



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΤΟ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΟ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΣΤΑΔΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ
ΔΟΚΟ»



ΜΑΡΙΟΛΗ ΛΙΤΣΑ (Α.Μ. 6882)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΥΤΟΥΣΜΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2021-2022

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Μαριόλη Λίτσα του Γρηγορίου, με αριθμό μητρώου 6882 φοιτήτρια του Προγράμματος Διπλωματικών Σπουδών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα



Η Διπλωματική Εργασία Εξετάστηκε Επιτυχώς από την κάτωθι
Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή

Σταυρούλα Δενεζάκη
Λέκτορα – Εφαρμογών

Τριαντάφυλλος – Φίλης Κόκκινος
Αναπληρωτής Καθηγητής



Μαρία Αλογομιά
Ακαδημαϊκή Υπότροφος

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο διεξαγωγής διπλωματικής εργασίας κατά το ακαδημαϊκό έτος 2021-2022 του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Το θέμα της εργασίας αφορά τη διερεύνηση στο προεντεταμένο σκυρόδεμα και τα στάδια ελέγχου σε δοκό. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην επεξήγηση του προεντεταμένου σκυροδέματος και στην ανάλυση αμφιέριστης δοκού προέντασης.

Το ενδιαφέρον μου για την διερεύνηση του προεντεταμένου σκυροδέματος αναπτύχθηκε έπειτα από παρακολούθηση του συγκεκριμένου μαθήματος της σχολής. Γενικά, βρίσκω ενδιαφέρον τον χώρο του σκυροδέματος και έπειτα από το συγκεκριμένο μάθημα, διαπίστωσα ότι με ενδιαφέρει ιδιαίτερα να μελετήσω εκτεταμένα και με χρήση άσκησης την χρήση της προέντασης στις κατασκευές.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω την βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου και τις εγκάρδιες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κύριο Αυτουσμή Αθανάσιο για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του, για την ακαδημαϊκή καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε σ' όλη τη πορεία διεκπεραίωσης της διπλωματικής μου εργασίας.

Περιεχόμενα

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
Περιεχόμενα	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	10
Περίληψη.....	11
Abstract	12
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή.....	13
Κεφάλαιο 2 – Προεντεταμένο σκυροδέμα	17
2.1 Ιστορική αναδρομή του προεντεταμένου σκυροδέματος	18
2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του προεντεταμένου σκυροδέματος	20
2.3 Προένταση και μετάταση	21
2.4 Επίπεδα προέντασης.....	24
2.4.1 Εξωτερική ή εσωτερική προένταση	24
2.4.2 Γραμμική προένταση	25
2.4.3 Κυλινδρική προένταση	25
2.4.4 Άλλοι τύποι προέντασης	26
2.4.5 Ανάλογα με την πρόβλεψη για εφελκυστικές τάσεις και ρηγμάτωση	26
2.4.6 Ανάλογα με τον τρόπο συνεργασίας τένοντα και σκυροδέματος.....	27
2.4.7 Ανάλογα με τις διευθύνσεις επιβολής προέντασης	28
2.5 Απώλειες προέντασης.....	29
2.5.1 Ελαστική βράχυνση (ES).....	30
2.5.2 Ερπυσμός σκυροδέματος (CR)	30
2.5.3 Συρρίκνωση σκυροδέματος (SH).....	30
2.5.4 Χαλάρωση (RE)	31
2.5.5 Κάμπερ και εκτροπή.....	31
2.6 Μέθοδοι πρόβλεψης απωλειών πριν από την καταπόνηση	32
2.6.1 Μέθοδοι χρονικού βήματος.....	32
2.6.2 Εκλεπτυσμένες μέθοδοι	32
2.6.3 Μέθοδοι χονδροειδούς εκτίμησης	33
Κεφάλαιο 3 – Υλικά για την κατασκευή προεντατωμένων δοκών	34
3.1 Υλικά.....	34
3.2 Χάλυβες υψηλής αντοχής.....	36
3.3 Εφαρμογή της προεντάσεως.....	39
3.3.1 Συστήματα αγκυρώσεως.....	40
Κεφάλαιο 4 - Διαδικασία παραγωγής δοκών προενταμένου σκυροδέματος.....	43

4.1. Προένταση.....	43
4.1.1. Προετοιμασία του καλουπιού.....	43
4.1.2. Τοποθέτηση οπλισμού.....	44
4.1.3. Προένταση.....	44
4.1.4. Χύτευση σκυροδέματος.....	45
4.1.5. Αφαίρεση του καλουπιού.....	45
4.1.6. Αποθήκευση.....	45
4.2. Μεταένταση.....	46
4.2.1. Τοποθέτηση οπλισμού και αγωγού.....	46
4.2.2. Προένταση.....	46
Κεφάλαιο 5 – Δύναμη προέντασης σε προεντεταμένο σκυρόδεμα.....	49
5.1 Υπολογισμός τάσεων.....	49
5.2 Υπολογισμοί δύναμης προέντασης.....	51
Κεφάλαιο 6 – Δυνάμεις προέντασης σε κατασκευές από προεντεταμένο σκυρόδεμα.....	53
6.1 Κριτήρια αξιολόγησης.....	54
6.2 Μέθοδοι δόνησης.....	56
Κεφάλαιο 7 - Επίλυση Εφαρμογής Αμφιέριστης δοκού με συμμετρικό παραβολικό τένοντα.....	64
7.1 Δεδομένα υλικών και προέντασης.....	64
7.1.2 Γεωμετρία των Προεντεταμένων Δοκών (Διαστασιολόγηση).....	64
7.2 Υπολογισμός του Ίδιου Βάρους της Διατομής.....	65
7.3 Υπολογισμός των Ροπών της Αμφιέριστης Δοκού λόγω των μονίμων και των κινητών φορτίων.....	66
7.4 Υπολογισμός του Κέντρου Βάρους της Διατομής.....	66
7.5 Υπολογισμός της Ροπής Αδράνειας και της Ροπής Αντίστασης της Διατομής περί τον κύριο άξονα της.....	66
7.6 Υπολογισμός του πυρήνα της Διατομής.....	67
7.7 Διαδικασία προελέγχου διατομής.....	67
7.8 Προεκτίμηση Δύναμης Προέντασης.....	69
7.9 Προσδιορισμός θέσης τένοντα στην μεσαία διατομή της δοκού.....	69
7.10 Τελική Εκτίμηση της Δύναμης Προέντασης.....	70
7.11 Υπολογισμός χαρακτηριστικών της Καθαρής και της Ιδεατής διατομής της Δοκού στην μεσαία διατομή.....	70
7.12 Υπολογισμός Στιγμαίων (Άμεσων) απωλειών.....	74
7.12.1 Υπολογισμός Στιγμαίων (Άμεσων) απωλειών- Τριβές.....	75
7.12.2 Αμφίπλευρη προένταση από τις στηρίξεις A, B.....	75
7.12.3 Μονόπλευρη προένταση από την στηρίξη A.....	75
7.12.4 Υπολογισμός Στιγμαίων (Άμεσων) απωλειών- Ολίσθηση του Τένοντα στην αγκύρωση.....	75
7.13 Κατανομή προέντασης σε κάθε μία από τις 2 περιπτώσεις.....	76
7.14 Υπολογισμός Χρόνιων Απωλειών στην θέση A.....	76
7.14.1 Συστολή ξηράνσεως του σκυροδέματος.....	77
7.14.2 Αυτογενής συρρίκνωση του σκυροδέματος.....	77

7.14.3 Ερπυσμός του σκυροδέματος.....	78
7.14.4 Χαλάρωση τένοντα.....	78
7.14.5 Αλληλεπίδραση χρόνιων απωλειών στη θέση Α.....	79
7.15 Υπολογισμός Χρόνιων Απωλειών στην θέση Μ.....	80
7.15.1 Συστολή ξηράνσεως του σκυροδέματος.....	80
7.15.2 Αυτογενής συρρίκνωση του σκυροδέματος.....	80
7.15.3 Ερπυσμός του σκυροδέματος.....	80
7.15.4 Χαλάρωση τένοντα.....	80
7.15.5 Αλληλεπίδραση χρόνιων απωλειών.....	81
7.16 Υπολογισμός Χρόνιων Απωλειών στην θέση Β.....	81
7.16.1 Συστολή ξηράνσεως του σκυροδέματος.....	82
7.16.2 Αυτογενής συρρίκνωση του σκυροδέματος.....	82
7.16.3 Ερπυσμός του σκυροδέματος.....	82
7.16.4 Χαλάρωση τένοντα.....	82
7.16.5 Αλληλεπίδραση χρόνιων απωλειών.....	82
7.17 Κατανομή της δύναμης προέντασης κατά μήκος της δοκού.....	83
7.18 Έλεγχος τάσεων του τένοντα κατά μήκος της δοκού.....	85
7.19 Έλεγχος Ο.Κ.Α. σε ρηγμάτωση στη θέση Μ.....	86
7.20 Έλεγχοι περιορισμού των θλιπτικών τάσεων.....	86
7.21 Έλεγχος Ο.Κ.Α σε ορθή ένταση στη θέση Μ.....	87
7.21.1 Προσδιορισμός οριακού επιπέδου αστοχίας.....	88
7.21.2 Παραμορφώσεις χαλαρών χαλύβων.....	88
7.21.3 Δυνάμεις χαλαρών χαλύβων.....	88
7.21.4 Νέα δοκιμή (τελική).....	89
7.21.5 Υπολογισμός της ροπής αντοχής της διατομής MR,d	91
7.22 Έλεγχος Ο.Κ.Α σε διάτμηση στη στήριξη Α.....	92
7.22.1 Θέσεις ελέγχου.....	92
7.22.2 Υπολογισμός δρώσας τέμνουσας σχεδιασμού VEd,x	93
7.22.3 Υπολογισμός αντοχής σχεδιασμού VRd,c	94
7.23 Έλεγχος-οπλισμοί διάτμησης.....	95
7.23.1 Ελάχιστος οπλισμός διάτμησης.....	96
7.23.2 Μέγιστη απόσταση μεταξύ οπλισμών διάτμησης.....	96
7.23.3 Μέγιστη απόσταση μεταξύ των σκελών των συνδετήρων.....	96
7.24 Σχεδιασμός περιοχής αγκύρωσης της διατομής.....	96
Κεφάλαιο 8 – Συμπεράσματα.....	100
Κεφάλαιο 9 – Βιβλιογραφία.....	102

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Διεργασία προέντασης.	14
Εικόνα 2: Ακολουθία που δείχνει την επίδραση της δύναμης προέντασης στα διαφορετικά στάδια.	15
Εικόνα 3: Προεντεταμένο σκυρόδεμα (Hannant & Rama Sreekanth, 2018)	20
Εικόνα 4: Προεντεταμένη κλίνη.....	22
Εικόνα 5: Δοκός μετά από μετάταση.	22
Εικόνα 6: Εξωτερική προένταση κιβωτίου δοκού (https://old.amu.ac.in/emp/studym/99992327.pdf)	24
Εικόνα 7: Εσωτερική προένταση σε δομή «κιβωτίου» δοκού (https://old.amu.ac.in/emp/studym/99992327.pdf).	25
Εικόνα 8: Γραμμικά προεντεταμένες στρωτήρες σιδηροδρόμου (https://old.amu.ac.in/emp/studym/99992327.pdf)	25
Εικόνα 9: Κυκλικά προεντεταμένη δομή συγκράτησης (https://old.amu.ac.in/emp/studym/99992327.pdf)	26
Εικόνα 10: Διαξονική προένταση πλάκας (https://old.amu.ac.in/emp/studym/99992327.pdf)	29
Εικόνα 11: Απεικόνιση προέντασης και ύστερης συμπεριφοράς του προεντεταμένου σκυροδέματος (Pretensioned Concrete, n.d.)	29
Εικόνα 12: Επιθυμητές ιδιότητες σκυροδέματος.	34
Εικόνα 13: Διατομή τένοντα προέντασης.	37
Εικόνα 14: Μορφές ράβδων προέντασης.	38
Εικόνα 15: Συστήματα Freyssinet.	40
Εικόνα 16: Συστήματα CCL.....	41
Εικόνα 17: Συστήματα VSL.....	41
Εικόνα 18: Σύστημα MeKano.	41
Εικόνα 19: Σύστημα DYWIDAG.....	42
Εικόνα 20: Σύστημα BBRV.	42
Εικόνα 21: Καλούπι δοκών προέντασης.	44
Εικόνα 22: Εξοπλισμός για την παραγωγή δοκών προέντασης.	44
Εικόνα 23: Αποθήκευση δοκών προέντασης.	45
Εικόνα 24: Υδραυλικός γρύλος για προένταση (α) και εξοπλισμός αγκυρώσεως (β).....	47
Εικόνα 25: Εξωτερική διαδικασία προέντασης.	48
Εικόνα 26: Κατανομή τάσεων σκυροδέματος από έκκεντρη δύναμη προέντασης και υπερτιθέμενα φορτία.	50
Εικόνα 27: Ντυμένοι τένοντες.....	51
Εικόνα 28: Διακύμανση της ακαμψίας σε εφαρμογή κάμψης με αξονική (προένταση) δύναμη (Saiidi et al., 1994).	58
Εικόνα 29: Ανάλυση παλινδρόμησης της θεμελιώδους συχνότητας με φορτίο μετατάσεως για (α) μια μη ραγισμένη δοκό και (β) μια ραγισμένη δοκό (D Noble et al., 2015).	59
Εικόνα 30: Μέσα δυναμικών δεδομένων δοκιμής με μεταβαλλόμενο φορτίο για (α) μια λεπτή δοκό και (β) μια στιβαρή δοκό (Darragh Noble et al., 2015).	61
Εικόνα 31: Όργανα δοκού προεντεταμένου σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε στις μελέτες των Kim et al. (2010) που δείχνει ένα πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα με τη μορφή έμπλαστρου Macro-Fiber Composite (MFC) σε πλάκα αγκύρωσης.....	63

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Διαστάσεις δοκού.	65
Διάγραμμα 2: Αμφιέριστη δοκός με παραβολική τροχιά κατά μήκος της δοκού (<i>Πηγή Autocad</i>).	65
Διάγραμμα 3: Καθαρή διατομή (netto) (<i>Πηγή Autocad.</i>)	73
Διάγραμμα 4: Ιδεατή Διατομή (<i>Πηγή Autocad</i>).	74
Διάγραμμα 5: Διάγραμμα κατανομής της δύναμης προέντασης κατά μήκος της δοκού για την περίπτωση της αμφίπλευρης προέντασης για χρόνους $t=0$ (μετά τις στιγμιαίες απώλειες) και για $t=\infty$ (μετά τις στιγμιαίες και τις χρόνιες απώλειες). (<i>Πηγή Autocad</i>).	84
Διάγραμμα 6: Διάγραμμα κατανομής της δύναμης προέντασης κατά μήκος της δοκού για την περίπτωση της μονόπλευρης προέντασης για χρόνους $t=0$ (μετά τις στιγμιαίες απώλειες) και για $t=\infty$ (μετά τις στιγμιαίες και τις χρόνιες απώλειες) (<i>Πηγή Autocad</i>).	84
Διάγραμμα 7: Διάγραμμα παραμορφώσεων δυνάμεων σ - ϵ της διατομής (<i>Πηγή Autocad</i>).	91
Διάγραμμα 8: Αγκύρωση τένοντα στη στήριξη Α. Η αγκύρωση είναι κεντροβαρική, η πλάκα αγκύρωσης που χρησιμοποιείται είναι 20/25cm και το ομοιόθετο σχήμα έχει διαστάσεις 30/37.5cm (<i>Πηγή Autocad</i>).	99

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετάται η τεχνολογία της προέντασης του σκυροδέματος κατασκευών διαφόρων κτιρίων και υποδομών. Αρχικά δίνεται μια ιστορική αναδρομή της υπάρχουσας τεχνολογίας και ο ορισμός του προεντεταμένου σκυροδέματος. Παρουσιάζονται συνοπτικά οι δύο τεχνικές προέντασης των δοκών και του σκυροδέματος, αλλά και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής. Συνεχίζοντας δίνονται οι πιο διαδεδομένοι τρόποι απώλειας των επιθυμητών ιδιοτήτων της προέντασης αλλά και οι τρόποι που υπάρχουν σήμερα για τη μέτρηση τον καθορισμό και την πρόβλεψη των ιδιοτήτων των δοκών με την πάροδο του χρόνου χρήσης τους. Συζητούνται τα βασικά υλικά που αποτελούν τις προεντεταμένες δοκούς, αλλά και οι διαθέσιμες τεχνολογίες για την επίτευξη της προέντασης. Τέλος, δίνονται συνοπτικά οι διαδικασίες παραγωγής τόσο για σκυρόδεμα με προένταση, όσο και για αυτό με μετατάνυση. Στη συνέχεια ακολουθεί ένα παράδειγμα επίλυσης αμφιέριστης δοκού με συμμετρικό παραβολικό τένοντα. Προσδιορίστηκε η δύναμη προέντασης με προέλεγχο στη μέση της δοκού και βρέθηκαν τα χαρακτηριστικά της *netto* και της ιδεατής διατομής. Στο επόμενο βήμα υπολογίσθηκαν κατά μήκος του τένοντα οι στιγμιαίες απώλειες σε δύο περιπτώσεις, πρώτα για την περίπτωση της αμφίπλευρης προέντασης και εν συνεχεία για την περίπτωση της μονόπλευρης προέντασης από την στήριξη. Ακολούθως υπολογίσθηκαν οι χρόνιες απώλειες στη θέση A, στη θέση M(μέσω της δοκού) και στη θέση B. Έπειτα πραγματοποιήθηκε η κατανομή της δύναμης προέντασης σε δύο περιπτώσεις για την περίπτωση της αμφίπλευρης προέντασης και για την περίπτωση της μονόπλευρης προέντασης από την στήριξη στο σημείο A. Επιπλέον διενεργήθηκαν οι εξής έλεγχοι: ο έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (Ο.Κ.Λ) έναντι ρηγματώσεως στη μέση της δοκού, ο έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (Ο.Κ.Α) έναντι ορθής έντασης στη μέση της δοκού και τέλος ο έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (Ο.Κ.Α) έναντι διάτμησης στη στήριξη A. Επίσης, σχεδιάσθηκε και η περιοχή αγκύρωσης στη διατομή.

Abstract

In the present work the technology of prestressing the concrete for construction purposes of various buildings and infrastructures is studied. First, a historical overview of the existing technology and the definition of prestressed concrete are given. The two techniques of prestressing the beams and the concrete are briefly presented, as well as the advantages and disadvantages of this technique. Furthermore, the most common ways of losing the desired properties of prestressing are given, as well as the techniques that exist today for measuring, determining, and predicting the change of properties of the used beams over time. The basic materials that constitute the prestressed beams are discussed, as well as the available technologies for achieving prestressing. Finally, the production procedures for both prestressed and metatanized concrete are briefly given. Additionally, an example of solving a beam with a symmetrical parabolic tendon is included. The pre-tensioning force was determined by pre-checking in the middle of the beam and the characteristics of the netto and the ideal cross-section were found. In the next step, the instantaneous losses along the tendon were calculated in two cases, first for the case of bilateral pre-tension and then for the case of unilateral tension from the support. The chronic losses in position A, position M (via the beam) and position B were then calculated. A. In addition, the following tests were performed: the test in Marginal State of Functionality (OKL) against cracking in the middle of the beam, the test in Marginal State of Failure (OKLA) against correct tension in the middle of the beam and finally the control in Marginal State of Failure (OKA) against shear in the support A. Also, the anchorage area in the cross section was designed.

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

Τα κύρια χαρακτηριστικά του σκυροδέματος είναι η μεγάλη αντοχή σε θλίψη και η πολύ μικρή αντοχή σε εφελκυσμό τα οποία οδήγησαν από πολύ νωρίς στην ιδέα τόσο του οπλισμένου όσο και του προεντεταμένου σκυροδέματος. Στο οπλισμένο σκυρόδεμα η ανάληψη των εφελκυστικών τάσεων γίνεται από το ενσωματωμένο χαλύβδινο οπλισμό, ενώ στο προεντεταμένο γίνεται προσπάθεια αναιρέσεως των εφελκυστικών τάσεων με την προσθήκη μιας κατάλληλης θλιπτικής δύναμης.

Οι αρχικές έρευνες για τα υλικά προέντασης απέτυχαν επειδή η δύναμη που ασκήθηκε σε αυτά σταδιακά εξασθενούσε ή εξαφανίστηκε με την πάροδο του χρόνου λόγω των ιδιοτήτων του υλικού όπως η συρρίκνωση ερπυσμού και ξήρανσης. Ο Freycinet (1926) συνειδητοποίησε ότι αυτές οι απώλειες είναι λίγο πολύ σταθερές και επομένως θα αποτελούν ένα μικρό ποσοστό των αρχικών τάσεων στην περίπτωση που οι αρχικές τάσεις στα υλικά έχουν αυξηθεί πολύ. Για αυτό το λόγο εισήγαγε τη χρήση υλικών με πολύ υψηλή αντοχή:

- Σκυρόδεμα με αντοχές 30 – 60MPa,
- Χάλυβα με όριο διαρροής 1400 ή 1500MPa.

Η δύναμη προέντασης είναι μια δύναμη που προστίθεται σε μια κατασκευή για να γίνει ισχυρότερη. Αυτή η δύναμη αποσκοπεί στη βελτίωση της στατικής λειτουργίας της κατασκευής. Η διατομή του προεντεταμένου σκυροδέματος μπορεί να θεωρηθεί ως μια διατομή οπλισμένου σκυροδέματος, ωστόσο εμφανίζει τις παρακάτω διαφορές:

- Ύπαρξη μιας σημαντικής θλιπτικής δύναμης
- Ύπαρξη δύο τύπων χαλύβων
- Ύπαρξη προμηκύνσεως στο χάλυβα υψηλής αντοχής

Η προένταση εφαρμόζεται με τους τένοντες. Διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

- Προένταση πριν από τη σκυροδέτηση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο τένοντας αποτελείται κυρίως από ευθύγραμμα τμήματα.
- Προένταση μετά τη σκυροδέτηση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο τένοντας ακολουθεί 'χάραξη που εφαρμόζεται καλύτερα στο διάγραμμα ροπών. Αρχικά, περιβάλλεται από ελαφρύ μεταλλικό σωλήνα και μετά την τάνυση

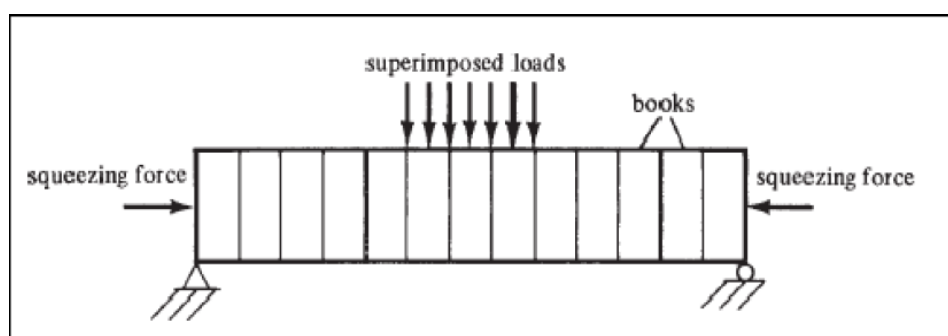
αποκαθίσταται η συνάρεια με τσιμεντένεση.

Μια ακόμη διάκριση είναι:

- Πλήρης προένταση όπου δεν επιτρέπει η εμφάνιση εφελκυστικών τάσεων.
- Περιορισμένη προένταση όπου επιτρέπει την εμφάνιση εφελκυστικών τάσεων, σε ορισμένες περιπτώσεις αλλά όχι την εμφάνιση ρηγματώσεως.
- Μερική προένταση όπου δεν τίθενται περιορισμοί εφελκυστικών τάσεων και ρηγματώσεως. Λειτουργεί ως ένα οπλισμένο σκυρόδεμα με τις πρόσθετες ιδιοτυπίες που αναφέρθηκαν προηγούμενα.

Γενικά ο σχεδιασμός προεντεταμένων φορέων απαιτεί αυξημένη ακρίβεια. Η προσθήκη μιας φόρτισης αντίθετης φοράς προς τα υπόλοιπα φορτία τροποποιεί τη γενική εικόνα της ασφάλειας. Ως αποτέλεσμα αντί μιας «πλευράς ασφαλείας» πλέον υπάρχει μια «ζώνη ή περιοχή ασφαλείας» από την οποία μπορούμε και πάλι να βγούμε και να βρεθούμε σε περιοχή κινδύνου αυξάνοντας ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη (Καραγιάννης, 2015).

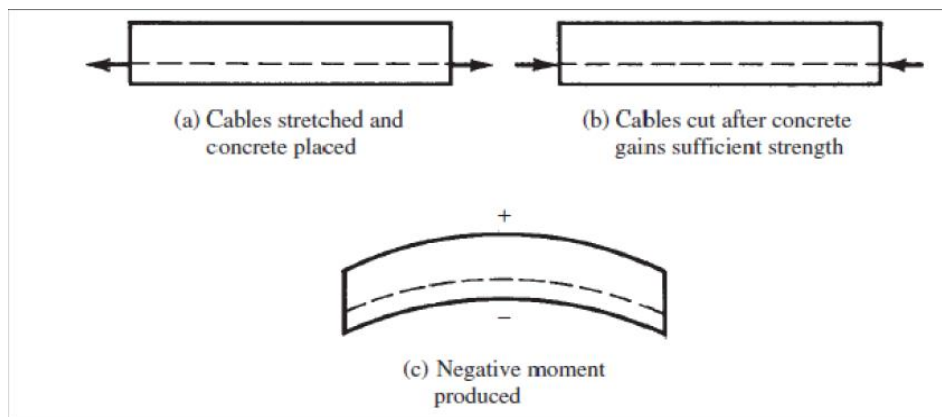
Η προένταση μπορεί να οριστεί ως η επιβολή εσωτερικών τάσεων σε μια δομή που έχει αντίθετο χαρακτήρα από αυτά που θα είναι που προκαλείται από τα φορτία εργασίας. Μια κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της προέντασης φαίνεται στην Εικόνα 1, όπου μια σειρά βιβλίων έχει συμπιεστεί μεταξύ τους από τα χέρια ενός ατόμου.



Εικόνα 1: Διεργασία προέντασης.

Η προκύπτουσα "δοκός" μπορεί να φέρει ένα φορτίο προς τα κάτω, εφόσον η θλιπτική τάση από τη συμπίεση στο κάτω μέρος της "δοκού" είναι μεγαλύτερη από την τάση εφελκυσμού εκεί από τη στιγμή που παράγεται από το βάρος των βιβλίων και τα υπερτιθέμενα φορτία. Μια τέτοια δοκός δεν έχει αντοχή σε εφελκυσμό και,

επομένως, δεν έχει αντίσταση ροπής μέχρι να συμπιεστεί ή να προενταθεί. Αυτό το συμπέρασμα θα μπορούσε πολύ απλά να επεκταθεί σε μια δοκό που αποτελείται από μια σειρά από τσιμεντόλιθους συμπιεσμένους μεταξύ τους και στη συνέχεια σε μια απλή δοκό από σκυρόδεμα με την αμελητέα αντοχή εφελκυσμού της παρόμοια με την προεντεταμένη. Η θεωρία της προέντασης είναι αρκετά απλή και χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια σε διάφορα είδη κατασκευών. Για παράδειγμα, τα ξύλινα βαρέλια έχουν κατασκευαστεί εδώ και πολύ καιρό με την τοποθέτηση σφιγμένων μεταλλικών λωρίδων γύρω τους, συμπιέζοντας έτσι τις ράβδους μεταξύ τους και φτιάχνοντας ένα σφιχτό δοχείο με αντίσταση στις εξωτερικές πιέσεις των κλειστών υγρών. Για δοκούς σκυροδέματος, η προένταση χρησιμοποιείται κυρίως για την εξουδετέρωση των τάσεων που προκαλούνται από το βάρος των μελών και τα υπερτιθέμενα φορτία. Εάν αυτά τα φορτία προκαλέσουν θετική ροπή σε μια δοκό, είναι δυνατό με προένταση να εισαχθεί μια αρνητική ροπή που μπορεί να εξουδετερώσει μέρος ή το σύνολο της θετικής ροπής. Μια συνηθισμένη δοκός πρέπει να έχει αρκετή αντοχή για να στηρίξει τον εαυτό της καθώς και τα άλλα φορτία, αλλά είναι δυνατό με την προένταση να παραχθεί μια αρνητική φόρτιση που θα εξαλείψει την επίδραση του βάρους της δοκού, δημιουργώντας έτσι μια «άβαρα δοκό».



Εικόνα 2: Ακολουθία που δείχνει την επίδραση της δύναμης προέντασης στα διαφορετικά στάδια.

Η Εικόνα 2 δίνει πιο λεπτομερή απεικόνιση της προέντασης. Υποτίθεται ότι έχουν γίνει τα ακόλουθα βήματα σχετικά με αυτή τη δοκό:

- Ατσάλινα νήματα (που αντιπροσωπεύονται από τις διακεκομμένες γραμμές) τοποθετήθηκαν στο κάτω μέρος της μορφής δοκού.
- Τα νήματα τεντώθηκαν σε πολύ υψηλή τάση.

- Το σκυρόδεμα τοποθετήθηκε στη φόρμα και αφέθηκε να αποκτήσει επαρκή ποσότητα αντοχή για τα προεντεταμένα νήματα που πρόκειται να κοπούν.
- Οι κλώνοι κόπηκαν. Τα κομμένα νήματα τείνουν να ξανανακτήσουν το αρχικό τους μήκος, συμπιέζοντας έτσι το κάτω μέρος της δοκού και προκαλώντας αρνητική ροπή κάμψης. Η θετική ροπή που προκαλείται από το βάρος της δέσμης και τυχόν υπερτιθέμενα φορτία βαρύτητας αντιτίθεται άμεσα από την αρνητική ροπή. Ένας άλλος τρόπος για να το εξηγήσουμε αυτό είναι να πούμε ότι έχει παραχθεί μια τάση συμπίεσης στο κάτω μέρος της δοκού αντίθετη ως προς την τάση εφελκυσμού που προκαλείται εκεί από τα φορτία εργασίας.

Κεφάλαιο 2 – Προεντεταμένο σκυρόδεμα

Με τον όρο προένταση εννοείται η επιβολή μιας επιπρόσθετης, ηθελιμένης και κατάλληλα προσχεδιασμένης θλιπτικής φόρτισης, η οποία στοχεύει στη βελτίωση της στατικής λειτουργίας του φορέα δια της μεγίστης κατά το δυνατόν εκμετάλλευσης των ιδιοτήτων των υλικών. Το προεντεταμένο σκυρόδεμα το χρησιμοποιούμε κυρίως στις κατασκευές. Είναι ουσιαστικά «προεντεταμένο» (συμπιέζεται) κατά την παραγωγή, με τρόπο που το ενισχύει έναντι των δυνάμεων εφελκυσμού που θα υπάρξουν όταν είναι σε λειτουργία. Το προεντεταμένο σκυρόδεμα είναι βασικά σκυρόδεμα στο οποίο εισάγονται εσωτερικές τάσεις κατάλληλου μεγέθους και κατανομής έτσι ώστε οι τάσεις που προκύπτουν από τα εξωτερικά φορτία να εξουδετερώνονται στον επιθυμητό βαθμό. Αυτή η συμπίεση παράγεται από την τάνυση των «τενόντων» υψηλής αντοχής που βρίσκονται μέσα ή δίπλα στο σκυρόδεμα γίνεται για να βελτιωθεί η απόδοση του σκυροδέματος κατά την λειτουργία. Οι τένοντες μπορεί να αποτελούνται από ενιαία σύρματα, πολυκλωνικά σύρματα ή ράβδους με σπείρωμα που είναι πιο συχνά κατασκευασμένα από χάλυβα υψηλής αντοχής, ίνες άνθρακα ή ίνες αραμιδίου. Η ουσία του προεντεταμένου σκυροδέματος είναι ότι μόλις εφαρμοστεί η αρχική συμπίεση, το προκύπτων υλικό έχει τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος υψηλής αντοχής όταν υπόκειται σε τυχόν μεταγενέστερες δυνάμεις συμπίεσης και από όλκιμο χάλυβα υψηλής αντοχής όταν υπόκεινται σε δυνάμεις εφελκυσμού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πολλές περιπτώσεις σε μια πιο βελτιωμένη δοκιμή ικανότητα ή δυνατότητα συντήρησης σε σύγκριση με το συμβατικό οπλισμένο σκυρόδεμα. Σε ένα προεντεταμένο μέλος σκυροδέματος, ο μελετητής εισάγει τάσεις στην κατασκευή με προγραμματισμένο τρόπο ώστε οι τάσεις που προκύπτουν από τα επιβαλλόμενα φορτία να εξισορροπούνται στον επιθυμητό βαθμό. Το προεντεταμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα κτιριακών και αστικών κατασκευών όπου η βελτιωμένη απόδοση του μπορεί να επιτρέψει μεγαλύτερα ανοίγματα, μειωμένα δομικά πάχη και εξοικονόμηση υλικών σε σύγκριση με το απλό οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν πολυώροφα κτίρια, πλάκες κατοικιών, συστήματα θεμελίωσης, κατασκευές γεφυρών και φραγμάτων, σιλό και δεξαμενές, βιομηχανικά πεζοδρόμια και κατασκευές πυρηνικής συγκράτησης. Η πρώτη φορά που χρησιμοποιήθηκε ήταν στα τέλη του δέκατου ένατου αιώνα. Το προεντεταμένο σκυρόδεμα αναπτύχθηκε εκτός από την

προένταση και για να συμπεριλάβει τη μεταάνυση, η οποία συμβαίνει μετά τη χύτευση του σκυροδέματος. Ένα σύστημα τάνυσης μπορεί να χαρακτηριστεί είτε ως *monostrand*, όπου το σκέλος ή το σύρμα κάθε τένοντα του τονίζεται μεμονωμένα ή ως *σκέλος πολλαπλό*, όπου όλα τα νήματα ή σύρματα σε ένα τένοντα τανύζονται ταυτόχρονα. Οι τένοντες μπορούν να βρίσκονται είτε εντός του όγκου του σκυροδέματος (εσωτερική προένταση), είτε εξ' ολοκλήρου έξω αυτού (εξωτερική προένταση). Το προεντεταμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιεί τένοντες που είναι στενά συνδεδεμένοι με το σκυρόδεμα. Το μετα-ενταμένο σκυρόδεμα, από την άλλη πλευρά, μπορεί να χρησιμοποιήσει είτε συνδεδεμένους είτε μη συνδεδεμένους τένοντες. Το προεντεταμένο σκυρόδεμα είναι μια παραλλαγή του σκυροδέματος όπου οι τένοντες τεντώνονται πριν από τη χύτευση του σκυροδέματος. Καθώς ο τένοντας ωριμάζει, αγκυρώνεται στο σκυρόδεμα λόγω ισχυρής, στατικής τριβής. Αυτή η τελική αγκύρωση απελευθερώνεται αργότερα και οι δυνάμεις τάσης του τένοντα μεταφέρονται στη συνέχεια στο σκυρόδεμα.

