

7. Η ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ

Επειδή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, επιτρέπεται η λειτουργία της κατασκευής σε κατάσταση αστοχίας και επειδή η σεισμική φόρτιση είναι επιβαλλόμενη παραμόρφωση και όχι επιβαλλόμενη φόρτιση, στο σχεδιασμό των φορέων υπεισέρχονται και παραμορφωσιακά μεγέθη του φορέα σε κατάσταση αστοχίας, η πλαστιμότητα.

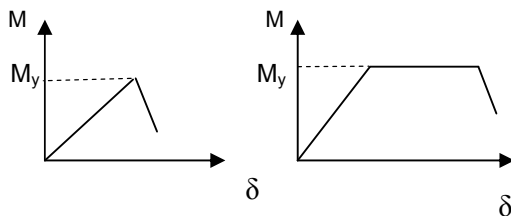
7.1 Η Πλαστιμότητα ως Μέγεθος της Παραμορφωσιακής Συμπεριφοράς σε Κατάσταση Αστοχίας

Διακρίνονται δύο τύποι παραμορφωσιακής συμπεριφοράς: η ελαστική και η ελαστοπλαστική.

Στο Σχ. 1 δίνονται τα διαγράμματα συμπεριφοράς για τους δύο αυτούς τύπους.

Στον κατακόρυφο άξονα των διαγραμμάτων τίθεται το μέγεθος της δράσης και στον οριζόντιο άξονα το μέγεθος της απόκρισης της κατασκευής.

Στην περίπτωση καμπτικής επιπόνησης στον κατακόρυφο άξονα τίθεται το φορτίο P ή η ροπή M και στον οριζόντιο η μετατόπιση δ (βέλος).



Σχ. 7.1 Διαγράμματα συμπεριφοράς για (α) ελαστική και (β) ελαστοπλαστική συμπεριφορά

Ορίζονται δύο δείκτες παραμορφωσιακής συμπεριφοράς:

➤ Η Δυσκαμψία του Φορέα

Είναι η κλίση του διαγράμματος καμπτικής συμπεριφοράς ενός φορέα για στάθμη επιπόνησης μικρότερη από τη στάθμη αστοχίας, δηλαδή για ροπή μικρότερη από τη M_y στο διάγραμμα συμπεριφοράς στο Σχ.1.

Εκφράζει τη δυσκολία παραμόρφωσης του φορέα (το βαθμό αντίστασής του στην παραμόρφωση).

➤ Η Πλαστιμότητα του Φορέα

Είναι μέγεθος για στάθμη επιπόνησης που αντιστοιχεί στην αστοχία του φορέα, δηλαδή

για ροπή μεγαλύτερη από τη M_y στο διάγραμμα συμπεριφοράς στο Σχ.1.

Εκφράζει την ευκολία παραμόρφωσης του φορέα στη στάθμη αστοχίας (σε αντίθεση με το μέγεθος της δυσκαμψίας το οποίο εκφράζει τη δυσκολία παραμόρφωσης στη στάθμη λειτουργίας του φορέα).

❖ **Η αστοχία φορέα με μεγάλη πλαστιμότητα είναι πιο παρατεταμένη απ' αυτήν φορέα με μικρότερη πλαστιμότητα.**

7.2 Ο Δείκτης Πλαστιμότητας ως Μέτρο της Πλαστιμότητας

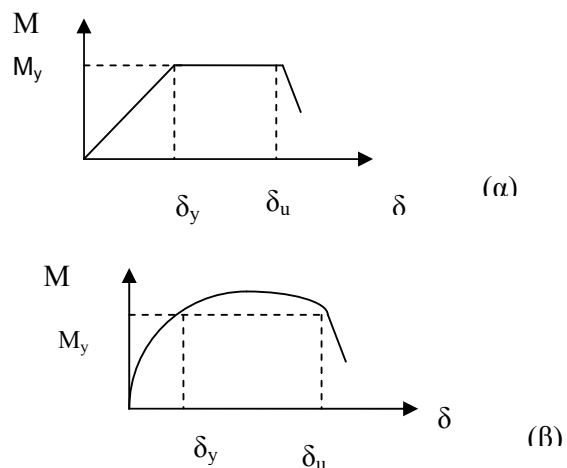
Μέτρο της πλαστιμότητας ορίζεται ο **δείκτης πλαστιμότητας μ** ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = \delta_u / \delta_y,$$

όπου:

δ_y είναι η μετατόπιση που αντιστοιχεί στη διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα, και

δ_u είναι η μετατόπιση που αντιστοιχεί σε απότομη πτώση του φορτίου ή της καμπτικής ροπής, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.



