

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN CHO NHÀ CAO TẦNG DƯỚI TÁC DỤNG CỦA ĐỘNG ĐẤT

DESIGN CONTROLLER FOR HIGH-RISE BUILDING UNDER EARTHQUAKE EXCITATION

Nhữ Quý Thơ*,
Nguyễn Xuân Thuận, Phạm Tiến Hùng

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu về dao động của tòa nhà cao tầng dưới tác động của động đất. Trong mục tiêu giảm rung động cho tòa nhà, một hệ thống giảm rung được thiết kế dựa trên bộ điều khiển thụ động Tuned Mass Damper (TMD) kết hợp với một thiết bị giảm chấn chủ động. Bộ điều khiển cho thiết bị giảm chấn chủ động được thiết kế dựa trên bộ điều khiển tối ưu tuyến tính dạng toàn phương (LQR). Dưới tác động của động đất, những tòa nhà cao tầng sẽ có những rung động rất lớn, đặc biệt tại các tầng trên cao. Vị trí của bộ giảm chấn chủ động cũng được đề xuất đặt tại các tầng khác nhau nhằm nghiên cứu ảnh hưởng của vị trí đó với hiệu quả giảm dao động của tòa nhà. Để khảo sát hiệu quả của bộ giảm chấn đề xuất, bài báo phân tích dao động của tòa nhà cao tầng dưới những trường hợp động đất khác nhau. Kết quả mô phỏng đã cho thấy hiệu quả của bộ giảm chấn đề xuất trong việc giảm dao động cho tòa nhà.

Từ khóa: Tòa nhà; dao động; động đất; điều khiển; bộ hấp thụ dao động thụ động TMD.

ABSTRACT

The paper investigated the vibration of a high-rise building under earthquake excitation. A system which is combined an active device and Tuned Mass Damper device (TMD), is designed to reduce the vibration of the building. The control law of active device is proposed based on Linear-quadratic regulator method (LQR). During the earthquakes excitation, the high-rise building will vibrate with high amplitudes, especially in the top of building. The location of the active device is also considered to analyze the performance of the proposed system in the vibration reduction of the building. In order to examine the effectiveness of the system, the study analyzes the vibration of the high-rise building under different earthquake cases. The numerical simulation results show the good performance of the proposed system to restrain the vibration of the building.

Keywords: Building; Vibration; Earthquake; Control; Tuned Mass Damper TMD.

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: nhuquytho@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 02/01/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/6/2020

Ngày chấp nhận đăng: 21/10/2020

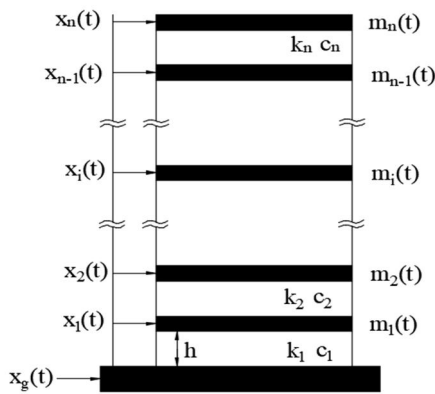
1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, tốc độ đô thị hóa trong những năm gần đây đang tăng rất nhanh trên toàn thế giới, điều này dẫn đến số

