma F_X = 57.30 + 10.70 - 12.49 - 55.55 = 0.04 \text{ kN} \cong 0$

Οι εσωτερικές δυνάμεις ισορροπούν, οπότε μπορούμε να προχωρήσουμε στον υπολογισμό της M_{rd} .

- Για $\varepsilon_c = 0.00142 < 0.002$ είναι,

$$\delta_G = 8 - 1000\varepsilon_c / 4(6 - 1000\varepsilon_c)$$

$$= 8 - 1000 \cdot 0.00142 / 4(6 - 1000 \cdot 0.00142) \Rightarrow \delta_G = 0.359$$

Οπότε,

$$\begin{aligned} M_{rd} &= A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot (d - \delta_G \cdot x) + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot (h - \delta_G \cdot x) + A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} \cdot (\delta_G \cdot x - d_2) \\ &= 101\text{mm}^2 \cdot 550\text{MPa} \cdot (220\text{mm} - 0.359 \cdot 47.84\text{mm}) \\ &\quad + 8.6 \text{ mm}^2 \cdot 242\text{GPa} \cdot 0.006 \cdot (250\text{mm} - 0.359 \cdot 47.84\text{mm}) \\ &\quad + 101 \text{ mm}^2 \cdot 200\text{GPa} \cdot 0.00053 \cdot (0.359 \cdot 47.84 - 30\text{mm}) \Rightarrow \\ &\quad \mathbf{M_{rd} = 14.04 \text{ kNm}} \end{aligned}$$

3^η Δοκιμή : Έστω $\varepsilon_c = 0.00197$ και $\varepsilon_f = 0.011$ (μετά από διαδοχικούς ελέγχους)

- Από (3) $\Rightarrow \varepsilon_c/x = \varepsilon_f/(h-x) \Rightarrow 0.00197/x = 0.011/(250-x) \Rightarrow$
 $x = 37.97 \text{ mm}$
- Από (2) $\Rightarrow \varepsilon_{s2} = \varepsilon_c \cdot (x - d_2) / x = 0.00197 \cdot (37.97 - 30) / 37.97 \Rightarrow$
 $\varepsilon_{s2} = 0.00041$

Άρα, ο θλιβόμενος χάλυβας δεν διαρρέει

Οπότε, $F_{s2} = 101\text{mm}^2 \cdot 200\text{GPa} \cdot 0.00041 \Rightarrow$
 $F_{s2} = 8.3 \text{ kN}$

- Είναι, $\varepsilon_c/x = \varepsilon_{s1}/(h-x-d_1) \Rightarrow 0.00197/37.97 = \varepsilon_{s1}/(250-37.97-30) \Rightarrow$
 $\varepsilon_{s1} = 0.0094$

Άρα, ο εφελκυσμένος χάλυβας διαρρέει

Οπότε, $F_{s1} = 550\text{MPa} \cdot 101\text{mm}^2 \Rightarrow F_{s1} = 55.55 \text{ kN}$

- $F_f = 8.6\text{mm}^2 \cdot 242 \text{ GPa} \cdot 0.011 \Rightarrow F_f = 22.90 \text{ kN}$
- Για $\varepsilon_c = 0.00197 < 0.002$ είναι,

$$\psi = 1000\varepsilon_c (0.5 - 1000 \varepsilon_c / 12)$$
$$= 1000 \cdot 0.00197 \cdot (0.5 - 1000 \cdot 0.00197 / 12) \Rightarrow \psi = 0.662$$

Οπότε, $F_c = 0.85 \cdot 0.662 \cdot 25 \text{ MPa} \cdot 130 \text{ mm} \cdot 37.97 \text{ mm} = 69.44 \text{ kN}$

- $\Sigma F_X = 69.44 + 8.3 - 22.90 - 55.55 = - 0.71 \text{ kN} \cong 0$

Οι εσωτερικές δυνάμεις ισορροπούν, οπότε μπορούμε να προχωρήσουμε στον υπολογισμό της M_{rd} .

- Για $\varepsilon_c = 0.00197 < 0.002$ είναι,

$$\delta_G = 8 - 1000\varepsilon_c / 4(6 - 1000\varepsilon_c)$$
$$= 8 - 1000 \cdot 0.00197 / 4(6 - 1000 \cdot 0.00197) \Rightarrow \delta_G = 0.374$$

Οπότε,

$$M_{rd} = A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot (d - \delta_G \cdot x) + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot (h - \delta_G \cdot x) + A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon_{s2} \cdot (\delta_G \cdot x - d_2)$$
$$= 101\text{mm}^2 \cdot 550\text{MPa} \cdot (220\text{mm} - 0.374 \cdot 37.97\text{mm})$$
$$+ 8.6 \text{ mm}^2 \cdot 242\text{GPa} \cdot 0.011 \cdot (250\text{mm} - 0.374 \cdot 37.97\text{mm})$$
$$+ 101 \text{ mm}^2 \cdot 200\text{GPa} \cdot 0.00041 \cdot (0.374 \cdot 37.97 - 30\text{mm}) \Rightarrow$$
$$M_{rd} = 16.70 \text{ kNm}$$

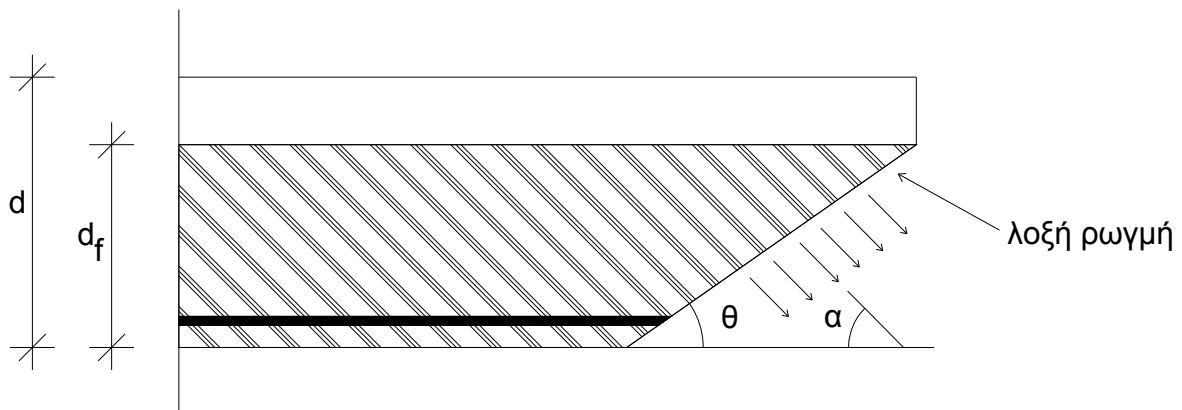
Άρα, $P_{\max} = 16.7 / 0.129 \Rightarrow P_{\max} = 129.46 \text{ kN}$

γ. Σύνθλιψη σκυροδέματος

Ο μηχανισμός σύμφωνα με τον οποίο η θραύση του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη προηγείται οποιασδήποτε άλλης αστοχίας αντιστοιχεί σε ψαθυρή συμπεριφορά και δεν είναι αποδεκτός, γι' αυτό και δεν αναλύεται περεταίρω.

iv. Ενίσχυση σε διάτμηση

Κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας οι ίνες που διαπερνούν μία λοξή (διατμητικού τύπου) ρωγμή "ενεργοποιούνται" και παραλαμβάνουν δυνάμεις **κατ' αναλογία με τους εσωτερικούς συνδετήρες**.



