

Ενότητα **Λ**

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ



1. ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Ο ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΩΣ ΕΝΑΡΜΟΝΙΣΗ ΑΝΤΙΤΙΘΕΜΕΝΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ

1.1 Στόχοι και Κριτήρια του Σχεδιασμού

Με βάση τον σχεδιασμό σε κατάσταση αστοχίας (Ο.Κ.Α) εξασφαλίζεται με αρκετό περιθώριο ασφάλειας ότι ο φορέας όταν θα δεχθεί τα φορτία του δεν θα αστοχήσει.

Εκτός, όμως, από την ασφάλεια αυτή πρέπει να ελεγχθεί αν ο φορέας όπως σχεδιάστηκε είναι και λειτουργικός. Κριτήρια για την λειτουργικότητα του φορέα αποτελούν, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα Α, το μέγεθος των ρωγμών του και του βέλους του.

Αυξημένο άνοιγμα ρωγμών αυξάνει τον κίνδυνο και επιταχύνει την διάβρωση του οπλισμού και ο περιορισμός του είναι ιδιαίτερα σημαντικός σε φορείς που βρίσκονται σε διαβρωτικό περιβάλλον, όπως δεξαμενές, παραθαλάσσιες κατασκευές, κ.λ.π.

Αυξημένο βέλος εκτός από λειτουργικά προβλήματα που ενδέχεται να ανακύπτουν, δίνοντας την αίσθηση επικείμενης αστοχίας έχει δυσμενή επιρροή στην ψυχολογία των χρηστών της κατασκευής.

Γιαυτό μετά τον σχεδιασμό του φορέα σε κατάσταση αστοχίας απαιτείται ο έλεγχος του ανοίγματος των ρωγμών του και του βέλους του για τα φορτία που θα δεχθεί, τα φορτία λειτουργίας, τα φορτία του με τις χαρακτηριστικές τους τιμές.

Για συνήθεις φορείς ο έλεγχος αυτός παραλείπεται, καθώς τα εμπειρικά κριτήρια (βλ. Ενότητα κεφ. Δ2) με βάση τα οποία γίνεται η επιλογή των διαστάσεων και οι κανονιστικές διατάξεις για την τοποθέτηση του οπλισμού (σχετικά με την διάμετρο και την απόσταση των ράβδων του οπλισμού καθώς και το μέγεθος της επικάλυψής του, βλ. Ενότητα Δ1)) περιορίζουν το μέγεθος των ρωγμών και των βελών.

Για ειδικούς φορείς, όμως, ο έλεγχος σε κατάσταση λειτουργικότητας δεν μπορεί να παραλειφθεί.

Για να εξασφαλιστεί η λειτουργικότητα του φορέα πρέπει το άνοιγμα των ρωγμών και το βέλος του

να μην υπερβαίνει τις αντίστοιχες επιτρεπόμενες τιμές.

$$w_R \leq \epsilon_{TP} w \text{ και } \delta_R \leq \epsilon_{TP} \delta,$$

όπου:

w_R και δ_R είναι το άνοιγμα της ρωγμής και το βέλος στην κρίσιμη διατομή του φορέα για τα φορτία λειτουργίας, και

$\epsilon_{TP} w$ και $\epsilon_{TP} \delta$ είναι οι επιτρεπόμενες τιμές ανάλογα με τη χρήση και το περιβάλλον του φορέα και δίνονται από πίνακες που υπάρχουν στους κανονισμούς.

Για συνήθεις φορείς, όπως σχολιάζεται στο κεφ. 3, η τιμή του $\epsilon_{TP} \delta$ τίθεται ίση με το 1/300 του ανοίγματος του φορέα (απόσταση μεταξύ μηδενικών ροπών), η δε επιτρεπόμενη τιμή του ανοίγματος των ρωγμών κυμαίνεται από 0,1 έως 0,4 mm, ανάλογα με τη βλαπτικότητα των συνθηκών του περιβάλλοντος του φορέα (για μέτριες συνθήκες τίθεται ίση με 0,2 mm).

1.2 Η Αντίφαση των Κριτηρίων των Δύο Σχεδιασμών σε ΟΚΛ και ΟΚΑ

Είναι προφανές ότι οι στόχοι και τα κριτήρια των δύο σχεδιασμών των φορέων για τις δύο καταστάσεις: ασφάλειας έναντι αστοχίας (ΟΚΑ) και λειτουργικότητας (ΟΚΛ), είναι αντίθετοι.

Στην ΟΚΑ τα κριτήρια καλού σχεδιασμού είναι σημαντικό άνοιγμα ρωγμών και σημαντικό βέλος ενώ στην ΟΚΛ τα αντίστοιχα κριτήρια είναι μικρό άνοιγμα ρωγμών και μικρό βέλος.

Γιαυτό, αντίθετες θα είναι σε μεγάλο βαθμό και οι κατευθύνσεις στην επιλογή των επί μέρους μεγεθών.

