

## ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

**Ιωάννης Γ. Ραυτογιάννης**

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

### 1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή διερευνάται η δυναμική συμπεριφορά πλαισίων από δομικό χάλυβα με συστήματα απόσβεσης από σύνθετα υλικά. Σε αντίθεση με τα συστήματα απόσβεσης που τοποθετούνται εξωτερικά της κατασκευής (όπως πχ. τα συστήματα σεισμικής μόνωσης στις εδράσεις της κατασκευής), τα συστήματα εσωτερικής απόσβεσης παρεμβάλλονται μεταξύ των μελών της κατασκευής και απορροφούν την κινητική ενέργεια του φορέα λόγω μιας εξωτερικής διέγερσης. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η συμπεριφορά χαλύβδινων πλαισίων με συστήματα δυσκαμψίας από δομικό χάλυβα και προσαρτημένα εσωτερικά συστήματα απορροφήσεως ενέργειας από σύνθετα υλικά που δρουν σε συνδυασμό, και τα οποία στοχεύουν στον περιορισμό των εντατικών μεγεθών των μελών χαλύβδινων πλαισίων και την ταχύτατη απόσβεση της απόκρισης της κατασκευής. Τούτο καθίσταται εφικτό λόγω των αυξημένων χαρακτηριστικών απόσβεσης των σύνθετων υλικών σε σχέση με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά φορέων από δομικό χάλυβα. Με χρήση απλών προσομοιωμάτων μελετάται η επίδραση των συστημάτων εσωτερικής απόσβεσης από σύνθετα υλικά στις δυναμικές μετακινήσεις και την εντατική κατάσταση του φορέα για διάφορες παραμέτρους γεωμετρίας και υλικών και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για το σχεδιασμό πλαισίων από δομικό χάλυβα με παρόμοια συστήματα απόσβεσης.

### 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κατακόρυφοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας χρησιμοποιούνται σε χαλύβδινα πλαίσια με σκοπό να παραλαμβάνουν τις οριζόντιες δράσεις. Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι συνδέσμων δυσκαμψίας όπως οι τύποι X, Λ και άλλοι προκειμένου να πληρούνται οι απαιτήσεις σχεδιασμού καθώς επίσης και οι αρχιτεκτονικές απαιτήσεις. Οι σύγχρονοι 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 οριζόντια δυναμικά φορτία. Τα πλαίσια με έκκεντρους συνδέσμους βασίζονται σε έναν ελαστοπλαστικό μηχανισμό του τμήματος της δοκού μεταξύ των συνδέσμων, ο οποίος αποσβήνει τη δυναμική ενέργεια λόγω των εξωτερικών φορτίων. Στα πλαίσια με ιξοελαστικούς συνδέσμους, η απόσβεση της δυναμικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω της μη-γραμμικής κυκλικής απόκρισης των συνδέσμων. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια έχουν διεξαχθεί πολυάριθμες ερευνητικές μελέτες για βελτίωση της απόδοσης των 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 τύπου Λ 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 διατημητικά μέσω της πλάκας FRP στη δοκό του πλαισίου. Η παρούσα εργασία εστιάζει στη σύγκριση της δυναμικής συμπεριφοράς πλαισίων από χάλυβα και συνδέσμους δυσκαμψίας  $\Lambda$  με και χωρίς πλάκα FRP συναρτήσει του μεγέθους και της συχνότητας της δυναμικής φόρτισης καθώς επίσης και του λόγου απόσβεσης του υλικού FRP. Τα αποτελέσματα από αυτήν την έρευνα μπορούν έπειτα να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της απόδοσης τέτοιων συνδέσεων από FRP με σκοπό τη βελτίωση της δυναμικής απόκρισης συστημάτων δυσκαμψίας τύπου  $\Lambda$  συναρτήσει των χαρακτηριστικών δυναμικών φορτίων και των παραμέτρων τους. Η προτεινόμενη σύνδεση FRP δεν έχει υποβληθεί ακόμα σε εργαστηριακές δοκιμές, αλλά αναμένεται να παρέχει τα προβλεπόμενα ωφέλη, όπως φαίνεται από την ανάλυση που ακολουθεί.