Μηχανισμός ανάληψης τέμνουσας από τα σύνθετα υλικά σε λοξή ρωγμή (Τριανταφύλλου 1998)

Για την περίπτωση χρήσης λωρίδων πάχους t_f και πλάτους b_f , ανά αποστάσεις s_f , η τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού που παραλαμβάνεται από τα σύνθετα υλικά, V_{fd} , δίνεται από τη σχέση:

$$V_{fd} = (2t_f b_f / s_f) \cdot d_f \cdot (\varepsilon_{f_e,d} E_f) (\cot\theta + \cot\alpha) \sin\alpha \quad (1)$$

όπου, d_f = ύψος του μανδύα που διαπερνάται από τη ρωγμή, μετρούμενο από τη στάθμη του διαμήκη οπλισμού (=0.9d όταν ο οπλισμός διάτμησης καλύπτει πλήρως της πλευρές)

θ = η γωνία ρωγμής (μπορεί να θεωρηθεί 45°)

α = γωνία διεύθυνσης ινών ως προς τον άξονα του μέλους

E_f = μέτρο ελαστικότητας σύνθετων υλικών παράλληλα στην διεύθυνση των ινών

$\varepsilon_{f_e,d}$ = μέση τιμή, κατά μήκος της ρωγμής, της παραμόρφωσης στα

σύνθετα υλικά παράλληλα στη διεύθυνση των ινών, κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω τέμνουσας (‘‘ενεργή’’ παραμόρφωση).

Στην πιο συνηθισμένη περίπτωση εφαρμογής συνεχούς υφάσματος αντί λωρίδων (οπότε $b_f = s_f \sin\alpha$), η εξίσωση (1) γίνεται:

$$V_{fd} = 2t_f d_f \cdot (\varepsilon_{fe,d} E_f) (\cot\theta + \cot\alpha) \sin^2\alpha \quad (2)$$

Επίσης, συνήθως τα σύνθετα υλικά εφαρμόζονται με τις ίνες κάθετα στον άξονα του μέλους ($\alpha = 90^\circ$), οπότε

$$V_{fd} = 2t_f d_f \cdot (\varepsilon_{fe,d} E_f) \cot\theta \quad (3)$$

Η παραμόρφωση $\varepsilon_{fe,d}$ είναι περίπου ανάλογη του ανοίγματος της ρωγμής, οπότε μεταβάλλεται περίπου γραμμικά μέχρι τη μέγιστη τιμή, $\varepsilon_{fd,max}$, η οποία είναι και η καθοριστική για την αστοχία του σύνθετου υλικού. Βάση των παραπάνω υποθέσεων, η ενεργή παραμόρφωση ισούται με

$$\varepsilon_{fe,d} = D_f \varepsilon_{fd,max} = [1 - (0.5d_f/0.9d)] \varepsilon_{fd,max} \quad (4)$$

Η τιμή της παραμόρφωσης $\varepsilon_{fd,max}$ κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω τέμνουσας εξαρτάται από το μηχανισμό αστοχίας με τον οποίο γίνεται η μελέτη (στη δική μας περίπτωση θραύση των σύνθετων υλικών).

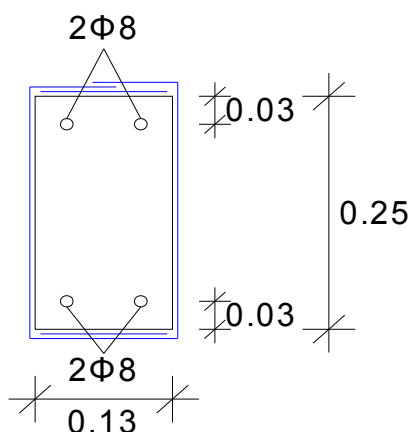
Θραύση των σύνθετων υλικών

Αναμένεται να συμβεί κατά κανόνα σε επαρκώς αγκυρωμένους (κλειστούς) μανδύες. Στην περίπτωση αυτή

$$\varepsilon_{fd,max} = f_{fde} / E_f \quad (5)$$

όπου f_{fde} η (μειωμένη ως προς την εφελκυστική αντοχή, λόγω συγκεντρώσεων τάσεων στις γωνίες του μέλους) αντοχή σχεδιασμού. Ο μειωτικός συντελεστής η_e για τον υπολογισμό f_{fde} είναι 0.80 (αντιστοιχεί σε 20% μείωση της αντοχής που προκύπτει μέσω δοκιμής εφελκυσμού).

Εικόνα διατομής →



Είναι, $d_f = 190 \text{ mm}$
 $d = 220 \text{ mm}$

Για υφάσμα SikaWrap - 150 C/30 είναι:

μέτρο ελαστικότητας $E_f = 242 \text{ GPa}$

ενεργή αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό $f_{fd} = 3800 \text{ MPa}$

οπότε,

$$f_{fde} = f_{fd} - 20\% f_{fd} \Rightarrow f_{fde} = 3040 \text{ MPa}$$

Έτσι,

$$\varepsilon_{fd,max} = f_{fde} / E_f = 3040 / 242000 = 0.0123$$

Τελικά λαμβάνεται, $\varepsilon_{fd,max} = \min(0.0123, 0.006) \Rightarrow$
 $\varepsilon_{fd,max} = 0.006$

Είναι, $D_f = 1 - (0.5 \cdot 190 / 0.9 \cdot 220) = 0.52$

Οπότε,

$$\varepsilon_{fe,d} = D_f \varepsilon_{fd,max} = 0.52 \cdot 0.006 \Rightarrow$$
$$\varepsilon_{fe,d} = 0.00312$$

Από σχέση (3) για μια στρώση υφάσματος έχουμε:

$$V_{fd} = 2t_f d_f (\varepsilon_{fe,d} E_f) \cot\theta = 2 \cdot (1 \cdot 0.086) \cdot 0.9 \cdot 220 \cdot (0.00312 \cdot 242) \Rightarrow$$
$$V_{fd} = 25.7 \text{ kN}$$

Άρα με μια στρώση υφάσματος SikaWrap - 150 C/30 η δοκός θα μπορούσε να παραλάβει επιπλέον φορτίο 25.7 kN.

V. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Γενικά

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας κατασκευάστηκαν έξι δοκοί ορθογωνικής διατομής, δύο εκ των οποίων ενισχύθηκαν με ινοπλισμένα πολυμερή και άλλες τέσσερις, οι οποίες μελετήθηκαν ως virgin beam (=παρθένα δοκός).

Τα έξι δοκάρια οπλίσθηκαν με έξι κλωβούς ίδια διάταξης και σκυροδετήθηκαν όλα μαζί την ίδια ημέρα με υλικό μιας σκυροδέτησης. Έτσι, έχουμε σαν αποτέλεσμα έξι πανομοιότυπα δοκάρια ίδιας σύστασης και ίδιου οπλισμού. Ακόμα, από την ίδια σκυροδέτηση λήφθηκαν δοκίμια (κύβοι ακμής 15 εκ. και κύλινδροι βάσης 15 και ύψους 30 εκ.) από τα οποία θα υπολογισθεί η ακριβής αντοχή του σκυροδέματος.

Έπειτα από ένα απαραίτητο διάστημα ωρίμανσης του σκυροδέματος οι έξι δοκοί υποβλήθηκαν σε κάμψη αυξανόμενου φορτίου. Μετρήσεις και αποτελέσματα ακολουθούν στην συνέχεια της εργασίας.

