

## ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΠΟ ΔΟΜΙΚΟ ΧΑΛΥΒΑ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΚΑΙ ΙΞΩΔΗ ΑΠΟΣΒΕΣΗ

**Ιωάννης Γ. Ραυτογιάννης**

Επίκουρος Καθηγητής, Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών,  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 15780  
e-mail: rafto@central.ntua.gr

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή εξετάζονται συστήματα δυσκαμψίας σε πλαίσια από χάλυβα, τα μέλη των οποίων εμπεριέχουν μηχανισμούς ιξώδους απόσβεσης από σύνθετα υλικά FRP που εφαρμόζονται είτε ενδιάμεσα είτε στους κόμβους και έχουν τη δυνατότητα να ενεργούν αποτελεσματικά στον περιορισμό του εύρους ταλάντωσης των πλαισίων που φορτίζονται δυναμικά. Η χρήση συστημάτων απόσβεσης έχει ως κύριο πλεονέκτημα τη μείωση των δράσεων που μεταβιβάζονται στις στηρίξεις και των μετατοπίσεων δεδομένου ότι η ταχύτητα κίνησης και η μέγιστη δράση απόσβεσης είναι σε διαφορά φάσεως κατά την ταλάντωση. Σε μια κατασκευή με συνδέσμους δυσκαμψίας και συστήματα απόσβεσης, η απώλεια ενέργειας εξαρτάται απλώς από τη μη-γραμμική κυκλική απόκριση των συνδέσμων. Επιπλέον, η προσθήκη συστημάτων απόσβεσης σε ένα χαλύβδινο πλαίσιο τροποποιεί τις σχέσεις δράσεων – μετατοπίσεων καθώς επίσης και τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Εδώ παρουσιάζεται μια παραμετρική μελέτη προκειμένου να καθοριστούν οι βάσεις σχεδιασμού για απλά πλαίσια από χάλυβα με συστήματα δυσκαμψίας που εμπεριέχουν μηχανισμούς απόσβεσης FRP. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αντίστοιχα για τα ίδια μοντέλα πλαισίων χωρίς απόσβεση και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για το σχεδιασμό.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση κατακορύφων συνδέσμων δυσκαμψίας σε χαλύβδινα πλαίσια για την παραλαβή οριζόντιων δράσεων αποτελεί συνήθη πρακτική στο σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών. Πληθώρα τύπων συνδέσμων δυσκαμψίας έχει αναπτυχθεί προκειμένου να πληρούνται οι απαιτήσεις σχεδιασμού καθώς επίσης και λοιπές αρχιτεκτονικές απαιτήσεις. Οι ισχύοντες κανονισμοί [1] περιέχουν διατάξεις σχετικές με το σχεδιασμό πλαισίων που διαθέτουν συστήματα δυσκαμψίας. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί προηγμένα συστήματα δυσκαμψίας, όπως με έκκεντρους συνδέσμους [2] και ιξοελαστικούς συνδέσμους [3] προκειμένου να παραλαμβάνονται τα οριζόντια δυναμικά φορτία. Ειδικά στα πλαίσια με ιξοελαστικούς συνδέσμους, η απόσβεση της δυναμικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω της μη-γραμμικής κυκλικής απόκρισης των συνδέσμων. Τα τελευταία χρόνια έχουν διεξαχθεί πολυάριθμες έρευνες για τη βελτίωση της απόδοσης συστημάτων δυσκαμψίας μέσω της εισαγωγής νέων δομικών σχηματισμών με χρήση υλικών υψηλής απόδοσης [4] καθώς επίσης και διατάξεων παθητικής απόσβεσης, όπως μέσω τριβής [5] ή χρήσης ρευστών ιξώδους απόσβεσης [6].

Στην εργασία αυτή, παρουσιάζεται μια διάταξη συνδέσμων δυσκαμψίας που διαθέτει μια προηγμένη σύνδεση με πλάκα από ινοπλισμένο πολυμερές υλικό (FRP) με ισχυρά ιξώδη απόσβεση. Η πλάκα αυτή εγκιβωτίζεται μέσα σε ένα δευτερεύον ορθογωνικό χαλύβδινο πλαίσιο, το οποίο προσαρτάται στη δοκό του κύριου πλαισίου. Οι δυνάμεις των συνδέσμων δυσκαμψίας διαβιβάζονται διατμητικά μέσω της πλάκας FRP στη δοκό του