### 3. ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΠΛΑΚΑΣ FRP

Η σύνδεση που παρουσιάζεται εδώ αποτελείται από μια πλάκα FRP με πάχος  $t$  και διαστάσεις  $a$  και  $b$ , η οποία εγκιβωτίζεται μέσα σε ένα δευτερεύον χαλύβδινο κιβώτιο με αρθρώσεις και στις 4 γωνίες. Το κιβώτιο αυτό συνδέεται με τη δοκό στο μέσον του ανοίγματος. Οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας συνδέονται με το κιβώτιο που περιβάλλει την πλάκα FRP, κατά συνέπεια αυτή θα υπόκειται σε μεμβρανικές δράσεις. Στην παρούσα περίπτωση, χρησιμοποιείται η χειρωνακτική διαδικασία για την διαστρωμάτωση της πλάκας FRP με τις επιθυμητές ιδιότητες. Οι διαστρωματώσεις από σύνθετα υλικά είναι συνήθως λεπτότοιχες και κατασκευάζονται με διάφορες διαστάσεις διατομών και κώδικες αλληλουχίας. Εδώ εξετάζονται δύο περιπτώσεις διαστρωματώσεων: πλάκα με σταυροειδή διαστρωμάτωση  $[0/90]$  (διατημητικά εύκαμπτη) και διαστρωμάτωση υπό γωνία  $[\pm 45]$  (διατημητικά δύσκαμπτη) σε σχέση με την οριζόντια κατεύθυνση. Κάθε πλάκα αποτελείται από έναν άρτιο αριθμό στρώσεων από υλικό E-glass/Epoxy. Όλες οι στρώσεις έχουν ένα σταθερό λόγο όγκου ινών  $v_f=65\%$ . Οι ιδιότητες υλικού για κάθε στρώση είναι  $E_1 = 42.3$  GPa,  $E_2 = 12.4$  GPa,  $\nu_{12} = 0.24$  και  $G_{12} = 6.20$  GPa, όπου 1 είναι η κατεύθυνση των ινών και 2 η εγκάρσια κατεύθυνση. Χρησιμοποιώντας την κλασική θεωρία διαστρωμάτωσης [7] προσδιορίζονται οι όροι δυσκαμψίας μιας γενικά ορθότροπης πλάκας. Η σχέση δράσεων-παραμορφώσεων για μια τέτοια διαστρωμάτωση είναι

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

όπου  $\{N\}$  είναι οι μεμβρανικές δράσεις ανά μονάδα μήκους και  $\{\epsilon\}$  είναι οι αντίστοιχες παραμορφώσεις. Το μητρώο μεμβρανικής δυσκαμψίας  $[A]$  για την πλάκα FRP μπορεί να καθοριστεί από την ακόλουθη σχέση

$$A_{ij} = \int_{-t/2}^{t/2} \bar{Q}_{ij} dz \quad (2)$$

όπου το  $t$  είναι το πάχος της διαστρωμάτωσης και οι όροι  $\bar{Q}_{ij}$  είναι οι μετασχηματισμένοι όροι δυσκαμψίας κάθε στρώσης. Αντιστρέφοντας την εξ(1) λαμβάνουμε

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι αν και οι όροι σύζευξης ορθών-διατημητικών δράσεων και παραμορφώσεων  $A_{16}$  και  $A_{26}$  είναι μηδέν στην εξ(1) για συμμετρικές διαστρωματώσεις, ο

