

## ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ GIẢM CHẤN CỦA HỆ CẢN MA SÁT ĐIỀU KHIỂN BỊ ĐỘNG VỚI CÔNG TRÌNH CHỊU TẢI TRỌNG ĐỘNG ĐẤT

Phạm Nhân Hòa <sup>(1)</sup>, Chu Quốc Thắng <sup>(2)</sup>

(1) Trường Đại học Kỹ Thuật Công Nghệ Tp. Hồ Chí Minh

(2) Trường Đại học Quốc tế, ĐHQG-HCM

### 1. GIỚI THIỆU

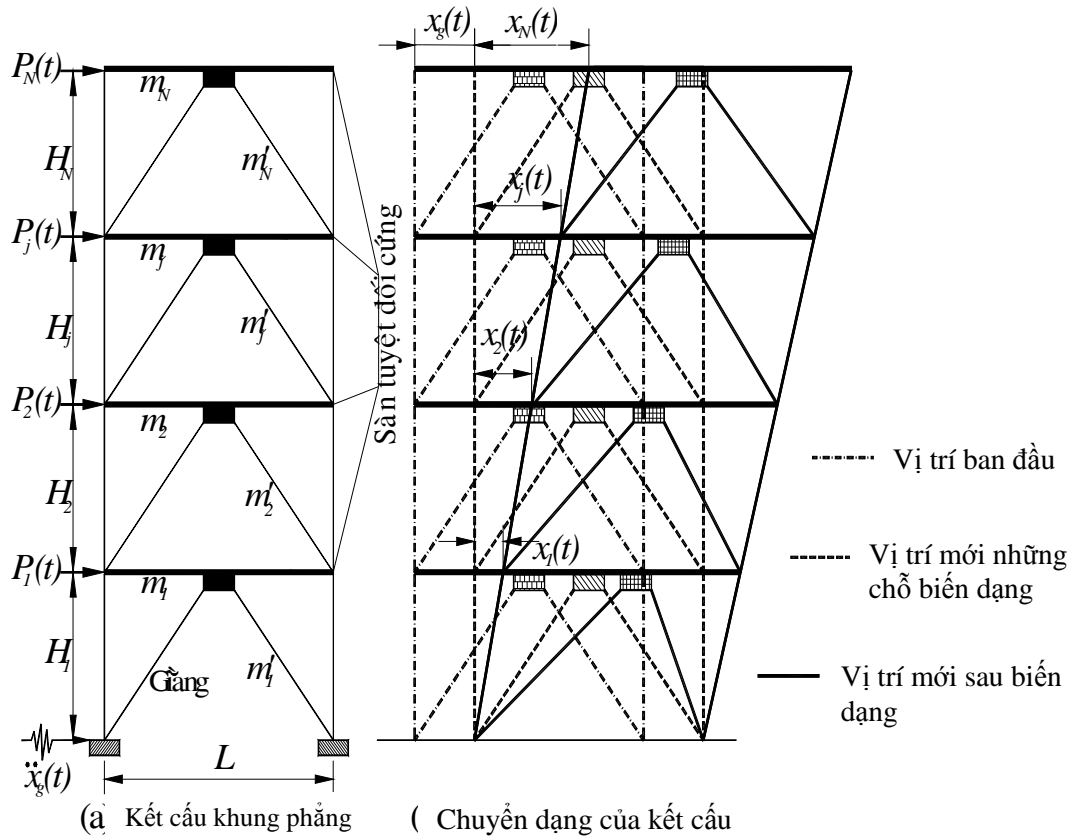
Với ưu điểm về giá thành rẻ và dễ điều khiển [1], FD thích hợp giảm chấn cho công trình thấp tầng và chịu tải trọng động đất ở mức độ trung bình. Nhưng để đánh giá đặc điểm của FD, ta cần phải có một mô hình tính toán và thuật giải tìm đáp ứng đúng để từ đó đưa ra cách xác định lực điều khiển sao cho FD làm việc hiệu quả. Do vậy, việc xây dựng mô hình tính toán và thuật giải để tìm đáp ứng là vấn đề cần thiết và quan trọng trước khi đánh giá mức độ hiệu quả của FD.

### 2. MÔ HÌNH TÍNH TOÁN CỦA KẾT CẤU

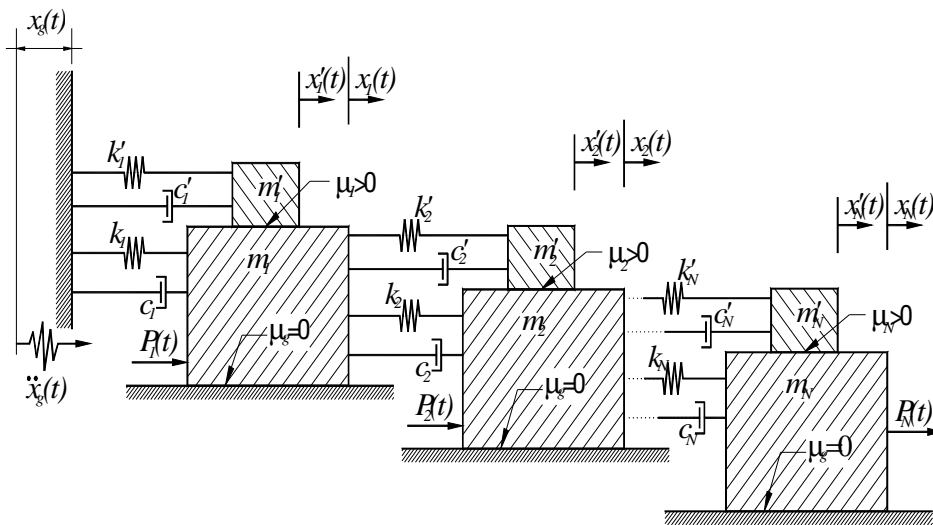
Xét kết cấu  $n$  tầng được trang bị  $n$  FD như sau: (0).