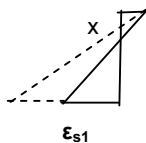
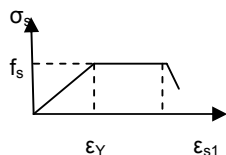
Σχ. 7.2 Ορισμός δείκτη πλαστιμότητας μ για (α) διγραμμικό και (β) καμπύλο διάγραμμα συμπεριφοράς

Σε περίπτωση που η στάθμη διαρροής στο διάγραμμα συμπεριφοράς δεν είναι σαφής, ο δείκτης πλαστιμότητας εντοπίζεται όπως φαίνεται στο Σχ. 2(β).

Η οριζοντίωση του διαγράμματος μετά τη διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα προκύπτει γιατί, ενώ με την αύξηση της επιπόνησης αυξάνει η παραμόρφωση ϵ_{s1} και η ϵ_c και, γι' αυτό, αυξάνει η καμπυλότητα $1/r$, η τάση και, άρα, και η δύναμη του χάλυβα παραμένει, όπως φαίνεται στο σχήμα, σταθερή.

Η μικρή αύξηση της ροπής μετά την παραμόρφωση διαρροής ϵ_y του εφελκυσμένου χάλυβα οφείλεται στην μικρή αύξηση του μοχλοβραχίονα z των εσωτερικών δυνάμεων λόγω της μικρής μείωσης του βάθους της θλιβόμενης ζώνης x .

(Επειδή ο ουδέτερος άξονας είναι προς την ίνα 2, η μείωση του x είναι, όπως φαίνεται στο σχήμα, μικρότερη απ' ό,τι η αύξηση της ϵ_{s1}).



7.3 Τα Επίπεδα Αναφοράς της Κατασκευής και οι Δύο Δείκτες Πλαστιμότητας

Κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Ο ενιαίος φέρωντας οργανισμός της κατασκευής θεωρείται ότι αποτελείται από **επί μέρους φορείς**,
2. Ο κάθε φορέας θεωρείται ότι **απαρτίζεται από επί μέρους διατομές**.

Σ' αντιστοιχία με τα επίπεδα αυτά του σχεδιασμού διακρίνονται οι παρακάτω δείκτες πλαστιμότητας:

- Ο δείκτης πλαστιμότητας μετακινήσεων $\mu_\delta = \delta_u / \delta_y$.

δ : το βέλος του φορέα στην κρίσιμη διατομή.

Αντιστοιχεί σε επίπεδο φορέα.

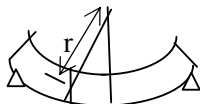
- Ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων $\mu_{1/R} = (1/r)_u / (1/r)_y$.

Αντιστοιχεί σε επίπεδο διατομής.

$1/r$: η καμπυλότητα της κρίσιμης διατομής του φορέα, (βλ. κεφ. 8.1).

r : είναι, όπως φαίνεται στο σχήμα, η ακτίνα καμπυλότητας του φορέα.

Αν θεωρήσουμε τον παραμορφωμένο φορέα τόξο κύκλου, r είναι η ακτίνα του κύκλου.



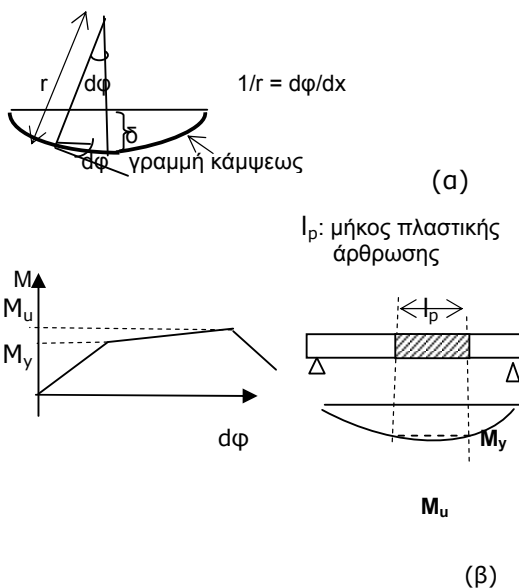
7.4 Πλαστιμότητα και Ανακατανομή της Έντασης

Η απαίτηση για Υπερστατικότητα

7.4.1 Η Έννοια της Πλαστικής Άρθρωσης

Όπως φαίνεται στο Σχ. 3(a), σε μια θέση του φορέα η γωνία στροφής $d\phi$ κατά μήκος του κεντροβαρικού άξονά του είναι ανάλογη της καμπυλότητας $1/r$ της εγκάρσιας διατομής του φορέα στη θέση αυτή.