όρος  $a_{11}$  στην εξ(3) περιλαμβάνει την επίδραση της διάτμησης λόγω του μετασχηματισμού της δυσκαμψίας στρώσεων. Οι όροι  $a_{16}$  και  $a_{26}$  σε αυτήν την περίπτωση είναι επίσης μηδέν. Τα ενεργά μέτρα ελαστικότητας  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $G_{xy}$  καθώς επίσης και ο ενεργός λόγος του Poisson  $\nu_{xy}$  μπορούν να υπολογιστούν από τις ακόλουθες σχέσεις ως εξής

$$E_x = \frac{1}{a_{11}t}, \quad E_y = \frac{1}{a_{22}t},$$

$$\nu_{xy} = -\frac{a_{12}}{a_{22}}, \quad G_{xy} = \frac{1}{a_{66}t}$$
(4)

Τα ενεργά μέτρα ελαστικότητας  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $\nu_{xy}$ , και  $G_{xy}$  παρατίθενται στον Πίνακα 1 τόσο για την σταυροειδή διαστρωμάτωση [0/90] όσο και για τη διαστρωμάτωση υπό γωνία [ $\pm 45$ ].

Πίνακας 1: Ενεργά μέτρα ελαστικότητας για διάφορες διαστρωματώσεις FRP

Κώδικας	$E_x$ (GPa)	$E_y$ (GPa)	$\nu_{xy}$ -	$G_{xy}$ (GPa)
[0/90]	27.49	27.49	0.11	6.20
[ $\pm 45$ ]	17.69	17.69	0.43	12.40

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

Ας θεωρήσουμε ένα απλό πλαίσιο ABCDE από δομικό χάλυβα με ένα συμβατικό σύστημα συνδέσμων τύπου-Λ (βλ. Σχήμα 1α). Λαμβανομένου υπόψη ότι η αξονική παραμόρφωση της δοκού BCD είναι αμελητέα, η οριζόντια δύναμη  $F$  λόγω σεισμού ή ανεμοπίεσης μπορεί να θεωρηθεί, χωρίς περιορισμό της γενικότητας, 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 συνδέσμων. 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,

$$K_1 = K_f + K_b$$
(5)

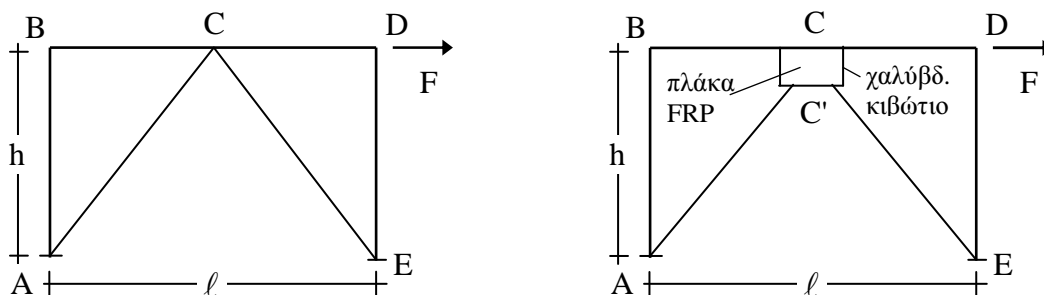
Κατά συνέπεια, η σχέση δράσεων-μετατοπίσεων για το πλαίσιο είναι

$$F = K_1 \delta_1$$
(6)

όπου  $\delta_1$  είναι η οριζόντια μετατόπιση του ζυγώματος. Η εξίσωση κίνησης του πλαισίου είναι [8]

$$M \ddot{\delta}_1 + K_1 \delta_1 = F(t)$$
(7)

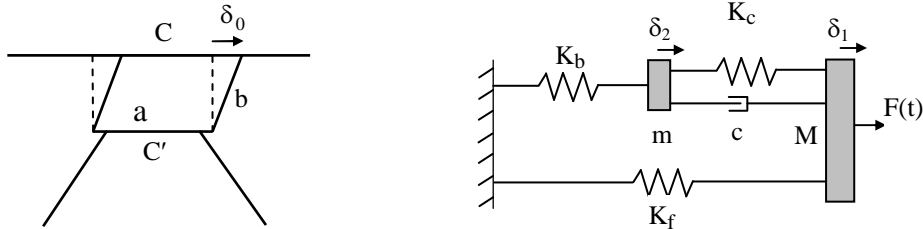
όπου  $M$  είναι η συνολική μάζα του ζυγώματος.