lượng các tòa nhà cao tầng tại các đô thị cũng tăng lên. Đối với các tòa nhà cao tầng, khi có tác động của ngoại lực như gió, động đất, sẽ xuất hiện hiện tượng rung động, đặc biệt ở các tầng trên cao. Sự rung động này có thể gây ra những thiệt hại cho người cũng như chính những tòa nhà đó. Gần đây, trên thế giới đã xảy ra các trận động đất có biên độ rất lớn như ở thủ đô Mexica City (1985), Kobe (1995), Tứ Xuyên (2008), Chile (2008), những trận động đất này đã gây ra những thiệt hại nghiêm trọng cho các công trình xây dựng trong đó phải kể đến những hư hại của các tòa nhà cao tầng. Ở bất kỳ đâu trên thế giới, khi thiết kế, xây dựng những tòa nhà cao tầng, một trong những việc quan trọng đầu tiên phải làm đó là nghiên cứu xem tòa nhà đó có thể chịu được những dao động ở cường độ nào cho phép. Từ đó, bài toán đặt ra là làm cách nào để giảm dao động của tòa nhà cao tầng dưới những tác động bất ngờ của ngoại lực có thể xảy ra như gió, động đất. Có một số phương pháp, bài báo đã đề cập tới vấn đề này. Lekshmi Suresh và các đồng tác giả (2019) đã chứng minh hiệu quả giảm dao động của hệ thống tòa nhà sử dụng nhiều bộ TMD (MTMD) so với việc sử dụng một bộ TMD đơn lẻ [1]. Luciana Silva Vellar và các đồng tác giả (2019) đã giới thiệu một phương pháp tối ưu thông số cho bộ đa TMD (MTMD) dựa trên nghiên cứu trên mô hình tòa nhà 10 tầng [2]. Cimellaro và các đồng tác giả (2009) sử dụng lý thuyết điều khiển tối ưu LQR để thiết kế bộ điều khiển kiểm soát rung động cho kết cấu kiến trúc cứng và đàn hồi [3, 4].

Từ những nghiên cứu trước đây, đến nay, chưa có bất kỳ một nghiên cứu nào sử dụng bộ giảm chấn thụ động TMD kết hợp với một bộ điều khiển chủ động được thiết kế dựa trên bộ điều khiển tối ưu tuyến tính dạng toàn phương (LQR). Bài báo sẽ đề xuất một mô hình giảm dao động cho tòa nhà cao tầng dưới tác động của động đất bằng việc sử dụng kết hợp giữa bộ giảm chấn TMD kết hợp với bộ điều khiển chủ động sử dụng luật điều khiển LQR. Vị trí của bộ điều khiển chủ động được khảo sát tại 3 vị trí: ở tầng thấp nhất, ở tầng giữa và ở tầng cao nhất của tòa nhà. Để xem xét sự hiệu quả của phương pháp đề xuất, 3 trường hợp động đất khác nhau được sử dụng làm đầu vào cho tòa nhà cao tầng. Kết quả mô phỏng chỉ ra, việc sử dụng mô hình đề xuất đã có những hiệu quả nhất định trong việc giảm dao động của mô hình nhà cao tầng.

2. MÔ HÌNH TÒA NHÀ



Hình 1. Mô hình tòa nhà

Trong nghiên cứu này, mô hình tòa nhà cao tầng bao gồm n tầng (hình 1). Mô hình được xây dựng với giả định rằng chỉ có các rung động ngang, bỏ qua các rung động theo phương thẳng đứng. Mô hình tòa nhà là mô hình tuyến tính với phương trình vi phân chuyển động dạng ma trận như sau:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\{1\}\ddot{x}_g(t) \tag{1}$$

Trong đó:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & m_i & \\ & & & \ddots \\ 0 & & & & m_n \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & & \\ -c_2 & c_1 + c_2 & -c_3 & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & -c_i & c_i + c_{i+1} & -c_{i+1} \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & -c_{n-1} & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ & & & & & & -c_n & c_n \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & & \\ -k_2 & k_1 + k_2 & -k_3 & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & -k_i & k_i + k_{i+1} & -k_{i+1} \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ & & & & & & -k_n & k_n \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$x(t) = [x_1(t) \ \dots \ x_i(t) \ \dots \ x_n(t)] \tag{5}$$