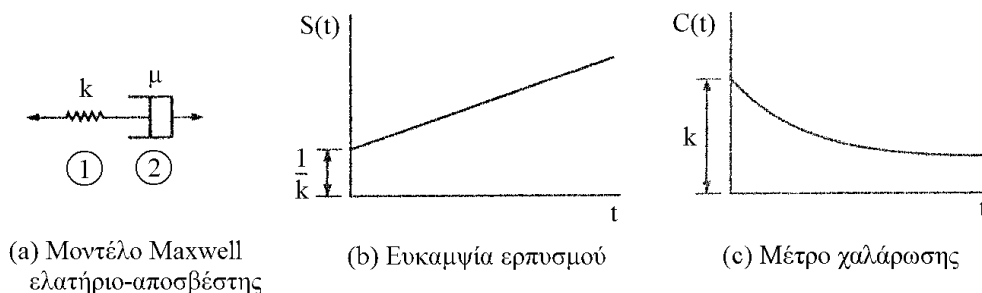
πλαίσιου. Η διάταξη αυτή διερευνήθηκε σε πρόδρομες εργασίες [7, 8] όπου για την προσομοίωση της ισοελαστικής συμπεριφοράς της πλάκας FRP υιοθετήθηκε το μοντέλο Kelvin-Voigt. Στην παρούσα εργασία υιοθετείται για την πλάκα FRP το μοντέλο Zener [9] που κρίνεται ότι προσομοιώνει πλησιέστερα στην πράξη την ισοελαστική συμπεριφορά επιμέρους συνδετικών υλικών όπως ρητίνες, εστέρες κλπ. Παρουσιάζονται συγκρίσεις της δυναμικής συμπεριφοράς πλαισίων από χάλυβα και συνδέσμους δυσκαμψίας με και χωρίς συστήματα απόσβεσης συναρτήσει του μεγέθους και της συχνότητας της δυναμικής φόρτισης καθώς επίσης και του λόγου απόσβεσης του υλικού FRP.

## 2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΙΣΟΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Όπως φαίνεται στα Σχήματα 1 έως 3, μπορούμε να μορφώσουμε χρήσιμα φυσικά μοντέλα με βάση απλά στοιχεία όπως ελαστικά ελατήρια και ιξώδεις αποσβέστες, όπου η σταθερά  $k$  του ελατηρίου ακολουθεί τον νόμο του Hooke και ο αποσβέστης είναι πληρωμένος με Νευτώνιο ρευστό ιξώδους  $\mu$ . Έτσι, η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων είναι της μορφής  $\varepsilon = \sigma/k$  ενώ η αντίστοιχη σχέση για τον ιξώδη αποσβέστη είναι  $\dot{\varepsilon} = \sigma/\mu$  (όπου η τελεία σημαίνει παραγωγή ως προς το χρόνο). Το μοντέλο Maxwell αποτελείται από ένα ελατήριο και έναν αποσβέστη εν σειρά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1(α). Με βάση το μοντέλο αυτό διατυπώνεται η σχέση τάσεων παραμορφώσεων και προκύπτουν η ευκαμψία ερπυσμού  $S(t)$  και το μέτρο χαλάρωσης  $C(t)$  που φαίνονται στα Σχήματα 1(β) και 1(γ).

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{k} + \frac{\sigma}{\mu} \quad (1)$$

$$S(t) = \frac{t}{\mu} + \frac{1}{k}, \quad C(t) = k e^{-t/\lambda} \quad (2)$$



Σχ. 1 Μοντέλο Maxwell και αντίστοιχες καμπύλες ερπυσμού και χαλάρωσης

Στην εξ(2) συμβολίζεται με  $\lambda = \mu/k$  ο λεγόμενος "χρόνος χαλάρωσης". Στο Σχήμα 1(γ) φαίνεται το μέτρο χαλάρωσης συναρτήσει του χρόνου όπως προκύπτει από την εξ(2), το οποίο γενικά συμφωνεί με πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών χαλάρωσης σύνθετων υλικών. Συνεπώς, το μοντέλο Maxwell φαίνεται να προσομοιάζει σωστά το φαινόμενο χαλάρωσης, όχι όμως και τη συμπεριφορά σε ερπυσμό των σύνθετων υλικών.

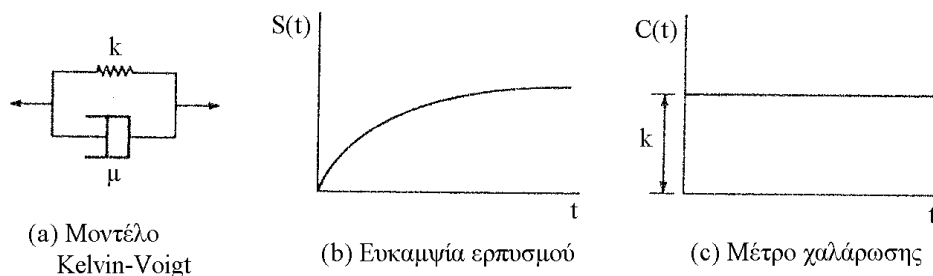
Στο Σχήμα 2(α) φαίνεται το μοντέλο Kelvin-Voigt, που αποτελείται από ένα ελατήριο και έναν αποσβέστη εν παραλλήλω. Με χρήση των σχέσεων για παράλληλη διάταξη καταλήγουμε στις αντίστοιχες σχέσεις που διέπουν τη συμπεριφορά του μοντέλου Kelvin-Voigt με το μέτρο ευκαμψίας  $S(t)$  και το μέτρο χαλάρωσης  $C(t)$

