

ΑΡΧΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΩΝ ΦΟΡΕΩΝ

1. ΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΩΝ ΣΥΝΗΘΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το σκυρόδεμα ως φυσικός λίθος χαρακτηρίζεται από ικανή θλιπτική αντοχή αλλά πολύ **μικρή εφελκυστική αντοχή** (της τάξεως του 1/12 της θλιπτικής αντοχής).

Για την εφαρμογή του σε καμπτόμενους φορείς οπλίζεται με χάλυβα (υλικό με μεγάλη εφελκυστική αντοχή), ο οποίος ενσωματώνεται στις εφελκυσόμενες περιοχές των φορέων με τη μορφή ράβδων.

Με την προοδευτική αύξηση της έκτασης των κτισμάτων και την απαίτηση μεγαλύτερων ελεύθερων χώρων (κινηματοθέατρα, κ.λ.π.) το άνοιγμα των οριζόντιων καμπτόμενων φορέων αυξάνει και η καμπτική επιπόνησή τους (ανάλογη του τετραγώνου του ανοίγματός τους) αυξάνει σημαντικά.

Οι αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις αποκτούν μεγάλο μέγεθος και η λύση του οπλισμένου σκυροδέματος αποδεικνύεται ανεπαρκής.

Παράδειγμα:

Συγκρίνοντας μια αμφιέριστη δοκό Δ1 ανοίγματος $l = 25.0$ m και μια αμφιέριστη δοκό Δ2 ανοίγματος $l = 5.0$ m, προκύπτει ότι η Δ1 επιπονεύεται με $(25.0/5.0)^2 = 25$ φορές μεγαλύτερη ροπή M_s ($M_s = q \cdot l^2 / 8$) από ό,τι η Δ2 (θεωρώντας ίδια φορτία και για τις δύο δοκούς).

Για να μπορέσει η δοκός Δ1 να αντέξει την 25πλάσια επιπόνησή της απαιτείται 25πλάσιο ύψος (θεωρώντας προσεγγιστικά τη ροπή αστοχίας ανάλογη του ύψους h της δοκού, όπως προκύπτει από την ανίσωση ασφαλείας:

$$M_{sd} \leq M_{rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z = A_s \cdot f_{yd} \cdot 0.9h.$$

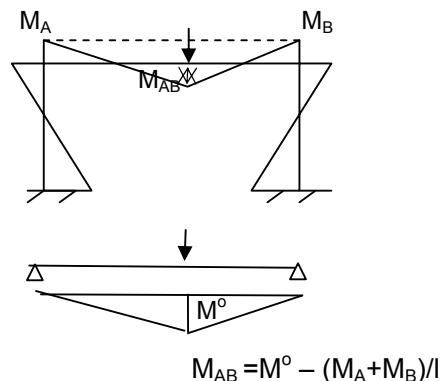
Δηλαδή το απαιτούμενο ύψος είναι της τάξεως των 15 m (θεωρώντας ύψος της δοκού Δ2 ίσο

με 60 cm είναι $h = 0.60 \times 25 = 15$ m).

Αν δε ληφθεί υπόψη και ο 25πλάσιασμός του ίδιου βάρους της Δ1, λόγω του 25πλάσιου ύψους της γίνεται φανερό ότι ακόμη και η λύση των 15 m ύψους δεν είναι επαρκής και ότι:

❖ Από μια τιμή του ανοίγματος και πέραν φορείς από οπλισμένο σκυρόδεμα δεν μπορούν να αντέξουν ούτε το ίδιο βάρος τους.

Για αμφιέριστες δοκούς με συνήθη φορτία (κτιριακά έργα) η μέγιστη τιμή του ανοίγματος για την οποία είναι επαρκής η λύση του οπλισμένου σκυροδέματος εκτιμάται περίπου 8-9 m.



Σχ. 1.1 Διάγραμμα ροπών πλαισίου

Η λύση αυτή μπορεί να επεκταθεί και σε δοκούς ανοίγματος μέχρι 15 -18 m (για κτιριακά έργα), αν οι δοκοί σχεδιαστούν και οπλιστούν ως ζυγώματα πλαισίων και ως εκ τούτου, όπως φαίνεται στο Σχ. 1, μειωθεί η ροπή τους στο άνοιγμα λόγω της ανάπτυξης αρνητικών ροπών στα άκρα τους.

2. Η ΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΟΙ ΤΡΕΙΣ ΟΠΤΙΚΕΣ

2.1 Η Προένταση ως Εισαγωγή Κεντρικής ή Εκκεντρής Θλιπτικής Δύναμης

Για να αρθεί η αδυναμία της μικρής εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος και να μπορεί το σκυρόδεμα να χρησιμοποιηθεί και για καμπτόμενους φορείς μεγάλου ανοίγματος αναζητείται τρόπος ώστε:

- Ο φορέας, όταν ασκούνται τα φορτία λειτουργίας, να θλίβεται καθ' όλο το ύψος της διατομής του (μετακίνηση του ουδέτερου άξονα εκτός της διατομής).

Για να επιτευχθεί αυτό:

- Απαιτείται συνύπαρξη καμπτικής και αξονικής θλιπτικής επιπόνησης ώστε η συνολική επιπόνηση να ισοδυναμεί με μια έκκεντρη θλιπτική δύναμη μέσα στον πυρήνα της διατομής

❖ Η τεχνική της προέντασης συνίσταται στην εισαγωγή αυτής της πρόσθετης αξονικής θλιπτικής επιπόνησης.

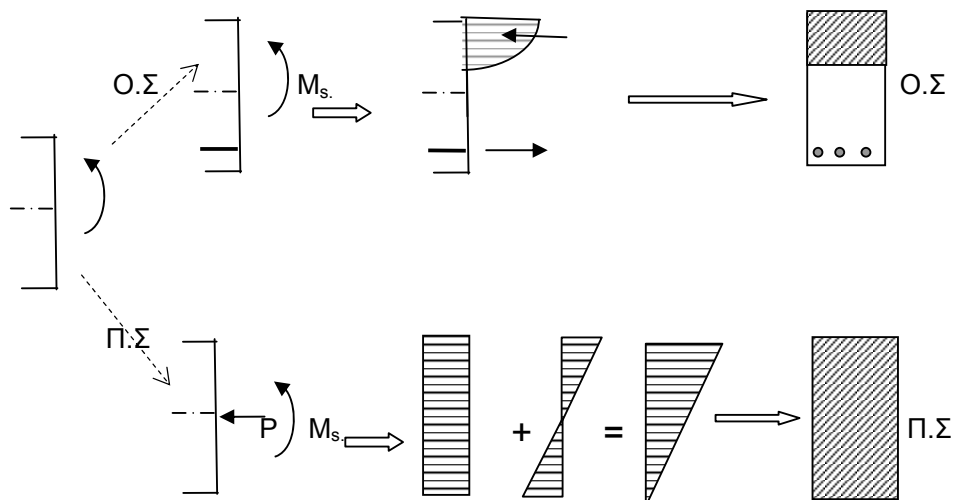
Η πρόσθετη θλιπτική δύναμη συμβολίζεται με το **P** (prestress) και ονομάζεται **δύναμη**

προέντασης, γιατί επιβάλλεται πριν ενταθεί ο φορέας από τα φορτία λειτουργίας.

Γραφική απεικόνιση της λύσης του οπλισμένου και του προεντεταμένου σκυροδέματος δίνεται στο Σχ. 1.

