

PHÂN TÍCH HIỆU QUẢ GIẢM CHẤN CỦA HỆ CẢN KẾT HỢP CHẤT LỎNG VỚI LƯU BIẾN TỪ NỐI GIỮA HAI KẾT CẤU DƯỚI TẢI ĐỘNG ĐẤT

Ngày nhận bài: 31/07/2013
Ngày nhận lại: 18/08/2013
Ngày duyệt đăng: 26/08/2013

Lê Thanh Cường¹
Nguyễn Trọng Phước²

TÓM TẮT

Bài báo phân tích hiệu quả giảm chấn của hệ cản kết hợp gồm có cản chất lỏng VFD (Viscous Fluid Damper) bố trí trong kết cấu và cản lưu biến từ MRD (Magneto-Rheological Damper) bố trí nối giữa hai kết cấu dưới tác dụng của gia tốc nền động đất. Hệ cản chất lỏng VFD được mô phỏng bởi quan hệ lực cản và vận tốc chuyển động của hệ, có thể là tuyến tính hoặc phi tuyến. Hệ cản lưu biến từ MRD được mô phỏng bởi các lò xo và cản nhớt, trong đó lực cản sinh ra là một hàm phụ thuộc vào điện thế. Kết cấu được mô hình như hai hệ có hữu hạn bậc tự do động lực học. Phương trình chuyển động của hệ chịu gia tốc nền được thiết lập và giải bằng phương pháp Newmark. Một chương trình máy tính khá phức tạp được viết bằng ngôn ngữ MATLAB để phân tích phản ứng động của hệ kết cấu. Kết quả số từ phản ứng động gồm có lực cắt, gia tốc và năng lượng tiêu tán cho thấy hiệu quả việc kết hợp hai hệ cản.

Từ khóa: Hệ cản lưu biến từ, Hệ cản chất lỏng, gia tốc nền.

ABSTRACT

This paper studies dynamic reduction of combining damper consisting of Viscous Fluid Damper, VFD, which set inside individual structure and Magneto Rheological Damper, MRD, which set between two structures under ground motion. The MRD is simulated by springs, dashpot with damping force depending on displacement, velocity and voltage of equipment. The VFD is also expressed by the relation of damping force and velocity. The governing equation of motion of a structure is derived and solved by step by step procedures of Newmark method. A program is also established base on MATLAB language to analyse dynamic response of the structures. The result obtained from the numerical study is drawn effective of combining damper.

Keywords: Magneto-Rheological Damper, Viscous Fluid Damper, Ground Acceleration.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các trận động đất xảy ra trên thế giới trong thời gian vừa qua gây ra những hậu quả khủng khiếp về người và của như: Ngày 12/01/2010 tại Haiti gây tử vong 222.570 người và 14 tỉ USD; Ngày 11/03/2012 tại Đông Bắc, Nhật

Bản gây tử vong 20.000 người và 243 tỉ USD .v.v. Do đó bài toán ứng xử kết cấu chịu động đất luôn là đề tài có tính thời sự và thu hút được nhiều nhà khoa học trong nước cũng như quốc tế tìm hiểu. Nhiều nghiên cứu của các tác giả khác nhau (Lê - Nguyễn [4], Ok [7], Xu [9]) đã

¹ ThS, Trường Đại học Mở TP.HCM.

² TS, Trường Đại học Bách khoa TP.HCM.

cho thấy hiệu quả giảm chấn khi liên kết các công trình với nhau bằng các thiết bị giảm chấn. Kháng chấn cho từng kết cấu riêng biệt cho kết quả giảm đáp ứng dưới tải trọng động đất của các tầng rất tốt (*Martinez-Rodrigo* [5], *Cho* [6], *Ying* [10]). Do vậy việc kết hợp hai phương pháp kháng chấn cho các kết cấu liên được tập trung phân tích và khảo sát trong bài báo này.

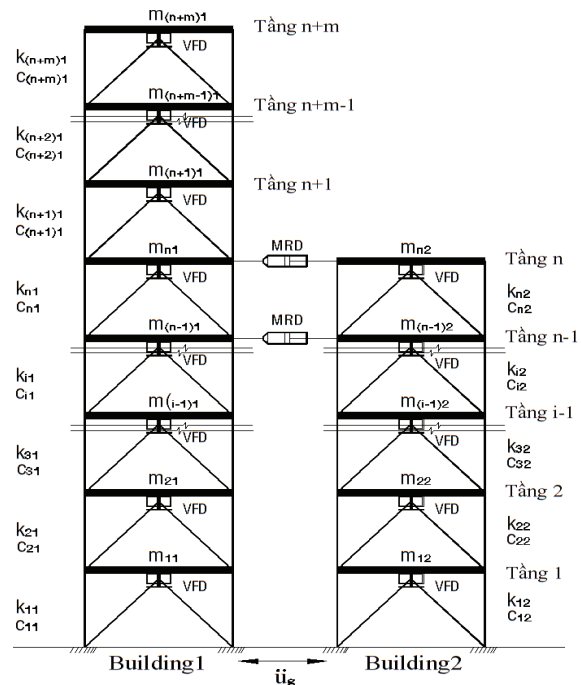
Hệ cản MR là thiết bị tiêu tán năng lượng thông minh sử dụng chất lưu MR (viết tắt của thuật ngữ Magneto-Rheological, tạm dịch là lưu biến từ). Chất lưu MR ra đời năm 1948 tại cục tiêu chuẩn Hoa Kỳ, có dạng là các hạt sắt trôi lơ lửng trong dung môi đặc biệt, và có thể chuyển từ lỏng sang rắn khi có lực từ đi qua từ đó sinh ra giới hạn đàn hồi cho chất lưu, giá trị này phụ thuộc vào độ từ hóa các hạt trong chất lưu (*San-Wan Cho* 2004 [6], *Spencer* 1997 [8]).

