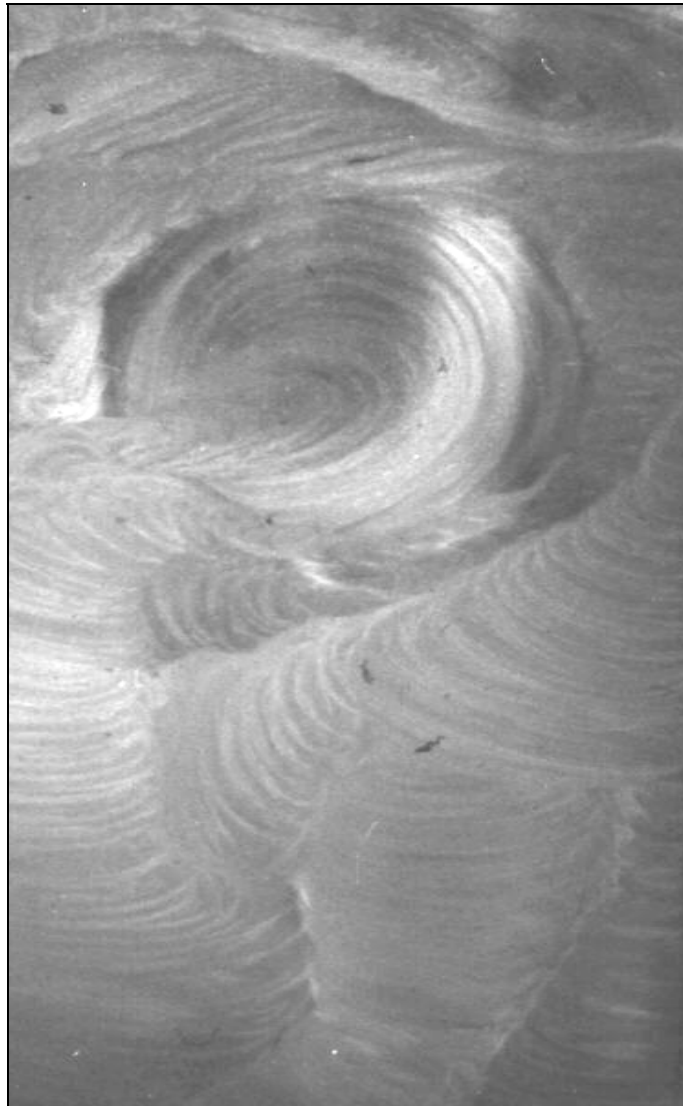


ΚΑΜΠΤΟΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΟΡΕΩΝ
Η ΕΝΝΟΙΑ, ΟΙ ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ



1. ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΟΡΕΩΝ

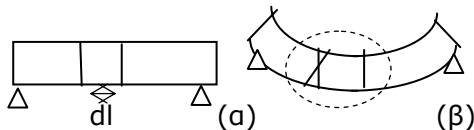
1.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΔΡΩΣΑΣ ΡΟΠΗΣ

1.1.1 Παραμορφώσεις Καθύψος της Διατομής

Όπως φαίνεται στο Σχ.1 μια εγκάρσια διατομή του φορέα λόγω της ροπής θα στραφεί (ώστε να παραμείνει κάθετη στη νέα θέση του κ.β. άξονα του φορέα), όπως φαίνεται στο Σχ. 1.

Λόγω της τέμνουσας θα υποστεί, όπως φαίνεται στο Σχ. 2(α), κατακόρυφη μετατόπιση.

Λόγω των δύο αυτών μετακινήσεων η διατομή στη νέα της θέση αναμένεται στρεβλωμένη.



Σχ. 1.1 Στροφή εγκάρσιας διατομής λόγω κάμψης του φορέα

Στους γραμμικούς φορείς, όμως, που εξετάζονται στον τόμο αυτό η τέμνουσα είναι μικρή σε σχέση με τη ροπή.

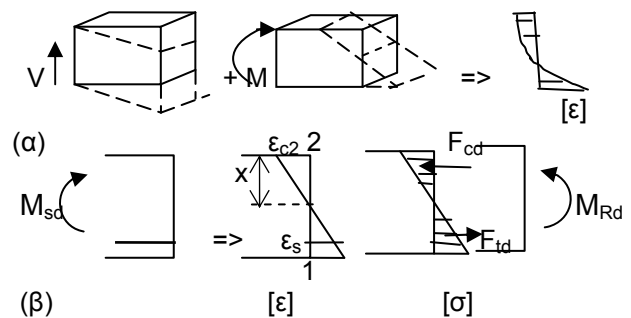
Γιαυτό, η βύθιση λόγω της τέμνουσας μπορεί να αμεληθεί και η διατομή στη νέα της θέση θεωρείται ότι παραμένει επίπεδη ακόμη και για επιπόνηση κοντά στην αστοχία του φορέα.

❖ Λόγω της παραδοχής για επιπεδότητα των διατομών (παραδοχή Bernoulli) το διάγραμμα των παραμορφώσεων καθύψος της διατομής είναι ευθύγραμμο.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 1 και 2(β), η παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη στα ακρότατα σημεία των διατομών του φορέα, στα πέλματα του φορέα, και μηδενίζεται σε κάποια ενδιάμεσα σημεία του. Τα σημεία αυτά αποτελούν τον ουδέτερο άξονα του φορέα*.

Η απόσταση από τον ουδέτερο άξονα μέχρι την ακραία θλιβόμενη ίνα 2^{**} είναι το πάχος ή το βάθος της θλιβόμενης ζώνης.

Συμβολίζεται με το x γιατί είναι ο βασικός άγνωστος του καμπτικού σχεδιασμού του φορέα. Αν είναι γνωστή η τιμή του x είναι γνωστή η τιμή και των άλλων μεγεθών.



Σχ. 1.2 Διάγραμμα $\{\epsilon\}$ και $\{\sigma\}$ για φορείς: (α) μη γραμμικούς (υψίκορμους) (β) γραμμικούς φορείς (μικρή επιπόνηση)

1.1.2 Εσωτερικές Δυνάμεις και Εσωτερική Ροπή

Επειδή οι παραμορφώσεις είναι (λόγω των στηρίξεων του φορέα) παρεμποδιζόμενες, αναπτύσσονται τάσεις σ και ως συνισταμένες των τάσεων οι εσωτερικές δυνάμεις F_{cd} και F_{td} (F: Force, c: compression, t: tension).