Σχ. 1: Πλαίσιο με συμβατικό σύστημα συνδέσμων τύπου-Λ 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 χάλυβδινο πλαίσιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1β.

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 μεμβρανική (εντός του επιπέδου) 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  $\delta_0$  (βλ. Σχήμα 2α).



Σχ. 2: Διατμητική παραμόρφωση πλάκας FRP και διβάθμιο μοντέλο πλαισίου

Η σχέση δράσεων-μετατοπίσεων για την πλάκα FRP μπορεί να προσδιοριστεί από την ακόλουθη σχέση

$$T = \left( \frac{a}{b} \frac{1}{a_{66}} \right) \delta_0 = \left( \frac{a}{b} G_{xy} t \right) \delta_0 = K_c \delta_0 \quad (8)$$

όπου  $T$  είναι η συνολική διατμητική δράση στην πλάκα και  $a_{66}$  είναι το αντίστροφο της διατμητικής δυσκαμψίας της διαστρωμάτωσης. Είναι προφανές ότι το σύστημα έχει τώρα έναν πρόσθετο βαθμό ελευθερίας ( $\delta_2 = \delta_1 - \delta_0$ ). Το μοντέλο του διβάθμιου συστήματος του πλαισίου φαίνεται στο Σχήμα 2β. Οι εξισώσεις κίνησης για το διβάθμιο σύστημα είναι

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\delta}_1 \\ \ddot{\delta}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\delta}_1 \\ \dot{\delta}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_f + K_c & -K_c \\ -K_c & K_c + K_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

όπου  $\delta_1$  και  $\delta_2$  είναι οι συνολικές μετατοπίσεις των κόμβων  $C$  και  $C'$ ,  $M$  είναι η μάζα του ζυγώματος,  $m$  είναι η επικόμβια μάζα του συστήματος δυσκαμψίας στο  $C'$ , και  $c$  είναι ο συντελεστής απόσβεσης της σύνδεσης FRP. Στο σημείο αυτό θεωρούμε ότι η απόσβεση των μελών από χάλυβα του πλαισίου είναι αμελητέα, κατά συνέπεια διαμορφώνεται μέσω της παρούσας σύνδεσης ένα εσωτερικό σύστημα απόσβεσης.

Προκειμένου να διευκολυνθεί μια παραμετρική μελέτη, εισάγονται στις εξ(9) οι ακόλουθες αδιάστατες ποσότητες:

$$\left. \begin{aligned} f &= \frac{F}{K_f l}, & t^* &= \sqrt{\frac{K_f}{M}} t, \\ m^* &= m/M, & c^* &= c/\sqrt{K_f M}, \\ K_c^* &= K_c/K_f, & K_b^* &= K_b/K_f \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

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

## 5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

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

$$K_2 = K_f + \frac{1}{\frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_c}} \quad (11)$$

