

PHÂN TÍCH SỰ HIỆU QUẢ GIẢM CHẤN CỦA GỐI TRƯỢT MA SÁT KẾT HỢP HỆ CẢN LƯU BIẾN TỪ NÓI GIỮA HAI KẾT CẤU CHỊU ĐỘNG ĐẤT

Ngày nhận bài: 03/11/2013

Ngày nhận lại: 12/12/2013

Ngày duyệt đăng: 30/12/2013

Phạm Đình Trung¹

Nguyễn Văn Nam²

Nguyễn Trọng Phước³

TÓM TẮT

Bài báo phân tích hiệu quả giảm chấn của gối trượt ma sát (Triple Friction Pendulum, TFP) ở chân cột cùng với hệ cản lưu biến từ (Magneto-Rheological, MR) nối giữa hai kết cấu chịu động đất. Gối trượt TFP được cấu tạo gồm 3 con lắc độc lập, 4 mặt trượt cong, có hệ số ma sát và bán kính khác nhau. Hệ cản MR được mô hình bởi các lò xo và cản nhớt, lực cản sinh ra từ hệ này là một hàm phụ thuộc vào điện áp cung cấp và những thông số của thiết bị. Phương trình chuyển động của hệ gồm có hai kết cấu, hệ cản MR và gối trượt TFP chịu động đất được thiết lập và giải bằng phương pháp Newmark trên toàn miền thời gian. Kết quả số gồm có chuyển vị động, gia tốc và nội lực của kết cấu cho thấy hiệu quả của gối trượt ma sát TFP kết hợp với hệ cản MR nối giữa hai kết cấu.

Từ khóa: Gối trượt ma sát, hệ cản lưu biến từ, gia tốc nền.

ABSTRACT

This paper studies the efficiency of vibration reduction of Triple Friction Pendulum (TFP) at the bottom of column combine with Magneto-Rheological (MR) damper between two structures due to ground motion in earthquake. The MR damper is modelled by springs and viscous dampers, the damping force of MR damper depends on the voltage and other typical parameters. TFP consists of 3 independent pendulums, 4 curved sliding surfaces with various friction coefficients and radii. The equation of motion is derived and solved by Newmark method in the time domain. The numerical results including displacement, acceleration and internal forces show the effectiveness of TFP combine with MR damper in structures.

Keywords: Triple Friction Pendulum, Magneto-Rheological damper, Ground acceleration.

¹ Trường Đại Học Quang Trung

² Trường Đại Học Quang Trung

³ TS, Trường Đại học Bách Khoa Đại học Quốc gia TP.HCM

1. GIỚI THIỆU

Trong bài toán kết cấu công trình xây dựng chịu động đất, việc tìm ra các giải pháp kết cấu mới để chứng ứng xử tốt hơn với động đất làm giảm bớt tổn thất do động đất gây ra cũng là một hướng nghiên cứu được quan tâm nhiều [1-5]. Một trong những hướng nghiên cứu có tính thời sự và cũng có ý nghĩa đó là gắn thêm các thiết bị lên kết cấu để thiết bị này hấp thụ một phần năng lượng do động đất tác động dẫn đến năng lượng tác động vào kết cấu chính sẽ giảm đi và vì vậy kết cấu chính có thể an toàn hơn. Các loại thiết bị tiêu tán năng lượng có thể kể đến như sau: Hệ cô lập móng; Hệ cân điều chỉnh khối lượng TMD (Tuned Mass Dampers); Hệ cân điều chỉnh chất lỏng TLD (Tuned Liquid Dampers); Hệ cân ma sát FD (Fiction Dampers); Hệ cân dèo bằng kim loại MD (Metallic Dampers); Hệ cân đàn nhớt (Viscoelastic Dampers); Hệ cân chất lỏng nhớt (Viscous Fluid Dampers); Hệ cân lưu biến điện ER (Electro - Rheological). Cho đến nay sự hiệu quả cũng đã có ý nghĩa, một số giải pháp đã ứng dụng, một số giải pháp còn đang giai đoạn nghiên cứu.