Για παράδειγμα, ενώ για την ΟΚΑ απαιτείται, σχεδιασμός υποοπλισμένων φορέων, με μικρό A_s και μεγάλο h , για την ΟΚΛ απαιτείται σχεδιασμός υπεροπλισμένων κατασκευών, με μεγάλο A_s και μικρό h , ώστε να αναπτύσσεται μικρή παραμόρφωση του χάλυβα, αφού και το άνοιγμα των ρωγμών και το βέλος είναι ανάλογα της παραμόρφωσης του οπλισμού.

1.3 Ο Σχεδιασμός ως Εναρμόνιση Δύο Αντιτιθέμενων Επιρροών

Ο επιτυχής σχεδιασμός των φορέων προκύπτει, ως δημιουργική δραστηριότητα και βασίζεται:

- στην τομή, **τη συνάντηση των δύο οπτικών**, της λειτουργικότητας και της αστοχίας,
- στην εκτίμηση της βαρύτητας κάθε οπτικής για την περίπτωση του συγκεκριμένου φορέα, καθώς π.χ. το άνοιγμα των ρωγμών λειτουργίας είναι πολύ κρίσιμο για φορείς σε

ιδιαίτερα διαβρωτικά περιβάλλοντα, όπως δεξαμενές τοξικών υλών, το βέλος λειτουργίας ιδιαίτερα κρίσιμο σε χώρους χρηστών με καρδιακή ευαισθησία, αλλά όχι σε αποθήκες καταναλωτικών αγαθών, η ασφάλεια έναντι αστοχίας είναι πολύ κρίσιμη για φορείς σε χώρους συνωστισμού. κ.λ.π.

- στην επίγνωση της περιοχής ισχύος όλων των συμπερασμάτων και κανονιστικών διατάξεων

2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΙΑ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΡΩΓΜΩΝ

Αν s_r είναι η απόσταση διαδοχικών ρωγμών, και ϵ_s είναι η παραμόρφωση του χάλυβα στη θέση της ρωγμής θα είναι:

$$w = \epsilon_s \cdot s_r$$

Για τον υπολογισμό του ανοίγματος των ρωγμών απαιτείται ο υπολογισμός της παραμόρφωσης του χάλυβα στην κρίσιμη διατομή για τα φορτία της λειτουργίας και η απόσταση των ρωγμών στην ίδια θέση και για τα ίδια φορτία.

2.1 Υπολογισμός Παραμόρφωσης ϵ_s

Στην ενότητα Η περιγράφηκε η διαδικασία υπολογισμού της παραμόρφωσης ϵ_s κατά την αστοχία του φορέα.

Ο υπολογισμός της για τα φορτία λειτουργίας υπακούει στην ίδια λογική.

Η M_R που αναπτύσσεται στο φορέα για τα φορτία λειτουργίας που είναι ίδια με την M_s που ασκείται είναι αποτέλεσμα ανάπτυξης του ζεύγους εσωτερικών δυνάμεων F_s και F_c .

Η σχέση ισοδυναμίας ροπών είναι:

$$M_s = M_R = F_s z = A_s \cdot \sigma_s \cdot z$$

Αν προκύψει η τιμή της σ_s η παραμόρφωση θα είναι: $\epsilon_s = \sigma_s / E_s$, καθώς, αφού η ροπή είναι σημαντικά μικρότερη από την M_{ru} η τάση σ_s θα είναι μικρότερη της f_y .

Ο προσδιορισμός του z προκύπτει με την ίδια λογική όπως και στην κατάσταση αστοχίας με τις εξής διαφοροποιήσεις:

- Η ϵ_c παραμένει άγνωστη. Δεν ισούται με 3.5‰ αφού δεν έχει αστοχήσει το σκυρόδεμα.
- Η κατανομή των τάσεων σ_c του σκυροδέματος δεν είναι παραβολοειδής, αλλά τριγωνική όπως φαίνεται στο Σχ. 1, αφού το διάγραμμα $[\sigma_c - \epsilon_c]$ του σκυροδέματος στην περιοχή μικρών τάσεων είναι περίπου γραμμικό

Γιαυτό αλλάζει η διατύπωση της F_c και η θέση εφαρμογής της.

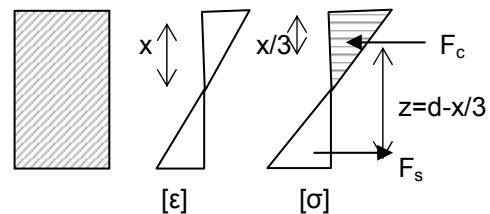
Η διατύπωση της ισοδυναμίας των αξονικών και

των ροπών καθώς και της επιπεδότητας των διατομών δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\epsilon_{s1} / \epsilon_c = (d-x)/x \quad (1)$$

$$M_s = M_R = F_{s1} \cdot z = A_{s1} \cdot E_s \cdot \epsilon_{s1} \cdot (d-x/3) \quad (2)$$

$$F_s = F_c \Rightarrow A_{s1} \cdot E_s \cdot \epsilon_{s1} = 1/2 \cdot b \cdot x \cdot E_c \cdot \epsilon_c \quad (3)$$



Σχ. 2.1 Διάγραμμα $[\epsilon]$, $[\sigma]$ και εσωτερικών δυνάμεων F καθύψος διατομής καμπτόμενου φορέα σε κατάσταση λειτουργίας

Επιλύοντας τη σχέση (1) ως προς το ϵ_c και αντικαθιστώντας την τιμή του στη σχέση (2) προκύπτουν δύο εξισώσεις η (2) και η (3) με δύο αγνώστους: την ϵ_{s1} και το x , από την επίλυση των οποίων προκύπτει η ζητούμενη τιμή της ϵ_{s1} .