Η συνισταμένη των εσωτερικών δυνάμεων αποτελεί την εσωτερική αξονική δύναμη N_{Rd} και οι ροπές τους ως προς τον κεντροβαρικό άξονα του φορέα την εσωτερική ροπή M_{Rd} .

* Για ομογενείς (αρηγμάτωτους) φορείς υπό καθαρή κάμψη (δηλ. χωρίς συνύπαρξη αξονικής δύναμης) ο ουδέτερος άξονας συμπίπτει με τον κεντροβαρικό άξονα.

**Τα μεγέθη που αναφέρονται στην ακραία εφελκυσμένη ίνα του φορέα συμβολίζονται με τον δείκτη 1 και αυτά που αναφέρονται στην ακραία θλιβόμενη ίνα με τον δείκτη 2.

Επειδή η εσωτερική αξονική δύναμη N_{Rd} είναι μηδενική αφού δεν δρα αξονική δύναμη στο

φορέα, οι εσωτερικές δυνάμεις είναι ίσες και η εσωτερική ροπή M_{Rd} είναι η ροπή του ζεύγους των εσωτερικών δυνάμεων.

2 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΕΝΤΑΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΠΟΝΗΣΗΣ

1.2.1 Στάδιο I και II

Διακρίνονται τα παρακάτω στάδια εντατικής κατάστασης του φορέα:

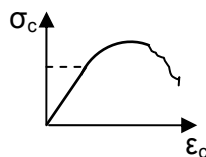
➤ Στάδιο I: Φορέας Αρηγμάτωτος

Για μικρή τιμή της επιπόνησης οι εφελκυστικές τάσεις είναι μικρότερες από την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος και ο φορέας παραμένει αρηγμάτωτος.

✚ Δεχόμενοι ότι η συνάφεια σκυροδέματος και χάλυβα είναι πλήρης η παραμόρφωση ϵ_s του εφελκυσμένου οπλισμού ισούται με την παραμόρφωση του σκυροδέματος στη στάθμη του οπλισμού, όπως φαίνεται στο Σχ. 2(β).

Η εφελκυστική δύναμη F_{td} είναι η συνισταμένη των εφελκυστικών τάσεων του σκυροδέματος και της εφελκυστικής δύναμης του οπλισμού η οποία, λόγω της μικρής τιμής της ϵ_s είναι μικρή ίση με $\sigma_s \cdot E_s \cdot \epsilon_s$ και μπορεί να παραλειφθεί.

Το διάγραμμα των τάσεων σ είναι ευθύγραμμο, καθώς οι τάσεις είναι μικρές και, όπως φαίνεται στο σχήμα, το διάγραμμα $[\sigma_c - \epsilon_c]$ του σκυροδέματος στην περιοχή αυτή είναι γραμμικό.



Η εσωτερική ροπή για ορθογωνική διατομή διαστάσεων $b \cdot h$ προκύπτει από τη σχέση:

$$\diamond M_{Rd} = F_{td} \cdot z = (1/2 \cdot b \cdot h \cdot \sigma_{cd}) \cdot 2h/3 = \sigma_{cd} \cdot W \quad (1)$$

όπου:

W: η ροπή αντίστασης της διατομής

Με την αύξηση της επιπόνησης αυξάνεται η παραμόρφωση του σκυροδέματος (αφού αυξάνεται το βέλος του). Για κάποια τιμή της δρώσας ροπής η τιμή της ακραίας εφελκυστικής τάσης φθάνει την εφελκυστική αντοχή f_{ct} του σκυροδέματος και ο φορέας ρηγματώνεται.

Η ροπή τη στιγμή της έναρξης της ρηγμάτωσης του φορέα δηλώνεται ως ροπή ρηγμάτωσης ή ροπή σταδίου I, συμβολίζεται ως M_i και δίνεται

από τη σχέση (2):

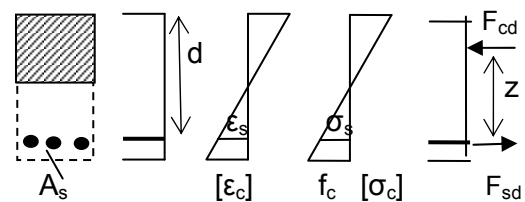
$$\color{red}{\oplus} M_i = 0,5 \cdot b \cdot h / 2 \cdot f_{ctd} \quad (2)$$

➤ Στάδιο II: Φορέας Ρηγματωμένος

Με τη ρηγμάτωση του φορέα θεωρώντας:

- Αμελητέα την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος,
- ✚ η ενεργή (εντεινόμενη) διατομή του φορέα αποτελείται, όπως φαίνεται στο Σχ. 3, από σκυρόδεμα στην θλιβόμενη περιοχή του φορέα και από τις ράβδους του οπλισμού στο εφελκυσμένο πέλμα του σε απόσταση d από την ακραία θλιβόμενη ίνα του φορέα.

Η απόσταση d αποτελεί το στατικό ύψος της νέας διατομής.



Σχ. 1.3 Εντατική κατάσταση αμέσως πριν τη ρηγμάτωση του φορέα

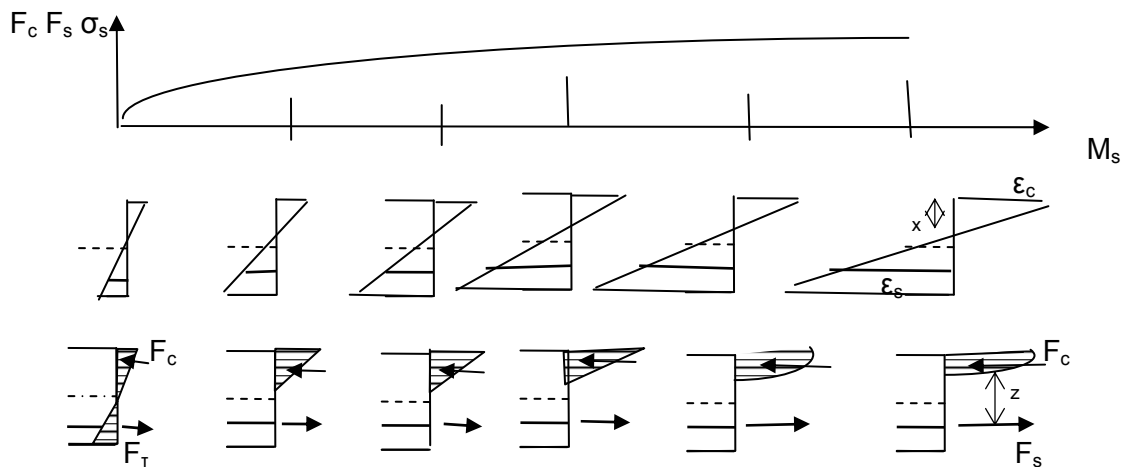
Το ζεύγος των εσωτερικών δυνάμεων αποτελείται από την θλιπτική δύναμη F_{cd} του σκυροδέματος και την εφελκυστική δύναμη F_{sd} του εφελκυσμένου οπλισμού, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.