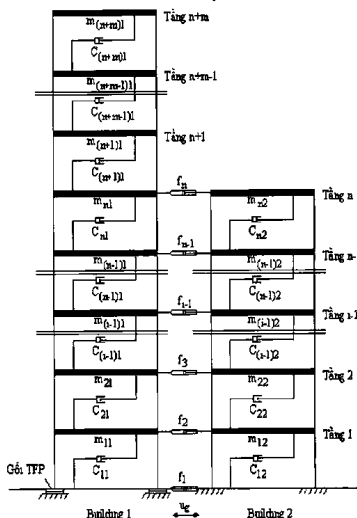
Gần đây, có một số đề cập về hệ cân lưu biến từ (Magneto-Rheological, MR) trong bài toán kết cấu chịu động đất được xem xét ở Việt Nam. Đặc biệt trong tài liệu [3], có giới thiệu tương đối chi tiết về thiết bị cân lưu biến từ là thiết bị tiêu tán năng lượng bán chủ động sử dụng chất lưu có cung cấp nguồn điện hoặc không. Chất này 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 [8-10]. Kết quả cũng cho thấy hệ cân này có hiệu quả nhất định và đang thu hút sự quan tâm nghiên cứu.

Gối cô lập là thiết bị làm giảm đáng kể phản ứng động của kết cấu do động đất. Nghiên cứu về gối này được giới thiệu đầu tiên bởi Victor A. Zayas. Đây là một dạng gối trượt đơn (SFP, Single Friction Pendulum). Tiếp theo, các dạng gối cô lập trượt ma sát tiếp tục được nghiên cứu và cải tiến các đặc trưng kỹ thuật, thích nghi hơn trong thiết kế kháng chấn cho công trình [11-15], đặc biệt đó là khả năng dịch chuyển ngang lớn và thích nghi được nhiều cấp động đất khác nhau.

Từ các đánh giá sơ bộ về gối TFP và hệ cân MR, bài báo đề xuất một mô hình kết cấu dạng khung với sàn tuyệt đối cứng có gắn gối TFP dưới các chân cột kết hợp với hệ cân MR nối giữa hai kết cấu để chịu động đất. Hệ cân MR cũng được bố trí tại vị trí mặt móng đóng vai trò như cản nền nhằm hạn chế chuyển dịch ngang của gối, đồng thời hệ cân MR cũng được bố trí tại các tầng nối giữa hai kết cấu. Gia tốc nền cũng được lựa chọn từ những trận động đất với phổ tần số tương đối gần với tần số riêng của kết cấu. Kết quả số của việc gắn gối trượt TFP kết hợp với hệ cân MR có và không có điện áp cung cấp cũng được khảo sát thông qua chuyển vị và nội lực của hệ.

Hình 1. Mô hình hệ kết cấu



2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Mô hình kết cấu

Xét hai kết cấu nhà có số tầng khác nhau, kết cấu 1 có số tầng là $n+m$ và kết cấu 2 có số tầng là n , được mô hình với số bậc tự do động lực học lần lượt là $m+n$ và n như hình 1. Các tấm sàn được xem là cứng tuyệt đối và chỉ xét thành phần chuyển vị theo phương ngang. Thực ra với số bậc tự do trong mô hình này thì phần nào mô tả được bản chất của hệ kết cấu

khi chịu gia tốc nền động đất (chủ yếu là tải trọng ngang) mà không quá phức tạp về số bậc tự do. Các thông số khác như độ cứng, khối lượng và cân của từng kết cấu cũng được thể hiện chi tiết như trên hình 1. Hệ cân MR được gắn tại vị trí các tầng và gối trượt ma sát được gắn tại vị trí chân cột của tầng trật tương ứng với vị trí mặt ngầm.

Phương trình chuyển động [5,6] của cả hệ kết cấu và thiết bị có dạng như sau:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = D_r f_r + D_m f_m - Mr\ddot{u}_g \quad (1)$$

trong đó M , C , K lần lượt là các ma trận khối lượng, cản, độ cứng của hệ; f_r , f_m là vector lực sinh ra do gối trượt ma sát TFP và hệ cân MR; D_r , D_m là ma trận thể hiện vị trí điểm đặt gối trượt ma sát TFP và MR; r

là vector 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 [3] như sau:

$$M = \begin{bmatrix} [M_1] & [0_1] \\ (n+m, n+m) & (n+m, n) \\ [0_2] & [M_2] \\ (n, n+m) & (n, n+m) \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} [C_1] & [0_1] \\ (n+m, n+m) & (n+m, n) \\ [0_2] & [C_2] \\ (n, n+m) & (n, n+m) \end{bmatrix}; K = \begin{bmatrix} [K_1] & [0_1] \\ (n+m, n+m) & (n+m, n) \\ [0_2] & [K_2] \\ (n, n+m) & (n, n+m) \end{bmatrix} \quad (2)$$

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

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

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

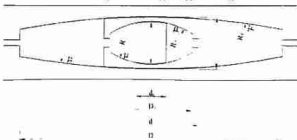
$$C_{1(n+m, n+m)} = \begin{bmatrix} c_{11} + c_{21} & -c_{21} & & & \\ -c_{21} & c_{21} + c_{31} & -c_{31} & & \\ & & \dots & & \\ & & & -c_{n+m-1,1} & c_{n+m-1,1} + c_{n+m,1} & -c_{n+m,1} \\ & & & & -c_{n+m,1} & c_{n+m,1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

và tương tự cho kết cấu thứ 2.