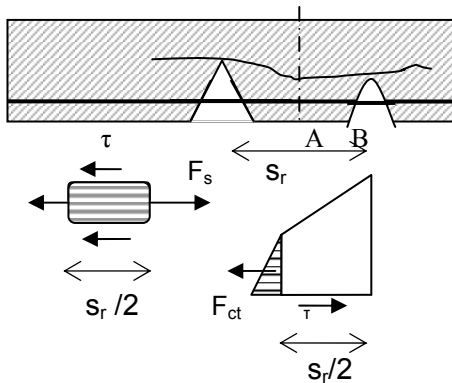
Η τιμή της M_s είναι η τιμή της ροπής συναρτησεί των χαρακτηριστικών τιμών των φορτίων.

2.2 Υπολογισμός Απόστασης Καμπτικών Ρωγμών

Η απόσταση των ρωγμών υπολογίζεται με βάση εμπειρικούς τύπους που δίνονται σε κανονιστικά βοηθήματα και διατάξεις.

Μια προσεγγιστική απλοποιητική σχέση για το μέγεθος της απόστασης των ρωγμών, για να αναδειχθούν τα βασικά μεγέθη τα οποία το καθορίζουν μπορεί να προκύψει από την ισορροπία ράβδου οπλισμού και σκυροδέματος με τις δυνάμεις, όπως φαίνονται στο παραπάνω Σχ. 2.

Επειδή στις θέσεις των ρωγμών αυξάνεται η τάση του χάλυβα, για την ισορροπία της ράβδου στο τμήμα AB από τη θέση της ρωγμής μέχρι το μέσον της απόστασής της s_r από γειτονική της ρωγμή αναπτύσσονται, όπως αναλύεται στην Ενότητα Θ, κεφ. 2.4, για την ισορροπία της ράβδου διατμητικές τάσεις, τριβές, **οι τάσεις συνάφειας** που ασκούνται από το σκυρόδεμα στη ράβδο.



Σχ. 2.2 Τάσεις και δυνάμεις στο τμήμα μεταξύ διαδοχικών ρωγμών (α) επί της ράβδου του οπλισμού, (β) επί του σκυροδέματος στο τμήμα μεταξύ ράβδου και ουδέτερου άξονα

Ίσες και αντίθετες τάσεις συνάφειας ασκούνται και από τη ράβδο στο σκυρόδεμα.

Από την ισορροπία της ράβδου στο τμήμα AB προκύπτει η σχέση:

$$A_s \cdot \Delta \sigma_s = \tau_m \cdot \pi \cdot \Phi \cdot s_r / 2 \quad (1)$$

Από την ισορροπία του εφελκυσμένου τμήματος του φορέα στο μήκος AB, προκύπτει η σχέση:

$$F_b = \tau_m \cdot \pi \cdot \Phi \cdot s_r / 2 = F_t$$

$$F_t = 1/2 \cdot A_{cef} \cdot \sigma_{ct} = 1/2 \cdot A_{cef} \cdot 1/2 f_{ct} \quad (2)$$

όπου:

A_{cef} είναι το εμβαδόν της εφελκυσμένης ζώνης του φορέα στη θέση αυτή εξαιρουμένου του σκυροδέματος της επικάλυψης.

Από τη σχέση (2) προκύπτει :

$$s_r = 1/8 \cdot A_{cef} / A_s \cdot \pi \cdot \Phi \cdot f_{ct} / \tau_m = \kappa \cdot \Phi / \rho_t \quad (3)$$

όπου:

$\rho_t = A_s / A_{cef}$ είναι το γεωμετρικό ποσοστό του οπλισμού ως προς το εμβαδόν της εφελκυσμένης περιοχής A_{cef} και

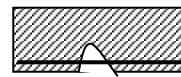
Φ είναι η διάμετρος της ράβδου.