2. Διαδικασία, Μετρήσεις – Αποτελέσματα

i. Virgin Δοκοί

- Ετοιμασία οπλισμών στο εργαστήριο



- Τελική φάση πριν τη σκυροδέτηση



- 10/6/09 ημέρα σκυροδέτησης



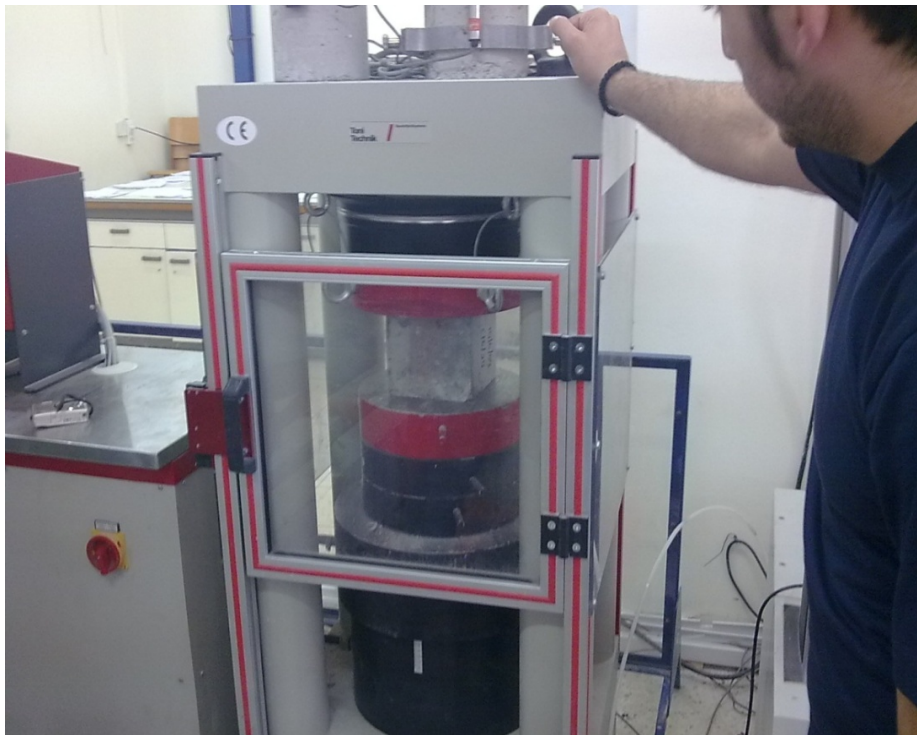
- Λήψη δοκιμίων σύμφωνα με τον ΚΤΣ



- Διατήρηση δοκιμίων σε υγρό περιβάλλον



- Θραύση δοκιμίων



- Έλεγχος κατά ΚΤΣ

Τιμές φορτίων θραύσης τριών πρώτων κύβων : $P_1 = 549 \text{ kN}$
 $P_2 = 542.2 \text{ kN}$
 $P_3 = 562.5 \text{ kN}$

Έτσι, με επιφάνεια κύβων $0.15\text{m} \times 0.15\text{m} = 0.0225 \text{ m}^2$ είναι,

$$\sigma_1 = 24.4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 24.1 \text{ MPa} \quad \Rightarrow \quad \bar{\sigma}_3 = 24.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = 25 \text{ MPa}$$

Οπότε, σύμφωνα με το κριτήριο E για σκυρόδεμα πρέπει,

$$\bar{\sigma}_3 \geq f_{ck} + 3.7 \text{ MPa}$$

$$X_i \geq f_{ck}$$

Έτσι, για C16/20 είναι, $24.5 \text{ MPa} > 23.7 \text{ MPa}$

$$24.1 \text{ MPa} > 20 \text{ MPa}$$

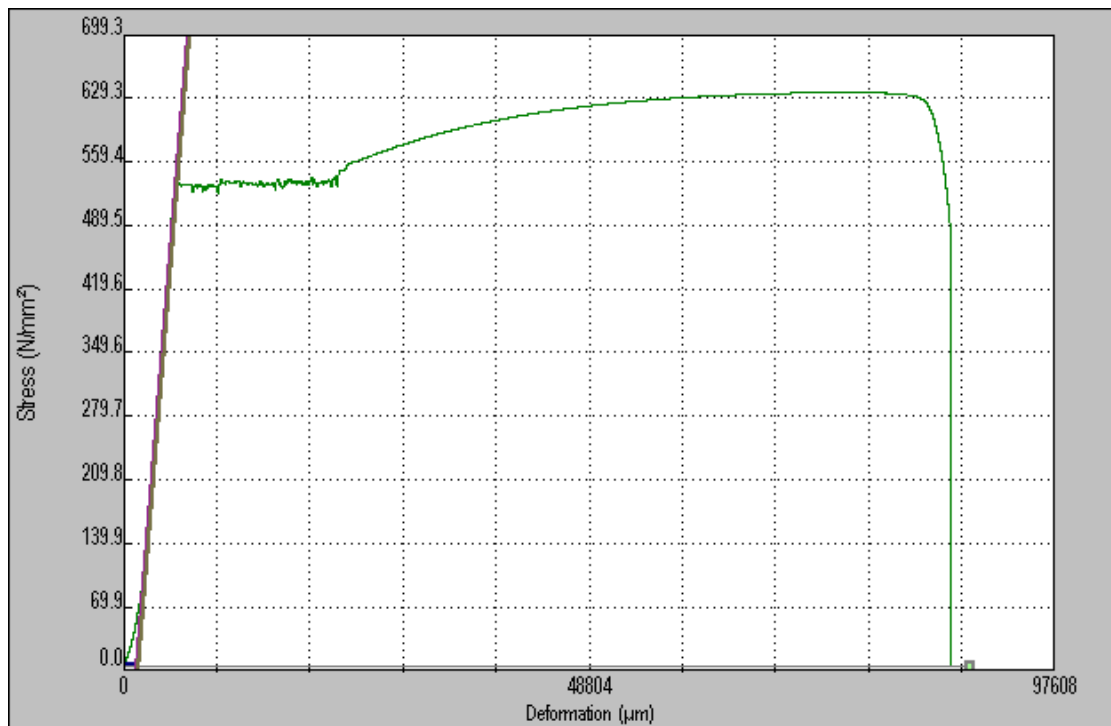
Για C20/25 είναι, $24.5 \text{ MPa} < 28.7 \text{ MPa}$

