

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου παρουσιάζει μεγάλες αβεβαιότητες ως προς:

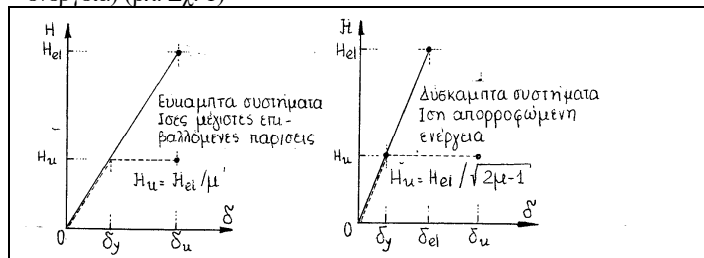
- την **σεισμική δράση**: μέγεθος, φάσμα, διάρκεια, επιτάχυνση, πιθανότητα υπερβάσεως
- το **έδαφος**: είδος, δυναμικά χαρακτηριστικά, συμβολή κυμάτων
- τις **ιδιότητες των υλικών**: σκυρόδεμα, χάλυβας, συνάφεια, ποιότητα εκτελέσεως
- την **συμπεριφορά των υλικών**: ταχύτητα φορτίσεως, επιβαλλόμενη παραμόρφωση, πλήθος ανακυκλώσεων, διαθέσιμη πλαστιμότητα, γήρανση
- τα **χαρακτηριστικά της κατασκευής**: δυσκαμψία, απόσβεση, απορρόφηση ενέργειας, τοιχοποιία(ς)

ΑΡΑ:

- πρέπει να συμβιβασθούμε με την αβεβαιότητα του σεισμικού φαινομένου
- η σεισμική δράση των κανονισμών έχει καθαρά συμβατικό χαρακτήρα
- οι κατασκευές πρέπει να έχουν επαρκή αντοχή σε περίπτωση “μεγάλου” σεισμού, αλλά και να μην παθαίνουν ζημιές με τους “συχνοῦς σεισμούς”.
- απόλυτη ασφάλεια δεν υπάρχει: ενδέχεται να έχουμε υπέρβαση του «σεισμοῦ σχεδιασμοῦ» κατά την διάρκεια ζωής της κατασκευής (με τα σημερινά δεδομένα ο σεισμός σχεδιασμοῦ αντιστοιχεί σε επιτάχυνση με πιθανότητα μη υπερβάσεως 90% σε 50 χρόνια)¹

Γι αυτό: κατά τον σχεδιασμό, εκτός από την ικανοποίηση της βασικής ανισότητας ασφαλείας: $S < R$, φροντίζουμε να δίνουμε στην κατασκευή-μας και άλλες ιδιότητες, μέσω της κατάλληλης σύλληψης του φορέα ή και της κατάλληλης όπλισης:

- **Ευρωστία – στερεότητα (robustness)**: η ικανότητα της κατασκευής ώστε οι συνέπειες μιας αστοχίας να μην είναι δυσανάλογες προς το συμβάν που τις προκάλεσε. (χονδροειδή σφάλματα, προστασία από πρόσκρουση σε υποστυλώματα, σύστημα φυσικού αερίου εκτός κτηρίου, προειδοποίηση, εναλλακτικές διαδρομές σε περίπτωση αστοχίας ενός μέλους (βλ επόμενη ιδιότητα).
- **Υπερστατικότητα** με την οποία, σε συνδυασμό με την πλάσιμη συμπεριφορά (βλ. επόμενη ιδιότητα), ενεργοποιούνται και οι «υποαποσχολούμενες» διατομές με συνέπεια την αύξηση της φέρουσας ικανότητας αλλά και της μετελαστικής παραμορφώσεως
- **Πλαστιμότητα** με την οποία πετυχαίνουμε:
 - μείωση των συμβατικών σεισμικών φορτίων $H_u = H_{el}/\mu$ (για ίσες επιβαλλόμενες μετατοπίσεις) ή $H_u = H_{el}/\sqrt{2\mu-1}$ (για ίση απορροφούμενη ενέργεια) (βλ. Σχ. 1)



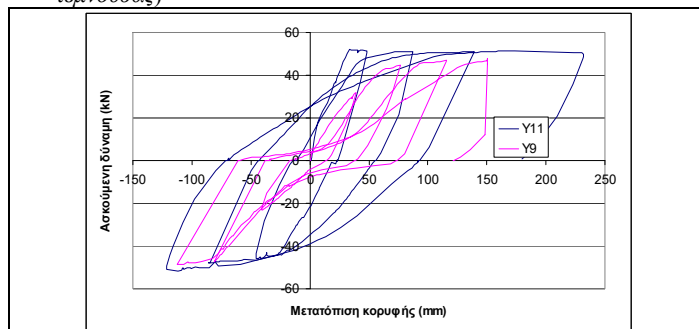
Σχήμα 1 Σύγκριση ενός πλήρως ελαστικού φορέα με έναν πλήρως ελαστοπλαστικό φορέα

- δυνατότητα απορρόφησης (εκτόνωσης) της σεισμικής ενέργειας (βλ. Σχ. 2)
- ανακατανομή της εντάσεως (ενεργοποίηση και των «υποαποσχολούμενων» διατομών του φορέα)
- ανάπτυξη προειδοποιητικών παραμορφώσεων που επιτρέπουν την λήψη μέτρων

Για να προσδώσουμε πλαστιμότητα απαιτείται:

- κατάλληλη όπλιση και διαμόρφωση του οπλισμοῦ (EC2, EC8)
- μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων (KTX)

- **Καθορισμό των θέσεων πιθανής αστοχίας**: τα στοιχεία που θα αστοχήσουν πρώτα να είναι οι δοκοί και όχι τα υποστυλώματα (ικανοτικός έλεγχος κόμβων)
- **Καθορισμό του είδους της πιθανής αστοχίας**: να μην προηγείται η διατμητική αστοχία της καμπτικής αστοχίας (ικανοτικός έλεγχος τέμνουσας)



Σχήμα 2 Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης. Το εμβαδόν στο εσωτερικό κάθε βρόχου είναι απορροφούμενη ενέργεια σε κάθε κύκλο. Παρατηρήσατε την διαφορά των δύο φορέων ως προς την απορροφούμενη ενέργεια παρόλο που η φέρουσα ικανότητά-τους είναι σχεδόν η ίδια

- **Μόρφωση του φορέα**: Απλότητα, γεωμετρική κανονικότητα (σε κάτοψη και καθύψος), κανονικότητα κατανομής μαζών, κανονικότητα κατανομής δυσκαμψιών και δυστρεπνών, κανονικότητα κατανομής υπεραντοχών, λειτουργία διαφράγματος, ικανοποιητική θεμελίωση

2. ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ (βλ «Σημειώσεις για τις κατασκευές από Ω.Σ.» σελ 134-139)

Είναι η ικανότητα φορέων ή δομικών στοιχείων να αναπτύσσουν μεγάλες μετελαστικές παραμορφώσεις χωρίς σημαντική μείωση της φέρουσας ικανότητάς τους κατά τους διαδοχικούς κύκλους φορτίσεως.