Hệ cản VFD (Viscous fluid damper) là hệ cản chất lỏng nhớt được phát minh cách đây cả thế kỷ, tuy nhiên đến năm 1990 mới đưa vào áp dụng cho các công trình dân dụng. Hiện nay, đây là hệ cản thông dụng nhất được sử dụng trong nhiều công trình dân dụng cũng như công nghiệp.

Dựa vào ý tưởng này, bài báo tập trung phân tích hiệu quả giảm chấn của hệ kết cấu dạng tháp đôi với hai loại hệ cản được sử dụng là VFD và MRD. Trong đó, hai kết cấu có số tầng khác nhau nhưng chiều cao tầng bằng nhau được nối với nhau bằng hệ MRD, đồng thời hệ VFD cũng được lắp đặt bên trong từng kết cấu. Phương trình chuyển động của cả hệ khi chịu gia tốc nền của động đất được thiết lập. Bài toán động lực học và điều khiển được giải bằng phương pháp tích phân số trong từng bước thời gian và lập trong mỗi bước thời gian. Gia tốc nền cũng được lựa chọn những trận động đất với phổ tần số tương đối gần với tần số riêng của kết cấu. Điều khác biệt trong bài báo này ứng xử của các hệ cản được phân tích tường minh

bằng phương pháp số và lập trình bằng ngôn ngữ Matlab. Sự hiệu quả của hệ cản trong bài báo được đánh giá theo phương pháp năng lượng tiêu tán của hệ kết cấu.

Hình 1. Mô hình kết cấu



2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Mô hình kết cấu

Xét hai kết cấu nhà có số tầng khác nhau, được mô hình với số bậc tự do động lực học khác nhau, được thể hiện như trên Hình 1. Các dầm được xem như cứng tuyệt đối và chỉ có chuyển vị theo phương ngang được xem xét. Các thông số khác như khối lượng, độ cứng, cản của từng kết cấu cũng được thể hiện chi tiết như trên Hình 1. Thiết bị MR được bố trí tại hai sàn trên cùng của công trình 2, thiết bị VFD được bố trí bên trong từng kết cấu 1 và kết cấu 2.

Phương trình chuyển động có dạng như sau (*Chopra* 2007 [1])

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -Mr\ddot{u}_g - f_{vf} + Df_{mr} \quad (1)$$

Trong đó: M , C , K lần lượt là các ma trận khối lượng, cản, độ cứng của kết cấu; D là ma trận thể hiện vị trí điểm đặt; $f_{mr} = [0]_{1,n-2}, \dots, f_{n-1}, f_n$ là

véc tơ lực điều khiển của hệ cản MRD; $f_{vf} = [f_{1,1}, \dots, f_{1,n+m}, f_{2,1}, \dots, f_{2,n}]$ véc tơ lực điều khiển của hệ cản VFD; $r = [1, 1, \dots, 1]^T$ là véc

tơ đơn vị; $\ddot{u}_g$ là gia tốc nền của động đất theo thời gian. Các ma trận M , C , K được định nghĩa và có kích thước như sau:

$$M_{(2n+m, 2n+m)} = \begin{bmatrix} [M_1]_{(n+m, n+m)} & [0_1]_{(n+m, n)} \\ [0_2]_{(n, n+m)} & [M_2]_{(n, n)} \end{bmatrix} \quad C_{(2n+m, 2n+m)} = \begin{bmatrix} [C_1]_{(n+m, n+m)} & [0_1]_{(n+m, n)} \\ [0_2]_{(n, n+m)} & [C_2]_{(n, n)} \end{bmatrix} \quad K_{(2n+m, 2n+m)} = \begin{bmatrix} [K_1]_{(n+m, n+m)} & [0_1]_{(n+m, n)} \\ [0_2]_{(n, n+m)} & [K_2]_{(n, n)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