- Ο φορέας από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ρηγματωμένος.
Στην κρίσιμη περιοχή αποτελείται από σκυρόδεμα σε βάθος x και χάλυβα σε απόσταση d από την ακραία θλιβόμενη ίνα.
- Ο φορέας από προεντεταμένο σκυρόδεμα παραμένει αρηγμάτωτος για τα φορτία λειτουργίας. αποτελείται από σκυρόδεμα καθ' όλο το ύψος της διατομής του.

Κατά την πρώτη εφαρμογή του προεντεταμένου σκυροδέματος υιοθετήθηκε η εισαγωγή κεντρικής θλιπτικής επιπόνησης (κατά τον κεντροβαρικό άξονα του φορέα), όπως φαίνεται στο Σχ. 2(α).



Σχ. 2.1 Σύγκριση φορέα από οπλισμένο και προεντεταμένο σκυρόδεμα

Κατά την πρώτη εφαρμογή του προεντεταμένου σκυροδέματος υιοθετήθηκε η εισαγωγή κεντρικής θλιπτικής επιπόνησης (κατά τον κεντροβαρικό άξονα του φορέα), όπως φαίνεται στο Σχ. 2(α).

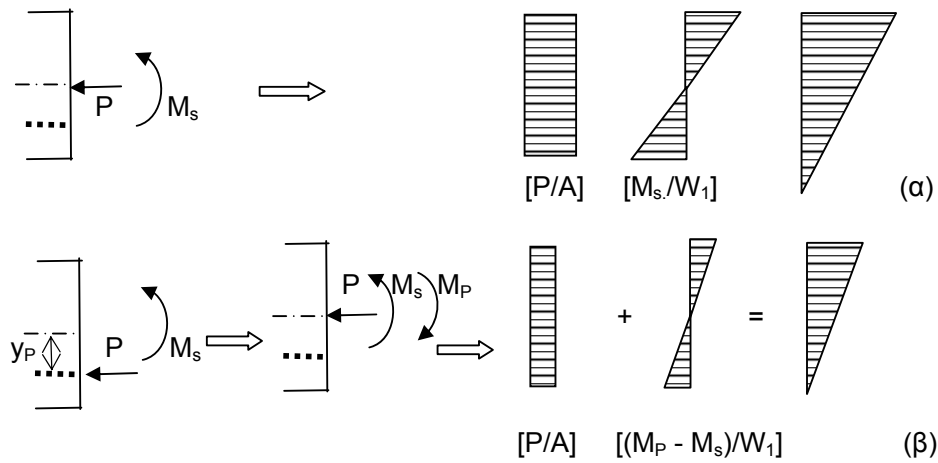
Η μέθοδος βελτιώθηκε με εισαγωγή έκκεντρης θλιπτικής δύναμης με εκκεντρότητα y_p προς την εφελκυσμένη πλευρά του φορέα, την ίνα 1, όπως φαίνεται στο Σχ. 2(β).

Με τον τρόπο αυτό αναιρείται ένα μέρος της καμπτικής επιπόνησης, γιατί εκτός από την

κεντρική θλιπτική επιπόνηση εισάγεται και μια αντίροπη καμπτική επιπόνηση.

Μειώνεται η συνολική καμπτική επιπόνηση του φορέα, αναπτύσσονται μικρότερες εφελκυστικές τάσεις και μειώνεται η απαιτούμενη δύναμη προέντασης P .

Η **αντιροπή** αυτή συμβολίζεται ως M_p σε αντίδιαστολή με την ροπή M_s που προκύπτει από τα φορτία της κατασκευής. Για ισοστατικούς φορείς η M_p είναι ίση με $P \cdot y_p$ (βλ. Κεφ. 6.1).



Σχ. 2.2 (α) Κεντρική Προένταση και (β) έκκεντρη προένταση

2.2 Η Προένταση ως Παραλαγή της Υποσύλωσης των Φορέων κατά την Κατασκευή τους- Εισαγωγή Αντιφορτίων

Κατά την κατασκευή ο φορέας από οπλισμένο σκυρόδεμα έως ότου το σκυρόδεμα αποκτήσει ικανή αντοχή και ενεργοποιηθεί (μεσω των τάσεων συνάφειας) ο οπλισμός, έχει μηδενική φέρουσα ικανότητα.

Με την υποσύλωσή του επιτυγχάνεται, όπως φαίνεται στο Σχ. 3(α), η εισαγωγή αντιφορτίων και η πλήρης αναίρεση της καμπτικής του επιπόνησης (λόγω του βάρους του).

Η τεχνική της προέντασης μπορεί να ειπωθεί ως παραλλαγή της τεχνικής αυτής της υποσύλωσης των φορέων κατά την κατασκευή τους.

Στο Σχ. 3(β) φαίνεται παραλλαγή της μεθόδου αυτής ώστε να αφήνεται ελεύθερος ο χώρος κάτω από το φορέα. Τα ικριώματα-στηρίγματα αντί να στηρίζονται στο έδαφος, στηρίζονται σε

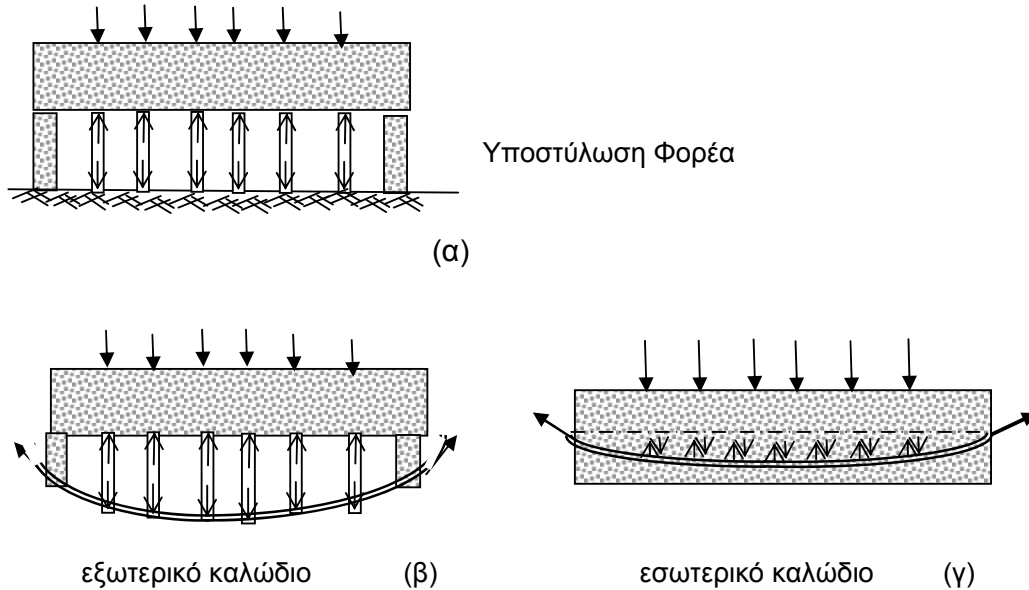
καλώδιο κάτω από το φορέα το οποίο εφελκύεται. Λόγω τις εφελκυστικής επιπόνησής του, το καλώδιο τείνει να ευθυγραμμιστεί. Η ευθυγράμμιση του παρεμποδίζεται από τα στηρίγματα τα οποία ασκούν σ' αυτό κατακόρυφες δυνάμεις. Ίσες και αντίθετες δυνάμεις ασκεί και το καλώδιο στα στηρίγματα και μέσω αυτών στο φορέα του σκυροδέματος.