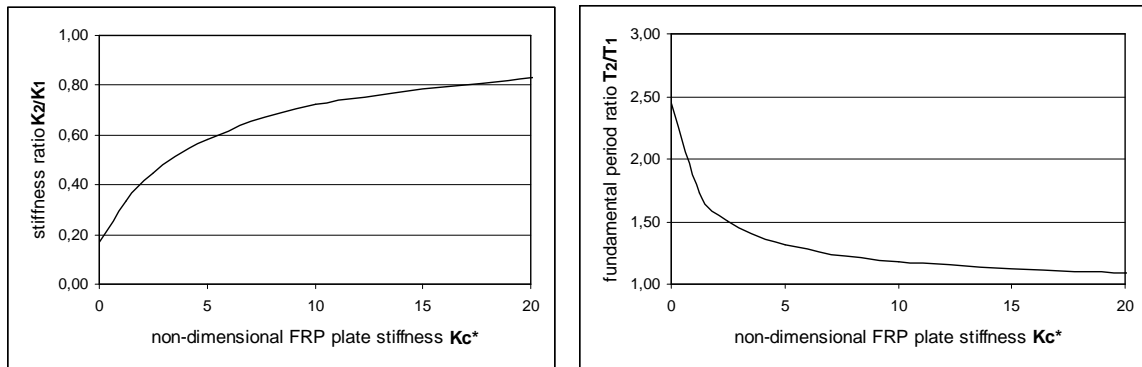
Κατά συνέπεια, στην περίπτωση του πλαισίου του Σχήματος 1α, η ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης  $\omega_1$  είναι

$$\omega_1 = \sqrt{K_1 / M} \quad (12\alpha)$$

ενώ για το πλαίσιο του Σχήματος 1β, η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα  $\omega_2$  θα είναι

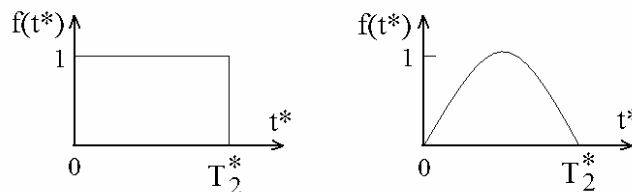
$$\omega_2 = \sqrt{K_2 / M} \quad (12\beta)$$

Στο Σχήμα 3α φαίνεται η μεταβολή του λόγου δυσκαμψιών  $K_2/K_1$  συναρτήσει της δυσκαμψίας  $K_c^*$  της πλάκας FRP και στο Σχήμα 3β η μεταβολή του λόγου των θεμελιωδών περιόδων  $T_2/T_1$  ομοίως συναρτήσει της δυσκαμψίας  $K_c^*$  της πλάκας FRP.



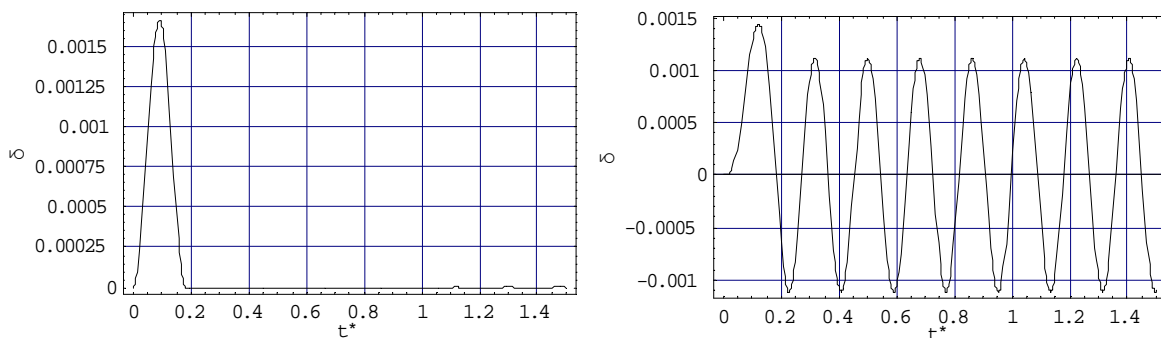
Σχ. 3: Μεταβολή δυσκαμψιών  $K_2/K_1$  και θεμελιωδών περιόδων  $T_2/T_1$  συναρτήσει  $K_c^*$

Τα πλαίσια του Σχήματος 1 υποβάλλονται σε μια δυναμική φόρτιση  $F(t)$  που δρά στο ζύγωμα. Εξετάζονται δύο περιπτώσεις φόρτισης: α) ένας ορθογωνικός παλμός, και β) ένας ημιτονοειδής παλμός όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.