Με την παραδοχή ότι (παρά τη ρηγμάτωση):

- Η συνάφεια οπλισμού και σκυροδέματος εξακολουθεί να είναι πλήρης,
- Η διατομή εξακολουθεί να παραμένει επίπεδη

προκύπτει ότι:

- Η παραμόρφωση του οπλισμού εξακολουθεί να είναι ίση με την παραμόρφωση που θα είχε το σκυρόδεμα στη στάθμη του.



Σχ. 1.4 Μεταβολή εντατικών διαγραμμάτων και εντατικών μεγεθών με την αύξηση της επιτόνησης

- Το διάγραμμα παραμορφώσεων παραμένει ευθύγραμμο.

Λόγω, όμως, της ρηγμάτωσης ο ουδέτερος άξονας δεν συμπίπτει με τον κεντροβαρικό.

Όσο αυξάνεται η δρώσα ροπή, το άνοιγμα και, άρα, και το βάθος της ρωγμής μεγαλώνει με αποτέλεσμα να:

1. μειώνεται το x καθώς ο ουδέτερος άξονας μετατίθεται προς την πλευρά της θλιβόμενης ίνας 2, όπως φαίνεται στο Σχ. 4 και γιαυτό:
2. μεγαλώνει ο μοχλοβραχίονας z
3. αυξάνουν οι ακραίες παραμορφώσεις ϵ_{c2} και ϵ_s και γιαυτό:
4. μεγαλώνουν οι εσωτερικές δυνάμεις

Λόγω της αύξησης των εσωτερικών δυνάμεων και του μοχλοβραχίονά τους η ροπή συνεχίζει να μεγαλώνει και προκύπτει από τη σχέση:

$$\diamond M_{Rd} = F_{sd} \cdot z = A_s \cdot \sigma_{sd} \cdot z \quad (3)$$

➤ Στάθμη Διαρροής και Αστοχίας Σταδίου II

Με την αύξηση της δρώσας ροπής η παραμόρφωση του οπλισμού φθάνει την παραμόρφωση και την τάση διαρροής του. Η τιμή της εσωτερικής ροπής που αναπτύσσεται δηλώνεται ως η ροπή διαρροής και δίνεται από τη σχέση:

$$\diamond M_{RdY} = A_s \cdot f_{sy} \cdot z \quad (4)$$

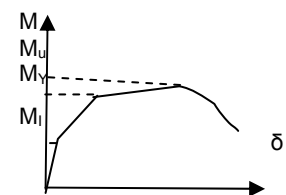
Με περαιτέρω αύξηση της δρώσας ροπής η ακραία θλιπτική παραμόρφωση και τάση του σκυροδέματος αυξάνει και το διάγραμμα των τάσεων σταματά να είναι ευθύγραμμο, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.

Παρατηρούνται οι παρακάτω μεταβολές:

- Οι εσωτερικές δυνάμεις παραμένουν σταθερές, καθώς μετά την παραμόρφωση διαρροής δεν αυξάνει η τάση, άρα, και η δύναμη του οπλισμού*
- Το βάθος x της θλιβόμενης ζώνης μειώνεται
- Ο μοχλοβραχίονας z των εσωτερικών δυνάμεων μεγαλώνει

Λόγω της αύξησης του z η εσωτερική ροπή συνεχίζει να μεγαλώνει αλλά, επειδή δεν μεταβάλλεται και η δύναμη του οπλισμού η αύξηση δεν είναι το ίδιο μεγάλη, όπως στο στάδιο πριν τη διαρροή.

Γιαυτό, όπως φαίνεται στο σχήμα, το διάγραμμα συμπεριφοράς του φορέα οριζοντιώνεται.



Όταν η ακραία παραμόρφωση φθάσει την οριακή της τιμή, το 3,5% και η τάση τη μέγιστη τιμή της f_{cd} . ο φορέας αστοχεί.

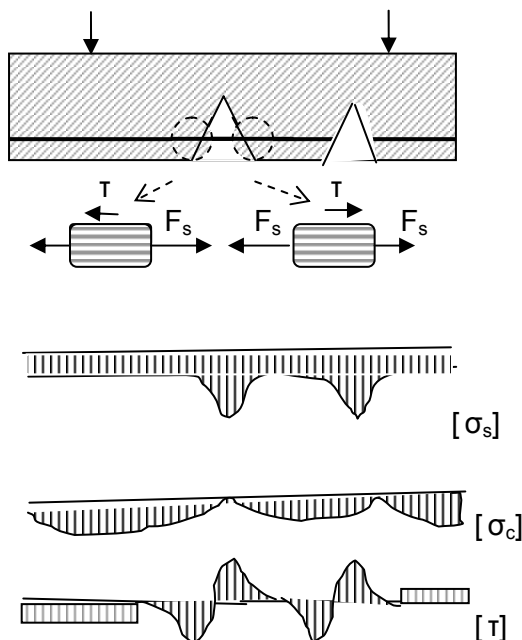
Η αντίστοιχη ροπή είναι η ροπή αστοχίας M_{Rdu} .

1.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ

1.3.1 Εντατική κατάσταση στην Περιοχή των Καμπτικών Ρωγμών

Η εφελκυστική παραμόρφωση του χάλυβα σε μια θέση του φορέα ισούται με το ανηγμένο άνοιγμα των ρωγμών στη θέση αυτή.

Σ'έναν καμπτόμενο φορέα εμφανίζονται εν γένει περισσότερες της μίας ρωγμές.