Ο **δείκτης πλαστιμότητας** μετράει την σχέση των πλαστικών παραμορφώσεων (μέχρι να αναπτυχθεί παραμόρφωση αστοχίας στο σκυρόδεμα $\epsilon_{c2} = \epsilon_{cu}$, αδιαφορώντας για την παραμόρφωση του χάλυβα αρκεί βέβαια να μην ξεπεραστεί η παραμόρφωση φυσικής αστοχίας του χάλυβα $\epsilon_{sl} < \epsilon_{su} \approx 0.075$) προς την ελαστική παραμόρφωση (όταν διαρρέει ο πλέον εφελκόμενος οπλισμός $\epsilon_{sl} = \epsilon_{yd}$). Ανάλογα με το είδος της παραμορφώσεως (μετατόπιση ή στρόφη ή καμπυλότητα), διακρίνουμε αντιστοίχως:

- δείκτη πλαστιμότητας σε όρους μετατοπίσεως $\mu_d = d_u/d_y$,
 - δείκτη πλαστιμότητας σε όρους στροφών $\mu_\phi = \phi_u/\phi_y$ και
 - δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλότητων $\mu_r = (1/r)_u/(1/r)_y$
- όπου ο δείκτης «u» υποδηλώνει την κατάσταση αστοχίας και ο δείκτης «y» υποδηλώνει την κατάσταση «διαρροής» (με τον όρο «διαρροή ενός μέλους», εννοείται το πέρασμα από τον ελαστικό κλάδο στον πλαστικό. Το πέρασμα αυτό συνήθως συμβαίνει όταν διαρρέει ο πλέον εφελκόμενος οπλισμός).

¹ Ο σεισμός αυτός έχει περίοδο επαναφοράς

$$T = \frac{n}{-\ln(p)} = \frac{50}{-\ln(0.90)} = \frac{50}{-(-0.105)} = 475 \text{ έτη}$$

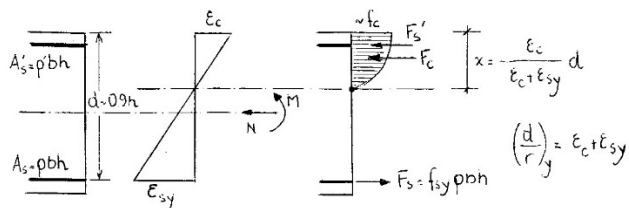
Προσεγγιστική εκτίμηση του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλότητας μ_r : Θα υπολογίσουμε την καμπυλότητα την στιγμή της αστοχίας $(d/r)_u = (\epsilon_{cu} + \epsilon_s)$ (θεωρούμε ότι το θλιβόμενο σκυρόδεμα έφτασε στην κρίσιμη παραμόρφωση ϵ_{cu} , και αδιαφορούμε για την παραμόρφωση του χάλυβα).

Στην συνέχεια θα υπολογίσουμε και την καμπυλότητα την στιγμή της διαρροής του πλέον εφελκυσμένου οπλισμού $(d/r)_y = (\epsilon_c + \epsilon_{sy})$ (προφανώς τώρα $\epsilon_c < \epsilon_{cu}$)². Η πλαστιμότητα σε όρους καμπυλότητας είναι:

$$\mu_r = \frac{\left(\frac{d}{r}\right)_u}{\left(\frac{d}{r}\right)_y} = \frac{\epsilon_{cu} + \epsilon_s}{\epsilon_{cy} + \epsilon_{sy}}$$

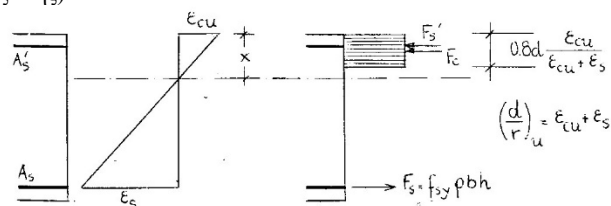
Έχουμε λοιπόν: Γενικώς είναι: $N = vbhf_c = F_c + F_{s2} - F_{s1}$ $F_c = vbhf_c + F_{s1} - F_{s2}$.

- Την στιγμή της διαρροής η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος είναι: $F_c = \alpha f_c b x \approx \frac{2}{3} f_c b 0.9h \left[\frac{\epsilon_{cy}}{\epsilon_{cy} + \epsilon_{sy}} \right]$ (εκτιμάμε ότι το διάγραμμα των τάσεων θα είναι καθαρά παραβολικό άρα $\alpha = 2/3$)



και αγνοούμε τον συντελεστή 0.85 επειδή ο σεισμός είναι ταχεία φόρτιση)

- Την στιγμή της αστοχίας θα είναι: $F_c \approx f_c b 0.9h 0.8 \left[\frac{\epsilon_{cy}}{\epsilon_{cy} + \epsilon_{sy}} \right]$ (θεωρούμε σταθερό δ/μα τάσεων στα 0.8 του ύψους της θλιβόμενης ζώνης)



- $F_{s1} = \rho_1 b h f_{sy}$, $F_{s2} = \rho_2 b h (\lambda f_{sy})$ (υποθέτουμε ότι ο θλιβόμενος οπλισμός έχει τάση λf_{sy} τόσο στην αστοχία όσο και στην διαρροή)

Από τα προηγούμενα προκύπτει:

$$vbhf_c + F_{s1} - F_{s2} = F_c = \frac{2}{3} f_c b \left[\frac{\epsilon_{cy}}{\epsilon_{cy} + \epsilon_{sy}} \right] 0.9h = f_c b 0.8 \left[\frac{\epsilon_{cy}}{\epsilon_{cy} + \epsilon_{sy}} \right] 0.9h$$

Από την ισότητα των δύο τελευταίων όρων προκύπτει:

$$\mu_r = \frac{\epsilon_{cu} + \epsilon_s}{\epsilon_{cy} + \epsilon_{sy}} = 1.2 \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cy}}$$

Ενώ από την ισότητα του 1^{ου} και 2^{ου} όρου προκύπτει:

$$\frac{1}{\epsilon_{cy}} = \left[\frac{0.6}{v + (\rho_1 - \lambda \rho_2) \left(\frac{f_{sy}}{f_c} \right)} - 1 \right] \frac{E_s}{f_{sy}}$$

Τελικά από τις δύο τελευταίες σχέσεις έχουμε:

$$\mu_r = 1.2 \epsilon_{cu} \left\{ \frac{0.6}{v + (\rho_1 - \lambda \rho_2) \left(\frac{f_{sy}}{f_c} \right)} - 1 \right\} \frac{E_s}{f_{sy}} \quad (1)$$

Από την παραπάνω προσεγγιστική έκφραση του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλότητας βλέπουμε ότι αυτός εξαρτάται από τα εξής έξι μεγέθη:

- το ποσοστό του θλιβόμενου οπλισμού ρ_2 ,
- την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος f_c ,
- την παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος ϵ_{cu} ,
- το ποσοστό του εφελκυσμένου οπλισμού ρ_1 ,
- το όριο διαρροής του χάλυβα f_{sy} , και
- την δρῶσα ανηγμένη αξονική δύναμη v .