2.3 Τα Μεγέθη Επιρροής του Ανοίγματος των Ρωγμών

Από τη σχέση (3) προκύπτει ότι η απόσταση της ρωγμής και άρα και το άνοιγμά της μειώνεται με:

- Μείωση της διαμέτρου Φ των ράβδων του οπλισμού
- Αύξηση του εμβαδού του οπλισμού A_s
- Μείωση της επικάλυψης και μείωση του πλάτους b (για μείωση του A_{cef})

Σημειώνεται ότι εκτός από την αύξηση του A_s και η μείωση του πλάτους έρχεται σε αντίθεση με τις απαιτήσεις του σχεδιασμού σε κατάσταση αστοχίας, καθώς για αυξημένη τιμή του ϵ_s και άρα μειωμένη τιμή του x απαιτείται, όπως προκύπτει από την ισοδυναμία των αξονικών, αυξημένη τιμή του b .



Τομή



Κάτοψη

Σχ. 2.3 Η επιρροή της επικάλυψης και της μικρής διαμέτρου του οπλισμού στο άνοιγμα των ρωγμών

Αντιφατική είναι, επίσης, και η απαίτηση για μικρή επικάλυψη, καθώς μικρή επικάλυψη αυξάνει τον κίνδυνο διάβρωσης του οπλισμού στις αρτηγμάτωτες θέσεις του φορέα.

2.4 Απόσταση Ρωγμών και (Φυσική) Λογική

Εύκολα συμπεραίνεται η επιρροή της επικάλυψης, καθώς, όπως φαίνεται στο Σχ. 3, όσο μεγαλύτερη είναι η επικάλυψη τόσο σε μεγαλύτερο βάθος παραμένει ανεξέλεκτη η διεύρυνση της ρωγμής η οποία αναχαιτίζεται στη στάθμη των ράβδων του οπλισμού.

Προφανής, επίσης, είναι και η επιρροή της διαμέτρου του οπλισμού, καθώς μικρότερη διάμετρος για δεδομένο εμβαδόν οπλισμού σημαίνει περισσότερες ράβδους και άρα παρεμπόδιση της ανεξέλεκτης διεύρυνσης της ρωγμής σε περισσότερες θέσεις,

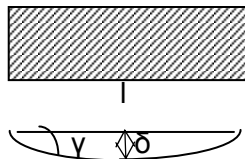
3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΙΑ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΒΕΛΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

3.1 Τιμή Επιτρεπόμενου Βέλους

Το βέλος δ_R στην κατάσταση λειτουργίας του φορέα πρέπει να μην υπερβαίνει μία επιτρεπόμενη τιμή δ_R και η ανίσωση ασφαλείας παίρνει τη μορφή της σχέσης:

$$\delta_R \leq \epsilon \pi \delta_R$$

Για συνήθεις φορείς δεν απαιτείται έλεγχος όταν η λυγηρότητα του φορέα είναι μικρότερη του 20 για δοκούς ή του 30 για πλάκες.



Το επιτρεπόμενο βέλος δίνεται στους κανονισμούς για τα μόνιμα φορτία (πριν τις τοιχοποιίες) της τάξεως του 1/250 και για τα μόνιμα και τα κινητά (μετά τις τοιχοποιίες) της τάξεως του 1/500, όπου l_0 είναι το μήκος του φορέα μεταξύ των θέσεων που σχολιάζεται στο κεφ. 55.3.

Η τιμή αυτή προκύπτει από τον περιορισμό η διατμητική τάση τ που θα αναπτυχθεί στην τοιχοποιία να είναι μικρότερη από την διατμητική αντοχή της.

Αν το μέτρο ολίσθησης G του τοίχου ληφθεί ίσο με 150 MPa και η διατμητική αντοχή ίση με 1 MPa θα είναι, όπως φαίνεται στο σχήμα:

$$\gamma = \delta / (l/2)$$

$$\tau = \gamma \cdot G = 2\delta G / l < ft \Rightarrow \delta / l = ft / (2G) = 1 / (2 \cdot 150)$$

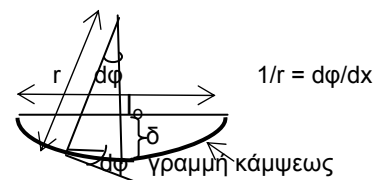
$$\delta / l < 1 / 300$$

Το αναπτυσσόμενο βέλος υπολογίζεται για την κατάσταση λειτουργίας του φορέα (με τις χαρακτηριστικές τιμές φορτίων και τάσεων σκυροδέματος και χάλυβα).

3.2 Υπολογισμός του Βέλους για τα Φορτία Λειτουργίας

Το βέλος δ ενός φορέα εξαρτάται, όπως φαίνεται στο Σχ. 1, από:

1. **το ενεργό ή κρίσιμο μήκος l_0** μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων μηδενικής καμπτικής ροπής,
2. την ακτίνα καμπυλότητας r της γραμμής κάμψης του φορέα, ή το αντίστροφό της $1/r$ που δηλώνεται ως η **καμπυλότητα** του φορέα. (Αν θεωρηθεί η γραμμή κάμψης τόξο κύκλου, r είναι η ακτίνα του κύκλου).