Σχ. 1.5 Εντατική κατάσταση στην περιοχή των ρωγμών

Όταν η εφελκυστική τάση του σκυροδέματος υπερβεί στην πιο εξασθενημένη θέση της κρίσιμης περιοχής την εφελκυστική αντοχή, ανοίγει η πρώτη ρωγή και η εφελκυστική τάση του σκυροδέματος στη θέση αυτή αναλαμβάνεται από τον οπλισμό.

Με μικρή περαιτέρω αύξηση του φορτίου, η εφελκυστική τάση φθάνει στην οριακή της τιμή στην επόμενη εξασθενημένη θέση της κρίσιμης περιοχής και ανοίγει δεύτερη ρωγή.

Η τάση του σκυροδέματος αναλαμβάνεται πάλι από τον οπλισμό και η εντατική κατάσταση στην περιοχή των ρωγμών είναι αυτή που φαίνεται στο Σχ. 5. Η εφελκυστική τάση του σκυροδέματος σ_{ct} βαίνει μειούμενη προς τη θέση της

ρωγμής, ενώ η τάση του χάλυβα σ_s βαίνει αυξανόμενη.

1.3.2 Η Ρωγή ως Θέση Αποτόνωσης της Έντασης του Φορέα

Στις θέσεις των ρωγμών μηδενίζεται η εφελκυστική δύναμη F_t του σκυροδέματος και αντισταθμίζεται με αύξηση της δύναμης F_s του εφελκυσμένου χάλυβα, ο οποίος στις θέσεις αυτές έχει αυξημένη παραμόρφωση (κατά το ανηγμένο άνοιγμα της ρωγμής) και αυξημένη τάση.

Για την ισορροπία του οπλισμού στην περιοχή από τη θέση της ρωγμής μέχρι το μέσον της απόστασης της από γειτονική της ρωγή, αναπτύσσονται, όπως φαίνεται στο Σχ. 5, δυνάμεις τριβής με φορά αυτήν της μικρότερης δύναμης και, γιαυτό, με αντίθετη φορά εκατέρωθεν της ρωγμής.

Οι δυνάμεις αυτές επειδή αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια δύο υλικών δηλώνονται ως τάσεις συνάφειας και παρεμποδίζουν την ολίσθηση των δύο υλικών.

Θεωρώντας το φορέα ως αλυσίδα με κρίκους τις επί μέρους διατομές του, οι θέσεις της ρωγμής αποτελούν τους ασθενείς κρίκους της αλυσίδας οι οποίοι, όπως εντοπίστηκε παραπάνω, εστιάζουν την ένταση σ αυτούς επιτρέποντας στους διπλανούς τους κρίκους να υποεντείνονται.

Με τον τρόπο αυτό, γίνεται ανακατανομή της έντασης του φορέα προς τις θέσεις των ρωγμών και αποφεύγεται η ρηγματώση σε άλλες θέσεις του φορέα. Με την αύξηση της επιπόνησης διευρύνονται οι ήδη υπάρχουσες ρωγμές.

1.3.2 Εξέλιξη Ρωγμών με την Αύξηση της Επιπόνησης

Μετά τη διαρροή του εφελκυσμένου οπλισμού η εξέλιξη των ρωγμών επιταχύνεται λόγω της μεγάλης παραμόρφωσης του οπλισμού.

Οι ρωγμές συνεχίζουν να διευρύνονται μέχρις ότου η ακραία θλιβόμενη ίνα του σκυροδέματος φθάσει την οριακή της παραμόρφωση και συνθλιβεί η θλιβόμενη ζώνη του φορέα που σηματοδοτεί και την αστοχία του.

2. ΚΑΜΠΤΟΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΟΡΕΩΝ

2.1 Εντατική Κατάσταση Καθύψος της Διατομής

Λόγω της καμπτικής ροπής M αναπτύσσονται ορθές τάσεις σ_c ανάλογες της τιμής της ροπής.

Λόγω της τέμνουσας V αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις τ .

Η τιμή τους για αρηγμάτωση διατομή δίνεται από τη σχέση (1) και η κατανομή τους καθύψος στο Σχ. 1.

$$\tau = V_s \cdot S / (b \cdot J) \quad (1)$$

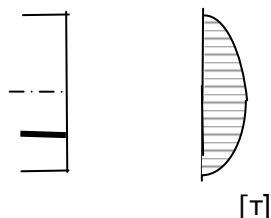
όπου:

V_s : η δρώσα τέμνουσα

S : η στατική ροπή της διατομής στη στάθμη της τ

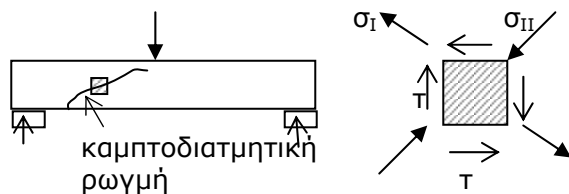
J : η ροπή αδρανείας της διατομής

b : το πλάτος της διατομής



Σχ. 2.1 Μορφή διαγράμματος διατμητικών τάσεων

Λόγω της συνύπαρξης των τάσεων σ και τ προκύπτει, όπως φαίνεται στο Σχ. 2, μια λοξή εφελκυστική τάση σ_I και μια λοξή θλιπτική τάση σ_{II} .



Σχ. 2.2 Λοξές εφελκυστικές τάσεις σ_I και θλιπτικές σ_{II} και θλιπτικές σ_{II}

Η τιμή τους και η κλίση τους ως προς τον κεντροβαρικό άξονα του φορέα προκύπτει από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\sigma_I = \sigma_c / 2 + \sqrt{\sigma_c^2 / 4 + \tau^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{II} = \sigma_c / 2 - \sqrt{\sigma_c^2 / 4 + \tau^2} \quad (2)$$

$$\epsilon_{\phi} = \sigma_c / 2\tau \quad (3)$$

2.2 Καμπτοδιατμητική Ρηγμάτωση

Από τη σχέση (1) προκύπτει ότι:

- Η σ_I μεγαλώνει με την αύξηση της τ και τη μείωση της σ_c (η θλιπτική σ_c δρα ευνοϊκά κλείνοντας τις ρωγμές). Άρα:
- 1. Η μέγιστη τιμή της σ_I είναι στη θέση του ουδέτερου άξονα ($\sigma_c = 0$) και ισούται με την τ στη θέση αυτή. Γιαυτό:

✚ Ο έλεγχος των λοξών εφελκυστικών τάσεων σ_I ονομάζεται **έλεγχος σε διάτμηση**

- 2. Η λοξή ρωγμή λόγω υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος θα εμφανιστεί στη θέση του ουδέτερου άξονα της διατομής (στον μέσον ορθογωνικής διατομής).