Các ký hiệu:  $m_j$  và  $m'_j$  lần lượt là khối lượng của kết cấu và của hệ giằng ở tầng thứ  $j$ ;  $x_j(t)$  và  $x'_j(t)$  lần lượt là chuyển vị của kết cấu và của hệ giằng so với đất nền ở tầng thứ  $j$ ;  $P_j(t)$  và  $\ddot{x}_g(t)$  là lực tác động và gia tốc nền của tải trọng động đất biến thiên theo thời gian.

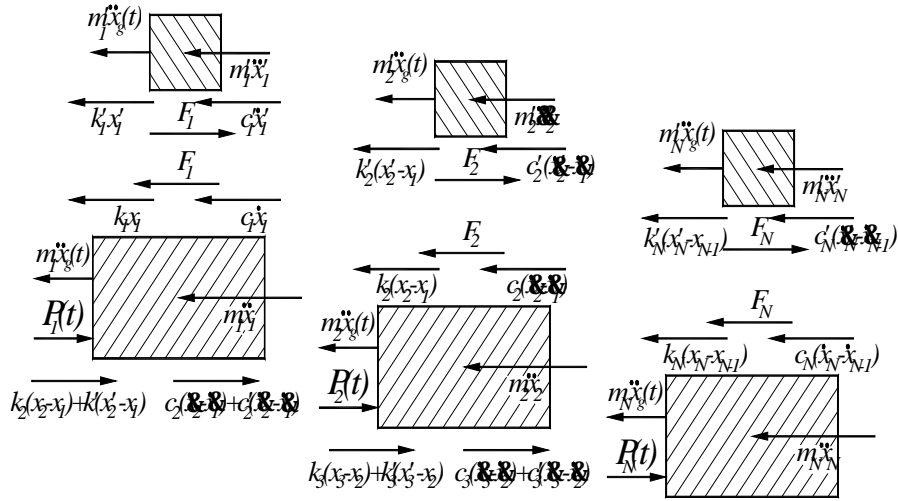
Với giả thiết sàn tuyệt đối cứng, ta quy khối lượng mỗi tầng thành khối lượng tập trung  $m_j$ , các khối lượng này được liên kết với nhau bằng các lò xo  $k_j$  và hệ cản  $c_j$ . Hệ giằng chứa FD được quy thành khối lượng tập trung  $m'_j$  đặt trên  $m_j$  và chúng liên kết với nhau bằng lực ma sát  $F_j$ , lực ma sát này chính là lực ma sát trong hệ cản được lắp đặt ở mỗi tầng.



Hình 1. Sơ đồ kết cấu khung nhiều tầng được trang bị FD theo mô hình sàn tuyệt đối cứng [4].



Hình 2. Mô hình cơ học của kết cấu.



Hình 3. Sơ đồ lực tác động vào các khối lượng tách rời.

Khi kết cấu chịu động đất, phương trình chuyển động của kết cấu như sau:

$$\mathbf{M}^{ss} \ddot{\mathbf{x}} + (\mathbf{C}^{ss} + \mathbf{C}^{db}) \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}^{dc} \dot{\mathbf{x}}^d + (\mathbf{K}^{ss} + \mathbf{K}^{db}) \mathbf{x}^s + \mathbf{K}^{dc} \mathbf{x}^d = -\mathbf{M}^{sr} \ddot{\mathbf{r}}_g - \mathbf{F} + \mathbf{P} \quad (1a)$$

$$\mathbf{M}^{dd} \ddot{\mathbf{x}}^d + (\mathbf{C}^{dc})^T \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}^{da} \dot{\mathbf{x}}^d + (\mathbf{K}^{dc})^T \mathbf{x}^s + \mathbf{K}^{da} \mathbf{x}^d = -\mathbf{M}^{dd} \ddot{\mathbf{r}}_g + \mathbf{F} \quad (1b)$$

trong đó:  $\bullet$

$$\mathbf{M}^{ss} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{O} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_N \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C}^{ss} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & \mathbf{O} & 0 \\ 0 & \mathbf{O} & \mathbf{O} & -c_N \\ 0 & 0 & -c_N & c_N \end{bmatrix} \text{ và}$$

$$\mathbf{K}^{ss} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \mathbf{O} & 0 \\ 0 & \mathbf{O} & \mathbf{O} & -k_N \\ 0 & 0 & -k_N & k_N \end{bmatrix}$$

lần lượt là các ma trận khối lượng, ma trận cản và ma trận độ cứng của kết cấu.

$$\mathbf{x}^s = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \mathbf{M} \\ x_N \end{Bmatrix}; \quad \dot{\mathbf{x}} = \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \mathbf{M} \\ \dot{x}_N \end{Bmatrix} \text{ và } \ddot{\mathbf{x}} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \mathbf{M} \\ \ddot{x}_N \end{Bmatrix}$$

lần lượt là các véc tơ đáp ứng về chuyển vị, vận tốc và gia tốc của kết cấu.

Các ma trận đặc trưng của hệ giằng ( $\mathbf{M}^{dd}, \mathbf{C}^{dd}, \mathbf{K}^{dd}, \mathbf{x}^d, \dot{\mathbf{x}}^d$  và  $\ddot{\mathbf{x}}^d$ ) cũng xác định tương tự như các ma trận đặc trưng của kết cấu.

$$C^{da} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c'_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{O} & \mathbf{O} & 0 \\ 0 & 0 & -c'_N & 0 \end{bmatrix}, \quad C^{db} = \begin{bmatrix} c'_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c'_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{O} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C^{dc} = \begin{bmatrix} 0 & -c'_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{O} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c'_N \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ và}$$

$C^{da} + C^{db} + C^{dc} + (C^{dc})^T = C^{dd}$ . Các ma trận về độ cứng của hệ giằng ( $K^{da}, K^{db}, K^{dc}$  và  $K^{dd}$ ) cũng xác định tương tự như ma trận cản.

$$r = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ \mathbf{M} \\ 1 \end{Bmatrix}, \quad F = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \mathbf{M} \\ F_N \end{Bmatrix} \text{ và } P = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \mathbf{M} \\ P_N \end{Bmatrix}$$

lần lượt là các vectơ đơn vị, vectơ lực ma sát và vectơ tải trọng tác động.