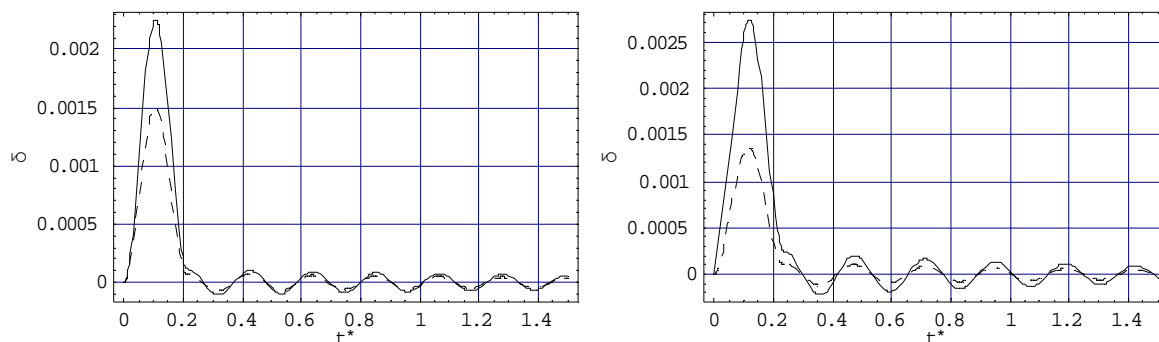
Σχ. 4: Δυναμική φόρτιση τύπου ορθογωνικού και ημιτονοειδούς παλμού

Στο Σχήμα 5 φαίνεται η απόκριση του πλαισίου του Σχήματος 1α με ακαμψία συνδέσμων  $K_b^* = 5$  υπό δυναμική φόρτιση τύπου ορθογωνικού και ημιτονοειδούς παλμού, αντίστοιχα, με πεπερασμένη διάρκεια  $\tau^* = T_2^* = 2\pi/\omega_2$ .



Σχ. 5: Αποκρίσεις συμβατικού πλαισίου για ορθογωνικό και ημιτονοειδή παλμό

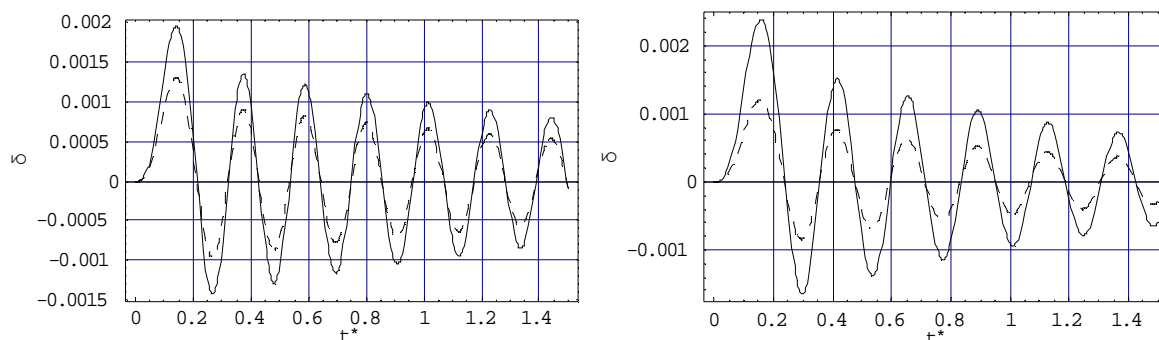
Στο Σχήμα 6α φαίνεται η απόκριση του ίδιου πλαισίου του Σχήματος 1β με  $K_b^* = 5$  και δύσκαμπτη πλάκα FRP με  $K_c^* = 10$  (δηλ.  $K_2/K_1 = 0.7222$ ,  $\tau_2/\tau_1 = 1.1767$ ) υπό ορθογωνικό παλμό και υψηλό λόγο απόσβεσης  $c^* = 10\%$ , όπου η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στη μετατόπιση  $\delta_1$  ενώ η διακεκομμένη γραμμή στη μετατόπιση  $\delta_2$ . Αντίστοιχα, στο Σχήμα 6β φαίνεται η απόκριση του ίδιου πλαισίου με εύκαμπτη πλάκα FRP με  $K_c^* = 5$  (δηλ.  $K_2/K_1 = 0.583$ ,  $\tau_2/\tau_1 = 1.309$ ) υπό ορθογωνικό παλμό και  $c^* = 10\%$