Όταν στις κρίσιμες διατομές του φορέα η καμπτική ροπή υπερβεί τη ροπή διαρροής M_y , η καμπυλότητα $1/r$ και, άρα, και η γωνία $d\phi$ αυξάνεται συνεχώς για αμελητέα αύξηση του φορτίου. Η παραμορφωσιακή κατάσταση στη θέση αυτή αντιστοιχεί σ' αυτήν αρθρωτής στήριξης και δηλώνεται ως **πλαστική άρθρωση**.



Σχ. 7.3 (α) Συσχέτιση $d\phi$ και $1/r$

(β) μήκος πλαστικής άρθρωσης

Η περιοχή του φορέα στην οποία η δρώσα ροπή υπερβαίνει, όπως φαίνεται στο Σχ. 3(β), τη ροπή διαρροής M_y αποτελεί το **μήκος της πλαστικής άρθρωσης**. Είναι η περιοχή στην οποία όλες οι εγκάρσιες διατομές του φορέα συμπεριφέρονται ως αρθρώσεις.

Η περιοχή αυτή δηλώνεται, επίσης, και ως το **κρίσιμο μήκος** του φορέα.

7.4.2 Η Αύξηση της Φέρουσας Ικανότητας Υπερστατικών

Φορέων

Στην περίπτωση υπερστατικών φορέων η πλαστιμότητα του φορέα του επιτρέπει να φέρει μεγαλύτερο φορτίο λόγω ανακατανομής της έντασής του.

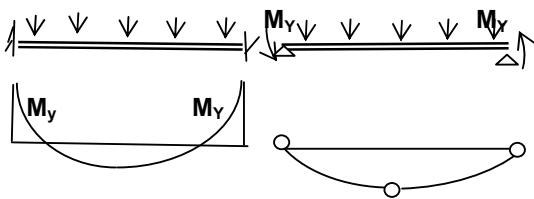
Για παράδειγμα:

Στην περίπτωση μιας αμφίπακτης δοκού στην ελαστική περιοχή (για μικρή επιπόνηση) είναι:

- $M = q \cdot l^2 / 12$ στις στηρίξεις
- $M = l^2 / 24$ στο μέσον του ανοίγματος

Όταν η ροπή στις ακραίες διατομές φθάσει την τιμή διαρροής M_y το φορτίο θα είναι:

$$\diamond \quad q = 12 M_y / l^2 \quad (1)$$



Σχ. 7.4 Δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στις στηρίξεις αμφίπακτου φορέα

Με περαιτέρω αύξηση της ροπής στις διατομές αυτές σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις και ο φορέας συμπεριφέρεται, όπως φαίνεται στο Σχ. 4, ως αμφιέριστος επιπονούμενος στις αρθρωτές στηρίξεις του με ροπές ίσες με M_y .

Αν ο φορέας έχει ικανή πλαστιμότητα, θα μπορέσει να συνεχίσει να δέχεται φορτίο.

Με την αύξηση του φορτίου η ροπή στις πλαστικές αρθρώσεις παραμένει περίπου σταθερή, ενώ αυξάνεται η ροπή στο μέσον του ανοίγματος του έως ότου σχηματιστεί και εκεί πλαστική άρθρωση, οπότε ο φορέας καθίσταται μηχανισμός και δεν μπορεί ν' αντέξει άλλο φορτίο.

Στην οριακή αυτή κατάσταση από την ισορροπία του φορέα προκύπτει:

$$2M_y = q_u \cdot l^2 / 8 \quad (2)$$

Από τη σχέση (2) προκύπτει:

$$\diamond \quad q_u = 16 M_y / l^2 \quad (3)$$

Συγκρίνοντας τις τιμές στη σχέση (1) και (3) προκύπτει:

$$\diamond \quad q_u / q = 16 / 12 = 1.33 \quad (4)$$

Από τη σχέση (4) προκύπτει ότι:

- Χάρη στην δυνατότητα ανακατανομής της έντασης που επιτρέπει η πλαστιμότητα του

φορέα, η φέρουσα ικανότητα του φορέα αυξάνεται κατά 33%.