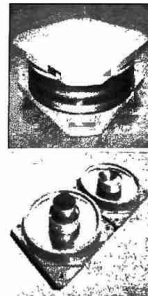
2.2. Mô hình TFP

Gối cô lập trượt ma sát TFP (Triple Friction Pendulum) bao gồm 3 con lắc độc lập. 4 mặt trượt cong có bán kính R_1 và hệ số ma sát μ_1 . Các bán kính và hệ số ma sát này có thể giống hay khác nhau (thông thường: $R_1=R_3 \gg R_2=R_4$; $\mu_2=\mu_3 < \mu_1 < \mu_4$, đây cũng là dạng gối sử dụng trong bài viết này) như trên các hình 2.3.

Hình 2. Mặt cắt ngang của gối TFP



Hình 3. Chi tiết gối TFP



Chu trình chuyển động, quan hệ giữa lực và chuyển vị ngang của gối được mô phỏng và kiểm chứng bằng thực nghiệm [12,14]. Kết quả cho thấy gối TFP có 5 giai đoạn trượt khác nhau như hình 4. Quan hệ giữa chuyển vị ngang của gối với

tỷ lệ lực trượt (F) so với tổng trọng lượng tác dụng lên gối (W) thể hiện trong hình 5. Đồng thời tổng chuyển vị ngang và điều kiện trượt trong các giai đoạn của gối TFP [11,13] được thể hiện trong Bảng 1.

Hình 4. Chu trình trượt của gối



Điều kiện trượt giai đoạn i chỉ xảy ra khi dịch chuyển ngang u_i của gối lớn hơn u_i^* và không được vượt quá giới hạn chuyển vị ngang của gối (U_r), với u_i^* xác định như sau [15]

$$u_2^* = 2R_{eff2}(\mu_1 - \mu_2) \quad (6)$$

$$u_3^* = R_{eff3}(\mu_1 + \mu_4 - 2\mu_3) + R_{eff1}(\mu_4 - \mu_1) \quad (7)$$

$$u_4^* = u_3^* + \left(\frac{u_{r1}}{R_{eff1}} + \mu_2 - \mu_3\right)(R_{eff1} + R_{eff4}) \quad (8)$$

$$u_5^* = u_4^* + \left(\frac{u_{r4}}{R_{eff4}} + \mu_4 - \frac{u_{r1}}{R_{eff1}} - \mu_1\right)(R_{eff1} + R_{eff4}) \quad (9)$$

Tổng chuyển vị ngang của gối TFP (U_r) được thiết lập từ chuyển vị ngang giới hạn của từng mặt cong (u_{ri}), xác định bởi [15]

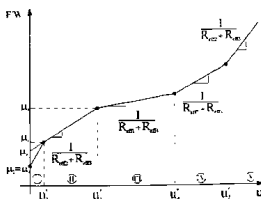
$$u_{r1} = u_{r4} = \frac{R_{eff1}}{R_1} \left(\frac{D_2 - d_2}{2} \right), \quad u_{r2} = u_{r3} = \frac{R_{eff2}}{R_2} \left(\frac{D_1 - d_1}{2} \right) \quad (10)$$

$$U_r = \sum u_{ri} \quad (11)$$

trong đó R_{eff} là bán kính hiệu dụng được xác định bởi

$$R_{eff1} = R_{eff4} = R_1 - \frac{h_2}{2}, \quad R_{eff2} = R_{eff3} = R_2 - \frac{h_1}{2} \quad (12)$$