$\mu_j$ : hệ số ma sát động của thiết bị cản ma sát được lắp đặt ở tầng thứ j.

### 3. THUẬT TOÁN GIẢI PHƯƠNG TRÌNH CHUYỂN ĐỘNG

– FD làm việc dưới 2 trạng thái:

• Trạng thái “dính” khi:  $st |F_j| < F_{max,j} = mN_j$  (2a)

Khi đó, ta có quan hệ sau:  $st \ddot{x} = st \ddot{x}'$  và  $st \dot{x} = st \dot{x}'$  (2b)

• Trạng thái “trượt” khi:  $sl |F_j| \geq F_{max,j} = mN_j$  (3a)

và lực ma sát lúc này được xác định: 
$$\begin{cases} sl (F_j)_{i+1} = F_{max,j} & \text{nếu } (F_j)_{i+1} \geq F_{max,j} \\ sl (F_j)_{i+1} = -F_{max,j} & \text{nếu } (F_j)_{i+1} \leq -F_{max,j} \end{cases} \quad (3b)$$

Các chỉ số dưới st và sl chỉ trạng thái của FD, st là “dính” và sl là “trượt”.

Từ (2a) và (3a): chỉ khi nào FD ở trạng thái “trượt” thì mới làm tiêu tán năng lượng của tải trọng tác động. Đối với FD được điều khiển bị động thì  $F_{max,j} = \text{const}$ , giá trị  $F_{max,j}$  này phụ thuộc vào thiết bị cản ma sát (tức là phụ thuộc vào hệ số ma sát động  $\mu_j$  và lực kẹp  $N_j$ ) theo quan hệ sau:  $F_{max,j} = m_j N_j$  (4)

Theo (4): lực ma sát lớn nhất  $F_{max,j}$  (khi FD xảy ra trạng thái “trượt”) mà ta thiết lập trước trong mỗi hệ cản là có thể thay đổi được qua việc thay đổi giá trị lực kẹp  $N_j$ .

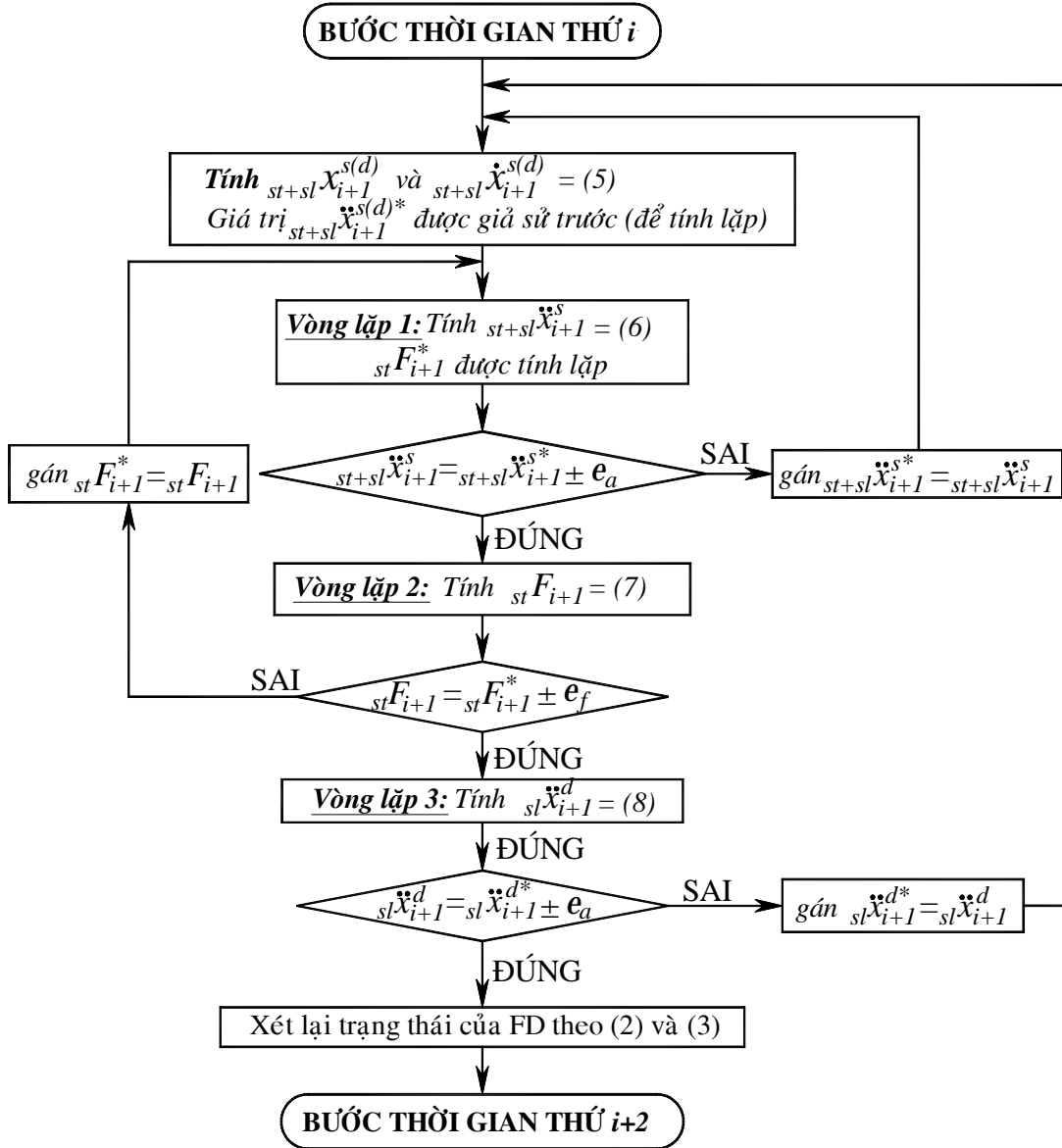
– Việc tìm đáp ứng của kết cấu ( $x^s, \ddot{x}$  và  $\ddot{x}$ ) từ phương trình chuyển động là phụ thuộc vào tải trọng tác động ( $P(t)$ , gia tốc nền  $\ddot{x}_g(t)$ ) và trạng thái của FD, do đó, bài toán mang tính phi tuyến. Phương pháp số để giải bài toán này như sau:

• Chia thời gian t thành các bước thời gian  $t_i = i \cdot \Delta t$ , i là bước thời gian thứ i và  $\Delta t$  là mỗi bước thời gian).

• Quan hệ giữa chuyển vị và vận tốc vào gia tốc được lấy theo phương pháp Time – Newmark như sau [3]:

$$\ddot{x}_{i+1} = \ddot{x}_i + \left[ \ddot{x}_i + \ddot{x}_{i+1} \right] \frac{\Delta t}{2} \quad \text{và} \quad x_{i+1} = x_i + \ddot{x}_i \Delta t + \left[ 2\ddot{x}_i + \ddot{x}_{i+1} \right] \frac{\Delta t^2}{6} \quad (5)$$

- Đáp ứng của kết cấu ở 1 bước thời gian điển hình được tính theo lưu đồ ở 0.



**Hình 4.** Lưu đồ thuật toán tìm đáp ứng của kết cấu sử dụng FD

$${}_{st+sl} \ddot{x}_{i+1} = -{}_{st+sl} \left[ \left( \mathbf{M}^{ss} \right)^{-1} \left[ {}_{st+sl} \left( \mathbf{C}^{ss} + \mathbf{C}^{db} \right) \cdot {}_{st+sl} \ddot{x}_{i+1}^s + {}_{st+sl} \mathbf{C}^{dc} \cdot {}_{st+sl} \ddot{x}_{i+1}^d + {}_{st+sl} \left( \mathbf{K}^{ss} + \mathbf{K}^{db} \right) \cdot {}_{st+sl} \mathbf{x}_{i+1}^s + \right. \right. \\ \left. \left. + {}_{st+sl} \mathbf{K}^{dc} \cdot {}_{st+sl} \mathbf{x}_{i+1}^d + {}_{st+sl} \mathbf{M}^{ss} \cdot \mathbf{r}_g(t_{i+1}) + {}_{st+sl} \mathbf{F}_{i+1}^* - {}_{st+sl} \mathbf{P}_{i+1} \right] \right] \quad (6)$$

$${}_{st} \mathbf{F} = {}_{st} \mathbf{M}^{dd} \cdot {}_{st+sl} \ddot{x}_{i+1}^d + {}_{st} \left[ \left( \mathbf{C}^{dc} \right)^T \right] \cdot {}_{st+sl} \ddot{x}_{i+1}^s + {}_{st} \mathbf{C}^{da} \cdot {}_{st+sl} \ddot{x}_{i+1}^d + \\ + {}_{st} \left[ \left( \mathbf{K}^{dc} \right)^T \right] \cdot {}_{st+sl} \mathbf{x}_{i+1}^s + {}_{st} \mathbf{K}^{da} \cdot {}_{st+sl} \mathbf{x}_{i+1}^d + {}_{st} \mathbf{M}^{dd} \cdot \mathbf{r}_g \quad (7)$$

$${}_{sl} \mathbf{x}_{i+1}^d = -{}_{sl} \left[ (\mathbf{M}^{dd})^{-1} \right] \cdot \left\{ \begin{array}{l} {}_{sl} \left[ (\mathbf{C}^{dc})^T \right] \cdot {}_{st+sl} \mathbf{x}_{i+1}^s + {}_{sl} \mathbf{C}^{da} \cdot {}_{st+sl} \mathbf{x}_{i+1}^d + \\ + {}_{sl} \left[ (\mathbf{K}^{dc})^T \right] \cdot {}_{st+sl} \mathbf{x}_{i+1}^s + {}_{sl} \mathbf{K}^{da} \cdot {}_{st+sl} \mathbf{x}_{i+1}^d + {}_{sl} \mathbf{M}^{dd} \mathbf{r} \cdot \mathbf{x}_g(t_{i+1}) - {}_{sl} \mathbf{F}_{i+1} \end{array} \right\} \quad (8)$$

$\epsilon_a$  và  $\epsilon_f$  lần lượt là các sai số về gia tốc và lực ma sát trong mỗi lần tính lặp.

• Kết quả bài toán là chính xác khi lấy:

$$\Delta t = \frac{T_F}{200} \quad ; \quad e_a = \frac{PGA}{10^5} \quad ; \quad e_f = \frac{mN}{10^5} \quad (9)$$

trong đó:  $T_F$  là chu kỳ dao động tự nhiên của kết cấu,  $PGA$  là đỉnh gia tốc nền của tải trọng động đất.