với các ma trận tính chất của kết cấu thứ nhất được thiết lập bởi

$$M_1_{(n+m, n+m)} = \begin{bmatrix} m_{11} & & & & \\ & m_{21} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & m_{n+m-1,1} & \\ & & & & m_{n+m,1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$K_1_{(n+m, n+m)} = \begin{bmatrix} k_{11} + k_{21} & -k_{21} & & & \\ -k_{21} & k_{21} + k_{31} & -k_{31} & & \\ & & \ddots & & \\ & & & -k_{n+m-1,1} & k_{n+m-1,1} + k_{n+m,1} & -k_{n+m,1} \\ & & & & -k_{n+m,1} & k_{n+m,1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C_1_{(n+m, n+m)} = \begin{bmatrix} c_{11} + c_{21} & -c_{21} & & & \\ -c_{21} & c_{21} + c_{31} & -c_{31} & & \\ & & \ddots & & \\ & & & -c_{n+m-1,1} & c_{n+m-1,1} + c_{n+m,1} & -c_{n+m,1} \\ & & & & -c_{n+m,1} & c_{n+m,1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2. Hệ cản lưu biến từ

Mô hình Bouc-Wen hiệu chỉnh do *Spencer (1997)* [8] đề xuất được sử

dụng để tính lực hệ cản MR. Lực do hệ cản MR sinh ra được xác định theo công thức sau:

$$f_{mr} = c_1 \dot{y} + k_1 (x - x_0) \quad (6)$$

với biến tiên hóa z được định nghĩa bởi

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| (z) |z|^{n-1} - \beta \left(\dot{x} - \dot{y} \right) |z|^n + A_m \left(\dot{x} - \dot{y} \right) \quad (7)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)} \left\{ \alpha z + c_0 \dot{x} + k_0 (x - y) \right\} \quad (8)$$

Trong đó, k_f là độ cứng của bộ phận khí nén (accumulator); k_o là độ cứng ứng với vận tốc lớn; c_l và c_o là hệ số cản ứng với vận tốc nhỏ và lớn; x_o là chuyển dịch ban đầu của lò xo k_f ; các thông số $\gamma \beta n A_m$ là các thông số hình dạng của chu trình trễ được hiệu chỉnh từ

thực nghiệm; Các thông số $c_o c_l \alpha_o$ là các thông số phụ thuộc vào điện áp ra lệnh được xác định như sau: $c_o = c_{oa} + c_{ob} U$; $c_l = c_{la} + c_{lb} U$; $\alpha_o = \alpha_{oa} + \alpha_{ob} U$. Với điện áp cung cấp cho bộ điều khiển được tính thông qua bộ lọc bậc một như sau:

$$\dot{U} = \eta(U - V)$$

(9)

2.3. Hệ cản chất lỏng

Lực sinh ra của hệ cản VFD là một hàm số phụ thuộc vào vận tốc được cho bởi

$$F_{vf} = C \cdot |v|^\alpha \cdot sign(v)$$

(10)

Trong đó, C là hệ số cản; v là vận tốc của hệ cản; tham số α đại diện cho mối quan hệ giữa lực và vận tốc. Trong công thức [10] nếu $\alpha = 1$ hệ cản là tuyến tính (linear damper), nếu $\alpha \neq 1$ hệ cản là phi

tuyến (nonlinear damper). Hệ này có các tham số đặc trưng được phân tích như sau:

Để phân tích ảnh hưởng của các tham số đến lực của hệ cản VFD, chuyển vị và vận tốc của hệ cản được giả định bởi

$$d = A \cdot \sin(\omega t)$$

$$v = \dot{d} = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)$$

(11)

thế vào công thức (9):

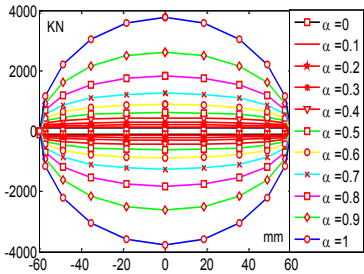
$$F_{vf} = C \cdot |v|^\alpha \cdot sign(v) = C \cdot |A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)|^\alpha \cdot sign(A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t))$$

(12)

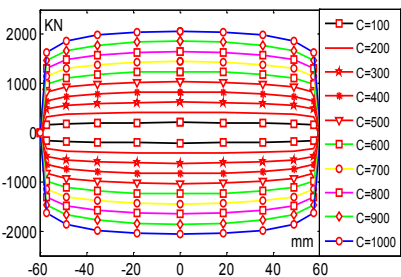
Chọn $A=60mm$, $f = \frac{\omega}{2\pi} = 0.1$ và $C=100kNs/mm$, quan hệ lực – chuyển vị khi thay đổi giá trị α từ 0:1 được thể hiện như trên Hình 2. Tương tự, lấy $\alpha = 0.2$

quan hệ lực – chuyển vị khi thay đổi giá trị C từ 100:1000 được thể hiện như trên Hình. 3.