Από αυτά, τα τρία πρώτα (ρ_2 , f_c , ϵ_{cu}) συμβάλλουν στην αύξηση-της πλαστιμότητας, ενώ τα τρία τελευταία (ρ_1 , f_{sy} , v) συμβάλλουν στην μείωσή-της.

Πρακτικά συμπεράσματα: Για να έχουμε μεγάλη πλαστιμότητα φροντίζουμε:

α) να έχουμε «μεγάλες» διατομές (ώστε να μειώνεται η ανηγμένη αξονική δύναμη καθώς και ο απαιτούμενος εφελκυσμένος οπλισμός),
β) θέτουμε θλιβόμενο οπλισμό ακόμη και αν δεν απαιτείται (*προσοχή: δεν εννοούμε να έχουμε τέτοιες διαστάσεις ώστε η εξέταση της μ_{lim} να μας οδηγήσει στην τοποθέτηση θλιβόμενου οπλισμού! Αντιθέτως θα έχουμε μεγάλες διαστάσεις για τις οποίες σίγουρα δεν θα χρειάζεται θλιβόμενος οπλισμός, αλλά παρ' όλα αυτά εμείς θα βάλουμε*). Πάντως, στην προηγούμενη σχέση, η ευνοϊκή επίδραση του θλιβόμενου οπλισμού είναι αποτελεσματική όταν η αξονική δύναμη « n » είναι μικρή (δηλαδή κυρίως για τις δοκούς για τις οποίες μπορούμε να πούμε, πολύ προσεγγιστικά, ότι $\lambda \approx 0.5 + 0.18 \rho_1$. Για τα υποστυλώματα και ιδίως για θλιπτικές δυνάμεις $0.4 > v > 0.2$, έχει διαρρεύσει και ο θλιβόμενος οπλισμός οπότε $\lambda = 1$ και άρα η πλαστιμότητα φαίνεται να μην επηρεάζεται από την ποσότητα του οπλισμού.)

γ) φροντίζουμε να αυξήσουμε την παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος. Η αύξηση της παραμορφώσεως αστοχίας επιτυγχάνεται όταν το σκυρόδεμα βρίσκεται υπό τριαξονική θλίψη. Η τριαξονικότητα επιτυγχάνεται εμποδίζοντας την παράπλευρη διόγκωση του σκυροδέματος η οποία αναπτύσσεται όταν το σκυρόδεμα βραχύνεται κατά την διαμήκη έννοια (αρνητικός συντελεστής Poisson): η παρεμπόδιση αυτή επιτυγχάνεται μέσω της περισφίγξης του σκυροδέματος με πυκνούς, καλά κλειστούς και με πολλές γωνίες συνδετήρες (ιδανική η κυκλική και με μικρό βήμα σπείρα).

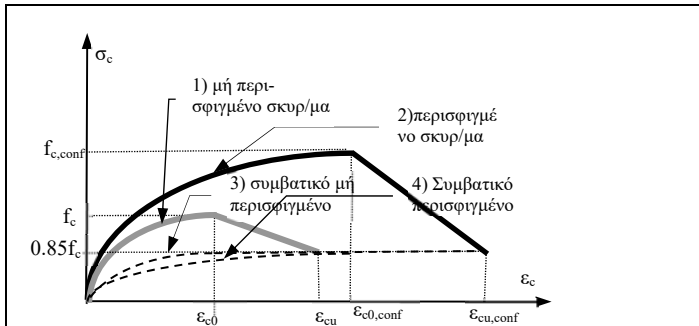
² Κανονικά οι καμπυλότητες διαρροής και αστοχίας πρέπει να υπολογισθούν με δοκιμές. Εδώ ας δεχθούμε αυτή την πολύ απλουστευτική προσέγγιση για λόγους παραμετρικής διερευνήσεως. Να εφαρμόσετε τις προσεγγιστικές σχέσεις που Κ.Γ. Τρέζος / Beton 7^{ου} /6-12-2019

δίνονται εδώ και να υπολογίσετε τις καμπυλότητες που βρήκατε σε σχετική άσκηση. Σχολιάσατε τις διαφορές.

4. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΩΝ

4.1 Σκυροδέμα

Στο επόμενο Σχήμα 3 παρουσιάζεται σχηματικά, το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του σκυροδέματος υπό **μονοαξονική** καταπόνηση (καμπύλη 1). Η καμπύλη αυτή παρουσιάζει μια παραβολική μεταβολή με μέγιστη τάση f_c για παραμόρφωση $\epsilon_{c0}=2.0\%$ και στην συνέχεια έναν γραμμικό φθιτό κλάδο στον οποίο η πτώση κατά 15% αντιστοιχεί σε παραμόρφωση $\epsilon_{cu}=3.5\%$. Αντί αυτής της καμπύλης 1, συμβατικά όπως έχουμε δει, χρησιμοποιούμε την καμπύλη 3 στην οποία κρατάμε ως μέγιστη τιμή $0.85f_c$. Το ίδιο σκυροδέμα υπό τριαξονική επιπόνηση (εφαρμόζοντας παράπλευρη πίεση p) παρουσιάζει το διάγραμμα της καμπύλης 2. Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται αφενός μεν αύξηση της μέγιστης τάσεως που μπορεί να αναπτυχθεί (από f_c γίνεται $f_{c,conf}$) αλλά κυρίως αύξηση της μέγιστης παραμόρφωσης αστοχίας του σκυροδέματος (από ϵ_{cu} γίνεται $\epsilon_{cu,conf}$). Επίσης το παραβολικό τμήμα εκτείνεται μέχρι την παραμόρφωση $\epsilon_{c0,conf}>2.0\%$. Συμβατικά, αγνοώντας την αύξηση της θλιπτικής αντοχής και αρκούμενη στην αύξηση της παραμόρφωσης αστοχίας, μπορούμε να προσεγγίσουμε την καμπύλη 2 με την καμπύλη 4 (κατ' αναλογία με τις καμπύλες 1 και 3).