Η λύση αυτή αποτελεί την αρχή της μεθόδου της **εξωτερικής προέντασης**. Ο τένοντας (το καλώδιο) είναι εξωτερικά του φορέα, αλλάζει την αισθητική του φορέα και απαιτεί ιδιαίτερη μέριμνα για την προστασία του (από διάβρωση, κ.π.λ).

Στο Σχ. 3(γ) το καλώδιο ενσωματώνεται μέσα στον φορέα. Στις θέσεις απόκλισης του καλώδιου από την ευθυγραμμία ασκούνται από το

σκληρυμένο σκυρόδεμα στο καλώδιο οι δυνάμεις **άντυγας**. Ίσες και αντίθετες δυνάμεις, τα **αντιφορτία**, ασκούνται από το καλώδιο στο σκυρόδεμα.

Η μέθοδος αυτή αποτελεί τη σύγχρονη μέθοδο **προέντασης**. Η λύση της εξωτερικής προέντασης περιορίζεται σε περιπτώσεις επισκευής ή ενίσχυσης προεντεταμένων φορέων.



Σχ. 2. 3 Η προένταση ως παραλλαγή της υποσύλωσης των φορέων κατά την κατασκευή τους

2.3 Η Προένταση ως Τρόπος Βελτίωσης του Οπλισμένου Σκυροδέματος

Η λύση της προέντασης μπορεί, επίσης, να ειδωθεί ως:

- ❖ τρόπος αύξησης της καμπτικής ικανότητας των φορέων **μέσω αύξησης του μεγέθους των εσωτερικών δυνάμεων**.

Στην εφελκυστική δύναμη του χάλυβα που αναπτύσσεται λόγω της ρηγμάτωσης του φορέα προστίθεται και η προεπιβαλλόμενη δύναμη λόγω της προέντασής του.

Για την ισοδυναμία των αξονικών αυξάνεται και η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος.

Προυπόθεση είναι:

- ❖ η **υψηλή ποιότητα σκυροδέματος και χάλυβα** ώστε να μπορούν να αναλάβουν τις αυξημένες αυτές δυνάμεις και
- ❖ η εξωτερική αγκύρωση των ράβδων μέσω των πλακών αγκύρωσης (λόγω της μεγάλης δύναμης των ράβδων απαιτείται μεγάλο μήκος αγκύρωσης).

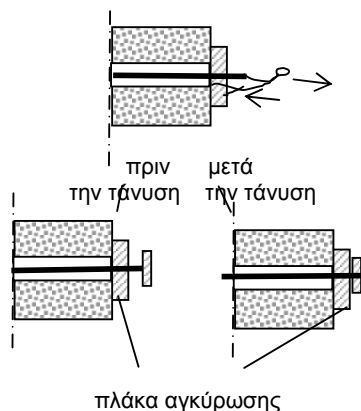
Μεγαλύτερη ανάλυση της οπτικής αυτής δίνεται στην Ενότητα Β.

3. Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή Δύναμης Προέντασης

Η εισαγωγή της δύναμης προέντασης επιτυγχάνεται με τάνυση (εφελκυσμό) καλωδίων ενσωματωμένων μέσα στο φορέα.

Τα καλώδια τοποθετούνται στον ξυλότυπο πριν τη σκυροδέτηση. Καταλήγουν σε χαλύβδινες πλάκες τοποθετημένες στις ακραίες διατομές του φορέα, όπως φαίνεται στο Σχ. 1. Κρατούνται στη θέση τους μέσω ειδικών στηριγμάτων τοποθετημένων ανά 1.0 m περίπου, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.



Σχ. 2. 1 Αγκύρωση και διαδικασία αγκύρωσης

Η τάνυση των καλωδίων γίνεται μέσω γρύλων μετά την ανάπτυξη ικανής θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος (συνήθως σε ένα μήνα).

Οι γρύλοι εδράζονται στις χαλύβδινες πλάκες στις οποίες ασκούν δύναμη ίση και αντίθετη με τη δύναμη τάνυσης. Η δύναμη αυτή είναι η θλιπτική δύναμη προέντασης του φορέα του σκυροδέματος.

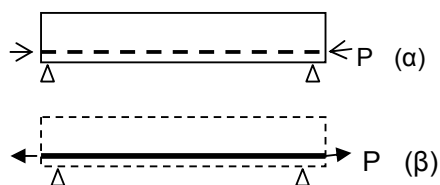
Παραμένει και μετά την απομάκρυνση των γρύλων μέσω **αγκύρωσης** των καλωδίων στις χαλύβδινες πλάκες.

Κατ'αυτόν τον τρόπο στη θέση τάνυσης επιβάλλεται, όπως φαίνεται στο Σχ. 2:

- μια εφελκυστική δύναμη P στον τένοντα και
- μια θλιπτική δύναμη P στο φορέα του σκυροδέματος,

Τα καλώδια αποτελούνται από ολόσωμες χαλύβδινες ράβδους ή από συρματοσχοίνα με διάφορες διατάξεις. Για να είναι δυνατή η τάνυση ο ράβδοι περιβάλλονται από σωλήνα

(από σχετικά εύκαμπτο υλικό) ώστε να παρεμποδιστεί η συνάφειά τους με το σκυρόδεμα. Τα καλώδια αυτά ονομάζονται **τένοντες** ή **καλώδια** και οι χαλύβδινες πλάκες στα άκρα τους **πλάκες αγκύρωσης**.

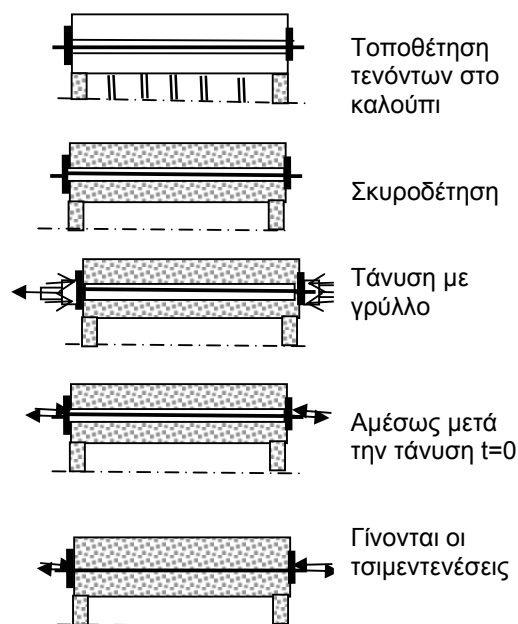


Σχ. 2.2 (α) θλιπτική P στο σκυρόδεμα και (β) εφελκυστική P στο τένοντα

❖ Μετά την τάνυση, το κενό μεταξύ χάλυβα και σωλήνα γεμίζεται με **τσιμεντένεμα** (μίγμα νερού, τσιμέντου και διογκωτικού πρόσθετου διοχετευόμενο υπό πίεση) ώστε να αποκατασταθεί η συνάφεια με το σκυρόδεμα.

3.2 Διαδοχικά Βήματα Υλοποίησης

Στο Σχ. 2 φαίνονται τα διαδοχικά βήματα για την υλοποίηση της προέντασης:



Σχ. 3.2 Διαδοχικά βήματα υλοποίησης της προέντασης

3.3 Τύποι Προέντασης

Διακρίνονται οι παρακάτω τύποι προέντασης:

- **Αμφίπλευρη** προένταση, όταν η τάνυση των τενόντων γίνεται και από τα δύο άκρα του φορέα.
- **Μονόπλευρη** προένταση, όταν η τάνυση γίνεται μόνον από το ένα άκρο, τη θέση **ενεργούς αγκύρωσης**, όταν δεν είναι δυνατή η πρόσβαση στο άλλο άκρο, τη θέση **τυφλής αγκύρωσης**.