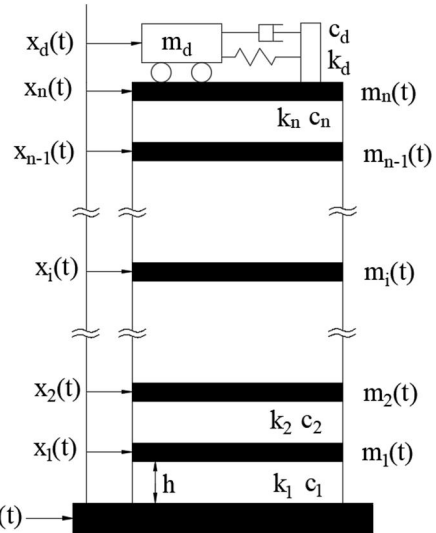
$$\{1\} = [1 \ \dots \ 1]^T \tag{6}$$

Các ma trận M, C, K lần lượt là các ma trận khối lượng, ma trận cản và ma trận độ cứng. x(t) x_g(t) là véc tơ chuyển vị tương đối của tòa nhà so với mặt đất và x_g(t) là chuyển vị tuyệt đối của mặt đất. Tòa nhà có khối lượng mỗi tầng là

m_i, độ cứng k_i, hệ số cản c_i và chuyển vị tương đối so với mặt đất của tầng thứ i là x_i. Bộ TMD có các thông số lần lượt là chuyển vị tương đối x_d(t) khối lượng m_d, hệ số cản c_c và độ cứng k_d.

3. MÔ HÌNH TÒA NHÀ KẾT HỢP VỚI BỘ TMD

Bộ TMD hay còn gọi là bộ hấp thụ dao động thụ động được lắp đặt ở tầng trên cùng của tòa nhà như hình 2 có thể mô tả như là một khối lượng m_d được gắn vào tòa nhà thông qua lò xo có độ cứng k_d và giảm chấn có hệ số c_d. Mục đích của việc sử dụng bộ hấp thụ dao động thụ động là để hấp thụ một phần năng lượng của tòa nhà khi xảy ra động đất hoặc gió mạnh giúp giảm dao động của tòa nhà. Hình 2 là hình minh họa tòa nhà có lắp thêm bộ TMD.



Hình 2. Mô hình tòa nhà cao tầng kết hợp với bộ TMD

Phương trình vi phân chuyển động của tòa nhà kết hợp với bộ TMD cũng chính là phương trình (1) tuy nhiên các ma trận hệ số M, C, K và véc tơ chuyển vị x(t) có sự thay đổi như sau:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & & & & & 0 \\ & \ddots & & & & \\ & & m_i & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & m_n & \\ 0 & & & & & & m_d \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & & & & 0 \\ -c_2 & c_1 + c_2 & -c_3 & & & & & \\ & & \ddots & & & & & \\ & & & -c_i & c_i + c_{i+1} & -c_{i+1} & & \\ & & & & \ddots & & & \\ & & & & & -c_{n-1} & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ & & & & & & -c_n & c_n \\ 0 & & & & & & & & -c_d & c_d \end{bmatrix} \tag{8}$$

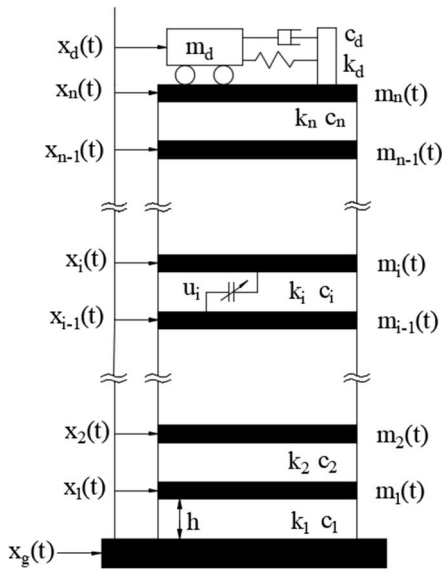
$$K = \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & & & & & & & & & & & & & & & & & & & 0 \\ -k_2 & k_1+k_2 & -k_3 & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & & & & & & & & & & & & & \\ & & & -k_i & k_i+k_{i+1} & -k_{i+1} & & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & \ddots & \ddots & \ddots & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & -k_{n-1} & k_{n-1}+k_n & -k_n & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & -k_n & k_n+k_d & -k_d & & & & & & & & & & \\ 0 & & & & & & & & & & -k_d & & & & & & & & & \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$x(t) = [x_1(t) \ \dots \ x_i(t) \ \dots \ x_n(t) \ x_d(t)] \quad (10)$$

4. MÔ HÌNH TÒA NHÀ KẾT HỢP VỚI BỘ TMD VÀ BỘ ĐIỀU KHIỂN CHỦ ĐỘNG

4.1. Mô hình đề xuất

Đề xuất một bộ điều khiển chủ động kết hợp với TMD, mô hình của hệ thống được diễn tả như hình 3.