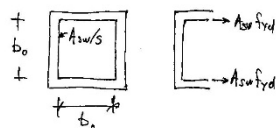


Σχήμα 3 Δ/μα Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων περισφιγμένου (τριαξονική μονοτονική θλίψη) και μή περισφιγμένου σκυροδέματος (μονοαξονική μονοτονική φόρτιση)

Η επίτευξη της τριαξονικής καταπόνησης του σκυροδέματος στις κατασκευές επιτυγχάνεται μέσω της περισφιγξέως του σκυροδέματος. Η περισφιγξή υλοποιείται με την τοποθέτηση πυκνών πολυγωνικών³ συνδετήρων, οι οποίοι, καθώς το θλιβόμενο σκυρόδεμα έχει την τάση να διογκωθεί (ο συντελεστής Poisson είναι αρνητικός), αντιστέκονται στην διάγκωση και εισάγουν θλίψη στο σκυρόδεμα. Πρόκειται δηλαδή περί παθητικής περισφιγξέως η οποία εκδηλώνεται όταν το σκυρόδεμα θλίβεται.

Ο βαθμός περισφιγξης του σκυροδέματος εξαρτάται από το πόση εγκάρσια πίεση μπορούν να εξασκήσουν οι συνδετήρες. Ας προσπαθήσουμε να εκτιμήσουμε αυτή την εγκάρσια πίεση:

Εστω τετραγωνικό υποστύλωμα με τετραγωνικό συνδετήρα (Σχήμα 4). Διογκούμενο το σκυρόδεμα εφελκύει τον συνδετήρα. Η συνολική δύναμη των δύο σκελών του συνδετήρα $2A_{sw}f_{yd}$ προκαλεί θλιπτικές τάσεις στο περισφιγμένο σκυρόδεμα b_0s (s η απόσταση των συνδετήρων):



Σχήμα 4 Τετραγωνικό υποστύλωμα με έναν συνδετήρα.

$$\sigma = 2A_{sw}f_{yd}/[b_0s] = 0.5 \{4b_0A_{sw}f_{yd}\} / \{b_0^2sf_{cd}\} f_{cd} = 0.5\omega_w f_{cd}$$

όπου:

$4b_0A_{sw}$ είναι ο όγκος των συνδετήρων που προκαλούν περισφιγξή

b_0^2s είναι ο όγκος του περισφιγμένου σκυροδέματος

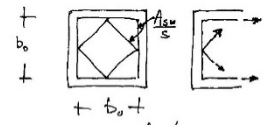
ω_w είναι το μηχανικό-ογκομετρικό ποσοστό των συνδετήρων, δηλαδή ο όγκος των συνδετήρων που προσδίδουν περισφιγξή προς τον όγκο του

περισφιγμένου πυρήνα του σκυροδέματος επί τον λόγο των αντιστοίχων αντοχών:

$$\omega_w = \frac{\text{όγκος συνδετήρων περισφιγξης } f_{yd}}{\text{όγκος πυρήνα σκυροδέματος } f_{cd}}$$

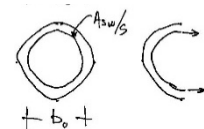
Εστω τετραγωνικό υποστύλωμα με δύο τετραγωνικούς συνδετήρες. Διογκούμενο το σκυρόδεμα εφελκύει τους συνδετήρες. Η συνολική δύναμη των τεσσάρων σκελών των συνδετήρων (προβολή στον οριζόντιο άξονα) $(2+\sqrt{2})A_{sw}f_{yd}$ προκαλεί θλιπτικές τάσεις στο περισφιγμένο σκυρόδεμα b_0s (s η απόσταση των συνδετήρων):

$$\sigma = (2+\sqrt{2})A_{sw}f_{yd}/[b_0s] = 0.5 \{(4+2\sqrt{2})b_0A_{sw}f_{yd}\} / \{b_0^2sf_{cd}\} f_{cd} = 0.5\omega_w f_{cd}$$



Σχήμα 5 Τετραγωνικό υποστύλωμα με δύο συνδετήρες

Εστω κυκλικό υποστύλωμα με έναν κυκλικό συνδετήρα. Διογκούμενο το σκυρόδεμα εφελκύει τον συνδετήρα. Η συνολική δύναμη των δύο σκελών του συνδετήρα $2A_{sw}f_{yd}$ προκαλεί θλιπτικές τάσεις στο περισφιγμένο σκυρόδεμα b_0s (s η απόσταση των συνδετήρων):



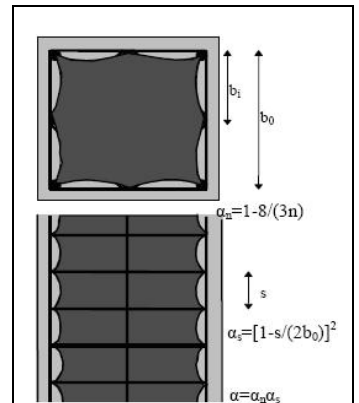
Σχήμα 6 Κυκλικό υποστύλωμα με κυκλικό συνδετήρα

$$\sigma = 2A_{sw}f_{yd}/[b_0s] = 0.5 \{\pi b_0A_{sw}f_{yd}\} / \{(\pi b_0^2/4)s f_{cd}\} f_{cd} = 0.5\omega_w f_{cd}$$

Αρα, για οποιαδήποτε διάταξη συνδετήρων, η εγκάρσια πίεση, σ , (περισφιγξή) την οποία μπορούν να εξασκήσουν οι συνδετήρες είναι:

$$\sigma = 0.5\omega_w f_{cd}$$

Όμως, δεν είναι όλη η διατομή του πυρήνα η οποία απολαύει της περισφιγξέως⁴ (βλ. Σχήμα 7 άνω). Το ίδιο ισχύει και καθύψος (βλ. Σχήμα 7 κάτω). Επειδή η περισφιγξή εισάγεται στο σκυρόδεμα στις θέσεις των γωνιών των συνδετήρων, αντιλαμβανόμαστε ότι όσες περισσότερες γωνίες σχηματίζουν οι συνδετήρες (μέσα στην διατομή) και όσο πιο πυκνά τοποθετημένοι είναι (καθύψος του υποστυλώματος) τόσο μεγαλύτερο ποσοστό του σκυροδέματος θα βρίσκεται υπό περισφιγξή. Πράγματι, στο Σχήμα 3, με έντονο γκρι φαίνεται η περισφιγμένη περιοχή του σκυροδέματος. Περισφιγμένη είναι η περιοχή που περικλείεται από τους μηνίσκους που σχηματίζονται από τις κορυφές των συνδετήρων. Προσέξτε πως οι πολλές γωνίες (κορυφές) των συνδετήρων (σε κάτωψη) και η πυκνή απόσταση (καθύψος) μειώνουν τους μή περισφιγμένους μηνίσκους και άρα αυξάνεται ο όγκος του σκυροδέματος που απολαύει της περισφιγξέως.



