

# ĐIỀU KHIỂN DAO ĐỘNG HAI KẾT CẤU LIÊN KÈ ĐƯỢC TRANG BỊ HỆ CẢN CHẤT LỎNG NHỚT VÀ HỆ CẢN MA SÁT

ThS. Phạm Nhân Hòa, PGS.TS. Chu Quốc Thắng

Trường Đại Học Quốc Tế – Đại học Quốc Gia Tp. Hồ Chí Minh

KS. Hồ Viết Tiên Phước

Trường Đại Học Bách Khoa Tp. Hồ Chí Minh – Đại Học Quốc Gia Tp. Hồ Chí Minh

**Tóm tắt:** Từ các ưu và khuyết điểm của các hệ cản chất lỏng nhớt và ma sát, bài báo đưa ra một giải pháp kháng chấn cho hai kết cấu liền kề sử dụng hai loại hệ cản này. Vì vậy, bài báo xây dựng mô hình cơ học cho hệ hai kết cấu liền kề sử dụng hệ cản chất lỏng nhớt và ma sát, từ đó xây dựng phương trình vi phân chuyển động, và hai thuật toán giải phương trình vi phân theo phương pháp Newmark nhằm tìm đáp ứng của kết cấu. Cuối bài báo là các kiến nghị về ưu khuyết điểm của việc sử dụng hai loại hệ cản này cho hệ hai kết cấu liền kề.

**Abstract:** From the advantages and disadvantages of both viscous fluid dampers and friction dampers, this paper presents a new solution of seismic resistance for two adjacent buildings equipped with these dampers to mitigate earthquake-induced motion. This paper therefore proposes the model, the differential motion equation, and two algorithms based on Newmark numerical integration method so as to resolve the equation. Finally, the paper draws conclusions on advantages and disadvantages of application of these types of dampers in a system of two adjacent building structures.

## 1. Giới thiệu

Điều khiển dao động được biết như là việc sử dụng các hệ cản được lắp vào trong công trình để thay đổi các thông số động lực học của kết cấu hay nhằm sinh ra lực ngang chống lại lực ngang của tải trọng ngoài. Ưu điểm nổi bật của giải pháp này là tiết kiệm chi phí hơn rất nhiều so với giải pháp truyền thống, giải pháp tăng độ cứng cột và rất hữu ích cho việc cải tạo các công trình cũ. Điều khiển dao động được chia thành các dạng: điều khiển bị động, bán chủ động, chủ động và hỗn hợp. Điều khiển bị động là sử dụng hệ cản gắn vào kết cấu và lực do hệ cản sinh ra là “bị động” hay không thay đổi được và hơn nữa việc sử dụng hệ cản bị động không chỉ được sử dụng gói gọn ở một kết cấu mà còn ở hệ hai kết cấu liền kề. Từ các nghiên cứu trước về điều khiển dao động công trình đơn lẻ mà chỉ sử dụng hệ cản ma sát [4] [5] và hệ cản chất lỏng nhớt [3] được điều khiển bị động, bài báo đưa ra giải pháp điều khiển bị động cho hai công trình liền kề được trang bị hệ cản chất lỏng nhớt ở mỗi tầng của kết cấu và hệ cản ma sát giữa hai kết cấu chống động đất. Các nghiên cứu trước đây về việc sử dụng hệ cản cho hai kết cấu liền kề trên thế giới có thể kể đến như [2] (nghiên cứu sử dụng kết hợp hệ cản ma sát và hệ cản đàn nhớt) hay [6] (kết hợp hệ cách ly móng và lưu biến từ). Việc sử dụng kết hợp hệ cản chất lỏng nhớt và hệ cản ma sát xuất phát từ việc tận dụng các ưu và khuyết điểm của chúng. Hệ cản ma sát bị động (FD) có khả năng sinh lực điều khiển đủ lớn cho kết cấu [4] nên hiệu quả cho việc giảm đáp ứng chuyển vị lớn nhất. Do đó, trong bài báo này FD được gắn vào giữa hai kết cấu do lực cắt tương đối giữa hai kết cấu liền kề là rất lớn. Còn đối với hệ cản chất lỏng nhớt (VFD), lực cản sinh ra từ VFD là nhỏ so với FD, cho hiệu quả giảm đáp ứng trung bình tốt khi được gắn vào giữa các tầng [3]. Vì vậy, hệ cản VFD được gắn vào giữa mỗi tầng của cả hai kết cấu. Thật vậy, lực điều khiển sinh ra trong hệ cản VFD phụ thuộc vào vận tốc của hai đầu pít tông mà hai đầu này được gắn vào hai sàn liền kề trong cùng một kết cấu. Lực sinh ra trong VFD được tính theo công thức sau [3]:

$$F_i^{VFD} = C_i |\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}|^{\alpha_i} \text{sign}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) \quad (1)$$

Trong đó:

$C_i$  và  $\alpha_i$  lần lượt là hệ số cản và hệ số mũ trong hệ cản VFD ở tầng  $i^{th}$ ;

$\dot{x}_i$  và  $\dot{x}_{i-1}$  lần lượt là vận tốc ở hai đầu pít tông ở tầng  $i^{th}$  và  $(i-1)^{th}$ .

Đối với hệ cản FD, lực ma sát sinh ra phụ thuộc vào chuyển vị và vận tốc hai đầu của hệ cản và được tính theo công thức gần đúng [2]:

$$\begin{cases} F_i^{FD} = k_i^{FD} (x_{i,2} - x_{i,1}) \text{sign}(\dot{x}_{i,2} - \dot{x}_{i,1}) \leq F_i^{FD,slip} & \text{trạng thái dính} \\ F_i^{FD} = F_i^{FD,slip} \cdot \text{sign}(\dot{x}_{i,2} - \dot{x}_{i,1}) & \text{trạng thái trượt} \end{cases} \quad (2)$$

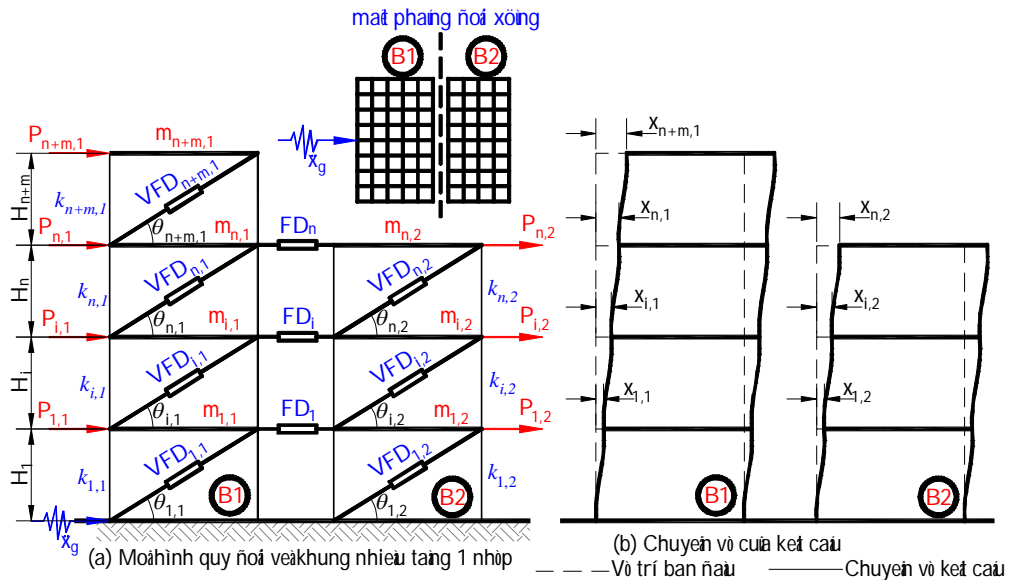
Trong đó,  $k_i^{FD}$  và  $F_i^{FD,slip}$  lần lượt là độ cứng và lực ma sát khi trượt của hệ cản FD ở tầng thứ  $i^{th}$ ;  $x_i$  và  $x_{i-1}$  lần lượt là chuyển vị ở hai đầu hệ cản FD ở tầng  $i^{th}$  và  $(i-1)^{th}$ .