Hình 2. Quan hệ lực-chuyển vị theo α



Hình 3. Quan hệ lực-chuyển vị theo C



Kết quả cho thấy khi tăng giá trị C và α thì lực sinh ra của thiết bị cản VFD cũng đồng thời tăng theo. Trong khi đối với từng hệ cản

luôn có một giá trị lực thiết kết cố định theo catalogue của nhà sản xuất, do đó giá trị C và α phải có quan hệ tỉ lệ nghịch là

$$C = \frac{F_{vf}}{|v|^{\alpha} \cdot sign(v)}$$

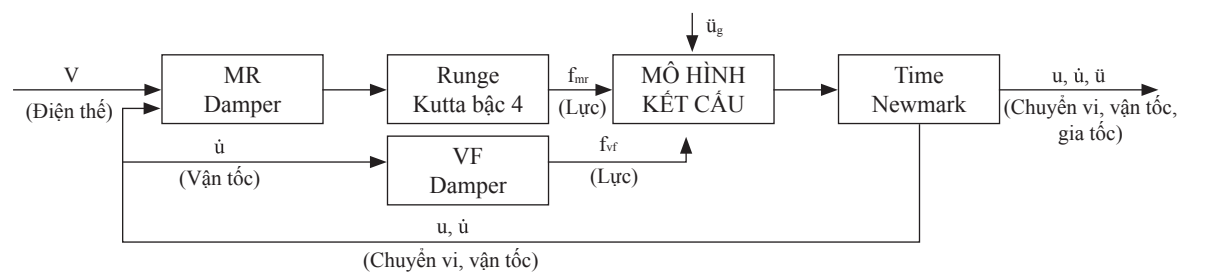
(13)

Do vậy, trong quá trình thiết kế công trình có sử dụng hệ cản VFD cần lựa chọn hệ số C và α phù hợp với mục tiêu thiết kế.

2.4. Phương pháp giải và thuật toán

Trong mỗi bước thời gian lực điều khiển trong hệ cản MRD được tính theo [6] và lực điều khiển trong hệ cản VFD được tính theo [10], các phương trình [7], [8], [9] được giải bằng phương pháp Runge Kutta bậc 4. Sơ đồ khối trong bài toán này được trình bày trên Hình 4.

Hình 4. Sơ đồ khối của thuật toán giải bài toán



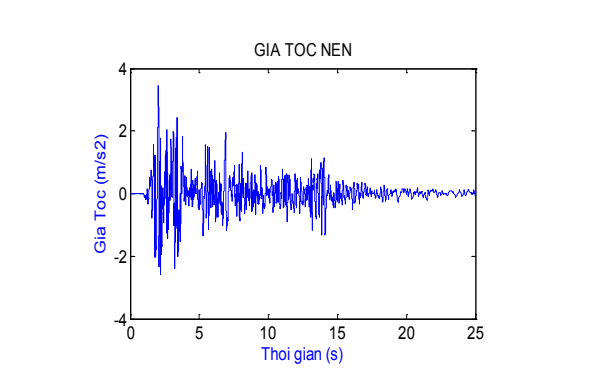
3. KẾT QUẢ SỐ

Khảo sát hai kết cấu 16 tầng và 8 tầng khối lượng mỗi tầng như nhau, độ cứng, chiều cao mỗi tầng là như nhau với giá trị của khối lượng là $m_i = 1.6 \times 10^5$ kg và độ cứng $k_i = 3 \times 10^8$ N/m. Tần số riêng thấp nhất của kết cấu 16 tầng là 0,6558 Hz và của kết cấu 8 tầng là 1,2718 Hz. Gia tốc nền được chọn là Elcentro như trên hình 4 có các tần số xấp xỉ sau khi phân tích

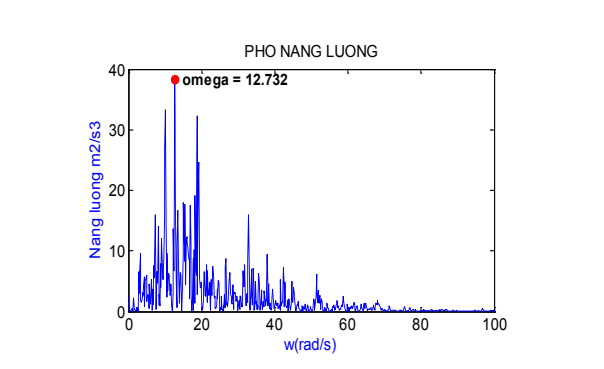
phổ Fourier là 2,027 Hz và các đỉnh khác xấp xỉ 1,8 Hz đến 2,6 Hz như trên Hình 5. Khảo sát số được thực hiện trong 4 trường hợp như sau:

- Kết cấu tách rời - không lắp hệ cản (Uncontrol)
- Kết cấu có lắp hệ cản MRD (MRD)
- Kết cấu có lắp hệ cản MRD kết hợp hệ cản VFD (MRDVFD)