Hình 5. Quan hệ giữa lực và chuyển vị của gối

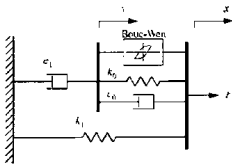


Bảng 1. Mô tả các giai đoạn trượt của gối

Giai đoạn	Mô tả chuyển động	Độ cứng (K_e)	Hệ số ma sát tương đương (μ_e)
 I	Trượt chỉ xảy ra trên mặt 2 và 3; Mặt 1 và 4 dừng.	$K_{tr} = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}}$	$\mu_{eI} = \mu_2 = \mu_3$
 II	Trượt chỉ xảy ra trên mặt 1 và 3; Mặt 2 và 4 dừng.	$K_{bII} = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff3}}$	$\mu_{eII} = \frac{\mu_1 R_{eff1} + \mu_3 R_{eff3}}{R_{eff1} + R_{eff3}}$
 III	Trượt chỉ xảy ra trên mặt 1 và 4; Mặt 2 và 3 dừng.	$K_{bIII} = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff4}}$	$\mu_{eIII} = \frac{\mu_1 R_{eff1} + \mu_4 R_{eff4}}{R_{eff1} + R_{eff4}}$
 IV	Trượt chỉ xảy ra trên mặt 2 và 4; Mặt 1 và 3 dừng.	$K_{bIV} = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff4}}$	$\mu_{eIV} = \frac{\mu_2 R_{eff2} + \mu_4 R_{eff4}}{R_{eff2} + R_{eff4}}$
 V	Trượt chỉ xảy ra trên mặt 2 và 3; Mặt 1 và 4 dừng.	$K_{bV} = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}}$	$\mu_{eV} = \mu_2 = \mu_3$

2.3. Mô hình cân MR

Mô hình động lực học của cân MR [9] được đề xuất để phân tích động lực học như hình 6.

Hình 6. Mô hình cân lưu biến từ

$$c_1 \dot{y} = \alpha z + k_0 (x - y) + c_0 (\dot{x} - \dot{y}) \quad (13)$$

trong đó biến z được xác định bởi

$$\ddot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| z |z|^{n-1} - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A_m (\dot{x} - \dot{y}) \quad (14)$$

Từ (13), có thể biến đổi thành

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} \{ \alpha z + c_0 \dot{x} + k_0 (x - y) \} \quad (15)$$

Tổng lực trong MR được xác định bằng tổng của phần trên và dưới, thể hiện như sau

Trong mô hình này, độ cứng của bộ phận khí nén (accumulator) được đặc trưng bởi k_1 ; hệ số cản nhớt ứng với vận tốc lớn được đặc trưng bởi c_0 ; hệ số cản của bộ phận giảm chấn ứng với vận tốc nhỏ được đặt trưng bởi hệ số c_1 ; x_0 là chuyển vị ban đầu của lò xo k_1 ; k_0 là độ cứng của bộ phận giảm chấn ứng với vận tốc nhỏ; các thông số (c_{0a} c_{0b} k_0 C_{1a} C_{1b} k_1 x_0 u_{0a} u_{0b} β γ n η và A_m) được xác định từ thực nghiệm.

Lực sinh ra trên bề mặt của hai thanh cứng là như nhau và xác định bởi [9]

$$f_m = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) \quad (16)$$

Hay

$$f_m = c_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (17)$$

trong đó các hệ số c_0 , c_1 và α là các thông số phụ thuộc vào điện áp cung cấp được xác định như sau

$$\begin{aligned} c_0 &= c_{0a}(u) = c_{0a} + c_{0b}U \\ c_1 &= c_1(u) = c_{1a} + c_{1b}U \\ \alpha &= \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b U \end{aligned} \quad (18)$$

với U là điện áp đưa vào thiết bị, được tính thông qua bộ lọc bậc một phụ thuộc vào điện áp hiện có, xác định bởi biểu thức sau

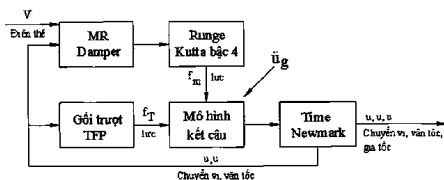
$$\dot{U} = \eta(U - v) \quad (19)$$

2.4. Phương pháp giải và thuật toán

Phương trình chuyển động của cả hệ bao gồm kết cấu, gối trượt ma sát TFP và hệ cản MR sau khi được thiết lập và giải bằng phương pháp Newmark trong từng bước thời gian. Lực cản do MR gây ra trong từng bước thời gian là phương trình vi phân bậc nhất, sử dụng phương pháp Runge Kutta bậc 4 để mô tả và phân

tích trong từng bước thời gian. Sơ đồ khối được thể hiện như hình 7. Một chương trình máy tính cũng được viết dựa trên ngôn ngữ lập trình MATLAB để phân tích ứng xử động của khung phẳng chịu động đất. Do trong mỗi bước thời gian đều phải mô tả đáp ứng của hệ MR nên khối lượng tính toán rất lớn và tiêu tốn khá nhiều thời gian của máy tính.