Η προένταση είναι μια κοινή τεχνική προκατασκευής, όπου το προκύπτων στοιχείο σκυροδέματος κατασκευάζεται εξ' αποστάσεως από την τελική θέση κατασκευής και μεταφέρεται στο εργοτάξιο μόλις σκληρυνθεί. Έτσι είναι απαραίτητο να είναι ισχυρά και σταθερά τα σημεία τελικής αγκύρωσης μεταξύ των οποίων τεντώνονται οι τένοντες. Οι συγκεκριμένες αγκυρώσεις σχηματίζουν τα άκρα ενός "κρεβάτι χύτευσης" το οποίο υπάρχει η πιθανότητα να είναι πολλαπλάσιο του μήκους του στοιχείου σκυροδέματος που κατασκευάζεται. Αυτό επιτρέπει την κατασκευή πολλαπλών στοιχείων από άκρο σε άκρο στη μία λειτουργία προέντασης, επιτρέποντας την επίτευξη σημαντικών οφελών παραγωγικότητας και οικονομιών κλίμακας (Καραγιάννης, 2015).

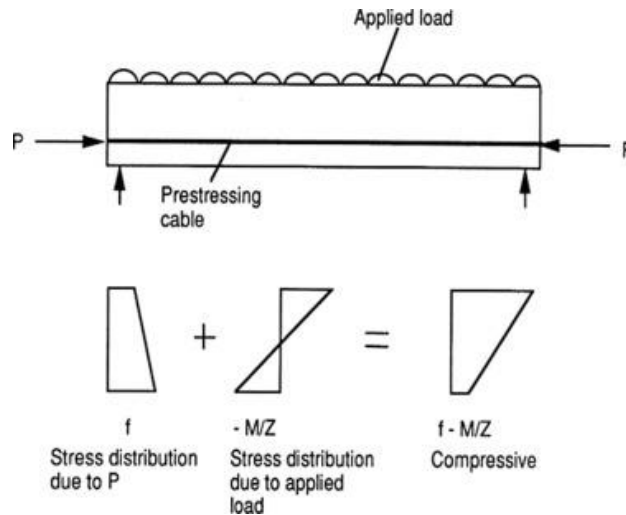
2.1 Ιστορική αναδρομή του προεντεταμένου σκυροδέματος

Το πρώτο προεντεταμένο στοιχείο ήταν ένα τσιμεντένιο υπέρθυρο που κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1890 από τον Henry Jackson, έναν Αμερικανό μηχανικό από το Σαν Φρανσίσκο. Το 1928 κατασκευάστηκε η πρώτη δοκός προεντεταμένου σκυροδέματος υψηλής ποιότητας και αντοχής, ενώ αργότερα ιδρύθηκε η Διεθνής Ομοσπονδία Προέντασης και η Ευρωπαϊκή Εταιρεία Σκυροδέματος.

Η ιδέα της προέντασης βασίζεται στη σκέψη να μην υπάρχει αδρανές τμήμα της διατομής, αλλά όλο το υλικό να συμμετέχει στην ανάληψη των φορτίων. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό και δεδομένου ότι το σκυρόδεμα έχει πολύ μικρή εφελκυστική αντοχή, θα πρέπει όλη η διατομή να βρίσκεται υπό θλίψη. Έτσι δε θα υπάρχει ρηγμάτωση με αποτέλεσμα να διορθώνονται πολλά μειονεκτήματα όπως το μεγάλο ίδιον βάρος, η μειωμένη δυσκαμψία, τα μεγάλα βέλη κάμψεως, η υδατοστεγανότητα και ο κίνδυνος διάβρωσης του οπλισμού.

Στο οπλισμένο σκυρόδεμα, η ανάληψη των εφελκυστικών δράσεων γίνεται με την ενσωμάτωση του οπλισμού στις θέσεις εφελκυστικής έντασης με αποτέλεσμα όλο το σκυρόδεμα της εφελκυστικής περιοχής να ρηγματώνεται, και να καθίσταται έτσι τελείως αδρανές χωρίς συμμετοχή στην ανάληψη των φορτίων αλλά αντιθέτως να προσθέτει μεγάλο ίδιον βάρος. Στο προεντεταμένο σκυρόδεμα γίνεται προσπάθεια αναιρέσεως των εφελκυστικών τάσεων με την επιβολή μιας κατάλληλης πρόσθετης θλιπτικής δύναμης. Κατά αυτόν τον τρόπο όλη η διατομή βρίσκεται υπό θλίψη και συμμετέχει στην ανάληψη των φορτίων. Η ιδέα για την επιβολή της επιπρόσθετης θλιπτικής δύναμης με τη χρήση χαλύβδινων ράβδων που προτανιόνται πριν τοποθετηθούν σε μία δοκό είναι παλαιά και διατυπώθηκε ήδη από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Η υλοποίησή της όμως δεν ήταν δυνατή διότι η προτάνυση αυτή και η αρχική δύναμη που αναπτυσσόταν κατά αυτόν τον τρόπο στις διατομές του στοιχείου με τους χάλυβες μειωνόταν πολύ ή και εκμηδενίζοταν βαθμιαίως με την πάροδο του χρόνου λόγω του ερπυσμού και της συστολής ξηράνσεως του σκυροδέματος και της ταυτόχρονης χαλάρωσης του χάλυβα.

Πρώτος ο Freyssinet συμπέρανε ότι υπάρχει δυνατότητα αύξησης των απωλειών αυτών, η οποία απώλεια θα είναι ανάλογη της αρχικής τάσης. Αυτές οι απώλειες θα αποτελούν ένα τμήμα τέτοιο ώστε οι τάσεις που θα απομείνουν να είναι επαρκείς για την ασφαλή λειτουργία του στοιχείου. Η στρατηγική βελτίωση των ιδιοτήτων των υλικών με ιδιαίτερη έμφαση στο χάλυβα και η προαναφερθείσα παρατήρηση του Freyssinet επέτρεψε την απαραίτητη αρχική επιβολή αυξημένων τάσεων με στόχο την υλοποίηση της ιδέας του προεντεταμένου σκυροδέματος.



Εικόνα 3: Προεντεταμένο σκυρόδεμα (Hannant & Rama Sreekanth, 2018)

2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του προεντεταμένου σκυροδέματος

Σχετικά με τα πλεονεκτήματα, σε αντίθεση με τα συμβατικά στοιχεία σκυροδέματος, ολόκληρη η διατομή σκυροδέματος του προεντεταμένου σκυροδέματος αντέχει το εφαρμοζόμενο φορτίο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το σκυρόδεμα στη ζώνη εφελκυσμού δεν υφίσταται ρωγμές και ως εκ τούτου θα συμμετέχει στη μεταφορά των φορτίων.

Τα ανοίγματα των προεντεταμένων δοκών είναι μεγαλύτερα σε σύγκριση με αυτά του οπλισμένου σκυροδέματος. Επίσης, το μεγαλύτερο μήκος ανοίγματος αυξάνει την ωφέλιμη επιφάνεια και τους διαθέσιμους χώρους στάθμευσης. Τα μεγαλύτερα ανοίγματα έχουν ως αποτέλεσμα τη χρήση λιγότερων αρθρώσεων, με αποτέλεσμα να απαιτείται λιγότερη συντήρησής τους. Η πιθανότητα διάβρωσης του χάλυβα και της επακόλουθης φθοράς του σκυροδέματος μειώνεται επειδή το σκυρόδεμα δεν εμφανίζει καθόλου ρωγμές. Το προεντεταμένο σκυρόδεμα έχει μακροχρόνια αντοχή.

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι ότι τα μέλη του προεντεταμένου σκυροδέματος είναι σε θέση να αντέχουν την αντιστροφή των τάσεων, των κρούσεων, των κραδασμών και των κραδασμών λόγω της απουσίας ρωγμών.

Πρακτικά, τα νεκρά φορτία είναι ουδέτερα σε μια δοκό προεντεταμένου σκυροδέματος. Κατά συνέπεια, το βάρος νεκρού φορτίου της κατασκευής μειώνεται με αποτέλεσμα τη μειωμένη κατανάλωση υλικών.

Επιτρέπεται η χρήση λεπτότερων πλακών, που είναι σημαντικές για πολυώροφα κτίρια, καθώς με το ίδιο κόστος, μπορεί να κατασκευαστούν περισσότερες πλάκες

από τις παραδοσιακές παχύτερες πλάκες. Ακόμα, η χρήση καμπυλωτών τενόντων και η προσυμπίεση του σκυροδέματος βοηθά στην αντίσταση στη διάτμηση. Η ποσότητα του απαιτούμενου χάλυβα στο προεντεταμένο σκυρόδεμα είναι το 1/3 αυτής που απαιτείται για το οπλισμένο σκυρόδεμα, ωστόσο ο χάλυβας που θα χρησιμοποιηθεί για το πρώτο θα πρέπει να έχει υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό.

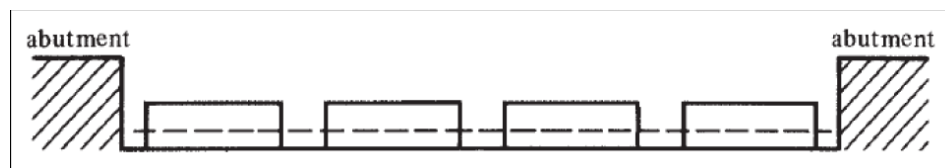
Η ανάπτυξη του προεντεταμένου σκυροδέματος έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή μιας αρκετά μεγάλης δομής συγκράτησης υγρών που διαφορετικά δεν θα ήταν δυνατή.

Οι μεγάλες κατασκευές συγκράτησης υγρών που κατασκευάζονται από προεντεταμένο σκυρόδεμα έχουν χαμηλό κόστος και είναι κατά προτίμηση ασφαλείς έναντι ρωγμών και επακόλουθης διαρροής. Το προεντεταμένο σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πλεονέκτημα σε όλες εκείνες τις κατασκευές όπου αναπτύσσεται τάση, όπως δέσιμο και ανάρτηση δοκού πλώρης χορδών, στρωτήρες σιδηροδρόμου, ηλεκτρικοί στύλοι, ανάντη όψη φράγματος βαρύτητας κ.λπ. Οι δοκοί από προεντεταμένο σκυρόδεμα έχουν συνήθως χαμηλή παραμόρφωση. Σχετικά με τα μειονεκτήματα, το προεντεταμένο σκυρόδεμα απαιτεί υψηλής ποιότητας πυκνό σκυρόδεμα υψηλής αντοχής. Απαιτείται σκυρόδεμα άριστης ποιότητας σε παραγωγή, τοποθέτηση και συμπίεση. Επίσης, απαιτείται χάλυβας υψηλού εφελκυσμού, ο οποίος είναι 2,5 έως 3,5 φορές πιο δαπανηρός από τον μαλακό χάλυβα. Σχετικά με τη διαδικασία προέντασης, αυτή απαιτεί περίπλοκο εξοπλισμό τάνυσης και συσκευές αγκύρωσης. Η κατασκευή απαιτεί τέλεια επίβλεψη σε όλα τα στάδιά της και παράλληλα απαιτείται εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό.

2.3 Προένταση και μετάταση

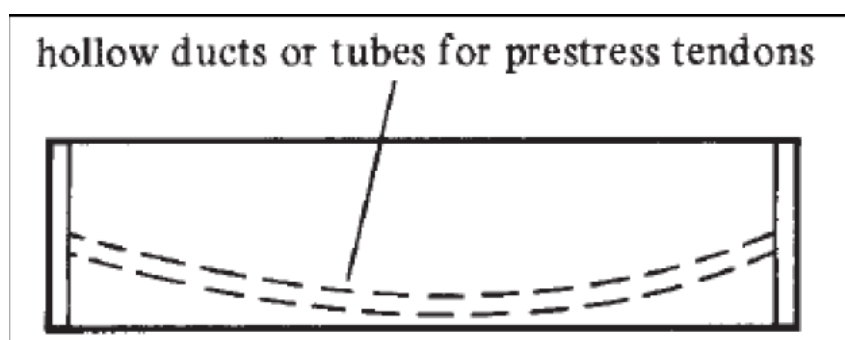
Οι δύο γενικές μέθοδοι προέντασης είναι η προένταση και μετάταση. Η προένταση απεικονίστηκε στην εισαγωγή, όπου οι τένοντες προέντασης τεντώθηκαν πριν από την τοποθέτηση του σκυροδέματος. Αφού το σκυρόδεμα είχε σκληρυνθεί επαρκώς, οι τένοντες κόπηκαν και η δύναμη προέντασης μεταδόθηκε στο σκυρόδεμα με σύνδεση. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για μαζική παραγωγή, επειδή οι κλίνες χύτευσης (καλούπια) μπορούν να κατασκευαστούν σε μήκος αρκετών εκατοντάδων ποδιών. Οι τένοντες μπορούν να τρέξουν για όλα τα μήκη του καλουπιού και να χρησιμοποιηθούν για τη χύτευση πολλών δοκών σε μια γραμμή ταυτόχρονα, όπως

φαίνεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4: Προεντεταμένη κλίνη.

Σε μετατεταμένη κατασκευή (Εικόνα 5), οι τένοντες καταπονούνται αφού τοποθετηθεί το σκυρόδεμα και αποκτήσει την επιθυμητή αντοχή. Πλαστικοί ή μεταλλικοί σωλήνες, αγωγοί, μανίκια ή παρόμοιες συσκευές με άτονους τένοντες εσωτερικά (ή αργότερα εισάγονται) τοποθετούνται στη φόρμα και τοποθετείται το σκυρόδεμα. Αφού το σκυρόδεμα έχει σκληρυνθεί επαρκώς, οι τένοντες τεντώνονται και προσαρμόζονται μηχανικά στις ακραίες συσκευές αγκύρωσης για να διατηρούν τους τένοντες στις τεντωμένες τους θέσεις. Έτσι, με την μετάταση, οι δυνάμεις προέντασης μεταφέρονται στο σκυρόδεμα όχι με συγκόλληση αλλά με ακραία έδραση.



Εικόνα 5: Δοκός μετά από μετάταση.

Πραγματικά είναι δυνατό στην μετάταση να υπάρχουν είτε κολλημένοι, είτε αδέσμευτοι τένοντες. Εάν είναι κολλημένοι, οι αγωγοί είναι συχνά κατασκευασμένοι από αλουμίνιο, χάλυβα ή άλλο μεταλλικό περίβλημα. Επιπλέον, είναι δυνατή η χρήση χαλύβδινων σωλήνων ή ράβδων ή πυρήνων από καουτσούκ που χυτεύονται στο σκυρόδεμα και αφαιρούνται λίγες ώρες μετά την τοποθέτηση του σκυροδέματος. Αφού τεντωθεί ο χάλυβας, εγχέεται τσιμεντοκονία στον αγωγό για συγκόλληση. Το ενέματα είναι επίσης χρήσιμο για την προστασία του χάλυβα από τη διάβρωση. Εάν πρόκειται να αποσυνδεθούν οι τένοντες, θα πρέπει να λιπαίνονται για να διευκολύνεται η τάνυση και να προστατεύονται από τη διάβρωση.

2.4 Επίπεδα προέντασης

Η προένταση του σκυροδέματος μπορεί να ταξινομηθεί με διάφορους τρόπους. Οι τρόποι αυτοί θα συζητηθούν συνοπτικά στη συνέχεια.

2.4.1 Εξωτερική ή εσωτερική προένταση

Αυτή η ταξινόμηση βασίζεται στη θέση του τένοντα προέντασης σε σχέση με το τμήμα του σκυροδέματος. Όταν η προένταση επιτυγχάνεται από στοιχεία που βρίσκονται έξω από το σκυρόδεμα, ονομάζεται ως εξωτερική προένταση. Οι τένοντες μπορεί να βρίσκονται έξω από το μέλος (για παράδειγμα σε δοκούς I ή τοίχους) ή μέσα στον κοίλο χώρο μιας δοκού μορφής «κουτιού». Αυτή η τεχνική υιοθετείται στις γέφυρες και για την ενίσχυση κτιρίων. Στην παρακάτω Εικόνα (6), η δοκός κιβωτίου μιας γέφυρας είναι προεντεταμένη με τένοντες που βρίσκονται έξω από το σκυρόδεμα.



Εικόνα 6: Εξωτερική προένταση κιβωτίου δοκού (<https://old.amu.ac.in/emp/studym/99992327.pdf>)

Όταν η προένταση επιτυγχάνεται από στοιχεία που βρίσκονται μέσα στο μέλος του σκυροδέματος (συνήθως, από ενσωματωμένους τένοντες), ονομάζεται εσωτερική προένταση. Οι περισσότερες από τις εφαρμογές της προέντασης χρησιμοποιούν την εσωτερική προένταση. Στην παρακάτω Εικόνα (7) θα ριχθεί σκυρόδεμα γύρω από τους αγωγούς για την τοποθέτηση των τενόντων.



Εικόνα 7: Εσωτερική προένταση σε δομή «κιβωτίου» δοκού
(<https://old.amu.ac.in/emp/studym/99992327.pdf>).

2.4.2 Γραμμική προένταση

Όταν τα προεντεταμένα μέλη είναι ευθύγραμμα ή επίπεδα, προς την κατεύθυνση της προέντασης, η προένταση ονομάζεται γραμμική προένταση. Για παράδειγμα, γραμμική προένταση αποτελεί η προένταση δοκών, πασσάλων και πλακών. Το προφίλ του τένοντα προέντασης μπορεί να είναι καμπύλο. Η παρακάτω Εικόνα (8) δείχνει γραμμικά προεντεταμένους στρωτήρες σιδηροδρόμου.



Εικόνα 8: Γραμμικά προεντεταμένους στρωτήρες σιδηροδρόμου
(<https://old.amu.ac.in/emp/studym/99992327.pdf>)

2.4.3 Κυλινδρική προένταση

Όταν τα προεντεταμένα μέλη είναι κυρτά, προς την κατεύθυνση της προέντασης, η προένταση ονομάζεται κυκλική προένταση. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί, η περιφερειακή προένταση των δεξαμενών, των σιλό, των σωλήνων αλλά και

παρόμοιων κατασκευών. Η ακόλουθη Εικόνα (9) δείχνει τη δομή συγκράτησης για έναν πυρηνικό αντιδραστήρα ο οποίος είναι κυκλικά προεντεταμένος.



Εικόνα 9: Κυκλικά προεντεταμένη δομή συγκράτησης
(<https://old.amu.ac.in/emp/studym/99992327.pdf>)

2.4.4 Άλλοι τύποι προέντασης

Η υδραυλική προένταση είναι ο απλούστερος τύπος προέντασης, που παράγει μεγάλες δυνάμεις προέντασης. Ο υδραυλικός γρύλος που χρησιμοποιείται για την τάνυση των τενόντων, αποτελείται από βαθμονομημένους μετρητές πίεσης που δείχνουν άμεσα το μέγεθος της δύναμης που αναπτύσσεται κατά την τάνυση.

Η μηχανική προένταση περιλαμβάνει μετάδοση της τάσης με ή χωρίς μοχλό, μετάδοση με γρανάζια σε συνδυασμό με μπλοκ τροχαλιών, βίδες με ή χωρίς μηχανισμούς μετάδοσης κίνησης και μηχανές περιέλιξης καλωδίων. Αυτός ο τύπος προέντασης υιοθετείται για μαζική παραγωγή.

Τέλος, στην ηλεκτρική προένταση τα χαλύβδινα σύρματα θερμαίνονται ηλεκτρικά και αγκυρώνονται πριν από την τοποθέτηση του σκυροδέματος στα καλούπια. Αυτός ο τύπος προέντασης είναι επίσης γνωστός ως θερμοηλεκτρική προένταση.

2.4.5 Ανάλογα με την πρόβλεψη για εφελκυστικές τάσεις και ρηγμάτωση

Κατά το σχεδιασμό των στοιχείων από προεντεταμένο σκυρόδεμα προβλέπονται όλες οι διατομές κατά μήκος του στοιχείου ώστε σε όλες τις φάσεις της ζωής του έργου αυτές να λειτουργούν υπό θλίψη. Υπάρχουν φορές που η πρόσθετη δύναμη που προστίθεται στον οπλισμό μπορεί να τον κάνει ισχυρότερο, παρόλο που ο ίδιος ο

οπλισμός τίθεται υπό τάση. Σε ορισμένες περιοχές του υλικού μπορεί να δημιουργηθούν ρωγμές εφελκυσμού και κάμψης. Με βάση τα παραπάνω διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

- Πλήρης ή ολική προένταση.

Ο σχεδιασμός γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε όλες οι διατομές κατά μήκος του στοιχείου να παραμένουν υπό πλήρη θλίψη σε όλες τις φάσεις της ζωής του έργου και άρα το στοιχείο να παραμένει αρηγμάτωτο. Η πλήρης ή ολική προένταση είναι η συνήθης μορφή προέντασης και σε αυτή είναι δυνατή η εφαρμογή των σχέσεων της μηχανικής δεδομένου ότι όλες οι διατομές παραμένουν αρηγμάτωτες.

- Περιορισμένη προένταση.

Όταν το επίπεδο προέντασης είναι τέτοιο ώστε η εφελκυστική τάση υπό τα φορτία λειτουργίας να είναι εντός της τάσης ρωγμής του σκυροδέματος, ονομάζεται Περιορισμένη Προένταση (Τύπος 2).

- Μερική προένταση

Όταν το επίπεδο προέντασης είναι τέτοιο ώστε υπό τάσεις εφελκυσμού λόγω φορτίων λειτουργίας, το πλάτος της ρωγμής να είναι εντός του επιτρεπόμενου ορίου, ονομάζεται Μερική Προένταση (Τύπος 3). Στη μερική προένταση δε τίθεται περιορισμοί στην εμφάνιση ελκυστικών τάσεων και ρηγματώσεως. Η δοκός λειτουργεί γενικά σαν δοκός από οπλισμένο σκυρόδεμα με την ιδιομορφία ότι έχει τοποθετηθεί σε αυτή και προεντεταμένος χάλυβας ο οποίος παράλληλα βοηθά με το συμβατικό οπλισμό στην ανάληψη των φορτίων. Η εφαρμογή της μερικής προέντασης δεν είναι συνήθης και απαιτεί ιδιαίτερο σχεδιασμό.

2.4.6 Ανάλογα με τον τρόπο συνεργασίας τένοντα και σκυροδέματος

Ανάλογα με τον τρόπο συνεργασίας του χάλυβα προέντασης και του σκυροδέματος διακρίνονται δύο περιπτώσεις προεντεταμένων στοιχείων:

- Τένοντες σε συνεργασία με το σκυρόδεμα (bonded tendons)

Είναι η συνήθης περίπτωση εφαρμογής προέντασης. Σε αυτή την περίπτωση μετά την επιβολή της προβλεπόμενης προέντασης πληρώνονται με πίεση οι σωλήνες

προέντασης με ειδικό τσιμεντένεμα και κατά αυτόν τον τρόπο αποκαθίσταται η συνάφεια και η συνεργασία μεταξύ του τένοντα και του περιβάλλοντος σκυροδέματος. Η αποκατάσταση της συνάφειας και της συνεργασίας του τένοντα με το σκυρόδεμα έχει μεγάλα πλεονεκτήματα, τόσο για την ασφάλεια του έργου από πλευράς τοπικών αστοχιών, όσο και τη συντήρηση του τένοντα έναντι της διάβρωσης. Δεν επιτρέπει την επιβολή πρόσθετης τάνυσης κατά τη διάρκεια ζωής του έργου.

- Τένοντες χωρίς συνεργασία με το σκυρόδεμα (unbonded tendons)

Σε αυτή την περίπτωση δεν προβλέπεται η αποκατάσταση της συνάφειας και της συνεργασίας του τένοντα με το σκυρόδεμα μετά την επιβολή της προέντασης. Έχει σημαντικά μειονεκτήματα σχετικά με την ασφάλεια και την εξασφάλιση των χαλύβων προέντασης έναντι της διάβρωσης. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι επιτρέπει την επιβολή πρόσθετης τάνυσης κατά τη διάρκεια της ζωής του έργου

2.4.7 Ανάλογα με τις διευθύνσεις επιβολής προέντασης

Ανάλογα με τις διευθύνσεις επιβολής προέντασης, δηλαδή τις διευθύνσεις των τενόντων διακρίνουμε:

- Μονοαξονική προένταση

Είναι η συνήθης μορφή προέντασης και χρησιμοποιείται σε δοκούς οικοδομικών έργων όταν υπάρχουν μεγάλα ανοίγματα και στις δοκούς των γεφυρών. Εφαρμόζεται και σε πλάκες με προένταση μιας διεύθυνσης.

- Διαξονική προένταση

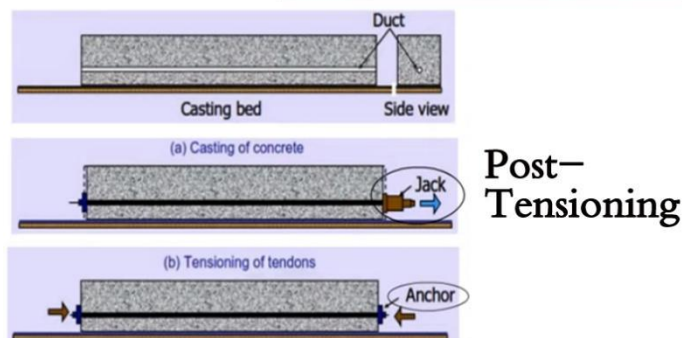
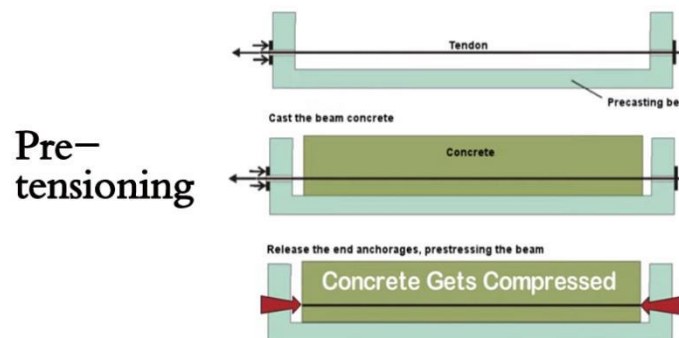
Εφαρμόζεται σε τμήματα γεφυρών, όταν εκτός από την κύρια διεύθυνση απαιτείται προένταση και κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Ακόμη εφαρμόζεται σε πλάκες με μεγάλο άνοιγμα και κατά τις διευθύνσεις όποτε αντίστοιχα απαιτείται προένταση και κατά τις δύο διευθύνσεις.



Εικόνα 10: Διαξονική προένταση πλάκας (<https://old.amu.ac.in/emp/studym/99992327.pdf>)

- Τριαξονική προένταση

Αυτός ο τύπος προέντασης χρησιμοποιείται σε ειδικές κατασκευές.



Εικόνα 11: Απεικόνιση προέντασης και ύστερης συμπεριφοράς του προεντεταμένου σκυροδέματος (*Pretensioned Concrete*, n.d.).

2.5 Απώλειες προέντασης

Οι απώλειες προέντασης ορίζονται ως η μείωση της τάσης εφελκυσμού στους τένοντες προέντασης. Κατηγοριοποιούνται είτε ως στιγμιαίες ή μακροπρόθεσμες απώλειες. Οι στιγμιαίες απώλειες περιλαμβάνουν απώλειες λόγω τριβής, ελαστική βράχυνση (ES) και απώλεια έδρας ή ολίσθηση αγκύρωσης. Μακροπρόθεσμες

απώλειες συμβαίνουν σε μια χρονική περίοδο. Περιλαμβάνουν απώλειες στην προένταση λόγω ερπυσμού σκυροδέματος (CR), συρρίκνωσης (SH) και χαλάρωσης των κλώνων προέντασης (RE). Η γενικευμένη διακύμανση της τάσης με την πάροδο του χρόνου οφείλεται στις διάφορες απώλειες που απεικονίζονται στην Εικόνα 11.

2.5.1 Ελαστική βράχυνση (ES)

Η απώλεια λόγω ελαστικής βράχυνσης προκαλείται από τη στιγμιαία συμπίεση του σκυροδέματος όταν η δύναμη προέντασης μεταφέρεται στο σκληρυμένο μέλος του σκυροδέματος. Καθώς το σκυρόδεμα βραχύνει, επιτρέπει στον χάλυβα προέντασης να βραχύνει μαζί του. Ορίζεται ως η απώλεια της τάση εφελκυσμού στον χάλυβα προέντασης λόγω της προέντασης σε συνδυασμό με την αύξηση της τάσης λόγω του ίδιου βάρους του μέλους. Η ελαστική βράχυνση εξαρτάται από την αρθρωτή αναλογία και τη μέση τάση στο σκυρόδεμα στο επίπεδο του χάλυβα προέντασης (JAYASEELAN, 2007).

2.5.2 Ερπυσμός σκυροδέματος (CR)

Η παρατεταμένη χρονικά εξαρτώμενη παραμόρφωση του σκυροδέματος υπό παρατεταμένο θλιπτικό φορτίο ή τάση ονομάζεται ερπυσμός. Ο ερπυσμός σκυροδέματος υποδιαιρείται σε δύο μέρη, τον βασικό ερπυσμό και τον ερπυσμό ξήρανσης. Βασικός ερπυσμός είναι η συνεχής παραμόρφωση που συμβαίνει σε ένα σφραγισμένο δείγμα που υποβάλλεται σε περιβάλλον υδρο-ισορροπίας. Ένα μη σφραγισμένο δείγμα υφίσταται επιπλέον ερπυσμό (drying creep) λόγω της ελεύθερης ανταλλαγής υγρασίας με το περιβάλλον. Αυτή η παρατεταμένη βράχυνση της δοκού από σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια της προέντασης. Ο ρυθμός ερπυσμού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως ο χρόνος, το μέγεθος της τάσης, η αναλογία νερού-τσιμέντου, η ποσότητα και το είδος του τσιμέντου, η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος και οι ιδιότητες των αδρανών.

2.5.3 Συρρίκνωση σκυροδέματος (SH)

Η ογκομετρική συστολή του δοκιμίου σκυροδέματος λόγω της απώλειας ελεύθερου νερού μέσω της εξάτμισης, της ενανθράκωσης ή της συνεχούς ενυδάτωσης του τσιμέντου, απουσία φορτίου ονομάζεται συρρίκνωση. Αποτελείται από τρία συστατικά: συρρίκνωση ξήρανσης, αυτογενή συρρίκνωση και ενανθράκωση. Η μείωση του όγκου του σκυροδέματος λόγω της διάχυσης του νερού στο περιβάλλον

ονομάζεται συρρίκνωση ξήρανσης. Η αυτογενής συρρίκνωση συμβαίνει όταν χρησιμοποιείται ελεύθερο νερό στη συνεχή ενυδάτωση της πάστας τσιμέντου μετά τη σκλήρυνση. Η ενανθράκωση προκύπτει από τη χημική αντίδραση του διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα με σκληρυμένο τσιμεντοπολτό. Και πάλι το ελεύθερο νερό χρησιμοποιείται στην αντίδραση ενανθράκωσης. Ανεξάρτητα από την πηγή συρρίκνωσης, η αλλαγή στον όγκο του σκυροδέματος προκαλεί συνολική βράχυνση του μήκους του κλώνου και έτσι μειώνει την τάση του κλώνου με αποτέλεσμα απώλειες προέντασης

2.5.4 Χαλάρωση (RE)

Η χαλάρωση είναι η σταδιακή μείωση του στρες με την πάροδο του χρόνου που υπόκειται σε παρατεταμένη καταπόνηση. Συμβαίνει χωρίς αλλαγές στο μήκος του χάλυβα. Η χαλάρωση είναι ιδιότητα του χάλυβα προέντασης και είναι ανεξάρτητη από τις ιδιότητες του σκυροδέματος. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι δοκών προέντασης σήμερα είναι οι δοκοί χαμηλής χαλάρωσης που συνήθως έχουν απώλειες που δεν υπερβαίνουν τα 5ksi.

2.5.5 Κάμπερ και εκτροπή

Το Camber είναι η κοινή λέξη για την ανοδική απόκλιση των έκκεντρα προεντεταμένων δοκών μιας γέφυρας. Η ποσότητα του κυρτώματος καθορίζεται από τη συνδυασμένη δράση της δύναμης προέντασης που αναγκάζει το κύρτωμα και το ίδιο το βάρος της δοκού να λειτουργήσει ενάντια στο κάμπερ. Το ίδιο το βάρος και τα άλλα φορτία παρατεταμένης βαρύτητας μπορεί να προκαλέσουν παραμορφώσεις προς τα κάτω να υπερβούν την ποσότητα του συνολικού κάμπερ. Ως αποτέλεσμα, οι δοκοί και οι γέφυρες μπορεί να εκτρέπονται προς τα κάτω. Η κύρτωση και/ή η παραμόρφωση είναι επίσης συνάρτηση της εξαρτώμενης από το χρόνο ερπυσμού και απώλειας προέντασης του σκυροδέματος. Η σωστή εκτίμηση της κλίσης ή εναλλακτικά της παραμόρφωσης είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική χρήση μεγαλύτερων ανοιγμάτων στις δοκούς γεφυρών HPC.