Hình 5. Gia tốc nền Elcentro



Hình 6. Phân tích phổ Elcentro



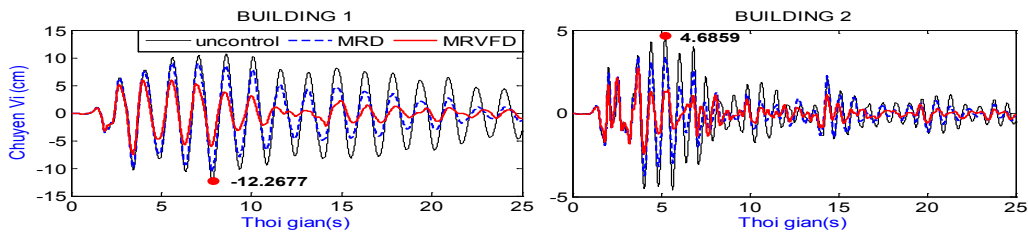
Tỉ số cản đối với các dạng 1, 2 là $\zeta_1 = \zeta_2 = 5\%$, đối với các dạng dao động cao hơn tỉ số cản được tính theo phương pháp Rayleigh (Chopra [1]). Các thông số mô phỏng được lấy như sau. Thông số MR damper (Lê, Nguyễn [4]): $\eta = 195 \text{ s}^{-1}$, $c_{1a} = 8106.2 \text{ kNs/m}$, $c_{1b} = 7807.9 \text{ kNs/m/V}$, $c_{0a} = 50.3 \text{ kNs/m}$, $c_{0b} = 48.7 \text{ kNs/m/V}$, $\alpha_{0a} = 8.7 \text{ kN/m}$, $\alpha_{0b} = 6.4 \text{ kN/m}$, $\gamma = 496 \text{ m}^2$, $\beta = 496 \text{ m}^2$, $A_m = 810.5$, $n=2$, $k_0 = 0.0054 \text{ kN/m}$, $x_0 = 0.18 \text{ m}$, $k_1 = 0.0087 \text{ kN/m}$. Thông số VFD damper: $\alpha = 1$, $C_1 = 7 \times 10^6 \text{ kNs/m}$, $C_2 = 1 \times 10^7 \text{ kNs/m}$.

3.1. Đáp ứng kết cấu

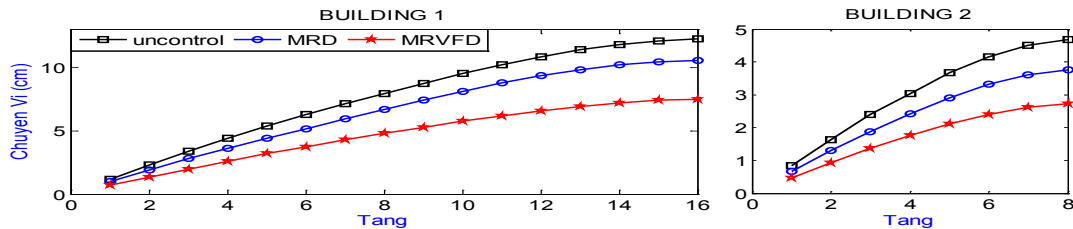
Các giá trị đáp ứng chuyển vị, lực cắt và gia tốc được phân tích rõ dưới dạng biểu đồ cho thấy hiệu quả của việc lắp đặt hệ cản. Kết quả cho thấy: Ứng với trường

hợp MRD hiệu quả giảm lực cắt tốt nhất từ tầng 1 đến tầng 8 cho kết cấu 1 và từ tầng 1 đến tầng 4 cho kết cấu 2, còn tại các tầng đỉnh hiệu quả giảm lực cắt không đáng kể; Ứng với trường hợp MRVFD hiệu quả giảm lực cắt đều trên tất cả các tầng của hai kết cấu và đạt giá trị khoảng 40%. Hình 10-12 đã chỉ ra hiệu quả giảm giá trị đáp ứng gia tốc lớn nhất tương ứng với trường hợp MRVFD, tuy nhiên hiệu quả không đều và khác nhau tùy theo tầng. Từ phân tích trên cho thấy trong trường hợp bố trí một dạng hệ cản MRD cho hiệu quả giảm đáp ứng khá tốt nhưng không đều trên toàn bộ các tầng, do đó kết hợp hai dạng hệ cản tương ứng với trường hợp MRVFD là cần thiết để nâng cao hiệu quả kháng chấn cho các kết cấu liên kề.