Để đánh giá hiệu quả giảm đáp ứng của hệ kết cấu liên kết sử dụng hệ cản VFD và FD, một mô hình tính toán cơ học tin cậy và thuật giải của phương trình vi phân chuyển động này cần được xây dựng. Để kiểm tra mức độ chính xác của thuật giải này, bài báo đề xuất 2 phương pháp số để giải phương trình vi phân dao động và kết quả của các phương pháp số này được so sánh với nghiệm giải tích (được xem là nghiệm chính xác) khi một kết cấu chỉ được trang bị hệ cản VFD. Khi  $\alpha_i = 1$ , hệ cản VFD được xem là cản tuyến tính và  $F_{i,1}^{VFD}$  có dạng như là lực cản sinh ra do tính cản của vật liệu [ $F_{i,1}^{VFD} \approx f_i = c_i (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1})$ ]. Vì vậy, đối với hệ một bậc tự do và  $\zeta = 0\%$ , nghiệm của kết cấu được trang bị VFD được xem là nghiệm của kết cấu không trang bị VFD nhưng có  $c = C$ , trong đó  $\zeta$  được lấy sao cho  $C = 2m\omega\zeta$ .

**2. Phương trình vi phân chuyển động và thuật giải**

**2.1. Các giả thiết và giới hạn của bài toán**

Khi xây dựng phương trình vi phân chuyển động, bài toán hệ hai kết cấu liên kết được trang bị hệ cản VFD và FD chịu tải trọng ngang được giới hạn ở các điểm sau: {1} hai kết cấu đối xứng qua mặt phẳng vuông góc với khung phẳng và theo chiều dài kết cấu; {2} chuyển động của đất nền do tải trọng động đất gây ra là theo phương ngang và nằm trong khung phẳng; {3} tải trọng tác dụng vào kết cấu đủ nhỏ để vật liệu kết cấu chỉ làm việc trong miền đàn hồi;



**Hình 1.** (a) Mô hình quy đổi khung phẳng hệ hai kết cấu liên kết nhiều nhịp và sử dụng hệ cản VFD ở mỗi tầng và FD giữa hai kết cấu về khung một nhịp; (b) Chuyển vị của hệ kết cấu khi có tải trọng tác dụng

4} sàn được giả thuyết là tuyệt đối cứng ( $EI_b = \infty$ ) (mô hình shear frame hay shear building). Khi đó, khối lượng được xem là tập trung tại sàn và mỗi sàn là một bậc tự do. Vì sàn được xem là tuyệt đối cứng nên hệ khung nhiều tầng và nhiều nhịp được quy đổi thành hệ khung nhiều tầng, một nhịp và cột hai đầu ngầm có độ cứng tương đương [1] (Hình 1)

$$k_{i,j} = \left( \sum_{\text{cột}} \frac{12EI_c}{H^3} \right)_{i,j} \begin{cases} \text{khi } j = 1; i = \overline{1, n+m} \\ \text{khi } j = 2; i = \overline{1, n} \end{cases} \quad (3)$$

trong đó,  $EI_c$  là độ cứng của mỗi cột

Từ các giả thiết trên, bài toán được đơn giản hóa như (Hình 1) và chỉ cần xét hệ gồm hai kết cấu liên kết nhiều tầng một nhịp B1 và B2; trong đó, B1 có  $(n+m)$  tầng và B2 có  $n$  tầng. Cả hai kết cấu được trang bị  $(2n+m)$  hệ cản VFD ở mỗi tầng và hai kết cấu được nối với nhau bằng  $n$  hệ cản FD ở các tầng. Khối lượng, độ cứng, và hệ số cản tại tầng thứ  $i^{th}$  của kết cấu B1 lần lượt là  $m_{i,1}, k_{i,1}, \text{ và } c_{i,1}$  và của kết cấu B2 lần lượt là  $m_{i,2}, k_{i,2}, \text{ và } c_{i,2}$ ;  $\ddot{x}_g$  và  $P_i(t)$  lần lượt là gia tốc nền và tải trọng tác động vào kết cấu;  $x_i$  là chuyển vị của kết cấu tại tầng thứ  $i^{th}$ .

**2.2. Phương trình vi phân chuyển động**

Từ nguyên lý Đalămbe và vì mỗi tầng là một bậc tự do, phương trình chuyển động của cả hệ kết cấu gồm  $(2n+m)$  bậc tự do được viết dưới dạng ma trận như sau:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{P} - \mathbf{M}\mathbf{I}\ddot{\mathbf{x}}_g - \mathbf{F}_{VFD} + \mathbf{F}_{FD} \quad (4)$$

trong đó, các ma trận hằng số:  $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{n+m,n+m} & \mathbf{0}_{n+m,n} \\ \mathbf{0}_{n,n+m} & \mathbf{M}_{n,n} \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{n+m,n+m} & \mathbf{0}_{n+m,n} \\ \mathbf{0}_{n,n+m} & \mathbf{K}_{n,n} \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{n+m,n+m} & \mathbf{0}_{n+m,n} \\ \mathbf{0}_{n,n+m} & \mathbf{C}_{n,n} \end{bmatrix}$  với,

$$\mathbf{M}_{n+m,n+m} = \begin{bmatrix} m_{1,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \dots & & & & & \\ 0 & 0 & m_{i,1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & \dots & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{n,1} & 0 & 0 \\ & & & & & \dots & \\ sym & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{n+m,1} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{M}_{n,n} = \begin{bmatrix} m_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \dots & & & \\ 0 & 0 & m_{i,2} & 0 & 0 \\ & & & \dots & \\ sym & 0 & 0 & 0 & m_{n,2} \end{bmatrix}$$

lần lượt là ma trận hằng số về khối

lượng của kết cấu B1 và B2 (ký hiệu  $\mathbf{M}_{n+m,n+m}$  là ma trận số thực có  $(n+m)$  hàng,  $(n+m)$  cột)

$$\mathbf{K}_{n+m,n+m} = \begin{bmatrix} k_{1,1} + k_{2,1} & -k_{2,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_{2,1} & k_{2,1} + k_{3,1} & -k_{3,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \dots & & & & & & & \\ 0 & 0 & -k_{i-1,1} & k_{i-1,1} + k_{i,1} & -k_{i,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_{i,1} & k_{i,1} + k_{i+1,1} & -k_{i+1,1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{i+1,1} & k_{i+1,1} + k_{i+2,1} & -k_{i+2,1} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & \dots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{n+m-1,1} & k_{n+m-1,1} + k_{n+m,1} & -k_{n+m,1} & 0 \\ sym & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{n+m,1} & k_{n+m,1} \end{bmatrix} \quad (i = \overline{1, n+m})$$