3.4 Σύστημα Προέντασης και Σήμανση των Τενόντων

Τα γεωμετρικά και τεχνολογικά χαρακτηριστικά των τενόντων και οι πλάκες και το είδος της αγκύρωσής τους καθορίζονται από το **σύστημα προέντασης** το οποίο διαφέρει ανάλογα με την εταιρεία παραγωγής τους.

❖ Οι τένοντες σημαίνονται με το σύμβολο ζ ακολουθούμενο από τον τύπο των καλωδίων και το σύστημα προέντασης π.χ:

2 ζ M Marodi => 4 καλώδια τύπου M του συστήματος Marodi (υποθετικό σύστημα).

❖ Η διαδρομή των τενόντων κατά μήκος του φορέα χαρακτηρίζεται ως η **χάραξη των τενόντων**.

3.5 Μέτρα Ασφαλείας

Κατά την τάνυση των τενόντων απαιτούνται αυστηρά μέτρα ασφαλείας για:

❖ το ενδεχόμενο να εκτιναχθούν οι πλάκες (ακριβέστερα οι κώνοι) αγκύρωσης από κακό χειρισμό, είτε αστοχία του συστήματος και των γρύλων προέντασης.

Ο χώρος στον οποίο εκτελείται η προένταση πρέπει να εκκενωθεί σε μεγάλη απόσταση και υπό γωνία, τουλάχιστον 45° .

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν φωτογραφίες εργαζομένων στους οποίους έχει σφηνώσει στην κοιλιακή χώρα κώνος αγκύρωσης που εκτινάχθηκε κατά την τάνυση.

4. ΤΥΠΟΙ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ

Ανάλογα με τη μορφή της χάραξης των τενόντων διακρίνονται οι παρακάτω τύποι προέντασης:

4.1 Κεντρική Προένταση

Οι τένοντες τοποθετούνται παράλληλοι προς τον κεντροβαρικό άξονα του φορέα ώστε η συνισταμένη δύναμη προέντασης P να ασκείται κατά μήκος του κεντροβαρικού άξονα του φορέα.

Στην περίπτωση φορέων με ευθύγραμμο κεντροβαρικό άξονα (περίπτωση φορέων με σταθερή διατομή) οι τένοντες είναι ευθύγραμμοι.

Συνήθως υλοποιείται με συμμετρική διάταξη περισσότερων του ενός τενόντων, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.

Αποτελεί την πρώτη εφαρμογή της προέντασης.

4.2 Εκκεντρή Προένταση με Σταθερή Εκκεντρότητα – Ευθύγραμμοι Τένοντες

Οι τένοντες τοποθετούνται, όπως φαίνεται στο Σχ. 2, παράλληλοι προς τον κεντροβαρικό άξονα του φορέα ώστε η συνισταμένη δύναμη προέντασης να είναι έκκεντρη προς την ακραία ίνα που εφελκύεται από τη ροπή των φορτίων της κατασκευής.

Στην περίπτωση φορέων με ευθύγραμμο κεντροβαρικό άξονα (με σταθερή διατομή) οι τένοντες είναι ευθύγραμμοι.

➤ Πλεονεκτήματα της Έκκεντρης Προέντασης

Με τον τρόπο αυτό αναιρείται ένα μέρος της καμπτικής επιπόνησης, γιατί εκτός από την αξονική θλιπτική δύναμη P εισάγεται και μια αντίροπη καμπτική επιπόνηση ίση με:

$$M_p = P \cdot y_p$$

όπου:

y_p : η εκκεντρότητα της P από τον κ.β. άξονα.

Έτσι, η τελική καμπτική επιπόνηση του φορέα είναι μειωμένη, ίση με:

$$M = M_s - M_p$$

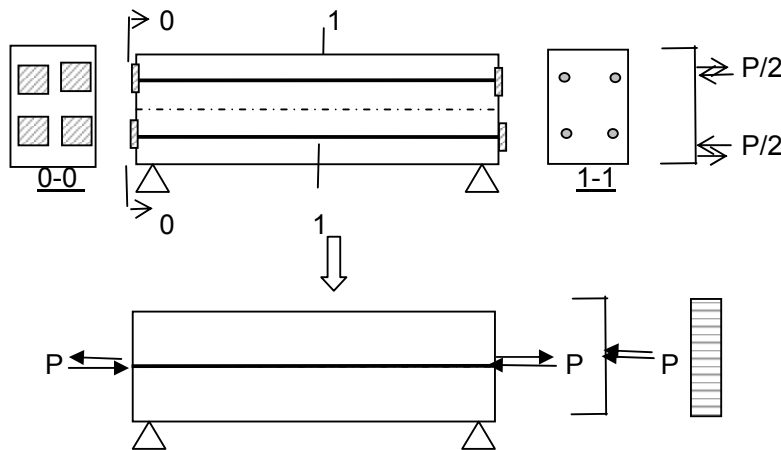
όπου:

M_s η ροπή λόγω των φορτίων της κατασκευής και

M_p η ροπή λόγω της προέντασης .

Λόγω της μείωσης της τελικής ροπής του φορέα, μειώνονται οι αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις και **μειώνεται η δύναμη προέντασης P** που απαιτείται για να τις αναιρέσει.

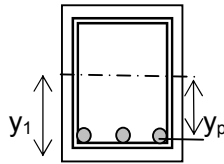
Μικρότερη δύναμη P σημαίνει λιγότεροι τένοντες και, γι αυτό, **οικονομικότερη λύση**.



Σχ. 4.1 Κεντρική προένταση

➤ **Μειονεκτήματα της Σταθερής Εκκεντρότητας**

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η εκκεντρότητα είναι, όπως φαίνεται στο σχήμα (για μία στρώση τενόντων):



$$\diamond \max y_p = y_1 - 0,09 \text{ m}$$

Η μείωση της P είναι, προφανώς, τόσο πιο μεγάλη όσο πιο μεγάλη είναι η αντιρροπή M_p , δηλ. όσο πιο μεγάλη είναι η εκκεντρότητα y_p της δύναμης προέντασης P.

Επειδή, όμως η αντιρροπή παραμένει ίδια σε όλο το άνοιγμα του φορέα:

❖ δεν μπορεί να εξαντληθεί η μέγιστη τιμή της εκκεντρότητας σε φορείς που το διάγραμμα της M_s δεν είναι ορθογωνικό.

Στους συνήθεις (ισοστατικούς) φορείς στους οποίους το διάγραμμα των ροπών βαίνει μειούμενο και μηδενίζεται στις στηρίξεις, στη στήριξη δρά μόνον η P και η M_p και υπάρχει ο κίνδυνος, όπως φαίνεται στο Σχ. 3 να παραμείνουν εφελκυστικές τάσεις στο πέλμα 2 (θλιβόμενο από την M_s) στην περιοχή κοντά στη στήριξη.

Γι αυτό:

όταν η M_s δεν παραμένει σταθερή κατά μήκος του φορέα, η **εκκεντρότητα y_p της δύναμης προέντασης πρέπει να περιορίζεται μέσα στον πυρήνα της διατομής***.