Σχ.3.1 Μεγέθη που καθορίζουν το βέλος δ

➤ Κρίσιμο Μήκος l_0

Για μεμονωμένους φορείς ανοίγματος l με σταθερή διατομή το μήκος l_0 προκύπτει, όπως

$$d\phi = dl/r = \epsilon_c \cdot dl/x = \epsilon_s \cdot dl/(d-x) = (\epsilon_c + \epsilon_s)/d$$

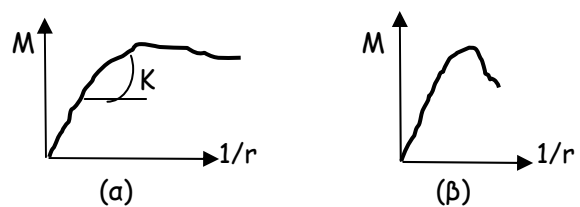
Άρα είναι:

$$\diamond \quad \underline{1/r = (\epsilon_c + \epsilon_s)/d} \quad (1)$$

Όπως προκύπτει από τη σχέση (1) η καμπυλότητα $1/r$ είναι ανάλογη του αθροίσματος των ακραίων παραμορφώσεων και αντίστροφα ανάλογη του στατικού ύψους του φορέα.

• Μεταβολή με την Αύξηση της Ροπής Διάγραμμα M-1/r Ροπών-Καμπυλοτήτων

Οι ακραίες παραμορφώσεις του φορέα είναι αποτέλεσμα της δράσης της ροπής M.



Σχ. 3.4 Διάγραμμα M-1/r για διατομή:
(α) υπεροπλισμένη
(β) υποοπλισμένη

Με την αύξηση της ροπής οι ακραίες παραμορφώσεις στην κρίσιμη διατομή αυξάνονται και, γι' αυτό, αυξάνεται και η καμπυλότητα της διατομής αυτής, όπως φαίνεται στο διάγραμμα M-1/r στο Σχ. 4.

Η μορφή του διαγράμματος είναι, εν γένει, καμπύλη.

Για υπολογιστικούς λόγους τυποποιείται σε ένα τριγωνικό διάγραμμα που φαίνεται στο Σχ. 5 με σημεία καμπής:

Σημείο Ι: έναρξη ρηγμάτωσης της διατομής

Σημείο γ: διαρροή εφελκυσμένου χάλυβα

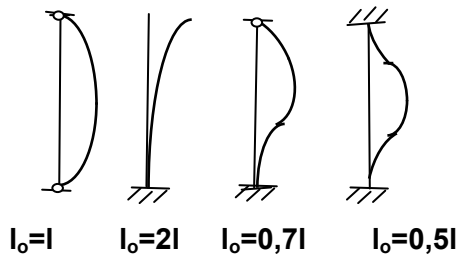
Σημείο υ: (υπολογιστική) αστοχία διατομής

Το διάγραμμα ισχύει για δεδομένη διατομή και αξονική.

• Διαδικασία για τη Σύνταξη του Διαγράμματος M-1/r

Παρακάτω δίνεται η διαδικασία για τον υπολογισμό της τιμής της ροπής M και της καμπυλότητας $1/r$ στα διακριτά αυτά σημεία:

φαίνεται στο Σχ. 2:

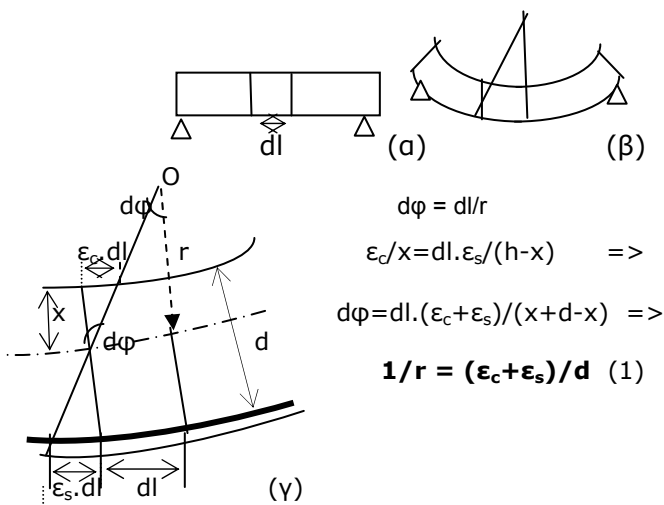


Σχ. 3. 2 Μήκη λυγισμού ανάλογα με το στατικό σύστημα του φορέα

➤ Καμπυλότητα 1/r

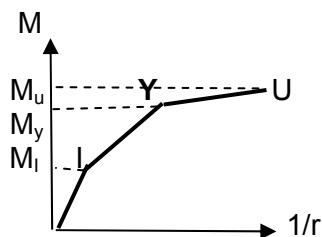
• Συσχέτιση με τις Ακραίες Παραμορφώσεις του Φορέα.