$$\mathbf{K}_{n,n} = \begin{bmatrix} k_{1,2} + k_{2,2} & -k_{2,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_{2,2} & k_{2,2} + k_{3,2} & -k_{3,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \dots & & & & & & & \\ 0 & 0 & -k_{i-1,2} & k_{i-1,2} + k_{i,2} & -k_{i,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_{i,2} & k_{i,2} + k_{i+1,2} & -k_{i+1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{i+1,2} & k_{i+1,2} + k_{i+2,2} & -k_{i+2,2} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & \dots & & & & \\ sym & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{n-1,2} & k_{n-1,2} + k_{n,2} & -k_{n,2} \end{bmatrix} \quad (i = \overline{1, n})$$

lần lượt là

ma trận hằng số mô tả độ cứng của kết cấu B1 và B2;  $\mathbf{C}_{n+m,n+m}$  và  $\mathbf{C}_{n,n}$  lần lượt là ma trận cản của kết cấu B1 và B2, mô tả độ cản của kết cấu và được xác định theo phương pháp Rayleigh [1]:  $\mathbf{C}_{n+m,n+m} = a_{0,1}\mathbf{M}_{n+m,n+m} + a_{1,1}\mathbf{K}_{n+m,n+m}$  và  $\mathbf{C}_{n,n} = a_{0,2}\mathbf{M}_{n,n} + a_{1,2}\mathbf{K}_{n,n}$ , trong đó,

$$a_{0,j} = \zeta_j \frac{2\omega_{1,j}\omega_{2,j}}{\omega_{1,j} + \omega_{2,j}}; \quad a_{1,j} = \zeta_j \frac{2}{\omega_{1,j} + \omega_{2,j}} \quad (j = 1, 2),$$

với:  $\zeta_j$  là tỉ số cản và phụ thuộc vào vật liệu cột của kết cấu;  $\omega_{1,j}$  và  $\omega_{2,j}$  lần lượt là tần số dao động riêng của kết cấu B1 và B2 ở mode 1 và mode 2.

Các véc tơ phụ thuộc thời gian bao gồm:  $\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_{n+m,1} \\ \mathbf{x}_{n,2} \end{Bmatrix}$  là véc tơ đáp ứng chuyển vị của hệ kết cấu theo thời gian, trong đó  $\mathbf{x}_{n+m,1} = \{x_{1,1}, \dots, x_{i,1}, \dots, x_{n,1}, \dots, x_{n+m,1}\}^T$ ;  $\mathbf{x}_{n,2} = \{x_{1,2}, \dots, x_{i,2}, \dots, x_{n,2}\}^T$ ;  $\dot{\mathbf{x}} = \frac{d\mathbf{x}}{dt}$  và  $\ddot{\mathbf{x}} = \frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2}$  lần lượt là véc tơ vận tốc và gia tốc của hệ kết cấu;  $\mathbf{P} = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_{n+m,1} \\ \mathbf{P}_{n,2} \end{Bmatrix}$  là véc tơ ngoại lực tác dụng tại các tầng của kết cấu, trong đó,

$$\mathbf{P}_{n+m,1} = \{P_{1,1}, \dots, P_{i,1}, \dots, P_{n,1}, \dots, P_{n+m,1}\}^T; \quad \mathbf{P}_{n,2} = \{P_{1,2}, \dots, P_{i,2}, \dots, P_{n,2}\}^T; \quad \mathbf{F}_{VFD} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_{n+m,1}^{VFD} \\ \mathbf{F}_{n,2}^{VFD} \end{Bmatrix}$$

là véc tơ lực điều khiển VFD trong kết cấu B1 và B2; trong đó,  $\mathbf{F}_{n+m,1}^{VFD} = \{F_{1,1}^{VFD} - F_{2,1}^{VFD}, \dots, F_{i,1}^{VFD} - F_{i+1,1}^{VFD}, \dots, F_{n,1}^{VFD} - F_{n+1,1}^{VFD}, \dots, F_{n+m,1}^{VFD}\}^T$ ;  $\mathbf{F}_{n,2}^{VFD} = \{F_{1,2}^{VFD} - F_{2,2}^{VFD}, \dots, F_{i,2}^{VFD} - F_{i+1,2}^{VFD}, \dots, F_{n,2}^{VFD}\}^T$ , với  $F_i^{VFD}$  được xác định [3]:

$$\begin{cases} F_{i,1}^{VFD} = C_{i,1}^{VFD} \cos \theta_{i,1} |\dot{x}_{i,1} - \dot{x}_{i-1,1}|^\alpha \text{sign}(\dot{x}_{i,1} - \dot{x}_{i-1,1}) & (i = \overline{1, n+m}) \text{ nối với kết cấu B1} \\ F_{i,2}^{VFD} = C_{i,2}^{VFD} \cos \theta_{i,2} |\dot{x}_{i,2} - \dot{x}_{i-1,2}|^\alpha \text{sign}(\dot{x}_{i,2} - \dot{x}_{i-1,2}) & (i = \overline{1, n}) \text{ nối với kết cấu B2} \end{cases}; \quad \mathbf{F}_{FD} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_n^{FD} \\ \mathbf{0}_m \\ -\mathbf{F}_n^{FD} \end{Bmatrix}$$

là véc tơ lực

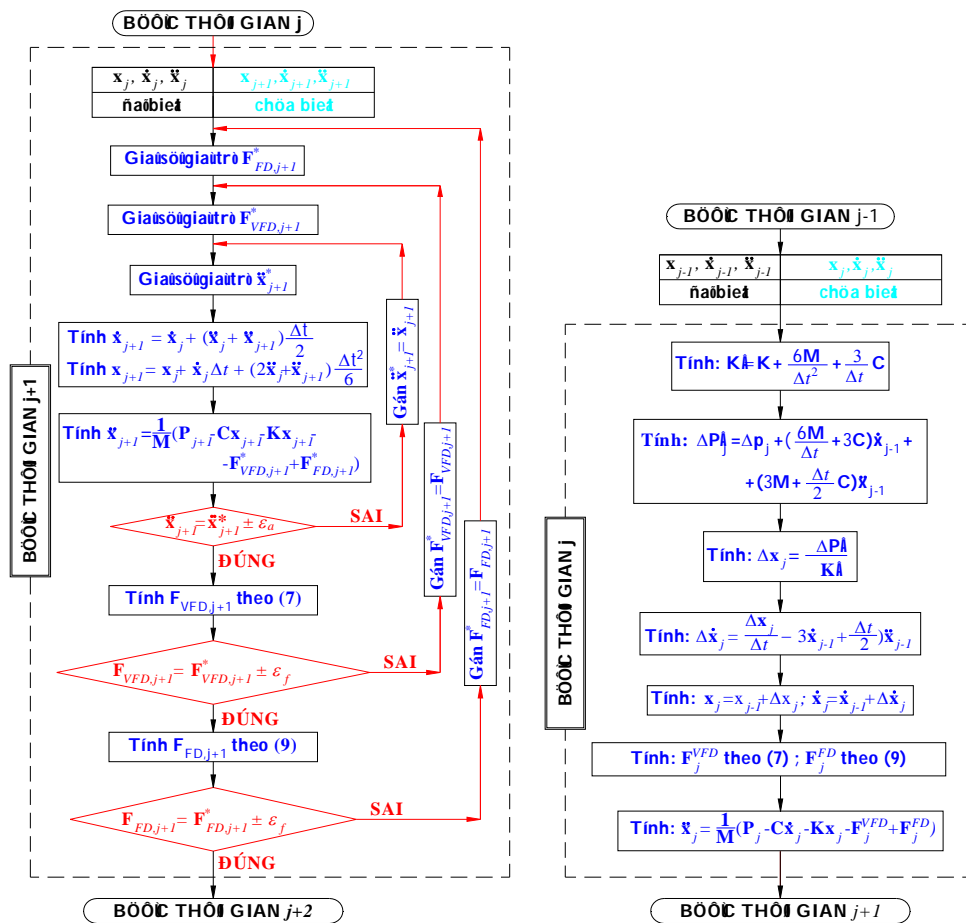
điều khiển FD giữa hai kết cấu B1 và B2; trong đó  $\mathbf{F}_n^{FD} = \{F_1^{FD}, \dots, F_i^{FD}, \dots, F_n^{FD}\}^T$ , với  $F_i^{FD}$  được xác định theo (2);

$\mathbf{1} = \left\{ \underbrace{1, \dots, 1}_{(2n+m) \text{ số } 1} \right\}^T$  là véc tơ hằng số mô tả phân phối gia tốc nền.