Άρα, το σκυρόδεμά μας είναι C16/20

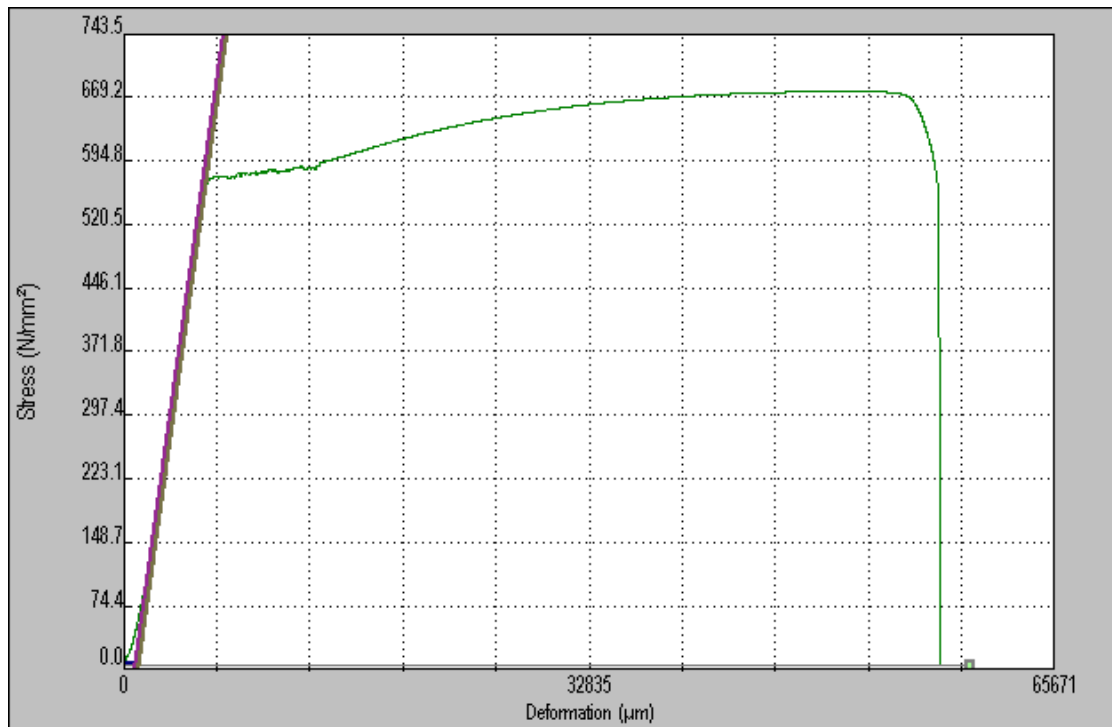
- Εφελκυσμός χάλυβα



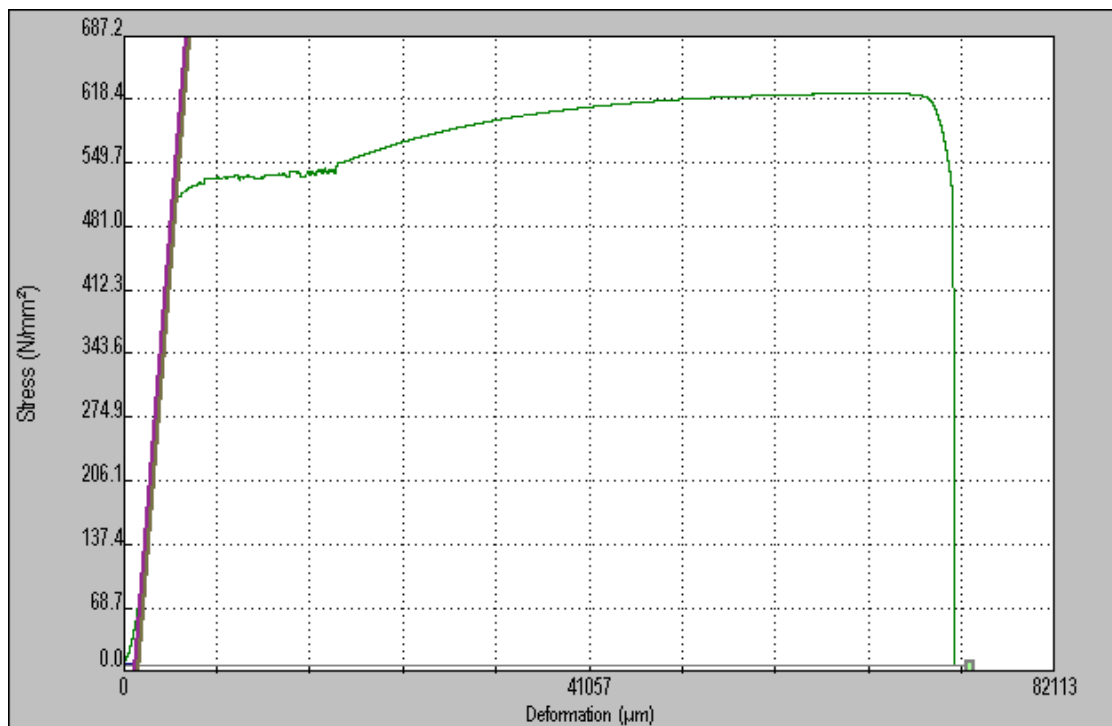
- Διαγράμματα εφελκυσμού δοκιμίων χάλυβα



Δοκίμιο 1 → $\sigma_y \approx 530 \text{ MPa}$ και $\sigma_{\max} \approx 638 \text{ MPa}$



Δοκίμιο 2 → $\sigma_y \approx 565$ MPa και $\sigma_{max} \approx 677$ MPa



Δοκίμιο 3 → $\sigma_y \approx 530$ MPa και $\sigma_{max} \approx 627$ MPa

- Υποβολή δοκών σε κάμψη



- Κατάρρευση δοκών

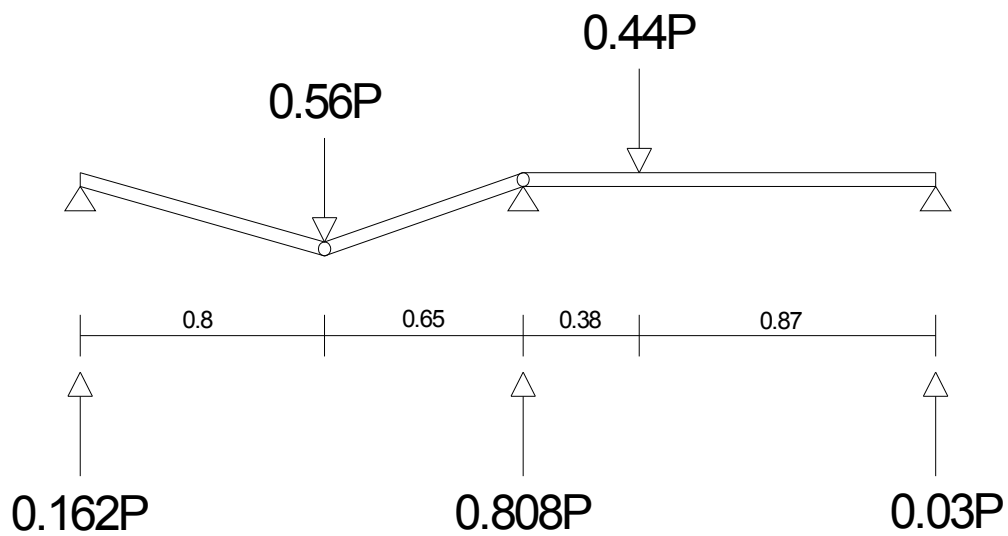


Παρατηρούμε ότι ο τρόπος κατάρρευσης των Virgin Δοκών ταιριάζει απόλυτα με τον αναμενόμενο μηχανισμό κατάρρευσης που αναφέρεται στο θεωρητικό μέρος. Επίσης, γίνεται εμφανές από τις ρηγματώσεις της δοκού η δημιουργία των προσδοκώμενων πλαστικών αρθρώσεων στη μεσαία στήριξη και στο σημείο της μέγιστης φόρτισης.