Για παράδειγμα:

Για φορέα με ορθογωνική διατομή πρέπει να είναι:

$$\diamond y_p < h/6,$$

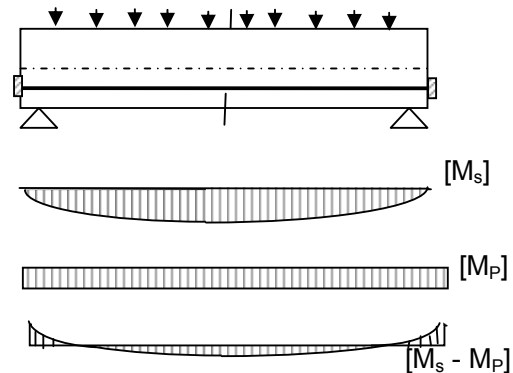
αφού η απόσταση k_1 του πυρήνα είναι*:

$$k_1 = W_2/Ac = (b \cdot h^2 / 6) / b \cdot h = h/6$$

4.3 Έκκεντρη Προένταση με Μεταβλητή Εκκεντρότητα

Για να αρθρεί ο παραπάνω περιορισμός για την εκκεντρότητα των τενόντων η εκκεντρότητα y_p

των τενόντων δεν κρατείται σταθερή σ' όλο το μήκος του φορέα, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με τη μορφή του διαγράμματος της M_s , όπως φαίνεται στο Σχ. 4



Σχ. 4.2 Έκκεντρη Προένταση με σταθερή εκκεντρότητα (ευθύγραμμη)

❖ **Η χάραξη των τενόντων έχει τη μορφή του διαγράμματος των ροπών.**

Με τον τρόπο αυτό μπορεί να εξαντληθεί η μέγιστη εκκεντρότητα στις κρίσιμες διατομές του φορέα και να αυξηθεί η οικονομικότητά του.

Όπως φαίνεται από την εντατική κατάσταση του φορέα στο Σχ. 4, για να είναι η τελική έκκεντρη δύναμη P όσο γίνεται πιο μικρή και η εκκεντρότητά της μέσα στον πυρήνα της διατομής, πρέπει η τελική ροπή $M_s - P \cdot y_p$ να είναι όσο γίνεται πιο μικρή.

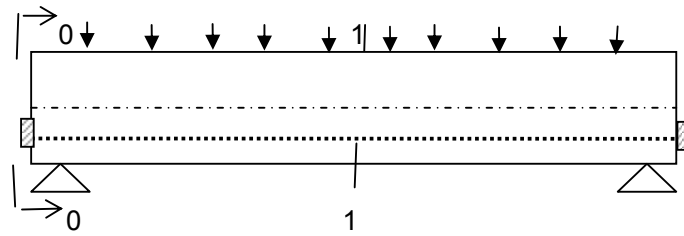
Γιαυτό, η y_p πρέπει να είναι:

- Στην κρίσιμη διατομή όσο γίνεται μεγαλύτερη, έξω από τον πυρήνα της διατομής.
- Στην ακραία διατομή όσο γίνεται πιο μικρή και μέσα στον πυρήνα της διατομής και αν είναι δυνατόν (βλ. κεφ. 13.7), μηδενική.

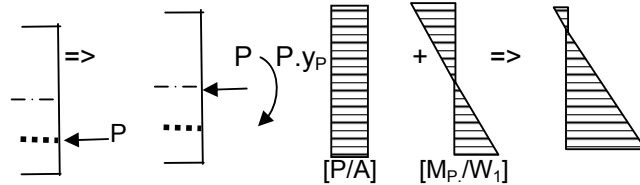
Η λύση αυτή αποτελεί την τρίτη ιστορικά βελτίωση των προεντεταμένων φορέων.

Δεν είναι δυνατή στην παρακάτω περίπτωση:

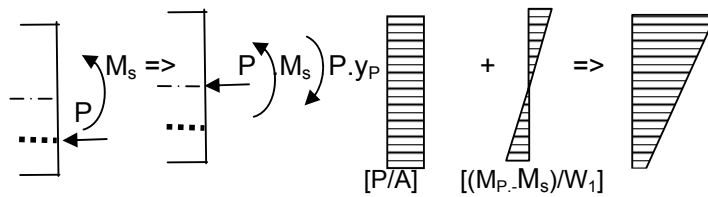
* Βλέπε κεφ. 6: Υπομνήσεις από τη Μηχανική.



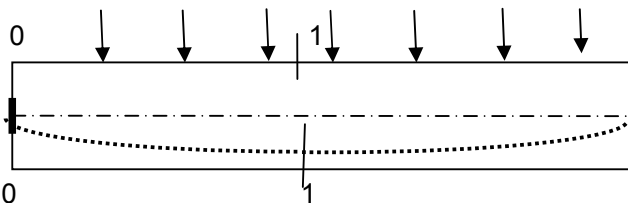
Ακραία Διατομή 0-0



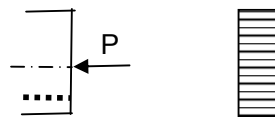
Μεσαία διατομή 1-1



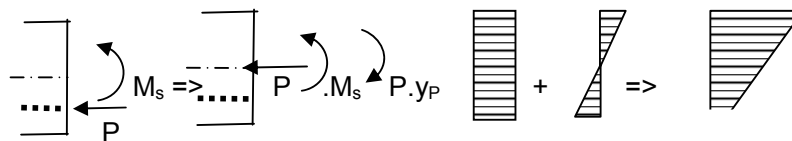
Σχ. 4.3 Τάσεις σκυροδέματος στην ακραία και μεσαία διατομή φορέα με έκκεντρη ευθύγραμμη χάραξη ('έξω από τον πυρήνα της διατομής)



Ακραία διατομή 0-0



Μεσαία διατομή 1-1

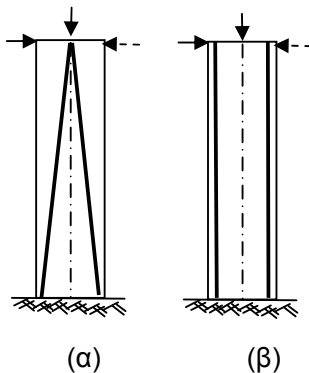


Σχ. 4.4 Έκκεντρη προένταση με μεταβλητή εκκεντρότητα

4.4 Περίπτωση Φορέων με Έναλλασσόμενη Επιπόνηση

Στην περίπτωση φορέων με εναλλασσόμενη επιπόνηση, όπως για παράδειγμα ο φορέας στο Σχ. 5 υπό σεισμική επιπόνηση, δεν μπορεί η χάραξη των τενόντων να ακολουθεί τη μορφή του διαγράμματος της M_s .

Θάπρεπε να γίνει διπλή χάραξη, όπως φαίνεται στο Σχ. 5(α). Στις περιπτώσεις αυτές υιοθετείται κεντρική χάραξη, όπως στο Σχ. 5(β).



Σχ. 4.5 Κεντρική χάραξη για φορείς με εναλλασσόμενη επιπόνηση

4.5 Μέγιστη Τιμή της Εκκεντρότητας

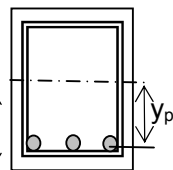
❖ Η μέγιστη τιμή της εκκεντρότητας y_p , θεωρώντας επικάλυψη των τενόντων 5 εκ, είναι:

Για μια στρώση τενόντων:

$$\max y_p = y_1 - 0,09 \text{ [m]}$$

Για δύο στρώσεις τενόντων: y_1

$$\max y_p = y_1 - 0,13 \text{ [m]}$$



(Διάμετρος τενόντων της τάξεως των 6 cm και συνδετήρας Φ10).