**2.3. Thuật toán giải phương trình chuyển động**

Do tính chất phi tuyến của bài toán (phi tuyến lực điều khiển và phi tuyến cả tải trọng tác dụng vào kết cấu) nên phương trình vi phân chuyển động dạng ma trận (4) được giải bằng phương pháp số dựa trên phương pháp Time-Newtonmark, phương pháp tích phân trực tiếp với giả thiết rằng ở mỗi bước thời gian gia tốc tuân theo quy luật tuyến tính, và cải tiến phương pháp số này để phù hợp với bài toán điều khiển. Với sự trợ giúp của máy tính và phần mềm MATLAB, miền thời gian của bài toán được rời rạc hóa thành các bước thời gian cách đều nhau  $\Delta t$  ( $j = 1, 2, \dots, nt$  với  $nt$  là tổng số bước thời gian tính toán). Điều kiện để ổn định nghiệm bài toán [1]  $\Delta t \leq \frac{\sqrt{3}}{T_n}$  với  $T_n$  là giá trị nhỏ nhất giữa hai chu kỳ dao động riêng  $T_{n,1}$  và  $T_{n,2}$ . Để tìm nghiệm của phương trình (4), ta cần biết {1} dữ liệu ở bước thời gian trước đó và {2} giá trị gia tốc  $\ddot{x}_{j+1}$  hoặc số gia về chuyển vị  $\Delta x_j$ .

Từ đó ta có thể xây dựng 2 phương pháp để giải phương trình (4) như sau (trong phương trình (4), véc tơ lực tác dụng  $\mathbf{P} - \mathbf{M}\mathbf{I}\ddot{x}_g$  được xem như là véc tơ tải trọng  $\mathbf{P}$ ): **phương pháp 1** là phương pháp tính lặp và  $\ddot{x}_{j+1}$  làm biến chính và **phương pháp 2** là phương pháp không lặp và dùng  $\Delta x_j$  làm biến chính. Các bước tính toán của hai phương pháp này được trình bày dưới dạng lưu đồ như Hình 2.



Hình 2. Lưu đồ 2 PHƯƠNG PHÁP số TIME-NEWMARK cải tiến

**3. Ví dụ tính toán số**

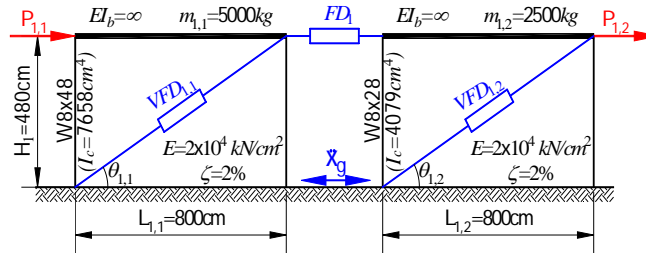
Các ví dụ dùng cho việc tính toán số được lấy từ các bài toán mẫu (Benchmark) [7] để tiện cho việc so sánh kết quả. Hệ kết cấu được điều khiển với 3 trường hợp: (A) chỉ sử dụng hệ cản FD ở giữa hai kết cấu; (B) chỉ sử dụng VFD ở các tầng của từng kết cấu; (C) sử dụng kết hợp (A) và (B).

Trong các ví dụ số, đối với hệ cản FD, việc chọn tham số điều khiển  $F_i^{slip}$  phụ thuộc vào đặc trưng kết cấu, vào độ lớn tải trọng, và được chọn bằng phương pháp thử dần [4] [5]

### 3.1. Hệ kết cấu B1-1 tầng và B2-1 tầng

Để đánh giá mức độ tin cậy của phương pháp 1 và 2 và phân tích sự truyền dao động từ kết cấu B1 sang kết cấu B2, bài toán được phân tích với hệ kết cấu B1-1 tầng và B2-1 tầng với hai trường hợp tải trọng: {1} dao động tự do và {2} tải trọng điều hòa. Nghiệm giải tích chính xác của bài toán khi kết cấu B1 chỉ có VFD chịu tải trọng {1} và {2} được cho ở [1]. Xét hệ kết cấu liền kề B1 và B2 mà mỗi tòa nhà có 1 tầng. Cả 2 kết cấu có cột được làm bằng thép hình chữ I, mô đun đàn hồi  $E = 200 GPa$ , và tỉ số cản  $\zeta = 2\%$ . Dầm sàn được xem như tuyệt đối cứng ( $EI_b = \infty$ ). Các kích thước và đặc trưng hình học và khối lượng mỗi hệ được cho trong

Hình 3.



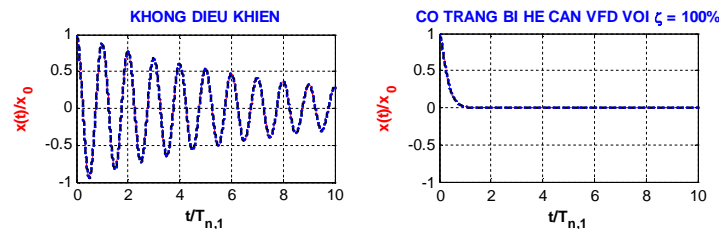
Hình 3. Sơ đồ hệ kết cấu liền kề được trang bị hệ cản VFD và FD

Độ cứng của hệ khung kết cấu được xác định theo (3). Các thông số điều khiển trong các hệ cản được lấy như sau: đối với hệ cản VFD, hệ số mũ  $\alpha$  lấy bằng 1 (cản tuyến tính),  $C_{1,j}^{VFD}$  ( $j=1,2$ ) được lấy sao cho  $(c_{1,j} + C_{1,j}^{VFD} \cdot \cos \theta_{1,j}) = c_{1,j}^{cr} = 2m_{1,j}\omega_{n,j}$  (cản tới hạn).

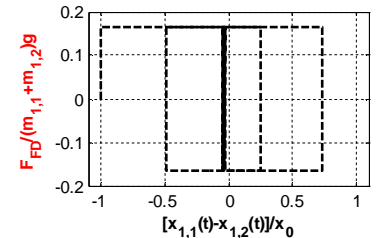
#### 3.1.1. Đáp ứng của hệ kết cấu với dao động tự do

Cho kết cấu thứ nhất một chuyển vị cưỡng bức ban đầu  $x_{1,1}(0) = x_0 = 10cm$  từ vị trí cân bằng tĩnh ( $\dot{x}_{1,1}(0) = 0$ ). Các tải trọng khác tác động vào kết cấu lấy bằng không.