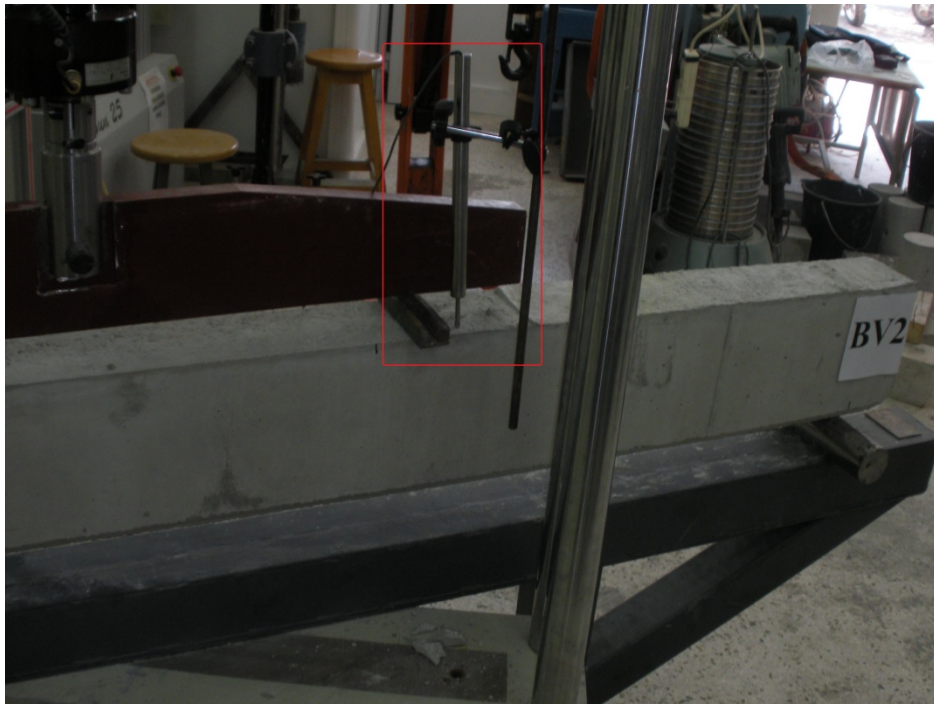
- Πλαστικές αρθρώσεις



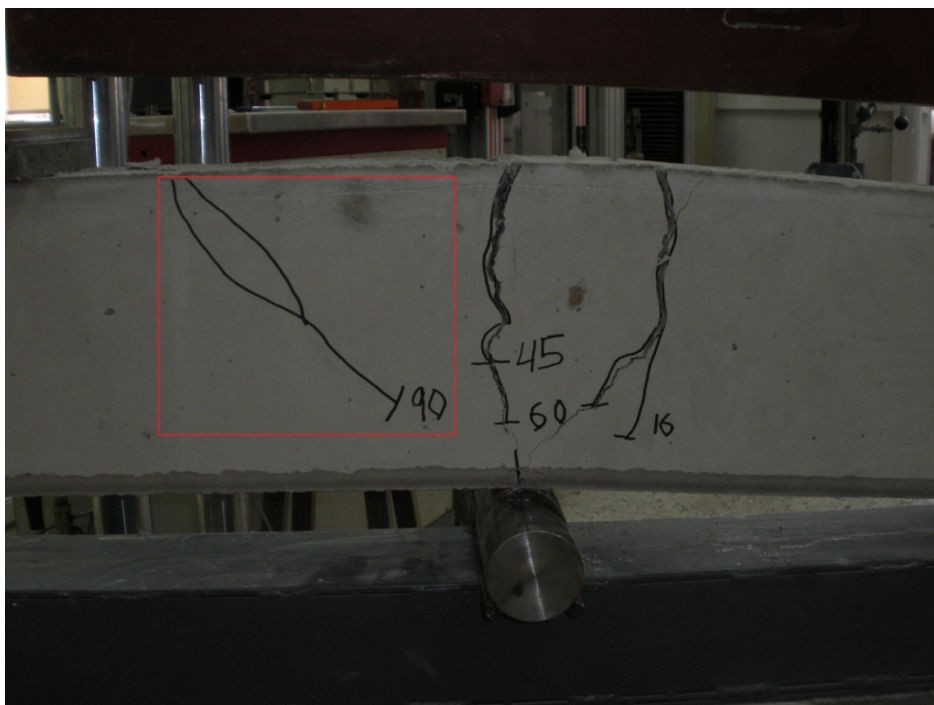
- Αναμενόμενος μηχανισμός κατάρρευσης



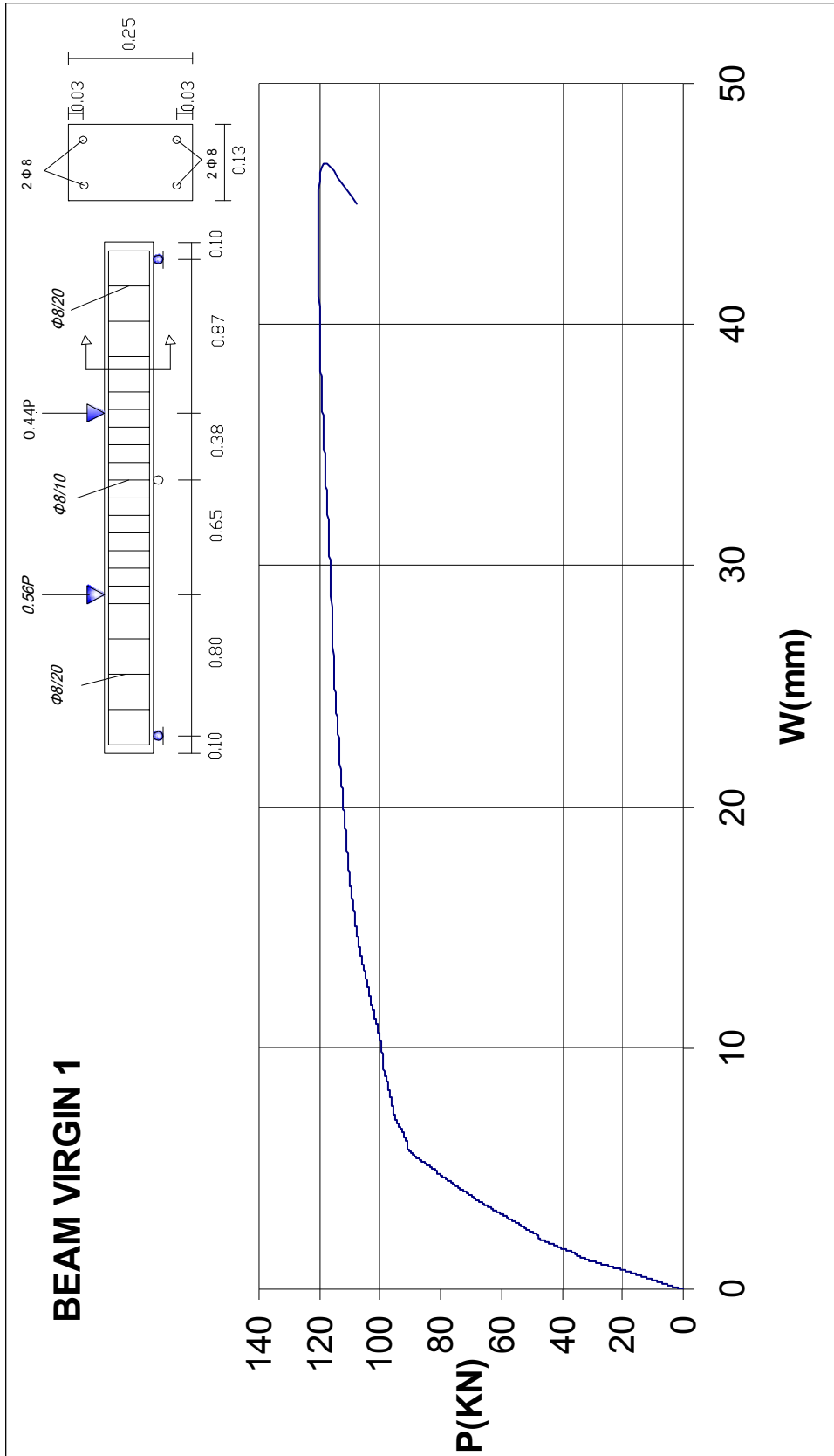
- Βελόμετρο



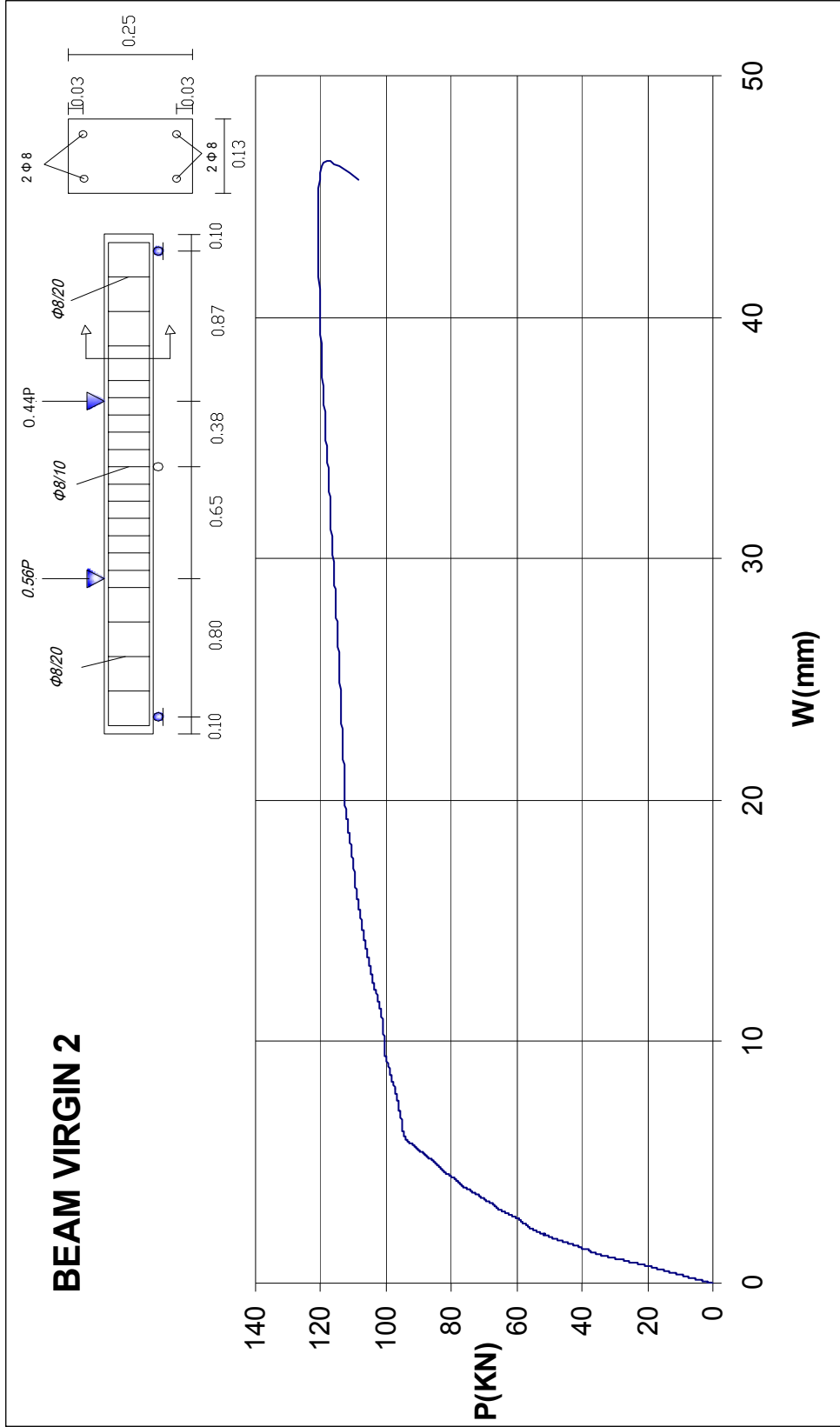
- Εμφάνιση διατμητικής ρωγμής



- Διαγράμματα Παραμόρφωσης - Βέλους κάμψης Virgin Δοκών



Διάγραμμα P-W πρώτης μάρτυρας δοκού ($P_y=90.66$ kN) ($P_{max}=120$ kN)



Διάγραμμα P-W δεύτερης μέγιστης δοκού ($P_{\gamma}=92.11$ KN) ($P_{\max}=120$ KN)

ii. Ενισχυμένοι Δοκοί

- Λείανση επιφανειών



- Κοπή υφασμάτων