Ανακεφαλαιωτικά:

Αν η κατασκευή είναι πλάσιμη και υπερστατική:

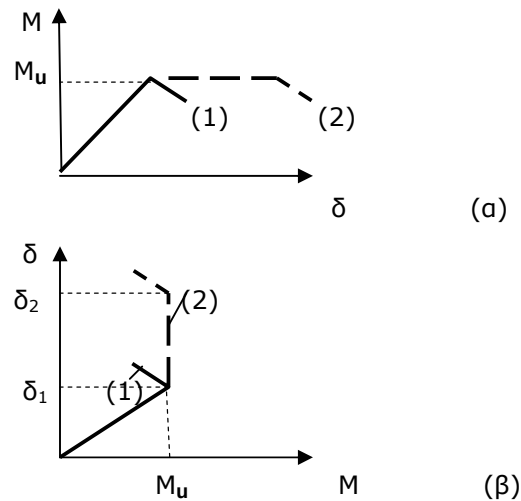
- Μπορεί να υπερβληθεί η αντοχή διαρροής σε μια κρίσιμη διατομή ενός μέλους της χωρίς να αστοχήσει όλο το σύστημα της κατασκευής.

Λόγω της πλαστιμότητάς του, το μέλος θα καθυστερήσει την αστοχία του και θα δώσει τη δυνατότητα να αναλάβουν περαιτέρω φορτίο και να φθάσουν σε διαρροή κι άλλες κρίσιμες διατομές στο μέλος αυτό ή σε άλλα μέλη της κατασκευής.

Η κατασκευή θα καταρρεύσει όταν αστοχήσουν τόσα μέλη της και σε τέτοιες θέσεις (όπως σε θέσεις υποστυλωμάτων) ώστε η κατασκευή να μετατραπεί σε μηχανισμό.

7.5 Πλαστιμότητα και Μέγεθος της Επιπόνησης

Οι καμπύλες (1) και (2) στο Σχ. 5 αντιστοιχούν στις καμπύλες συμπεριφοράς φορέα με δύο διαφορετικούς σχεδιασμούς, λιγότερο και περισσότερο πλάστιμο.



Σχ. 7.5 Φέρουσα ικανότητα σε (α) κατακόρυφα φορτία και (β) σεισμικά φορτία

Στην περίπτωση κατακόρυφης φόρτισης επιβαλλόμενο μέγεθος είναι, όπως φαίνεται στο Σχ. 5(α), το φορτίο και ο φορέας αποκρίνεται με μετατόπιση δ .

Και οι δύο σχεδιασμοί (1) και (2) είναι αποδεκτοί, αφού εξασφαλίζουν ίδια φέρουσα

ικανότητα του φορέα, αφού η ροπή αστοχίας είναι η ίδια και για τους δύο σχεδιασμούς.

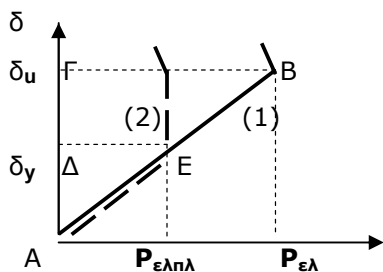
Ο φορέας με το σχεδιασμό (2) με τη μεγαλύτερη πλαστιμότητα δεν μπορεί να δεχθεί μεγαλύτερο φορτίο.

Σε σύγκριση με τον φορέα (1) θα επιδείξει απλά πιο παρατεταμένη αστοχία και, γι αυτό, θα διαθέτει μεγαλύτερη ασφάλεια.

Στην περίπτωση της σεισμικής φόρτισης επιβαλλόμενο μέγεθος είναι, όπως φαίνεται στο Σχ. 5(β), η μετατόπιση δ και ο φορέας αποκρίνεται με φορτίο P .

Ο φορέας (2) θ' αντέξει σεισμική φόρτιση, μεγέθους δ_2 , μεγαλύτερη απ' αυτήν, μεγέθους δ_1 , που θ' αντέξει ο φορέας (1).

Για δεδομένη σεισμική φόρτιση μεγέθους δ η δύναμη απόκρισης θα είναι, όπως φαίνεται στο Σχ. 6, αντίστροφα ανάλογη του δείκτη πλαστιμότητας του φορέα.