$$\sigma = k\varepsilon + \mu\dot{\varepsilon} \quad (3)$$

$$S(t) = \frac{1}{k}(1 - e^{-t/\rho}) \quad , \quad C(t) = k \quad (4)$$

όπου  $\rho = \mu/k$  είναι ο λεγόμενος "χρόνος υστέρησης". Η ευκαμψία ερπυσμού του μοντέλου Kelvin-Voigt συμφωνεί με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα για σύνθετα υλικά εκτός μόνον από την αρχική ελαστική συμπεριφορά που φαίνεται να λείπει. Αντίθετα, το μέτρο

χαλάρωσης έχει παρατηρηθεί ότι δεν είναι σταθερό όπως φαίνεται στο Σχήμα 2(γ) και συνεπώς ούτε το μοντέλο Kelvin-Voigt προσομοιάζει σωστά όλες τις παραμέτρους συμπεριφοράς σε ερπυσμό και χαλάρωση όπως αυτές προκύπτουν πειραματικά.

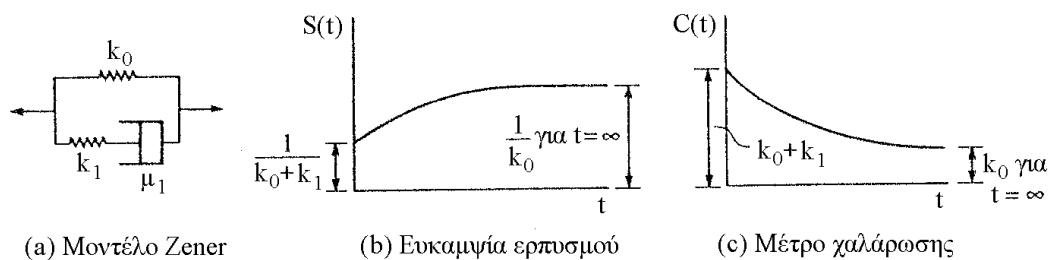


Σχ. 2 Μοντέλο Kelvin-Voigt και αντίστοιχες καμπύλες ερπυσμού και χαλάρωσης

Ένας εύκολος τρόπος βελτίωσης των μοντέλων είναι η χρήση περισσότερων στοιχείων. Ένα τέτοιο βελτιωμένο μοντέλο είναι το λεγόμενο κλασσικό γραμμικά στερεό μοντέλο ή μοντέλο Zener [9] που φαίνεται στο Σχήμα 3(α). Η διαφορική εξίσωση που διέπει τη συμπεριφορά του μοντέλου αυτού είναι

$$\sigma + \frac{\mu_1}{k_1} \dot{\sigma} = k_0 \varepsilon + \frac{\mu_1}{k_1} (k_0 + k_1) \dot{\varepsilon} \quad (5)$$

όπου οι παράμετροι  $k_0$ ,  $k_1$  και  $\mu_1$  καθορίζονται στο Σχήμα 3(α).



Σχ. 3 Μοντέλο Zener και αντίστοιχες καμπύλες ερπυσμού και χαλάρωσης

Η ευκαμψία ερπυσμού  $S(t)$  και το μέτρο χαλάρωσης  $C(t)$  για το μοντέλο Zener δίδονται από τις σχέσεις

$$S(t) = \frac{1}{k_0} \left( 1 - \frac{k_1}{k_0 + k_1} e^{-t/\rho} \right), \quad C(t) = k_0 + k_1 e^{-t/\lambda} \quad (6)$$

όπου  $\rho = \mu_1(k_0 + k_1)/k_0 k_1$  είναι ο χρόνος υστέρησης και  $\lambda = \mu_1/k_1$  είναι ο χρόνος χαλάρωσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3(β), η μορφή της καμπύλης ευκαμψίας ερπυσμού (βλ. Σχ. 3β) ταιριάζει με αντίστοιχες από πειραματικά αποτελέσματα. Το ίδιο συμβαίνει και με τη μορφή της καμπύλης του μέτρου χαλάρωσης (βλ. Σχ. 3γ), συνεπώς το μοντέλο Zener κρίνεται πλέον κατάλληλο για την προσομοίωση της ισοελαστικής συμπεριφοράς σύνθετων υλικών.