Από τη σχέση (3) προκύπτει ότι:

- Η κλίση της λοξής εφελκυστικής τάσης σ_I μεγαλώνει με την αύξηση της σ_c και τη μείωση της τ . Άρα:
- ✚ Η κλίση της λοξής ρωγμής βαίνει:
 - μειούμενη στο θλιβόμενο πέλμα οριζοντιούμενη κοντά στην ίνα 2 (θέση μέγιστης αρνητικής τάσης σ_c και μηδενικής τ)
 - αυξανόμενη στο εφελκυσμένο πέλμα κατακορυφούμενη στην εφελκυσμένη ίνα 1 (θέση μέγιστης εφελκυστικής τάσης σ_c και μηδενικής τ).

Γιαυτό οι καμπτοδιατμητική ρωγμή έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχ. 2.

3. Η ΕΝΝΟΙΑ ΚΑΙ ΟΙ ΤΥΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΩΝ ΦΟΡΕΩΝ

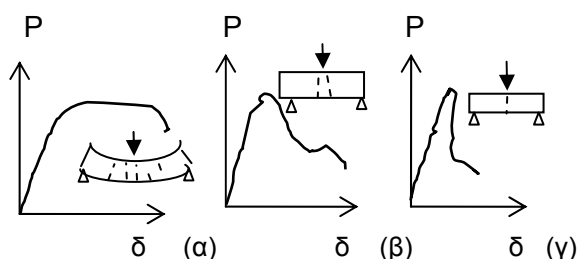
Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα Α, για το σχεδιασμό των φορέων απαιτείται ο υπολογισμός των μεγεθών αστοχίας τους. Η έννοια της αστοχίας είναι συμβατική. Στο κεφάλαιο αυτό διευκρινίζεται η έννοια της αστοχίας για φορείς από οπλισμένο σκυρόδεμα.

3.1 Η Έννοια της Αστοχίας Φορέων

❖ Με τον όρο αστοχία δεν νοείται κατάρρευση του φορέα αλλά αχρήστευσή του.

Ο φορέας που αστοχεί εμφανίζει εκτεταμένη ή έντονη ρηγμάτωση, είτε σημαντικό βέλος και απαιτείται σημαντική αποφόρτιση και επισκευή του ώστε να αποκατασταθεί η φέρουσα ικανότητά του.

Αν δεν αποφορτιστεί, ο φορέας οδηγείται σε κατάρρευση, άμεσα αν η συμπεριφορά του αντιστοιχεί σ' αυτήν που φαίνεται στο Σχ. 1(β) και 1(γ), είτε μετά κάποιο χρονικό διάστημα αν η συμπεριφορά του αντιστοιχεί σ' αυτήν στο Σχ. 1(α).



Σχ. 1.1 Τύποι αστοχίας και αντίστοιχα διαγράμματα συμπεριφοράς P-δ (α) πλάστιμος, (β) ψαθυρός, (γ) ακαριαίος

3.2 Οι Τρεις Τύποι Αστοχίας

3.2.1 Πλάστιμη Αστοχία

Αν η αστοχία του φορέα είναι αυτή στο Σχ. 1(α) και στην εικόνα 1(α), η αστοχία αποκαλείται πλάστιμη.

Χαρακτηρίζεται από εκτεταμένη (καμπτική) ρηγμάτωση (περισσότερες της μίας ρωγμές μικρού ανοίγματος) και σημαντικό βέλος. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να αποφευχθεί η κατάρρευση του φορέα, γιατί:

- Εμφανίζονται ενδείξεις της επαπειλούμενης κατάρρευσης (με τη μορφή σημαντικής ρηγμάτωσης και βέλους του φορέα), και
- Υπάρχει χρονικό περιθώριο για αποφόρτιση του φορέα.

3.2.2 Ψαθυρή αστοχία

Αν η συμπεριφορά του φορέα είναι αυτή στο Σχ. 1(β), η αστοχία του αποκαλείται ψαθυρή και χαρακτηρίζεται από εντοπισμένη ρηγμάτωση (μία ή δύο μόνον ρωγμές μεγάλου εύρους) και μικρό βέλος. Η αστοχία αυτή δεν είναι επιθυμητή γιατί:

- Δεν εμφανίζονται αρκετές ενδείξεις της επερχόμενης κατάρρευσης, και
- Δεν υπάρχει αρκετό χρονικό περιθώριο για την αποφόρτιση του φορέα ώστε να αποφευχθεί η κατάρρευση.



(α)



(β)

Εικόνα 1.1 (α) Πλάστιμη (καμπτική) αστοχία (β) Ψαθυρή (διατμητική) αστοχία

3.2.3 Ακαριαία Αστοχία

Αν η συμπεριφορά του φορέα είναι αυτή στο Σχ. 1(γ), δεν υπάρχει καθόλου περιθώριο για αποφόρτιση του φορέα, η αστοχία του είναι ακαριαία και ισοδυναμεί με κατάρρευση του φορέα. Ο τύπος αυτός αστοχίας χαρακτηρίζεται φορείς από άοπλο σκυρόδεμα.

4. ΤΥΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΦΟΡΕΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕ/ΜΑ

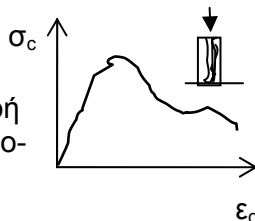
Στην ενότητα Ε, κεφ. 1, 8 και 11, σχολιάζονται οι τύποι ρηγμάτωσης θλιπτήρων και ελκυστήρων των φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα για την καμπτοδιατμητική και στρεπτική επιπόνηση. Παρακάτω περιγράφεται και εξηγείται ο τύπος της οριακής κατάστασης της ρηγμάτωσης, δηλ. της αστοχίας των φορέων με έμφαση στην πλαστιμότητα ή μη της αστοχίας του φορέα.