Hình 7. Sơ đồ khối phân tích hệ



3. KẾT QUẢ SỐ

Khảo sát hai kết cấu 16 tầng và 8 tầng khối lượng mỗi tầng là như nhau, độ cứng, chiều cao mỗi tầng là như nhau với giá trị khối lượng là $m_1 = 1.6 \times 10^5$ kg và độ cứng $k = 3 \times 10^8$ N/m. Tần số riêng thấp nhất của kết cấu tầng 16 là 0,6558 Hz và kết cấu tầng 8 là 1,2718 Hz [3]. Gia tốc nền được chọn là gia tốc Elcentro có tần số xấp

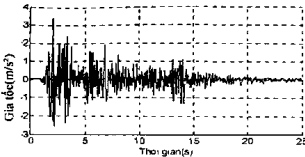
xi khi phân tích phổ Fourier là 2,026 Hz và có các đỉnh khác xấp xỉ từ 1.8 Hz đến 2.6 Hz như hình 8.9. Tỷ số cản đối với các dạng dao động 1,2 là $\xi = 5\%$, đối với các dạng dao động cao hơn, tỷ số cản được tính theo phương pháp Rayleigh [6].

Thông số của MR [10] được lấy như sau: $c_{0a} = 50.3$ kNs/m; $c_{0b} = 48.7$ kNs/m; $k_0 = 0.0054$ kN/m; $c_{1a} = 8106.2$ kNs/m;

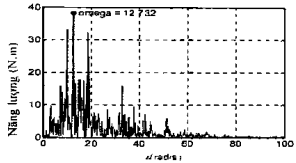
$C_{1b} = 7807.9 \text{ kNs/m/V}$; $k_1 = 0.0087 \text{ kN/m}$; $x_0 = 0.18\text{m}$; $\alpha_{0a} = 8.7 \text{ kN/m}$; $\alpha_{0b} = 6.4 \text{ kN/m}$; $\gamma = 496 \text{ m}^2$; $\beta = 496 \text{ m}^2$; $n = 2$; $\eta = 195 \text{ s}^{-1}$; $A_m = 810.5$

Thông số gối TFP [15] được lấy như sau: $R_1=R_4=474\text{mm}$; $R_2=R_3=76\text{mm}$; $\mu_1=\mu_3=0.01$; $\mu_2=0.04$; $\mu_4=0.08$; $d_1=51\text{mm}$; $D_1=89\text{mm}$; $d_2=102\text{mm}$; $D_2=229\text{mm}$; $h_1=46\text{mm}$; $h_2=71\text{mm}$.

Hình 8. Gia tốc nền Elcentro



Hình 9. Phổ gia tốc nền Elcentro



Kết quả số được thực hiện để khảo sát tác động của gối trượt ma sát TFP kết hợp với hệ cân MR nối giữa hai kết cấu trong các trường hợp.

Kết cấu tách rời, không lắp TFP-MR (Uncontrolled)

Kết cấu có lắp TFP-MR có điện áp cung cấp $V_{\max}=6\text{v}$ (Double-on)

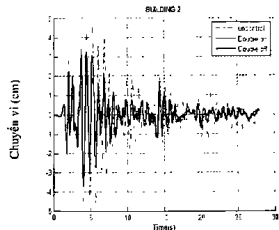
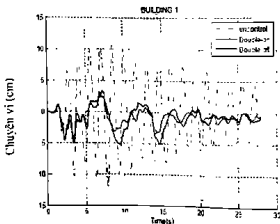
Kết cấu có lắp TFP-MR có điện áp cung cấp $V_{\max}=0\text{v}$ (Double-off)

Kết quả được trình bày như sau. Hình 10 trình bày chuyển vị của tầng trên cùng của mỗi kết cấu trong các trường hợp phân tích. Hình 11 trình bày giá trị chuyển vị lớn nhất của các tầng. Hình 12 trình bày gia tốc của tầng trên cùng của mỗi kết cấu trong các trường hợp. Hình 13 trình bày giá trị gia tốc lớn nhất của các tầng của mỗi kết cấu trong các trường hợp. Hình 14

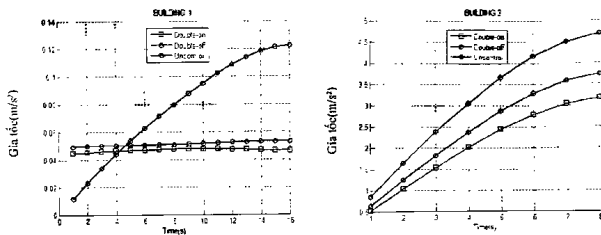
trình bày giá trị lực cắt trong tầng 1 trong các trường hợp phân tích. Hình 15 trình bày ứng xử của MR trong các trường hợp phân tích. Bài viết cũng phân tích trường hợp đặt gối TFP không kết hợp với hệ cân MR, cũng như ảnh hưởng của số lượng MR đặt trong hệ như hình 16, 17 và 18.