Σχ. 6: Απόκριση πλαισίου με δύσκαμπτη ( $K_c^* = 10$ ) και εύκαμπτη ( $K_c^* = 5$ ) πλάκα FRP υπό ορθογωνικό παλμό

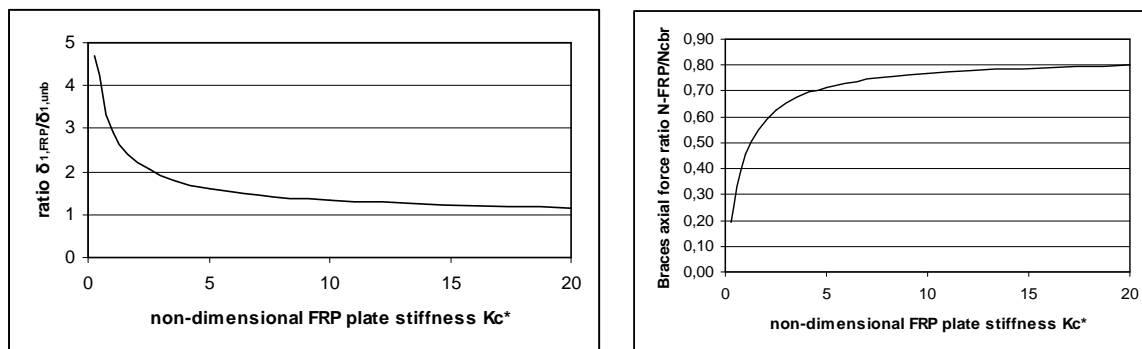
Από μια σύγκριση των αποκρίσεων των συστημάτων που παρουσιάζονται στα Σχήματα 6α (δύσκαμπτη πλάκα FRP) και 6β (εύκαμπτη πλάκα FRP) με το Σχήμα 5α (χωρίς πλάκα FRP) διαπιστώνεται ότι η δυσκαμψία του πλαισίου μειώνεται κατά 27.8% και η αντίστοιχη θεμελιώδης ιδιοπερίοδος αυξάνεται κατά 17.6% στην πρώτη περίπτωση, ενώ στην δεύτερη περίπτωση η αντίστοιχη δυσκαμψία μειώνεται σχεδόν 41.9% και η αντίστοιχη θεμελιώδης ιδιοπερίοδος αυξάνεται κατά 30.9%. Επιπλέον, το μέγιστο εύρος  $\delta_1$  της απόκρισης είναι 32,3% υψηλότερο στην περίπτωση δύσκαμπτης πλάκας FRP, ενώ στην περίπτωση εύκαμπτης πλάκας το εύρος  $\delta_1$  αυξάνει κατά 58,8% σε σχέση με το μέγιστο εύρος  $\delta_1$  του συμβατικού πλαισίου. Αντιστρόφως, η μέγιστη αξονική δύναμη  $N_{br}$  των συνδέσμων μειώνεται κατ' απόλυτη τιμή κατά 25,3% στην πρώτη περίπτωση και κατά 37,1% στην δεύτερη περίπτωση σε σχέση με αυτήν των συνδέσμων του συμβατικού πλαισίου.

