

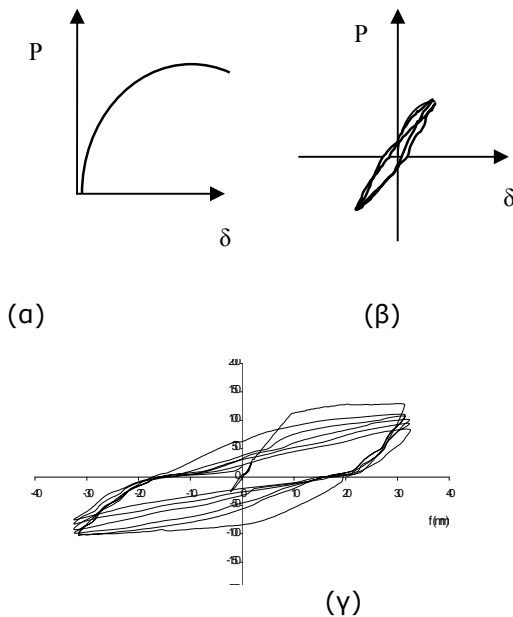
13. ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Στα προηγούμενα κεφάλαια εντοπίστηκαν οι μεταβολές στα μεγέθη των δράσεων, καμπτικών ροπών και τεμνουσών, που αποτελούν το πρώτο σκέλος της ανίσωσης ασφαλείας, λόγω των διαφοροποιήσεων της σεισμικής φόρτισης.

Στο κεφάλαιο αυτό και το επόμενο εντοπίζονται οι μεταβολές στην καμπτική και διατμητική αντοχή που αποτελούν το δεύτερο σκέλος της ανίσωσης ασφαλείας που είναι το κλειδί κάθε σχεδιασμού.

13.1 Μεταβολή στο Διάγραμμα Συμπεριφοράς

Στο Σχ. 1(α) δίνεται το διάγραμμα συμπεριφοράς P-δ ενός φορέα υπό μονότονη επιπόνηση (περίπτωση κατακόρυφων φορτίων) και στο Σχ. 1(β) και (γ) το διάγραμμα συμπεριφοράς του φορέα υπό εναλλασσόμενη επιπόνηση μικρού εύρους (ανακύκλιση για μετατόπιση $\delta = \delta_y$, όπου δ_y είναι η μετατόπιση που αντιστοιχεί στην διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα) και μεγάλου εύρους (ανακύκλιση για μετατόπιση $\delta = 3\delta_y$).



Σχ. 13.1 Διάγραμμα P-δ δοκού για (α) μονότονη επιπόνηση, (β) στάθμη εναλλαγής $\delta = \delta_y$ και (γ) $\delta = 3\delta_y$

Στην περίπτωση της εναλλασσόμενης επιπόνησης το διάγραμμα συμπεριφοράς είναι υπό μορφή (υστερητικών) βρόχων που προκύπτουν λόγω της ανακύκλισης της επιπόνησης.

Το εμβαδόν κάθε βρόχου αποτελεί μέτρο της μετασχηματιζόμενης ενέργειας.

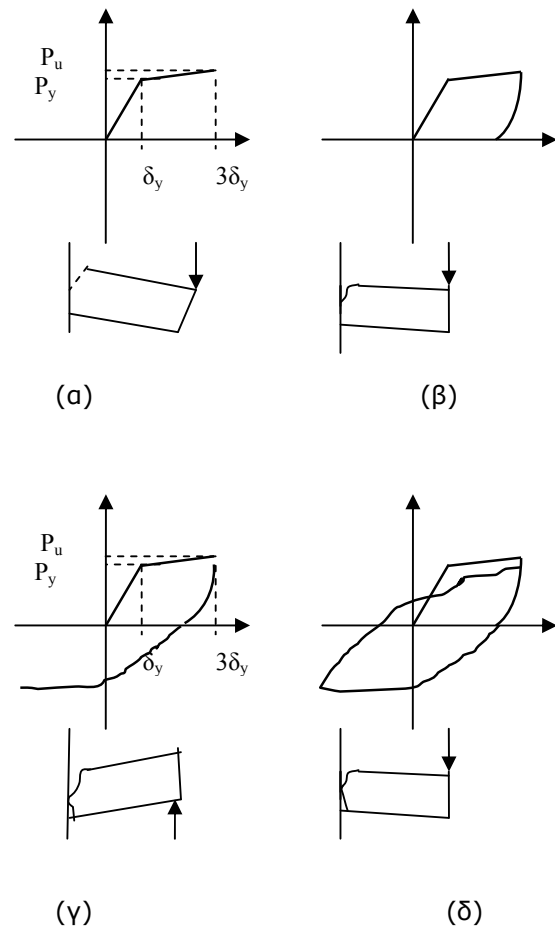
Στο Σχ. 2 δίνεται η προοδευτική εξέλιξη του διαγράμματος P-δ στην περίπτωση εναλλασσόμενης επιπόνησης και η αντίστοιχη εξέλιξη της ρηγμάτωσης του φορέα για τις παρακάτω στάθμες της επιβαλλόμενης μετατόπισης:

(α): αρχική επιπόνηση μέχρι $\delta = 3\delta_y$,

(β): αποεπιπόνηση μέχρι $P = 0$,

(γ): ανάστροφη επιπόνηση, μέχρι $\delta = 3\delta$

(δ): εκ νέου επιπόνηση μέχρι $\delta = 3\delta_y$.



Σχ. 13.2 Προοδευτική εξέλιξη διαγράμματος P-δ και αντίστοιχης ρηγμάτωσης του φορέα

του φορέα

13.2 Μεταβολή στους Δείκτες Συμπεριφοράς

Στην περίπτωση κατακόρυφης φόρτισης δείκτες της συμπεριφοράς του φορέα είναι η τιμή της καμπτικής αντοχής M_u ή του μέγιστου φορτίου P_u και προκειμένου για υπολογισμό βελών η δυσκαμψία του φορέα.

Στην περίπτωση της εναλλασσόμενης επιπόνησης εκτός από το μέγιστο φορτίο σημαντικοί **δείκτες συμπεριφοράς** είναι και τα παρακάτω μεγέθη:

- **Ο αριθμός των κύκλων επιπόνησης τους οποίους αντέχει ο φορέας χωρίς σημαντική μείωση της φέρουσας ικανότητάς του.**
- **Η μείωση του μέγιστου φορτίου με τον αριθμό των κύκλων (βλ. πίνακα 1).**
- **Η μείωση της δυσκαμψίας σε κάποια στάθμη (π.χ. η αρχική δυσκαμψία, βλ. κεφ.12.2 στην ενότητα Α) με τον αριθμό των κύκλων.**

13.3 Μεταβολή των Δεικτών Συμπεριφοράς με την Εναλλαγή της Επιπόνησης

Όπως φαίνεται από τη μορφή του διαγράμματος συμπεριφοράς στο Σχ. 1(γ), με την εναλλαγή της επιπόνησης παρατηρούνται οι παρακάτω μεταβολές:

- **Μείωση της δυσκαμψίας**
- **Μείωση της (απομένουσας) πλαστιμότητας**
- **Μείωση της φέρουσας ικανότητας (μεγιστής δυνατής δύναμης επιπόνησης)**
- **Μείωση του εμβαδού των υστερητικών βρόχων**

13.4 Συνέπειες από τη Μεταβολή των Δεικτών

Στην περίπτωση μέτρων σεισμών που επιπονούν τον φορέα στην ελαστική του περιο-

χή (γραμμική περιοχή του διαγράμματος συμπεριφοράς), οι παραπάνω μεταβολές είναι, όπως φαίνεται στο Σχ. 1(β) αμελητέες.

Ο φορέας μπορεί να θεωρηθεί ότι μπορεί να αντέξει μια απειρία τέτοιων επιπονήσεων, αφού αυτές δεν τον εξασθενούν.

Στην περίπτωση ισχυρού σεισμού που επιπονει το φορέα στην περιοχή της αστοχίας του:

- *Λόγω της μείωσης της πλαστιμότητας του φορέα αυξάνει η επιπονούσα δύναμη (βλ. κεφ. 6), ενώ,*
- *Λόγω της μείωσης της δυσκαμψίας, της αντοχής και του εμβαδού του υστερητικού βρόχου μειώνεται η απόκριση του φορέα σ' αυτή.*

Γι αυτό, η ικανότητα του φορέα για ανάληψη σεισμικού φορτίου φθίνει συνεχώς.

13.5 Μεταβολή στην Καμπτική Αντοχή

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα στο Σχ. 1(γ), δεν παρατηρείται διακριτή μεταβολή του μέγιστου φορτίου μετά τους πρώτους δυό-τρεις κύκλους.

Γι αυτό:

- ❖ **Δεν προβλέπεται στους κανονισμούς διαφοροποίηση στην τιμή της καμπτικής αντοχής.**

Σημειώνεται ότι:

- ❖ **Η μη διαφοροποίηση της καμπτικής αντοχής είναι λάθος**, όπως σχολιάζεται στο κεφ. 15, για **στοιχεία με περιμετρική κατανομή του διαμήκους οπλισμού** που αποτελούν την πλειοψηφία των κατακόρυφων στοιχείων, υποστυλωμάτων και τοιχωμάτων.