--- PHƯƠNG PHÁP GIAI TÍCH --- PHƯƠNG PHÁP SỐ 1 ..... PHƯƠNG PHÁP SỐ 2

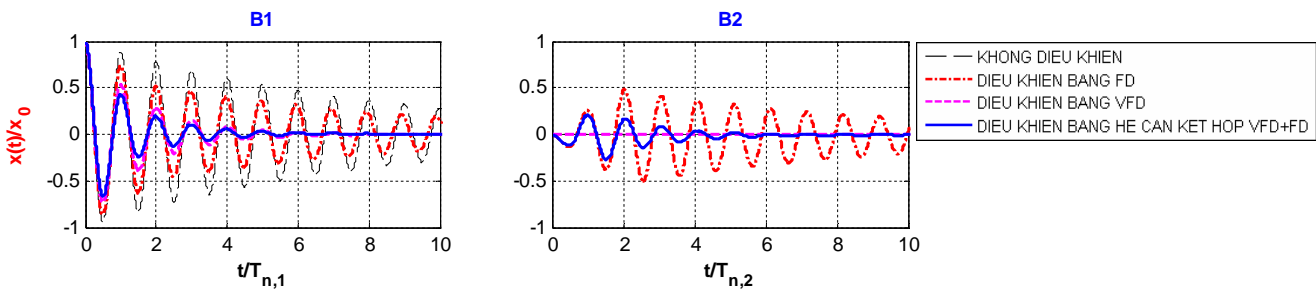


Hình 4. Đáp ứng chuyển vị kết cấu B1 khi có và không sử dụng hệ cản VFD



Hình 5. Chu trình tiêu tán năng lượng FD – phương pháp 2

Kết cấu thứ hai ban đầu cân bằng ở vị trí trạng thái tĩnh và không có tải trọng tác động vào kết cấu này ( $x_{1,2}(0) = 0, \dot{x}_{1,2}(0) = 0$ ). Tham số điều khiển của FD giữa 2 kết cấu B1 và B2 được lấy  $F_{slip} = 12.25 kN$ .

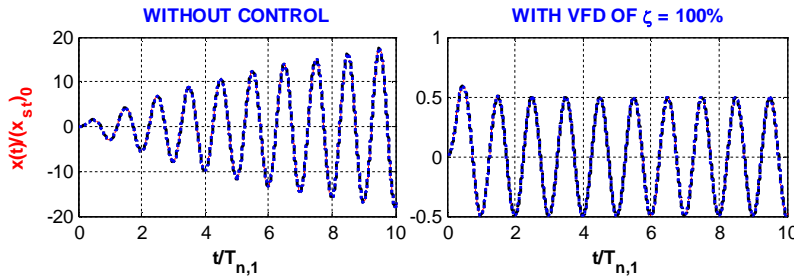


Hình 6. Chuyển vị hệ kết cấu với các trường hợp (A), (B) với  $C_{1,1}^{VFD} = 20627 N \cdot s / m$  ( $\zeta = 8\%$ ), và (C) sử dụng phương pháp số 2

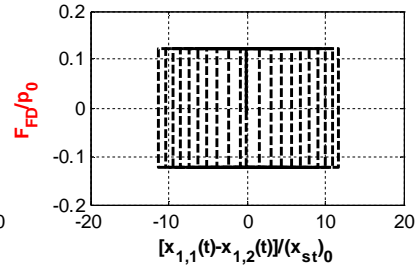
3.1.2. Đáp ứng của hệ kết cấu với tải trọng điều hòa

Cho kết cấu B1 chịu một tải trọng cường bức điều hòa có dạng  $p_{1,1}(t) = p_0 \sin(\omega t)$ , trong đó  $p_0 = 200kN$  hay  $(x_{st})_0 = \frac{p_0}{k_{1,1}} = 6cm$ ; tần số lực kích thích  $\omega$  được lấy bằng tần số dao động tự nhiên của B1 và B2 ( $\omega = \omega_{n,1} = \omega_{n,2}$ ) để khi không được điều khiển, kết cấu B1 xảy ra hiện tượng cộng hưởng. Khảo sát đáp ứng của kết cấu khi không có hệ cản hay lần lượt thay đổi các tỉ số cản  $\zeta$ . Tham số điều khiển của FD được lấy:  $F_{slip} = 24.5kN$

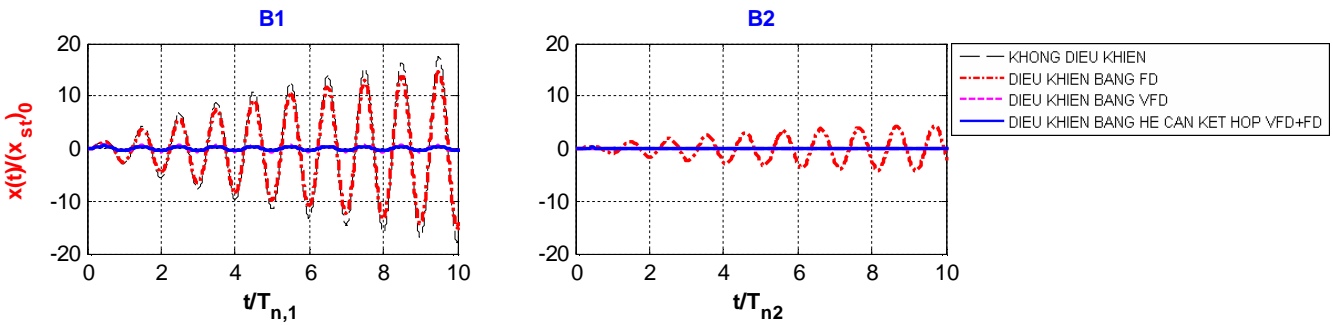
--- PHƯƠNG PHÁP GIẢI TÍCH    - - - - PHƯƠNG PHÁP SỐ 1    ..... PHƯƠNG PHÁP SỐ 2



Hình 7. Chuyển vị B1 khi sử dụng 2 phương pháp số Time Newmark và phương pháp giải tích với tải trọng điều hòa



Hình 8. Chu trình tiêu tán năng lượng của hệ cản FD sử dụng phương pháp 2



Hình 9. Chuyển vị hệ kết cấu với các trường hợp: (A), (B) với  $C_{1,1}^{VFD} = 252680 N \cdot s/m$  ( $\zeta = 98\%$ ), và (C)

Đối với cả hai trường hợp tải trọng, sai số tích lũy về đáp ứng chuyển vị của kết cấu khi giải bằng phương pháp giải tích và bằng hai phương pháp 1 và 2 là không đáng kể đối với cả hai trường hợp khi không và có điều khiển bởi hệ cản VFD (Hình 4, Hình 7 và Bảng 1). Phương pháp 2 do không sử dụng vòng lặp nên cho thời gian tính toán nhanh hơn phương pháp 1 (phương pháp sử dụng 3 vòng lặp) nên trong các ví dụ tính toán sau này, bài báo sử dụng phương pháp 2 để tìm đáp ứng hệ kết cấu. Khi xét về chu trình tiêu tán năng lượng của hệ cản FD, mặc dù lực cản sinh ra trong hệ FD được tính theo công thức gần đúng (2) nhưng chu trình tiêu tán năng lượng của FD (Hình 5, Hình 8) là đúng với lý thuyết cơ học về ma sát [1]. Còn xét về cách chọn hệ số cản C trong VFD, các trường hợp  $\zeta < 100\%$  hay  $\zeta > 100\%$  đều cho hiệu quả giảm đáp ứng chuyển vị kém hơn trường hợp  $\zeta = 100\%$  (Hình 4, và Hình 6). Hay nói cách khác, hệ số cản của VFD được chọn sao kết cấu bị cản tới hạn (critically damped) cho đáp ứng tốt nhất. Vì vậy, đây là cơ sở để chọn tham số điều khiển cho hệ cản VFD trong kết cấu 1 tầng. Đối với việc sử dụng hệ cản FD ở giữa hai kết cấu, mặc dù kết cấu B1 giảm được chuyển vị nhưng B1 đã truyền dao động cho B2, làm cho B2 dao động cộng hưởng theo cùng với B1 (vì tần số riêng của B2 được chọn gần bằng với B1) thay vì đứng yên cân bằng (Hình 6 và Hình 9).