Hình 3. Mô hình tòa nhà kết hợp với bộ TMD và bộ điều khiển chủ động

Phương trình vi phân chuyển động của hệ được đưa ra như sau:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\{1\}\ddot{x}_g(t) + fu(t) \quad (11)$$

Trong đó:

$$f = \begin{bmatrix} 1 & -1 & & 0 \\ & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & -1 \\ 0 & & & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$u(t) = [0 \ \dots \ u_i(t) \ \dots \ 0]^T \quad (13)$$

Bộ điều khiển chủ động ở đây sẽ được lắp giữa các tầng với nhau để điều khiển lực. Khi lực điều khiển u_i được áp dụng cho tầng thứ i thì lực điều khiển cho tầng thứ $i-1$ có cùng độ lớn nhưng theo hướng ngược lại. Do đó, ma trận hệ số f của lực điều khiển và véc tơ lực điều khiển sẽ có dạng như phương trình trên.

4.2. Thiết kế bộ điều khiển

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng luật điều khiển dựa trên phương pháp LQR.

Phương trình (11) có thể viết lại theo dạng phương trình không gian trạng thái.

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) + G\ddot{x}_g(t) \quad (14)$$

$$X(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$A = \begin{bmatrix} O_{(n+1) \times (n+1)} & I_{(n+1) \times (n+1)} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$B = \begin{bmatrix} O_{(n+1) \times (n+1)} \\ M^{-1}f \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$G = \begin{bmatrix} O_{(n+1) \times (n+1)} \\ -I_{(n+1) \times (n+1)} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Trong bài báo này, I là ma trận đơn vị và O là ma trận số 0.

Gia tốc tuyệt đối của tòa nhà có thể được tính như sau:

$$y_a(t) = \ddot{x}(t) + \{1\}\ddot{x}_g(t) \quad (19)$$

$$y_a(t) = [-M^{-1}K \quad -M^{-1}C]X(t) + M^{-1}fu(t)$$

$$y_a(t) = C_{ss}X(t) + D_{ss}u(t)$$

$$C_{ss} = [-M^{-1}K \quad -M^{-1}C] \quad (20)$$

$$D_{ss} = M^{-1}f$$

Trong nghiên cứu này, các đối tượng được điều khiển là đáp ứng gia tốc của tòa nhà và đáp ứng dịch chuyển của bộ TMD, do đó hàm mục tiêu tại thời điểm đó như sau:

$$J = \int_0^\infty [y_a^T(t)y_a(t) + u^T(t)Ru(t) + X^T Q_x X(t)] dt \quad (21)$$

$$= \int_0^\infty [X^T QX(t) + u^T(t)Ru(t) + 2X^T(t)Su(t)] dt$$

$$Q = C_{ss}^T C_{ss} + Q_x \quad (22)$$

$$S = C_{ss}^T D_{ss} \quad (23)$$

$$R = Ir + D_{ss}^T D_{ss} \quad (24)$$

$$Q_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ & \ddots & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\ & & & 0 & & & & & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & q_x & & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & 0 & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \ddots & & & & & & & & \\ 0 & & & & & & & & & & & & & & & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Lực điều khiển:

$$u(t) = -FX(t) \quad (26)$$

$$F = R^{-1}(S^T + B^T P) \quad (27)$$

Trong đó, P là nghiệm của phương trình đại số Ricatti.