Το εγχειρίδιο PCI (PCI 1999) παρέχει εξισώσεις για εκτροπή και αρχικές και μακροπρόθεσμες κάμπερες. Επιπλέον, το νέο εγχειρίδιο PCI Bridge Design Manual (1997) παρέχει το "Βελτιωμένη μέθοδος πολλαπλασιαστή" με σκοπό την πρόβλεψη κύρτωσης και εκτροπής. Αυτή η μέθοδος, βασισμένη στην υπάρχουσα μέθοδο που βρίσκεται στο Εγχειρίδιο PCI, τροποποιεί συγκεκριμένα τους πολλαπλασιαστές.

Αυτή η μέθοδος λαμβάνει επίσης υπόψη το χρόνο μέχρι την ανέγερση και τις ιδιότητες ερπυσμού του σκυροδέματος (JAYASEELAN, 2007)

2.6 Μέθοδοι πρόβλεψης απωλειών πριν από την καταπόνηση

Αρκετές μέθοδοι πρόβλεψης απωλειών έχουν αναπτυχθεί όλα αυτά τα χρόνια, αλλά απλές πρακτικές λύσεις για την ακριβή εκτίμηση της απώλειας προέντασης έχουν αποδειχθεί δύσκολες. Η ακριβής εκτίμηση των απωλειών απαιτεί ακριβέστερη γνώση των ιδιοτήτων του υλικού καθώς και της αλληλεπίδρασης μεταξύ ερπυσμού, συρρίκνωσης του σκυροδέματος και χαλάρωσης του χάλυβα. Οι τρέχουσες μέθοδοι για την πρόβλεψη των ζημιών μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με την προσέγγισή τους για τον υπολογισμό των ζημιών. Καταγράφονται σύμφωνα με τη φθίνουσα σειρά της ακρίβειάς τους: (α) μέθοδοι χρονικού βήματος, (β) εξευγενισμένες μέθοδοι και (γ) μέθοδοι χονδροειδούς εκτίμησης.

2.6.1 Μέθοδοι χρονικού βήματος

Αυτές οι μέθοδοι εντάσσονται στην πιο λεπτομερή ομάδα μεθόδων πρόβλεψης απωλειών που βασίζονται σε μια βήμα προς βήμα αριθμητική διαδικασία και εφαρμόζονται σε εξειδικευμένα προγράμματα υπολογιστών. Αυτή η μέθοδος έχει βρει την εκτίμησή της στην κατασκευή γέφυρας πολλών σταδίων ειδικά σε γέφυρες δοκών ματισμένης και τμηματικής δοκού κιβωτίου. Η μέθοδος αναπτύχθηκε με διαίρεση του χρόνου σε διαστήματα των οποίων η διάρκεια μπορεί να αυξηθεί όσο αυξάνεται η ηλικία του σκυροδέματος. Η τάση στους κλώνους στο τέλος κάθε διαστήματος αντιπροσωπεύει τη διαφορά μεταξύ των αρχικών συνθηκών στην αρχή εκείνου του χρόνου και τις υπολογιζόμενες απώλειες προέντασης κατά τη διάρκεια αυτού του διαστήματος. Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στην αρχή κάθε διαστήματος είναι ίσες με εκείνες στο τέλος του προηγούμενου διαστήματος. Τα ερευνητικά προγράμματα που πραγματοποιήθηκαν από τους Tadros et al (1977), Abdel-Karim (1993) και PCI-BDM (1997) παρέχουν περισσότερες πληροφορίες για τις μεθόδους χρονικού βήματος.

2.6.2 Εκλεπτυσμένες μέθοδοι

Σε αυτές τις μεθόδους κάθε επιμέρους συνιστώσα των απωλειών προέντασης (απώλειες ελαστικού και εξαρτώμενου από το χρόνο) υπολογίζεται χωριστά. Στη

συνέχεια, οι μεμονωμένες απώλειες αθροίζονται για να ληφθεί η συνολική απώλεια. Η δυσκολία έγκειται στον ακριβή υπολογισμό της αλληλεξάρτησης αυτών των μεμονωμένων στοιχείων. Η πλάκα καταστρώματος των σύνθετων τμημάτων σέρνεται λιγότερο και συρρικνώνεται περισσότερο από την προκατασκευασμένη δοκό. Αυτό μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερο κέρδος προέντασης παρά απώλεια προέντασης (Tadros et.al., NCHRP 496 2003). Η ακρίβεια αυτών των μεθόδων εξαρτάται επίσης από τις ιδιότητες των υλικών, τη φόρτωση και τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και από τις σχετικές δομικές λεπτομέρειες. Η πρότυπη μέθοδος προδιαγραφής AASHTO (1993), η μέθοδος AASHTO-LRFD (Refined) (1998) και η μέθοδος per Bridge Design Manual (1997) χρησιμοποιούν αυτήν την εκλεπτυσμένη προσέγγιση.

2.6.3 Μέθοδοι χονδροειδούς εκτίμησης

Πραγματοποιήθηκαν διάφορες παραμετρικές μελέτες για τις απώλειες προέντασης διαφορετικών ειδών προεντεταμένων δοκών υπό μέσες συνθήκες. Οι τιμές και οι τάσεις που αναπτύχθηκαν από αυτές τις μελέτες χρησιμοποιήθηκαν στις κατά προσέγγιση μεθόδους Εφάπαξ. Αν και αυτές οι μέθοδοι ήταν χρήσιμα στην προμελέτη, απαιτούν επαναξιολόγηση στην τελική μελέτη. Η τρέχουσα μέθοδος (AASHTO-LRFD) εκτίμησης αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο.

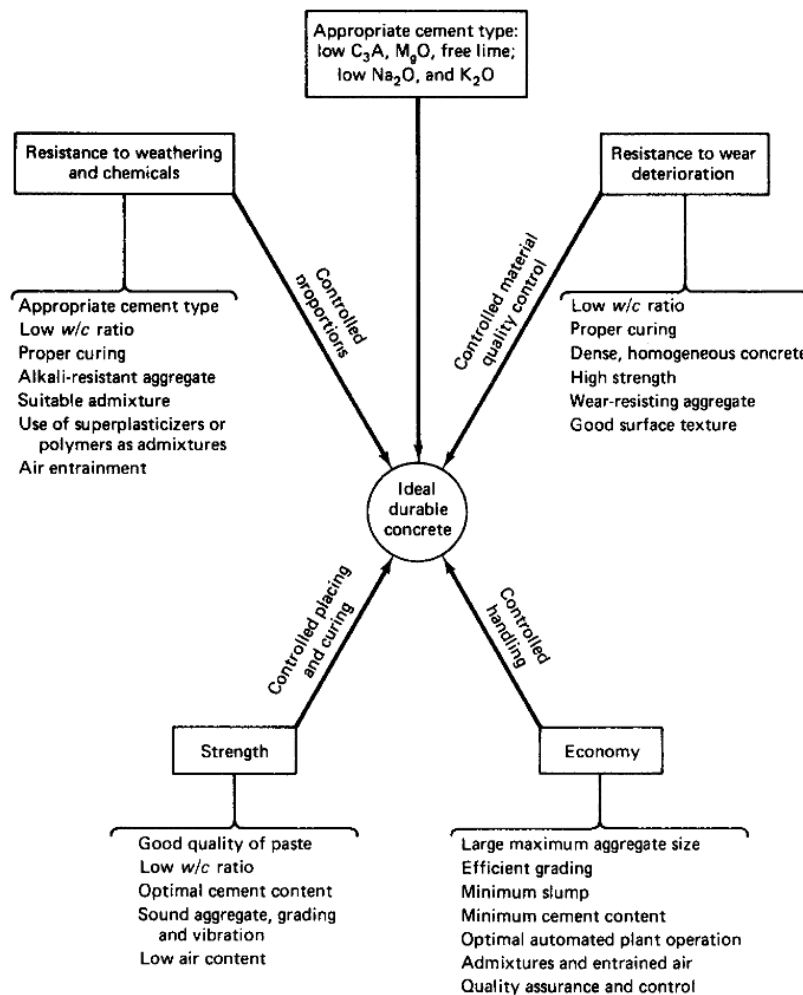
Κεφάλαιο 3 – Υλικά για την κατασκευή προεντατωμένων δοκών

Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται τα επιμέρους υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των προεντεταμένων δοκών.

3.1 Υλικά

Τα βασικά υλικά για την υλοποίηση του προεντεταμένου σκυροδέματος είναι:

- Σκυρόδεμα: το οποίο είναι αυστηρών προδιαγραφών, ώστε να εμφανίζει τις επιθυμητές ιδιότητες (Εικόνα 12).



Εικόνα 12: Επιθυμητές ιδιότητες σκυροδέματος.

- Χάλυβες προεντάσεως που περιλαμβάνουν ράβδους, σύρματα, συρματόσχοινα και καλώδια.
- Χάλυβες χαλαρού οπλισμού. Οι χαλαροί χάλυβες συνυπάρχουν πάντα στα προεντεταμένα στοιχεία και χρησιμοποιούνται ως διαμήκης οπλισμοί και ως συνδετήρες. Στην περίπτωση της πλήρους προέντασης οι διαμήκης οπλισμοί δεν είναι οι κύριοι οπλισμοί δεδομένου ότι ως οπλισμός αντοχής θεωρείται ο τένοντας. Στην ειδική περίπτωση της μερικής προέντασης οι χάλυβες αυτοί μαζί με τον τένοντα αποτελούν τον κύριο οπλισμό, δηλαδή οπλισμό αντοχής και η διατομή θεωρείται ρηγματωμένη.
- Τσιμεντένεμα. Είναι το υλικό που πιέζεται μέσα στους σωλήνες προέντασης μετά την επιβολή της προέντασης με σκοπό να αποκατασταθεί η συνάφεια μεταξύ των τενόντων και του περιβάλλοντος σκυροδέματος.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως για το προεντεταμένο σκυρόδεμα είναι το σκυρόδεμα και οι χάλυβες υψηλής αντοχής. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται είναι συνήθως υψηλότερης αντοχής από αυτό που χρησιμοποιείται για μέλη από οπλισμένο σκυρόδεμα, για διάφορους λόγους, συμπεριλαμβανομένων των εξής (Izzet & Abdulhameed, 2017):

- 1) Ο συντελεστής ελαστικότητας αυτού του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερος, με αποτέλεσμα ότι οι ελαστικές καταπονήσεις στο σκυρόδεμα είναι μικρότερες όταν οι τένοντες κόβονται. Έτσι, οι χαλαρώσεις ή οι απώλειες στις τενοντικές τάσεις είναι μικρότερες.
- 2) Στο προεντεταμένο σκυρόδεμα, όλα τα μέλη διατηρούνται σε συμπίεση και έτσι όλο το σκυρόδεμα είναι αποτελεσματικό στην αντίσταση των δυνάμεων. Ως εκ τούτου, είναι λογικό να κοστίζει πολύ πιο ακριβά, αλλά ισχυρότερο σκυρόδεμα εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί όλο. (Σε συνηθισμένες δοκούς από οπλισμένο σκυρόδεμα, περισσότερες από τις μισές διατομές είναι σε τάση και, επομένως, θεωρείται ότι έχουν ραγίσει. Ως αποτέλεσμα, περισσότερο από το μισό σκυρόδεμα υψηλότερης αντοχής που χρησιμοποιείται εκεί θα σπαταληθεί).
- 3) Τα περισσότερα προεντεταμένα κτίρια παγκόσμια είναι προκατασκευασμένα, με προεντεταμένου τύπου τεχνολογίες που γίνεται στο εργοστάσιο προέντασης, όπου μπορεί να γίνει η εργασία προσεκτικά ελεγχόμενη. Κατά συνέπεια, αξιόπιστη υψηλότερη αντοχή σκυρόδεμα μπορεί να ληφθεί εύκολα.

4) Για προεντεταμένες εργασίες, τα σκυρόδεμα υψηλότερης αντοχής επιτρέπουν τη χρήση για υψηλότερες τάσεις σύνδεσης μεταξύ των καλωδίων και του σκυροδέματος. Οι χάλυβες υψηλής αντοχής είναι απαραίτητοι για την παραγωγή και διατήρηση ικανοποιητικών δυνάμεων προέντασης στα μέλη. Οι καταπονήσεις που εμφανίζονται σε αυτούς τους χάλυβες κατά την καταπόνηση είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που μπορούν να ληφθούν με τους κοινούς χάλυβες οπλισμού. Ως αποτέλεσμα, όταν το σκυρόδεμα βραχύνει ελαστικά στη συμπίεση και επίσης βραχύνει λόγω ερπυσμού και συρρίκνωσης, οι απώλειες στην καταπόνηση στον χάλυβα (και επομένως η τάση) αντιπροσωπεύουν ένα μικρότερο ποσοστό της συνολικής τάσης. Ένας άλλος λόγος για τη χρήση χάλυβων υψηλής αντοχής είναι ότι μια μεγάλη δύναμη προέντασης μπορεί να αναπτυχθεί σε μια μικρή περιοχή.

3.2 Χάλυβες υψηλής αντοχής

Η ανάπτυξη του προεντεταμένου σκυροδέματος επηρεάστηκε από την εφεύρεση του χάλυβα υψηλής αντοχής. Αυτός αποτελείται από ένα κράμα σιδήρου, άνθρακα, μαγγανίου και άλλων προαιρετικών υλικών. Παρακάτω περιγράφονται οι τύποι και οι ιδιότητες του χάλυβα προέντασης. Εκτός από την προένταση του χάλυβα, ο συμβατικός μη προεντεταμένος οπλισμός χρησιμοποιείται για την ικανότητα κάμψης του (προαιρετικό), την ικανότητα διάτμησης που εμφανίζει, τη θερμοκρασιακή αντοχή του και τις απαιτήσεις συρρίκνωσης που πρέπει να καλύπτει. Οι χάλυβες υψηλής αντοχής απαντώνται στις παρακάτω μορφές:

- **Σύρματα**

Ένα σύρμα προέντασης είναι μια ενιαία μονάδα κατασκευασμένη από χάλυβα. Οι ονομαστικές διαμέτροι των συρμάτων είναι 2,5, 3,0, 4,0, 5,0, 7,0 και 8,0mm. Οι διαφορετικοί τύποι καλωδίων είναι οι εξής:

- 1) Απλό σύρμα: Χωρίς εσοχές στην επιφάνεια.
- 2) Σύρμα με εσοχή: Υπάρχουν κυκλικές ή ελλειπτικές εσοχές στην επιφάνεια.

- **Πολύκλιωνα σύρματα προέντασης**

Μερικά σύρματα περιστρέφονται μεταξύ τους σε ελικοειδή μορφή για να σχηματίσουν έναν κλώνο προέντασης. Οι διαφορετικοί τύποι κλώνων είναι οι εξής:

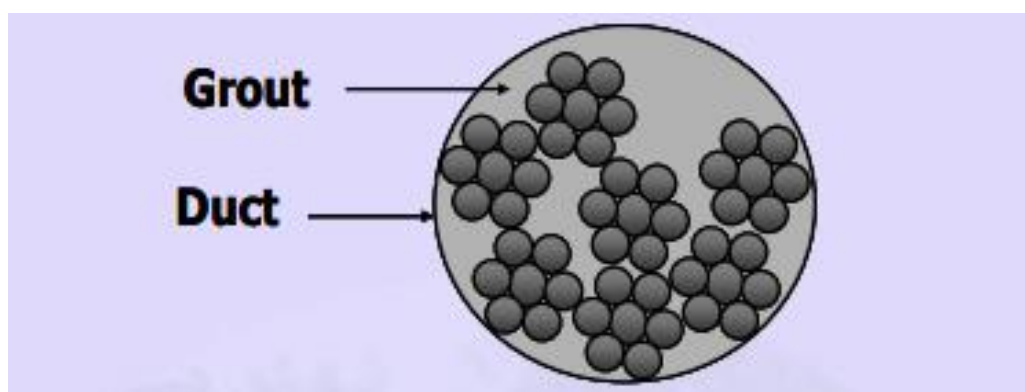
- 1) Σκέλος δύο συρμάτων: Δύο σύρματα περιστρέφονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν το σκέλος.

2) Τριών συρμάτων: Τρία σύρματα περιστρέφονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν τον κλώνο.

3) Επτά σύρμα κλώνος: Σε αυτόν τον τύπο κλώνου, έξι σύρματα περιστρέφονται γύρω από ένα κεντρικό καλώδιο. Το κεντρικό καλώδιο είναι μεγαλύτερο από τα άλλα καλώδια.

- Τένοντες

Μια ομάδα κλώνων ή συρμάτων τοποθετούνται μαζί για να σχηματίσουν έναν τένοντα προέντασης. Οι τένοντες χρησιμοποιούνται σε στελέχη μετά την τάση. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τη διατομή ενός τυπικού τένοντα. Οι κλώνοι τοποθετούνται σε έναν αγωγό ο οποίος μπορεί να γεμίσει με ενέματα μετά την ολοκλήρωση της λειτουργίας μετά την τάνυση (Εικόνα 13).



Εικόνα 13: Διατομή τένοντα προέντασης.

- Καλώδια

Μια ομάδα τενόντων σχηματίζει ένα καλώδιο προέντασης. Τα καλώδια χρησιμοποιούνται σε γέφυρες.

- Δοκοί

Ένας τένοντας μπορεί να αποτελείται από μία μόνο ατσάλινη ράβδο. Η διάμετρος μιας ράβδου είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή ενός σύρματος. Οι ράβδοι διατίθενται στα ακόλουθα μεγέθη: 10, 12, 16, 20, 22, 25, 28 και 32mm. Η παρακάτω Εικόνα δείχνει τις διάφορες μορφές χάλυβα προέντασης σε μορφή ράβδων.



Εικόνα 14: Μορφές ράβδων προέντασης.

Ο χάλυβας υποβάλλεται σε επεξεργασία για να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες. Ακολουθούν οι διαδικασίες θεραπείας.

- Ψυχρή εργασία (ψυχρό σχέδιο):

Η ψυχρή επεξεργασία γίνεται με κύλιση των ράβδων μέσα από μια σειρά βαφών. Ευθυγραμμίζει εκ νέου τους κρυστάλλους και αυξάνει την αντοχή.

- Ανακούφιση έντασης:

Η ανακούφιση από το στρες γίνεται με θέρμανση του κλώνου στους 350°C περίπου και ψύξη αργά. Αυτό μειώνει την πλαστική παραμόρφωση του χάλυβα μετά την έναρξη της διαρροής.

- Θερμοσκλήρυνση για χαμηλή χαλάρωση:

Αυτή η διαδικασία γίνεται με θέρμανση του κλώνου στους 350°C, ενώ αυτός είναι υπό τάση. Αυτό βελτιώνει επίσης τη συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης του χάλυβα μειώνοντας την πλαστική παραμόρφωση μετά την έναρξη της υποχώρησης. Επιπλέον, μειώνεται η χαλάρωση.

Το IS:1343 - 1980 καθορίζει τις ιδιότητες του υλικού του χάλυβα. Επιτρέπονται οι ακόλουθοι τύποι χάλυβα:

- 1) Απλό σύρμα ανακούφισης από τάσεις ψυχρής έλξης σύμφωνα με το IS:1785.

- 2) Σύρμα με εσοχή ψυχρής έλξης σύμφωνα με το IS:6003, Προδιαγραφή για σύρμα με εσοχή για προεντεταμένο σκυρόδεμα.
- 3) Ράβδος χάλυβα υψηλής εφελκυσμού σύμφωνα με το IS:2090, Προδιαγραφή για ράβδους χάλυβα υψηλής εφελκυσμού που χρησιμοποιούνται σε προεντεταμένο σκυρόδεμα.
- 4) Μη επικαλυμμένο κλώνο ανακουφισμένο από πίεση σύμφωνα με το IS:6006. Προδιαγραφές για το μη επικαλυμμένο κλώνο χωρίς τάσεις για προεντεταμένο σκυρόδεμα.

3.3 Εφαρμογή της προεντάσεως

Η προένταση, δηλαδή η θλιπτική δύναμη που ασκείται κατά μήκος του φορέα, υλοποιείται κατά κανόνα με χαλύβδινες ράβδους ή συρματόσχοινα που ονομάζονται τένοντες. Τα διάφορα στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα προέντασης είναι τα ακόλουθα:

- Ο κυρίως τένοντας, δηλαδή η ράβδος ή το συρματόσχοινο το οποίο τανύεται και στη συνέχεια μεταβιβάζει τη δύναμη θλίψεως στο σκυρόδεμα.
- Ο σωλήνας που περιβάλλει τον τένοντα ώστε να μην έρχεται σε επαφή με το σκυρόδεμα στην περίπτωση προεντάσεως μετά τη σκυροδέτηση. Ο σωλήνας αποτελείται από ένα χαμηλού κόστους υλικό όπως ο τσίγκος ή ακόμη και το χαρτί.
- Η αγκύρωση δηλαδή η διάταξη αγκυρώσεως του τένοντα στα άκρα μετά την τάνυση.

Κινητή ονομάζεται η αγκύρωση από την οποία γίνεται η τάνυση του τένοντα και σταθερή είναι εκείνη η οποία χρησιμεύει απλώς στην αγκύρωση του σταθερού άκρου του τένοντα. Η διάταξη αγκυρώσεως πρέπει να εξασφαλίζει την καλή αγκύρωση της ράβδου ή των ράβδων του τένοντα, χωρίς μεγάλη στιγμιαία ή μεταγενέστερη ολίσθηση και απώλεια δυνάμεως. Πέρα των ανωτέρω υπάρχει η διάταξη τανύσεως η οποία συνήθως γίνεται με υδραυλικούς γρύλλους ή με άλλο κατάλληλο τρόπο. Η διάταξη αυτή πρέπει να συγκρατεί τη ράβδο ή τις ράβδους, να τις τανύει όσο απαιτείται και στη συνέχεια να μεταβιβάζει τις δυνάμεις στην αγκύρωση χωρίς απώλεια δύναμης. Τα συστήματα προεντάσεως έχουν προταθεί και εφαρμόζονται αρκετά, τα οποία φέρουν το όνομα του κατασκευαστή ή μια εμπορική ονομασία. Το

κυριότερο χαρακτηριστικό κάθε συστήματος. Είναι ο τρόπος αγκυρώσεως και ιδιαίτερα η κινητή αγκύρωση.

3.3.1 Συστήματα αγκυρώσεως

Τα κυριότερα συστήματα αγκυρώσεως κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

➤ Αγκύρωση με σφήνες

Οι αγκυρώσεις του τύπου αυτού στηρίζονται στη σφήνωση μίας ή περισσοτέρων ράβδων μεταξύ δύο στοιχείων κωνικής μορφής δια της τριβής. Τέτοια συστήματα κατά χρονολογική σειρά εμφάνισης και χρήσης είναι:

- Συστήματα Freyssinet. Οι ράβδοι συσφίγγονται περιμετρικά μεταξύ ενός εξωτερικού κυλίνδρου με κωνική οπή στο κέντρο και ενός εσωτερικού κώνου. Και τα δύο στοιχεία κατασκευάζονται από σκυρόδεμα πολύ υψηλής αντοχής. Ο εσωτερικός κώνος φέρει στο μέσο οπή για τη μεταγενέστερη εισαγωγή του τσιμεντοκονιάματος.



Εικόνα 15: Συστήματα Freyssinet.

- Σύστημα Magnel-Blaton. Οι σφήνες είναι μεταλλικές και επίπεδες. Οι ράβδοι συσφίγγονται ανά δύο.
- Σύστημα Morandi. Αυτό αποτελείται από μικρούς μεταλλικούς κώνους που συσφίγγουν τις ράβδους ανά τρεις.
- Συστήματα CCL και VSL. Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν μικρούς μεταλλικούς κώνους που συσφίγγουν μία οι περισσότερες ράβδους.



Εικόνα 16: Συστήματα CCL.



Εικόνα 17: Συστήματα VSL.

- Σύστημα MeKano. Είναι ένα ισπανικό σύστημα με ποικιλία μικρών μεταλλικών κόνων (παρεμφερών του συστήματος Morandi) που παρέχει ευκαμψία στην επιλογή και κατανομή των δυνάμεων

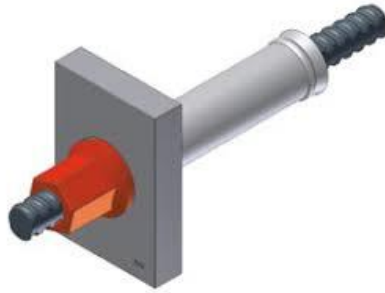


Εικόνα 18: Σύστημα MeKano.

➤ Αγκύρωση με κοχλίες

Οι ράβδοι αγκυρώνονται με συστήματα κοχλίας και περικοχλίου, είτε μεμονωμένα είτε περισσότερες μαζί. Τέτοια συστήματα είναι:

- Σύστημα DYWIDAG. Ο κοχλίας κατασκευάζεται με ειδική συσκευή επάνω σε κάθε ράβδο η οποία μετά την τάνυση στερεώνεται με περικόχλιο. Ο χάλυβας των ράβδων είναι μέσης αντοχής ώστε να μπορεί να διαμορφωθεί στα άκρα ο κοχλίας.



Εικόνα 19: Σύστημα DYWIDAG.

- Σύστημα BBRV. Αποτελεί ελβετικό σύστημα κατά το οποίο πολλές ράβδοι μαζί στερεώνονται με διαπλάτυνση των άκρων (πριτσίνι) σε ένα μεγαλύτερο εξάρτημα που φέρει τον κοχλία.



Εικόνα 20: Σύστημα BBRV.

➤ Άλλα συστήματα

Σε αυτά πρέπει να αναφερθεί η πρόταση του Leonhardt για την τάνυση πολλών ράβδων οι οποίες περιβάλλουν ένα ημικυλινδρικό στοιχείο από σκυρόδεμα το οποίο απομακρύνεται με υδραυλικούς γρύλους. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι τα συστήματα κατατάσσονται και περιγράφονται ανωτέρω με βάση την αρχική τους ιδέα που αποτελεί και το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους. Όλα όμως τα συστήματα για να προσαρμοστούν στις ανάγκες των κατασκευών, έχουν αναπτύξει μία ποικιλία παραλλαγών ώστε τελικά να καλύπτουν ένα μεγάλο φάσμα τύπων και συνδυασμών των προαναφερθέντων βασικών χαρακτηριστικών.

Κεφάλαιο 4 - Διαδικασία παραγωγής δοκών προενταμένου σκυροδέματος

Τα προεντεταμένα στοιχεία σκυροδέματος παράγονται σύμφωνα με την τεκμηρίωση του έργου στο εργοστάσιο με όλο τον εξοπλισμό που είναι απαραίτητος για την παραγωγή, ώστε να επιτευχθεί η ποιότητα της παραγωγής. Στις μέρες μας, η παραγωγική διαδικασία ολοκληρώνεται με τη χρήση εξοπλισμού τελευταίας γενιάς τεχνολογίας. Στη διαδικασία παραγωγής υπάρχουν δύο μέθοδοι προέντασης:

- προένταση,
- μετατόνωση (συγκολλημένο και μη κολλημένο σκυρόδεμα).

4.1. Προένταση

Οι φάσεις της παραγωγικής διαδικασίας είναι οι εξής:

- 1) προετοιμασία του καλουπιού,
- 2) τοποθέτηση οπλισμού,
- 3) προένταση,
- 4) χύτευση σκυροδέματος,
- 5) αφαίρεση του καλουπιού,
- 6) αποθήκευση (*Precast Beams*, n.d.).

4.1.1. Προετοιμασία του καλουπιού

Πριν εφαρμοστεί οποιαδήποτε φάση της παραγωγικής διαδικασίας, πρέπει πρώτα να προετοιμαστεί το καλούπι. Για την παραγωγή μιας προεντεταμένης δοκού, η ποσότητα σκυροδέματος μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 4m³. Επομένως, τα καλούπια που χρησιμοποιούνται για σκοπούς όπως αυτός πρέπει να είναι πολύ ισχυρά και αυτός είναι ο λόγος που τα καλούπια από χάλυβα που φαίνονται στην Εικόνα 21 χρησιμοποιούνται πιο συχνά σήμερα (Tomićić, 1995).



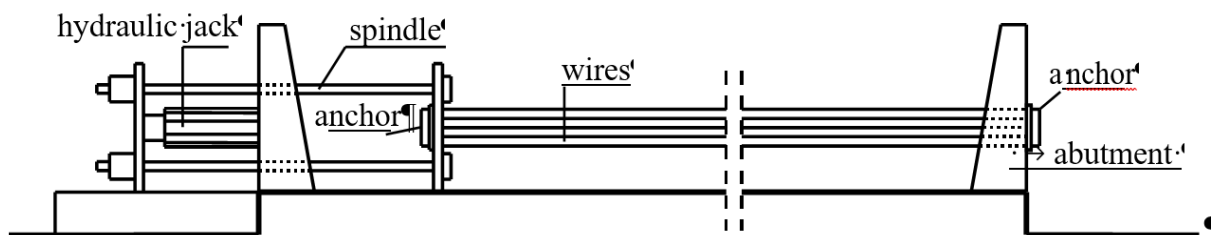
Εικόνα 21: Καλούπι δοκών προέντασης.

4.1.2. Τοποθέτηση οπλισμού

Εκτός από τα σύρματα που θα χρησιμοποιηθούν για την προένταση, κάθε στοιχείο σκυροδέματος έχει παραδοσιακό οπλισμό (στο επάνω και στο κάτω μέρος του στοιχείου, κατακόρυφη διατμητική ενίσχυση) που πρέπει πάντα να υπάρχει, ανεξάρτητα από τη μέθοδο προέντασης που εφαρμόζεται. Στο προεντεταμένο σκυρόδεμα, τα σύρματα για προένταση είναι θέσεις στο καλούπι μαζί με τον παραδοσιακό οπλισμό.

4.1.3. Προένταση

Αυτός ο τύπος παραγωγής χρησιμοποιεί τη μέθοδο προέντασης με μακρά γραμμή με εξαρτήματα που φαίνονται στην Εικόνα 16. Η εικόνα δείχνει ότι το ένα άκρο των συρμάτων συνδέεται ισχυρά με το στήριγμα μέσω μιας άγκυρας. Το άλλο άκρο των καλωδίων μέσω της άγκυρας και του άξονα συνδέεται με υδραυλικό γρύλο. Τα καλώδια τεντώνονται με υδραυλικό γρύλο στην επαρκή δύναμη προέντασης. Έτσι τα καλώδια παραμένουν τεντωμένα και μπορεί να ξεκινήσει η χύτευση του σκυροδέματος.



Picture 3: Equipment for pre-tensioning

Εικόνα 22: Εξοπλισμός για την παραγωγή δοκών προέντασης.

4.1.4. Χύτευση σκυροδέματος

Η ποσότητα σκυροδέματος που απαιτείται για την κατασκευή ενός στοιχείου εξαρτάται από τις διαστάσεις του στοιχείου και καθορίζεται σύμφωνα με την τεκμηρίωση του έργου. Η χύτευση του σκυροδέματος πρέπει να γίνεται χωρίς διακοπή. Η ιδανική θερμοκρασία είναι 14 - 20°C. Αφού τοποθετηθεί το σκυρόδεμα στο καλούπι, πραγματοποιείται συμπίεση φρέσκου ιστού σκυροδέματος. Όταν το σκυρόδεμα επιτυγχάνει αντοχή σε θλίψη περίπου 30MPa, η σύνδεση μεταξύ των συρμάτων και των αγκυρίων απελευθερώνεται και το προεντεταμένο στοιχείο έγινε.

4.1.5. Αφαίρεση του καλουπιού

Η μούχλα μπορεί να αφαιρεθεί από ένα στοιχείο όταν το σκυρόδεμα έχει επιτύχει επαρκή αντοχή. Η αφαίρεση πρέπει να γίνει με προσοχή για να μην προκληθούν ζημιές στις άκρες του στοιχείου. Στην παραγωγή δοκών προεντεταμένου σκυροδέματος όπου εφαρμόζεται προεντεταμένη δύναμη, συνιστάται η αφαίρεση του καλουπιού αφού το σκυρόδεμα έχει επιτύχει τη μέγιστη θλιπτική αντοχή και δηλαδή για 28 ημέρες μετά τη χύτευση του σκυροδέματος.

4.1.6. Αποθήκευση

Με την αφαίρεση η διαδικασία παραγωγής καλουπιού ολοκληρώνεται, οπότε η επόμενη φάση είναι η αποθήκευση (Εικόνα 23).



Εικόνα 23: Αποθήκευση δοκών προέντασης.

Η αποθήκευση πρέπει να γίνεται με προσοχή. Το πιο σημαντικό είναι η μεταφορά ενός στοιχείου στον τόπο αποθήκευσης. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αποθήκευσης, τα στοιχεία δεν μπορούν να καταστραφούν και πρέπει να

τοποθετηθούν τέλεια χωρίς να παρέχουν την ελευθερία κινήσεων. Επιπλέον, τα στοιχεία πρέπει να βρίσκονται στην ευθεία επιφάνεια χωρίς δυνατότητα εμφάνισης ροπής κάμψης.

4.2. Μεταένταση

Οι φάσεις της παραγωγικής διαδικασίας είναι οι εξής:

- 1) προετοιμασία του καλουπιού,
- 2) τοποθέτηση οπλισμού και αγωγού,
- 3) χύτευση σκυροδέματος,
- 4) αφαίρεση του καλουπιού,
- 5) προένταση,
- 6) αποθήκευση.

Η διαδικασία παραγωγής είναι παρόμοια με μια διαδικασία που περιεγράφηκε προηγουμένως με ορισμένες διαφορές. Φάσεις παραγωγής όπως: προετοιμασία του καλουπιού, χύτευση σκυροδέματος, αφαίρεση του καλουπιού και αποθήκευση μπορούν να γίνουν με τον ίδιο τρόπο που περιγράφεται παραπάνω. Επομένως, το επόμενο κείμενο θα περιγράψει μόνο τις φάσεις παραγωγής που είναι ουσιαστικά διαφορετικές από τις φάσεις της προηγούμενης μεθόδου προέντασης (Beganović, 2006)(*Prednapeti Beton-Predavanja*, n.d.).