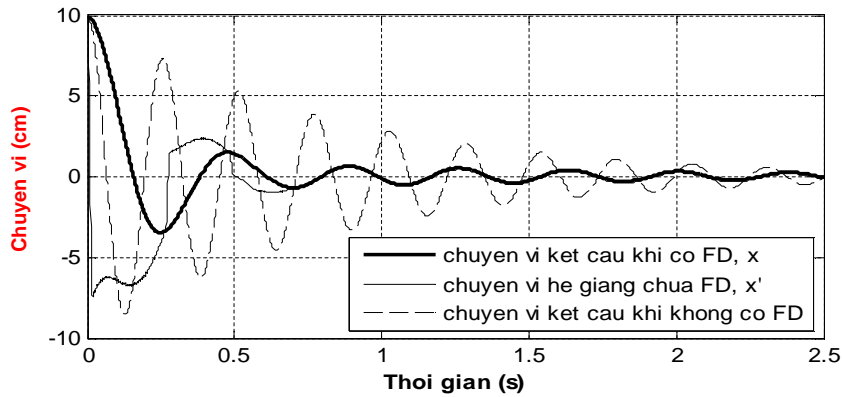
#### 4. VÍ DỤ TÍNH TOÁN

##### 4.1. Hệ một bậc tự do

Số liệu về đặc trưng kết cấu:  $k = 29.991(kN/cm)$ ,  $m = 5000kg$ ,  $c = 0.1225(kN.s/cm)$  (tỉ số cản của vật liệu  $x$  lấy bằng 5%), độ cứng của hệ giằng chứa VFD:  $k' = 25.9747(kN/cm)$

##### 4.1.1. Đáp ứng của hệ với dao động tự do

Với  $x(0) = x'(0) = 10cm$ ,  $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}'(0) = 0$ ,  $P(t) = 0$  và  $\mathbf{x}_g(t) = 0$ . Tổng thời gian phân tích là 2.5s, với bước thời gian  $\Delta t = 0.001s$  và  $F_{max} = 20kN$ .

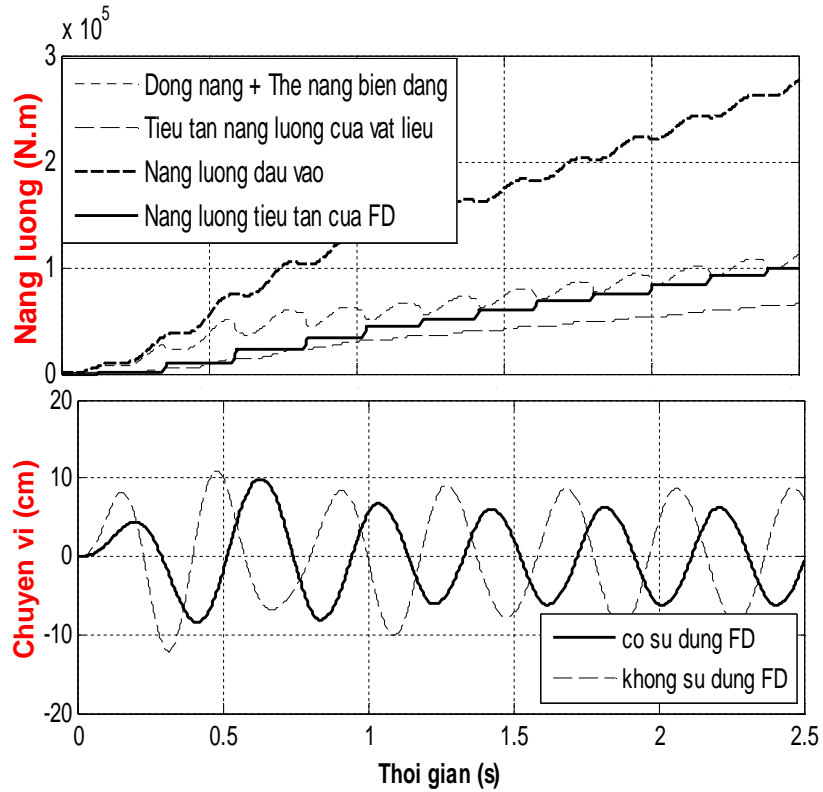


Hình 5. Đáp ứng với dao động tự do

*Nhận xét:* Khi xảy ra trạng thái “trượt”, chu kỳ dao động của kết cấu có sử dụng FD là lớn hơn so với khi không được điều khiển hay nói cách khác, FD đã làm cho kết cấu dao động chậm lại. Sau khi “dính” (tức là  $x \equiv x'$ ) thì chu kỳ dao động của hệ là hằng số.

##### 4.1.2. Đáp ứng của hệ với tải trọng điều hòa

$x(0) = x'(0) = 0$ ,  $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}'(0) = 0$ ,  $P(t) = 150 \cdot \sin(16t)$  (kN,s) và  $\mathbf{x}_g(t) = 0$ . Tổng thời gian phân tích là 2.5s, với bước thời gian  $\Delta t = 0.001s$  và  $F_{max} = 60kN$ .



Hình 6. Đáp ứng về năng lượng (a) và chuyển vị (b) với tải điều hòa

*Nhận xét:* Theo biểu đồ đáp ứng về năng lượng (0a), đường tiêu tán năng lượng của FD có hình dạng khá giống với đường năng lượng tích lũy của tải trọng, điều đó đã cho ta cách thức sử dụng  $F_{max}$  trong FD. Sự giảm đáp ứng của kết cấu sử dụng FD đối với tải trọng điều hòa là không lớn, do đó, hệ cản FD không thích hợp để giảm đáp ứng với tải trọng gió.