- Καθαρισμός επιφανειών πριν την ενίσχυση



- Ακριβής ζύγιση αναλογιών των 2 συστατικών



- Ανάμιξη 2 συστατικών



- Προετοιμασία υποστρώματος



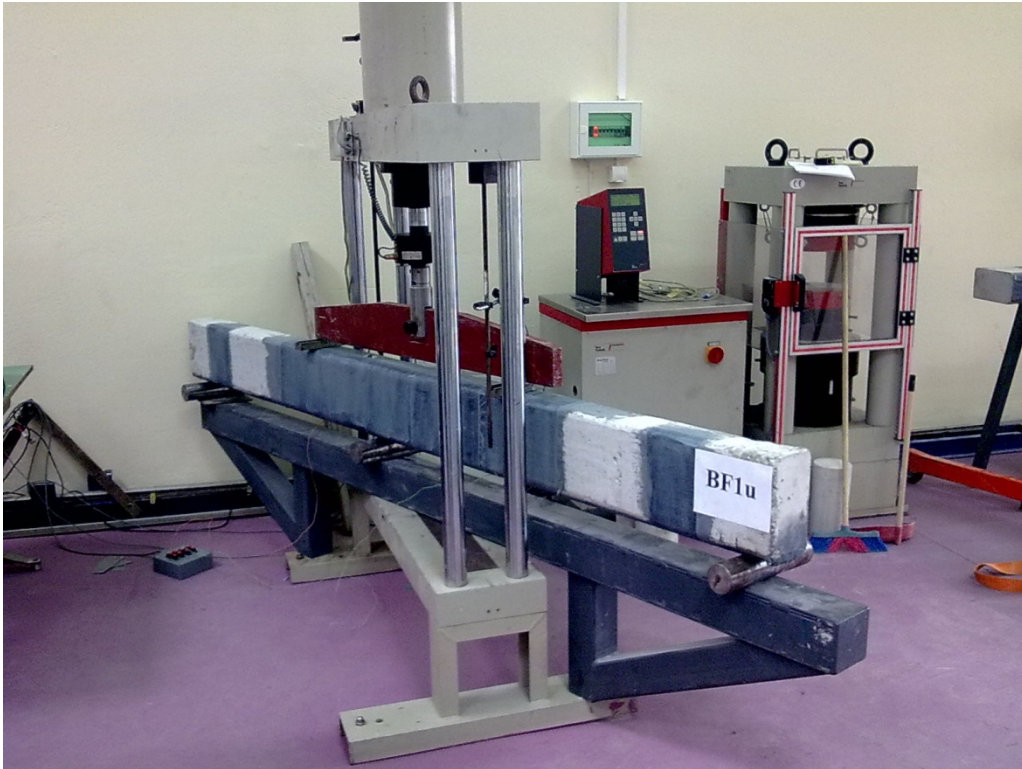
- 1^η στρώση εποξειδικής ρητίνης Sikadur®-330



- Τοποθέτηση υφασμάτων



- Υποβολή δοκών σε κάμψη



- Ενισχυμένη δοκός 1 – Ενισχυμένη δοκός 2

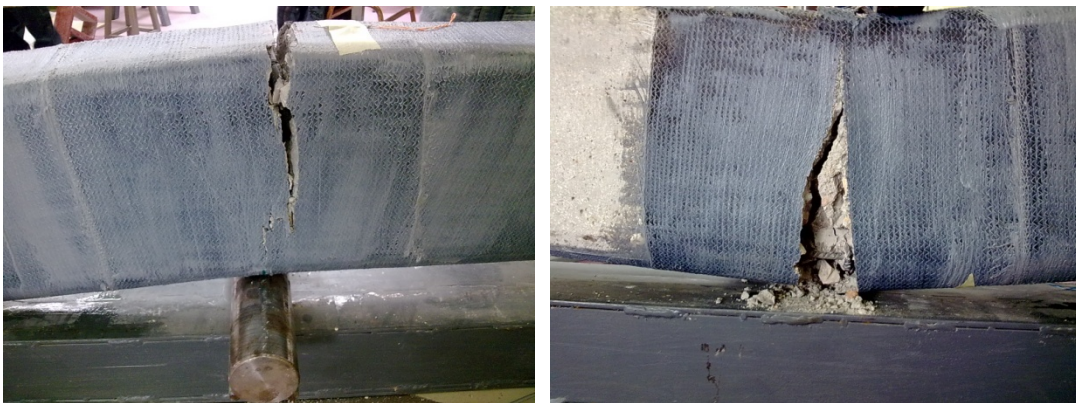


Σημείωση : Τα u και c έχουν να κάνουν με τον τρόπο αγκύρωσης των υφασμάτων. Στη δοκό 1 έχει γίνει αγκύρωση μορφής u, ενώ στη δοκό 2 έχει γίνει αγκύρωση με μορφή περίσφιξης.