Στο Σχ. 3(α) φαίνεται στοιχειώδες τμήμα του φορέα μήκους dl στην κρίσιμη περιοχή του, στο Σχ. 3(β) η νέα του θέση κατά την επιπόννησή του. Όπως φαίνεται στο μεγενθυμένο Σχ. 3(γ), το τμήμα dl έχει συσταθεί κατά Δdl_1 στην ίνα 2, έχοντας υποστεί μια θλιπτική παραμόρφωση $\epsilon_c = \Delta dl_1/dl$ και έχει εκταθεί στην ίνα 1 κατά Δdl_2 έχοντας υποστεί μια εφελκυστική παραμόρφωση $\epsilon_s = \Delta dl_2/dl$.



Σχ. 3.3 Συσχέτιση καμπυλότητας $1/r$ και παραμορφώσεων ϵ_c και ϵ_s

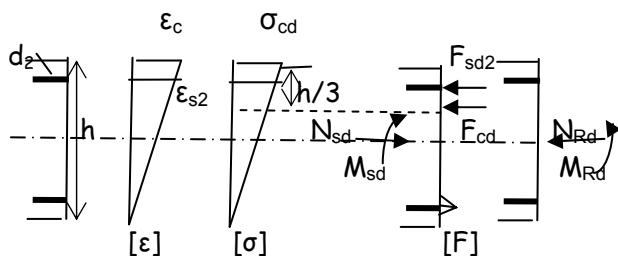
Από τα όμοια τρίγωνα στο Σχ. 3(γ) προκύπτει η σχέση:



Σχ. 3.5 Τυποποιημένο διάγραμμα M-1/r

➤ Σημείο M_y -1/r Έναρξης Ρηγμάτωσης

Θεωρώντας μηδενική την εφελκυστική αντοχή f_{ct} , τη στιγμή πριν τη ρηγμάτωση η ακραία τάση σ_1 και, άρα, και η ακραία παραμόρφωση ϵ_1 της διατομής θα είναι μηδενικές, οπότε το διάγραμμα παραμορφώσεων και τάσεων καθ' ύψος της διατομής είναι, όπως φαίνεται στο Σχ. 6, τριγωνικό.



Σχ. 3.6 Διαγράμματα παραμορφώσεων, τάσεων και εσωτερικών δυνάμεων τη στιγμή της ρηγμάτωσης

Θεωρώντας μηδενική την ϵ_{s1} , λόγω του μικρού μεγέθους της, από τη διατύπωση της ισοδυναμίας των αξονικών και των ροπών καθώς και της επιπεδότητας των διατομών προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\epsilon_{s2}/\epsilon_c = (h-d_2)/h \quad (1)$$

$$N_{sd} = N_{Rd} = F_{cd} + F_{sd2} = \frac{1}{2} \cdot b \cdot h \cdot \sigma_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{sd} \Rightarrow$$

$$N_{sd} = \frac{1}{2} \cdot b \cdot h \cdot E_c \cdot \epsilon_c / 1,5 + A_{s2} \cdot E_s \cdot \epsilon_{s2} / 1,15 \Rightarrow$$

$$\epsilon_c = (1,5 N_{sd} - A_{s2} \cdot E_s \cdot \epsilon_{s2} / 1,15) / (0,5 \cdot b \cdot h \cdot E_c) \quad (2)$$

$$\diamond M_I = M_{Rd} = F_{cd} \cdot (h/2 - h/3) + A_{s2} \cdot E_s \cdot \epsilon_{s2} (h/2 - d_2) \quad (\alpha)$$

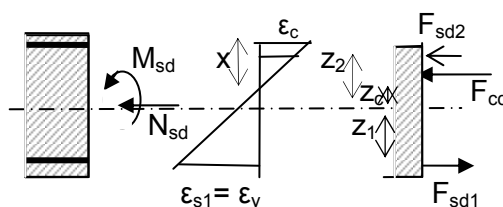
$$\diamond 1/r = (\epsilon_c + 0)/h \quad (\beta)$$

➤ Σημείο M_y -1/r Διαρροή Εφελκυσμένου Οπλισμού

Τίθεται $\epsilon_{s1} = \epsilon_{yd} = f_{yd}/E_s$ και αναζητείται η αντίστοιχη ϵ_c η οποία ικανοποιεί την ισοδυναμία των αξονικών.

Γνωρίζοντας τις ακραίες παραμορφώσεις ϵ_c και ϵ_{s1} προκύπτει η τιμή του x από τη σχέση (1) επιπεδότητας των διατομών:

$$x = d \cdot \epsilon_c / (\epsilon_c + \epsilon_{sy}) \quad (1)$$



Σχ. 7 Διαγράμματα παραμορφώσεων, τάσεων και εσωτερικών δυνάμεων για $\epsilon_{s1} = \epsilon_y$

Από την ισοδυναμία των ροπών προκύπτει η τιμή της M_y από τη σχέση (α):

$$\diamond M_y = F_{cd} \cdot z_c + F_{sd2} \cdot z_2 - F_{sd1} \cdot z_1 = M_{sd(I)} + N_{sd} \cdot e_2 \quad (\alpha^*)$$

Η τιμή της $(1/r)_y$ προκύπτει από τη σχέση:

$$\diamond (1/r)_y = (\epsilon_c + \epsilon_{sy})/d \quad (\beta^*)$$

➤ Σημείο M_u -1/r Αστοχία διατομής

Τίθεται $\epsilon_c = 3,5\%$, και αναζητείται η αντίστοιχη ϵ_{s1} η οποία ικανοποιεί την ισοδυναμία των αξονικών. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με το παραπάνω σημείο.