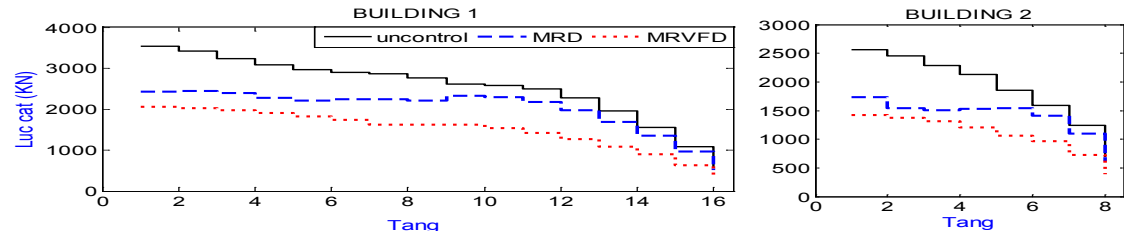
Hình 7. Đáp ứng chuyển vị của kết cấu theo thời gian



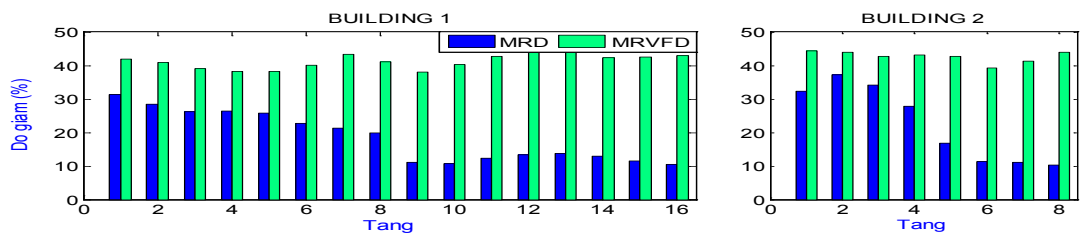
Hình 8. Chuyển vị lớn nhất của kết cấu theo tầng



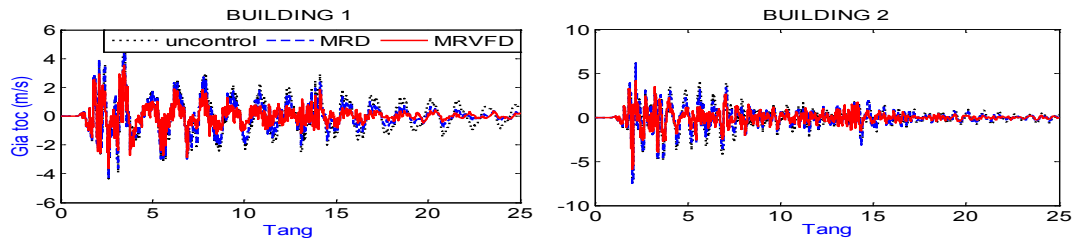
Hình 9. Lực cắt lớn nhất của kết cấu theo tầng



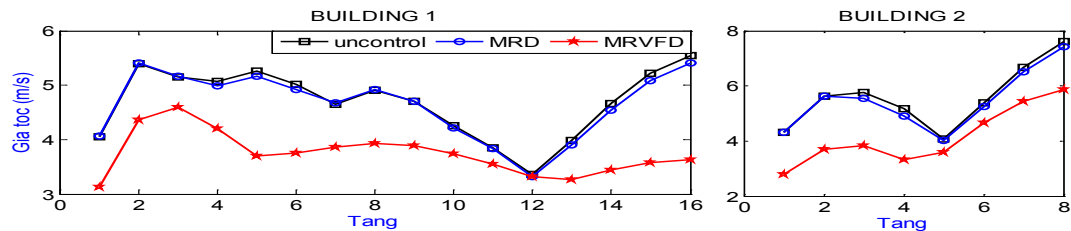
Hình 10. Độ giảm lực cắt của kết cấu



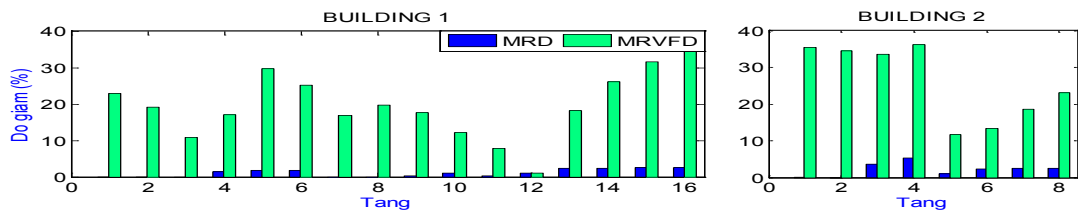
Hình 11. Đáp ứng gia tốc của kết cấu theo thời gian



Hình 12. Gia tốc lớn nhất của kết cấu theo tầng



Hình 13. Độ giảm gia tốc của kết cấu



Bảng 1. Hiệu quả giảm đáp ứng lớn nhất cho kết cấu 1

Trường hợp khảo sát	Chuyển vị		Vận tốc		Gia tốc		Lực cắt	
	Max (cm)	Độ giảm (%)	Max (cm/s)	Độ giảm (%)	Max (m/s ²)	Độ giảm (%)	Max (KN)	Độ giảm (%)
Uncontrolled	12.27	0	54.1	0	5.6	0	3.54E+03	0
MRD	10.67	13.04	45.4	16.08	5.2	7.14	2.43E+03	31.36
MRVFD	7.52	38.71	41.29	23.68	3.63	35.11	2.06E+03	41.77