4.1 Η Ψαθυρότητα της Διατμητικής Αστοχίας

Όπως εντοπίζεται στην ενότητα Ε, κεφ. 8, η διατμητική αστοχία εμφανίζεται με τη μορφή:

- ❖ Λοξής σύνθλιψης του σκυροδέματος λόγω ανεπάρκειας του λοξού θλιπτήρα του φορέα (περίπτωση φορέων με ανεπαρκές πλάτος). ή
- ❖ Μεμονωμένης λοξής ρωγμής με διακριτά χείλη, λόγω ανεπάρκειας του λοξού ή εγκάρσιου ελκυστήρα του φορέα.

Η πρώτη περίπτωση της σύνθλιψης του σκυροδέματος είναι σαφώς ψαθυρή αστοχία, καθώς η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε θλίψη είναι, όπως φαίνεται από το διάγραμμα συμπεριφοράς του σκυροδέματος στο σχήμα, ψαθυρή.



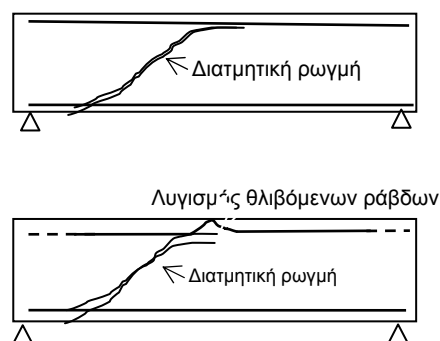
Η δεύτερη περίπτωση αστοχίας λόγω της διακριτής λοξής ρηγμάτωσης θα ανεμένετο να είναι πιο πλαστιμη, καθώς η παρουσία των εγκάρσιων ελκυστήρων του οπλισμού (των συνδετήρων) παρεμποδίζει την ανεξέλεγκτη εξέλιξη της ρηγμάτωσης αυτής.

Εν τούτοις και αυτή η περίπτωση αστοχίας είναι ψαθυρή γιατί, όπως φαίνεται στο Σχ. 1 και την εικόνα 1, οι διατμητικές ρωγμές:

- Συναντούν τον διαμήκη εφελκόμενο οπλισμό σε θέση κοντά στην αγκύρωσή του και καταστρέφοντας τη συνάφεια οπλισμού και σκυροδέματος στη θέση αυτή οδηγούν σε καταστροφή της αγκύρωσης του διαμήκους εφελκόμενου οπλισμού.
- Συναντούν τον διαμήκη θλιβόμενο οπλισμό σε θέση κοντά στη μέγιστη καμπτική επιπόνηση και καταστρέφοντας τοπικά τη συνάφεια του θλιβόμενου οπλισμού, οδηγούν, όπως φαίνεται στο Σχ. 1 σε πρόωρο λυγισμό του με αποτέλεσμα εκτίναξη του σκυροδέματος της επικάλυψης, αποδιοργάνωση του διαμήκους θλιπτήρα και απότομη αστοχία.

Σημειώνεται ότι:

- ❖ Λόγω της ταχείας εξέλιξης της διατμητικής αστοχίας, διατμητική ρηγμάτωση εμφανίζεται συνήθως στο ένα μόνο διατμητικό μήκος του φορέα (κι αν είναι ίδια η τιμή της τέμνουσας και, άρα, και η ένταση των λοξών ράβδων και στα δύο διατμητικά μήκη).

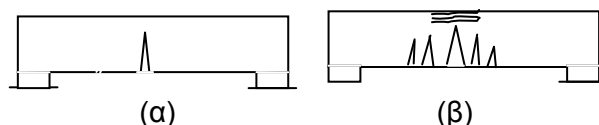


Σχ. 4.1 Διατμητική αστοχία

4.2 Η Πλαστιμότητα της Καμπτικής Αστοχίας

Η καμπτική αστοχία είναι, εν γένει, πλαστιμη. Όπως φαίνεται στο Σχ. 2, οι καμπτικές ρωγμές:

- Δεν οδηγούν σε αστοχία της αγκύρωσης του διαμήκους εφελκόμενου οπλισμού, γιατί δεν τον συναντούν σε θέση κοντά στην αγκύρωσή του. Η ράβδος του οπλισμού εκτείνεται σημαντικά πέραν από τη θέση της καμπτικής ρηγμάτωσης, τουλάχιστον κατά το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης.
- Δεν συναντούν το θλιβόμενο οπλισμό και δεν οδηγούν σε πρόωρο λυγισμό του.
-



Σχ. 4.2 (α) Καμπτική ρηγμάτωση, (β) Καμπτική αστοχία

Λόγω της βραδύτερης, πιο παρατεταμένης, εξέλιξης της καμπτικής αστοχίας των φορέων από Ο.Σ, ο φορέας μπορεί να αστοχήσει σε περισσότερες από μία κρίσιμες θέσεις εμφανίζοντας περισσότερες από μία καμπτικές ρωγμές σε κάθε θέση, όπως φαίνεται στο Σχ 2(β).

4.3 Η Μειωμένη Πλαστιμότητα της Καμπτοδιατμητικής Αστοχίας

Στην περίπτωση ταυτόχρονης καμπτικής και διατμητικής αστοχίας, δηλ. στην περίπτωση καμπτοδιατμητικής αστοχίας, αποφεύγονται οι δυσμενείς παρενέργειες του λυγισμού του θλιβόμενου οπλισμού και της ολίσθησης του εφελκυσμένου οπλισμού που παρατηρείται στην περίπτωση της καθαρά διατμητικής αστοχίας που σχολιάστηκε στο κεφ. 1.



Σχ. 4.3 Καμπτοδιατμητική αστοχία

Οι λοξές ρωγμές εμφανίζονται στην περιοχή του φορέα μεταξύ της μέγιστης τέμνουσας και της μέγιστης ροπής.

Οι λοξές ρωγμές, λόγω των σημαντικών καμπτικών εφελκυστικών τάσεων στη θέση του διαμήκους ελκυστήρα, πλησιάζοντας στο εφελκυσμένο πέλμα του φορέα κατακορυφώνονται, όπως φαίνεται στο Σχ. 3, με αποτέλεσμα οι λοξές ρωγμές να μην συναντούν τον διαμήκη εφελκυσμένο οπλισμό κοντά στην αγκύρωσή του και να αποφεύγεται η ολίσθησή του και η ψαθυρότητα που συνεπάγεται.

Η αστοχία είναι πιο παρατεταμένη και, γι'αυτό εμφανίζονται, όπως φαίνεται στο Σχ. 3, περισσότερες από μία καμπτοδιατμητικές ρωγμές.