Ας θεωρήσουμε στη συνέχεια τα ανωτέρω συστήματα πλαισίων που υποβάλλονται σε ένα ημιτονοειδή παλμό. Στο Σχήμα 7 φαίνεται η απόκριση πλαισίου με  $K_b^* = 5$  και δύσκαμπτη ( $K_c^* = 10$ ) ή εύκαμπτη ( $K_c^* = 5$ ) πλάκα FRP υπό ημιτονοειδή παλμό και  $c^* = 10\%$ . Παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά του πλαισίου υπό ημιτονοειδή παλμό είναι παρόμοια με αυτήν υπό ορθογωνικό παλμό.



Σχ. 7: Απόκριση πλαισίου με δύσκαμπτη ( $K_c^* = 10$ ) και εύκαμπτη ( $K_c^* = 5$ ) πλάκα FRP υπό ημιτονοειδή παλμό

Στο Σχήμα 8 φαίνεται η μεταβολή του λόγου εύρους  $(\delta_1)_{FRP}/(\delta_1)_{cbr}$  συναρτήσει της  $K_c^*$  και η μεταβολή του λόγου των αξονικών δράσεων των συνδέσμων  $N_{FRP}/N_{cbr}$  για τις διάφορες τιμές  $K_c^*$ .



Σχ. 8: Μεταβολή των λόγων  $(\delta_1)_{FRP}/(\delta_1)_{cbr}$  και  $N_{FRP}/N_{cbr}$  συναρτήσει της  $K_c^*$ .

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα προηγμένο σύστημα συνδέσμων δυσκαμψίας  $\Lambda$  και σύνθετων υλικών για χαλύβδινα πλαίσια. Η προτεινόμενη σύνδεση δρα ως εσωτερικό σύστημα απόσβεσης έναντι μιας δυναμικής διέγερσης με πεπερασμένη διάρκεια. Επιπλέον, η δυσκαμψία και τα χαρακτηριστικά απόσβεσης του σύνθετου υλικού FRP μπορούν να προσαρμοστούν ούτως ώστε να ικανοποιούνται οι ανάγκες σχεδιασμού. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν με βάση τα παραπάνω είναι:

- η παρουσία μιας σύνδεσης FRP σε χαλύβδινα πλαίσια με συνδέσμους οδηγεί σε μεγαλύτερες θεμελιώδεις ιδιοπεριόδους και μεγαλύτερα εύρη απόκρισης.
- αυτή η επίδραση είναι εντονότερη στα εύκαμπτα συστήματα FRP, ενώ στα δύσκαμπτα συστήματα η αύξηση της ιδιοπεριόδου και του εύρους είναι χαμηλότερη.
- καθώς μειώνεται η διατμητική δυσκαμψία της πλάκας FRP, η αξονική δύναμη των συνδέσμων μειώνεται σημαντικά.
- ένα από τα κυριότερα μειονεκτήματα του προτεινόμενου συστήματος είναι η μειωμένη δυσκαμψία και κατ' επέκταση οι αυξημένες μετατοπίσεις του σε σχέση με το αρχικό.

## 7. 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] VINSON JR, SIERAKOWSKI RL. The behavior of structures composed of composite materials. Martinus Nijhoff, The Netherlands, 1987.
- [8] WARBURTON GB. The dynamical behaviour of structures. Pergamon Press, London, UK, 1976.

**DYNAMIC BEHAVIOR OF STEEL FRAMES WITH ENERGY DISSIPATION  
SYSTEMS MADE FROM FRP COMPOSITE MATERIALS****Ioannis G. Raftoyiannis**

Assistant Professor, Laboratory of Metal Structures,  
School 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 such as X and V-type bracings have been developed in order to comply with structural design requirements as well as architectural demands. This paper describes a rational methodology for the development of an advanced joining type for steel frames with bracing systems capable of providing enhanced dissipation of vibration energy without serious penalties in strength, stiffness, or weight characteristics. One such configuration is that of a V-type bracing system with an FRP-joint 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 V-type joint. The results are compared with the corresponding tradeoffs for frames with conventional V-type bracing systems.