**4.2.Hệ nhiều bậc tự do**

Xét kết cấu khung 3 tầng của tòa nhà mẫu [5]. Các đặc điểm động lực học của kết cấu được cho như sau:

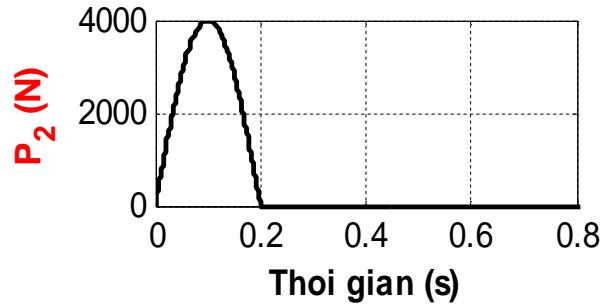
- $m_1 = m_2 = m_3 = 4.78 \times 10^5 (kg)$  ;  $k_1 = k_2 = k_3 = 1393 (N / m)$  ;  $\alpha = 0.02\%$

- $m'_1 = m'_2 = m'_3 = 350 (kg)$  ;  $k'_1 = k'_2 = k'_3 = 432 (N / m)$  ;  $\alpha' = 0\%$

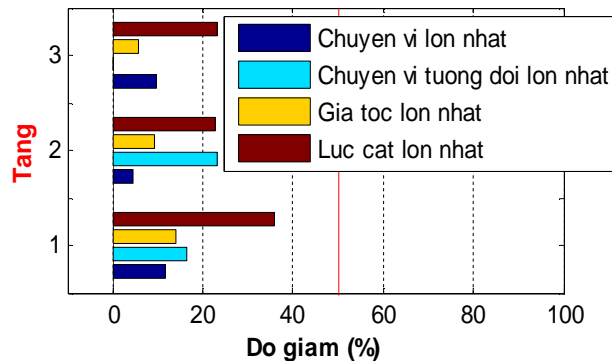
Lấy  $\Delta t = 0.001$  ,  $e_a = 0.0001 (m/s^2)$  và  $e_f = 1N$  .

**4.2.1.Đáp ứng của hệ với tải trọng xung**

Một tải trọng xung tác động vào tầng 2 của kết cấu  $\mathbf{P}(t) = [0; P_2(t); 0]$  ,  $P_2(t)$  được mô tả như bên, tổng thời gian phân tích là 2.5s.

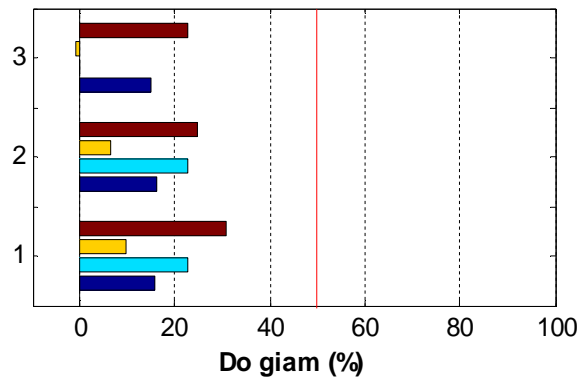


Hình 7. Tải trọng xung hình sin tác động vào tầng 2



Hình 8. Độ giảm đáp ứng lớn nhất với tải trọng xung khi sử dụng

$$\mathbf{F1}_{\max} = [468; 468; 508](kN)$$



Hình 9. Độ giảm đáp ứng lớn nhất khi sử dụng  $\mathbf{F2}_{\max} = \mathbf{F1}_{\max} \times 5$

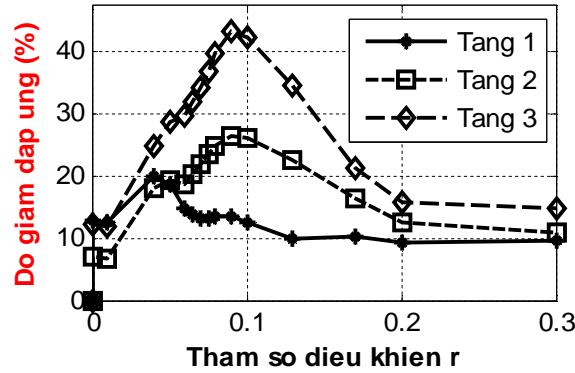
*Nhận xét:* Với các công trình chịu tải trọng xung, việc giảm các đáp ứng lớn nhất (như chuyển vị lớn nhất, gia tốc lớn nhất, lực cắt lớn nhất,...) là rất quan trọng đối với độ bền và sự ổn định của công trình. Tuy nhiên, độ giảm đáp ứng lớn nhất của kết cấu sử dụng FD là không lớn (0), ngay khi ta tăng lực ma sát trong FD lên gấp 5 lần (0) thì hiệu quả cũng không tăng lên đáng kể. Điều này được giải thích như sau: năng lượng tiêu tán của FD của một chu kỳ chỉ tỉ lệ thuận với chuyển vị, trong khi năng lượng tiêu tán của vật liệu thì tỉ lệ với bình phương của chuyển vị. Hơn nữa, do đặc điểm của FD là dẫn tiêu tán năng lượng qua từng chu kỳ nên nó không hiệu quả để tiêu tán năng lượng tức thời của đáp ứng lớn nhất. Vì vậy, hệ cản FD không hiệu quả nhiều đối với tải trọng xung.

**4.2.2.Đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến sự hiệu quả về giảm đáp ứng của kết cấu sử dụng FD đối với công trình chịu tải trọng động đất:**

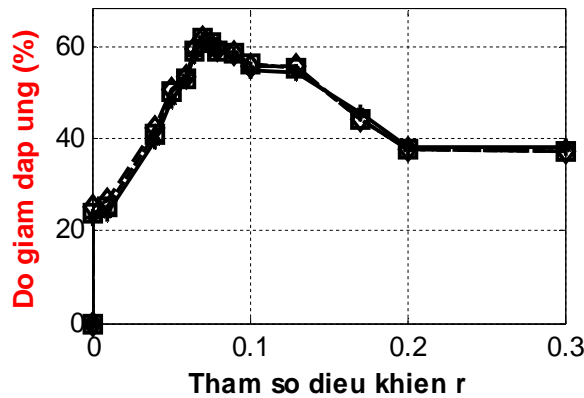
Tải trọng động đất ElCentro được sử dụng để phân tích bài toán đã mô tả ở phần trên.