$$P(A - BR^{-1}S^T) + (A - BR^{-1}S^T)^T P - PBR^{-1}B^T P - SR^{-1}S^T = O \quad (28)$$

5. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

5.1. Thông số của mô hình

Thông số tòa nhà được tham khảo dựa trên tài liệu của các tác giả Thuan Xuan Nguyen, Nanako Miura, Akira Sone (2019) [5] và được đưa ra trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số của tòa nhà

Thông số	Ký hiệu	Giá trị
Chiều cao mỗi tầng	H	4,0m
Chu kì dao động riêng của tòa nhà	T	5,8s
Số tầng	n	60
Phân tử cản nhớt	ζ	0,01
Khối lượng mỗi tầng	m_i	$2,0 \cdot 10^6 \text{kg}$

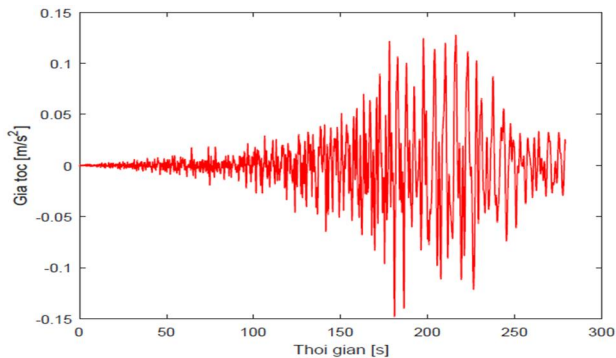
Thông số của bộ TMD sử dụng trong nghiên cứu này dựa trên phương pháp của Den Hartog. Khối lượng của TMD là 5% tổng khối lượng của tòa nhà. Bảng 2 đưa ra thông số của bộ TMD.

Bảng 2. Thông số của bộ TMD

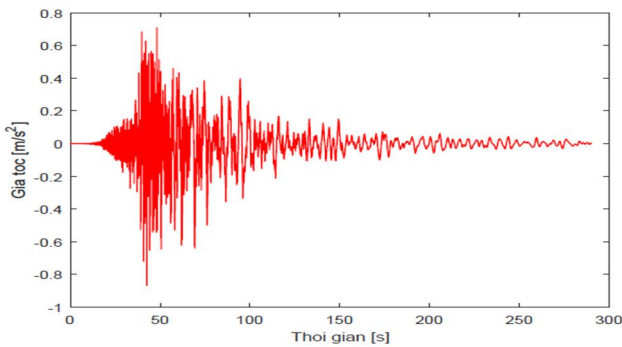
Thông số	Ký hiệu	Giá trị
Khối lượng	m_d	$6,0 \times 10^6 \text{ kg}$
Hệ số cản	c_d	$1,6544 \times 10^5 \text{ Ns/m}$
Độ cứng	k_d	$6,3867 \times 10^6 \text{ N/m}$

5.2. Kết quả mô phỏng

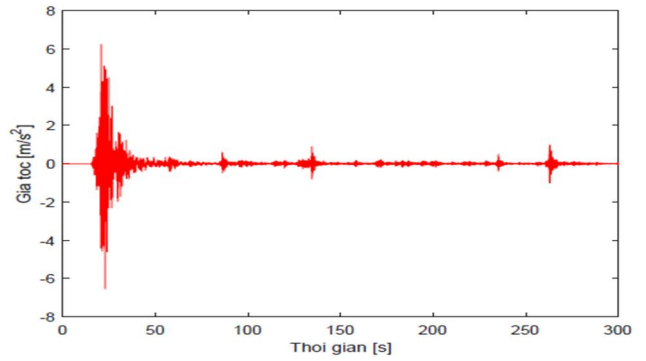
Hình 4 đưa ra đồ thị gia tốc ghi nhận được của 3 trận động đất ở Nhật Bản bao gồm: sóng NS Konohana (4a, động đất Great East 2011); Sóng NS Tomakomai (4b, động đất Tokachi 2003); sóng NS Kumamoto (4c, động đất Kumamoto 2016).



a)