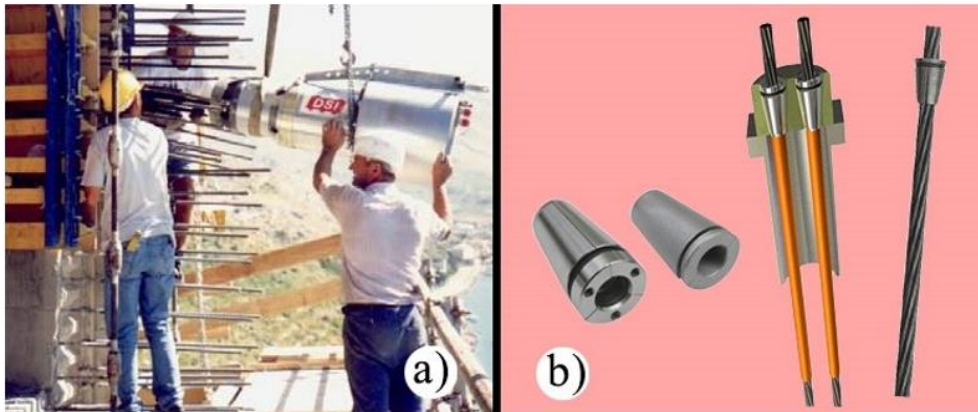
4.2.1. Τοποθέτηση οπλισμού και αγωγού

Σε αυτή τη φάση τοποθετείται μόνο παραδοσιακή ενίσχυση στο καλούπι. Επιπλέον, στο καλούπι τοποθετείται επίσης ένας αγωγός (συνήθως σωλήνες από χάλυβα ή πλαστικό) και σύρματα προέντασης θα περάσουν αργότερα από τον αγωγό. Τώρα μπορεί να εφαρμοστεί σκυροδέτηση. Όταν το σκυρόδεμα έχει σκληρυνθεί καλά, η μούχλα μπορεί να αφαιρεθεί. Μετά την αφαίρεση του καλουπιού μπορεί να εφαρμοστεί συμπίεση και αυτό είναι που κάνει αυτή τη μέθοδο προέντασης διαφορετική από την προένταση (Beganović, 2006).

4.2.2. Προένταση

Σε αυτή την περίπτωση η προένταση εφαρμόζεται με υδραυλικό γρύλο (Εικόνα 18α) αφού το σκυρόδεμα έχει επιτύχει τη μέγιστη θλιπτική αντοχή. Φυσικά, πρέπει πρώτα

να τοποθετηθούν καλώδια ή καλώδια στον αγωγό. Στο ένα άκρο της δοκού, τα καλώδια αγκυρώνονται μόνιμα (συνήθως στο σκυρόδεμα) με νεκρή άγκυρα. Στο άλλο άκρο υπάρχει μια ενεργή άγκυρα που χρησιμοποιείται για την αγκύρωση των συρμάτων μετά την προένταση. Σήμερα, υπάρχουν πολλά διάδια για την αγκύρωση των καλωδίων και των καλωδίων στο άκρο της δοκού (Εικόνα 24b) (Τομιζιό, 1995)(Jure, 2006).



Εικόνα 24: Υδραυλικός γρύλος για προένταση (a) και εξοπλισμός αγκυρώσεως (b).

Μετά την προένταση, η δύναμη μεταφέρεται στο στοιχείο σκυροδέματος με άγκυρες που βρίσκονται στα άκρα της δοκού. Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για την προένταση μπορούν να αρμολογηθούν με υλικό έγχυσης. Αυτός ο τύπος προέντασης ονομάζεται συγκολλημένο μετα-ενταμένο σκυρόδεμα. Αντί για αρμολόγηση, τα καλώδια μπορούν να έχουν μόνιμη ελευθερία κινήσεων σε σχέση με το σκυρόδεμα. Αυτός ο τύπος προέντασης ονομάζεται μη συνδεδεμένο μετα-ενταμένο σκυρόδεμα. Προκειμένου να προστατεύονται τα καλώδια και τα καλώδια από τη διάβρωση και να παρέχεται σύνδεση μεταξύ των τενόντων και του σκυροδέματος, σήμερα είναι πιο αποδεκτό να χρησιμοποιείται κολλημένο προεντεταμένο σκυρόδεμα (Beganović, 2006)(Τομιζιό, 1995)(Jure, 2006).

Σε αυτόν τον τύπο προέντασης, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι όλα τα καλώδια δεν μπορούν να τεντωθούν αμέσως μετά την κατασκευή της δοκού. Κατά την αποθήκευση, μόνο μερικά καλώδια μπορούν να τεντωθούν για να μεταφερθεί η δοκός στην αποθήκη.

Η τάνυση όλων των συρμάτων εφαρμόζεται κατά τη συναρμολόγηση ενός στοιχείου στη δομή. Καθώς έχουν συναρμολογηθεί περισσότερα μέρη της κατασκευής (για παράδειγμα οι γέφυρες), πρέπει να προεντεταθούν περισσότερα σύρματα. Είναι

επίσης σημαντικό να πούμε ότι η μετα-ένταση μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους:

- εσωτερικό (τα καλώδια βρίσκονται στο εσωτερικό του στοιχείου σκυροδέματος),
- εξωτερικά (τα καλώδια βρίσκονται έξω από το στοιχείο σκυροδέματος).

Στην Εικόνα 25 φαίνεται η εξωτερική προένταση (*Prednapeti Beton-Predavanja*, n.d.).



Εικόνα 25: Εξωτερική διαδικασία προέντασης.

Κεφάλαιο 5 – Δύναμη προέντασης σε προεντεταμένο σκυρόδεμα

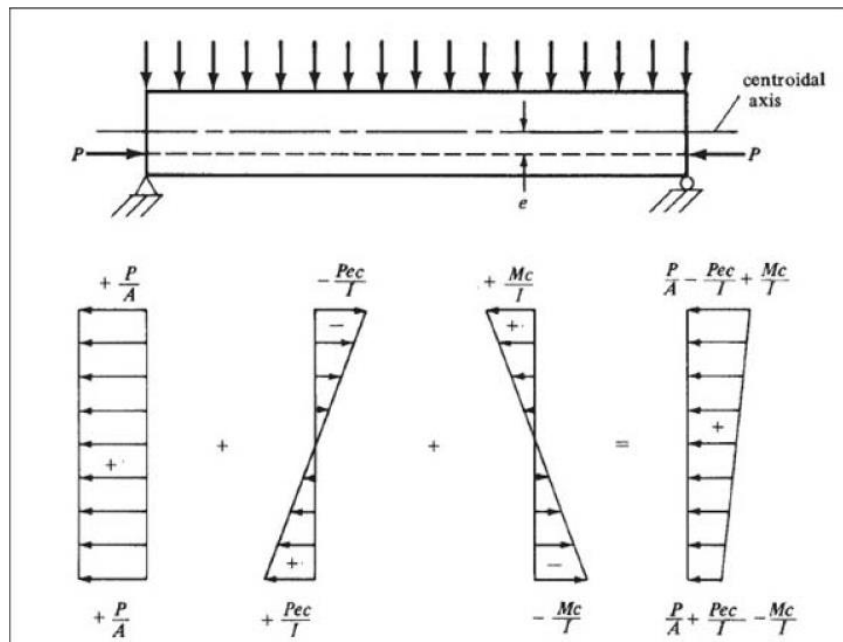
Στο κεφάλαιο δίνονται οι γενικές αρχές που απαιτούνται για το σχεδιασμό κατασκευών ή μελών προεντεταμένου σκυροδέματος με τένοντες CFRM σε συνδυασμό με τένοντες από χάλυβα. Τα επίπεδα προέντασης πρέπει να καθορίζονται για να διασφαλίζεται ότι η κατασκευή μπορεί να εκπληρώσει το σκοπό της με ασφάλεια και οικονομικά, ώστε να δώσει την επιθυμητή απόδοση.

5.1 Υπολογισμός τάσεων

Η θεώρηση των τάσεων σε μια προεντεταμένη ορθογώνια δοκό, δίνεται στην Εικόνα 20 που ακολουθεί. Για αυτό το παράδειγμα, οι τένοντες προέντασης θεωρείται ότι είναι ίσοι, αν και αργότερα θα αποδειχθεί ότι ένα καμπύλο σχήμα είναι πιο πρακτικό για τις περισσότερες δοκούς. Οι τένοντες υποτίθεται ότι βρίσκονται σε μια έκκεντρη απόσταση (e), κάτω από τον κεντροειδές άξονα της δέσμης. Ως αποτέλεσμα, η δοκός υπόκειται σε συνδυασμό άμεσης συμπίεσης και ροπής λόγω της εκκεντρότητας της προέντασης. Επιπλέον, θα υπάρχει μια δύναμη από το εξωτερικό φορτίο, συμπεριλαμβανομένου του ίδιου του βάρους της δοκού. Η προκύπτουσα τάση σε οποιοδήποτε σημείο της δοκού που προκαλείται από αυτούς τους τρεις παράγοντες μπορεί να γραφτεί ως εξής, όπου P είναι η δύναμη προέντασης:

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{P * e * c}{I} \pm \frac{M * c}{I}$$

Σε αυτήν την έκφραση, P είναι η δύναμη προέντασης, e είναι η εκκεντρότητα της δύναμης προέντασης ως προς το κέντρο της διατομής, c είναι η απόσταση από τον κεντροειδές άξονα στην ακραία ίνα (πάνω ή κάτω ανάλογα με το πού βρίσκονται οι τάσεις καθορίζεται), το M είναι η εφαρμοζόμενη ροπή από τα μη παραγοντικά φορτία στο στάδιο στο οποίο υπολογίζονται οι τάσεις, το A είναι το εμβαδόν διατομής του μη ραγισμένου σκυροδέματος και το I είναι η ροπή αδράνειας της μικτής διατομής σκυροδέματος. Στην Εικόνα 20, σχεδιάζεται ένα διάγραμμα τάσεων για καθένα από αυτά τα τρία στοιχεία και τα τρία συνδυάζονται για να δώσουν το τελικό διάγραμμα τάσεων (JSCE Standard, 2020).



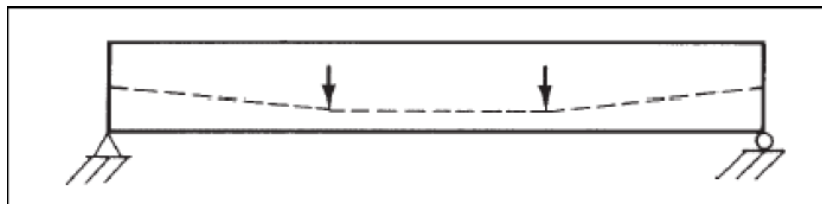
Εικόνα 26: Κατανομή τάσεων σκυροδέματος από έκκεντρη δύναμη προέντασης και υπερτιθέμενα φορτία.

Η συνήθης πρακτική είναι να βασίζονται οι υπολογισμοί τάσεων στο ελαστικό εύρος στις ιδιότητες του χονδροειδούς τμήματος σκυροδέματος. Το μικτό τμήμα αποτελείται από τις εξωτερικές διαστάσεις του σκυροδέματος χωρίς προσθήκες για τη μετασχηματισμένη περιοχή των χαλύβδινων τενόντων ή αφαιρέσεις που γίνονται για τις περιοχές αγωγών κατά την μετάταση. Αυτή η μέθοδος θεωρείται ότι δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα επειδή οι μεταβολές στις τάσεις που λαμβάνονται εάν χρησιμοποιηθούν καθαρές ή μετασχηματισμένες ιδιότητες συνήθως δεν είναι σημαντικές. Θα σημειωθεί ότι, καθώς δεν υπάρχουν ροπές στα άκρα μιας απλής δοκού από τα εξωτερικά φορτία ή από το ίδιο το βάρος της δοκού, το τμήμα Mc/I της εξίσωσης τάσης είναι μηδέν εκεί και η εξίσωση μειώνεται σε:

$$f = \frac{P}{A} \pm \frac{P * c * e}{I}$$

Εάν, ωστόσο, οι τένοντες είναι ντυμένοι, όπως φαίνεται στην Εικόνα 27, είναι δυνατό να μειωθούν ή ακόμη και να εξαλειφθούν οι τάσεις εφελκυσμού. Έξω στο άνοιγμα, το κέντρο των κλώνων μπορεί να είναι κάτω από το κάτω σημείο του πυρήνα για τον προσδιορισμό του σημείου του πυρήνα για αυτό το τμήμα, αλλά αν στα άκρα της δοκού, όπου δεν υπάρχει τάση λόγω της ροπής του νεκρού φορτίου, είναι κάτω από το σημείο του πυρήνα, το αποτέλεσμα θα είναι οι τάσεις εφελκυσμού να εφαρμοσθούν στην κορυφή. Εάν οι τένοντες είναι ντυμένοι έτσι ώστε στα άκρα να βρίσκονται στο ή πάνω από αυτό το σημείο, δεν θα υπάρξει τάση στην κορυφή της

δοκού (Izzet & Abdulhameed, 2017). Στην μετάταση, το χιτόνιο ή ο αγωγός τοποθετείται στις φόρμες στην επιθυμητή καμπύλη θέση. Οι τένοντες στα προεντεταμένα μέλη μπορούν να τοποθετηθούν στα ή πάνω από τα κάτω σημεία του πυρήνα και στη συνέχεια να ωθηθούν προς τα κάτω στο επιθυμητό βάθος στην κεντρική γραμμή ή σε άλλα σημεία. Στην Εικόνα 27, οι τένοντες φαίνονται συγκρατημένοι στο ένα τρίτο σημείο. Δύο εναλλακτικές λύσεις αντί των ντυμένων τενόντων που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι η χρήση ευθύγραμμων τενόντων, που βρίσκονται κάτω από το κατώτερο σημείο του πυρήνα, αλλά που είναι εγκλωβισμένοι σε σωλήνες στα άκρα τους ή που έχουν τα άκρα τους λιπασμένα. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την πρόληψη της ανάπτυξης αρνητικών ροπών στα άκρα της δοκού. Στην Ενότητα 18.3.3 ACI, τα συνδεδεμένα και μη συνδεδεμένα προεντεταμένα μέλη ορίζονται ως μέλη Κατηγορίας U, T ή C. Αυτές οι ταξινομήσεις βασίζονται σε υπολογισμένες τάσεις εφελκυσμού σε μέλη που υπόκεινται σε φορτία λειτουργίας. Τα μέλη της κλάσης U είναι εκείνα που υποτίθεται ότι δεν είναι σπασμένα και έχουν μέγιστες εφελκυστικές τάσεις $f_t \leq 7,5\sqrt{f_c}$. Τα μέλη της κατηγορίας Γ είναι εκείνα που υποτίθεται ότι είναι σπασμένα και έχουν $f_t > 12\sqrt{f_c}$. Τα μέλη της κατηγορίας T θεωρείται ότι βρίσκονται σε μετάβαση μεταξύ σπασμένων και μη ραγισμένα μέλη και έχουν μέγιστες τάσεις εφελκυσμού $> 7\sqrt{f_c}$ (JSCE Standard, 2020).



Εικόνα 27: Ντυμένοι τένοντες.

5.2 Υπολογισμοί δύναμης προέντασης

Η δύναμη προέντασης υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 2:

$$P(\chi) = P_i - [\Delta P_i(\chi) + \Delta P_t(\chi)] + \Delta P_T(\chi)$$

Όπου: $P(\chi)$ = δύναμη προέντασης στο υπό εξέταση τμήμα σχεδιασμού,

P_i = δύναμη προέντασης κατά την προένταση λόγω τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του τένοντα,

$\Delta P_i(\chi)$ = η απώλεια της δύναμης προέντασης κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά την προένταση, που θα υπολογιστεί επιτρέποντας τα ακόλουθα αποτελέσματα:

[1] την ελαστική παραμόρφωση του σκυροδέματος

[2] την τριβή μεταξύ τένοντα και αγωγού και

[3] την απώλεια καθορισμού κατά την αγκύρωση του τένοντα

$\Delta P_i(x)$ = η εξαρτώμενη από το χρόνο απώλεια της δύναμης προέντασης, που θα υπολογιστεί επιτρέποντας τα ακόλουθα αποτελέσματα:

[4] τη χαλάρωση του τένοντα

[5] τον ερπυσμό του σκυροδέματος

[6] τη συρρίκνωση του σκυροδέματος

$\Delta P_T(x)$ = μεταβολή της δύναμης προέντασης λόγω αλλαγής της θερμοκρασίας.

Κεφάλαιο 6 – Δυνάμεις προέντασης σε κατασκευές από προεντεταμένο σκυρόδεμα

Από την εισαγωγή του προεντεταμένου σκυροδέματος στη δεκαετία του 1940, υπήρξε σημαντική αύξηση στη χρήση του ως δομικού υλικού λόγω των πολυάριθμων πλεονεκτημάτων του έναντι του παραδοσιακού οπλισμένου σκυροδέματος, όπως μειωμένα μεγέθη μελών, έλεγχος παραμόρφωσης και έλεγχος ρωγμών. Για παράδειγμα, περισσότερο από το 45% των γεφυρών που κατασκευάστηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες από το 2010 έχουν κατασκευαστεί από προεντεταμένο σκυρόδεμα (Kahn & Lopez, 2005). Επιπλέον, το προεντεταμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται συνήθως στην κατασκευή πολλών άλλων τύπων σημαντικών κατασκευών, όπως δοχεία συγκράτησης πυρηνικών αντιδραστήρων, σιλό και δεξαμενές, πλάκες δαπέδου μετά την τάση και πύργους ανεμογεννητριών προεντεταμένου και μετατεταμένου σκυροδέματος. Λόγω της σημασίας αυτών των δομών, η παράταση της διάρκειας ζωής τους παρουσιάζει ενδιαφέρον. Αυτό οδήγησε σε πολλές προσπάθειες για την παρακολούθηση του προεντεταμένου σκυροδέματος για τη διασφάλιση της δομικής ακεραιότητας και απόδοσης τόσο μέσω της μακροπρόθεσμης παρακολούθησης της δομικής υγείας (SHM) όσο και της διαλείπουσας μη καταστροφικής αξιολόγησης (NDE).

Τα επίπεδα της δύναμης προέντασης είναι ενδεικτικά της ζημιάς ως προάγγελος ορισμένων τύπων ζημιών (η απώλεια τους μπορεί να προκαλέσει ρωγμές) και ως συνέπεια άλλων τύπων ζημιών (διάβρωση ή ρήξη κλώνων). Εάν τα επίπεδα δύναμης πέσουν κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι, μπορεί να αναπτυχθούν εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα, με αποτέλεσμα ρωγμές ή υπερβολικές παραμορφώσεις. Επιπλέον, η διάβρωση ή η ρήξη στα νήματα προέντασης έχει ως αποτέλεσμα τοπικές αλλαγές στα επίπεδα της δύναμης προέντασης, οι οποίες μπορεί να έχουν καταστροφικές επιπτώσεις στη δομή. Εάν εντοπιστεί τοπική αλλαγή στα επίπεδα δύναμης προέντασης, μπορεί να είναι ενδεικτική τέτοιων τύπων ζημιών και μπορεί να προγραμματιστεί συντήρηση για να αποτραπεί η διάδοση αυτής της βλάβης σε επίπεδο που μπορεί να απειλήσει την ασφάλεια της κατασκευής. Τα επίπεδα της δύναμης προέντασης αναμένεται να μειωθούν κατά τη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής λόγω απωλειών που εξαρτώνται από το χρόνο που προκαλούνται από χαλάρωση χαλύβδινων κλώνων και αλλαγές διαστάσεων σκυροδέματος λόγω ερπυσμού και συρρίκνωσης. Αυτές οι απώλειες προέντασης υπολογίζονται στη

διαδικασία σχεδιασμού χρησιμοποιώντας εμπειρικές εξισώσεις από κώδικες σχεδιασμού. Ωστόσο, αυτές οι εμπειρικές εξισώσεις βασίζονται συνήθως σε εργαστηριακές δοκιμές και μπορεί να μην αντιπροσωπεύουν πραγματικά τις πραγματικές συνθήκες μίγματος σκυροδέματος και σκλήρυνσης. Για παράδειγμα, οι απώλειες προέντασης σε προεντεταμένο σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης έχει αποδειχθεί ότι είναι σημαντικά διαφορετικές από τις προβλέψεις σχεδιασμού και εξαρτώνται από το μείγμα σκυροδέματος (Abdel-Jaber & Glisic, 2019). Η υπερεκτίμηση των απωλειών προέντασης μπορεί να οδηγήσει σε συντηρητικούς και πιθανώς αντικοινομικούς σχεδιασμούς. Από την άλλη πλευρά, η υποτίμηση των απωλειών προέντασης μπορεί να οδηγήσει σε τάσεις εφελκυσμού στο σκυρόδεμα και πιθανώς ρωγμές, που μπορεί να επηρεάσουν την ανθεκτικότητα εκθέτοντας τον οπλισμό στο περιβάλλον και σε ορισμένες περιπτώσεις, σε συνδυασμό με άλλους μηχανισμούς (π.χ. διάβρωση), μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία. Έτσι, η αξιολόγηση των δυνάμεων προέντασης και συνεπώς των απωλειών σε κατασκευές από προεντεταμένο σκυρόδεμα έχει γίνει όλο και πιο σημαντική.

6.1 Κριτήρια αξιολόγησης

Οι μέθοδοι που παρουσιάζονται σε αυτό το άρθρο λαμβάνουν υπόψη γενικές κατηγορίες μεθόδων NDE και SHM και όχι συγκεκριμένους αισθητήρες ή αλγόριθμους. Έτσι, αξιολογούνται με βάση τη συνολική τους υπόσχεση να παρέχουν σταθερές και ακριβείς μακροπρόθεσμες πληροφορίες για τις δυνάμεις προέντασης. Τα πέντε κριτήρια αξιολόγησης περιλαμβάνουν την ευαισθησία στις αλλαγές της δύναμης προέντασης, τη στεγανότητα σε άλλους τακτικά μεταβαλλόμενους παράγοντες όπως οι περιβαλλοντικές μεταβλητές, την ικανότητα παρακολούθησης της τοπικής κατανομής της δύναμης κατά μήκος του κλώνου, τη σκοπιμότητα των οργάνων και την ευκολία εφαρμογής σε διαφορετικούς τύπους πραγματικών δομών ζωής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η εργασία εξετάζει μεθόδους που αφορούν κυρίως νήματα σε κατασκευές από προεντεταμένο σκυρόδεμα και κατασκευές με συρματοσχοίνο. Μια ιδανική μέθοδος θα πρέπει να είναι πολύ ευαίσθητη σε μικρές αλλαγές στη δύναμη προέντασης, ενώ δεν επηρεάζεται εντελώς από αλλαγές σε άλλους παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, που αναμένεται να ποικίλλουν περιοδικά σε όλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Οι απώλειες προέντασης είναι συνήθως μικρότερες από το 25% της αρχικής τιμής της δύναμης

προέντασης, και ο μέσος όρος που βασίζεται σε περισσότερες από σαράντα μελέτες αναφέρθηκε ότι είναι 21% (Joint ACI-ASCE Committee, 2016). Αν και η διακύμανση της απώλειας προέντασης σε αρκετά τοις εκατό γενικά δεν αποτελεί ανησυχία για το σχεδιασμό. Εφόσον η απώλεια σταθεροποιείται με την πάροδο του χρόνου, η σταθερή εξέλιξη ή η ξαφνική αύξηση των απωλειών με την πάροδο του χρόνου μπορεί να είναι κρίσιμη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ευαισθησία της μεθόδου είναι πολύ σημαντική γιατί οι μέθοδοι με υψηλότερη ευαισθησία είναι πιο πιθανό να ανιχνεύσουν την εξέλιξη ή την αύξηση των απωλειών προέντασης σε πρώιμο στάδιο, κάτι που βοηθά τους διαχειριστές να σχεδιάσουν προληπτικές ή επισκευαστικές ενέργειες.

Η διαπερατότητα σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, ιδιαίτερα τη θερμοκρασία, είναι μία από τις κύριες προκλήσεις για τις επιτόπιες εφαρμογές των περισσότερων μακροπρόθεσμων τεχνικών SHM και NDE, ανεξάρτητα από τον σκοπό της παρακολούθησης. Επειδή καμία μέθοδος ή παράμετρος παρακολούθησης δεν είναι εντελώς ανεπηρέαστη από τις αλλαγές θερμοκρασίας, το κριτήριο σε αυτή την περίπτωση σχετίζεται με τον βαθμό στον οποίο η επίδραση της θερμοκρασίας στις συλλεγόμενες μετρήσεις, και επομένως στα αποτελέσματα, είναι γνωστή και κατανοητή. Η κατανομή δύναμης κατά μήκος του κλώνου παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με ελαττώματα του κλώνου, που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία, 8,9 καθώς και σχετικά με άμεσες απώλειες σε προεντεταμένο σκυρόδεμα, όπως αυτές λόγω πήξης αγκυρώσεων και τριβής. Σημαντική αλλαγή στο μέγεθος της δύναμης κατά μήκος του κλώνου μπορεί να συνεπάγεται θραύση του σύρματος, η επίδραση του οποίου είναι αμελητέα καθώς η απόσταση από τη θραύση αυξάνεται και μπορεί να μην ανιχνευθεί εάν η δύναμη παρακολουθείται μόνο κοντά στην αγκύρωση. Αυτό το κριτήριο σχετίζεται με τη σκοπιμότητα της κατασκευής του κλώνου ή της δοκού με πολλαπλούς αισθητήρες κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Επιπλέον, σχετίζεται με την εντοπιότητα της παρακολουθούμενης παραμέτρου, δηλαδή την περιοχή στην οποία είναι έγκυρη και αντιπροσωπευτική. Για παράδειγμα, η φυσική συχνότητα είναι μια συνολική παράμετρος που χαρακτηρίζει ολόκληρη τη δομή, ενώ η καταπόνηση είναι μια τοπική παράμετρος που αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά στη συγκεκριμένη τοποθεσία στην οποία μετράτε.

Η σκοπιμότητα και η δυνατότητα για επιτόπιες υλοποιήσεις είναι ένα άλλο σημαντικό κριτήριο στην αξιολόγηση και σύγκριση των μεθόδων. Αυτό το κριτήριο επηρεάζεται από το κόστος, το μέγεθος και το βάρος των αισθητήρων και του εξοπλισμού που

απαιτείται για μια τεχνική παρακολούθησης. Έτσι, σχετίζεται έντονα με την ωριμότητα της τεχνικής παρακολούθησης. Οι πιο ώριμες τεχνικές έχουν πιο εύκολα διαθέσιμους εμπορικούς αισθητήρες διαφόρων μεγεθών, ανάλογα με τον σκοπό των οργάνων, μειώνοντας έτσι το κόστος παρακολούθησης και παρέχοντας καλό ποιοτικό έλεγχο των αισθητήρων, σε αντίθεση με αυτούς που βρίσκονται στο στάδιο της έρευνας. Η δυνατότητα εφαρμογής σε διαφορετικούς τύπους κατασκευών είναι εγγενής στη μέθοδο και ελέγχεται από δύο πτυχές:

(α) απαίτηση για άμεση πρόσβαση στον κλώνο προέντασης και

(β) ανάγκη για ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για ανάλυση δεδομένων.

Και οι δύο αυτές πτυχές περιορίζουν τους τύπους δομών που μπορούν να παρακολουθούνται χρησιμοποιώντας μια δεδομένη μέθοδο με διαφορετικούς τρόπους. η απαίτηση για άμεση πρόσβαση περιορίζει τη χρήση της μεθόδου σε δομές με εξωτερικούς τένοντες προέντασης, ενώ η ανάγκη για ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων περιορίζει την εφαρμογή σε λιγότερο πολύπλοκες δομές με γνωστές ιδιότητες υλικού. Ενώ η υπέρβαση της απαίτησης για άμεση πρόσβαση είναι δύσκολη, η υπέρβαση της ανάγκης για ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων είναι συχνά δυνατή μέσω βαθμονόμησης με γνωστά επίπεδα δύναμης προέντασης, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία μιας εμπειρικής σχέσης μεταξύ της μετρούμενης παραμέτρου και του επιπέδου της δύναμης προέντασης χωρίς την ανάγκη μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, οι συνθήκες και οι απαιτήσεις της τοποθεσίας δεν επιτρέπουν πάντα μια φάση βαθμονόμησης με γνωστά επίπεδα δύναμης, καθιστώντας αυτή την επιλογή πιο κατάλληλη για εργαστηριακές εφαρμογές.

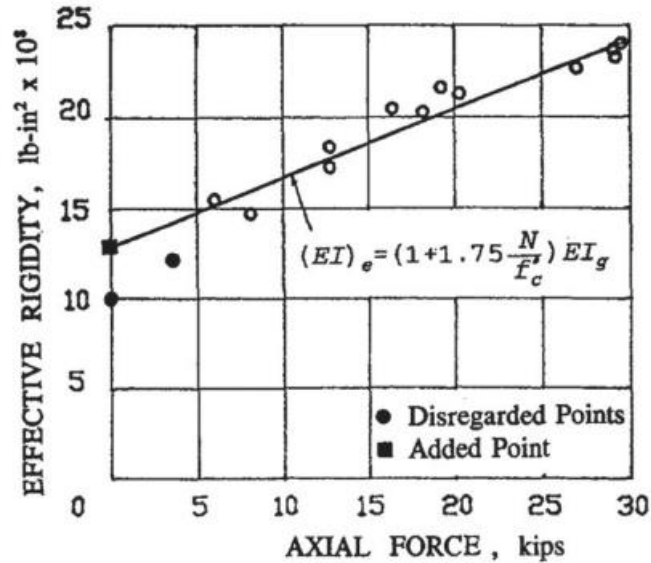
6.2 Μέθοδοι δόνησης

Οι μέθοδοι δόνησης περιλαμβάνουν όλες τις μεθόδους αναγνώρισης της δύναμης προέντασης που χρησιμοποιούν τις ιδιότητες δόνησης μιας κατασκευής. Για τους σκοπούς αυτής της μελέτης, οι παρουσιαζόμενες μέθοδοι θα περιοριστούν σε εκείνες που περιλαμβάνουν φυσικές συχνότητες, καθώς τα σχήματα ή οι μετρήσεις μετατόπισης αποδείχθηκε ότι δεν επηρεάζονται από την αλλαγή στις δυνάμεις προέντασης. Η κύρια αρχή βασίζεται στην εξάρτηση των φυσικών συχνοτήτων από την ακαμψία της κατασκευής, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από το επίπεδο της δύναμης προέντασης. Τέτοιες μέθοδοι έχουν αποδειχθεί επιτυχείς για καλωδιωμένες

κατασκευές όπου η δύναμη στο καλώδιο σχετίζεται άμεσα με τη μετρούμενη φυσική συχνότητα χρησιμοποιώντας τη θεωρία των χορδών τροφοδοσίας (Abraham et al., 1995). Ωστόσο, η σχέση είναι πιο περίπλοκη στις κατασκευές από προεντεταμένο σκυρόδεμα. Αν και πολλοί ερευνητές έχουν αναπτύξει σχέσεις μεταξύ της δύναμης προέντασης και των φυσικών συχνοτήτων που προκύπτουν της κατασκευής, άλλοι ερευνητές έχουν δείξει ότι η δύναμη προέντασης δεν έχει καμία επίδραση στις φυσικές συχνότητες. Υπάρχουν τρία διαφορετικά επιχειρήματα για τη σχέση μεταξύ των δυνάμεων προέντασης και της φυσικής συχνότητας (Casas, 1994). Πρώτον, ορισμένοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι η αύξηση των δυνάμεων προέντασης οδηγεί σε μείωση των φυσικών συχνοτήτων, κυρίως λόγω της επίδρασης της αποσκλήρυνσης με συμπίεση. Μία από τις πρώτες προσπάθειες να συσχετιστεί η συχνότητα δόνησης μιας κατασκευής με το επίπεδο της δύναμης προέντασης ήταν μια πειραματική μελέτη από τους Saiidi et al. (1994). Η μελέτη εξέτασε αρχικά ένα αναλυτικό μοντέλο για τη σχέση, που δόθηκε από την παρακάτω εξίσωση, η οποία θεωρεί ότι η αυξανόμενη δύναμη προέντασης σε επίπεδα θα προκαλούσε μείωση των φυσικών συχνοτήτων:

$$\omega_v^2 = -\left(\frac{n * \pi}{L}\right)^2 * \frac{N}{m} + \left(\frac{n * \pi}{L}\right)^4 * \frac{E * I}{m}$$

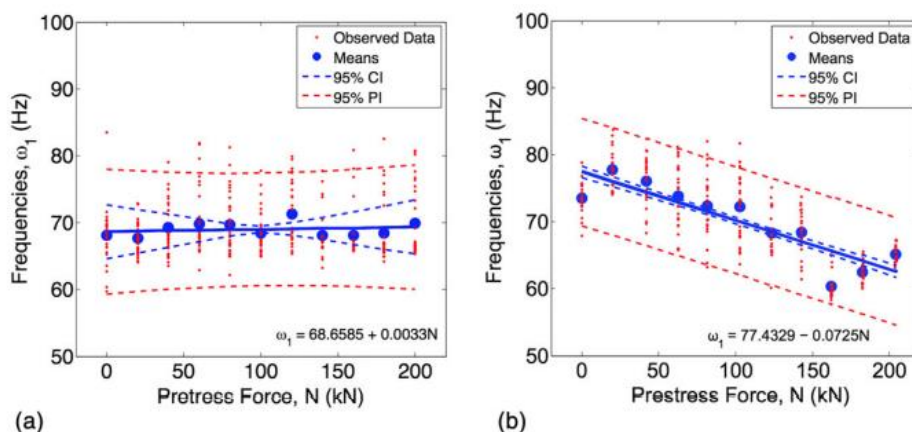
όπου ω είναι η φυσική συχνότητα της δόνησης, n είναι ο αριθμός λειτουργίας, L είναι το μήκος του ανοίγματος, N είναι η αξονική δύναμη συμπίεσης, δηλαδή η δύναμη προέντασης, m είναι η μάζα της δοκού ανά μονάδα μήκους, E είναι ο συντελεστής ελαστικότητας της δοκού σκυροδέματος και το I είναι η ροπή αδράνειας για το τμήμα της δοκού.



Εικόνα 28: Διακόμανση της ακαμψίας σε εφαρμογή κάμψης με αξονική (προένταση) δύναμη (Saiidi et al., 1994).