Bảng 1. Bảng sai số về chuyển vị B1 (thời gian phân tích là 2.5s) của 2 phương pháp số 1 và 2

LOẠI TẢI TRỌNG	Nghiệm phương pháp số so với nghiệm chính xác	Nghiệm giữa hai phương pháp số
	$\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{nt} [(x_{1,1}^{Method})_j - (x_{1,1}^{Exact})_j]^2}{nt}}{\frac{(x_{1,1}^{Exact})_{max} - (x_{1,1}^{Exact})_{min}}{100\%}}}$	$\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{nt} [(x_{1,1}^{Method 1})_j - (x_{1,1}^{Method 2})_j]^2}{nt}}{\frac{(x_{1,1}^{Method 1})_{max} - (x_{1,1}^{Method 1})_{min}}{100\%}}}$

	Không điều khiển	Với VFD ( $\zeta=100\%$ )	
<b>DAO ĐỘNG TỰ DO</b>	<b>0.0038</b> – Phương pháp 1	<b>0.2149</b> – Phương pháp 1	<b><math>1.4579 \times 10^{-7}</math></b> (không điều khiển)
	<b>0.0038</b> – Phương pháp 2	<b>0.2149</b> – Phương pháp 2	<b><math>6.3650 \times 10^{-5}</math></b> (điều khiển VFD)
<b>ĐIỀU HÒA</b>	<b>0.0133</b> – Phương pháp 1	<b>0.0010</b> – Phương pháp 1	<b><math>3.7201 \times 10^{-8}</math></b> (không điều khiển)
	<b>0.0133</b> – Phương pháp 2	<b>0.3952</b> – Phương pháp 2	<b>0.0415</b> (điều khiển VFD)

**3.2. Hệ kết cấu B1-9 tầng và B2-3 tầng**

Ví dụ số tiếp theo nhằm phân tích dao động của hệ kết cấu B1 cao tầng (9 tầng) được nối bằng FD với kết cấu B2 thấp tầng (3 tầng) và được trang bị VFD ở mỗi tầng B1 và B2. Các kết cấu này đều là các bài toán benchmark [7]. Khung của cả hai kết cấu B1 và B2 được làm bằng thép có:  $E = 200\text{GPa}$ , tỉ số cản của mode 1 và mode 2 là  $\zeta = 2\%$ , và các đặc trưng động lực học của hệ được cho ở Bảng 2

**Bảng 2. Đặc trưng động lực học về khối lượng và độ cứng kết cấu B1**

KẾT CẤU	B1									B2				
	TẦNG $i^{th}$	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>	5 <sup>th</sup>	6 <sup>th</sup>	7 <sup>th</sup>	8 <sup>th</sup>	9 <sup>th</sup>	TẦNG $i^{th}$	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>
$m_{i,1} (\times 10^3 \text{ kg})$		1010	989	989	989	989	989	989	989	1070	$m_{i,1} (\times 10^3 \text{ kg})$	957	957	1040
$k_{i,1} (\text{kN/cm})$		17843	41638	41638	31504	31504	22238	22238	19690	19690	$k_{i,1} (\text{kN/cm})$	6838	18223	18223

**3.2.1. Thông số điều khiển hệ cản VFD cho kết cấu B1 chịu tải trọng động đất Elcentro và Northridge**

Để phân tích phân tích hiệu quả làm việc của hệ kết cấu được trang bị (VFD+FD), trước hết các thông số trong hệ cản VFD và FD phải được lựa chọn tối ưu. Nhằm tìm thông số tối ưu trong VFD, xét hệ kết cấu B1 chịu tải trọng động đất với hai trường hợp tải trọng động đất: |1| ElCentro có giá trị gia tốc đỉnh (PGA) là  $\ddot{x}_0 = 0.35g$  và |2| Northridge có  $\ddot{x}_0 = 0.84g$ , với  $g$  là gia tốc trọng trường ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ). Để chọn tham số điều khiển trong hệ cản VFD, ta xét 3 trường hợp sử dụng hệ cản VFD trong kết cấu B1 như sau: trường hợp {1} lấy  $C_{i,1}^{VFD} = 49 \times c_{i,1}$  và  $\alpha_{i,1} = 1$  với  $c_{i,1}$  là hệ số cản trong ma trận cản  $C_{9,9}$  của kết cấu B1; trường hợp {2}  $C_{i,1}^{VFD} = 2.7007 \times 10^8 \text{ N.s/m}$  và  $\alpha_{i,1} = 1$ ; trường hợp {3}  $C_{i,1}^{VFD} = 49 \times c_{i,1}$  và  $\alpha_{i,1} = \begin{cases} 0.7 & \text{để tăng cường lực cản theo} \\ 1.0 (i \neq 1) & \end{cases}$  phương ngang cho cột tầng 1<sup>st</sup>; {4} sử dụng các hệ cản của trường hợp {2} nhưng ở dạng cách tầng (chỉ có tầng 1,3,5,7,9 là sử dụng hệ cản).

Tiêu chí để đánh giá hiệu quả giảm đáp ứng của {1}, {2}, {3}, và {4} là hiệu quả giảm đáp ứng trung bình của B1:

$$R_{mean,1} (\%) = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \left[ R_{(x_{i,1})_{max}} + R_{(x_{i+1,1} - x_{i,1})_{max}} + R_{(a_{i,1})_{max}} \right] / 3$$

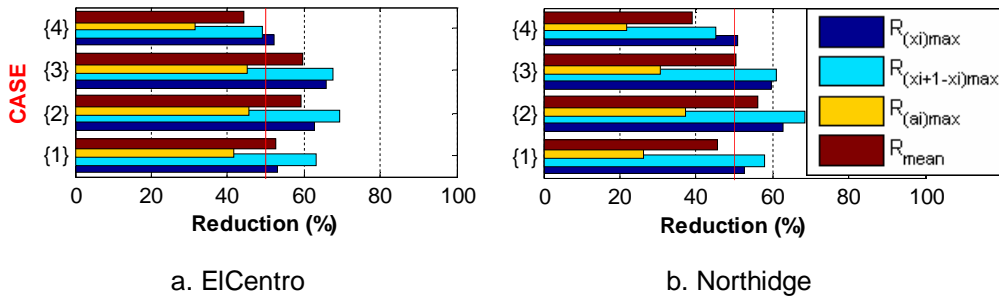
trong đó:  $R_{(x_{i,1})_{max}} (\%)$ ,  $R_{(x_{i+1,1} - x_{i,1})_{max}} (\%)$ , và  $R_{(a_{i,1})_{max}} (\%)$  lần lượt

là độ giảm đáp ứng chuyển vị, chuyển vị tương đối, và gia tốc lớn nhất từng tầng của kết cấu B1.