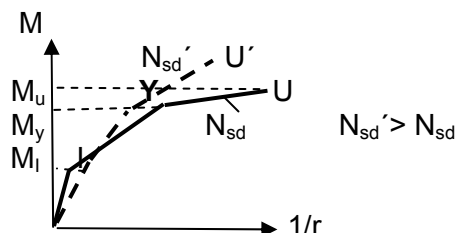
Όπως φαίνεται στο Σχ. 4 και 5, το διάγραμμα M-1/r οριζοντιώνεται μετά τη ροπή διαρροής.

Οι παραμορφώσεις χάλυβα και σκυροδέματος αυξάνονται και αυξάνεται η καμπυλότητα, αλλά η αύξηση της ροπής είναι πολύ μικρή, καθώς μετά την διαρροή του χάλυβα η τάση του, συνεπώς, και η δύναμή του δεν αυξάνει.

Η μικρή αύξηση της ροπής οφείλεται στη μικρή αύξηση του z_c , επειδή μειώνεται το x (λόγω της αύξησης της ϵ_{s1}).

- **Η Επιρροή της N_{sd} στη Μορφή του Διαγράμματος**

Όπως φαίνεται στο Σχ. 8, η αύξηση της N_{sd} μεταβάλλει το διάγραμμα $M-1/r$, ιδιαίτερα ως προς το σημείο U αστοχίας.



Σχ. 3. 8 Η επιρροή της N_{sd} στη μορφή του διαγράμματος $M-1/r$

- **Σημείο M_u-1/r Αστοχία διατομής**

Με την αύξηση της N_{sd} (μέχρι την τιμή $N_{bal} = 0,40 N_{Rdu}$) αυξάνεται, όπως προκύπτει από το διάγραμμα αλληλεπίδρασης ροπής και αξονικής (βλ. Κεφ. 3, Σχ. 1) η καμπτική αντοχή M_{Rdu} , ενώ μειώνεται η παραμόρφωση ϵ_{s1} κατά την αστοχία και, άρα, μειώνεται η καμπυλότητα $(1/r)_u$ αστοχίας.

- **Σημείο M_y-1/r Διαρροή Εφελκυσμένου Οπλισμού**

Από τη σχέση ισοδυναμίας των αξονικών:

$$N_{sd} = N_{sd} = N_{Rd} = F_{cd} + F_{sd2} - F_{sd1}$$

προκύπτει ότι αυξανόμενης της N_{sd} μειώνεται η δύναμη F_{cd} (αφού η F_{sd1} παραμένει σταθερή) και, άρα, μειώνεται η παραμόρφωση ϵ_c και, γι' αυτό, μειώνεται η καμπυλότητα $(1/r)_y$ διαρροής.

Η ροπή διαρροής M_y δεν θα εμφανίσει σημαντική διαφορά, καθώς τη μείωσή της λόγω της μείωσης της F_{cd} αντισταθμίζει η αύξησή της λόγω της αύξησης της απόστασης z_c (βλ. Σχ. 7), αφού θα μειωθεί το x λόγω της μείωσης της παραμόρφωσης ϵ_c .

- **Σημείο M_l-1/r Έναρξης Ρηγμάτωσης**

Όπως προκύπτει από τις σχέσεις (α) και (β) στο κεφ.2.3.3 με την αύξηση της N_{sd} αυξάνει τόσο η καμπυλότητα όσο και η ροπή ρηγμάτωσης.

- **Συσχέτιση της Απόκλισης e_2 με το Κρίσιμο Μήκος l_0 και την Καμπυλότητα $1/r$**

Όπως φαίνεται στο Σχ. 1 και 3, η καμπυλότητα $1/r$ είναι ίση με την κλίση $d\phi/dx$ της γραμμής κάμψεως η οποία είναι η πρώτη παράγωγος d^2y/dx^2 της εξίσωσης της γραμμής κάμψεως.

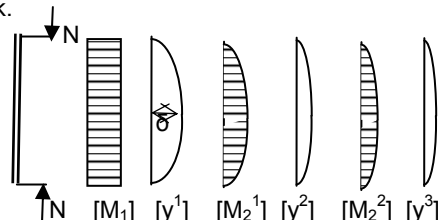
Αποδεικνύεται ότι για οποιαδήποτε μορφή της γραμμής κάμψεως ενός φορέα η πρώτη παράγωγος της εξίσωσής της και, άρα, η καμπυλότητα $1/r$ στην κρίσιμη διατομή του φορέα δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$\diamond \quad 1/r = \delta \cdot 10 / l_0^2 \quad (1) \Rightarrow$$

$$\diamond \quad \delta = (l_0^2 / 10) \cdot 1/r \quad (2)$$

Ο αριθμητικός συντελεστής 10 στις παραπάνω σχέσεις εμφανίζει ανάλογα με τη μορφή της γραμμής κάμψης μικρή απόκλιση από την τιμή 10, η οποία, όπως αποδεικνύεται στην υποσημείωση*, είναι αμελητέα.