Ωστόσο, οι εργαστηριακές και επιτόπιες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στη μελέτη έδειξαν το αντίθετο αποτέλεσμα, όπου η αύξηση των επιπέδων της δύναμης προέντασης προκάλεσε αυξημένες φυσικές συχνότητες, αποτέλεσμα που επιβεβαιώθηκε πειραματικά σε άλλες μελέτες. Ισχυρίζεται ότι η αύξηση της δύναμης προέντασης προκαλεί αύξηση των φυσικών συχνοτήτων. Η απόκλιση εξηγήθηκε από το φαινόμενο ακαμψίας λόγω του κλεισίματος των μικρορωγμών στο σκυρόδεμα καθώς αυξάνονται τα επίπεδα δύναμης προέντασης, αυξάνοντας έτσι την ακαμψία και τις φυσικές συχνότητες της κατασκευής, μια επίδραση που δεν λαμβάνεται υπόψη στο αναλυτικό μοντέλο. Οι συγγραφείς επιβεβαίωσαν αυτό το αποτέλεσμα εξετάζοντας την αλλαγή στην πραγματική ακαμψία κάμψης (δηλαδή, την ακαμψία κάμψης που θα είχε ως αποτέλεσμα τις μετρούμενες φυσικές συχνότητες) με την αλλαγή στην αξονική δύναμη. Η θετική συσχέτιση παρουσιάζεται στην Εικόνα 28.

Άλλοι ερευνητές συμφωνούν ότι η αύξηση των δυνάμεων προέντασης στις ραγισμένες δοκούς έχει ως αποτέλεσμα το κλείσιμο της ρωγμής που αυξάνει την ακαμψία. Οι Noble et al. (2015) συνέκριναν τις φυσικές συχνότητες μιας μη ραγισμένης και μιας ραγισμένης δοκού με ποικίλα επίπεδα δύναμης προέντασης.



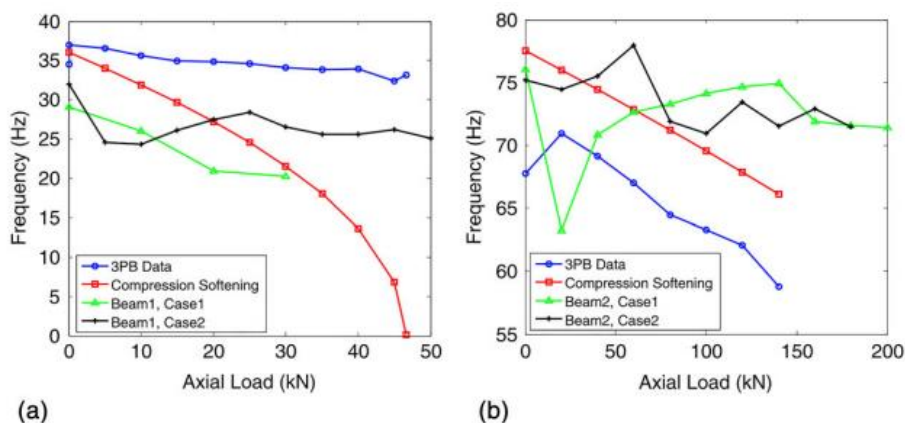
Εικόνα 29: Ανάλυση παλινδρόμησης της θεμελιώδους συχνότητας με φορτίο μετατάσεως για (α) μια μη ραγισμένη δοκό και (β) μια ραγισμένη δοκό (D Noble et al., 2015).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 29, η μελέτη δεν έδειξε στατιστικά σημαντική σχέση μεταξύ της δύναμης προέντασης και των φυσικών συχνοτήτων για μη ραγισμένη δοκό (Εικόνα 29α), αλλά μια σημαντική σχέση για μια ραγισμένη δοκό (Εικόνα 29β). Οι ερευνητές εξήγησαν περαιτέρω την παρουσιαζόμενη περίπλοκη σχέση, όπου υπάρχει σημαντική μείωση στις φυσικές συχνότητες για επίπεδα δυνάμεων προέντασης κάτω από 160kN, ακολουθούμενη από αυξητική τάση. Οι ερευνητές απέδωσαν τη μείωση στην πολύπλοκη δυναμική συμπεριφορά της ραγισμένης δέσμης που την κάνει να συμπεριφέρεται ως μια σειρά ανεξάρτητων δοκών με μήκη που αυξάνονται καθώς συμβαίνει το κλείσιμο των ρωγμών. Τα αυξανόμενα μήκη ανοιγμάτων προκαλούν μείωση της ακαμψίας και συνεπώς των φυσικών συχνοτήτων της κατασκευής. Ωστόσο, καθώς οι ρωγμές συνεχίζουν να κλείνουν σταδιακά λόγω της αυξανόμενης δύναμης προέντασης, η δοκός αρχίζει να συμπεριφέρεται μονολιθικά σε ένα ορισμένο κατώφλι δύναμης (160kN σε αυτό το πείραμα), με αποτέλεσμα την αύξηση της ακαμψίας και των φυσικών συχνοτήτων καθώς αυξάνεται η δύναμη προέντασης. Άλλοι ερευνητές ανέφεραν μια θετική συσχέτιση μεταξύ του κλεισίματος της ρωγμής και των φυσικών συχνοτήτων, συμβάλλοντας περαιτέρω στο δεύτερο επιχείρημα. Οι Grace και ο Ross έδειξαν πειραματικά μια μείωση στις φυσικές συχνότητες των δοκών από μετατεταμένο σκυρόδεμα που προκαλείται από μείωση της ακαμψίας λόγω ρωγμών λόγω κόπωσης (Grace & Ross, 1996). Ο Hor έδειξε πειραματικά παρόμοια αποτελέσματα (Hor, 1991). Οι Hamed και Frostig έδειξαν αναλυτικά μείωση στις φυσικές συχνότητες με αυξημένη ρωγμή, αλλά δεν αναπτύχθηκε μοντέλο για τη σχέση με τα επίπεδα δύναμης προέντασης (Hamed & Frostig, 2004). Ο De Roeck συμφωνεί με τους ερευνητές και υποστηρίζει

ότι η απώλεια προέντασης μπορεί να ανιχνευθεί μόνο με μεθόδους δόνησης εάν συνοδεύεται από ράγισμα (Roeck, 2003). Η ασυμφωνία οδήγησε στο τρίτο επιχείρημα ότι, εάν παραμεληθεί η ρωγμή, οι δυνάμεις προέντασης δεν επηρεάζουν τις φυσικές συχνότητες. Οι Dall'Asta και Dezi παρουσιάζουν ένα απλοποιημένο αλλά ακριβές αναλυτικό μοντέλο για τις φυσικές συχνότητες μιας δοκού προεντεταμένου σκυροδέματος που αντιπροσωπεύει το γεγονός ότι η δύναμη προέντασης είναι εσωτερική στο σύστημα, που δίνεται από την επόμενη εξίσωση (σε αντίθεση με την προηγούμενη εξίσωση που υποθέτει ότι η δύναμη προέντασης είναι εξωτερική) (Saiidi et al., 1994):

$$\omega_n^2 = \frac{n^4 * \pi^4}{m * L^4} * \left[\left(E_b - \frac{N}{A_b} \right) * I_b + \left(E_c + \frac{N}{A_c} \right) * I_c \right]$$

όπου E_b , A_b και I_b είναι το μέτρο ελαστικότητας, το εμβαδόν διατομής και η ροπή αδράνειας της δοκού από σκυρόδεμα, αντίστοιχα, και τα E_c , A_c και I_c είναι οι ίδιες ποσότητες για τον χαλύβδινο κλώνο. Με βάση τις τυπικές τιμές για μια δοκό προεντεταμένου σκυροδέματος, οι όροι N/A_b και N/A_c είναι αμελητέοι σε σύγκριση με τους όρους E_b και E_c , αντίστοιχα. Επιπλέον, το I_c είναι αμελητέο σε σύγκριση με το I_b , μειώνοντας την εξίσωση σε αυτή μιας απλά υποστηριζόμενης δοκού και υπονοώντας ότι οι δυνάμεις προέντασης δεν έχουν σημαντικό αντίκτυπο στις φυσικές συχνότητες της δοκού. Οι άλλες δύο συζητήσεις της μελέτης από τους Saiidi et al υποστηρίζουν ομοίως ότι οι δυνάμεις προέντασης δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται ως εξωτερική δύναμη στο σύστημα και επομένως δεν προκαλούν μαλάκωμα συμπίεσης ή αλλαγή συχνότητας, εκτός από το κλείσιμο των μικρορωγμών (Saiidi et al., 1994). Αυτό επιβεβαιώθηκε από μια άλλη μελέτη όπου οι ερευνητές συνέκριναν την επίδραση της μετατάσεως των κοίλων δοκών από χάλυβα και της εξωτερικής αξονικής φόρτισής τους για να δοκιμάσουν τη θεωρία της αποσκλήρυνσης με συμπίεση χωρίς την παρεμβολή μικρορωγμών (Darragh Noble et al., 2015).



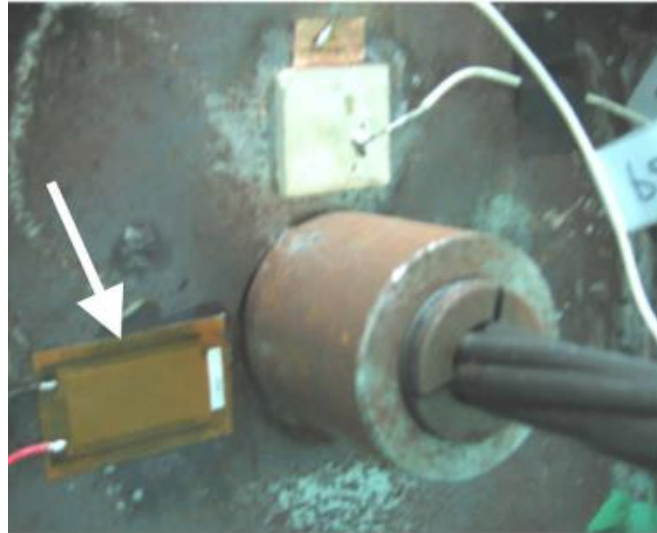
Εικόνα 30: Μέσα δυναμικών δεδομένων δοκιμής με μεταβαλλόμενο φορτίο για (α) μια λεπτή δοκό και (β) μια στιβαρή δοκό (Darragh Noble et al., 2015).

Το συμπέρασμα ήταν ότι τα φορτία μετά την τάνυση και τα εξωτερικά αξονικά φορτία δεν επηρεάζουν τις δοκούς με τον ίδιο τρόπο, με μόνο το τελευταίο να προκαλεί χαλάρωση συμπίεσης σε λεπτές δοκούς. Δείγματα αποτελεσμάτων από τη μελέτη παρουσιάζονται στην Εικόνα 30. Οι ετικέτες Beam 1 και Beam 2 αναφέρονται σε μια λεπτή δοκό και μια στιβαρή δοκό, αντίστοιχα, για να ελεγχθεί η θεωρία ότι η αποσκλήρυνση με συμπίεση επηρεάζει τις δοκούς που είναι επιρρεπείς σε λυγισμό (μόνο λεπτή δοκός), ενώ οι ετικέτες Case 1 και Case 2 αναφέρονται σε μια εξωτερικά αξονικά φορτισμένη δοκός και μια δοκός με υστέρηση, αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 30α, στην περίπτωση μιας λεπτής δοκού, η αύξηση του εξωτερικού αξονικού φορτίου προκαλεί συμπεριφορά που συμμορφώνεται με τη θεωρία μαλακώματος συμπίεσης, ενώ η αύξηση της δύναμης προέντασης προκαλεί στατιστικά σημαντική μείωση στη θεμελιώδη συχνότητα κάμψης, αλλά αυτή η συμπεριφορά δεν συμμορφώνεται με η θεωρία μαλακώματος συμπίεσης. Στην Εικόνα 30β, ούτε η εξωτερικά αξονικά φορτισμένη, ούτε η μετατεταμένη δοκός παρουσιάζουν συμπεριφορά που συμφωνεί με τη θεωρία του μαλακώματος της συμπίεσης. Μια εξωτερικά αξονικά φορτισμένη δοκός δείχνει σημαντική αύξηση στη συχνότητα κάμψης, ενώ μια δοκός μετά την τάση δείχνει στατιστικά σημαντική μείωση στη συχνότητα κάμψης με την αύξηση της δύναμης. Επιπλέον, ένα αυστηρό αναλυτικό μοντέλο που προέκυψε από τους Hamed & Frostig (2006) χρησιμοποιώντας τη μεταβλητή αρχή της εικονικής εργασίας δείχνει ότι δεν υπάρχει εξάρτηση των φυσικών συχνοτήτων από τις δυνάμεις προέντασης. Επιπλέον, ένα άλλο εκτεταμένο πειραματικό πρόγραμμα για μη ραγισμένες δοκούς προεντεταμένου σκυροδέματος έδειξε ότι δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική αλλαγή στις φυσικές

συχνότητες λόγω αλλαγής της δύναμης προέντασης για έξι από τις εννέα δοκιμασμένες δοκούς, με τους συγγραφείς να υποστηρίζουν επιπλέον ότι τυχόν παρατηρούμενες αλλαγές οφείλονται σε ευκαιρία και όχι συστηματική αλλαγή. Τα αντικρουόμενα επιχειρήματα δείχνουν ότι η αναγνώριση της δύναμης προέντασης με βάση τις μεθόδους δόνησης δεν έχει επιτευχθεί. Ωστόσο, από τις μελέτες που παρουσιάζονται μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η θεωρία αποσκλήρυνσης συμπίεσης για δοκούς προεντεταμένου σκυροδέματος έχει απομυθοποιηθεί με βάση αναλυτική εργασία, όπως δίνεται από την δεύτερη εξίσωση και πειραματικές μελέτες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 30.
2. Στην περίπτωση των μη ραγισμένων δοκών, οι αλλαγές στις δυνάμεις προέντασης δεν έχουν καμία επίδραση στις φυσικές συχνότητες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 29α και συζητείται σε άλλες μελέτες.
3. Στην περίπτωση των ραγισμένων δοκών, η αύξηση των δυνάμεων προέντασης προκαλεί κλείσιμο των μικρορωγμών, γεγονός που σκληραίνει τη δομή και προκαλεί αύξηση των φυσικών συχνοτήτων.

Με βάση τις μελέτες και τα παραπάνω συμπεράσματα, η ανίχνευση απώλειας προέντασης με χρήση αλλαγών στις φυσικές συχνότητες δεν είναι δυνατή σε μη ραγισμένα δοκάρια. Επιπλέον, ακόμη και στην περίπτωση των ραγισμένων δοκών, δεν υπάρχει ανεπτυγμένη σχέση μεταξύ του επιπέδου προέντασης και των φυσικών συχνοτήτων γιατί εξαρτάται από το επίπεδο ρωγμής. Αυτό περιπλέκεται περαιτέρω από την παγκόσμια φύση της παρακολούθησης των κραδασμών, επειδή άλλοι τύποι ζημιών και αλλαγή των οριακών συνθηκών μπορούν να οδηγήσουν σε αλλαγές στις φυσικές συχνότητες. Επιπλέον, οι φυσικές συχνότητες μπορεί να ποικίλλουν σημαντικά λόγω περιβαλλοντικών αλλαγών (Darragh Noble et al., 2016) και έλλειψη των ιδανικών στηρίξεων. Μια μελέτη αναφέρει μια αλλαγή της τάξης του 6%, ενώ μια άλλη αναφέρει αλλαγή έως και 18% (Cornwell et al., 1999). Συγκριτικά, οι αλλαγές στη συχνότητα λόγω απωλειών της προέντασης είναι ασήμαντες και μπορεί να μην ανιχνευθούν (Huynh et al., 2015).



Εικόνα 31: Όργανα δοκού προεντεταμένου σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε στις μελέτες των Kim et al. (2010) που δείχνει ένα πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα με τη μορφή έμπλαστρου Macro-Fiber Composite (MFC) σε πλάκα αγκύρωσης.

Κεφάλαιο 7 - Επίλυση Εφαρμογής Αμφιέριστης δοκού με συμμετρικό παραβολικό τένοντα

Σημειώνεται ότι η διατομή που χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό του προεντεταμένου σκυροδέματος αναφέρεται στην αρηγμάτωση διατομή. Η προένταση θα θέσει την διατομή υπό μόνιμη θλίψη και έτσι θα αποφευχθούν οι πιθανές ρωγμές.

7.1 Δεδομένα υλικών και προέντασης

- Σκυρόδεμα C30/37 με τσιμέντο *Class N* (CEM 32.5R)
- Χάλυβας συμβατικού οπλισμού (χαλαροί οπλισμοί) B500C (S500)
- Σύστημα προέντασης:
 - Χάλυβας προέντασης S1770/1860 Συρματόσχοινα
 - Κατηγορία χαλάρωσης 2
 - Συντελεστές τριβών $\mu=0.25$ και $k=0.01 \text{ rad/m}$
 - Ολίσθηση της αγκύρωσης $\delta=2\text{mm}$
- Η προένταση επιβάλλεται στις 21 ημέρες από την σκυροδέτηση
- Η τροχιά του τένοντα ακολουθεί παραβολική τροχιά με εξίσωση

$$y_x = \frac{4f}{l}x - \frac{4f}{l^2}x^2$$

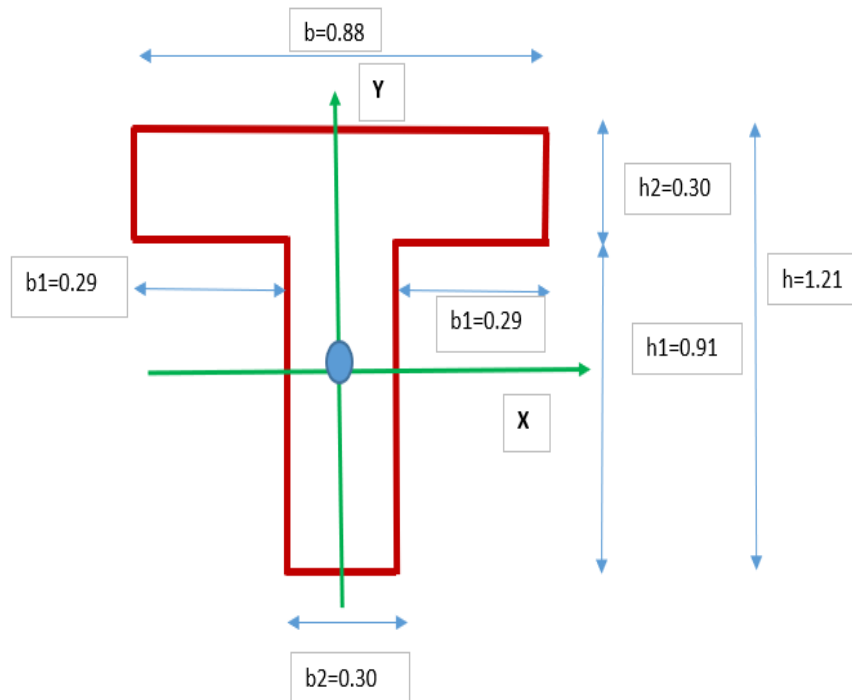
όπου f το βέλος της παραβολής στη μέση του ανοίγματος

7.1.2 Γεωμετρία των Προεντεταμένων Δοκών (Διαστασιολόγηση)

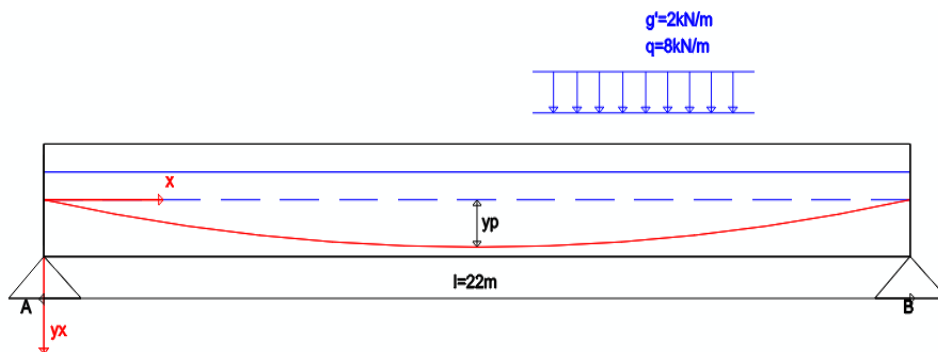
Το πρώτο βήμα για την επίλυση της προεντεταμένης δοκού είναι ο καθορισμός των φορτίσεων και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της τα οποία έχουν ληφθεί 10% αυξημένα σε σχέση με την σχετική εφαρμογή του συγγράμματος του Χ. Καραγιάννη «Σχεδιασμός κατασκευών από Προεντεταμένο Σκυρόδεμα».

$L=$	22	m	άνοιγμα προεντεταμένων δοκών
$g' =$	2	KN/m	κατανεμημένο, μόνιμο φορτίο επικαλύψεων
$q =$	8	KN/m	κατανεμημένο, κινητό φορτίο
$b_1 =$	0.29	m	πλάτος καθαρού φτερού διατομής
$b_2 =$	0.30	m	πλάτος κορμού διατομής
$b =$	0.88	m	συνολικό πλάτος διατομής
$h =$	1.21	m	συνολικό ύψος διατομής

$h_1 = 0.91 \text{ m}$ ύψος κορμού διατομής
 $h_2 = 0.30 \text{ m}$ πάχος «πλάκας T» διατομής



Διάγραμμα 1: Διαστάσεις δοκού.



Διάγραμμα 2: Αμφιέριστη δοκός με παραβολική τροχιά κατά μήκος της δοκού (Πηγή Autocad).

7.2 Υπολογισμός του Ίδιου Βάρους της Διατομής

Υπολογίζεται η επιφάνεια διατομής του σκυροδέματος και στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με το βάρος του σκυροδέματος ($\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$) για να υπολογιστεί το συνολικό βάρος.

$$A_1 = b_1 \cdot h_2 = 0.26 \text{ m}^2 \quad \text{εμβαδόν άνω ορθογωνίου}$$

$$A_2 = b_2 \cdot h_1 = 0.27 \text{ m}^2 \quad \text{εμβαδόν κάτω ορθογωνίου}$$

$$A_c = A_1 + A_2 = 0.54 \text{ m}^2 \quad \text{συνολικό εμβαδόν διατομής}$$

$$g = 25 \cdot A_c = 13.43 \text{ KN/m} \quad \text{ίδιο βάρος διατομής}$$

7.3 Υπολογισμός των Ροπών της Αμφιέριστης Δοκού λόγω των μονίμων και των κινητών φορτίων

Παρακάτω υπολογίζονται οι ροπές στην αμφιέριστη δοκό τόσο από τα μόνιμα (για την κατάσταση $g+P_0$) όσο και από τα κινητά φορτία (για την κατάσταση $g+q+P_0$) οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς παρακάτω. Από την στιγμή που οι υπολογισμοί γίνονται με τη θεωρία των επιτρεπόμενων τάσεων στα φορτία δεν θα εφαρμοστεί κάποιος επιπλέον συντελεστής ασφαλείας.

$$M_{g,M} = g \cdot L^2 / 8 = 933.21 \text{ KNm} \quad \text{δρώσα ροπή αμφιέριστης στο μέσον λόγω μόνιμων φορτίων}$$

$$M_{q,M} = q \cdot L^2 / 8 = 484.00 \text{ KNm} \quad \text{δρώσα ροπή αμφιέριστης στο μέσον λόγω κινητών φορτίων}$$

$$M_{g+q,M} = M_{q,M} + M_{g,M} = 1417.21 \text{ KNm} \quad \text{σύνολο ροπής λόγω μόνιμων και κινητών φορτίων}$$

7.4 Υπολογισμός του Κέντρου Βάρους της Διατομής

Έπειτα η διατομή διαιρείται σε δύο ορθογώνια και υπολογίζεται το συνολικό κέντρο βάρους (κ.β.) της διατομής με βάση την εξίσωση:

$$y = \frac{\sum y_i \cdot A_i}{\sum A_i}$$

$$Y_1 = 1.06 \text{ m} \quad \text{κ.β. άνω ορθογωνίου}$$

$$Y_2 = 0.455 \text{ m} \quad \text{κ.β. κάτω ορθογωνίου}$$

$$Y_{cm} = (Y_1 \cdot A_1 + Y_2 \cdot A_2) / A_c = 0.75 \text{ m} \quad \text{κέντρο βάρους διατομής μετρώντας από κάτω πέλμα}$$

$$Y'_{cm} = h - Y_{cm} = 0.46 \text{ m} \quad \text{κέντρο βάρους διατομής μετρώντας από άνω πέλμα}$$

$$d_1 = Y_{cm} - Y_1 = 0.31 \text{ m} \quad \text{απόσταση από άξονα άνω ορθογωνίου}$$

$$d_2 = Y_2 - Y_{cm} = 0.30 \text{ m} \quad \text{απόσταση από άξονα κάτω ορθογωνίου}$$

7.5 Υπολογισμός της Ροπής Αδράνειας και της Ροπής Αντίστασης της Διατομής περί τον κύριο άξονα της

Μετά τον υπολογισμό του κ.β. ακολουθεί ο υπολογισμός της ροπής αδράνειας (πρώτου και δευτέρου βαθμού) και της ροπής αντίστασης της διατομής όπου χρησιμοποιείται το θεώρημα Steiner.

$$I_2 = 1/2 \cdot h_1^3 \cdot b_2 = 0.019 \text{ m}^4 \quad \text{«κάτω ορθογώνιο» διατομής}$$

$$I_1 = 1/2 \cdot h_2^3 \cdot b = 0.002 \text{ m}^4 \quad \text{«άνω ορθογώνιο» διατομής}$$

$$d_1 = Y_{cm} - Y_1 = 0.31 \text{ m} \quad \text{απόσταση από άξονα άνω ορθογωνίου, θα χρησιμοποιηθεί στο θεώρημα Steiner}$$

$$d_2 = Y_2 - Y_{cm} = 0.30 \text{ m} \quad \text{απόσταση από άξονα κάτω ορθογωνίου, θα χρησιμοποιηθεί στο θεώρημα Steiner}$$

$$I = I_1 + A_1 \cdot d_1^2 + I_2 + A_2 \cdot d_2^2 = 0.069 \text{ m}^4$$

Με δεδομένη την ροπή αδράνειας της διατομής, οι ροπές αντίστασης της διατομής υπολογίζονται παρακάτω: (οι άνω και κάτω ροπές αντίστασης δεν μπορεί να είναι ίσες με δεδομένο ότι η διατομή δεν έχει οριζόντιο άξονα συμμετρίας).

$$W_u = I / (h - Y_{cm}) = 0.153 \text{ m}^3 \quad \text{στατική ροπή αδράνειας- άνω}$$

$$W_b = I / Y_{cm} = 0.093 \text{ m}^3 \quad \text{στατική ροπή αδράνειας- κάτω}$$

Ακολουθώντας, εφαρμόζοντας θεωρία της αντοχής υλικών, υπολογίζεται η στατική ροπή αδράνειας της διατομής ως προς το άνω πέλμα της:

$$S = Y'_{cm} \cdot A_c = 0.246 \text{ m}^3 \text{ ροπή αντίστασης ως προς το άνω πέλμα της διατομής}$$

7.6 Υπολογισμός του πυρήνα της Διατομής

Ο πυρήνας της διατομής είναι εκείνη η κλειστή περιοχή της διατομής στην οποία αν ασκηθεί μια αξονική δύναμη οι τάσεις της διατομής θα είναι μονοσήμαντες δηλαδή μονοσήμαντα θλιπτικές ή εφελκυστικές. Οι τεταγμένες k_1 , k_2 που αντιστοιχούν στην άνω και κάτω τεταγμένη του πυρήνα εκτιμώνται σε:

$$k_1 = I / (A_c \cdot Y'_{cm}) = 0.28 \text{ m} \quad \text{τεταγμένη του πυρήνα- ανώτατο σημείο}$$

$$k_2 = I / (A \cdot Y_{cm}) = 0.17 \text{ m} \quad \text{τεταγμένη του πυρήνα- κατώτατο σημείο}$$

7.7 Διαδικασία προελέγχου διατομής

Προτού ξεκινήσουν οι υπολογισμοί της φάσης αυτής, λαμβάνει χώρα μία σύντομη εξήγηση της διαδικασίας προελέγχου. Για την διαδικασία προελέγχου θα πρέπει να υπολογιστούν οι μέγιστες τάσεις στην κρίσιμη διατομή. Η κρίσιμη διατομή στην περίπτωση της αμφιέρειστης δοκού είναι στο μέσον της ενώ οι μέγιστες/ελάχιστες τάσεις θα βρίσκονται στην άνω και την κάτω ίνα. Προκειμένου να υπολογιστούν οι μέγιστες αυτές τάσεις θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω δύο φορτίσεις:

α) Την χρονική στιγμή $t=0$ θα δρουν τα μόνιμα φορτία και η αρχική προένταση - φόρτιση ($g+P_0$).

β) Με την πάροδο του χρόνου η προένταση θα υποστεί τις χρόνιες απώλειες της ενώ θα δρα ταυτόχρονα τόσο το μόνιμο όσο και το κινητό φορτίο- φόρτιση ($g+q+P_\infty$).

Οι τάσεις στην αμφιέριστη διατομή δημιουργούνται από την κάμψη λόγω των φορτίων $g+q$ αλλά και λόγω της προέντασης η οποία όντας κεντροβαρικά έκκεντρη πέρα από το αξονικό φορτίο δημιουργεί και μία ροπή στη δοκό. Η προένταση ξεκινά από την μέγιστη τιμή της P_0 ($t_0=0$) και ασκεί ροπή $P_0 \cdot y_p$ με την πάροδο του χρόνου όμως οι χρόνιες απώλειες μειώνουν την προένταση και οι αντίστοιχες τιμές πείπουν σε P_∞ και $P_\infty \cdot y_p$.

Τονίζεται ότι μιας και η προένταση θέτει ολόκληρη τη διατομή υπό θλίψη η διατομή του σκυροδέματος θα παραμείνει αρηγμάτωτη (*uncracked*) και οι υπολογισμοί θα λάβουν χώρα θεωρώντας τις ιδιότητες αυτής της διατομής. Ο προέλεγχος της διατομής λαμβάνει χώρα με τον περιορισμό των τάσεων με βάση τα παρακάτω όρια στις δύο διακριτές χρονικές στιγμές $t_0=0$, $t_0=\infty$.

Την χρονική στιγμή $t_0=0$:

- Η τάση στην άνω ίνα δεν πρέπει να λαμβάνει εφελκυστικές τιμές - θα πρέπει να είναι συνεχώς σε θλίψη ($\sigma_{2,0} \leq 0$).
- Η τάση στην κάτω ίνα είναι δεν πρέπει να λάβει θλιπτική τιμή μεγαλύτερη της $0.6f_{ck}$ ($\sigma_{1,0} \leq 0.6f_{ck}$).

Την χρονική στιγμή $t=\infty$:

- Η τάση στην άνω ίνα δεν πρέπει να λάβει θλιπτική τιμή μεγαλύτερη της $0.6f_{ck}$ ($\sigma_{2,\infty} \leq 0.6f_{ck}$).
- Η τάση στην κάτω ίνα δεν πρέπει να λάβει εφελκυστική αλλά να παραμείνει σε θλίψη ($\sigma_{1,\infty} \leq 0$).

Στην φάση του προελέγχου γίνεται μια αρχική εκτίμηση του λόγου $\omega = P_\infty / P_0$ που κυμαίνεται μεταξύ 0.80 και 0.90. Στην εφαρμογή αυτή θα επιλεγεί $\omega=0.85$.

Με βάση τις παραπάνω απαιτήσεις και περιορισμούς προκύπτουν τα παρακάτω όρια για τις τιμές των $W_1=W_b$, $W_2= W_u$:

$$W_b = W_1 \geq \frac{M_{g+q} - \omega M_g}{\omega(0.6f_{ck})}$$

$$W_u = W_2 \geq \omega W_1$$

Για την αμφιέριστη δοκό έχουν ήδη υπολογιστεί οι ροπές που οφείλονται στα μόνιμα και στα κινητά φορτία και έτσι ακολούθως εφαρμόζονται οι παραπάνω σχέσεις:

$\omega=0.85$ λόγος τελικής προέντασης μετά από τις χρόνιες απώλειες προς την αρχική προένταση

$$r1=(Mg+q-\omega \cdot Mg)/(\omega \cdot 0.60 \cdot fck)=0.041$$

$$r1 < Wb=0.093, \text{ OK! ΕΛΕΓΧΟΣ 1}$$

$$r2=\omega \cdot Wb=0.079$$

$$r2 < Wu=0.153, \text{ OK! ΕΛΕΓΧΟΣ 2}$$

7.8 Προεκτίμηση Δύναμης Προέντασης

Ακολούθως προεκτιμάται η αρχική δύναμη της προέντασης (πριν τις χρόνιες απώλειες) με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής που έχουν υπολογισθεί νωρίτερα:

- $P_0=(Mg+q-\omega \cdot Mg)/\{\omega \cdot (k1+k2)\}= 1603.66 \text{ KN}$ προσέγγιση για την προεκτίμηση της δύναμης προέντασης
- $P_0=2200 \text{ KN}$ προεκτίμηση αρχικής προέντασης (πριν από τις χρόνιες απώλειες, στην μεσαία διατομή)

7.9 Προσδιορισμός θέσης τένοντα στην μεσαία διατομή της δοκού

Για να βρεθεί η θέση του τένοντα αφενός αρχικά εκτιμάται το γεωμετρικό όριο της απόστασης αυτής και ακολούθως με βάση τις ροπές και την θέση του τένοντα που έχει υπολογιστεί επιλέγεται η αρχική προένταση στην μεσαία διατομή «Μ». Με δεδομένη την επιλογή των διαστάσεων της διατομής αλλά και της αρχικής προέντασης είναι δυνατή η εκτίμηση της θέσης του τένοντα (y_p) όπως αυτή μετράτε από τον οριζόντιο άξονα που διέρχεται από το κέντρο βάρους της δοκού. Εφαρμόζεται η παρακάτω διπλή ανίσωση:

$$\frac{M_{g+q}}{\omega P_0} - k_2 \leq y_p \leq \frac{M_g}{P_0} + k_1$$

$$M_{g+q}/(\omega \cdot P_0)-k_2= 0.58 \text{ m} \quad \text{κάτω όριο } y_p$$

$$M_{g+q}/(\omega \cdot P_0)+k_1= 1.04 \text{ m} \quad \text{άνω όριο } y_p$$

Ταυτόχρονα με αυτά τα όρια η παράμετρος y_p του τένοντα καθορίζεται και από την γεωμετρία της δοκού μια και περιορίζεται τόσο από την επικάλυψη του

σκυροδέματος όσο και από τη γεωμετρία του ίδιου του σωλήνα. Αναλυτικότερα υπολογίζεται εκείνη η μέγιστη τιμή του y_p , η οποία θα είναι συμβατή με όλους τους περιορισμούς:

$$c=50.00 \text{ mm} \quad \text{επικάλυψη}$$

$$\Phi\sigma=70.00 \text{ mm} \quad \text{διάμετρος σωλήνα τένοντα (προεκτίμηση)}$$

$$y_{pmax}=Y_{cm}-(c+\Phi\sigma/2)=0.67 \text{ m} \quad \text{κάτω γεωμετρικό όριο } y_p$$

$y_p=0.65 \text{ m}$ παραδεκτή τιμή y_p η οποία σέβεται τόσο τον γεωμετρικό όσο και τον «φορτιστικό περιορισμό»

$$y_0=y_p+Y'_{cm}=1.11 \text{ m} \quad \text{θέση τένοντα από άνω πέλμα}$$

Παρατηρείται ότι στην περίπτωση αυτή μπορεί να βρεθεί μία κοινώς αποδεκτή τιμή για το y_p δηλαδή μία τιμή που εξυπηρετεί όλους τους περιορισμούς. Εάν αυτό δεν είναι δυνατό θα έπρεπε να «ρυθμιστεί» αναλόγως η προεκτίμηση της προέντασης.