### 3. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Για αρμονική ταλάντωση του μοντέλου Zener (βλ. Σχ. 3(α)) έχουμε

$$\sigma = \sigma_0 e^{i\omega t} = (E' + iE'') \varepsilon \quad (7)$$

όπου  $\sigma = \eta$  χρονικά μεταβαλλόμενη τάση,  $\sigma_0 = \eta$  το εύρος της τάσης,  $\varepsilon = \eta$  παραμόρφωση,  $\omega = \eta$  συχνότητα ταλάντωσης,  $E' = \eta$  το μέτρο αποθήκευσης,  $E'' = \eta$  το μέτρο απωλειών και  $i$  η φανταστική μονάδα.

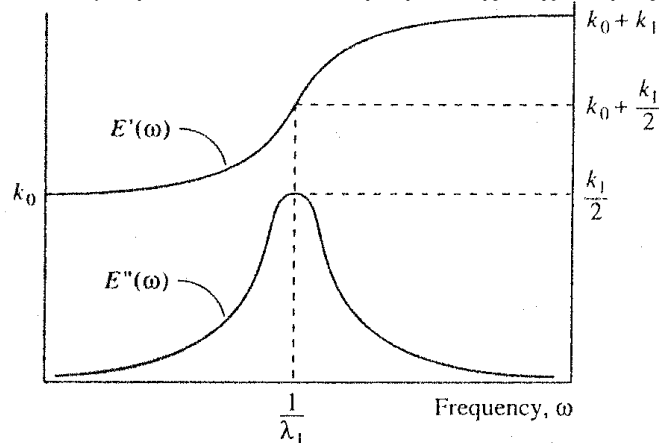
Αντικαθιστώντας την εξ(7) στην σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του μοντέλου Zener εξ(5) και διαχωρίζοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη, προκύπτουν:

$$E' = E'(\omega) = \frac{k_0 + (k_0 + k_1)\omega^2 \lambda^2}{1 + \omega^2 \lambda^2}, \quad E'' = E''(\omega) = \frac{\omega \lambda k_1}{1 + \omega^2 \lambda^2} \quad (8)$$

και συνεπώς ο λόγος απόσβεσης  $\eta = \eta(\omega)$  είναι

$$\eta = \eta(\omega) = \frac{E''(\omega)}{E'(\omega)} = \frac{\omega \lambda k_1}{k_0 + (k_0 + k_1)\omega^2 \lambda^2} \quad (9)$$

Στο Σχήμα 4 φαίνονται τα μέτρα  $E'$  και  $E''$  συναρτήσει της συχνότητας  $\omega$ .



Σχ. 4 Μέτρο αποθήκευσης  $E'(\omega)$  και μέτρο απωλειών  $E''(\omega)$  για το μοντέλο Zener

### 3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΜΕ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΤΥΠΟΥ-Λ

Θεωρούμε το πλαίσιο ABCDE από δομικό χάλυβα με ένα συμβατικό σύστημα συνδέσεων (Σχήμα 5α). Λαμβανομένου υπόψη ότι η αξονική παραμόρφωση της δοκού BCD είναι αμελητέα, η οριζόντια δύναμη  $F$  μπορεί να θεωρηθεί ότι δρα στη δοκό στο σημείο της σύνδεσης  $C$ . Δεδομένου ότι η σύνδεση είναι άκαμπτη, ένα μικρό μέρος της δύναμης παραλαμβάνεται καμπτικά από το πλαίσιο και το υπόλοιπο αξονικά από το σύστημα των συνδέσεων. Συνεπώς, το πλαίσιο μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένα μονοβάθμιο σύστημα. Η συνολική οριζόντια δυσκαμψία του πλαισίου  $K_1$  με συνδέσμους υπολογίζεται απλά προσθέτοντας τη δυσκαμψία του πλαισίου  $K_f$  και αυτήν των ενισχύσεων  $K_b$ . Δηλαδή,