Σχήμα 7 Με σκούρο χρώμα είναι το περισφιγμένο σκυρόδεμα, ενώ με ανοικτό χρώμα είναι το απερίσφιγτο σκυρόδεμα. Οι συντελεστές α_n και α_s υπολογίζουν το ποσοστό του σκυροδέματος το οποίο βρίσκεται υπό περισφιγξή.

³ Με την έννοια ότι είναι επιθυμητή η διάταξη συνδετήρων με πολλές γωνίες θλάσεως (χωρίς κατ' ανάγκη να πρόκειται για έναν μεμονωμένο συνδετήρα).

⁴ Απολαύω (+γεν): είμαι αποδέκτης, μου παρέχεται, με τιμούν με.. «απολαύω εμπιστοσύνης».

Απολαμβάνω (+αιτ): χαίρομαι, ευχαριστιέμαι, μου αρέσει απολαμβάνω την θέα».

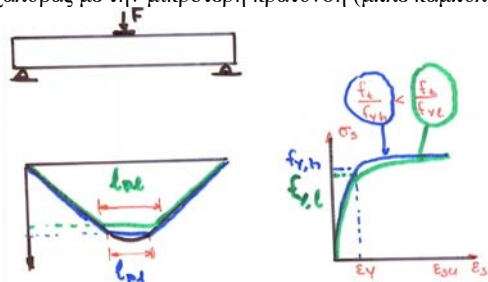
Γ. Μπαμπινιώτης Λεξικό της Νέας Ελληνικής Γλώσσας

	$\max b_t = 200\text{mm}$ (ΚΠΜ), 150mm (ΚΠΥ)
	$\min d_{bw} = 6\text{mm}$ (ΚΠΜ), $0.4d_{l,\max}$ (ΚΠΥ)
	$s = \min \{b_o/2; 175; 8d_{bL}\}$ (ΚΠΜ), $s = \min \{b_o/3; 125; 6d_{bL}\}$ (ΚΠΥ)

Σχήμα 11 Περίσφιγξη πυρήνα σκυροδέματος: ελάχιστες απαιτήσεις EC8

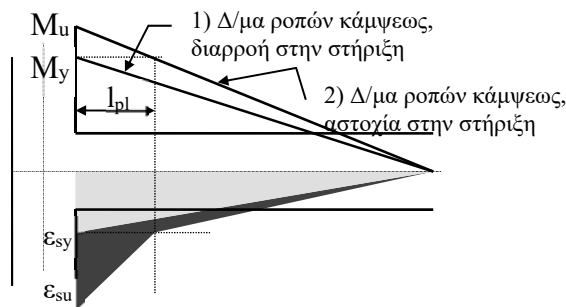
Γιατί είναι απαραίτητη η ολκιμότητα του χάλυβα; Γιατί έτσι επιτυγχάνονται: **α)** απορρόφηση ενέργειας (η οποία συμβαίνει κυρίως στις πλαστικές αρθρώσεις) και **β)** ανακατανομή της εντάσεως (μετά την διαρροή των πλέον επιπονούμενων διατομών επιστρατεύονται και οι «υποαπασχολούμενες» διατομές χωρίς όμως οι προηγούμενες να χάνουν την αντοχή που είχαν αναπτύξει). Έτσι:

- Ο λόγος f_t/f_y επηρεάζει το μήκος της πλαστικής αρθρώσεως. Στο επόμενο σχήμα 12 συγκρίνονται δύο χάλυβες με διαφορετικό λόγο f_t/f_y . Ο χάλυβας με την μεγαλύτερη κράτυνση (πράσινη καμπύλη) θα προσδώσει στην δοκό μεγαλύτερο μήκος πλαστικής αρθρώσεως από ότι ο χάλυβας με την μικρότερη κράτυνση (μπλε καμπύλη).



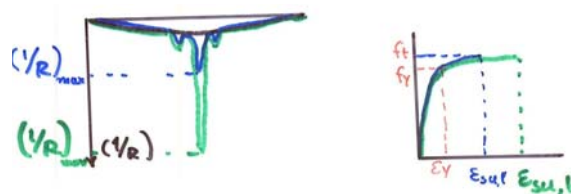
Σχήμα 12 Πώς η κράτυνση επηρεάζει το μήκος της πλαστικής άρθρωσης.

Ομοίως, στο επόμενο σχήμα 13 παρακολουθήστε την ανάπτυξη της πλαστικής αρθρώσεως στο άκρο της δοκού, στην συμβολή-της με το υποστυλώμα: Εστω ότι στην στήριξη της δοκού έχει αναπτυχθεί η ροπή διαρροής, M_y , που εφελκύνει τις πάνω ίνες και έστω ότι το δ/μα ροπών μεταβάλλεται γραμμικά κατά μήκος της δοκού (καμπύλη 1). Στην περίπτωση αυτή η μεταβολή της παραμόρφωσης του χάλυβα κατά μήκος της δοκού είναι επίσης γραμμική (σκιαγράφηση με ανοικτό γκρι) και άρα αντιστοίχως και οι καμπυλότητες. Αν τώρα στην στήριξη αναπτυχθεί η ροπή αστοχίας, M_u , κατ' αναλογία προς τον λόγο f_t/f_y , το δ/μα ροπών θα είναι η καμπύλη 2. Στο ακραίο τμήμα όπου η ροπή είναι μεγαλύτερη από την ροπή διαρροής, οι παραμορφώσεις του χάλυβα αυξάνονται πολύ (σκιαγράφηση με έντονο γκρι) και άρα και οι αντίστοιχες καμπυλότητες αυξάνονται πολύ. Την περιοχή αυτή ονομάζουμε πλαστική άρθρωση. Στο σχήμα η πλαστική άρθρωση έχει μήκος l_{pl} : το μήκος αυτό έχει προκύψει από τον λόγο M_u/M_y ο οποίος με την σειρά-του είναι περίπου ίσος με τον λόγο f_t/f_y (την κράτυνση).



Σχήμα 13 Πώς η κράτυνση επηρεάζει το μήκος της πλαστικής άρθρωσης.

- Η παραμόρφωση θραύσεως επηρεάζει το μέγεθος της πλαστικής στρώσης (μέσω της καμπυλότητας $1/R$). Πράγματι, στο επόμενο σχήμα 14 οι δύο χάλυβες διαφέρουν μόνο ως προς την παραμόρφωση θραύσεως. Είναι προφανές ότι στην περίπτωση του χάλυβα με την μεγαλύτερη παραμόρφωση θραύσεως θα αναπτυχθούν μεγαλύτερες καμπυλότητες και άρα μεγαλύτερες πλαστικές στρώσεις και άρα μεγαλύτερη απορρόφηση (σεισμικής) ενέργειας πράγμα το οποίο είναι επιθυμητό.



Σχήμα 14 Πώς η παραμόρφωση θραύσεως επηρεάζει το μέγεθος της πλαστικής στρώσης.