Các kết quả phản ứng động cho thấy rằng hệ cân MR khi kết hợp với gối trượt TFP có hiệu quả khi gắn trong hệ. Cụ thể, nhất là đối với công trình 1 thì hiệu quả giảm chấn rất lớn, giá trị phản ứng động giảm đi khoảng 60% khi dùng gối TFP kết hợp với hệ cân MR khi có điện áp cung cấp và khi không có điện áp cung cấp. Đối với công trình 2 thì hiệu quả giảm chấn tương đối lớn, giá trị phản ứng động giảm đi khoảng 30% khi có điện áp và khoảng 20% khi không có điện áp.

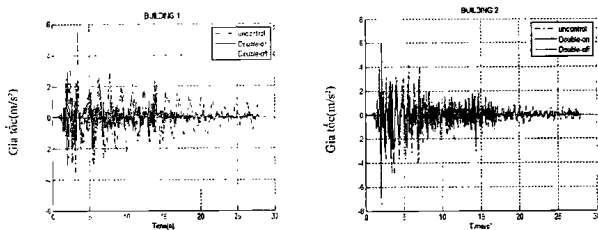
Hình 10. Chuyển vị tầng trên cùng theo thời gian của kết cấu 1 (a) và kết cấu 2 (b)



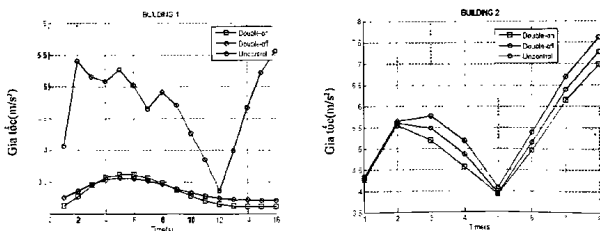
Hình 11. Chuyển vị lớn nhất của các tầng của kết cấu 1 (a) và kết cấu 2 (b)



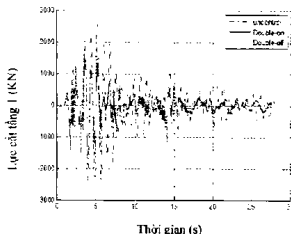
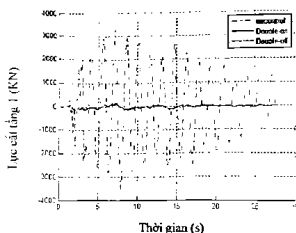
Hình 12. Gia tốc của tầng trên cùng theo thời gian của kết cấu 1 (a) và kết cấu 2 (b)



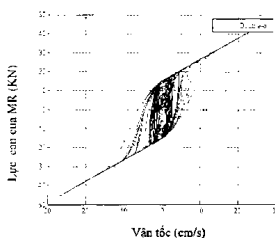
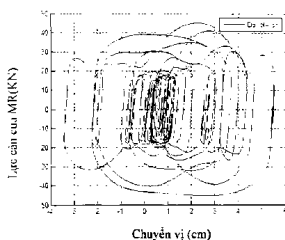
Hình 13. Gia tốc lớn nhất của các tầng của kết cấu 1 (a) và kết cấu 2 (b)



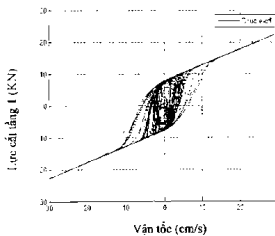
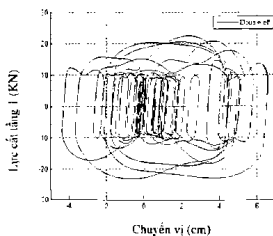
Hình 14. Lực cắt tầng một theo thời gian của kết cấu 1 (a) và kết cấu 2 (b)



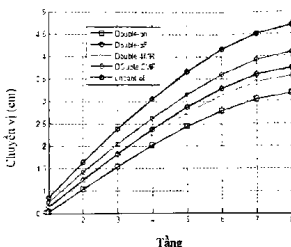
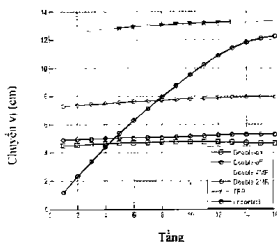
Hình 15. Ứng xử của MR trong trường hợp điện áp cung cấp $V_{max}=6V$