Σχ. 7.6 Ορισμός δείκτη ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς

Αν $P_{ελ}$ και $P_{ελπλ}$ είναι η δύναμη απόκρισης φορέα με ελαστική και ελαστοπλαστική συμπεριφορά, αντίστοιχα, από τα όμοια τρίγωνα ABΓ και ADE στο Σχ. 6 προκύπτει:

$$P_{ελ}/P_{ελπλ} = \delta_u/\delta_y \quad (1)$$

$$P_{ελπλ} = P_{ελ}/q \quad (2)$$

Από τις σχέσεις (1) και (2) προκύπτει η (3):

$$\diamond q = P_{ελ}/P_{ελπλ} \quad (3)$$

$$P_{ελ}/P_{ελπλ} = \delta_u/\delta_y = \mu_\delta$$

7.5.1 Συντελεστής Ελαστοπλαστικής Συμπεριφοράς και η Εξάρτησή του από την Πλαστιμότητα

Ο λόγος $P_{ελ}/P_{ελπλ}$ δηλώνεται ως δείκτης ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς και συμβολίζεται με το q .

$$\diamond q = P_{ελ}/P_{ελπλ} \quad (2)$$

Ο συντελεστής q δηλώνει τη μείωση της επιπονούσας δύναμης λόγω ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς της κατασκευής.

Ο λόγος δ_u/δ_y ισούται με το δείκτη πλαστιμότητας μ_δ .

Αντικαθιστώντας στη σχέση (1) τους λόγους με τα μεγέθη q και μ_δ προκύπτει ότι:

❖ Ο συντελεστής q μπορεί να ληφθεί **ίσος με** το δείκτη πλαστιμότητας μ_δ .

Κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό υιοθετείται μία τιμή για τον συντελεστή q (για κατάσκευές από σκυρόδεμα οι κανονισμοί συνιστούν $q = 3$) η οποία οφείλει να εξασφαλιστεί διαστασιολογώντας την κατασκευή έτσι ώστε να διαθέτει τον δείκτη πλαστιμότητας μ_δ που αντιστοιχεί στην τιμή αυτή του μ_δ (βλ. και κεφ. 2, ενότητα Β).

7.6 Η Διαφορετική Βαρύτητα της Πλαστιμότητας στους Δύο Σχεδιασμούς της Κατασκευής

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το μέγεθος της πλαστιμότητας έχει εντελώς άλλη βαρύτητα κατά τους δύο σχεδιασμούς του Φ.Ο της κατασκευής:

➤ **Κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό το μέγεθος της πλαστιμότητας είναι το ίδιο σημαντικό όσο και οι καμπτικές, διατμητικές και κ.λ.π αντοχές των φορέων**, αφού η τιμή της πλαστιμότητας καθορίζει την τιμή των σεισμικών φορτίων που θα δράσουν στην κατασκευή.

Αν δεν υλοποιηθεί η τιμή της πλαστιμότητας που υιοθετήθηκε κατά τον σχεδιασμό, θα μεταβληθεί το μέγεθος των σεισμικών φορτίων που θα δράσουν στην κατασκευή.

Για παράδειγμα:

Αν η τιμή της πλαστιμότητας στην κατασκευή είναι η μισή από την τιμή που ελήφθη στο σχεδιασμό, η τιμή των σεισμικών φορτίων που θα δράσουν στην κατασκευή θα είναι διπλάσια από αυτή που ελήφθη στο σχεδιασμό.

Οι συνέπειες θα είναι ίδιες μ' αυτές που θα προέκυπταν αν οι αντοχές των φορέων της κατασκευής ήταν μικρότερες απ' αυτές του σχεδιασμού.

➤ **Κατά το σχεδιασμό με κατακόρυφα μόνον φορτία η ικανή πλαστιμότητα των φορέων είναι απλά ένα επιθυμητό μέγεθος**, καθώς μεγαλύτερη πλαστιμότητα σημαίνει πιο παρατεταμένη αστοχία και, γι αυτό, περισσότερες προειδοποιητικές ενδείξεις με τη μορφή αυξανόμενου βέλους και διευρυνόμενων ρωγμών παρέχοντας το χρονικό περιθώριο για την εγκατάλειψη της κατασκευής ή και για μερική αποφόρτιση της και αποφυγή της τελικής αστοχίας της.

- ♦ *Αν ληφθεί, όμως, υπόψη ότι για τα κατακόρυφα φορτία η κατασκευή σχεδιάζεται με αρκετό περιθώριο ασφαλείας ώστε να μην φθάσει σε κατάσταση αστοχίας, η προστατευτική*

αυτή δράση του πλάστιμου σχεδιασμού των κατασκευών θα ενεργοποιηθεί μόνον σε ακραίες μη προβλεπόμενες περιπτώσεις υπερφόρτισης της κατασκευής.