Η μέγιστη αυτή τιμή δεν μπορεί να εξαντληθεί σε:

- φορέα με έκκεντρη ευθύγραμμη χάραξη (και μεταβλητή ροπή M_s κατά μήκος του), όπως αναλύθηκε στο κεφ. 4.3, και
- φορέα με μεγάλο λόγο $\max M_s / \min M_s$, (φορέα με μεγάλο λόγο q/g), όπως αναλύεται παρακάτω:

4.6 Τιμή της Εκκεντρότητας στην Περίπτωση Φορέων με Μεγάλο Λόγο $\max M_s / \min M_s$

Η M_s δεν μεταβάλλεται μόνον κατά μήκος του φορέα. Μεταβάλλεται και με το χρόνο. Κυμαίνεται μεταξύ:

- μιας μέγιστης τιμής **$\max M_s$** (όταν δρουν όλα τα κινητά φορτία) και
- μιας ελάχιστης τιμής **$\min M_s$** (όταν δρουν μόνον τα μόνιμα ή και μερικά από τα κινητά φορτία).

Αντιθέτως:

- η δύναμη της προέντασης P και, γι' αυτό, και η αντιροπή M_p παραμένει (περίπου) σταθερή με τον χρόνο.

Στο Σχ. 6 φαίνεται η εντατική κατάσταση στην κρίσιμη διατομή του φορέα όταν δρα στο φορέα η $\max M_s$ και η $\min M_s$:

- Όταν δρα η **$\max M_s$** υπάρχει κίνδυνος να υπερτερήσει η $\max M_s$ και να **εφελκυστεί η ίνα 1 και να υπερθλιβεί η ίνα 2**.
- Όταν δρα η **$\min M_s$** υπάρχει κίνδυνος να υπερτερήσει η M_p και να **εφελκυστεί η ίνα 2 και να υπερθλιβεί η ίνα 1**.

Στους συνήθεις φορείς (φορείς με ομόσημα διαγράμματα ροπών από μόνιμα και κινητά) η (απόλυτη) τιμή της $\max M_s$ είναι μεγαλύτερη από αυτήν της $\min M_s$, και η τιμή της M_p οφείλει να είναι ενδιάμεση:

$$\min M_s < M_p < \max M_s$$

Δεν μπορεί να τεθεί $M_p = \max M_s$ ώστε να προκύπτει η ελάχιστη δυνατή τιμή της P , γιατί όταν θα δρα η $\min M_s$ θα υπερτερεί σημαντικά η M_p και οι μεγάλες εφελκυστικές τάσεις που θα προκύπτουν (στην ίνα 2) από τη μεγάλη τελική ροπή $M_p - \min M_s$ δεν θα μπορούν να αναιρεθούν από τη μικρή τιμή της P .

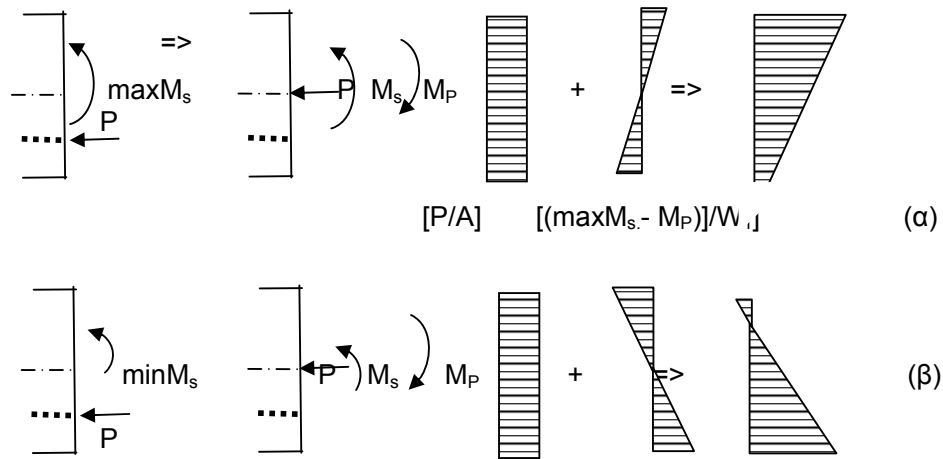
Γι αυτό, σε φορείς με μεγάλη διαφορά τιμών μεταξύ της $\min M_s$ και της $\max M_s$, δηλαδή σε φορείς με μεγάλο λόγο $\max M_s / \min M_s$, η τιμή της M_p πρέπει να είναι αρκετά μικρότερη από την $\max M_s$ και άρα:

- ❖ Σε φορείς με μεγάλο λόγο $\max M_s / \min M_s$ δεν μπορεί να εξαντληθεί η $\max y_p$ και η **λύση της προέντασης είναι αντιοικονομική**.

4.7 Ανακεφαλαιωτικά

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι:

- Οι τένοντες διατάσσονται προς την πλευρά της ίνας 1 του φορέα (την εφελκυσμένη ή λιγότερο θλιβόμενη από τα φορτία της κατασκευής).
- Σε φορείς με μεταβλητή M_s και έκκεντρη χάραξη με σταθερή εκκεντρότητα y_p της συνισταμένης δύναμης των τενόντων, η y_p οφείλει να είναι ίση ή μικρότερη από το όριο του πυρήνα* της διατομής τους (προς την ίνα ίνα 1).
- Πιο αποδοτική είναι έκκεντρη χάραξη που ακολουθεί τη μορφή του διαγράμματος της M_s και με τιμή της y_p στην κρίσιμη διατομή του φορέα ίση με τη $\max y_p$.
- Η τιμή της y_p δεν μπορεί να φθάσει τη μέγιστη τιμή της $\max y_p$ σε φορείς με μεγάλο λόγο $\max M_s / \min M_s$ (μεγάλο q/g).
- Σε φορείς με εναλλασσόμενη επιπόνηση, υιοθετείται κεντρική χάραξη (αντιοικονομική λύση).



Σχ. 4.6 Τάσεις σκυροδέματος όταν δρα (α) η $\max M_s$ και (β) η $\min M_s$

5. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΩΝ ΦΟΡΕΩΝ ΟΙ ΑΥΞΗΜΕΝΕΣ ΠΡΟΣΔΟΚΙΕΣ ΚΑΙ Η ΦΘΙΝΟΥΣΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η λύση του προεντεταμένου σκυροδέματος χαιρετίστηκε ως ιδιαίτερα υποσχόμενη, ικανή να αναιρέσει βασικά μειονεκτήματα του οπλισμένου σκυροδέματος.

Με το χρόνο αποδείχθηκε προβληματική και τείνει να εγκαταλειφθεί.

Έχουν αναφερθεί επανειλημμένες:

- αστοχίες προεντεταμένων φορέων με εκρηκτικές συνέπειες οφειλόμενες στην διάβρωση του χάλυβα προέντασης, καθώς
- αστοχίες οφειλόμενες στην κόπωση του σκυροδέματος και τη χαλάρωση του χάλυβα προέντασης, ιδιαίτερα στην περίπτωση (υπερστατικών) γεφυρών.

Παρακάτω συνοψίζονται μερικά από τα μειονεκτήματα της λύσης αυτής.

5.1 Οι Αυξημένοι Κίνδυνοι και οι Εκρηκτικές Συνέπειες της Διάβρωσης του Προεν/νου Χάλυβα

Το οπλισμένο σκυρόδεμα, ως το συνδυασμένο αποτέλεσμα σκυροδέματος και χάλυβα, επιδεικνύει σε σημαντικό βαθμό τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα των δύο συστατικών του.

Ένα από τα κυριότερα μειονεκτήματα του χάλυβα αποτελεί η διαβρωσιμότητά του και η, εν γένει, μικρή ανθεκτικότητά του.