Τέλος, εκτός από τους δύο προαναφερθέντες λόγους (απορρόφηση ενέργειας, ανακατανομή) η ολκιμότητα του χάλυβα είναι απαραίτητη επίσης και για τους εξής λόγους:

- Να υπάρχει δυνατότητα κάμψης του χάλυβα προκειμένου να μπορεί να παίρνει την μορφή που θέλουμε (στις περιπτώσεις μη ευθύγραμμης διαμόρφωσης).
- Να υπάρχει προειδοποίηση (μέσω των αναπτυσσόμενων ρωγμών)
- επειδή η ελαστική δυσκαμψία του αρηγμάτωτου σκυροδέματος διαφέρει από την πραγματική δυσκαμψία του ρηγματωμένου σκυροδέματος, πρέπει να υπάρχει δυνατότητα ανακατανομής της εντάσεως που αναπόφευκτα θα απαιτηθεί μετά την ρηγμάτωση του σκυροδέματος.
- στο προσομοίωμα «θλιπτήρα-ελκυστήρα» (struts and ties), ο χάλυβας πρέπει να έχει ολκιμότητα για προσαρμογή από την ελαστική κατανομή σ' αυτή του προσομοιώματος
- να υπάρχει αντοχή έναντι επιβαλλομένων παραμορφώσεων
- να υπάρχει αντοχή σε κρούσεις και σε άλλες τυχηματικές⁷ δράσεις πλην του σεισμού
- να υπάρχει δυνατότητα ανακατανομής της εντάσεως σε περίπτωση πυρκαγιάς

Προσοχή όμως, μεγάλες τιμές της κράτυνσης (f_t/f_y) και της υπεραντοχής ($f_{y,act}/f_{y,nom}$): **α)** αλλοιώνουν την μετελαστική συμπεριφορά **β)** αυξάνουν την πιθανότητα να μην ικανοποιούνται οι ικανοτικοί έλεγχοι⁸ (ικανοτικός έλεγχος κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων σε κάμψη, και ικανοτικός έλεγχος τέμνουσας) και **γ)** αυξάνουν το απαιτούμενο μήκος αγκυρώσεως με αποτέλεσμα την αστοχία της αγκυρώσεως (η ολίσθηση του χάλυβα είναι ψαθυρή αστοχία): $L_{b,net} = \Phi * f_{yd} / 4f_{bd}$.

⁷ Τυχηματικές (accidental) δράσεις θεωρούνται εκείνες που έχουν πολύ μικρή πιθανότητα εμφανίσεως και οι συνέπειές-τους μπορεί να είναι καταστροφικές. Τέτοιες δράσεις είναι ο σεισμός, η πυρκαγιά, η πρόσκρουση οχήματος, η έκρηξη και άλλες τρομοκρατικές ενέργειες. Ωστόσο ο σεισμός, εδώ στην Ελλάδα, έχει διαφορετική μεταχείριση από πλευράς αξιοπιστίας, μιας και στην διάρκεια ζωής της κατασκευής είναι σχεδόν βέβαιον ότι θα πληγεί από έναν μεγάλο σεισμό, ενώ δεν είναι πιθανό ότι θα υποστεί τις άλλες τυχηματικές δράσεις.

⁸ Π.χ. σε έναν κόμβο δοκών υποστυλωμάτων ενδέχεται τα διαμήκη σίδερα των δοκών να παρουσιάζουν μεγάλη υπεραντοχή ενώ τα διαμήκη σίδερα των υποστυλωμάτων να μην παρουσιάζουν διότι μπορεί να προέρχονται από άλλη παρτίδα χάλυβα ή ακόμη και από άλλο χαλβουργείο. Το ίδιο μπορεί να συμβαίνει και με τα διαμήκη σίδερα σε σχέση με τους συνδετήρες στον ικανοτικό έλεγχο τέμνουσας.

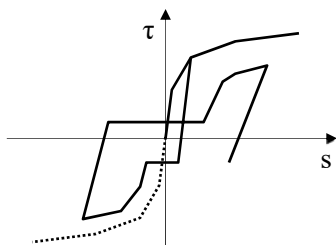
Για τους παραπάνω λόγους λοιπόν οι κανονισμοί θέτουν όρια για τις τρεις βασικές ιδιότητες των χαλύβων:

Μηχανικά χαρακτηριστικά χαλύβων σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 και τον ΕΚΩΣ 2000.

Μέγεθος	EC8 Κατηγορία πλαστιμότητας υψηλή (DCH)	ΕΚΩΣ 2000
f_t/f_y	$\geq 1,15$ $\leq 1,35$	$\geq 1,10$ $\leq 1,35$
$\varepsilon_{u,k}$ (%)	$\geq 7,5$	$\geq 7,0$
$f_{y,act}/f_{ynom}$	$\leq 1,25$	$\leq 1,30$

4.3 Συνάφεια

Σημαντική επιδείνωση σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (απαιτείται όλο και πιο μεγάλη ολίσθηση s για την ανάπτυξη της ίδιας τάσεως συνάφειας).



Σχήμα 15 Επιδείνωση της συνάφειας κατά την ανακύκλιση.

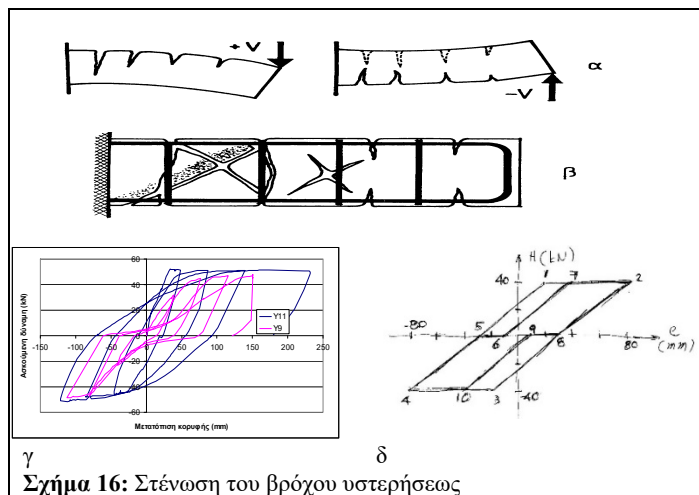
4.4 Ωπλισμένο σκυρόδεμα Βρόχοι υστερήσεως:

Ενδιαφέρουν παρουσιάζει η εναλλασσόμενη ένταση: στον πρόβολο του σχήματος 16, υπό την επίδραση του φορτίου $+V$, το πάνω πέλμα εφελκύεται λόγω κάμψης και ρηγματώνεται. Ταυτόχρονα, λόγω της τέμνουσας, οι ρωγμές αυτές αρχίζουν να λοξεύουν πλησιάζοντας προς το στηρίγμα κι' έτσι έχουμε τις χαρακτηριστικές καμποδοδιαμητικές ρωγμές (Σχήμα 16.α αριστερά). Όταν όμως, λόγω σεισμού, αλλάζει η φορά του φορτίου $-V$, τότε παρατηρούμε τα εξής: **1)** θα σχηματισθούν αντιστοιχες νέες ρωγμές στο κάτω πέλμα (βλ. παρακάτω σχήμα 16.α δεξιά): σχηματισμός δισδιαγώνιων ρωγμών. **2)** προκειμένου να λειτουργήσει το νέο θλιβόμενο πέλμα θα πρέπει προηγουμένως να κλείσουν οι ρωγμές που είχαν ανοίξει στον προηγούμενο κύκλο (Σχήμα 16.β). Μέχρι όμως να κλείσουν οι ρωγμές, ο φορέας παραμορφώνεται χωρίς όμως να αυξάνει η ροπή με την οποία αποκρίνεται. Τούτο έχει συνέπεια ν' αναπτύσσονται μεγάλες παραμορφώσεις μέχρις ότου ενεργοποιηθούν οι μηχανισμοί μεταφοράς της ροπής και της τέμνουσας (βλ. την κόκκινη καμπύλη στο σχήμα 16.γ), **3)** στην συνέχεια, όταν θα ξανα-αλλάξει φορά η τέμνουσα, θα παρουσιασθούν τα ίδια φαινόμενα και προς την άλλη κατεύθυνση.

Αυτή η αύξηση των παραμορφώσεων μέχρι να κλείσουν οι ρωγμές του προηγούμενου κύκλου (στένωση του διαγράμματος) έχει συνέπεια την θεαματική μείωση του εμβαδού των βρόχων υστερήσεως (pinching effect) (βλ. σχήμα 16.γ κόκκινη καμπύλη) άρα μείωση της απορροφούμενης ενέργειας.

Για την αύξηση του εμβαδού των βρόχων (δηλαδή για την αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας σε κάθε κύκλο) απαιτείται η τοποθέτηση σημαντικού θλιβόμενου οπλισμού ο οποίος αναλαμβάνει θλιπτικές τάσεις αμέσως, πριν ακόμη κλείσουν οι προηγούμενες ρωγμές (μπλε καμπύλες). Σχηματικά, στο σχήμα 16.δ παρουσιάζονται δύο βρόχοι υστερήσεως: ο βρόχος 1-2-3-4-1 δεν παρουσιάζει καμία μείωση και απορροφά μεγάλη σεισμική ενέργεια, αντιθέτως ο βρόχος 5-6-7-2-8-9-10-4-5 παρουσιάζει στένωση και άρα μείωση της απορροφούμενης ενέργειας.

Τέλος, με την εναλλασσόμενη φόρτιση παρατηρείται μείωση της αποκρίσεως, δηλαδή: μείωση του μέγιστου φορτίου που μπορεί να αναληφθεί και αντιστοίχη αύξηση των παραμορφώσεων (με συνέπεια την επέκταση της αποδιοργάνωσης).



Σχήμα 16: Στένωση του βρόχου υστερήσεως

5 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΕΝΤΑΣΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΟΠΛΙΣΗ

Η ένταση λόγω σεισμού είναι εναλλασσόμενης φοράς: $\pm M_{\text{σεισμ.}}$, $\pm N_{\text{σεισμ.}}$, $\pm V_{\text{σεισμ.}}$. Η επαλληλία της σεισμικής εντάσεως με την ένταση λόγω των υπολοίπων (στατικών) δράσεων μπορεί να δώσει είτε εναλλασσόμενη ένταση (όπως συνήθως συμβαίνει π.χ. στα υποστυλώματα: επειδή τα υποστυλώματα συνήθως δεν έχουν ροπή από στατικά φορτία ή η ροπή αυτή είναι πολύ μικρή συγκριτικά με την σεισμική ροπή έχουμε ότι $M_{\text{τελ.}} \approx \pm M_{\text{σεισμ.}}$) είτε ανακυκλιζόμενη ένταση (όπως π.χ. η ροπή στηρίξεως μιας συνεχούς δοκού με μεγάλη στατική ροπή $M_{\text{τελ.}} = M_{\text{στατ.}} \pm M_{\text{σεισμ.}}$). Ετσι:

α) Ροπές:

α1) τα υποστυλώματα λόγω του εναλλασσόμενου πρόσημου της ροπής τα οπλίζουμε συμμετρικώς (Και όχι μόνον: υπάρχουν και τα χονδροειδή σφάλματα από τα οποία κινδυνεύουμε να βάλουμε τον ασύμμετρο οπλισμό ακριβώς στην λάθος θέση!).

α2) στα δοκάρια βρίσκουμε απλώς την περιβάλλουσα των ροπών και οπλίζουμε αναλόγως (η ροπή στις στηρίξεις μπορεί και να αλλάξει πρόσημο αλλά γι αυτό θα έχουμε βάλει και "κάτω" οπλισμό. Προσοχή όμως να τον αγκυρώσουμε καλά ιδίως στις ακραίες στηρίξεις, θυμηθείτε επίσης και την μετατόπιση του δ/τος ροπών λόγω της λοξής ρηγματώσεως από τέμνουσα)

α3) οι πλάκες έτσι κι' αλλιώς δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από τον σεισμό. (Επειδή στις πλάκες η δρώσα ροπή κάμψης και η δρώσα τέμνουσα δύναμη δεν μεταβάλλονται ιδιαίτερα λόγω του σεισμού, οι πλάκες θεωρούνται ως στοιχεία τα οποία δεν καταπονούνται από τον σεισμό, αν και επιτελούν το πολύ σημαντικό έργο της "διαφραγματικής λειτουργίας". Η διαφραγματική λειτουργία επιτυγχάνεται από την λειτουργία των πλακών ως δίσκων (πλάκα: επίπεδος επιφανειακός φορέας καταπονούμενος κάθετα στο επίπεδο του ενώ δίσκος: επίπεδος επιφανειακός φορέας καταπονούμενος εντός του επιπέδου του). Πάντως, πλάκες-πρόβολοι μεγάλου μήκους ενδέχεται να επηρεασθούν από την κατακόρυφη συνιστώσα του σεισμού (καθώς επίσης και στοιχεία τα οποία στηρίζουν φυτευτά υποστυλώματα)

β) Αξονική δύναμη:

β1) στα υποστυλώματα η τελική αξονική δύναμη αυξομειώνεται (μέχρι που μπορεί και να γίνει εφελκυστική στους πάνω ορόφους) αυτό όμως δεν έχει ιδιαίτερη επίπτωση στην όπλιση από ορθή ένταση (με εξαίρεση ίσως το "αναπάντεχο" γεγονός να απαιτείται ορισμένες φορές περισσότερος οπλισμός σε υποστυλώμα μιας ανώτερης στάθμης από ότι στο ίδιο υποστυλώμα της υποκείμενης στάθμης. Γιατί?). Η μείωση της αξονικής στα υποστυλώματα είναι δυσμενής κατά την όπλιση έναντι διατμήσεως (βλ παρακάτω)

β2) οι δοκοί στα οικοδομικά έργα συνήθως δεν καταπονούνται με αξονική δύναμη μιας και υπάρχει η πλάκα που λειτουργεί ως διάφραγμα και με την μεγάλη δυστένιά-της πρακτικώς παραλαμβάνει όλες τις αξονικές δυνάμεις.