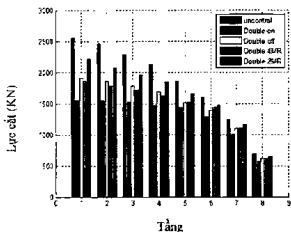
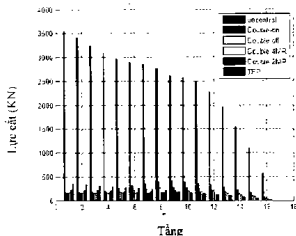
Hình 16. Ứng xử của MR trong trường hợp điện áp cung cấp $V_{max}=0$



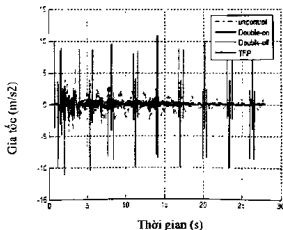
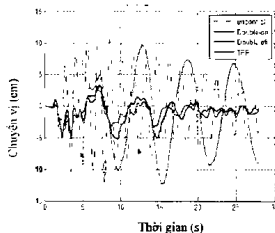
Hình 17. Chuyển vị lớn nhất các tầng trong các trường hợp của kết cấu 1 (a) và kết cấu 2 (b)



Hình 18. Lực cắt lớn nhất trong các trường hợp của kết cấu 1 (a) và kết cấu 2 (b)



Hình 19. Chuyển vị (a) và gia tốc (b) theo thời gian của gối TFP và tầng đỉnh của kết cấu 1



Từ kết quả của hình 9 đến hình 14 cho thấy rằng, khi đặt gối TFP trong kết cấu 1, thì chuyển dịch của gối là rất lớn, làm tăng chuyển vị của các tầng lên nhưng chuyển vị tương đối giữa các tầng là giảm đáng kể, làm giảm đáng kể lực cắt trong các tầng. Khi kết hợp gối TFP và hệ cân

MR thì rõ ràng hiệu quả giảm chấn là rõ rệt trong cả kết cấu 1 và kết cấu 2 trong trường hợp có điện áp và không có điện áp cung cấp, đặc biệt khi có điện áp thì hiệu quả giảm chấn có thể lên đến 60% so với trường hợp không có gắn thiết bị.

Từ kết quả hình 15 và 16 cho thấy rằng, ứng xử của MR là phụ thuộc vào điện áp cung cấp, lực sinh ra trong hệ cân ứng với trường hợp có điện áp là lớn hơn so với trường hợp không có điện áp trong thiết bị. Từ kết quả hình 17 và 18 cũng cho thấy rằng, ứng xử động của hệ kết cấu bị ảnh hưởng bởi số lượng hệ cân MR, ứng với số lượng hệ cân MR khác nhau thì hiệu quả giảm chấn cũng khác nhau và tăng theo số

lượng của hệ cân MR. Hình 19 trình bày ứng xử của gối TFP, cho thấy rằng chuyển dịch và gia tốc của gối TFP là tương đối lớn so với các tầng. Các kết quả số mô tả phản ứng động của hệ kết cấu đều cho thấy rằng gối trượt ma sát TFP kết hợp với hệ cân MR nối giữa hai kết cấu có hiệu quả đáng kể khi lắp trong hệ kết cấu chịu động đất, thể hiện trong bảng 2 và 3.

Bảng 2. Thống kê các giá trị lớn nhất và độ giảm đáp ứng trong kết cấu 1

Trường hợp khảo sát	Chuyển vị phương ngang		Vận tốc phương ngang		Gia tốc phương ngang		Lực cắt	
	Max (cm)	Độ giảm (%)	Max (cm/s)	Độ giảm (%)	Max (m/s ²)	Độ giảm (%)	Max (KN)	Độ giảm (%)
Uncontrol	12,27		54,09		5,55		$3,54.10^3$	
Double-on	4,65	62,12	20,47	62,16	3,11	44,00	$0,17.10^2$	95,14
Double-off	5,30	56,80	18,97	64,93	3,21	42,19	$0,15.10^2$	95,69
Double-5MR	5,81	52,65	18,71	65,41	3,25	41,45	$0,17.10^2$	95,14
Double-3MR	7,98	34,92	19,10	64,69	3,29	40,77	$0,23.10^2$	93,55
Single-TFP	13,31	-8,48	24,57	54,58	3,32	40,19	$0,36.10^2$	89,82
[3]	9,40	23,40	45,35	16,16	5,18	6,61	$2,43.10^3$	31,40