Το σκυρόδεμα συνδυαζόμενο με το χάλυβα απώλεσε σε σημαντικό βαθμό την υψηλή ανθεκτικότητά του και την πυρασφάλειά του με συνέπεια τη σημαντική μείωση της διάρκειας ζωής των κατασκευών από σκυρόδεμα.

Στις ημέρες μας με την αυξανόμενη ατμοσφαιρική και εδαφική μόλυνση, η ευαλωσία αυτή του σκυροδέματος γίνεται πιο εμφανής και η αντιμετώπισή της πιο επιτακτική.

❖ Το προεντεταμένο σκυρόδεμα αναμενόταν να βελτιώσει την ανθεκτικότητα των φορέων, λόγω:

- 1) της υψηλής ποιότητας των προεντεταμένων χαλύβων και

- 2) της απουσίας ρηγμάτωσης των φορέων για τα φορτία λειτουργίας τους.

❖ Αντίθετα με τις προσδοκίες, οι χάλυβες προέντασης αποδείχθηκαν περισσότερο ευάλωτοι σε διάβρωση.

➤ Μια Εξήγηση: Οι Ατέλειες και η Χρησιμότητά τους

Η διάβρωση, όπως και οποιαδήποτε μεταβολή, οποιαδήποτε κίνηση, προϋποθέτει ανισοροπία. Λόγω της υψηλής ποιότητάς τους (περιέχουν προσμίξεις τιτανίου, νικέλιου, κ.λ.π) οι χάλυβες προέντασης:

- εμφανίζουν μικρότερες ατέλειες στην επιφάνειά τους και, γιαυτό,
- η διαφορά δυναμικού σε περίπτωση τοπικής επιφανειακής αλλοίωσης, λόγω κάποιου βλαπτικού παράγοντα, είναι σημαντικά μεγαλύτερη απ' ό,τι στην περίπτωση των κοινών χαλύβων (οι οποίοι εμφανίζουν σημαντικές ατέλειες σ' όλη την επιφάνειά τους).

Γι αυτό, ο μηχανισμός διάβρωσης είναι πιο έντονος στην περίπτωση των χαλύβων προέντασης.

Επί πλέον, στην περίπτωση του προεντεταμένου χάλυβα:

❖ Οι συνέπειες από τη διάβρωση είναι άμεσες και καταστροφικές. Λόγω της υψηλής τάσης του χάλυβα, η διάβρωσή του εκδηλώνεται με εκρηκτική θραύση, χωρίς προειδοποίηση.

Αντιθέτως, η διάβρωση του οπλισμού των φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα οδηγεί σε προοδευτική μείωση της ενεργής διατομής του και διατάραξη της συνάφειας του με το σκυρόδεμα και προειδοποιεί με αυξανόμενο εύρος ρωγμών του φορέα.

➤ Η Ανορθολογική Επιδίωξη της Τελειότητας - Οι Κοινωνικές Επιπτώσεις

Για την αύξηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν παραχθεί και ερευνώνται σε ευρεία κλίμακα ανοξείδωτοι (μη προεντεταμένοι) χάλυβες για την αντικατάσταση των συνήθων χαλύβων.

- ❖ Το παράδειγμα της αποτυχίας των υψηλής ποιότητας (ανοξειδωτων) χαλύβων προέντασης δεν φαίνεται να έχει ληφθεί υπόψη στην εξέλιξη αυτή.

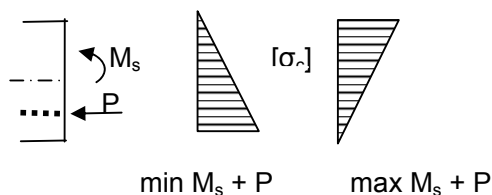
Οι ερευνώμενοι χάλυβες έχουν ιδιαίτερα μεγάλο κόστος προοριζόμενοι εκ των πραγμάτων για «εκλεκτούς» χρήστες των κατασκευών, επιτείνοντας την μέσω της τεχνολογίας αποδυνάμωση των «μη εκλεκτών μαζών» ανθρώπων στερώντας τους και τη δυνατότητα στέγασης.

Είναι χαρακτηριστική η συνεχής αύξηση των ανθρώπων χωρίς στέγη που παρατηρείται, ιδιαίτερα, σε τεχνολογικά αναπτυσσόμενες χώρες με εκτεταμένη έρευνα στις κατασκευές.

5.2 Οι Κίνδυνοι από την Κόπωση Προεντεταμένων Φορέων με Συχνή Εναλλαγή των Κινητών Φορτίων

Όπως σχολιάστηκε στο κεφ. 4.6 και φαίνεται στο Σχ. 1, με την εναλλαγή της δρώσας ροπής από την τιμή της $\min M_s$ στην τιμή της $\max M_s$, λόγω εναλλαγής των φορτίων από g σε $g+q$:

- ❖ η τάση του σκυροδέματος στην ίνα 1 εναλλάσσεται από σχεδόν μηδενική τιμή στην μέγιστη τιμή της, ενώ στην ίνα 2 από τη μέγιστη τιμή της σε σχεδόν μηδενική τιμή της.



Σχ. 5.1 Διαγράμματα τάσεων σκυροδέματος καθ' ύψος της κρίσιμης διατομής του φορέα

Για παράδειγμα,

- Σε μια προεντεταμένη γέφυρα, η εναλλαγή των ακραίων τάσεων του σκυροδέματος από μια ελάχιστη σε μια μέγιστη τιμή θα συμβαίνει κάθε φορά που θα διέρχεται από μια θέση της ένα όχημα.

- ❖ Η εναλλαγή αυτή των τάσεων, αν είναι συχνή, όπως σε γέφυρες, δεξαμενές, κ.λ.π., οδηγεί σε κόπωση του σκυροδέματος η οποία, λόγω του μεγάλου εύρους της, οδηγεί σε σημαντική μείωση της αντοχής του.

Το φαινόμενο αυτό μαζί με το φαινόμενο της χαλάρωσης των προεντεταμένων χαλύβων ενέχεται στην κατάρρευση αρκετών γεφυρών.

Στους φορείς από οπλισμένο σκυρόδεμα η κόπωση δεν είναι σημαντική γιατί το εύρος της εναλλαγής των τάσεων είναι σημαντικά μικρότερο. Οι τάσεις μεταβάλλονται από την τιμή τους για τα μόνιμα φορτία στην τιμή τους για τα μόνιμα και τα κινητά φορτία.

5.3 Η Επικινδυνότητα σε Περίπτωση Πυρκαγιάς ή Καθαίρεσης των Φορέων

Σε περίπτωση πυρκαγιάς οι προεντεταμένοι χάλυβες, λόγω της μεγάλης τάσης τους, εκρήγνυνται διασπειρόμενοι σε σημαντική έκταση γύρω από το κτίσμα με απρόβλεπτες συνέπειες.

Σε περίπτωση κακοτεχνίας ή αστοχίας των προεντεταμένων φορέων, δεν είναι δυνατή, λόγω της μεγάλης τάσης των τενόντων, η εφαρμογή των συνηθών τρόπων κατεδάφισης των κατασκευών από σκυρόδεμα.

Η μελέτη κατεδάφισης είναι πολύ πιο δύσκολη και πολύπλοκη από την αρχική μελέτη για τον σχεδιασμό τους. Συχνά απαιτείται εκκένωση του περιβάλλοντος χώρου σε σημαντική έκταση, ιδιαίτερα δύσκολη για κτίσματα σε αστικά κέντρα.