7.10 Τελική Εκτίμηση της Δύναμης Προέντασης

Πλέον με δεδομένη τη θέση του τένοντα στην διατομή γίνεται μία τελική εκτίμηση της δύναμης προέντασης της διατομής με βάση την παρακάτω διπλή ανίσωση:

$$\frac{M_{g+q}}{\omega(y_p + k_2)} \leq P_0 \leq \frac{M_g}{y_p - k_1}$$

$$M_{g+q}/(\omega \cdot (y_p+k_2))=2025.63 \text{ KN} \quad \text{κάτω όριο προέντασης}$$

$$M_{g+q}/(y_p-k_1)=3879.12 \text{ KN} \quad \text{άνω όριο προέντασης}$$

Με βάση τις παραπάνω τιμές η επιλογή των 2500KN είναι αρκετά κοντά στην ελάχιστη αποδεκτή προένταση (2023.63KN) και έτσι η μελέτη θα προχωρήσει υιοθετώντας την συγκεκριμένη τιμή. Έτσι:

$$P_{0,M}=2500 \text{ KN} \quad \text{επιλογή προέντασης στην μεσαία διατομή της δοκού.}$$

7.11 Υπολογισμός χαρακτηριστικών της Καθαρής και της Ιδεατής διατομής της Δοκού στην μεσαία διατομή

Η «καθαρή» διατομή είναι εκείνη στην οποία δεν έχει ενσωματωθεί ο τένοντας απλά υφίσταται ο σωλήνας και οι χαλαροί οπλισμοί. Αυτό σημαίνει ότι η καθαρή διατομή είναι μια απλή διατομή οπλισμένου σκυροδέματος με μία οπή στη θέση του σωλήνα. Τα χαρακτηριστικά της (ροπή αδράνειας / αντίστασης / στατική ροπή κ.ο.κ.) θα υπολογιστούν με βάση τη θεωρία της αντοχής υλικών ως να πρόκειται για μία

σύνθετη διατομή εκ δύο υλικών δηλαδή «χαλαρού» χάλυβα και σκυροδέματος. Η καθαρή διατομή είναι εκείνη που χρησιμοποιείται την χρονική στιγμή $t_0=0$. Αντίθετα η ιδεατή διατομή περιέχει ενσωματωμένο και τον τένοντα και θα είναι η διατομή που θα χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς μετά και την ολοκλήρωση των χρόνιων απωλειών δηλαδή $t=\infty$. Σε όλους τους παρακάτω υπολογισμούς εξετάζεται η μεσαία διατομή μια και οι ιδιότητες της διατομής αλλάζουν από την στιγμή που μεταβάλλεται και η θέση του τένοντα. Ο σωλήνας που θα περιέχει τον τένοντα θα πρέπει να έχει διατομή μεγαλύτερη από αυτή των τενόντων ώστε να μπορεί εύκολα ο τένοντας να λάβει την παραβολική τροχιά του αλλά και παράλληλα να μπορεί το ένεμα να εισχωρήσει εύκολα και να πετύχει συνεργασία τένοντα- διατομής. Επιπροσθέτως η δύναμη προέντασης P στην οποία γίνεται αναφορά αναφέρεται πάντοτε στην μέση της δοκού, η προένταση στα άκρα θα είναι όμως υψηλότερη. Υπενθυμίζεται ότι στις σύνθετες διατομές απαιτείται ο υπολογισμός του λόγου των μέτρων ελαστικότητας χάλυβα και σκυροδέματος δηλαδή:

$E_{cm}=30 \text{ GPa}$ μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος C30/37

$E_s=200 \text{ GPa}$ μέτρο ελαστικότητας χάλυβα

$\alpha_s=E_s/E_{cm}=6.06$

Με βάση τις διατάξεις του ΕΚ2 υπολογίζονται οι μέγιστες επιτρεπόμενες τάσεις του τένοντα σε αρχικό στάδιο αλλά και μετά τις στιγμιαίες απώλειες. Η επιλογή της διατομής των τενόντων θα γίνει με βάση τα κριτήρια επιτρεπόμενων τάσεων από τον κανονισμό. Πράγματι κατά την τάνυση ο Ευρωκώδικας επιτρέπει την παρακάτω μέγιστη τάση:

$\sigma_{p,max}=\min(k_1 \cdot f_{pk}, k_2 \cdot f_{p0.10k})=1488 \text{ MPa}$ μέγιστη τάση τένοντα EC2-5.10.2.1

($k_1=0.80$, $k_2=0.90$)

$\sigma_{p,m0}(x)=\min(k_7 \cdot f_{pk}, k_8 \cdot f_{p0.10k})=1395 \text{ MPa}$ μέγιστη τάση τένοντα μετά από στιγμιαίες απώλειες EC2-5.10.3 ($k_7=0.75$, $k_8=0.85$)

Η μέγιστη τάση θα εμφανιστεί στην θέση αγκύρωσης του οπλισμού (Α,Β) και πριν τις στιγμιαίες απώλειες ολίσθησης. Παρόλο που η αρχική εκτίμηση έχει γίνει για την προένταση στην μέση της δοκού (Μ) είναι δυνατόν καταρχάς προσεγγιστικά να θεωρηθεί:

$$P_A = P_M$$

Το εμβαδόν του τένοντα που θα υπολογιστεί θα πρέπει κατάτι να αυξηθεί ώστε να ληφθεί υπόψη η αυξημένη τιμή της προέντασης στις αγκυρώσεις.

$A_{pr}=P_{0,M}/\sigma_{p,m0}(x)=1792.1147 \text{ mm}^2$ απαιτούμενη διατομή τένοντα τάνυσης με βάση την

μέγιστη επιτρεπόμενη τάση σ' αυτών μετά τις στιγμιαίες απώλειες

$d_s = (1/2)"$ διάμετρος συρματόσχοινου-λαμβάνεται από κατάλογο κατασκευαστή

$A_s = 99.00 \text{ mm}^2$ εμβαδόν 1 συρματόσχοινου διαμέτρου (1/2") (από κατάλογο)

$v = 19.00$ αριθμός συρματόσχοινων / τένοντα

$D_0 = 80 \text{ mm}$ διάμετρος σωλήνα τένοντα

$A_0 = 5026.55 \text{ mm}^2$ εμβαδόν σωλήνα τένοντα

$A_p = 1881 \text{ mm}^2$ εμβαδόν τένοντα που θα χρησιμοποιηθεί είναι το γινόμενο του εμβαδού κάθε συρματόσχοινου επί των αριθμό αυτών.

Ακολουθως δίνεται η θέση του «χαλαρού οπλισμού» (μη προεντεταμένου) μετρώντας από την πάνω ίνα της δοκού. Ο χαλαρός οπλισμός συνίσταται από 10 ράβδους $\Phi 14$.

Οι ιδιότητες της **καθαρής διατομής** υπολογίζονται παρακάτω:

$\Phi = 14 \text{ mm}$ διάμετρος χαλαρής ράβδου

$A_1 = 153.94 \text{ mm}^2$ εμβαδόν χαλαρής ράβδου

$y_{s1} = 0.05 \text{ m}$ αποστάσεις από άνω πέλμα ανώτατη σειρά

$n_1 = 4$ αριθμός ράβδων οπλισμού στην ανώτατη στρώση- εντός πλάκας

$A_{s1} = 615.75 \text{ mm}^2$ εμβαδόν οπλισμού (σύνολο)

$y_{s2} = 0.25 \text{ m}$ αποστάσεις από άνω πέλμα 2^η σειρά εντός πλάκας

$n_2 = 2.00$ αριθμός ράβδων οπλισμού στην 2^η σειρά

$A_{s2} = 307.88 \text{ mm}^2$ εμβαδόν οπλισμού (σύνολο)

$y_{s3} = 0.55 \text{ m}$ αποστάσεις από άνω πέλμα 3^η σειρά εντός κορμού

$n_3 = 2.00$ αριθμός ράβδων οπλισμού στην 3^η σειρά

$A_{s3} = 307.8 \text{ mm}^2$ εμβαδόν οπλισμού (σύνολο)

$y_{s4} = 1.16 \text{ m}$ αποστάσεις από άνω πέλμα 4^η σειρά εντός κορμού

$n_4 = 2.00$ αριθμός ράβδων οπλισμού στην 4^η σειρά.

$A_{s4} = 307.88 \text{ mm}^2$ εμβαδόν οπλισμού

$A_s = \Sigma A_s = 1539.38 \text{ mm}^2$ σύνολο οπλισμού

$A_{cn} = A_c - A_0 + (a_s - 1) \cdot A_s = 539763.65 \text{ mm}^2$ ισοδύναμη διατομή σκυροδέματος- εμβαδόν

$A_{cn} = 0.54 \text{ m}^2$

$S_s = \Sigma (A_{si} \cdot y_{si}) = 0.00063 \text{ m}^3$ στατική ροπή αδράνειας χαλύβων οπλισμού

$S_0 = A_0 \cdot y_0 = 0.00557 \text{ m}^3$ στατική ροπή αδράνειας σωλήνα τένοντα

$S_{cn} = S_c + (a_s - 1) \cdot S_s - S_0 = 0.4 \text{ m}^3$ στατική ροπή ισοδύναμης διατομής σκυροδέματος

$y_{2n} = S_{cn} / A_{cn} = 0.4 \text{ m}$ κ.β. Netto διατομής από την άνω ίνα

$y_{1n} = h - y_{2n} = 0.7 \text{ m}$ κ.β. Netto διατομής από την κάτω ίνα

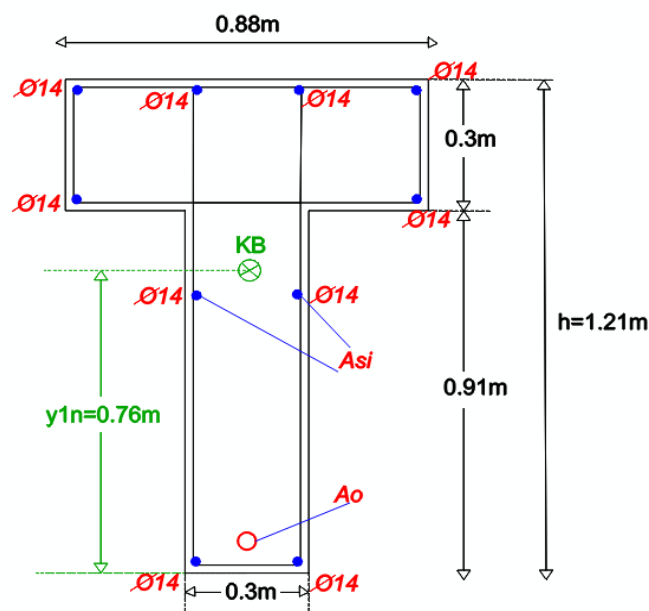
$I_{sn} = \Sigma(y_{si}-y_{2n})^2 \cdot A_{si} = 0.00027 m^4$ ροπή αδράνειας χαλαρών οπλισμών
 $I_0 = A_0 \cdot (y_0 - y_{2n})^2 = 0.00217 m^4$ ροπή αδράνειας σωλήνα τένοντα
 $I_{cn} = I_c + (as-1) \cdot I_{sn} - I_0 = 0.06913893 m^4$ ροπή αδράνειας ισοδύναμης διατομής σκυροδέματος

$W_{1n} = I_{cn} / y_{1n} = 0.091 m^3$ ροπή αντίστασης ισοδύναμης διατομής κάτω

$W_{2n} = I_{cn} / y_{2n} = 0.153 m^3$ ροπή αντίστασης ισοδύναμης διατομής άνω

$k_{1n} = 0.28 m$ τεταγμένη πυρήνα κάτω- ισοδύναμη

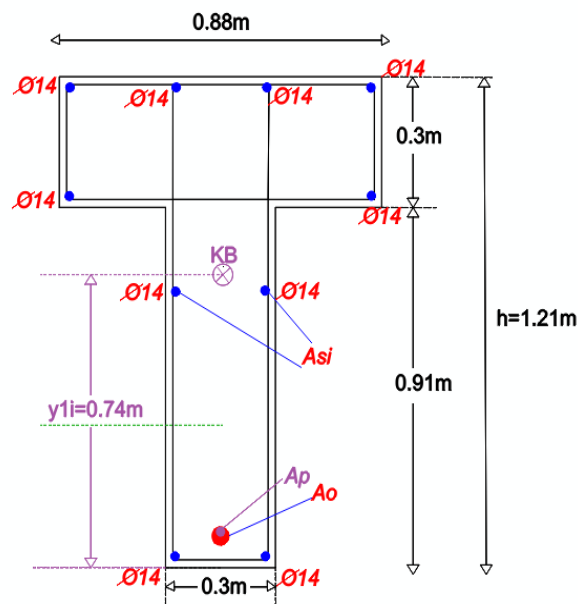
$k_{2n} = 0.17 m$ τεταγμένη πυρήνα άνω- ισοδύναμη



Διάγραμμα 3: Καθαρή διατομή (netto) (Πηγή Autocad.)

Μετά τους υπολογισμούς στην καθαρή διατομή ακολουθούν οι υπολογισμοί στην «ιδεατή» διατομή. Υπενθυμίζεται ότι μετά την τάνυση του τένοντα εντός του σωλήνα ακολουθεί η πλήρωση του τελευταίου με τσιμεντένεμα ώστε να αναπτυχθεί συνάφεια μεταξύ των δύο. Μετά την επίτευξη της συνάφειας αυτής η διατομή εκτός από τους «χαλαρούς» οπλισμούς περιέχει και τον τένοντα προέντασης, ενώ ο σωλήνας δεν αφαιρείται αφού έχει πληρωθεί με το τσιμεντένεμα. Αφού περάσει πολύς (∞) χρόνος μετά την προένταση η διατομή που θα δουλεύει θα είναι η ιδεατή και τα χαρακτηριστικά αυτής είναι εκείνα τα οποία θα πρέπει να υπολογιστούν. Αριθμητικά θα προστεθούν τα χαρακτηριστικά του τένοντα πολλαπλασιασμένα με τον λόγο των μέτρων ελαστικότητας αυτού, προς το σκυρόδεμα ($a_p = E_p / E_c$).

$y_p = y_0 = 1.11 \text{ m}$ θέση κέντρου βάρους τένοντα από άνω παρειά δοκού
 $a_p = E_p/E_c = 5.91$ λόγος μέτρων ελαστικότητας τένοντα/ σκυροδέματος
 $A_{ci} = A_c + (a_s - 1)A_s + (a_p - 1)A_p = 0.55 \text{ m}^2$ εμβαδόν ιδεατής διατομής μετά την τάνυση του τένοντα
 $S_p = A_p \cdot y_p = 0.0021 \text{ m}^3$ στατική ροπή αδράνειας τένοντα
 $S_{ci} = S_c + (a_s - 1)S_s + (a_p - 1)S_p = 0.259 \text{ m}^3$ στατική ροπή αδράνειας ιδεατής διατομής
 $y_{2i} = S_{ci}/A_{ci} = 0.47 \text{ m}$ κέντρο βάρους ιδεατής διατομής από άνω παρειά
 $y_{1i} = h - y_{2i} = 0.74 \text{ m}$ κέντρο βάρους ιδεατής διατομής από κάτω παρειά
 $I_p = A_p \cdot (y_0 - y_{2i})^2 = 0.0008 \text{ m}^4$ ροπή αδράνειας τένοντα
 $I_{ci} = I_c + (a_s - 1) \cdot I_s + (a_p - 1) \cdot I_p = 0.0751 \text{ m}^4$ ροπή αδράνειας ιδεατής διατομής
 $W_{1i} = I_{ci}/y_{1i} = 0.10 \text{ m}^3$ ροπή αντίστασης κάτω ιδεατής διατομής
 $W_{2i} = I_{ci}/y_{2i} = 0.16 \text{ m}^3$ ροπή αδράνειας άνω ιδεατής διατομής
 $k_{1i} = W_{2i}/A_{ci} = 0.29 \text{ m}$ τεταγμένη πυρήνα κάτω- ιδεατή
 $k_{2i} = W_{1i}/A_{ci} = 0.18 \text{ m}$ τεταγμένη πυρήνα άνω- ιδεατή



Διάγραμμα 4: Ιδεατή Διατομή (Πηγή Autocad).

7.12 Υπολογισμός Στιγμαίων (Άμεσων) απωλειών

Παρακάτω υπολογίζονται οι άμεσες απώλειες στον τένοντα λόγω τριβών αλλά και λόγω ολίσθησης του τένοντα στην αγκύρωση.

7.12.1 Υπολογισμός Στιγμαίων (Άμεσων) απωλειών- Τριβές

Αρχικά δίνονται οι συντελεστές τριβής:

$$\mu=0.25 \quad \text{συντελεστής τριβής}$$

$$k=0.01 \text{rad/m} \quad \text{συντελεστής τριβής (μεταβολή γωνίας τένοντα λόγω της παραβολικής τροχιάς)}$$

Η εκτροπή του τένοντα είναι ίση με:

$$\tan \alpha = 4f/L$$

$$f = yp = 0.65 \text{m} \quad \text{βέλος της παραβολής του τένοντα}$$

$$\tan \alpha = 4f/L = 0.118 \quad \text{εκτροπή τένοντα } \alpha \text{ από το σημείο } A \text{ έως το μέσον της δοκού, άρα:}$$

$$\alpha = 0.118 \text{ rad}$$

Οι στιγμιαίες απώλειες του τένοντα θα υπολογιστούν τόσο για την περίπτωση αμφίπλευρης όσο και μονόπλευρης προέντασης (από την στήριξη A).

7.12.2 Αμφίπλευρη προένταση από τις στηρίξεις A, B

$$x = L/2 = 11 \text{ m} \quad \text{μεσαία διατομή}$$

$$\lambda = e\{-\mu(\alpha+kx)\} = 0.9447$$

$$P_M = 2500 \text{ KN} \quad \text{προένταση στη μεσαία διατομή όπως έχει αρχικώς εκτιμηθεί.}$$

$$P_A = P_B = P_M/\lambda = 2646.40 \text{ KN} \quad \text{προένταση στις ακραίες διατομές } A, B \text{ (θα είναι ίση στις 2 αυτές διατομές)}$$

7.12.3 Μονόπλευρη προένταση από την στήριξη A

$$P_A = P_M/\lambda = 2646.40 \text{ KN} \quad \text{είναι η προένταση στο άκρο της διατομής που γίνεται η τάνυση}$$

$$P_M = 2500 \text{ KN} \quad \text{είναι η προένταση στο μέσον της διατομής}$$

$$P_B = P_M \cdot \lambda = 2361.70 \text{ KN} \quad \text{είναι η προένταση στο άκρο } B \text{ της διατομής}$$

7.12.4 Υπολογισμός Στιγμαίων (Άμεσων) απωλειών- Ολίσθηση του Τένοντα στην αγκύρωση

$$\delta = 0.002 \text{ m} \quad \text{ολίσθηση}$$

$$k_x = \mu'(a/x+k) = 0.005174 \quad \text{παράμετρος που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του μήκους διατάραξης κατά την ολίσθηση του τένοντα}$$

$$\sigma_{pm0} = \sigma_{pi} = P_A/A_p = 1406.91 \text{ MPa} \quad \text{τάση τένοντα στην αγκύρωση } A$$

$$\epsilon_{pi} = \sigma_{pm0}/E_p = 0.00721 \quad \text{παραμόρφωση τένοντα στην αγκύρωση } A$$

$x_0 = (-1/k_x) \cdot \ln\{1 - \sqrt{(k_x \cdot \delta / \epsilon_{pi})}\} = 7.46m$ μήκος διατάραξης κατά την ολίσθηση του τένοντα

$P_{x0} = P_A \cdot e^{(-x_0 \cdot k_x)} = 0.962P_A$ προένταση στην θέση x_0 την χρονική στιγμή $t=0$

$P'_A = P_{x0} \cdot e^{(-x_0 \cdot k_x)} = 0.926P_A$ προένταση στην θέση A μετά την ολίσθηση

Στον παρακάτω υπολογισμό συνοψίζονται οι συνολικές στιγμιαίες απώλειες προέντασης τόσο λόγω τριβών όσο και λόγω ολίσθησης για τις περιπτώσεις της αμφίπλευρης προέντασης κ' της μονόπλευρης προέντασης από το Α.

7.13 Κατανομή προέντασης σε κάθε μία από τις 2 περιπτώσεις

α) Αμφίπλευρη προένταση

$P_A = P_B = P_M / 0.9447 = 2646.40 KN$ είναι η προένταση στο σημείο A πριν την ολίσθηση, η οποία λόγω συμμετρίας θα είναι ίση και με την προένταση στο σημείο B .

$P_{x0} = 2546.18 KN$ είναι η προένταση στο πέρας της διατάραξης μετά την ολίσθηση του τένοντα

$P'_A = P'_B = 2356.98 KN$ είναι η προένταση στα A, B μετά την ολίσθηση του τένοντα.

$P_M = 2500 KN$ είναι η προένταση στο μέσον M του τένοντα.

β) Μονόπλευρη προένταση

$P_A = P_M / 0.9447 = 2646.40 KN$ είναι η προένταση στο σημείο A πριν την ολίσθηση

$P_{x0} = 2546.18 KN$ είναι η προένταση στο πέρας της διατάραξης μετά την ολίσθηση του τένοντα

$P'_A = 2356.98 KN$ είναι η προένταση στο A μετά την ολίσθηση του τένοντα

$P_M = 2500 KN$ είναι η προένταση στο μέσον M του τένοντα

$P_B = 2361.70 KN$ είναι η προένταση στο B μετά την ολίσθηση του τένοντα

Επομένως έχει βρεθεί η κατανομή της προέντασης μετά τις στιγμιαίες απώλειες κατά μήκος της δοκού.

7.14 Υπολογισμός Χρόνιων Απωλειών στην θέση Α

Ακολούθως θα υπολογιστούν οι χρόνιες απώλειες στο σημείο αγκύρωσης Α του σκυροδέματος οι οποίες οφείλονται στη συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος, στην αυτογενή συρρίκνωση του και στον ερπυσμό αυτού. Τέλος θα υπολογιστούν και οι απώλειες για την χαλάρωση του τένοντα.

7.14.1 Συστολή ξηράνσεως του σκυροδέματος

Η τελική τιμή της παραμόρφωσης λόγω της συστολής ξήρανσης του σκυροδέματος δίνεται από την σχέση:

$\varepsilon_{cd,\infty} = \varepsilon_{cd,0} \cdot k_h$ με $\varepsilon_{cd,0}$ να είναι η αναμενόμενη μέση τιμή της παραμόρφωσης και k_h ένας συντελεστής που εξαρτάται από την ονομαστική τιμή του μεγέθους h_0 του στοιχείου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις που δίνουν τα $\varepsilon_{cd,0}$ & k_h .

$\varepsilon_{cd,0} = 0.85[(220 + 110a_{ds1}) \cdot e^{(-ads2 \cdot f_{cm}/f_{cm0})} \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}]$ αναμενόμενη μέση τιμή παραμόρφωσης

$f_{cm} = 38 \text{ MPa}$ είναι η μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος C30/37

$f_{cm0} = 10 \text{ MPa}$

$a_{ds1} = 4$ για τσιμέντα κλάσης N

$a_{ds2} = 0.12$ για τσιμέντα κλάσης N

$RH = 80\%$ είναι η σχετική υγρασία περιβάλλοντος για εξωτερικούς χώρους (δοκός γέφυρας)

$RH_0 = 100\%$

$\beta_{RH} = 1.55 \cdot \{1 - (RH/RH_0)^3\} = 0.7564$

$\varepsilon_{cd,0} = 0.00027$

$u = 4.18 \text{ m}$ περίμετρος διατομής που θα υποστεί ξήρανση

$h_0 = 2A_c/u = 0.257 \text{ m}$ ονομαστική τιμή μεγέθους στοιχείου

$k_h = 0.793$ γραμμική παρεμβολή από τον πίνακα 3.3 του Ευρωκώδικα 2

$\varepsilon_{cd,\infty} = \varepsilon_{cd,0} \cdot k_h = 2.13E-04$ τελική τιμή παραμόρφωσης λόγω συστολής ξήρανσης

7.14.2 Αυτογενής συρρίκνωση του σκυροδέματος

Η παραμόρφωση που οφείλεται στην αυτογενή συρρίκνωση του σκυροδέματος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty)$ όπου οι δύο αυτές παράμετροι δίνονται από τις εξής σχέσεις:

$\beta_{as}(t) = 1 - e^{(-0.20t^{0.50})} = 1$ η τιμή "1" αντιστοιχεί σε "άπειρο χρόνο"

$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2.5 \cdot (f_{ck} - 10) / 1000000 = 5.00E-05$ τελική τιμή αυτογενούς συρρίκνωσης σκυροδέματος

7.14.3 Ερπυσμός του σκυροδέματος

Προκειμένου να υπολογιστεί η συνολική ερπυστική παραμόρφωση (σε άπειρο χρόνο) για σκυρόδεμα στο οποίο την χρονική στιγμή t_0 από την κατασκευή εφαρμόζεται σταθερή θλιπτική τάση, θα πρέπει να υπολογιστεί ο συντελεστής ερπυσμού $\varphi(\infty, t_0)$.

Με δεδομένο ότι:

$\beta_c(\infty, t_0) = 1$ η τιμή "1" αντιστοιχεί σε "άπειρο χρόνο"

ισχύει:

δηλαδή η τελική τιμή του συντελεστή ερπυσμού " $\varphi(\infty, t_0)$ " ισούται με την ονομαστική τιμή του συντελεστή ερπυσμού " φ_0 "

Η ονομαστική τιμή φ_0 του συντελεστή ερπυσμού δίνεται από την σχέση:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$$

Παρακάτω υπολογίζονται οι παράμετροι φ_{RH} , $\beta(f_{cm})$ και $\beta(t_0)$:

$$a_1 = (35/f_{cm})^{0.70} = 0.944$$

$$a_2 = (35/f_{cm})^{0.20} = 0.984$$

$\varphi_{RH} = a_2 \cdot \{1 + a_1 \cdot (1 - 0.01RH) / [0.10 \cdot h_0^{(1/3)}]\} = 1.28$ συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την επιρροή της σχετικής υγρασίας επί της ονομαστικής τιμής του συντελεστή ερπυσμού

$\beta(f_{cm}) = 16.80 / (f_{cm})^{0.50} = 2.73$ συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την επιρροή της αντοχής του σκυροδέματος επί της ονομαστικής τιμής του συντελεστή ερπυσμού

$t_0 = 21.00$ ημέρες: ηλικία του σκυροδέματος κατά την επιβολή του σταθερού φορτίου στη δοκό

$\beta(t_0) = (0.10 + t_0^{0.20})^{-1} = 0.52$ συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την ηλικία του σκυροδέματος κατά την επιβολή της φόρτισης

$\varphi(\infty, t_0) = \varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) = 1.795$ συντελεστής ερπυσμού σε "άπειρο χρόνο"

7.14.4 Χαλάρωση τένοντα

$f_{pk} = 1860$ MPa χαρακτηριστική αντοχή τένοντα προέντασης

$\Delta\sigma_{pr}$: απώλεια τάσης λόγω χαλάρωσης του τένοντα

σ_{pi} : τιμή της προέντασης στην αρχή της χαλάρωσης (αρχική τιμή προέντασης)

Ισχύει $\sigma_{pi} = \sigma_{pm0}$

$\sigma_{pi} = \sigma_{pm0} = P' / A_p = 1253$ MPa είναι η τάση που αντιστοιχεί στον τένοντα μετά τις στιγμιαίες απώλειες, στο άκρο A

$$\mu = \sigma_{pi} / f_{pk} = 0.674$$

$\rho_{1000} = 2.5\%$ τένοντας κατηγορίας χαλάρωσης 2

$t = 1000$ ώρες χρόνος μετά την τάνυση

$$(\Delta\sigma_{pr}/\sigma_{pi}) = \{0.66 \cdot \rho_{1000} \cdot e^{9.1\mu} \cdot (0.001t)^{0.75(1-\mu)}\} / 100000 = 8.059E-03$$

Συνάρτηση χαλάρωσης - χρόνου για τένοντα κατηγορίας 2 κατά EC2, para. 3.3.2(7)

$\Delta\sigma_{pr} = 10.10 \text{ MPa}$ εκτιμώμενες απώλειες λόγω χαλάρωσης τένοντα

7.14.5 Αλληλεπίδραση χρόνιων απωλειών στη θέση A

$$A_{con} = A_c - A_o - A_{st} = 0.53 \text{ m}^2 \quad \text{εμβαδόν διατομής σκυροδέματος}$$

$$I_0 = (\pi/64) \cdot D^4 = 2.011E-06 \text{ m}^4 \quad \text{ροπή αδράνειας σωλήνα προέντασης}$$

$$I_{con} = I_c - I_s - I_o = 0.070 \text{ m}^4 \quad \text{ροπή αδράνειας της διατομής του σκυροδέματος}$$

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd,\infty} + \varepsilon_{ca}(\infty) = 2.63E-04 \quad \text{συνολική τιμή συρρίκνωσης σκυροδέματος}$$

$P'_A = P_0 = 2356.98 \text{ KN}$ προένταση στο σκυρόδεμα μετά τις στιγμιαίες απώλειες (ολίσθηση)

$\sigma_{cp} = -P'_A / A_{cn} = -4.37 \text{ MPa}$ τάση στο σκυρόδεμα λόγω προέντασης μετά τις στιγμιαίες απώλειες (ολίσθηση) - θεωρείται ότι η προένταση δρα στο κέντρο βάρους της διατομής-κεντρική θλίψη

Σημειώνεται ότι την χρονική στιγμή $t=0$ οι τάσεις στο σημείο στήριξης προέρχονται μόνο από την προένταση και όχι από τον μόνιμο συνδυασμό $g+0.30q$ οπότε:

$$M_{G+0.3Q} = 0 \text{ KNm}$$

$$\sigma_{1,G+0.3Q} = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2,G+0.3Q} = 0 \text{ MPa}$$

$\sigma_{c,G+0.3Q} = 0 \text{ MPa}$ τάση του σκυροδέματος στη θέση του τένοντα

Επομένως προκύπτει:

$\sigma_{c,QP} = \sigma_{cp} = -4.37 \text{ MPa}$ μακροχρόνια τάση στο σκυρόδεμα στην περιοχή της στήριξης

Επισημαίνεται ότι ο τένοντας αγκυρώνεται στο κέντρο βάρους της πλήρους διατομής. Έτσι η απόσταση των τενόντων από το κέντρο βάρους της διατομής θεωρείται αμελητέα και άρα $z_{cp} = 0$

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = \{ \varepsilon_{cs} E_p + 0.80 \Delta\sigma_{pr} + (E_p / E_{cm}) \varphi(t, t_0) \sigma_{c,QP} \} / \{ 1 + (E_p A_p / E_{cm} A_c) [1 + z_{cp}^2 (A_c / I_c)] (1 + 0.8 \varphi(t, t_0)) \}$$

$\Delta\sigma_{p,c+s+r}$ είναι οι συνολικές απώλειες στη θέση A που οφείλονται στη συρρίκνωση του σκυροδέματος στην χαλάρωση του τένοντα και στον ερπυσμό, δηλαδή οι απώλειες που οφείλονται στην αλληλεπίδραση όλων των παραπάνω φαινομένων.

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = 51.81 \text{ MPa} \quad \text{συνολικές απώλειες στη θέση A}$$

7.15 Υπολογισμός Χρόνιων Απωλειών στην θέση Μ

Ομοίως θα υπολογιστούν οι χρόνιες απώλειες στο σημείο αγκύρωσης Μ του σκυροδέματος οι οποίες οφείλονται στη συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος, στην αυτογενή συρρίκνωση του και στον ερπυσμό αυτού. Τέλος θα υπολογιστούν και οι απώλειες για την χαλάρωση του τένοντα.

7.15.1 Συστολή ξηράνσεως του σκυροδέματος

Η τελική τιμή της παραμόρφωσης λόγω της συστολής ξήρανσης του σκυροδέματος θα είναι ίδια με την παραμόρφωση με αυτή στη θέση Α και άρα

$\varepsilon_{cd,\infty} = \varepsilon_{cd,0} \cdot k_h = 2.13E-04$ τελική τιμή παραμόρφωσης λόγω συστολής ξήρανσης.