4.4 Η Ψαθυρότητα της Αστοχίας της Αγκύρωσης του Οπλισμού

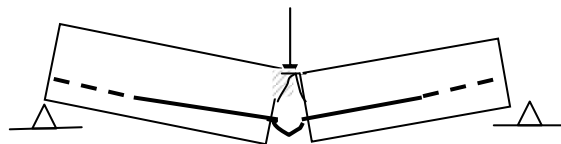
(Βλ. και Ενότητα Κ)

Όπως εντοπίστηκε στην ενότητα Α, κεφ. 2, προϋπόθεση για την παραμόρφωση και ένταση ενός φορέα είναι η μετακίνησή του να είναι παρεμποδιζόμενη.

Ομοίως, προϋπόθεση για την παραμόρφωση και την ένταση των ράβδων του χάλυβα είναι η επιμήκυνσή τους να είναι παρεμποδιζόμενη.

Οι ράβδοι του χάλυβα παραμορφώνονται και εντείνονται μόνον αν στηρίζονται σε κάποια θέση τους, δηλ. αν είναι αγκυρωμένες στο σκυρόδεμα, αν είναι κολλημένες σ'αυτό.

Όπως μία δοκός, αν υποχωρήσουν οι στηρίξεις της, απλά κατέρχεται χωρίς να παραμορφώνεται και, κατά συνέπεια, χωρίς να εντείνεται, έτσι και μια ράβδος χάλυβα αν δεν είναι αγκυρωμένη, απλά ολισθαίνει χωρίς να εντείνεται και ο φορέας παραμένει άοπλος και αστοχεί ακαριαία.



Σχ. 4.3 Αστοχία αγκύρωσης

Γι αυτό:

- ❖ **αστοχία της αγκύρωσης των ράβδων του οπλισμού, λόγω ελλιπούς μήκους αγκύρωσής τους, είτε κακής επαφής τους με το σκυρόδεμα (π.χ. κακή συμπίκνωση του σκυροδέματος), οδηγεί σε κατάρρευση του φορέα.**

4.5 Σχεδιασμός των Φορέων για Καμπτική Αστοχία

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι φορείς πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να αστοχήσουν καμπτικά.

5. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΦΟΡΕΙΣ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Τα μεγέθη αστοχίας του φορέα προκύπτουν όταν αστοχήσουν τα υλικά του, το σκυρόδεμα και ο χάλυβας.

Λόγω του διαφορετικού διαγράμματος συμπεριφοράς τους η αστοχία έχει διαφορετική έννοια για κάθε υλικό.

5.1 Η Μονοσήμαντη Τιμή της Παραμόρφωσης Αστοχίας ϵ_{cu} του Σκυροδέματος

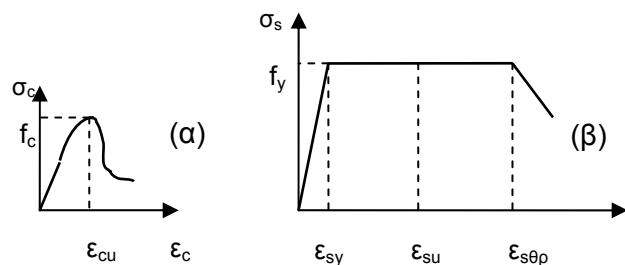
Στο σκυρόδεμα, όπως φαίνεται από το διάγραμμα συμπεριφοράς του στο Σχ. 1(α), η αντοχή του παραπέμπει σε συγκεκριμένη παραμόρφωσή του. Μετά την οριακή αυτή τιμή ϵ_{cu} της παραμόρφωσης η τάση του εμφανίζει απότομη πτώση και το σκυρόδεμα θραύεται (συνθλίβεται).

❖ Η οριακή αυτή παραμόρφωση αστοχίας ϵ_{cu} είναι της τάξεως του:

$$\epsilon_{cu} = 3,5\% \text{ για καμπτική επιπόνηση} \\ (\epsilon_{cu} = 2\% \text{ για αξονική επιπόνηση})$$

5.2 Η Μη Μονοσήμαντη Παραμόρφωση Αστοχίας ϵ_{su} του Οπλισμού

Στο χάλυβα η αντοχή του δεν παραπέμπει, όπως φαίνεται στο Σχ. 1(β), σε συγκεκριμένη παραμόρφωσή του. Η αστοχία του είναι παρατεταμένη. Ο χάλυβας είναι όλκιμο (πλάστιμο) υλικό σε αντίθεση με το σκυρόδεμα που είναι ψαθυρό υλικό.



Σχ. 5.1 Διαγράμματα σ-ε για
(α) σκυρόδεμα
(β) χάλυβα

Για παραμορφώσεις μεγαλύτερες από την παραμόρφωση ϵ_y διαρροής ($\epsilon_y = f_{sy}/E_s = 2$ έως 3‰) μέχρι την παραμόρφωση κατά τη θραύση του (της τάξεως του 100‰) η τάση του σ_s είναι ίση με τη μέγιστη τιμή της f_s (στους υπολογισμούς θεωρείται απλοποιητικά ότι η

τάση διαρροής του f_{sy} είναι και η μέγιστη τάση του f_s).

5.3 Η Έννοια της Αστοχίας των Ελκυστήρων του Χάλυβα στην Καμπτική Επιπόνηση

Αν στην κρίσιμη διατομή ενός φορέα θραυστούν είτε ο διαμήκης ελκυστήρας είτε ο εγκάρσιος ελκυστήρας, ο φορέας θα παραμείνει άοπλος στη θέση αυτή, θα διαχωριστεί στα δύο και θα καταρρεύσει.

Στο κεφ. 1 εντοπίστηκε ότι αστοχία ενός φορέα δεν σημαίνει κατάρρευσή του, αλλά αχρήστευσή του, αστοχία της λειτουργίας του.

Γι' αυτό:

❖ Αστοχία του χάλυβα ενός φορέα δεν σημαίνει θραύση του.

Για να εξασφαλιστεί ότι ο φορέας θα φθάσει τη μέγιστη ικανότητά του αλλά δεν θα καταρρεύσει, οι ράβδοι του χάλυβα πρέπει να φθάσουν στη μέγιστη τάση τους, την αντοχή τους, αλλά δεν πρέπει να θραυστούν.