Mặc dù độ giảm đáp ứng tỉ lệ thuận với số lượng hệ cản VFD gắn vào kết cấu nhưng việc chọn chủng loại và bố trí chúng vào kết cấu B1 cũng làm tăng hiệu quả giảm đáp ứng (Bảng 3 và Hình 10). So sánh trường hợp {1} và {2}, nếu VFD được sử dụng một cách “hài hòa” về chủng loại VFD {1} thay vì sử dụng tất cả các tầng VFD có  $C_{i,1}^{VFD}$  lớn nhất  $C_{i,1}^{VFD} = 2.7007 \times 10^8 (\text{N.s/m})$ , ta có thể tiết kiệm được chi phí mà hiệu quả giảm đáp ứng không thay đổi nhiều (Hình 10). So sánh trường hợp {2} và trường hợp {3}, nếu VFD vẫn được sử dụng “hài hòa” nhưng tại tầng một ta sử dụng VFD có khả năng tiêu tán năng lượng lớn  $\alpha_{1,1}=0.7$  thì hiệu quả giảm đáp ứng vẫn cho tốt như trường hợp {2}. Cuối cùng đối với trường hợp {4}, mặc dù số lượng VFD giảm gần một nửa nhưng hiệu quả giảm đáp ứng trung bình vẫn có thể ở mức “chấp nhận được”. Vì vậy, ở các ví dụ sau, bài báo đề xuất sử dụng VFD ở trường hợp {3}.

**Bảng 3.** Hiệu quả giảm đáp ứng chuyển vị kết cấu B1 của VFD với 4 trường hợp {1}, {2}, {3}, {4}

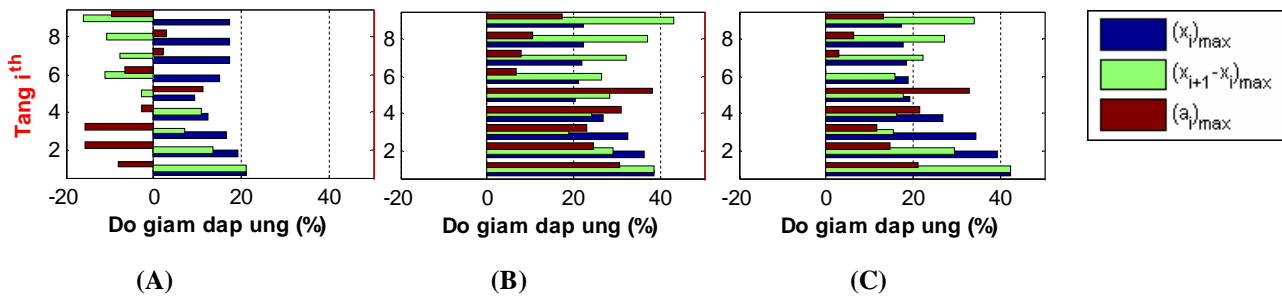
TẢI TRỌNG	TRƯỜNG HỢP	$\frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 R_{(x_{i,1})_{\max}} (\%)$	$\frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 R_{(x_{i+1,1}-x_{i,1})_{\max}} (\%)$	$\frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 R_{(a_{i,1})_{\max}} (\%)$	$R_{mean,1} (\%)$
ELCENTRO  1	{1}	53.2	63.3	41.5	<b>52.7</b>
	{2}	62.6	69.6	45.4	<b>59.2</b>
	<u>{3}</u>	<u>66.0</u>	<u>67.5</u>	<u>45.2</u>	<b><u>59.5</u></b>
	{4}	52.4	49.3	31.3	<b>44.3</b>
NOR-THIDGE  2	{1}	52.5	58.1	26.3	<b>45.7</b>
	{2}	62.6	68.4	37.1	<b>56.0</b>
	<u>{3}</u>	<u>59.8</u>	<u>61.2</u>	<u>30.7</u>	<b><u>50.6</u></b>
	{4}	50.8	45.1	21.8	<b>39.2</b>



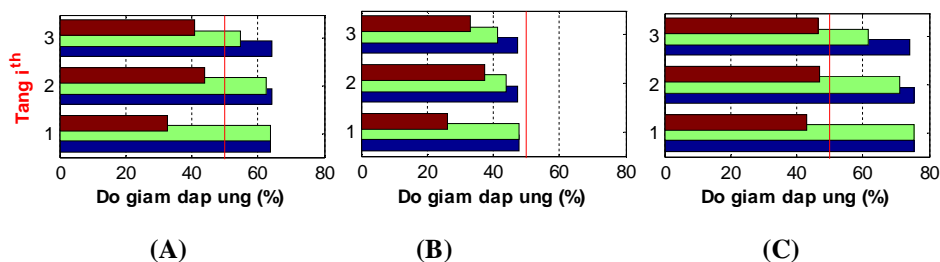
**Hình 10.** Độ giảm đáp ứng của kết cấu B1 với bốn trường hợp sử dụng VFD

3.2.2. Phân tích đáp ứng của hệ B1-9 tầng và B2-3 tầng dưới tải trọng động đất Elcentro

Khi gắn VFD (được sử dụng ở trường hợp {3} cho cả B1 và B2) trở lại vào hệ kết cấu B1 và B2, đáp ứng của kết cấu B1 và B2 dưới tác dụng của tải trọng ElCentro trong 3 trường hợp (A), (B), và (C) được cho ở Hình 11 và Hình 12. Đối với hệ căn FD ở trường hợp (A), lấy  $f_i^{slip,FD} = 0.25 \times m_{i,2} \ddot{x}_0$



**Hình 11.** Độ giảm đáp ứng lớn nhất của kết cấu B1 trong ba trường hợp (A), (B), và (C)



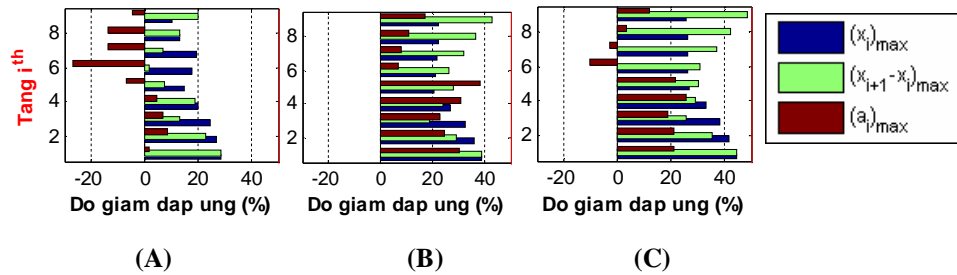
**Hình 12.** Độ giảm đáp ứng của kết cấu B2 trong ba trường hợp (A), (B), và (C)