$$K_1 = K_f + K_b \quad (10)$$

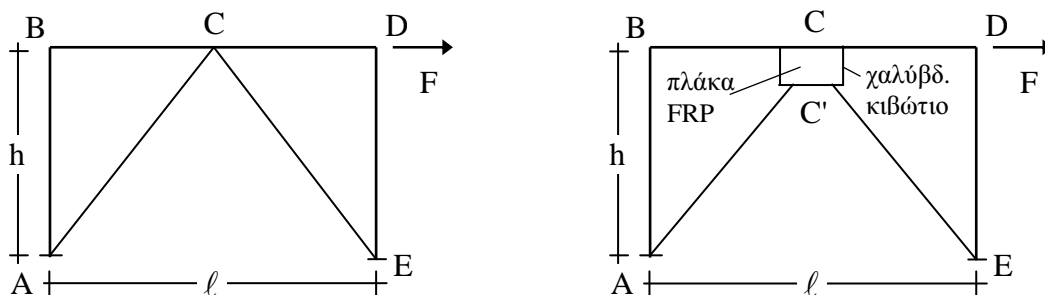
Κατά συνέπεια, η σχέση δράσεων-μετατοπίσεων για το πλαίσιο είναι

$$F = K_1 \delta_1 \quad (11)$$

όπου  $\delta_1$  είναι η οριζόντια μετατόπιση του ζυγώματος. Η εξίσωση κίνησης του πλαισίου είναι

$$M \ddot{\delta}_1 + K_1 \delta_1 = F(t) \quad (12)$$

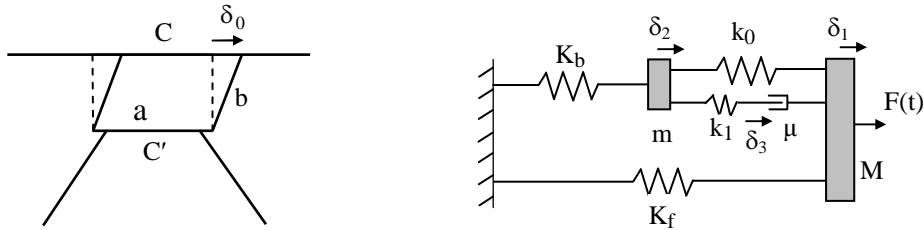
όπου  $M$  είναι η συνολική μάζα του ζυγώματος.



Σχ. 5 Πλαίσιο με συμβατικό σύστημα συνδέσεων και πλαίσιο με σύνδεση FRP.

Ας θεωρήσουμε στη συνέχεια το ίδιο πλαίσιο χάλυβα, όπου η σύνδεση C υλοποιείται χρησιμοποιώντας μια διαστρωμάτωση από FRP με διαστάσεις a και b που εγκιβωτίζεται μέσα σε ένα χαλύβδινο πλαίσιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5(β).

Όταν στο πλαίσιο επιβάλλεται η οριζόντια δράση F, και δεδομένου ότι η δυσκαμψία των συνδέσμων είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτήν του πλαισίου, η σύνθετη πλάκα υποβάλλεται σε καθαρή διατμητική καταπόνηση λόγω της οριζόντιας μετακίνησης της δοκού, δηλ. η άνω παρειά της πλάκας (σημείο C) μετατοπίζεται σχετικά με την κάτω παρειά (σημείο C') κατά  $\delta_0 = \delta_1 - \delta_2$  (βλ. Σχήμα 6α).



Σχ. 6 Διατμητική παραμόρφωση πλάκας FRP και τριβάθμιο μοντέλο πλαισίου

Είναι προφανές ότι το σύστημα έχει τώρα δύο πρόσθετους βαθμούς ελευθερίας:  $\delta_2$  και  $\delta_3$ . Το μοντέλο του τριβάθμιου συστήματος του πλαισίου φαίνεται στο Σχήμα 6(β). Οι εξισώσεις κίνησης για το τριβάθμιο σύστημα είναι

$$\begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\delta}_1 \\ \ddot{\delta}_2 \\ \ddot{\delta}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu & 0 & -\mu \\ 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\delta}_1 \\ \dot{\delta}_2 \\ \dot{\delta}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_f + k_0 & -k_0 & 0 \\ -k_0 & K_b + k_0 & -k_1 \\ 0 & -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F(t) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

όπου  $\delta_1$  και  $\delta_2$  είναι οι συνολικές μετατοπίσεις των κόμβων C και C',  $\delta_3$  είναι η μετατόπιση του εσωτερικού κόμβου του μοντέλου Zener, M είναι η μάζα του ζυγώματος, m είναι η επικόμβια μάζα του συστήματος δυσκαμψίας στο C' και  $\mu$  είναι η σταθερά απόσβεσης. Επίσης, θεωρούμε ότι η απόσβεση των μελών από χάλυβα του πλαισίου είναι αμελητέα, κατά συνέπεια διαμορφώνεται ένα εσωτερικό σύστημα απόσβεσης.