7.15.2 Αυτογενής συρρίκνωση του σκυροδέματος

Ακολούθως και η παραμόρφωση που οφείλεται στην αυτογενή συρρίκνωση θα είναι ίδια με αυτή που υπολογίστηκε στη θέση Α άρα:

$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2.5 \cdot (f_{ck}10) / 1000000 = 5.00E^{05}$ τελική τιμή παραμόρφωσης λόγω συστολής ξήρανσης.

7.15.3 Ερπυσμός του σκυροδέματος

Και σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του συντελεστή ερπυσμού $\varphi(\infty, t0)$. Ισχύει και για αυτήν την περίπτωση ότι σε χρόνο άπειρο η τελική τιμή του συντελεστή ερπυσμού θα είναι ίση με την ονομαστική τιμή του συντελεστή ερπυσμού αφού $\beta_c(\infty, t0) = 1$ και άρα ισχύει $\varphi(\infty, t0) = \varphi_0$ επομένως και σε αυτή την περίπτωση ο ερπυσμός του σκυροδέματος θα έχει την ίδια τιμή με την θέση Α $\varphi(\infty, t0) = \varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) = 1.795$ συντελεστής ερπυσμού σε "άπειρο χρόνο".

7.15.4 Χαλάρωση τένοντα

Ομοίως και σε αυτή την περίπτωση οι εκτιμώμενες απώλειες λόγω χαλάρωσης θα είναι ίδιες με την παραπάνω θέση άρα ;

$\Delta\sigma_{pr} = 10.10MPa$ εκτιμώμενες απώλειες λόγω χαλάρωσης τένοντα.

7.15.5 Αλληλεπίδραση χρόνιων απωλειών

$A_{con} = A_c - A_o - A_{st} = 0.53 \text{ m}^2$ εμβαδόν διατομής σκυροδέματος

$I_o = (\pi/64) \cdot D^4 + A_o \cdot y_o^2 = 2.019E^{-06} \text{ m}^4$ ροπή αδράνειας σωλήνα προέντασης

$I_{con} = I_c - I_s - I_o = 0.067 \text{ m}^4$ ροπή αδράνειας της διατομής του σκυροδέματος

$P_{0,M} = 2500 \text{ KN}$ δύναμη προέντασης στην μεσαία διατομή της δοκού

$y_{cp} = y_p - y_2i = 0.64 \text{ m}$

$\sigma_{cp} = -P_o/A_{cn} - P_o \cdot y_{cp}/A_{cn} = -19.43 \text{ MPa}$ τάση στο σκυρόδεμα λόγω προέντασης στη θέση M

Τη χρονική στιγμή $t=0$ οι τάσεις στη διατομή ελέγχου M προέρχονται και από την επίδραση του μόνιμου συνδυασμού $g+0.30q$

$M_{G+0.3Q} = 1078.41 \text{ KNm}$

$\sigma_{1,G+0.3Q} = M_{G+0.3Q}/W_{1n} = 11.84 \text{ MPa}$

$\sigma_{2,G+0.3Q} = M_{G+0.3Q}/W_{2n} = 7.03 \text{ MPa}$

$\sigma_{c,G+0.3Q} = 10.24 \text{ MPa}$ τάση του σκυροδέματος στη θέση του τένοντα

$\sigma_{c,QP} = -9.19 \text{ MPa}$ τελική τάση του σκυροδέματος στη περιοχή του τένοντα από το συνδυασμό των δράσεων (μόνιμες δράσεις + αρχική προένταση (μετά τις στιγμιαίες απώλειες))

$S_{con} = S_c - S_s - S_o = 0.24 \text{ m}^3$ στατική ροπή αδράνειας της διατομής του σκυροδέματος

$y_{2con} = S_{con}/A_{con} = 0.45 \text{ m}$

$z_{cp} = 1.11 - 0.45 = 0.66 \text{ m}$ απόσταση του κέντρου βάρους της διατομής του σκυροδέματος από το κέντρο των τενόντων

Επομένως οι συνολικές απώλειες στη θέση M είναι :

$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = \{\varepsilon_{cs}E_p + 0.80\Delta\sigma_{pr} + (E_p/E_{cm})\varphi(t,t_0)\sigma_{c,QP}\} / \{1 + (E_pA_p/E_{cm}A_c)[1 + z_{cp}^2(A_c/I_c)](1 + 0.80\varphi(t,t_0))\}$

$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = 86.12 \text{ MPa}$ συνολικές απώλειες στη θέση M

7.16 Υπολογισμός Χρόνιων Απωλειών στην θέση B

Στην θέση B υπάρχουν δύο περιπτώσεις αυτή της αμφίπλευρης και αυτή της μονόπλευρης προέντασης. Οι χρόνιες απώλειες είναι ίδιες με την θέση A για την περίπτωση της αμφίπλευρης προέντασης οπότε θα εξεταστεί η περίπτωση της μονόπλευρης προέντασης από την στήριξη A. Και στη περίπτωση της μονόπλευρης προέντασης οι ακόλουθες τιμές των παραμέτρων είναι ίδιες με αυτές των θέσεων A και M συνεπώς:

7.16.1 Συστολή ξηράνσεως του σκυροδέματος

Η τελική τιμή της παραμόρφωσης λόγω της συστολής ξήρανσης του σκυροδέματος θα είναι ίδια με την παραμόρφωση που έχει στη θέση Α και Μ και άρα:

$\varepsilon_{cd,\infty} = \varepsilon_{cd,0} \cdot k_h = 2.13E-04$ τελική τιμή παραμόρφωσης λόγω συστολής ξήρανσης.

7.16.2 Αυτογενής συρρίκνωση του σκυροδέματος

Και η παραμόρφωση που οφείλεται στην αυτογενή συρρίκνωση είναι ίδια με αυτή που στη θέση Α και Μ άρα :

$\varepsilon_{ca(\infty)} = 2.5 \cdot (f_{ck} - 10) / 1000000 = 5.00E^{-05}$ τελική τιμή αυτογενούς συρρίκνωσης σκυροδέματος.

7.16.3 Ερπυσμός του σκυροδέματος

Και σε αυτή την περίπτωση η ονομαστική τιμή του φ_0 του συντελεστή ερπυσμού $\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$ είναι ίδια με αυτή των θέσεων Α και Μ οπότε

$\varphi(\infty, t_0) = \varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) = 1.795$ συντελεστής ερπυσμού σε "άπειρο χρόνο".

7.16.4 Χαλάρωση τένοντα

Και σε αυτή την περίπτωση οι εκτιμώμενες απώλειες λόγω χαλάρωσης θα είναι ίδιες με της θέσης Α και Μ άρα $\Delta \sigma_{pr} = 10.10 \text{MPa}$ εκτιμώμενες απώλειες λόγω χαλάρωσης τένοντα.

7.16.5 Αλληλεπίδραση χρόνιων απωλειών

Για την θέση Β το εμβαδόν της διατομής του σκυροδέματος και η ροπή αδράνειας του σκυροδέματος είναι ίση με αυτή της θέσης Α άρα:

$A_{con} = A_c - A_o - A_{st} = 0.53 \text{ m}^2$ εμβαδόν διατομής σκυροδέματος

$I_{con} = I_c - I_s - I_o = 0.070 \text{m}^4$ ροπή αδράνειας της διατομής του σκυροδέματος

$P_B = 2361.70 \text{ KN}$ δύναμη προέντασης για την περίπτωση μονόπλευρης προέντασης

$\sigma_{cr} = -P_B / A_{cn} = -4.38 \text{MPa}$ τάση στο σκυροδέμα λόγω προέντασης μετά τις στιγμιαίες απώλειες (ολίσθηση)- θεωρείται ότι η προένταση δρα στο κέντρο βάρους της διατομής-κεντρική θλίψη.

Σημειώνεται ότι την χρονική στιγμή $t=0$ οι τάσεις στο σημείο στήριξης προέρχονται μόνο από την προένταση και όχι από τον μόνιμο συνδυασμό $g+0.30q$

$\sigma_{c,QP} = \sigma_{cp} = -4.38 \text{ MPa}$ μακροχρόνια τάση στο σκυρόδεμα στην περιοχή της στήριξης
 Επισημαίνεται ότι ο τένοντας αγκυρώνεται στο κέντρο βάρους της πλήρους διατομής.
 Έτσι η απόσταση των τενόντων από το κέντρο βάρους της διατομής θεωρείται αμελητέα
 και άρα $z_{cp} = 0$

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = \{\varepsilon_{cs} E_p + 0.80 \Delta\sigma_{pr} + (E_p/E_{cm}) \varphi(t, t_0) \sigma_{c,QP}\} / \{1 + (E_p A_p / E_{cm} A_c) [1 + z_{cp}^2 (A_c / I_c)] (1 + 0.8 \varphi(t, t_0))\}$$

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = 51.88 \text{ MPa} \text{ συνολικές απώλειες στη θέση B}$$

7.17 Κατανομή της δύναμης προέντασης κατά μήκος της δοκού

Στη θέση A

Συμπεριλαμβάνοντας και την αλληλεπίδραση των φαινομένων οι συνολικές απώλειες

$\Delta\sigma_{p,c+s+r}$ για την θέση A έχουν υπολογισθεί

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = 51.81 \text{ MPa}$$

Επομένως για χρόνο $t = \infty$ η πτώση της δύναμης προέντασης είναι:

$$\Delta P = A_p \cdot \Delta\sigma_{p,c+s+r} = 97.42 \text{ KN}$$

Και άρα σε χρόνο $t = \infty$ η δύναμη προέντασης είναι:

$$P_{t,A} = P'A - \Delta P = 2259.57 \text{ KN}$$

Στη θέση M

Συμπεριλαμβάνοντας και την αλληλεπίδραση των φαινομένων οι συνολικές απώλειες

$\Delta\sigma_{p,c+s+r}$ για την θέση M έχουν υπολογισθεί

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = 86.12 \text{ MPa}$$

Επομένως για χρόνο $t = \infty$ η πτώση της δύναμης προέντασης είναι:

$$\Delta P = A_p \cdot \Delta\sigma_{p,c+s+r} = 161.99 \text{ KN}$$

Και άρα σε χρόνο $t = \infty$ η δύναμη προέντασης είναι :

$$P_{t,M} = P_M - \Delta P = 2338.01 \text{ KN}$$

Στη θέση B

Στη περίπτωση της αμφίπλευρης προέντασης στη θέση B η τιμή της προέντασης είναι ίδια με αυτή της θέσης A, δηλαδή:

$$P_{t,A} = P_{t,B} = 2259.57 \text{ KN}$$

Στη περίπτωση της μονόπλευρης προέντασης από την στήριξη A οι συνολικές απώλειες $\Delta\sigma_{p,c+s+r}$ στη θέση B συμπεριλαμβάνοντας και την αλληλεπίδραση των φαινομένων είναι:

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = 51.88 \text{ MPa}$$

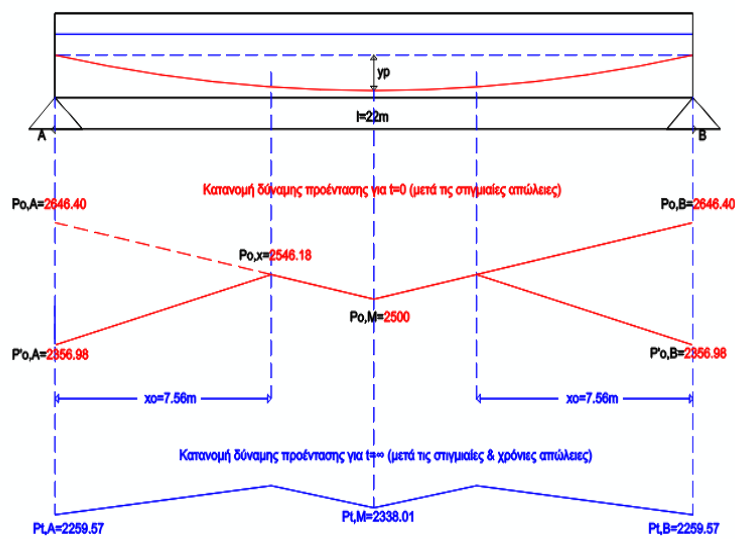
Επομένως για χρόνο $t = \infty$ η πτώση της δύναμης προέντασης είναι:

$$\Delta P = A_p \text{ (ελέγχεται και η διατομή B για την μονόπλευρη προένταση)}$$

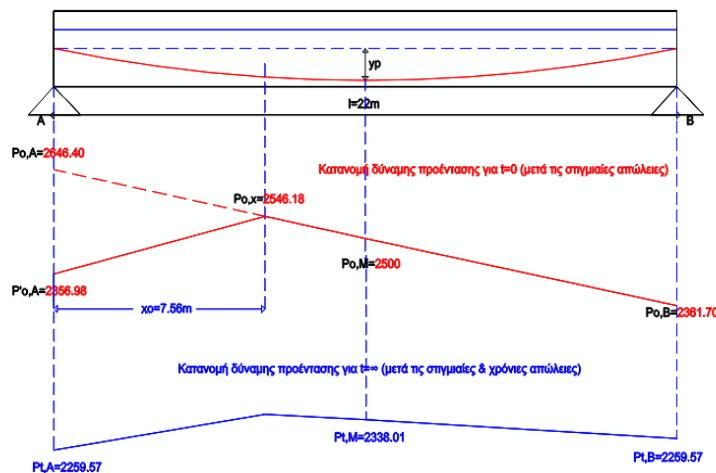
$$\Delta\sigma_{p,c+s+r} = 97.58 \text{ KN}$$

Και άρα σε χρόνο $t = \infty$ η δύναμη προέντασης είναι:

$$P_{t,B} = P_B - \Delta P = 2264.12 \text{ KN}$$



Διάγραμμα 5: Διάγραμμα κατανομής της δύναμης προέντασης κατά μήκος της δοκού για την περίπτωση της αμφίπλευρης προέντασης για χρόνους $t=0$ (μετά τις στιγμιαίες απώλειες) και για $t=\infty$ (μετά τις στιγμιαίες και τις χρόνιες απώλειες). (Πηγή Autocad).



Διάγραμμα 6: Διάγραμμα κατανομής της δύναμης προέντασης κατά μήκος της δοκού για την περίπτωση της μονόπλευρης προέντασης για χρόνους $t=0$ (μετά τις στιγμιαίες απώλειες) και για $t=\infty$ (μετά τις στιγμιαίες και τις χρόνιες απώλειες). (Πηγή Autocad).

7.18 Έλεγχος τάσεων του τένοντα κατά μήκος της δοκού

Οι τάσεις του τένοντα δεν πρέπει να υπερβαίνουν τις τιμές που αναφέρονται ως άνω όρια από τον Ευρωκώδικα 2. Πιο συγκεκριμένα:

Κατά την τάνυση

Η τάση του τένοντα δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την τιμή EC2-5.10.2.1 που δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{p,max} = \min(k_1 \cdot f_{pk}, k_2 \cdot f_{p0.10k}) = 1488 \text{ MPa με } (k_1=0.80, k_2=0.90)$$

Μετά την τάνυση και αγκύρωση

Η τάση του τένοντα δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την τιμή EC2-5.10.3 που δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{p, m0(x)} = \min(k_7 \cdot f_{pk}, k_8 \cdot f_{p0.10k}) = 1395 \text{ MPa με } (k_7=0.75, k_8=0.85)$$

Με βάση τους παραπάνω περιορισμούς:

Κατά την αγκύρωση

Στην θέση A αλλά και στην θέση B για την περίπτωση της αμφίπλευρης προέντασης θα πρέπει:

$$P_A / A_p = 1406.91 \text{ MPa} \leq 1488 \text{ MPa} \text{ οπότε η συνθήκη ικανοποιείται.}$$

Σε όλες τις θέσεις μετά την αγκύρωση

Δηλαδή μετά τις στιγμιαίες απώλειες θα πρέπει να ισχύει η συνθήκη $P / A_p \leq 1395$

$$P'_A / A_p = 1253.05 \text{ MPa} \leq 1395$$

$$P_{x0} / A_p = 1353.63 \text{ MPa} \leq 1395$$

$$P_M / A_p = 1329.08 \text{ MPa} \leq 1395$$

$P_B / A_p = 1255.56 \text{ MPa} \leq 1395$ (ελέγχεται και η διατομή B για την μονόπλευρη προένταση)

Επομένως η συνθήκη ικανοποιείται για όλες τις περιπτώσεις.

7.19 Έλεγχος Ο.Κ.Α. σε ρηγμάτωση στη θέση M

Η πιο συνηθισμένη μορφή προέντασης είναι η πλήρης ή αλλιώς ολική προένταση. Στην περίπτωση αυτή η δοκός βρίσκεται μόνιμα υπό θλίψη και σε καμία φάση της ζωής του έργου δεν επιτρέπεται να αναπτυχθούν εφελκυσμοί. Οπότε αφού γίνει εφαρμογή της πλήρους προέντασης θα γίνουν και ακολούθως οι αντίστοιχοι απαραίτητοι έλεγχοι ώστε να μην αναπτυχθούν εφελκυστικές τάσεις για όλη τη ζωή του έργου. Στην συγκεκριμένη εργασία αφού η δοκός είναι αμφιέρειστη με παραβολικό τένοντα η κρίσιμη διατομή είναι η μεσαία διατομή, ωστόσο είναι πιθανόν σε κάποιες περιπτώσεις συγκεντρωμένων φορτίων ή συνεχών δοκών να υπάρχουν περισσότερες διατομές στις οποίες αναπτύσσονται μεγάλες ροπές και πρέπει να γίνει έλεγχος σε περισσότερες διατομές, κάτι τέτοιο δεν χρειάζεται όπως βλέπουμε στο συγκεκριμένο παράδειγμα. Επομένως θα πραγματοποιηθεί έλεγχος μόνο στην μεσαία διατομή.

Σε χρόνο $t=0$

Πρέπει να γίνει έλεγχος της άνω παρειάς της διατομής και πρέπει να ισχύει ότι:

$$\sigma_{2,o,g+Po} = -P_{o,M}/A_{cn} + P_{o,M} \cdot (y_o - y_{2n}) / W_{2n} - M_{g,M} / W_{2n} \leq 0$$

$$\sigma_{2,o,g+Po} = -0.011 \text{ MPa} \leq 0$$

Άρα ικανοποιείται ο έλεγχος αφού η άνω παρειά βρίσκεται υπό θλίψη.

Σε χρόνο $t=\infty$

Πρέπει να γίνει έλεγχος της κάτω παρειάς της διατομής και πρέπει να ισχύει ότι:

$$\sigma_{1,\infty,g+q+Po} = -P_{\infty,M}/A_{ci} + P_{\infty,M} \cdot (y_o - y_{2i}) / W_{1i} - M_{tot} / W_{1i} \leq 0$$

$$\sigma_{1,\infty,g+q+Po} = -4.99 \text{ MPa} \leq 0$$

Άρα ικανοποιείται ο έλεγχος αφού η κάτω παρειά βρίσκεται υπό θλίψη.

7.20 Έλεγχοι περιορισμού των θλιπτικών τάσεων

Για να ικανοποιείται ο έλεγχος πρέπει $\sigma_{1,2} \leq 0.6 f_{ck}$

Σε χρόνο $t=0$

Πρέπει να γίνει έλεγχος της κάτω παρειάς της διατομής και πρέπει να ισχύει:

$$\sigma_{1,o,g+Po} = -P_{o,M}/A_{cn} + P_{o,M} \cdot (y_o - y_{2n}) / W_{1n} - M_{g,M} / W_{1n} \geq f_{c,max}$$

$$\sigma_{1,o,g+P_o} = -12.41 \text{ MPa}$$

και αν βάλουμε την τάση σε απόλυτη τιμή ισχύει:

$$\sigma_{1,o,g+P_o} = 12.41 \text{ MPa} \leq 0.6 f_{ck} = 18 \text{ MPa}$$

Επομένως ο έλεγχος ικανοποιείται.

Σε χρόνο $t=\infty$

Πρέπει να γίνει έλεγχος της άνω παρειάς της διατομής και πρέπει να ισχύει:

$$\sigma_{2,\infty,g+q+P_o} = -P_{\infty,M}/A_{ci} + P_{\infty,M} \cdot (y_o - y_{2i})/W_{2i} - M_{tot}/W_{2i} \geq f_{c,max}$$

$$\sigma_{2,\infty,g+q+P_o} = -3.73 \text{ MPa} \leq 0$$

και αν βάλουμε την τάση σε απόλυτη τιμή ισχύει:

$$\sigma_{2,o,g+P_o} = 3.73 \text{ MPa} \leq 0.6 f_{ck} = 18 \text{ MPa}.$$

Επομένως ο έλεγχος ικανοποιείται.

7.21 Έλεγχος Ο.Κ.Α σε ορθή ένταση στη θέση M

Στα προεντεταμένα στοιχεία σκυροδέματος ο έλεγχος στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) από μεγέθη ορθής έντασης (M και N) γίνεται με τις ίδιες βασικές παραδοχές όπως στα συμβατικά οπλισμένα στοιχεία από σκυρόδεμα. Ωστόσο η κύρια διαφορά τους είναι ότι οι χάλυβες προέντασης έχουν μια αρχική εφελκυστική παραμόρφωση και έτσι δημιουργούν μια αρχική θλιπτική παραμόρφωση στο σκυρόδεμα πριν από την εφαρμογή εξωτερικών φορτίων στον φορέα. Καθώς γίνεται εφαρμογή και άλλων νέων εξωτερικών φορτίων προκαλούνται στους τένοντες πρόσθετες εφελκυστικές δυνάμεις και γίνεται μείωση στην αρχική θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος. Η παραμόρφωση των τενόντων λέγεται προμήκυνση ενώ η αρχική θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος που μηδενίζεται λόγω των εξωτερικών φορτίων χαρακτηρίζεται ως απόθλιψη σκυροδέματος. Για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος πρέπει να βρεθούν οι παρακάτω παράμετροι:

$$M_{Ed,M} = 1.35 \cdot M_{g,M} + 1.50 \cdot M_{q,M} = 1985.84 \text{ kNm} \quad \text{ροπή σχεδιασμού στην ΟΚΑ}$$

$$d_p = 1.11 \text{ m} \quad \text{απόσταση τενόντων από άνω παρειά}$$

$$\varepsilon_{po} = P_t/A_p \cdot E_p = 0.0064 \quad \text{εφελκυστική παραμόρφωση τενόντων}$$

$$\sigma_{cp} = -P_t/A_{ci} - P_t \cdot (d_p - y_{2i})^2/I_{ci} = -16.97 \text{ MPa} \quad \text{θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος στη θέση των τενόντων}$$

$$\varepsilon_{cp} = \sigma_{cp}/E_c = -0.0005 \quad \text{αρχική θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος στη θέση των τενόντων}$$

τενόντων λόγω της δύναμης προέντασης

$$\varepsilon_{p(0)} = \varepsilon_{p0} + |\varepsilon_{cp}| = 0.0069 \quad \text{προμήκυνση χάλυβα προέντασης}$$

$$f_{pd} = f_{p0.1k} / 1.15 = 1539.13 \text{MPa} \quad \text{τάση διαρροής σχεδιασμού του χάλυβα προέντασης}$$

$$\varepsilon_{pd} = f_{pd} / E_p = 7.893\text{‰} \quad \text{παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα προέντασης}$$

$$f_{yd} = f_{yk} / 1.15 = 434.783 \text{MPa} \quad \text{τάση διαρροής σχεδιασμού των χαλαρών χαλύβων}$$

$$\varepsilon_{yd} = f_{yd} / E_s = 2.174\text{‰} \quad \text{παραμόρφωση διαρροής των χαλαρών χαλύβων}$$

7.21.1 Προσδιορισμός οριακού επιπέδου αστοχίας

Αφού το κρίσιμο υλικό είναι το σκυρόδεμα για τους χάλυβες η ανάλυση γίνεται με βάση την παραδοχή 2 οπότε θα γίνουν δοκιμές ώστε να μπορέσει να προσδιοριστεί το οριακό επίπεδο αστοχίας.

$$\text{Έστω } \varepsilon_{cu} = 3.5\text{‰} \text{ και } \Delta\varepsilon_p = 20\text{‰}$$

$$\xi = \varepsilon_c / \varepsilon_c + \Delta\varepsilon_p = 0.149 \quad \text{συντελεστής για να υπολογιστή το ύψος της θλιβόμενης ζώνης}$$

$$d = 1.11 \text{ m} \quad \text{απόσταση τενόντων από άνω παρειά}$$

$$x = \xi \cdot d = 0.165 \quad \text{ύψος θλιβόμενης ζώνης}$$

$x = 0.153 < d_o = 0.30 \text{ m}$ επομένως σε αυτή την περίπτωση η θλιβόμενη ζώνη είναι ορθογωνική με πλάτος $b = 0.88 \text{ m}$.

7.21.2 Παραμορφώσεις χαλαρών χαλύβων

$$\varepsilon_{s1} = (x - d_{s1} / x) \cdot \varepsilon_{cu} = 2.44\text{‰}$$

$$\varepsilon_{s2} = (x - d_{s2} / x) \cdot \varepsilon_{cu} = -1.80\text{‰}$$

$$\varepsilon_{s3} = (x - d_{s3} / x) \cdot \varepsilon_{cu} = -8.17\text{‰}$$

$$\varepsilon_{s4} = (x - d_{s4} / x) \cdot \varepsilon_{cu} = -21.11\text{‰}$$

7.21.3 Δυνάμεις χαλαρών χαλύβων

Το εμβαδόν $\Phi 14$ είναι 1.54 cm^2 (153.94 mm^2), $f_{yd} = 437.783 \text{ MPa}$, $\varepsilon_{yd} = 2.174\text{‰}$

- Αν $\varepsilon_s > \varepsilon_{yd}$ τότε $F_s = n \cdot A_{14} \cdot f_{yd}$

- Αν $\varepsilon_s < \varepsilon_{yd}$ τότε $F_s = n \cdot A_{14} \cdot \varepsilon_s \cdot E_s$

$$|\varepsilon_{s1}| > \varepsilon_{yd} \quad \text{άρα } F_{s1} = n_1 \cdot A_{14} \cdot f_{yd} = 0.268 \text{ MN}$$

$$|\varepsilon_{s2}| < \varepsilon_{yd} \quad \text{άρα } F_{s2} = n_2 \cdot A_{14} \cdot \varepsilon_{s2} \cdot E_s = -0.111 \text{ MN}$$

$$|\varepsilon_{s3}| > \varepsilon_{yd} \quad \text{άρα } F_{s3} = n_3 \cdot A_{14} \cdot f_{yd} = -0.134 \text{ MN}$$

$$|\varepsilon_{s4}| > \varepsilon_{yd} \text{ \acute{a}ρα } F_{s4} = n_4 \cdot A_{14} \cdot f_{yd} = -0.134 \text{ MN}$$

(το θετικό πρόσημο σημαίνει θλίψη και το αρνητικό εφελκυσμό)

$$F_c = 0.688 \cdot (f_{ck}/1.15) \cdot \xi \cdot b \cdot d = 2.605 \text{ MN θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος}$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{p(0)} + \Delta\varepsilon_p = 26.88 \text{ ‰ συνολική παραμόρφωση}$$

$$\varepsilon_p = 26.88 \text{ ‰} > \varepsilon_{pd} = 7.893 \text{ ‰}$$

Αφού η συνολική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη από την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα προέντασης ισχύει ότι:

$$\sigma_p = f_{pd} = 1539.13 \text{ MPa και \acute{a}ρα}$$

$$F_p = \sigma_p \cdot A_p = 2.90 \text{ MN εφελκυστική δύναμη του τένοντα}$$

$$F_c + F_{s1} = 2.87 \text{ MN σύνολο θλιπτικών δυνάμεων}$$

$$F_p + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} = 3.27 \text{ MN σύνολο εφελκυστικών δυνάμεων}$$

Στην συγκεκριμένη δοκιμή οι θλιπτικές δυνάμεις είναι μικρότερες από τις εφελκυστικές επομένως διατηρώντας την παραμόρφωση του σκυροδέματος που είναι το κρίσιμο υλικό θα γίνει μείωση της παραμόρφωσης του χάλυβα προέντασης ώστε να μειωθούν οι εφελκυστικές δυνάμεις της διατομής

7.21.4 Νέα δοκιμή (τελική)

Ύστερα από δοκιμές λαμβάνεται $\Delta\varepsilon_p = 12.6 \text{ ‰}$

$$\text{\acute{A}ρα } \varepsilon_{cu} = 3.5 \text{ ‰ και } \Delta\varepsilon_p = 12.6 \text{ ‰}$$

$$\xi = \varepsilon_c / \varepsilon_c + \Delta\varepsilon_p = 0.217 \text{ συντελεστής για να υπολογιστή το \acute{u}πος της θλιβόμενης ζώνης}$$

$$d = 1.11 \text{ m απόσταση τενόντων από \acute{a}νω παρειά}$$

$$x = \xi \cdot d = 0.241 \text{ m \acute{u}πος θλιβόμενης ζώνης}$$

$x = 0.241 \text{ m} < d_o = 0.30 \text{ m}$ επομένως σε αυτή την περίπτωση η θλιβόμενη ζώνη είναι ορθογωνική με πλάτος $b = 0.88 \text{ m}$

Παραμορφώσεις χαλαρών χάλυβων

$$\varepsilon_{s1} = (x - d_{s1}/x) \cdot \varepsilon_{cu} = 2.773 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s2} = (x - d_{s2}/x) \cdot \varepsilon_{cu} = -0.134 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s3} = (x - d_{s3}/x) \cdot \varepsilon_{cu} = -4.405 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s4} = (x - d_{s4}/x) \cdot \varepsilon_{cu} = -13.362 \text{ ‰}$$

(το θετικό πρόσημο σημαίνει θλίψη και το αρνητικό εφελκυσμό)

Δυνάμεις χαλαρών χαλύβων

Το εμβαδόν Φ14 είναι 1.54cm^2 (153.94mm^2), $f_{yd}=437.783\text{MPa}$, $\varepsilon_{yd}=2.174\text{‰}$

- Αν $\varepsilon_s > \varepsilon_{yd}$ τότε $F_s = n \cdot A_{14} \cdot f_{yd}$
- Αν $\varepsilon_s < \varepsilon_{yd}$ τότε $F_s = n \cdot A_{14} \cdot \varepsilon_s \cdot E_s$

$$|\varepsilon_{s1}| > \varepsilon_{yd} \text{ άρα } F_{s1} = n_1 \cdot A_{14} \cdot f_{yd} = 0.268\text{ MN}$$

$$|\varepsilon_{s2}| > \varepsilon_{yd} \text{ άρα } F_{s2} = n_2 \cdot A_{14} \cdot \varepsilon_{s2} \cdot E_s = -0.008\text{ MN}$$

$$|\varepsilon_{s3}| > \varepsilon_{yd} \text{ άρα } F_{s3} = n_3 \cdot A_{14} \cdot f_{yd} = -0.134\text{ MN}$$

$$|\varepsilon_{s4}| > \varepsilon_{yd} \text{ άρα } F_{s4} = n_4 \cdot A_{14} \cdot f_{yd} = -0.134\text{ MN}$$

$$F_c = 0.688 \cdot (f_{ck}/1.15) \cdot \xi \cdot b \cdot d = 2.895\text{ MN} \text{ θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος}$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{p(0)} + \Delta\varepsilon_p = 19.49\text{‰} \text{ συνολική παραμόρφωση}$$

$$\varepsilon_p = 19.49\text{‰} > \varepsilon_{pd} = 7.893\text{‰}$$

Αφού η συνολική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη από την παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα προέντασης ισχύει ότι:

$$\sigma_p = f_{pd} = 1539.13\text{MPa} \text{ και άρα}$$

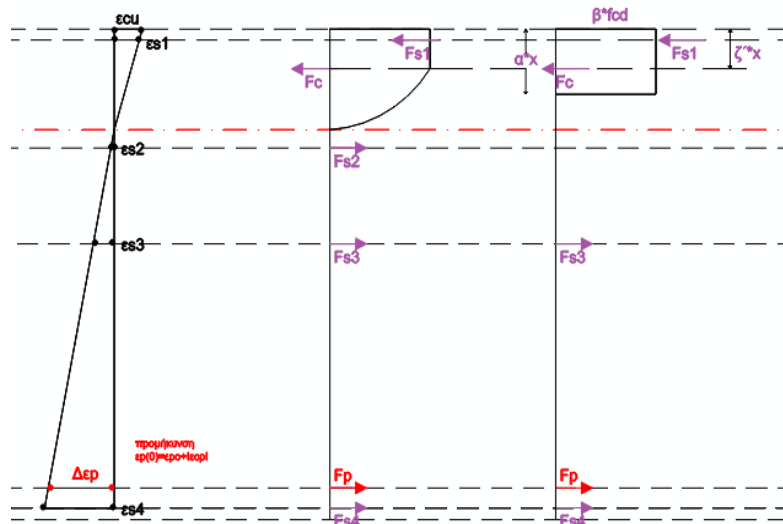
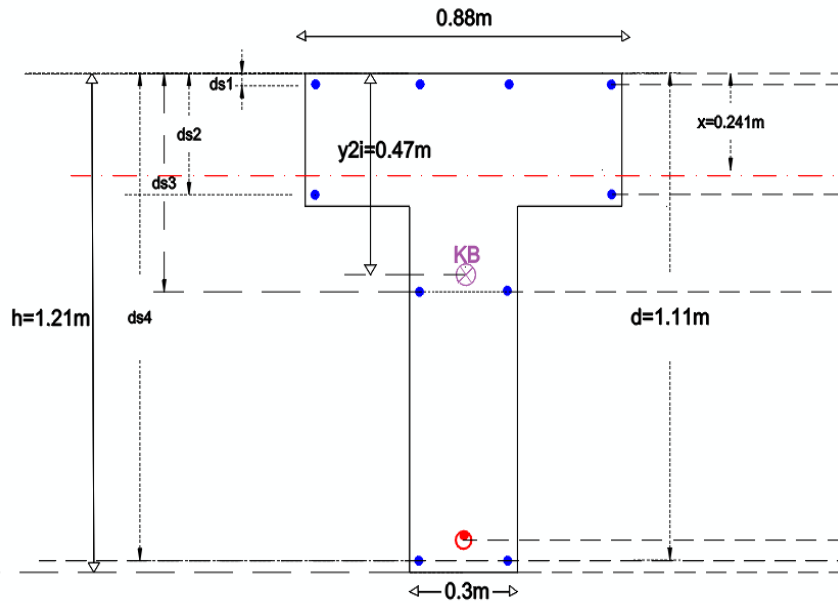
$$F_p = \sigma_p \cdot A_p = 2.895\text{ MN} \text{ εφελκυστική δύναμη του τένοντα}$$

$$F_c + F_{s1} = 3.183\text{ MN} \text{ σύνολο θλιπτικών δυνάμεων}$$

$$F_p + F_{s2} + F_{s3} + F_{s4} = 3.171\text{ MN} \text{ σύνολο εφελκυστικών δυνάμεων}$$

Εφόσον οι θλιπτικές δυνάμεις είναι μεγαλύτερες από τις εφελκυστικές η παραδοχή είναι αποδεκτή και άρα το οριακό επίπεδο παραμόρφωσης της διατομής είναι:

$$\varepsilon_{cu} = 3.5\text{‰} \text{ και } \Delta\varepsilon_p = 12.6\text{‰}.$$



Διάγραμμα 7: Διάγραμμα παραμορφώσεων δυνάμεων σ-ε της διατομής (Πηγή Autocad).