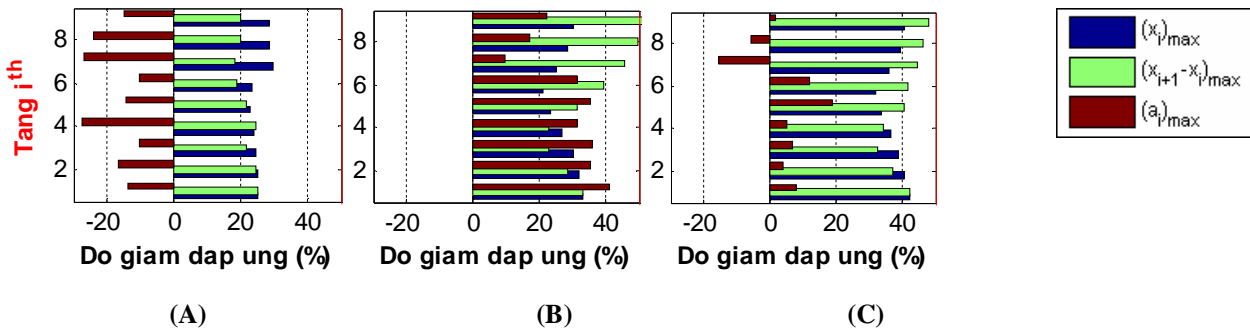
Với trường hợp (A), độ giảm chuyển vị chỉ tốt cho kết cấu B2 và chỉ 3 tầng của kết cấu B1 (Hình 11a và Hình 12a). Các tầng trên của kết cấu B1 cho hiệu quả giảm đáp ứng âm (tăng đáp ứng) về chuyển vị tương đối (hay lực cắt, mô men) do 3 tầng dưới của kết cấu B1 được “liên kết” với kết cấu B2. Nhưng đối với trường hợp (C) (kết hợp (A) và (B)), độ giảm đáp ứng là tốt cho cả hai kết cấu (Hình 11c và Hình 12c).

**3.3. Phân tích đáp ứng của hệ B1-9 tầng và B2-9 tầng dưới tải trọng động đất Elcentro**

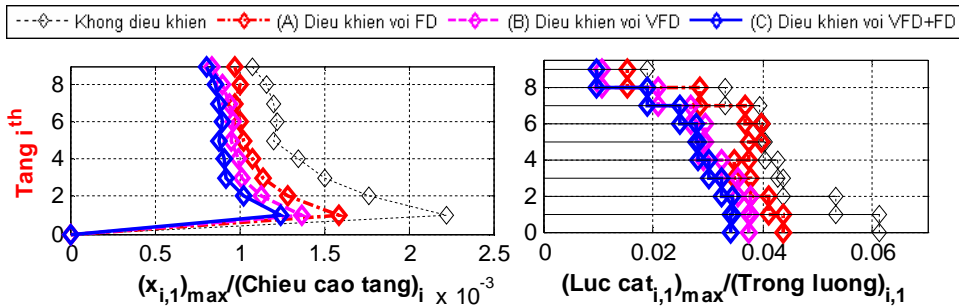
Để xét hiện tượng tăng đáp ứng về chuyển vị tương đối giữa các tầng trên còn xảy ra hay không khi hệ sử dụng hệ cản FD nối kết cấu B1 và B2, ví dụ số xét hệ gồm 2 kết cấu B1-9 tầng và B2-9 tầng được liên kết với nhau bằng hệ cản FD. Giữa các tầng của B1 và B2 được trang bị hệ cản VFD mà thông số điều khiển của nó được lấy như ở trường hợp {3}. Hai kết cấu B1 và B2 được xem như là “giống nhau” vì độ cứng của B2 được lấy bằng B1 như Bảng 2 và khối lượng của B2 được lấy:  $m_{i,2} = 75\% \times m_{i,1}$ . Thông số điều khiển trong FD  $F_i^{slip,FD} = 0.25m_{i,1}\ddot{x}_0$



Hình 13. Độ giảm đáp ứng lớn nhất của kết cấu B1 trong ba trường hợp (A) , (B) , và (C)



Hình 14. Độ giảm đáp ứng của kết cấu B2 trong ba trường hợp (A) , (B) , và (C)



Hình 15. Đáp ứng chuyển vị tuyệt đối và lực cắt lớn nhất trong các tầng B1

Với trường hợp (A), hiện tượng tăng đáp ứng không còn xảy ra và độ giảm đáp ứng chuyển vị tương đối giữa các tầng B1 tăng đáng kể so với trường hợp kết cấu 9 tầng nối với 3 tầng (Hình 13a).

Hơn nữa, trong số các trường hợp (A), (B) và (C), trường hợp kết hợp (C) cho kết quả đáp ứng chuyển vị và lực cắt là nhỏ nhất (Hình 13c và Hình 14c). Đối với lực cắt chân cột tầng 1, đáp ứng quyết định sự bền vững hay sụp đổ trong kết cấu, các hệ cản VFD và FD đã giảm đáng kể lực cắt chân cột tầng 1, đặc biệt là hệ cản kết hợp VFD+FD (Hình 15).

#### 4. Kết luận

Đối với tải trọng tác động dạng dao động tự do hay tải trọng điều hòa tác dụng vào B1 và khi B2 cân bằng, kết cấu B1 luôn truyền dao động cho B2. Nhưng đối với tải trọng động đất, hệ cản đã FD lợi dụng dao động khác nhau giữa 2 kết cấu B1 và B2 tại các tầng để cả hai cùng giảm đáp ứng. Bên cạnh đó, khi nối FD giữa kết cấu B1 cao tầng và B2 thấp tầng, các tầng được nối thì có độ giảm đáp ứng tốt, nhưng các tầng phía trên cao của B1 thì có thể gây ra đáp ứng âm. Do vậy, bài báo đề xuất không nên nối 2 kết cấu có độ chênh lệch tầng quá lớn. Xét về mức độ ưu và khuyết điểm của việc sử dụng kết hợp các hệ cản, đối với kết cấu B1 (kết cấu có chu kỳ dao động tự nhiên lớn), độ giảm đáp ứng của VFD+FD luôn tốt nhất so với kết cấu chỉ sử dụng VFD hoặc FD. Trong khi đó, đối với kết cấu B2, đôi khi hệ cản FD gây tăng đáp ứng cho B2, khi đó hệ cản VFD giữa các tầng của B2 trong trường hợp này sẽ hấp thụ bớt một phần năng lượng và làm cho kết cấu B2 giảm đáp ứng. Vì vậy, việc sử dụng kết hợp cả hai hệ cản VFD ở giữa các tầng trong B1 và B2 và hệ cản FD giữa hai kết cấu B1 và B2 luôn cho hiệu quả giảm đáp ứng tối ưu.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] ANIL K.CHOPRA – Dynamics of Structures, 4<sup>th</sup> edition – Prentice Hall Press – 2012.
- [2] A.V. BHASKARARAO, R.S. JANGID – Seismic Response Of Adjacent Buildings Connected With Dampers – 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 3143.
- [3] DOUGLAS P. TAYLOR – Fluid Viscous Dampers for Application of Seismic Energy Dissipation and Seismic Isolation – Eleventh Conference World on Earthquake Engineering – 1996.
- [4] PHẠM NHÂN HÒA, CHU QUỐC THẮNG – Đánh giá hiệu quả giảm chấn của hệ cản ma sát điều khiển bị động với công trình chịu tải trọng động đất – Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ, Đại học quốc gia Tp. Hồ Chí Minh, Vol 11, No.05(2008) 78-90.
- [5] PHẠM NHÂN HÒA, CHU QUỐC THẮNG – Các phương án sử dụng hệ cản ma sát biến thiên trong kết cấu 9 tầng – Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ, Đại học quốc gia Tp. Hồ Chí Minh – 2007.
- [6] S. M. DUMNE, M. K. SHRIMALI – Earthquake Performance of Isolated Buildings Connected with MR Dampers – 8<sup>th</sup> Pacific Conference on Earthquake Engineering, 5-7 DECEMBER 2007, SINGAPORE.
- [7] Y. OHTORI, R. E. CHRISTENSON, B. F. SPENCER – Benchmark Control Problems for Seismically Excited Nonlinear Buildings – Journal of Engineering Mechanics © ASCE / APRIL 2004.