Προκειμένου να διευκολυνθεί μια παραμετρική μελέτη, εισάγονται στις εξ(13) οι ακόλουθες αδιάστατες ποσότητες:

$$f = \frac{F}{K_f \ell}, \quad t^* = \sqrt{\frac{K_f}{M}} t, \quad m^* = m/M, \quad c^* = \mu/\sqrt{K_f M}, \quad K_c^* = (k_0 + k_1)/K_f, \quad K_b^* = K_b/K_f$$

Θεωρούμε επίσης ότι ο εγκιβωτισμός της πλάκας FRP στο δευτερεύον πλαίσιο γίνεται κατά τρόπον ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα αποκόλλησης και ολίσθησης στις παρειές χάλυβα και πλάκας FRP.

#### 4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η σύνδεση πλάκας FRP – συνδέσμων οδηγεί σε μια μειωμένη συνολική δυσκαμψία  $K_2$  για το πλαίσιο, που είναι

$$K_2 = K_f + \frac{1}{\frac{1}{K_b} + \frac{1}{k_0 + k_1}} \quad (14)$$

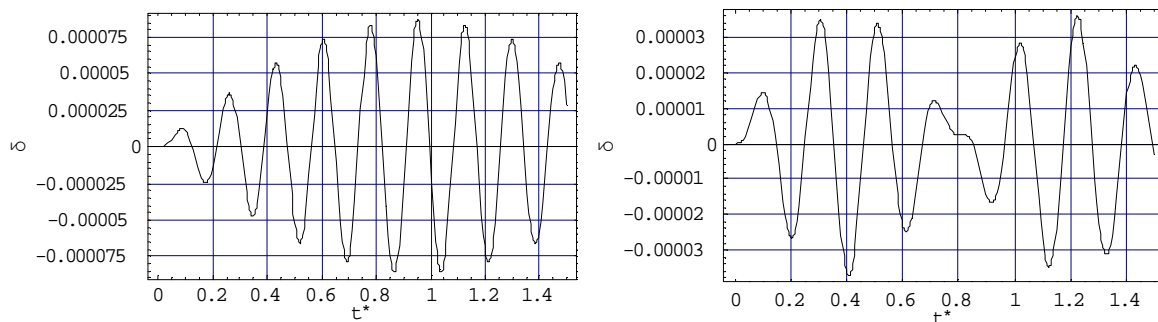
Κατά συνέπεια, στην περίπτωση του πλαισίου του Σχήματος 5(α), η ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης  $\omega_1$  είναι

$$\omega_1 = \sqrt{K_1/M} \quad (15\alpha)$$

ενώ για το πλαίσιο του Σχήματος 5(β), η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα  $\omega_2$  είναι αντίστοιχα

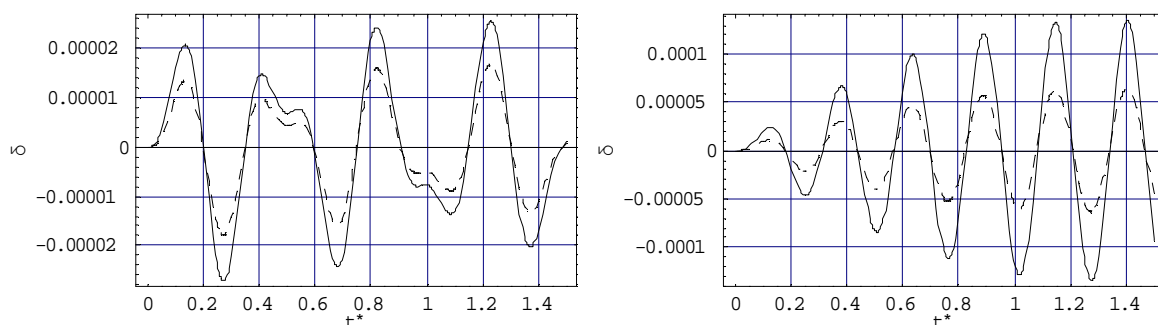
$$\omega_2 = \sqrt{K_2 / M} \quad (15\beta)$$

Τα πλαίσια του Σχήματος 5 υποβάλλονται σε μια ημιτονοειδή φόρτιση  $F(t)=F_0 \cdot \sin \Omega t$  που δρα στο ζύγωμα. Καθώς η συχνότητα διέγερσης  $\Omega$  της  $F(t)$  πλησιάζει την αντίστροφη τιμή του χρόνου χαλάρωσης  $1/\lambda$  (βλ. Σχ. 4), το μέτρο απωλειών  $E''$  λαμβάνει την υψηλότερη τιμή και συνεπώς η απόσβεση της πλάκας FRP έχει τη μέγιστη επίδραση στο σύστημα. Στο Σχήμα 7 φαίνεται η απόκριση του συμβατικού πλαισίου του Σχήματος 5(α) με δυσκαμψία συνδέσμων  $K_b^*=5$  υπό ημιτονοειδή φόρτιση με  $\Omega=0.75\omega_1$  και  $1.25\omega_1$ .