*Yếu tố về lực sát trong FD:*

Để đánh giá ảnh hưởng của  $F_{max}$  trong FD đến sự hiệu quả giảm chấn, ta sử dụng tham số điều khiển  $r$  được định nghĩa như sau:  $r_j = F_{max,j} / W_j$ , trong đó,  $W_j$  là trọng lượng của mỗi tầng.



(a) Độ giảm đáp ứng về chuyển vị lớn nhất



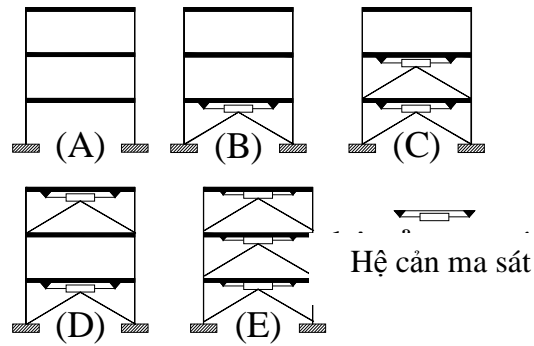
(b) Độ giảm đáp ứng về chuyển vị trung bình

**Hình 10.**Độ giảm đáp ứng của kết cấu với tham số  $r$  thay đổi

*Nhận xét:* Với cùng tải trọng tác động, khi  $r$  nhỏ (tức  $F_{max}$  còn nhỏ) thì độ giảm đáp ứng cũng chưa nhiều do sự tiêu tán năng lượng của FD tỉ lệ với  $F_{max}$ . Khi  $r$  tăng thì độ giảm đáp ứng cũng tăng theo và tăng đến một giá trị tối ưu, nhưng khi qua giá trị đỉnh này thì độ giảm đáp ứng giảm theo (0), do lúc này lực ma sát trong FD quá lớn dẫn đến trạng thái của FD luôn “dính” nên ít xảy ra quá trình tiêu tán năng lượng và khi này FD gần giống như một hệ giằng.

*Yếu tố về số lượng FD:*

Ta phân tích đáp ứng của các kết cấu có số lượng FD được bố trí như sau (0):



Hình 11. Các trường hợp phân tích

Trường hợp:

(A): khi không điều khiển

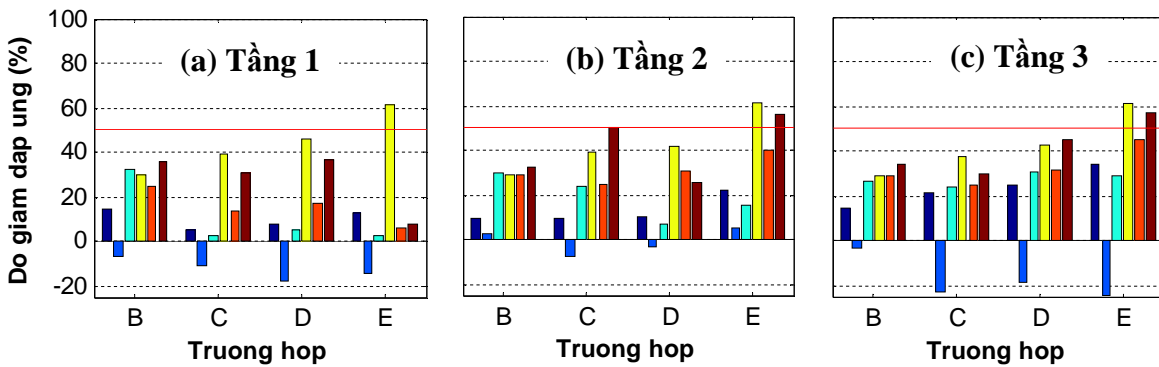
(B): 1 FD đặt ở tầng I

(C): 2 FD đặt ở tầng I và II

(D): 2 FD đặt ở tầng I và III

(E): 3 FD đặt ở tầng I, II và III

– Độ giảm đáp ứng ở các trường hợp (B), (C), (D) và (E) được so sánh với trường hợp (A).