Για αμφιαρθρωτό φορέα ανοίγματος l_0 επιτινόμενο με θλιπτικό φορτίο N_{sd} με εκκεντρότητα e_1 το διάγραμμα των ροπών M_1 είναι ορθογωνικό και η εξίσωση της γραμμής κάμψεως είναι, όπως φαίνεται στο Σχ. 9(α) παραβολή 2^{ου} βαθμού. Λόγω του πρόσθετου παραβολικού διαγράμματος ροπών M_2 η γραμμή κάμψεως είναι παραβολή 4^{ου} βαθμού κ.ο.κ.



$$y^1 = \delta^1 \cdot 4x/l_0 \cdot (1-x/l_0) \text{ παραβολή } 2^{\text{ου}} \text{ βαθμού}$$

$$\Rightarrow d^2y/dx^2 = 1/r^1 = \delta^1 \cdot 8 / l_0$$

$$y^2 = \delta^2 \cdot 16/5 \cdot (x/l_0 - 2x^3/l_0^3 + x^4/l_0^4) \text{ παραβολή } 4^{\text{ου}} \text{ βαθμού}$$

$$\Rightarrow d^2y/dx^2 = 1/r^2 = 192/5 \cdot \delta^2 \cdot 1/l_0 \cdot (-x/l_0 + x^2/l_0^2) \text{ κ.ο.κ.}$$

$$\text{Για } x = l_0/2 \Rightarrow 1/r = e_2^2 \cdot 9,6/l_0 \Rightarrow \underline{e_2^2 = 1/r \cdot l_0/9,6}$$

➤ **Η Επιρροή του Ερπυσμού του Σκυροδέματος στην Μακροχρόνια τιμή των Βελών του Φορέα**

Το βέλος δ μακροχρόνια αυξάνει λόγω του **ερπυσμού του σκυροδέματος**.

Το σκυρόδεμα με το χρόνο συστέλλεται. Η συστολή αυτή με το χρόνο, οριζόμενη ως **συστολή ξηράνσεως** (shrinkage), όταν ο φορέας είναι αφόρτιστος και ως **ερπυσμός*** (creep) όταν ο φορέας βρίσκεται υπό μακροχρόνια θλιπτική τάση.

Η παραμόρφωση ϵ_{cs} λόγω συστολής ξηράνσεως είναι ίδια σ' όλο το φορέα και, γι' αυτό, δεν μεταβάλλει το βέλος του.

Η παραμόρφωση ϵ_{cc} λόγω του ερπυσμού του σκυροδέματος είναι τόσο πιο μεγάλη όσο πιο μεγάλη είναι η σταθερή θλιπτική τάση σ_c που ασκείται και τόσο πιο μικρή όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του σκυροδέματος στην παραμόρφωσή του, δηλ. όσο πιο μεγάλο είναι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος E_c .

Μπορεί, απλοποιητικά, να αποδοθεί στη διαφυγή με την πάροδο του χρόνου του πλεονάζοντος που δεν δεσμεύεται χημικά με το τσιμέντο) νερού του συγκρατούμενου στον ιστό του σκυροδεματος προς το ξηρότερο περιβάλλον του φορέα.

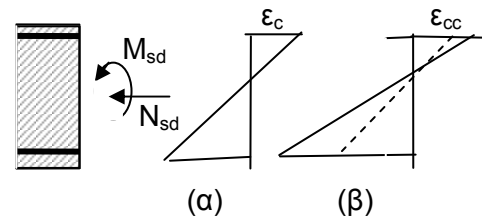
Άρα η ϵ_{cc} είναι **ανάλογη** του μεγέθους της βραχυχρόνιας παραμόρφωσης ϵ_c του σκυροδέματος .

$$\epsilon_{cc} = \varphi \cdot \epsilon_c = \varphi \cdot \sigma_c / E_c \quad (3)$$

όπου:

φ είναι ο συντελεστής ερπυσμού

Η ϵ_{cc} , λόγω της καμπτικής επιπρόννησης, δεν είναι, όπως φαίνεται στο Σχ. 9, σταθερή καθ' ύψος του φορέα και, γι' αυτό, **αυξάνει το μακροχρόνιο βέλος** του φορέα, αφού αυξάνει τις ακραίες παραμορφώσεις.



Σχ. 3.9 Διαγραμμα παραμορφώσεων
(α) βραχυχρόνιων
(β) μακροχρόνιων

Το μακροχρόνιο βέλος μπορεί να προκύψει προσεγγιστικά πολλασιάζοντας το βραχυχρόνιο e_2 με έναν συντελεστή K_φ