Bảng 2. Hiệu quả giảm đáp ứng lớn nhất cho kết cấu 2

Trường hợp khảo sát	Chuyển vị		Vận tốc		Gia tốc		Lực cắt	
	Max (cm)	Độ giảm (%)	Max (cm/s)	Độ giảm (%)	Max (m/s2)	Độ giảm (%)	Max (KN)	Độ giảm (%)
Uncontrolled	4.69	0	40.69	0	7.61	0	2.56E+03	0
MRD	3.38	27.93	34.05	16.32	7.2	5.39	1.73E+03	32.42
MRVFD	2.73	41.79	28.06	31.04	5.85	23.13	1.42E+03	44.36

Các giá trị chuyển vị, vận tốc, gia tốc và lực cắt lớn nhất của hai kết cấu tương ứng với hai trường hợp bố trí hệ cản được thể hiện trong Bảng 1 và Bảng 2. Trong trường hợp MRVFD các giá trị đạt được đều cho kết quả giảm đáp ứng tốt hơn và

giá trị gia tốc cho kết quả giảm tốt nhất từ 7.14% tăng lên 35.11% cho kết cấu 1 và từ 5.39% tăng lên 23.13% cho kết cấu 2.

3.2. Năng lượng của kết cấu

Năng lượng của kết cấu được tính như sau:

$$E_K + E_D + E_S + E_F = E_I$$

(14)

Trong đó, E_K năng lượng động học của hệ; E_D là năng lượng tiêu tán do cản của vật liệu; E_S là năng lượng tiêu tán do

biến dạng trong kết cấu; E_F là năng lượng tiêu tán của hệ cản; E_I là năng lượng do động đất sinh ra.

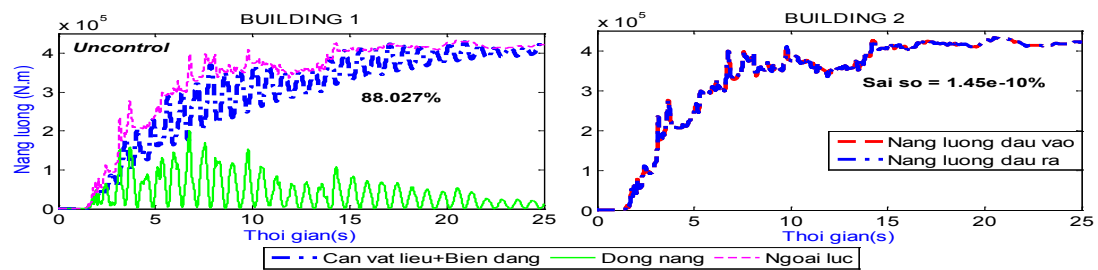
Bảng 3. Tỷ lệ năng lượng

Trường hợp khảo sát	Tỷ lệ năng lượng		
	E_K (%)	$E_S + E_D$ (%)	E_F (%)
Uncontrolled	11.973	88.027	
MRD	6.522	59.918	33.585
MRVFD	2.354	20.757	76.917

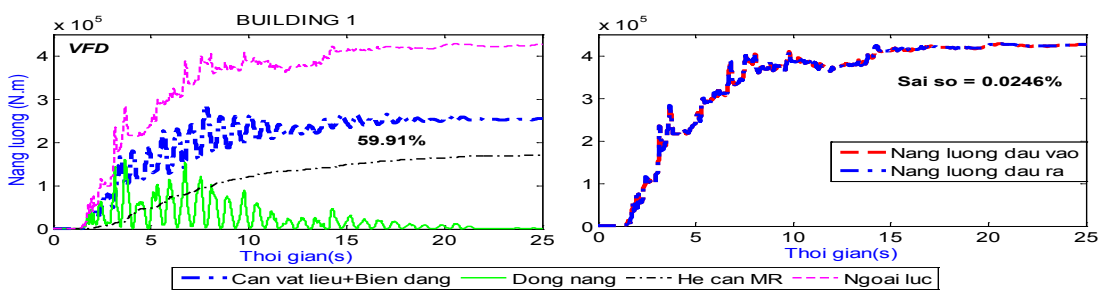
Trong trường hợp kết cấu tách rời không có hệ cản (Uncontrol), Hình 13 cho thấy năng lượng tiêu tán do cản vật liệu và do biến dạng 88.027% điều đó đồng nghĩa với sự tiêu tán năng lượng của hệ là do hư hỏng và phá hoại cục bộ trong kết cấu. Trong trường hợp hai kết cấu liên kết với nhau bằng hệ cản MR, Hình 14 cho thấy lúc này một phần năng lượng tiêu tán do sự làm việc của hệ cản MR, năng lượng tiêu tán do cản vật liệu và do biến dạng giảm xuống 59.91%. Trong trường