Σχ. 7 Αποκρίσεις συμβατικού πλαισίου για ημιτονοειδή φόρτιση με  $\Omega=0.75\omega_1$  και  $1.25\omega_1$

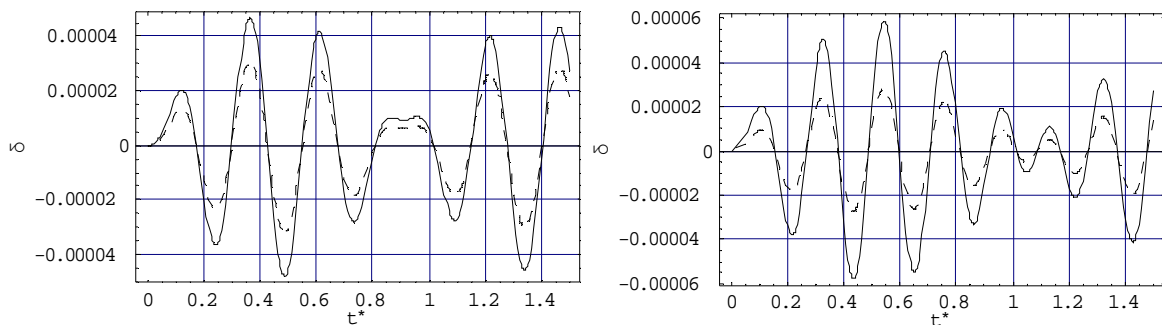
Στο Σχήμα 8(α) φαίνεται η απόκριση του πλαισίου του Σχήματος 5(β) με  $K_b^*=5$  και δύσκαμπτη πλάκα FRP με  $K_c^*=10$  (και λόγο  $k_1/k_0=10$ ) υπό ημιτονοειδή φόρτιση με  $\Omega=0.75/\lambda$  και υψηλό λόγο απόσβεσης  $c^*=10\%$ , όπου η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στη μετατόπιση  $\delta_1$  ενώ η διακεκομμένη γραμμή στη μετατόπιση  $\delta_2$ . Αντίστοιχα, στο Σχήμα 8(β) φαίνεται η απόκριση του ίδιου πλαισίου με εύκαμπτη πλάκα FRP με  $K_c^*=5$  (και λόγο  $k_1/k_0=10$ ) υπό ημιτονοειδή φόρτιση με  $\Omega=0.75/\lambda$  και  $c^*=10\%$ .



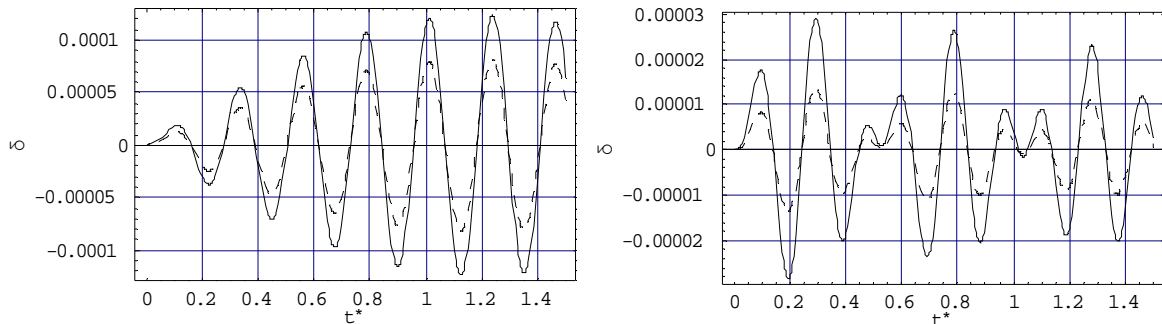
Σχ. 8 Απόκριση πλαισίου (δύσκαμπτη  $K_c^*=10$  εύκαμπτη  $K_c^*=5$  πλάκα FRP) για  $\Omega=0.75/\lambda$

Στα Σχήματα 9 και 10 φαίνονται οι αντίστοιχες αποκρίσεις του πλαισίου του Σχήματος 5(β) με  $K_b^*=5$  και δύσκαμπτη πλάκα FRP με  $K_c^*=10$  καθώς και για εύκαμπτη πλάκα FRP με  $K_c^*=5$  (και λόγο  $k_1/k_0=10$ ) υπό ημιτονοειδή φόρτιση με  $\Omega=1/\lambda$  και  $\Omega=1.25/\lambda$ , αντίστοιχα, και υψηλό λόγο απόσβεσης  $c^*=10\%$ .