Bảng 3. Thống kê các giá trị lớn nhất và độ giảm đáp ứng trong kết cấu 2

Trường hợp khảo sát	Chuyển vị phương ngang		Vận tốc phương ngang		Gia tốc phương ngang		Lực cắt	
	Max (cm)	Độ giảm (%)	Max (cm/s)	Độ giảm (%)	Max (m/s ²)	Độ giảm (%)	Max (KN)	Độ giảm (%)
Uncontrol	4,69		40,69		7,61		$2,56.10^3$	
Double-on	3,17	32,44	31,77	21,94	6,97	8,42	$1,56.10^3$	39,23
Double-off	3,73	20,38	33,97	16,54	7,27	4,46	$1,90.10^3$	25,66
Double-5MR	3,56	23,96	33,17	19,49	7,23	4,90	$1,86.10^3$	27,50
Double-3MR	4,08	12,88	35,14	13,66	7,45	2,07	$2,22.10^3$	13,48
[3]	3,38	27,80	31,90	41,02	7,20	5,31	$1,73.10^3$	32,32

4. KẾT LUẬN

- Mô hình hệ kết cấu có gắn gối trượt ma sát TFP kết hợp với hệ cản MR nối giữa hai kết cấu khi chịu gia tốc nền động đất được đề xuất và thiết lập chi tiết phương trình chuyển động, thuật toán giải, chương trình máy tính phân tích động lực học khi hệ chịu động đất cũng được viết.

- Khi đặt gối trượt ma sát TFP thì làm tăng chuyển vị tuyệt đối của hệ do chuyển vị ở gối là lớn nhưng chuyển vị tương đối

giữa các tầng giảm đáng kể nên giảm nội lực của hệ.

- Khi đặt gối TFP kết hợp với hệ cản MR nối giữa hai kết cấu thì hiệu quả lớn hơn nữa trong cả trường hợp có điện áp và không có điện áp cung cấp. Sự hiệu quả này là đáng kể, đối với kết cấu 1 có thể làm giảm phản ứng động lên đến 60% và trong kết cấu 2 có thể làm giảm phản ứng động lên đến 30% so với trường hợp không có thiết bị này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Bharti S.D., Dumne S.M., Shrimali M.K. (2010), Seismic response analysis of adjacent buildings connected with MR dampers, Engineering Structures 32, pp. 2122-2133.
2. Xu Y. L., He Q., Ko J. M. (1999), Dynamic response of damper-connected adjacent building under earthquake excitation, Engineering Structures 21, pp. 135-148.
3. Lê Thanh Cường (2013), Phân tích sự hiệu quả giảm chấn của hệ cản MR nối giữa hai kết cấu. Luận văn Thạc sĩ, Trường Đại học Bách khoa TP.HCM.
4. Phạm Đình Trung, Nguyễn Trọng phước (2013), Hiệu quả giảm chấn của hệ cản lưu biến từ kết hợp với gối trượt ma sát trong kết cấu chịu động đất, ISBN: 978-604-82-0022-0, pp. 775-782.
5. Phạm Đình Trung, Nguyễn Trọng phước (2013), Hiệu quả giảm chấn của hệ cản lưu biến trong khung phẳng chịu động đất, ISBN: 978-604-82-0022-0, pp. 783-788.
6. Chopra A. K. (2001), Dynamics of Structures, 2nd editions, Prentice-Hall.
7. Đỗ Kiến Quốc, Lương Văn Hải (2010), Động lực học kết cấu, NXB ĐHQG HCM.
8. San-Wan Cho (2004), Simple control algorithms for MR dampers and smart passive control system, Doctoral Thesis, KAIST.
9. Spencer J. B., Dyke S. J., Sain M. K., Carlson J. D. (1996), Phenomenological model for magnetorheological dampers. J Eng Mech ASCE: 123(3), pp. 230-238.
10. Yang G, Spencer J. B., Carlson J. D., Sain MK (2002), Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations, Eng Struct. 24, pp. 309-323.
11. Fenz, D.M. and Constantinou, M.C (2008), Modeling Triple Friction Pendulum Bearings for Response-History Analysis, Earthquake Engineering Research Institute, pp 1011-1027.
12. Fenz D.M. (2006), Constantinou M.C. Behaviour of the double concave Friction Pendulum bearing. Earthquake Eng. and Structural Dynamics. 35, pp. 1403-1424.
13. Troy A. Morgan, Stephen A. Mahin (2008), The Optimization of Multi-Stage

Friction Pendulum Isolators for loss mitigation considering a range of Seismic Hazard, The 14th World Conference on Earthquake Engineering.

14. Nitish T., Paul D. K. (2012), Seismic response of friction pendulum isolated medium rise multistory buildings, ISSN: 0975-5462, 4(6).
15. Nguyễn Văn Nam, Hoàng Phương Hoa, Phạm Duy Hòa (2012). Hiệu quả giảm chấn của thiết bị gối cô lập trượt ma sát TFP so với gối SFP, Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ IX, Hà Nội, 8-9/12/2012.