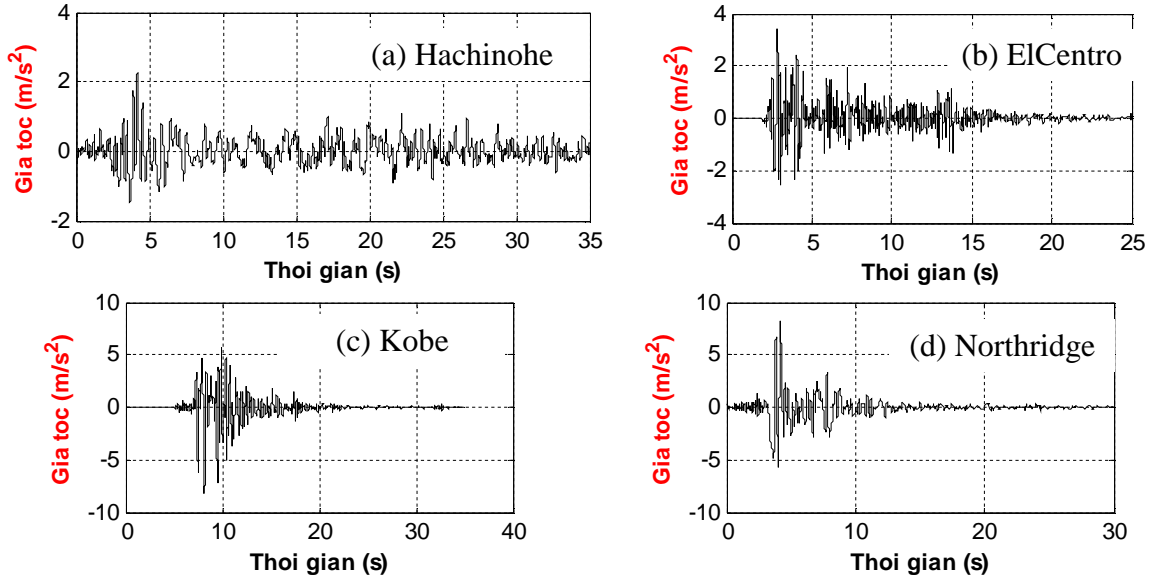


Hình 12. Độ giảm đáp ứng với các trường hợp sử dụng FD khác nhau

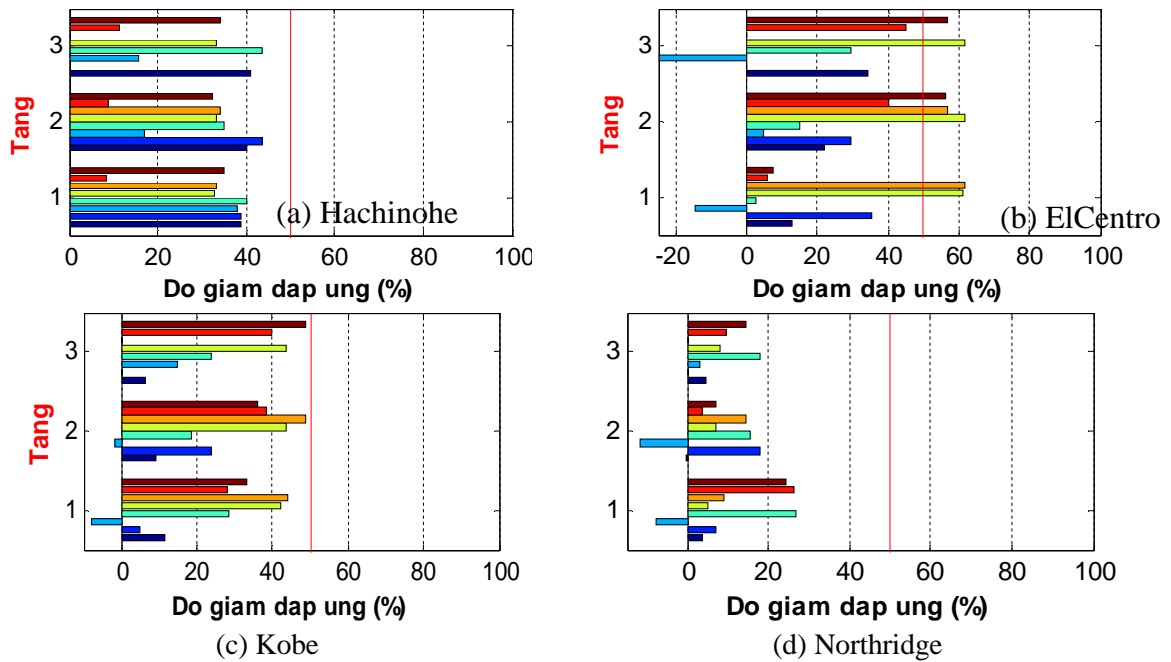


*Nhận xét:* Độ giảm đáp ứng tỉ lệ thuận với số lượng FD được sử dụng. Đối với trường hợp (C) và (D) (cùng sử dụng 2 FD) thì nhìn chung độ giảm là gần nhau nhưng ở các tầng có sử dụng FD, độ giảm đáp ứng là lớn hơn các tầng không sử dụng FD.

*Yếu tố về phổ gia tốc nền của tải trọng động đất:*



Hình 13. Phổ gia tốc nền của 4 trận động đất



Hình 14. Độ giảm đáp ứng của kết cấu với 4 phổ gia tốc nền khác nhau

*Nhận xét:* (Kết quả đáp ứng được tính với  $r$  tối ưu đối với từng trận động đất) FD hiệu quả với các trận động đất có phổ như 0a và b, còn đối với các trận động đất có dạng như 0d (có dạng tương tự như tải trọng xung) thì FD hiệu quả không nhiều.

## 5.KẾT LUẬN

Do khi làm việc, FD luôn chuyển đổi giữa 2 trạng thái “đính” và “trượt” nên bài toán là phi tuyến (phi tuyến do FD và tải trọng đầu vào). Dựa trên phương pháp Time-Newmark, việc tìm nghiệm của phương trình chuyển động của kết cấu sử dụng FD trở nên đơn giản hơn.

Hiệu quả của FD với tải trọng gió hay tải xung là kém hơn so với tải trọng động đất. Trong số các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả giảm chấn của FD thì yếu tố về sự phù hợp  $F_{max}$  và phổ gia tốc nền là đóng vai trò quan trọng. Hơn nữa, hệ cản ma sát cho kết quả về sự giảm đáp ứng về chuyển vị là tốt hơn so với gia tốc.

Đối với Việt Nam, khi các công trình xây dựng không cao và chịu các trận địa chấn không lớn [2] thì việc sử dụng FD hợp lý hơn cả.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Charlie Vail, Jeff Hubbell, Brian O'Connor, John King, Avtar Pall – *Seismic upgrade of the Boeing Commercial Airplane Factory at Everett, WA, USA* –13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada – August 1-6, (2004).
- [2]. <http://www.vnn.vn/khoahoc/trongnuoc/2005/01/367701/>
- [3]. Ray W.Clough and Joseph Penzien, *Dynamics of structures (Second edition)*, McGraw-Hill Inc, (1993).
- [4]. Servio Tulio de la Cruz Chaùidez, *Contribution to the Assessment of the Efficiency of Friction Dissipators for Seismic Protection of Buildings*, July (2003).
- [5]. Y.Ohtori, R. E. Christenson, B. F. Spencer, *Benchmark Control Problems for Seismically Excited Nonlinear Buildings*, Journal Of Engineering Mechanics © ASCE / APRIL (2004).