Από μια σύγκριση των αποκρίσεων των συστημάτων που παρουσιάζονται στα Σχήματα 8α (δύσκαμπτη πλάκα FRP) και 8β (εύκαμπτη πλάκα FRP) με το Σχήμα 7 (χωρίς πλάκα FRP) διαπιστώνεται ότι τα εύρη ταλάντωσης του πλαισίου αυξάνονται σημαντικά με την μείωση της δυσκαμψίας της πλάκας FRP. Επιπλέον, εμφανίζεται το φαινόμενο του συντονισμού για ιδιοσυχνότητες διέγερσης  $\Omega$  κοντά στην τιμή  $\omega_1$ . Αντιστρόφως, η μέγιστη απόσβεση λαμβάνει χώρα για τιμές  $\Omega=1/\lambda$  όπως φαίνεται κατά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων στα Σχήματα 8 έως 10 (αύξηση διαφοράς της συνεχούς με τη διακεκομμένη γραμμή).



Σχ. 9 Απόκριση πλαισίου (δύσκαμπτη  $K_c^* = 10$  - εἰσκαμπτη  $K_c^* = 5$  πλάκα FRP) για  $\Omega = 1/\lambda$



Σχ.10 Απόκριση πλαισίου (δύσκαμπτη  $K_c^* = 10$  - εἰσκαμπτη  $K_c^* = 5$  πλάκα FRP) για  $\Omega = 1.25/\lambda$

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια σύνδεση συνδέσμων δυσκαμψίας και σύνθετων υλικών σε χαλύβδινα πλαίσια που δρα ως εσωτερικό σύστημα απόσβεσης έναντι μιας δυναμικής διέγερσης. Οι ιδιότητες των υλικών της σύνδεσης μπορούν να προσαρμοστούν έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι ανάγκες σχεδιασμού. Επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του εύρους ταλάντωσης και των εσωτερικά αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] EUROCODE 3. Design of Steel Structures, Part 1.1 General Rules and Rules for Buildings, European Committee for Standardization. Brussels 2004.
- [2] BERMAN JW, BRUNEAU M. Experimental and analytical investigation of tubular links for eccentrically braced frames. *Engineering Structures* 2007; 29: 1929-1938.
- [3] DICLELI M, MECHTA A. Seismic performance of chevron braced steel frames with and without viscous fluid dampers as a function of ground motion and damper characteristics. *J Construct Steel Research* 2007; 63: 1102-1115.
- [4] WILSON JC, WESOLOWSKY MJ. Shape memory alloys for seismic response modification: A state-of-the-art review. *Earthquake Spectra* 2005; 21(2): 569-601.
- [5] PALL AS, MARCH C. Response of friction damped braced frames. *ASCE J Struct Div* 1982; 108(ST6): 1313-1323.
- [6] BARTERA F, GIACCETTI R. Steel dissipating braces for upgrading existing building frames. *J Construct Steel Research* 2004; 60: 751-769.
- [7] RAFTOYIANNIS IG. Energy Dissipation Bracing Systems in Steel Frames Using FRP Composite Materials. *Open Construction & Building Technology J* 2008; 2, 137-145.
- [8] ΡΑΥΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΙΓ. Δυναμική Συμπεριφορά Χαλύβδινων Πλαισίων με Συστήματα Εσωτερικής Απόσβεσης από Σύνθετα Υλικά. 6<sup>ο</sup> Εθνικό Συνέδριο Μεταλλικών Κατασκευών. Τόμος Ι, σελ. 522-29, 2-4 Οκτ., Ιωάννινα, 2008.
- [9] ZENER C. *Elasticity and Anelasticity of Metals*, The University of Chicago Press, Chicago, IL, 1948.

# **DYNAMIC BEHAVIOR OF STEEL FRAMES WITH BRACING SYSTEMS AND VISCOUS DAMPING**

**Ioannis G. Raftoyiannis**

Assistant Professor, Laboratory of Metal Structures,  
Department of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Greece 15780  
e-mail: rafto@central.ntua.gr

## **SUMMARY**

Bracing systems are commonly used in steel frames in order to resist lateral loads. Many types of bracing systems include mechanisms of viscous damping, which have been developed in order to comply with structural design requirements as well as architectural demands. This paper presents an advanced joining type for steel frames with bracing systems made from steel and FRP materials capable of providing enhanced dissipation of vibration energy without serious penalties in strength, stiffness, or weight characteristics. One such configuration is that of an FRP-joint with viscoelastic behavior, which provides a beneficial deformation coupling between the direction of load transfer and less critical offset directions. A comprehensive parametric study has been carried out in order to establish design guidelines for favorable tradeoffs between damping benefits and the associated stiffness and strength penalties in an FRP joint. The results are compared with the corresponding tradeoffs for frames with conventional bracing systems.