β3) η αξονική δύναμη που εισάγεται στις πλάκες από την διαφραγματική λειτουργία τους είναι αμελητέα (προσοχή όμως στις πλάκες με μεγάλα κενά που υπερβαίνουν π.χ. το 35% της επιφανείας του ορόφου ή στις πολύ επιμήκεις πλάκες με $L_{\text{max}}/L_{\text{min}} > 4$ διότι τότε ενδέχεται να μην λειτουργήσουν ως απαραμόρφωτα διαφράγματα).

γ) Τέμνουσα δύναμη:

γ1) στα υποστυλώματα η τέμνουσα λόγω σεισμού προκαλεί εναλλασσόμενη καταπόνηση (βλ. και παρ. 4.4) και έτσι ο έλεγχος διατμήσεως τροποποιείται παρουσία σεισμικών δυνάμεων. Τέλος, αν η αξονική δύναμη ενός υποστυλώματος μειωθεί αρκετά ($v > -0.1$) τότε το υποστυλώμα θα πρέπει να θεωρηθεί ως δοκός και να οπλισθεί έναντι διατμήσεως με τις διατάξεις των δοκών.

γ2) στις δοκούς παρουσία σεισμού, και λόγω του ικανοτικού ελέγχου υπάρχει ενδεχόμενο να απαιτηθεί, εκτός από συνδετήρες, και η τοποθέτηση δισδιαγώνιου οπλισμού,

γ3) στις πλάκες το πρόβλημα της διατμήσεως δεν είναι σημαντικό.

6 ΙΚΑΝΟΤΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ

Πλαστικές αρθρώσεις: περιοχές με περιορισμένο μήκος (π.χ. όσο το ύψος του στοιχείου, d) στις οποίες κατανέμεται η μετελαστική απόκριση (δηλαδή μετά την διαρροή) και η οποία πρέπει να έχει πλάστιμη μορφή (δηλαδή οι μετελαστικές παραμορφώσεις να είναι “μεγάλες” σε σχέση με την παραμόρφωση διαρροής). Οι πλαστικές αρθρώσεις πρέπει να κατανέμονται στο μεγαλύτερο δυνατό αριθμό φερόντων στοιχείων. Αυτό όμως προϋποθέτει ότι έχει εξασφαλισθεί η αποφυγή των πιθανών ψαθυρών μορφών αστοχίας που είναι δυνατόν να προηγηθούν⁹.

Οι πλαστικές αρθρώσεις αναπτύσσονται στα άκρα των στοιχείων. *Προβλεπόμενες (ή πιθανές) θέσεις πλαστικών αρθρώσεων* είναι εκείνες στις οποίες υπάρχει πρόβλεψη (ή μεγάλη πιθανότητα) εμφάνισης των αρθρώσεων (τέτοιες θέσεις είναι συνήθως τα άκρα των δοκών: προτιμάμε να εμφανισθούν πλαστικές αρθρώσεις στις δοκούς και όχι στα υποστυλώματα). *Ενδεχόμενες θέσεις πλαστικών αρθρώσεων* είναι εκείνες στις οποίες υπάρχει μικρότερη πιθανότητα δημιουργίας αρθρώσεων, οι οποίες όμως πρέπει, και αυτές, να διαθέτουν αυξημένη πλαστιμότητα επειδή βρίσκονται σε περιοχές ιδιαίτερα κρίσιμες για την ευστάθεια του δομήματος (τέτοιες θέσεις είναι τα άκρα των υποστυλωμάτων ακόμη και όταν οι προβλεπόμενες θέσεις πλαστικών αρθρώσεων βρίσκονται στα άκρα των δοκών). Αυτό επιτυγχάνεται με τα μέτρα για την *αποφυγή σχηματισμού μηχανισμού ορόφου*¹⁰.

Ικανοτικός σχεδιασμός:

1. Σε όλες τις προβλεπόμενες και ενδεχόμενες θέσεις πλαστικών αρθρώσεων εξασφαλίζεται επαρκής τοπική πλαστιμότητα (καμπυλοτήτων) για τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από τον συνδυασμό: $G_k + \psi_2 Q_k \pm E$ (άρα καλή περίσφιγξη με πυκνούς συνδετήρες).
2. Προσδιορίζονται τα εντατικά μεγέθη ικανοτικού σχεδιασμού, δηλαδή τα μεγέθη που προκύπτουν από τις συνθήκες ισορροπίας ενός στοιχείου ή ομάδας στοιχείων όταν στις προβλεπόμενες θέσεις πλαστικών αρθρώσεων αναπτύσσεται η πιθανή ανώτατη τιμή πλάστιμης αντοχής (λαμβάνοντας υπόψη και την υπεραντοχή του χάλυβα). Με τα ικανοτικά αυτά μεγέθη γίνεται ο έλεγχος αποφυγής ψαθυρών μορφών αστοχίας σε όλα τα μέλη του φορέα που περιέχουν ή γειτνιάζουν με (προβλεπόμενες ή ενδεχόμενες) πλαστικές αρθρώσεις καθώς και ο έλεγχος πλάστιμων μορφών αστοχίας (π.χ. κάμψη) σε θέσεις που πρέπει να αποφευχθεί ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων.
3. Στους ικανοτικούς ελέγχους, η ροπή αντοχής M_R διατομής πλαστικής αρθρώσεως, με βάση την οποία προσδιορίζεται η υπεραντοχή, λαμβάνεται ίση με την μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί σε σύγχρονη δράση της αξονικής δύναμης που προκαλείται από τον σεισμικό συνδυασμό που χρησιμοποιείται στον αντίστοιχο ικανοτικό έλεγχο. Η αντοχή αυτή υπολογίζεται πάντοτε με βάση τις τελικές διαστάσεις και τον συνολικό τελικό οπλισμό της διατομής.

⁹ Τέτοια είναι κυρίως η διατμητική αστοχία, και ο έλεγχος αυτός λέγεται πολλές φορές “ικανοτικός έλεγχος τέμνουσας”.

¹⁰ Ο έλεγχος αυτός λέγεται (κακώς) πολλές φορές “ικανοτικός έλεγχος κόμβων”, ενώ στην ουσία είναι ικανοτικός έλεγχος των υποστυλωμάτων.