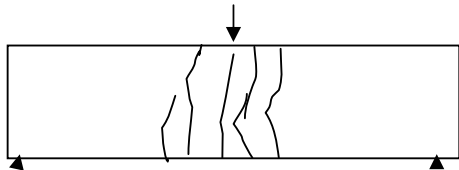
Πίνακας 1: Μεταβολή φορτίου P και δυσκαμψίας K με τον αριθμό των κύκλων

	ΚΥΚΛΟΙ ΦΟΡΤΙΣΗΣ										
	1 ^{ος}	2 ^{ος}	3 ^{ος}	4 ^{ος}	5 ^{ος}	6 ^{ος}	7 ^{ος}	8 ^{ος}	9 ^{ος}	10 ^{ος}	11 ^{ος}
P_{max} [kN]	168,5	153,2	149,3	146,2	143,7	143	138,1	132	120,2	100,1	
K	33,96	34,13	34,3	34,08	33,16	34,03	31,7	34,83	32,9	34,29	

14. ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ

14.1 Διαφοροποίηση στη Μορφολογία των Ρωγμών

Οι καμπτικές ρωγμές, κάθετες στις ορθές εφελκυστικές τάσεις, εμφανίζονται κάθετες στον κεντροβαρικό άξονα του φορέα στις θέσεις της μέγιστης τιμής της καμπτικής ροπής.



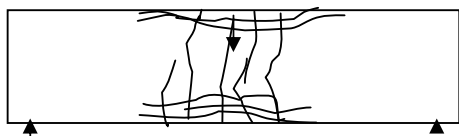
Σχ. 14.1 Καμπτική ρηγμάτωση

Στην περίπτωση της μονότονης επιπόνησης το άνοιγμα των ρωγμών αυτών βαίνει μειούμενο και μηδενίζεται στη στάθμη (περίπου) του ουδέτερου άξονα.

Στην περίπτωση της εναλλασσόμενης επιπόνησης οι καμπτικές ρωγμές εκτείνονται, όπως φαίνεται στο Σχ. 13.2(δ) και στο Σχ.1, σ' όλο το ύψος της διατομής, καθώς οι ρωγμές που προκύπτουν πριν και μετά την αντιστροφή της επιπόνησης εμφανίζονται στην ίδια περίπου θέση και διεύθυνση.

14.2 Διαφοροποίηση στον Τύπο Αστοχίας

Σε φορείς σχεδιασμένους για καμπτική αστοχία μετά την ανάπτυξη μιας σειράς καμπτικών ρωγμών η **αστοχία** σηματοδοτείται από την εμφάνιση σύνθλιψης του σκυροδέματος στην θλιβόμενη ζώνη, όπως φαίνεται στο Σχ.2.



Σχ. 14.2 Καμπτική αστοχία

14.3 Αρχική και Τελική Αστοχία

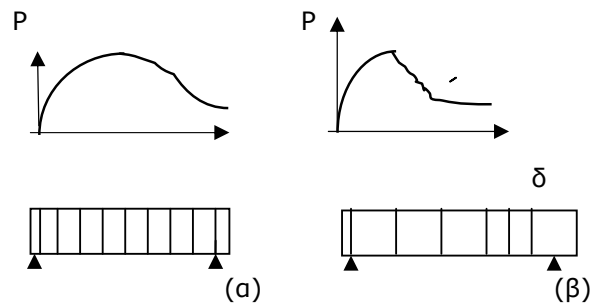
14.3.1 Τελική Αστοχία Λόγω Λυγισμού των Διαμήκων Ράβδων

Λόγω της αποκόλλησης του σκυροδέματος της επικάλυψης των διαμήκων θλιβόμενων ράβδων κατά την (αρχική) καμπτική αστοχία, επι-

ταχύνεται ο **λυγισμός των διαμήκων ράβδων** και, γι αυτό, επιταχύνεται η απώλεια της φέρουσας ικανότητας των φορέων και επέρχεται η **τελική αστοχία τους**.

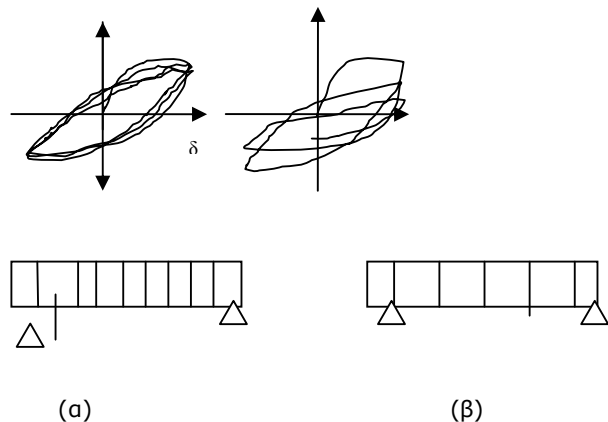
Η επιτάχυνση αυτή εξαρτάται, προφανώς από την πυκνότητα των συνδετήρων και τη διάμετρο των διαμήκων ράβδων.