7.21.5 Υπολογισμός της ροπής αντοχής της διατομής $M_{R,d}$

Θέση της θλιπτικής δύναμης του σκυροδέματος

Για $\epsilon_{cu}=3.5 \%$ όπως στο συγκεκριμένο παράδειγμα ισχύει $\zeta' = 0.416$

Ροπή της θλιπτικής δύναμης του σκυροδέματος

$$F_{c,u} = (y_{2i} - \zeta' \cdot x) = 1.07 \text{ MNm}$$

Ροπή χαλαρών χαλύβων

$$F_{s1} \cdot (d_{s1} - y_{2i}) = -0.112 \text{ MNm}$$

$$F_{s2} \cdot (d_{s2} - y_{2i}) = -0.002 \text{ MNm}$$

$$F_{s3} \cdot (d_{s3} - y_{2i}) = -0.011 \text{ MNm}$$

$$F_{s4} \cdot (d_{s4} - y_{2i}) = -0.093 \text{ MNm}$$

Οπότε το άθροισμα των ροπών είναι:

$$| \sum F_{si} \cdot (d_p - y_{2i}) | = 0.217 \text{ MNm}$$

Ροπή της δύναμης προέντασης

$$F_{p,u} \cdot (d_p - y_{2i}) = 1.852 \text{ MNm}$$

Τελική ροπή αντοχής

$$M_{R,d} = F_{c,u} \cdot (y_{2i} - \zeta' \cdot x) + | \sum F_{si} \cdot (d_p - y_{2i}) | + F_{p,u} \cdot (d_p - y_{2i}) = 3.141 \text{ MNm}$$

$$\text{Δηλαδή } M_{R,d} = 3141.36 \text{ KNm}$$

Τελικός έλεγχος

Για να ικανοποιείται ο έλεγχος θα πρέπει η ροπή αντοχής να είναι μεγαλύτερη από τη ροπή σχεδιασμού δηλαδή:

$$M_{R,d} = 3141.36 \text{ KNm} \geq M_{Ed,M} = 1985.84 \text{ KNm}$$

Το οποίο ισχύει άρα ικανοποιείται ο έλεγχος στην ΟΚΑ σε ορθή ένταση στη θέση Μ.

7.22 Έλεγχος Ο.Κ.Α σε διάτμηση στη στήριξη Α

7.22.1 Θέσεις ελέγχου

Οι λιγότερες κατά το δυνατό θέσεις στις οποίες απαιτείται έλεγχος στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) έναντι της διάτμησης είναι:

- Στην στήριξη Α που ο έλεγχος γίνεται σε απόσταση $d_{p,A}$ από την παρειά της στήριξης
- Στην στήριξη Β στην περίπτωση της αμφίπλευρης προέντασης ο έλεγχος είναι ίδιος με την θέση Α ωστόσο στην περίπτωση της μονόπλευρης στήριξης απαιτείται έλεγχος διάτμησης σε απόσταση $d_{p,B}$ από την παρειά της στήριξης

7.22.2 Υπολογισμός δρώσας τέμνουσας σχεδιασμού $V_{Ed,x}$

Θέση διατομής ελέγχου

Η διατομή ελέγχου βρίσκεται σε απόσταση $x = d_{p,A}$ από την παρειά της στήριξης, και όπως ορίζει ο κανονισμός δεν χρειάζεται έλεγχος από την παρειά μέχρι τη θέση αυτή. Στη στήριξη Α ο τένοντας αγκυρώνεται στο κέντρο βάρους της διατομής οπότε $x = d_{p,A} = y_2 = 0.455m$

Θέση τένοντα στη διατομή ελέγχου

Έχοντας $x = 0.455m$ όπου είναι η θέση ελέγχου για να υπολογισθεί με ακρίβεια η θέση και η κλίση του τένοντα θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση της παραβολής όπου για βέλος παραβολής έχουμε $f = 0.65$ και μήκος δοκού $l = 22m$

$y_x = 4f/l \cdot (x) - 4f/l^2 \cdot (x^2)$ εξίσωση της παραβολής με την κατάλληλη αντικατάσταση προκύπτει:

$$y_x = 0.12x - 0.0054x^2 \quad \text{εξίσωση της τροχιάς του τένοντα και για όπου } x = 0.455m$$

$$\text{προκύπτει: } y_x = 0.053m$$

$$d_p = x + y_x = 0.508m \quad \text{θέση του τένοντα στη διατομή ελέγχου}$$

και για να υπολογιστεί η κλίση της τροχιάς του τένοντα θα χρειαστεί η πρώτη παράγωγος της εξίσωσης της τροχιάς του τένοντα όπου είναι $y'_x = 0.12 - 0.0054x$

$$\text{και εφόσον ισχύει } \tan \alpha_x = y'_x, \text{ για όπου } x = 0.455m$$

$$\text{προκύπτει } \tan \alpha_x = 0.116 \quad \text{και}$$

$$\alpha_x = 0.1152 \text{ rad} \quad \text{κλίση της τροχιάς του τένοντα}$$

Τέμνουσες μόνιμων και μεταβλητών φορτίων

Στη στήριξη για:

$$g' = 15.43 \text{ KN/m} \quad \text{όπου είναι τα μόνιμα φορτία η τέμνουσα είναι } V_{g,A} = 154.3 \text{ KN}$$

$$q = 8 \text{ KN/m} \quad \text{όπου είναι τα κινητά φορτία η τέμνουσα είναι } V_{q,A} = 80 \text{ KN}$$

Στη θέση ελέγχου $x = 0.455m$ οι τέμνουσες είναι:

$$V_{g,x} = V_{g,A} - g \cdot x = 147.23 \text{ KN}$$

$$V_{q,x} = V_{q,A} - q \cdot x = 76.36 \text{ KN}$$

Τέμνουσα λόγω προέντασης

Μετά τις στιγμιαίες απώλειες στη θέση A η προένταση είναι $P'_A = 2356.98 \text{ KN}$

$\alpha_A - \alpha_x = 2.4E-003$ εκτροπή στη θέση x

$P_{o,x} = P'_A \cdot e^{\mu(\alpha+kx)} = 2361.09 \text{ KN}$ προένταση στη θέση $x=0.455 \text{ m}$ για $t=0$

(υπενθυμίζεται $\mu=0.25$ και $k=0.01$)

Οι χρόνιες απώλειες στην θέση A έχουν υπολογισθεί και είναι $\Delta\sigma_{p,c+s+r} = 51.81 \text{ MPa}$

Επομένως με μια σωστή προσέγγιση στη θέση x θα είναι:

$P_{t,x} = P_{o,x} - \Delta\sigma_{p,c+s+r} \cdot A_p = 2360.99 \text{ KN}$

$V_{pt,x} = P_{t,x} \cdot \eta_{μαx} = 271.44 \text{ KN}$ κατακόρυφη συνιστώσα της δύναμης προέντασης στη θέση x

Τέμνουσα σχεδιασμού $V_{Ed,x}$

Εφόσον ο έλεγχος έναντι τέμνουσας γίνεται στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας θα ληφθεί υπόψιν ο συνδυασμός δράσεων $1.35G + 1.50Q$. Κατά τον υπολογισμό της δρώσας τέμνουσας λαμβάνεται η ευνοϊκή επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας της δύναμης προέντασης στη θέση ελέγχου και άρα η δρώσα τέμνουσα $V_{Ed,x}$ προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$V_{Ed,x} = 1.35 \cdot V_{g,x} + 1.50 \cdot V_{q,x} - \gamma_{p,fav} \cdot V_{pt,x}$$

όπου ο συντελεστής $\gamma_{p,fav}$ λειτουργεί για την ευνοϊκή επιρροή της δύναμης προέντασης, για έλεγχο έναντι Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας όπως συνιστάται από τον EC2 -2.4.2.2(2) και η τιμή είναι $\gamma_{p,fav} = 1.00$ και άρα με αντικατάσταση προκύπτει

$$V_{Ed,x} = 1.35 \cdot V_{g,x} + 1.50 \cdot V_{q,x} - \gamma_{p,fav} \cdot V_{pt,x} = 41.86 \text{ KN} \text{ δρώσα τέμνουσα σχεδιασμού}$$

7.22.3 Υπολογισμός αντοχής σχεδιασμού $V_{Rd,c}$

Για προεντεταμένα στοιχεία ενός ανοίγματος σε μια περιοχή που λόγω κάμψης δεν έχει ρηγματωθεί και με δεδομένο ότι η περιοχή της στήριξης δεν έχει ροπές γίνεται ο υπολογισμός της αντοχής $V_{Rd,c}$ και για αυτή την περίπτωση η αντοχή λαμβάνεται με βάση EC2-6.2.2(2) από τη σχέση:

$$V_{Rd,c} = I \cdot b_w / S \cdot \sqrt{(f_{ctd}^2 + f_{ctd} \cdot \sigma_{cp})}, \text{ όπου:}$$

f_{ctd} :είναι η σχεδιαστική αντοχή του σκυροδέματος είναι ίση με $f_{ctk0.05} / \gamma_c$

για σκυρόδεμα C30 ισχύει $f_{ctk0.05} = 2.0 \text{ MPa}$ και άρα

$f_{ctd} = f_{ctk0.05}/\gamma_c = 1.333 \text{ MPa}$ σχεδιαστική αντοχή του σκυροδέματος

b_w : το πλάτος διατομής στο ύψος του κεντροβαρικού άξονα, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα υφιστάμενα περιβλήματα με τη χρήση του ονομαστικού πάχους κορμού $b_{w,nom}$ που ανάλογα με τις συνθήκες υπολογίζονται ως εξής:

Στον κορμό της διατομής υπάρχουν μεταλλικά περιβλήματα ενσωματωμένων τενόντων με $\Phi > b_w/8$ και η ονομαστική τιμή του πάχους κορμού $b_{w,nom}$ δίνεται από τη σχέση $b_{w,nom} = b_w - 0.5 \cdot \Sigma \Phi$ όπου Φ είναι η εξωτερική διάμετρος του κάθε περιβλήματος.

Αφού τοποθετηθεί σωλήνας προέντασης με $D_\sigma = 80 \text{ mm}$ και υπολογίσουμε ότι ισχύει $D = 80 \text{ mm} > b_w/8 = 3.75 \text{ mm}$ που ισχύει, επομένως από την αντικατάσταση προκύπτει $b_{w,nom} = b_w - 0.5 \cdot \Sigma \Phi = 26 \text{ cm}$ ονομαστικό πάχος κορμού

I : η ροπή αδρανείας $I_{ci,x}$ στη θέση $x = 0.455$ και αφού στην ΟΚΑ χρησιμοποιείται η ιδεατή διατομή και εφόσον έχουν βρεθεί ότι $I_{si} = 0.00027 \text{ m}^4$ και $I_p = 2.01 \cdot 10^{-6}$ τότε προκύπτει $I_{ci,x} = I_c + (a_s - 1) \cdot I_{si} + (a_p - 1) \cdot I_p = 0.0713 \text{ m}^4$

S : η ροπή αντίστασης της διατομής περί τον κεντροβαρικό άξονα και για να υπολογιστεί αφού

$$A_{ci} = A_c + (a_s - 1)A_s + (a_p - 1)A_p = 0.55 \text{ m}^2$$

$$S_{ci} = S_c + (a_s - 1) \cdot S_s + (a_p - 1) \cdot A_p \cdot x = 0.253 \text{ m}^3$$

$y_{1i} = h - y_{2i} = 0.74 \text{ m}$ κέντρο βάρους ιδεατής διατομής από κάτω παρειά

και η ροπή αντίστασης περί τον κεντροβαρικό της άξονα λαμβάνεται το κάτω αποκοπτόμενο τμήμα της ιδεατής διατομής στη στήριξη Α

$$S = b_w \cdot y_{1i} \cdot (y_{1i}/2) = 0.0826 \text{ m}^3 \text{ ροπή αντιστάσεως περί τον κεντροβαρικό άξονα}$$

σ_{cp} είναι η τάση που αντιπροσωπεύει την επιρροή της δύναμης της προέντασης P

$$\sigma_{cp} = P_{t,x}/A_{ci} = 4.262 \text{ MPa}$$

Επομένως η αντοχή σχεδιασμού $V_{Rd,c}$ που προκύπτει είναι ίση :

$$V_{Rd,c} = (I \cdot b_w/S) \cdot (f_{ctd}^2 + f_{ctd} \cdot \sigma_{cp}) = 645.24 \text{ KN}$$

7.23 Έλεγχος-οπλισμοί διάτμησης

Επειδή ισχύει ότι η δράσα τέμνουσα σχεδιασμού είναι μικρότερη από την τέμνουσα αντοχής σχεδιασμού $V_{Ed,x} = 41.86 \text{ KN} < V_{Rd,c} = 645.24 \text{ KN}$ στην περιοχή της στήριξης Α δεν απαιτείται σύμφωνα με τον EC2-6.2.1(3) να υπολογιστεί ο οπλισμός διάτμησης και σύμφωνα με τον EC2-6.2.1(4) πρέπει να τεθεί ο ελάχιστος οπλισμός

7.23.1 Ελάχιστος οπλισμός διάτμησης

Σύμφωνα με τον EC2-9.2.2(5) θα πρέπει σε κάθε περίπτωση και σε κάθε θέση ο υφιστάμενος οπλισμός διάτμησης ρ_w να είναι τουλάχιστον ίσος με τον ελάχιστο οπλισμό $\rho_{w,min}$ άρα θα πρέπει να ισχύει:

$$\rho_w \geq \rho_{w,min} = (0.08\sqrt{f_{ck}})/f_{yk}$$

Με δεδομένα $f_{ck}=30MPa$ και $f_{yk}=500 MPa$

$$\rho_{w,min}=(0.08\sqrt{(30)})/500=0.009 \text{ ή } 0.9\% \text{ ελάχιστος οπλισμός}$$

Για $\Phi 8 S500$ δίτητους συνδετήρες με

$$A_{sw}=2 \cdot \pi \cdot 0.8^2/4= 1.005 \text{ cm}^2$$

$$s=A_{sw}/\rho_{w,min} \cdot b_w= 38.24 \text{ cm ελάχιστη απόσταση μεταξύ οπλισμών}$$

7.23.2 Μέγιστη απόσταση μεταξύ οπλισμών διάτμησης

Σύμφωνα με τον EC2-9.2.2(6) η μέγιστη απόσταση μεταξύ των συνδετήρων δηλαδή των οπλισμών διάτμησης δίνεται από τη σχέση:

$$s_{l,max}=0.75d(1+cot(\alpha))$$

όπου $\alpha=90^\circ$ γωνία των συνδετήρων με τον διαμήκη άξονα

$d=d_p=0.455m$ η απόσταση του κύριου οπλισμού δηλαδή του τένοντα από την άνω παρειά

$$s_{l,max}=0.75d(1+cot(\alpha))= 34.14 \text{ cm}$$

7.23.3 Μέγιστη απόσταση μεταξύ των σκελών των συνδετήρων

Σύμφωνα με τον EC2-9.2.2(8) η μέγιστη εγκάρσια απόσταση μεταξύ των συνδετήρων δηλαδή των οπλισμών διάτμησης δίνεται από τη σχέση:

$$s_{t,max}=0.75d=34.125 \text{ cm} \leq 600 \text{ mm}$$

η συνθήκη ικανοποιείται διότι τα δύο σκέλη του συνδετήρα απέχουν μεταξύ τους περίπου $25 \text{ cm} < 34.14 \text{ cm}$.

Τελικά οι ελάχιστοι συνδετήρες είναι χωρίς απαιτήσεις αντισεισμικότητας $\Phi 8/35$ δίτητοι συνδετήρες.

7.24 Σχεδιασμός περιοχής αγκύρωσης της διατομής

Σε μια προεντεταμένη δοκό όπως το παράδειγμα η αγκύρωση γίνεται στο κέντρο βάρους των ακραίων διατομών γνωρίζουμε ότι η δοκός που είναι μορφής T έχει

κεντροβαρική αγκύρωση και με την παραδοχή ότι κατά την εφαρμογή γίνεται πλήρης εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του χάλυβα προέντασης και υπερτάνυση θα τοποθετηθεί μια πλάκα αγκύρωσης με ορθογωνική διατομή και το κέντρο βάρους της θα συμπίπτει με αυτό της πλήρους διατομής. Στο παράδειγμα η πλάκα αγκύρωσης θα έχει διαστάσεις 20/25cm.

$$A_{c0}=0.20\cdot 0.25=0.05\text{ m}^2 \text{ εμβαδόν διατομής πλάκας αγκύρωσης}$$

Ομοιόθετο σχήμα

Το ομοιόθετο σχήμα θα είναι ορθογωνικό με το ίδιο κέντρο βάρους με εκείνο της πλάκας αγκύρωσης και εγγράφεται στη περίμετρο της διατομής και θα έχει διαστάσεις 30/37.5

$$A_{c1}=0.30\cdot 0.375=0.1125\text{ m}^2 \text{ εμβαδόν διατομής ομοιόθετου σχήματος}$$

Μέγιστη δύναμη τένοντα με υπερτάνυση

Εφόσον κατά τον σχεδιασμό της περιοχής της αγκύρωσης προβλέπεται να γίνει πλήρης εκμετάλλευση της αντοχής του χάλυβα και υπερτάνυση οπότε επιτρέπεται να αυξηθεί η μέγιστη τιμή του τένοντα να αυξηθεί έως την παρακάτω μέγιστη τιμή:

$$P_{max} = \gamma_{p,unf} \cdot k_3 \cdot f_{p0.1} \cdot A_p$$

Όπου σύμφωνα με τον EC2-5.10.2.1(2) οι προτεινόμενες τιμές για το σχεδιασμό της περιοχής αγκύρωσης είναι: $\gamma_{p,unf} = 1.2$ και $k_3 = 0.95$

Και γνωρίζουμε ότι S1770/1860 και $A_p = 1881\text{ mm}^2$ οπότε:

$$P_{max} = \gamma_{p,unf} \cdot k_3 \cdot f_{p0.1} \cdot A_p = 0.3795\text{ MN} \text{ μέγιστη τιμή δύναμης που μπορεί να αναπτυχθεί αφού γίνει δεκτή η πλήρης εκμετάλλευση του υλικού.}$$

Αντίσταση F_{Rdu}

Η αντίσταση F_{Rdu} με τη θεώρηση ομοιόμορφης κατανομής θλιπτικών τάσεων με εμβαδό ίσο με αυτό του ομοιόθετου εγγεγραμμένου σχήματος δίνεται από τον τύπο:

$$F_{Rdu} = A_{c0} \cdot f_{cd} \cdot \sqrt{A_{c1}/A_{c0}} = 2.25\text{ MN}$$

η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνει τη τιμή $F_{Rdu} \leq 3.0 \cdot f_{cd} \cdot A_{c0} = 3.0\text{ MN}$

Επομένως ισχύει η ανισότητα $F_{Rdu} = 2.25\text{ MN} < 3.0\text{ MN}$

Έλεγχος της θλιπτικής δύναμης

Πρέπει να ισχύει $F_{Rdu} \geq P_{max}$, το οποίο ισχύει αφού οι δύο δυνάμεις έχουν υπολογισθεί
 $F_{Rdu} = 2.25 \text{ MN} \geq P_{max} = 0.3795 \text{ MN}$ άρα ικανοποιείται ο έλεγχος.

Έλεγχος θλιπτήρων

Εφόσον περιλαμβάνεται ο έλεγχος των θλιπτικών τάσεων στους θλιπτήρες οι αναπτυσσόμενες θλιπτικές τάσεις θα είναι:

$$\sigma_{Ed} = 0.6 \cdot P_{max} / 0.2 \cdot 0.25 \cdot \cos 33.69^\circ = 0.2277 \text{ MN} / 0.0416 = 5.47 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Rd,max} = 0.6 \cdot \nu' \cdot f_{cd} = 10.56 \text{ MPa} \text{ μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή των θλιπτικών τάσεων}$$

Όπου η τιμή $\nu' = 1 - f_{ck} / 250 = 0.88$ και οι κλίσεις των θλιπτήρων ακολουθούν τη γωνία $\beta = 33.69^\circ$ η οποία συνιστάται από τον EC2 για την τροχιά των θλιπτικών τάσεων

$$\text{Και εφόσον ισχύει ότι } \sigma_{Rd,max} = 10.56 \text{ MPa} \geq \sigma_{Ed} = 5.47 \text{ MPa}$$

Επομένως ο έλεγχος ικανοποιείται.

Έλεγχος ελκυστήρων - υπολογισμός συνδετήρων

Οι απαιτούμενοι συνδετήρες θα προκύψουν από τον έλεγχο των ελκυστήρων. Οι συνδετήρες θα τοποθετηθούν τοπικά στο σκυρόδεμα πίσω από την πλάκα και σε βάθος ίσο με την απόσταση που απαιτείται ώστε οι τάσεις να γίνουν ομοιόμορφες, δηλαδή μέχρι τη θέση του μέγιστου ομοιόθετου σχήματος.

$$l_a \cdot \varepsilon_{\varphi 33.69} = d_l / 2 = d_l / (2 \cdot \varepsilon_{\varphi 33.69}) = 37.5 \text{ cm} / (2 \cdot 0.6666)$$

$$l_a = 28.1 \text{ cm} \text{ απόσταση που απαιτείται ώστε οι τάσεις να γίνουν ομοιόμορφες}$$

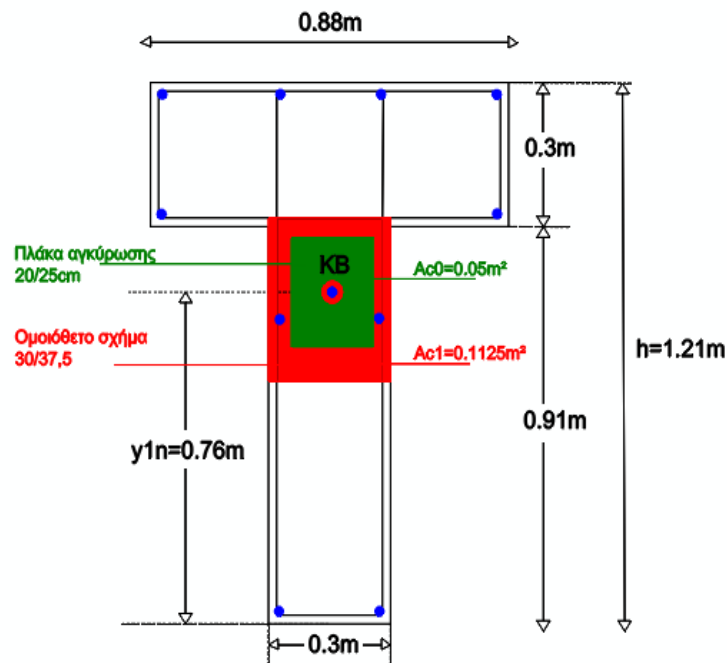
$P = 0.33 \cdot P_{max} = 0.1252 \text{ MN}$ εφελκυστική δύναμη που αναπτύσσεται στον ελκυστήρα η συγκεκριμένη δύναμη θα πρέπει να παραληφθεί από τους τοπικούς συνδετήρες.

Έτσι θα τοποθετηθούν συνδετήρες S500 με διάμετρο 10mm. Το εμβαδό για τον έναν συνδετήρα είναι 0.7854 cm^2 και η αντίστοιχη δύναμη που μπορεί να αναλάβει είναι $0.7854 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot f_{yd} = 0.03415$

Οι απαιτούμενοι συνδετήρες θα δοθούν από την παρακάτω σχέση

$$0.33 P_{max} / 0.7854 \cdot 10^{-4} \cdot f_{yd} = 3.67$$

Άρα χρειάζονται 4 σίδερα με διάμετρο 10mm και με δεδομένο ότι οι συνδετήρες έχουν δύο σκέλη ανά διεύθυνση θα χρειαστούν δύο συνδετήρες. Επομένως θα τοποθετηθούν 2 συνδετήρες Φ10 σε διάστημα 28cm πίσω από την πλάκα αγκύρωσης.



Διάγραμμα 8: Αγκύρωση τένοντα στη στήριξη Α. Η αγκύρωση είναι κεντροβαρική, η πλάκα αγκύρωσης που χρησιμοποιείται είναι 20/25cm και το ομοιόθετο σχήμα έχει διαστάσεις 30/37.5cm (Πηγή Autocad).

Κεφάλαιο 8 – Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας διαπιστώνουμε ότι το προεντεταμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται κυρίως στις κατασκευές, στην ουσία το προεντεταμένο σκυρόδεμα λόγω των ιδιοτήτων του, μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να οδηγήσει σε μια πιο βελτιωμένη δομική ικανότητα ή δυνατότητα συντήρησης σε σύγκριση με το συμβατικό οπλισμένο σκυρόδεμα.

Μέσα από την ανάλυση και την μελέτη συμπεριφοράς της δοκού προέντασης που μελετήθηκε στο χέρι κάτω από τα φορτία του ιδίου βάρους της, αυτά που θέσαμε και την δύναμη προέντασης παρατηρήθηκαν θλιπτικές τάσεις στις διατομές των δοκών. Αυτό αποτελεί από τα κύρια πλεονεκτήματα της προέντασης, αφού μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε την υψηλότερη αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη.

Μελετώντας τα στάδια ελέγχου της δοκού στο παράδειγμα που εξετάσαμε τα συμπεράσματα που διακρίνονται είναι τα εξής:

Πρώτα απ' όλα στο επίπεδο του προελέγχου ή προμελέτης δηλαδή σε χρόνο $t=0$ χρησιμοποιούνται τα χαρακτηριστικά της καθαρής διατομής (διατομή *netto*) ενώ στην οριστική μελέτη σε χρόνο $t=\infty$ τα χαρακτηριστικά της ιδεατής διατομής. Έπειτα παρατηρούμε ότι οι χρόνιες απώλειες μεταβάλλονται από θέση σε θέση κατά μήκος του τένοντα, άρα ο υπολογισμός της δύναμης προέντασης κατά μήκος της δοκού για χρόνο $t=\infty$ προϋπόθετει τον υπολογισμό των χρόνιων απωλειών σε πολλές θέσεις κατά μήκος του τένοντα και σε όλες τις θέσεις που κρίθηκαν κρίσιμες. Ακόμη στον έλεγχο Ο.Κ.Α έναντι ρηγματώσεως στη μέση της δοκού το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι και σε χρόνο $t=0$ πρέπει να γίνει έλεγχος στην άνω παρειά για να μην αναπτυχθεί εφελκυσμός ενώ σε χρόνο $t=\infty$ γίνεται έλεγχος στην κάτω παρειά, επισημαίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις γίνεται και έλεγχος ταυτόχρονα στην κάτω και στην άνω παρειά αντίστοιχα ώστε να μην αναπτυχθούν θλιπτικές τάσεις με τιμές μεγαλύτερες από αυτές που επιτρέπει ο κανονισμός EC2. Στον έλεγχο Ο.Κ.Α σε ορθή ένταση στη θέση Μ το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι από την αρχή πρέπει να γίνει αποδεκτό ότι σε όλες τις περιπτώσεις κρίσιμο υλικό πρέπει να είναι το σκυρόδεμα για αυτό και γίνεται αποδεκτή η παραδοχή 2. Τέλος στον έλεγχο Ο.Κ.Α σε διάτμηση στη στήριξη Α το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι πρέπει να γίνουν όλοι οι απαραίτητοι έλεγχοι ώστε να τεθούν οι κατάλληλοι οπλισμοί σύμφωνα με των EC2, βασική παρατήρηση είναι ότι όπου δεν απαιτείται οπλισμός διάτμησης πρέπει να τίθεται ο ελάχιστος οπλισμός, δηλαδή σε κάθε περίπτωση και σε κάθε θέση ο

υφιστάμενος οπλισμός διάτμησης να είναι τουλάχιστον ίσος με τον ελάχιστο οπλισμό.

Κεφάλαιο 9 – Βιβλιογραφία

- Abdel-Jaber, H., & Glisic, B. (2019). Monitoring of prestressing forces in prestressed concrete structures—An overview. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(8). <https://doi.org/10.1002/stc.2374>
- Abraham, M., Park, S., & Stubbs, N. (1995). Loss of prestress prediction based on nondestructive damage location algorithms. *Smart Structures and Materials 1995: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, Vol. 2446*. San Diego, CA: SPIE: The International Society for Optics and Photonics.
- Beganović, M. (2006). Teorija i tehnologija betona. *Grafičar Bihać*.
- Casas, J. R. (1994). A Combined Method for Measuring Cable Forces: The Cable-Stayed Alamillo Bridge, Spain. *Structural Engineering International*, 4(4), 235–240. <https://doi.org/10.2749/101686694780601700>
- Cornwell, P., Farrar, C. R., Doebling, S. W., & Sohn, H. (1999). ENVIRONMENTAL VARIABILITY OF MODAL PROPERTIES. *Experimental Techniques*, 23(6), 45–48. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.1999.tb01320.x>
- Grace, N. F., & Ross, B. (1996). Dynamic Characteristics of Post-Tensioned Girders with Web Openings. *Journal of Structural Engineering*, 122(6), 643–650. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:6\(643\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:6(643))
- Hamed, E., & Frostig, Y. (2004). Free vibrations of cracked prestressed concrete beams. *Engineering Structures*, 26(11), 1611–1621. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.06.004>
- Hamed, E., & Frostig, Y. (2006). Natural frequencies of bonded and unbonded prestressed beams—prestress force effects. *Journal of Sound and Vibration*, 295(1–2), 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.11.032>
- Hannant, D., & Rama Sreekanth, P. (2018). *Comprehensive Composite Materials II*.
- Hop, T. (1991). The effect of degree of prestressing and age of concrete beams on frequency and damping of their free vibration. *Materials and Structures*, 24(3), 210–220. <https://doi.org/10.1007/BF02472987>
- Huynh, T.-C., Park, Y.-H., Park, J.-H., Hong, D.-S., & Kim, J.-T. (2015). Effect of Temperature Variation on Vibration Monitoring of Prestressed Concrete Girders. *Shock and Vibration*, 2015, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2015/741618>

- Izzet, A. F., & Abdulhameed, A. A. (2017). *Prestressed Concrete: A Fundamental Approach, ACI 318-11 Code Philosophy & Stresses Limitations*.
- JAYASEELAN, H. (2007). *PRESTRESS LOSSES AND THE ESTIMATION OF LONG-TERM DEFLECTIONS AND CAMBER FOR PRESTRESSED CONCRETE BRIDGES*.
- Joint ACI-ASCE Committee. (2016). *Joint ACI-ASCE Committee 423. Guide to estimating prestress loss, Farmington Hills, MI, American Concrete Institute*.
- JSCE Standard. (2020). *PRESTRESSED CONCRETE*.
- Jure, R. (2006). *Betonske konstrukcije-priručnik, Građevinski fakultet Zagreb,*.
- Kahn, L., & Lopez, M. (2005). Prestress losses in high performance lightweight bridge girders. *PCI J*, 50(5), 84–94.
- Kim, J.-T., Park, J.-H., Hong, D.-S., & Park, W.-S. (2010). Hybrid health monitoring of prestressed concrete girder bridges by sequential vibration-impedance approaches. *Engineering Structures*, 32(1), 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.08.021>
- Noble, D, Nogal, M., O'Connor, A. J., & Pakrashi, V. (2015). The effect of post-tensioning force magnitude and eccentricity on the natural bending frequency of cracked post-tensioned concrete beams. *Journal of Physics: Conference Series*, 628, 012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/628/1/012047>
- Noble, Darragh, Nogal, M., O'Connor, A., & Pakrashi, V. (2015). Dynamic impact testing on post-tensioned steel rectangular hollow sections; An investigation into the “compression-softening” effect. *Journal of Sound and Vibration*, 355, 246–263. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.06.021>
- Noble, Darragh, Nogal, M., O'Connor, A., & Pakrashi, V. (2016). The effect of prestress force magnitude and eccentricity on the natural bending frequencies of uncracked prestressed concrete beams. *Journal of Sound and Vibration*, 365, 22–44. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.11.047>
- Precast beams*. (n.d.). Retrieved May 6, 2013, from <http://www.assakkaf.com/courses/ence454/lectures/chapter14a.pdf>
- Prednapeti beton-predavanja*. (n.d.). Retrieved April 29, 2013, from <http://www.grad.hr/gukov/pdf/prednapeti-beton.pdf>
- Pretensioned concrete*. (n.d.). Retrieved February 13, 2022, from <https://www.tjgtqc.com/news/the-difference-between-pretensioning-and-post-tensioning>

- Roeck, G. De. (2003). The state-of-the-art of damage detection by vibration monitoring: the SIMCES experience. *Journal of Structural Control*, 10(2), 127–134. <https://doi.org/10.1002/stc.20>
- Saiidi, M., Douglas, B., & Feng, S. (1994). Prestress Force Effect on Vibration Frequency of Concrete Bridges. *Journal of Structural Engineering*, 120(7), 2233–2241. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1994\)120:7\(2233\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:7(2233))
- Tomčić, I. (1995). *Betonske konstrukcije - Društvo hrvatskih građevinskih konstruktora Zagreb*.
- Καραγιάννης, Χ. (2015). *Σχεδιασμός κατασκευών από προεντεταμένο σκυρόδεμα*. ΣΟΦΙΑ. www.esofia.net