5.4 Η Μειωμένη Αντισεισμικότητα των Προεντεταμένων Φορέων

Λόγω της σημαντικής θλιπτικής επιπόνησής τους:

- ❖ οι προεντεταμένοι φορείς είναι ψαθυροί.

Λόγω των μεγάλων ανοιγμάτων τους, το ύψος τους προκύπτει μεγάλο (της τάξεως των δύο και τριών μέτρων) και

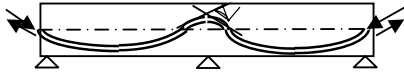
- ❖ δεν είναι δυνατή η τήρηση του ικανοτικού σχεδιασμού για ισχυρά υποστυλώματα-ασθενείς δοκούς (βλ. Αντισεισμικός Σχεδιασμός).

Βασική απαίτηση καλής αντισεισμικής συμπεριφοράς των φορέων από σκυρόδεμα είναι η δυνατότητα των φορέων να συμπεριφερθούν υπερστατικά.

❖ Η λύση της προέντασης είναι **αντιοικονομική και ιδιαίτερα δυσχερής στην περίπτωση υπερστατικών φορέων.**

Οι υπερστατικοί φορείς δεν ενδείκνυνται σε υπερστατικούς φορείς για τους εξής λόγους:

- Λόγω των πλεοναζουσών στηρίξεων τους αντιστέκονται περισσότερο από τους ισοστατικούς φορείς στην προπαραμόρφωσή τους και, γιαυτό, απαιτείται μεγαλύτερη δύναμη προέντασης για ίδια προπαραμόρφωση με τους ισοστατικούς.
- Λόγω των μεγάλων αποκλίσεων από την ευθυγραμμία στη θέση των υπερστατικών στηρίξεων, όπως φαίνεται στο Σχ. 2, οι μειώσεις της δύναμης προέντασης είναι σημαντικά μεγάλες (βλ. Επισκόπηση).



Σχ. 5.2 Μεγάλη απόκλιση των τενόντων στις ενδιάμεσες στηρίξεις υπερστατικών φορέων

Λόγω της μεγάλης καμπύλωσης των τενόντων στις θέσεις των ενδιάμεσων στηρίξεων ανακύπτουν κατασκευαστικά και τεχνολογικά προβλήματα ρηγματώσεων του σκυροδέματος στις περιοχές αυτές (από την ανάπτυξη δυνάμεων άντυνας).

Για τους λόγους αυτούς δεν ενδείκνυται η εφαρμογή του σε περιοχές με σεισμική επικινδυνότητα.

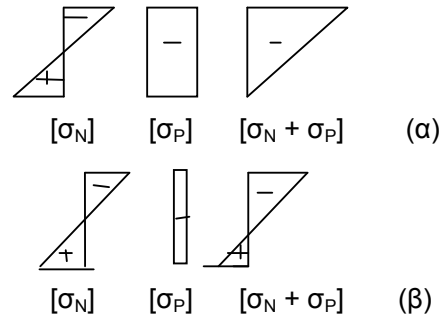
5.5 Τα Προβλήματα Μεταφοράς της Τεχνολογίας – Οι Νέες Τάσεις

Η λύση του προεντεταμένου σκυροδέματος πρωτοεφαρμόστηκε στη Γερμανία (χώρα χωρίς ιδιαίτερη σεισμικότητα) και **μεταφέρθηκε και σε χώρες με έντονη σεισμικότητα**, όπως η Ελλάδα, μολονότι **έρχεται σε αντίθεση με τις αντισεισμικές απαιτήσεις**, όπως σχολιάστηκε παραπάνω.

Σήμερα η λύση αυτή εγκαταλείπεται.

- Σε ερευνητικό στάδιο μελετάται η αντικατάσταση της παραπάνω λύσης της **πλήρους προέντασης** με τη λύση της **μερικής προέντασης**, η οποία αποτελεί συνδυασμό οπλισμένου και προεντεταμένου σκυροδέματος.

Σύμφωνα με τη λύση αυτή η δύναμη προέντασης επιλέγεται ώστε οι φορείς να ρηγματώνονται για τα φορτία λειτουργίας, αλλά το άνοιγμα των ρωγμών να είναι μικρότερο απ' αυτό των φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα.



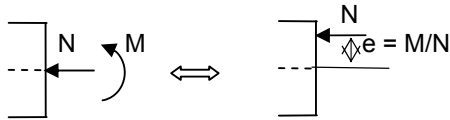
Σχ. 5.3 (α) Λύση πλήρους προέντασης και (β) λύση μερικής προέντασης

❖ Με τη λύση της μερικής προέντασης μέρος μόνον των ράβδων του οπλισμού είναι προεντεταμένες.

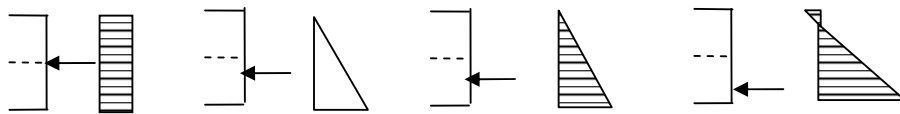
Η λύση αυτή αναμένεται να προσδώσει στους φορείς τα πλεονεκτήματα των δύο λύσεων (οπλισμένου και προεντεταμένου σκυροδέματος) και να αναιρέσει τα μειονεκτήματά τους.

1. ΥΠΟΜΝΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

- Καμπτική ροπή M και αξονική N ισοδυναμεί με έκκεντρη θλιπτική δύναμη ίση με N με εκκεντρότητα $e = M/N$ προς το πέλας προς το οποίο δείχνει το βέλος της ροπής και αντίστροφα:
- Έκκεντρη θλιπτική δύναμη N με εκκεντρότητα e ισοδυναμεί με αξονική ίση με N και ροπή ίση με $M = N \cdot e$.



Η τάση που προκύπτει από την εφαρμογή έκκεντρης θλιπτικής δύναμης είναι θλιπτική την ακραία ίνα την πλησιέστερη προς το σημείο εφαρμογής της δύναμης ενώ στην απέναντι ακραία ίνα είναι θλιπτική, μηδενική ή εφελκυστική, αν η εκκεντρότητα είναι μικρότερη, ίση ή μεγαλύτερη από το όριο του πυρήνα της διατομής, αντίστοιχα.



Πυρήνας και Όρια k_1 και k_2 Πυρήνα Διατομής

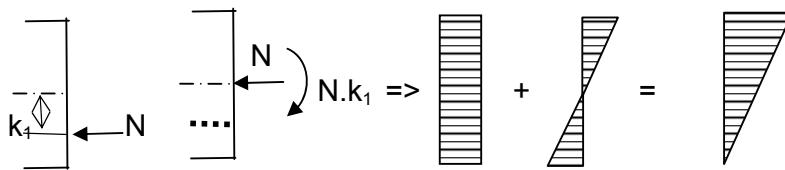
Ο πυρήνας της διατομής είναι η περιοχή μέσα στην οποία μπορεί να ασκείται μια θλιπτική δύναμη χωρίς να αναπτύσσεται εφελκυστική τάση στη διατομή.

Όπως φαίνεται στο σχήμα είναι:

$$k_1 = W_1/A_c \text{ και } k_2 = W_2/A_c$$

Για ορθογωνική διατομή είναι:

$$k_1 = k_2 = bh^2/6$$



$$\sigma_1 = -N/A_c - N \cdot k_1/W_1 = 0 \Rightarrow k_1 = W_1/A_c$$

$$\sigma_2 = -N/A_c - N \cdot k_2/W_2 = 0 \Rightarrow k_2 = W_2/A_c$$