Είναι εντονότερη στην περίπτωση μεγαλύτερης απόστασης των συνδετήρων είτε μικρότερης διαμέτρου των διαμήκων ράβδων.



Σχ. 14.3 Μορφή διαγράμματος P-δ για φορέα με (α) πυκνούς συνδετήρες και (β) αραιούς συνδετήρες-Μονότονη επιπόνηση

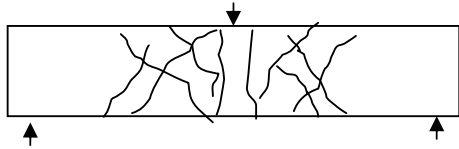
Αντανακλάται στο διάγραμμα συμπεριφοράς των φορέων στην μεν περίπτωση της μονότονης επιπόνησης από τη μεγαλύτερη κλίση του κατερχόμενου κλάδου, όπως φαίνεται στο Σχ. 3(β), στη δε εναλλασσόμενη επιπόνηση από το μεγαλύτερο βαθμό μείωσης της φέρουσας ικανότητας μεταξύ διαδοχικών κύκλων επιπόνησης, όπως φαίνεται στο Σχ. 4(β).



Σχ. 14.4 Μορφή διαγράμματος P-δ για φορέα με (α) πυκνούς συνδετήρες και (β) αραιούς συνδετήρες-Εναλλασσόμενη επιπόνηση

14.3.2 Καμπτοδιατμητική Τελική Αστοχία

Σε μερικά πειραματικά στοιχεία έχει παρατηρηθεί η τελική αστοχία να είναι καμπτοδιατμητική, όπως φαίνεται στο Σχ. 5, μολονότι η μορφολογία της ρηγμάτωσης στους πρώτους κύκλους είναι καθαρά καμπτική (ρωγμές κάθετες στον κεντροβαρικό άξονα του στοιχείου).



Σχ. 14.5 Καμπτοδιατμητικός τύπος αστοχίας

Η εμφάνιση λοξών διατμητικών ρωγμών σε στοιχεία σχεδιασμένα για καμπτική αστοχία μπορεί εύκολα να κατανοηθεί, αν η εναλλαγή της επιπόνησης ειδωθεί ως αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου.

Αυτό πιστοποιείται από τη συνεχή αύξηση του ανοίγματος των καμπτοδιατμητικών ρωγμών με τον αριθμό των κύκλων, όπως ακριβώς θα συνέβαινε αν αντί να αυξάνονται οι κύκλοι αυξανόταν το φορτίο.

Και, όπως το στοιχείο θα αστοχούσε διατμητικά αν το φορτίο ξεπερνούσε κάποια τιμή (την αντίστοιχη στη διατμητική αντοχή του), έτσι και το στοιχείο αστοχεί διατμητικά μετά κάποιο αριθμό κύκλων.

14.3.3 Συμπερασματικά

Ο τύπος της τελικής αστοχίας στοιχείων με αρχική καμπτική αστοχία (αστοχία κατά τους πρώτους κύκλους επιπόνησης) μπορεί να είναι λόγω:

- *Λυγισμού των διαμήκων ράβδων*
- *Εμφάνισης δισδιαγώνιων ρωγμών*

Ποιός από τους δύο τύπους τελικής αστοχίας θα εμφανιστεί σε έναν φορέα εξαρτάται από τη σχέση του εγκάρσιου και διαμήκους οπλισμού. Οι διατμητικά υπεροπλισμένοι φορείς θα εμφανίσουν τον πρώτο τύπο τελικής αστοχίας. Οι υπόλοιποι φορείς θα εμφανίσουν τον δεύτερο τύπο αστοχίας.

14.4 Εικόνες Αστοχίας στις Κατασκευές

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται ενδεικτικές εικόνες ρωγμών και αστοχιών κατασκευών στην Αττική κατά τον τελευταίο σεισμό. Είναι εμφανής ο λυγισμός των διαμήκων ράβδων

που αποτέλεσε και τον τελικό τύπο αστοχίας των κατασκευών αυτών.



Εικόνα 1



Εικόνα 2



Εικόνα 3



Εικόνα 4