- Κατάρρευση δοκών

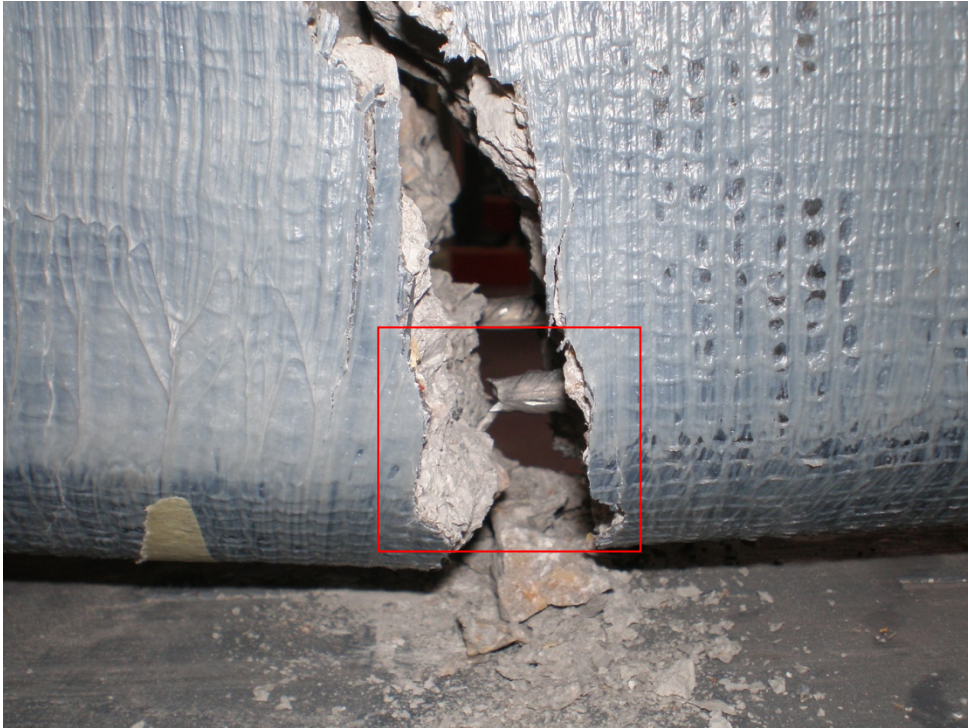


- Πλαστικές αρθρώσεις



Παρατηρούμε και πάλι ότι ο τρόπος κατάρρευσης των δοκών ταιριάζει απόλυτα με τον αναμενόμενο μηχανισμό κατάρρευσης που αναφέρεται στο θεωρητικό μέρος. Επίσης, γίνεται εμφανές από τις ρηγματώσεις της δοκού η δημιουργία των προσδοκόμενων πλαστικών αρθρώσεων στη μεσαία στήριξη και στο σημείο της μέγιστης φόρτισης.

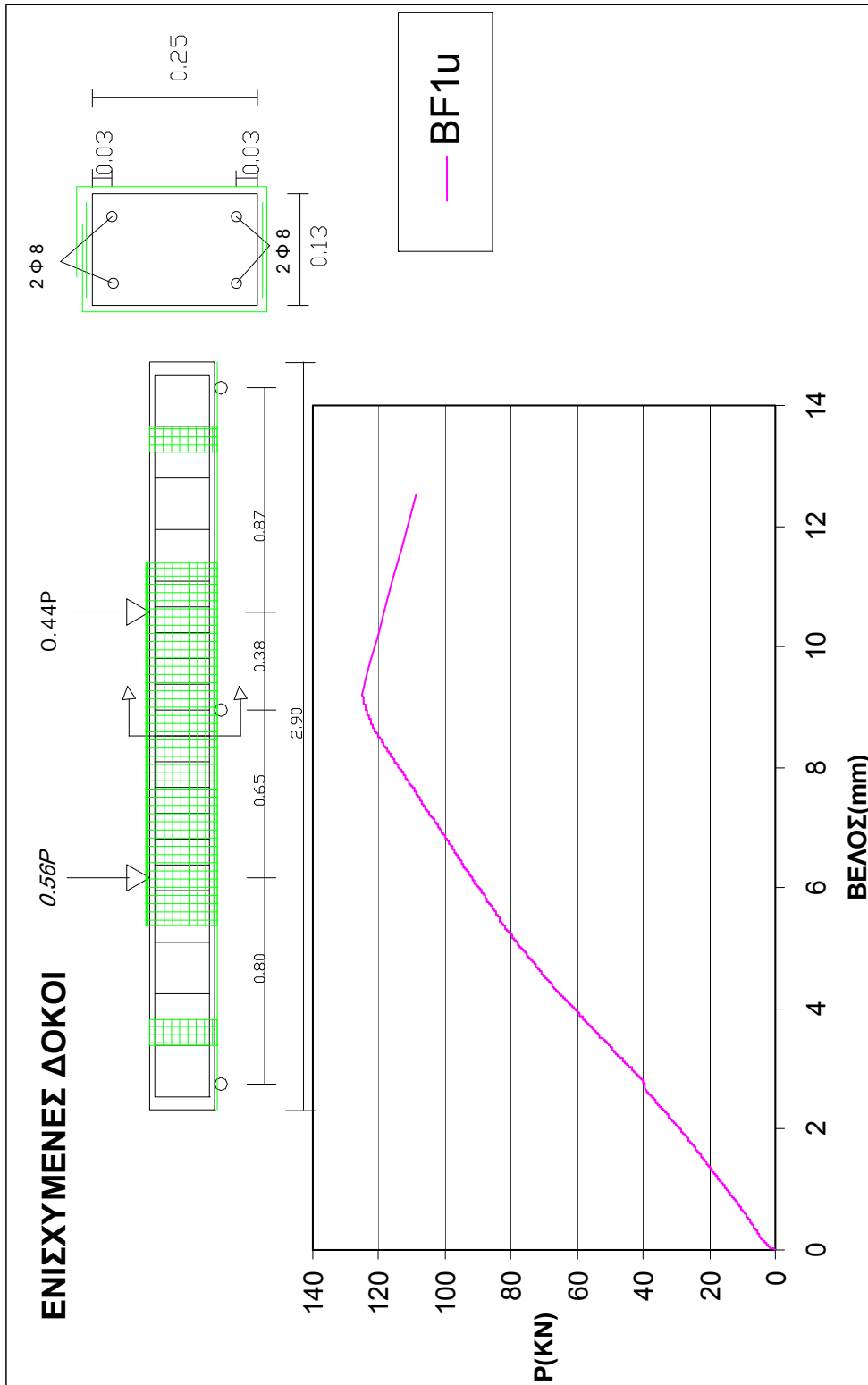
- Θραύση οπλισμού



- Αποσάθρωση σκυροδέματος

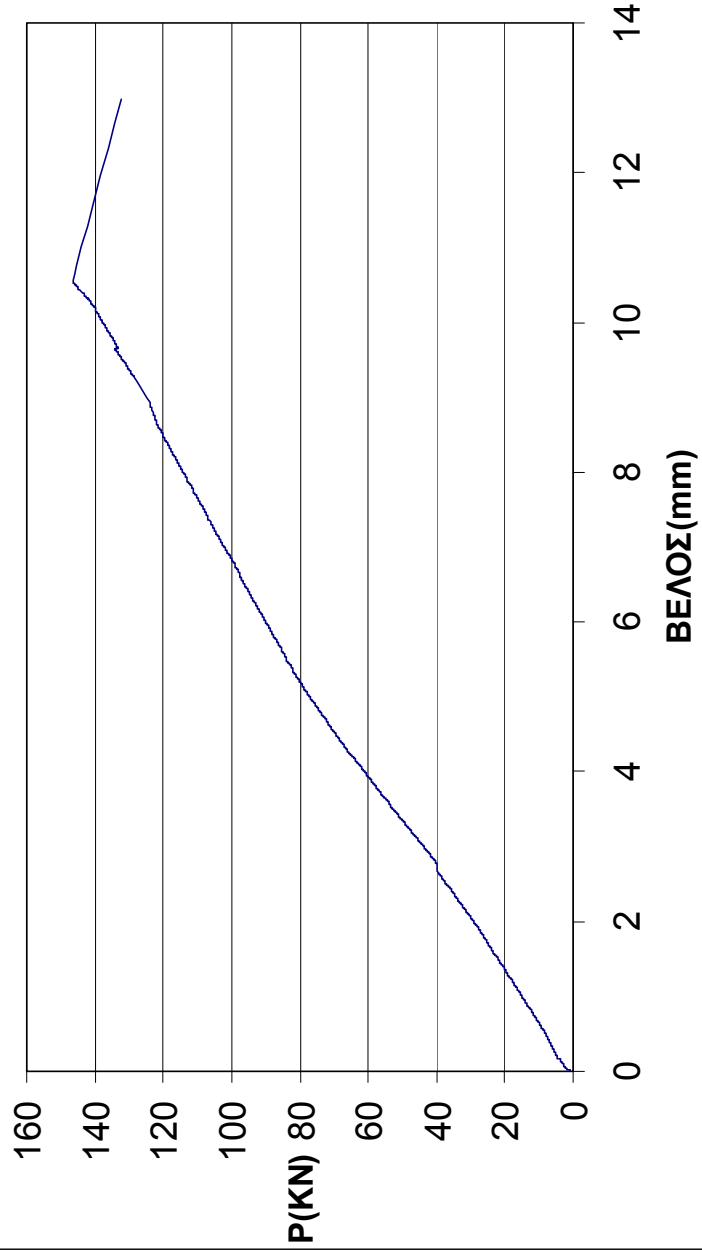
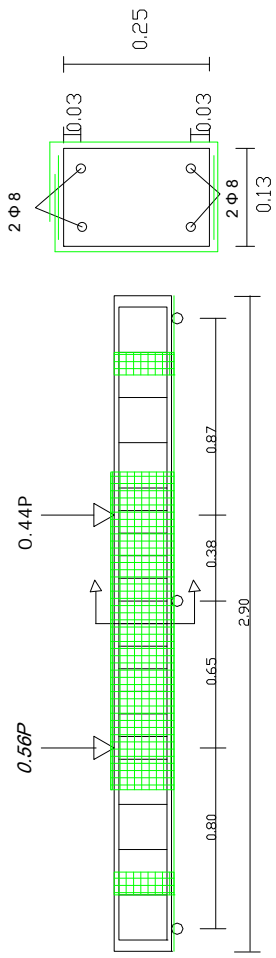