Για να φθάσουν οι ράβδοι τη μέγιστη ικανότητά τους πρέπει:

➤ Η παραμόρφωση των ράβδων να είναι μεγαλύτερη ή ίση με την παραμόρφωση διαρροής ϵ_y του χάλυβα.

Για να μην θραυστούν οι ράβδοι του οπλισμού πρέπει:

➤ η παραμόρφωση των ράβδων να είναι μικρότερη από την παραμόρφωση θραύσεως $\epsilon_{sθρ}$ του χάλυβα.

Η παραμόρφωση θραύσεως του χάλυβα είναι της τάξεως του 100 έως 200%, ανάλογα με την ποιότητα και τρόπο παραγωγής του χάλυβα.

Για να υπάρχει ένα περιθώριο ασφαλείας (ότι δεν θα θραυστεί ο οπλισμός), πρέπει:

➤ η παραμόρφωση του χάλυβα κατά την αστοχία του φορέα δεν πρέπει να ξεπεράσει μια οριακή τιμή η οποία δηλώνεται ως η παραμόρφωση αστοχίας του χάλυβα ϵ_{su} .

Η τιμή της προκύπτει διαιρώντας την παραμόρφωση θραύσεως $\epsilon_{sθρ}$ με έναν συντελεστή ασφαλείας*.

Συμπερασματικά:

- ❖ Κατά την αστοχία ενός φορέα η παραμόρφωση ϵ_s του χάλυβα πρέπει να είναι:

$$\epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{su}$$

5.4 Η Τιμή της Παραμόρφωσης Αστοχίας ϵ_{su} του Χάλυβα στους Κανονισμούς

Η τιμή της παραμόρφωσης αστοχίας ϵ_{su} των ράβδων του οπλισμού αυξάνεται** με κάθε αναθεώρηση των κανονισμών.

Πριν 20 περίπου χρόνια ήταν 5‰, πριν δέκα χρόνια ορίστηκε 10‰, τα τελευταία χρόνια τέθηκε 20‰ και πρόσφατα αυξήθηκε σε:

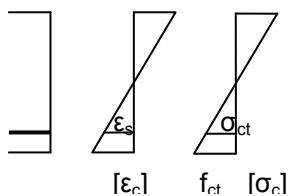
$$\epsilon_{su} = 68 \text{ ‰}$$

5.5 Παραμόρφωση Αστοχίας ϵ_{su} και Άνοιγμα Ρωγμών

Οι ράβδοι του οπλισμού λόγω της συνάφειάς τους με το σκυροδέμα παρακολουθούν τις παραμορφώσεις του σκυροδέματος που τις περιβάλλει.

Τη στιγμή αμέσως πριν την εμφάνιση των ρωγμών η παραμόρφωση του εφελκόμενου οπλισμού που είναι ίδια με την παραμόρφωση του εφελκόμενου σκυροδέματος είναι:

$$\epsilon_s = \epsilon_{ct} = \max \sigma_{ct} / E_c = f_{ct} / E_c$$



Σχ. 5.2 Διάγράμματα παραμορφώσεων και τάσεων του σκυρ/τος καθ' ύψος του φορέα—τιμές παραμόρφωσης και τάσης του εφελκόμενου οπλισμού

Επειδή η εφελκυστική αντοχή f_{ct} του σκυροδέματος είναι αμελητέα, η παραμόρφωση του χάλυβα ϵ_s πριν την εμφάνιση των ρωγμών είναι αμελητέα.

Γι' αυτό:

- ❖ Η παραμόρφωση ϵ_s των ράβδων του οπλισμού μπορεί να θεωρηθεί μόνον αυτή που οφείλεται στο άνοιγμα των ρωγμών.

Τη στιγμή της εμφάνισης των ρωγμών οι ράβδοι υφίστανται επιμήκυνση Δl ίση με το άνοιγμα w των ρωγμών και μέση ανηγμένη παραμόρφωση ϵ_s ίση με $\Delta l/l = w/l$, όπου l είναι το μήκος στο οποίο εμφανίζονται οι ρωγμές. Έτσι:

- ❖ Μέση παραμόρφωση του εφελκόμενου διαμήκους χάλυβα ίση με $\epsilon_s = 20\text{‰}$ σε ένα τμήμα μήκους $l = 1000 \text{ mm}$ σημαίνει ότι το άνοιγμα των καμπτικών ρωγμών στην περιοχή αυτή είναι ίσο με $w = \epsilon_s \cdot \Delta l = 20/1000 \times 1000 = 20 \text{ mm}$.

Ομοίως, αν εμφανιστεί λοξή ρωγμή με άνοιγμα 10 mm (μετρούμενο κατά τη διεύθυνση του συνδετήρα), η (μέση) παραμόρφωση του εγκάρσιου συνδετήρα στη θέση της ρωγμής είναι, αν το μήκος του κατακόρυφου σκέλους του συνδετήρα είναι 500 mm, ίση με $\epsilon_s = w/\Delta l = 10/500 = 0,02 = 2\text{‰}$.

5.6 Παραμόρφωση Αστοχίας Χάλυβα και Πλαστιμότητα Φορέα

Όπως σχολιάστηκε παραπάνω, όσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση του εφελκόμενου χάλυβα, τόσο μεγαλύτερο είναι το συνολικό άνοιγμα των ρωγμών και, προφανώς και το βέλος του φορέα.

Γι' αυτό:

- ❖ Όσο μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση ϵ_{su} του χάλυβα κατά την αστοχία του τόσο μεγαλύτερη είναι η πλαστιμότητα του φορέα, δηλ. τόσο πιο πλάστιμος (παρατεταμένος) είναι ο τύπος της αστοχίας του, καθώς εμφανίζει επαρκείς ενδείξεις της επαπειλούμενης κατάρρευσής του.

* Η συνεχής αναθεώρηση της τιμής της παραμόρφωσης αστοχίας του χάλυβα ενδέχεται να οφείλεται, εν μέρει, στη συνεχώς αυξανόμενη με το χρόνο σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή της Αττικής, περιοχή ιδιαίτερου ενδιαφέροντος των συμμετεχόντων στις ομάδες διαμόρφωσης των κανονισμών. Όπως σχολιάζεται στο κεφ. 5.6, μεγαλύτερη τιμή της παραμόρφωσης αστοχίας του εφελκόμενου χάλυβα σημαίνει μεγαλύτερη πλαστιμότητα του φορέα και, για αυτό, καλύτερη σεισμική συμπεριφορά του.