hợp hai kết cấu liên kết với nhau bằng hệ cản MR kết hợp với hệ cản VFD bố trí trong từng kết cấu (MRVFD), Hình 15 cho thấy lúc này năng lượng tiêu tán phần lớn do sự làm việc kết hợp của hai hệ cản MRD và VFD, năng lượng tiêu tán do cản vật liệu và do biến dạng giảm xuống còn 20.757%, hay nói cách khác khi kết hợp cả hai hệ cản sẽ cho hiệu quả tiêu tán năng lượng tốt nhất so với hai trường hợp MRD và Uncontrol.

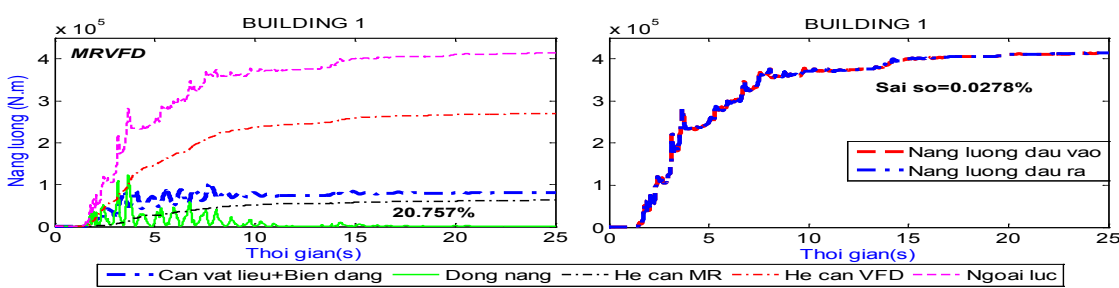
Hình 14. Đáp ứng năng lượng với trường hợp Uncontrol



Hình 15. Đáp ứng năng lượng với trường hợp VFD



Hình 16. Đáp ứng năng lượng với trường hợp MRVFD



4. KẾT LUẬN

Mô hình bài toán hai kết cấu nối với nhau bởi hệ cản MRD kết hợp với hệ cản VFD bố trí trong từng kết cấu chịu gia tốc nền của động đất đã được thiết lập và đánh giá sự hiệu quả giảm chấn của hệ cản. Từ đó cho thấy hiệu quả giảm chấn của việc

kết hợp hai hệ cản MRD và VFD bố trí cho kết cấu liên kề. Từ các kết quả số cho thấy rằng khi bố trí hệ cản có tác dụng tiêu tán năng lượng cũng như giảm chấn khi kết cấu chịu tải trọng động đất. Hiệu quả của sự kết hợp hai hệ cản MRD và VFD là tốt hơn so với chỉ sử dụng một loại hệ cản MR bố trí ngoài kết cấu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Chopra A. K. (2007). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Pearson Prentice Hall.
2. Đỗ Kiến Quốc, Nguyễn Trọng Phước (2010). *Các phương pháp số trong động lực học kết cấu*. Nhà xuất bản Đại Học Quốc Gia TP. HCM.

3. Kim G. C., Kang J. W (2011). Seismic response control of adjunction building by using hybrid control algorithm of MR Damper. *Procedia Engineering* 14, 1013-1020.
4. Lê Thanh Cường, Nguyễn Trọng Phước (2012). Phân tích sự hiệu quả giảm chấn của hệ cản MR nối giữa hai kết cấu. *Tuyển tập công trình khoa học – Hội nghị cơ học toàn quốc lần thứ 9*.
5. M. M. Rodrigo, M.L. Romero (2003). An optimum retrofit strategy for moment resisting frames with nonlinear viscous dampers for seismic applications. *Engineering Structures* 25, 913-925.
6. San-Wan Cho (2004). *Simple control algorithms for MR dampers and smart passive control system*. Doctoral Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
7. Ok S. Y., Song J., Park K. S. (2008). Optimal design of hysteretic dampers connecting adjunction structures using multi-objective genetic algorithm and stochastic linearization method. *Engineering Structures* 30 1240-1249.
8. Spencer J. B., Dyke S. J., Sain M. K., Carlson J. D. (1997). Phenomenological model for magnetorheological dampers. *J Eng Mech ASCE*: 123(3), pp. 230-238.
9. Xu Y. L., He Q., Ko J. M. (1999). Dynamic response of damper-connected adjacent building under earthquake excitation. *Engineering Structures* 21, 135-148.
10. Ying Zhou, Xilin Lu, Dagen Weng, Ruifu Zhang (2012). A Practical design method for reinforced concrete structures with viscous dampers. *Engineering Structures* 39, 187-198.