- Διαγράμματα Παραμόρφωσης - Βέλους κάμψης Ενισχυμένων Δοκών



Διάγραμμα P-W ενισχυμένης δοκού με CFRP συγκολλημένο στα άκρα του με U-Strip από CFRP

ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΕΣ ΔΟΚΟΙ



— BF2c

Διάγραμμα P-Δ ενισχυμένης δοκού με CFRP πλήρως περισφιγμένο στα άκρα του με CFRP

iii. Αποτελέσματα

- Θεωρητικό μέρος

- Virgin Δοκοί $\rightarrow M_{rd} = 11.42 \text{ kNm} \rightarrow$

$$P_{\max} = M_{rd}/0.129 \Rightarrow P_{\max} = 88.53 \text{ kN}$$

$$V_{sd} = 0.41P_{\max} \Rightarrow V_{sd} = 36.3 \text{ kN}$$

- Ενισχυμένοι Δοκοί $\rightarrow M_{rd} = 16.70 \text{ kNm} \rightarrow$

$$P_{\max} = M_{rd}/0.129 \Rightarrow P_{\max} = 129.46 \text{ kN}$$

$$V_{sd} = 0.41P_{\max} \Rightarrow V_{sd} = 53.08 \text{ kN}$$

- Ενίσχυση σε τέμνουσα \rightarrow

Υπολογίσαμε ότι με μια στρώση υφάσματος SikaWrap - 150 C/30 η δοκός θα μπορούσε να παραλάβει επιπλέον φορτίο 25.7 kN.

Συνολικά

1. Μέγιστη ροπή κάμψης **maxM = 11.42 kNm**
2. Μέγιστο διατμητικό φορτίο **maxQ = 36.3 kN**
3. Με χρήση FRPs \rightarrow **maxM = 16.70 kNm**
maxQ = 53.08 kN

$$11.42 \text{ kNm} \rightarrow 16.70 \text{ kNm} \rightarrow \text{Αύξηση } 46.23 \%$$

$$36.30 \text{ kN} \rightarrow 53.08 \text{ kN} \rightarrow \text{Αύξηση } 46.23 \%$$

Έτσι, με την εφαρμογή των υφασμάτων πετύχαμε - αναμένουμε μια αύξηση αντοχής, σε κάμψη και διάτμηση, ίση με 46.23 %.

Σημείωση: Σύμφωνα με τον προσδοκώμενο μηχανισμό κατάρρευσης, όπως έχει αναφερθεί και στη σελ.28, αναμενόταν αστοχία της δοκού σε κάμψη και όχι σε διάτμηση. Εντούτοις, στην κρίσιμη περιοχή έγινε περίσφιξη της δοκού με μια στρώση SikaWrap – 150 C/30.

Έτσι, αν υποθέσουμε ότι η virgin δοκός κατέρρευε λόγω διατμητικών φορτίων με $V_{sd} = 36.3 \text{ kN}$, τότε τα 25.7 kN επιπλέον φορτίο που θα μπορούσε να παραλάβει μετά την ενίσχυση θα επαρκούσαν καθώς,

$$53.08 \text{ kN} < 36.3 + 25.7 = 62 \text{ kN}$$

- Πειραματικό μέρος

- Virgin Δοκοί →

Από τα διαγράμματα προκύπτουν φορτία διαρροής :

90.66 kN για την BV1

92.11 kN για την BV2

Παρατηρούμε ότι οι τιμές που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία για τις Virgin Δοκούς βρίσκονται αρκετά κοντά στις αναμενόμενες των θεωρητικών υπολογισμών.

- Ενισχυμένοι Δοκοί →

Από τα διαγράμματα προκύπτουν φορτία διαρροής :

122.70 kN για την BF1u

144.25 kN για την BF2c

Στην περίπτωση των ενισχυμένων δοκών οι αποκλίσεις είναι κάπως μεγαλύτερες, πράγμα που πιθανότατα οφείλεται σε τυχόν ατέλειες κατά την φάση της ενίσχυσης. Ακόμα, πιθανή αιτία είναι η διαφοροποίηση στην επικάλυψη των οπλισμών ή μια μικρή διαφορά στην διάταξη των φορτίων.

- Συμπεράσματα

Και στις δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα που παίρνουμε από τα διαγράμματα Φορτίου – Βέλους κάμψης βρίσκονται, σε λογικά και πειραματικά πλαίσια, κοντά στα προσδοκώμενα αποτελέσματα.

Έτσι, με την ενίσχυση που επιλέχτηκε, κατά το θεωρητικό μέρος, για τις δοκούς μας, έχουμε σαν αποτέλεσμα μια κατά μέσον όρο αύξηση αντοχής > 40%.

VI. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Bournas D., Lontou P., Papanicolaou C., Triantafillou T. (2006), “Textile-Reinforced Mortar (TRM) versus FRP Confinement in Reinforced Concrete Columns”, *ACI Structural Journal*, (accepted).
2. Triantafillou T., Papanicolaou C. (2004), “Shear Strengthening of Reinforced Members with Textile Reinforced Mortar (TRM) Jackets”, *Rilem Materials and Structures*.
3. Triantafillou T., Papanicolaou C., Zissimopoulos P., Laourdekis T. (2006), “Concrete confinement with Textile Reinforced Mortar (TRM) Jackets”, *ACI Structural Journal*, 103, V.1, pp.28-37, 2006.
4. Δρίτσος Σ.(2002), “Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα”, *Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών*, Πάτρα 2002.
5. Τριανταφύλλου Αθ. (2005), “Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με σύνθετα υλικά (ινοπλισμένα πολυμερή)”, *Πανεπιστήμιο Πατρών 2η έκδοση*, 2005.
6. Τριανταφύλλου, Αθ. Χ. (2001), “Δομικά Υλικά”, *Βιβλιοπωλείο Παπασωτηρίου Πάτρα*, 2001.
7. Elsanadedy H., Haroun M. (2005), “Seismic Design Criteria for Circular Lap-Spliced Reinforced Concrete Bridge Columns Retrofitted with Fiber-Reinforced Polymer Jackets”, *ACI Structural Journal* / May-June 2005, Title no. 102-S35.
8. Hamad B., Rteil Ahmad, Salwan B., Soudki K., “Behavior of Bond-Critical Regions Wrapped with Fiber-Reinforced Polymer Sheets in Normal and High- Strength Concrete”, *Journal of Composites for Construction*, May-June 2004.
9. Harries Kent, Ricles James, Pessiki Stephen, Sause Richard (2004), “Rehabilitation of Lap-Splices in Non-Ductile Reinforced Concrete Columns using CFRP Jackets”.
10. Teng J.G, De Lorentzis L., Bo Wang, Rong Li, Wong T.N., Lam Lik. (2006), “Debonding failures of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP Strips”, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2006.