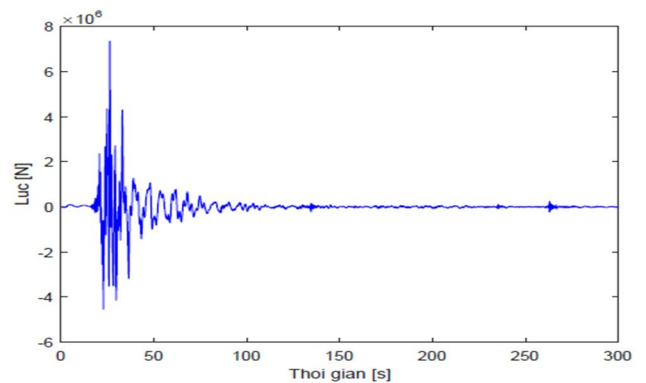
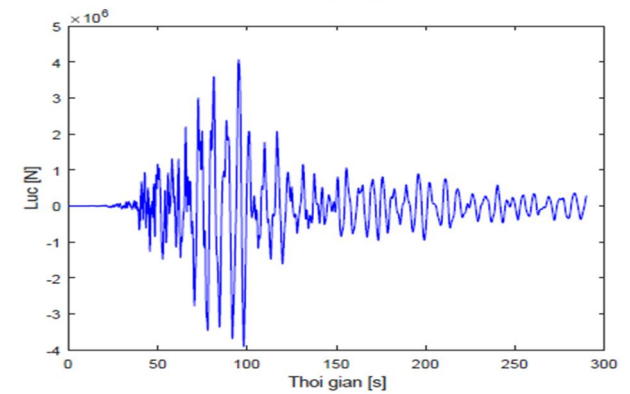
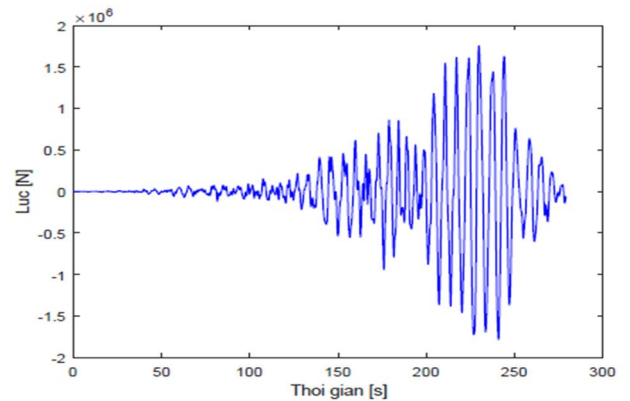
b)



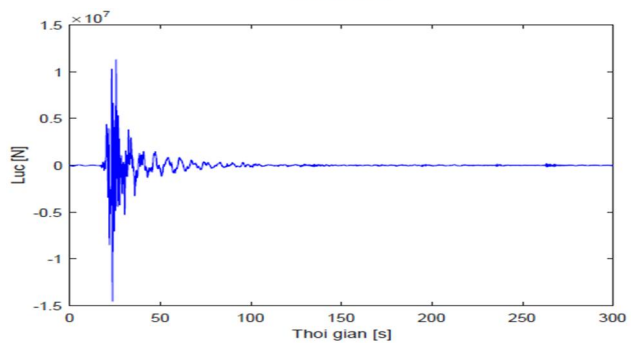
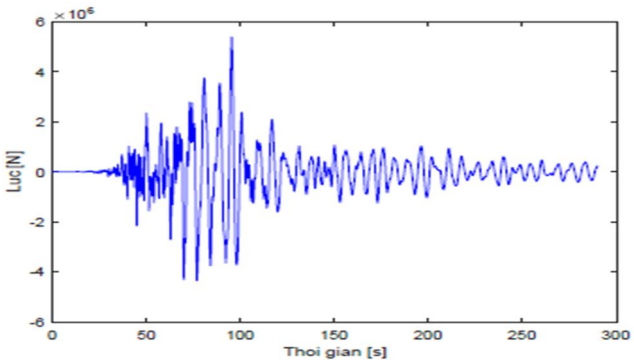
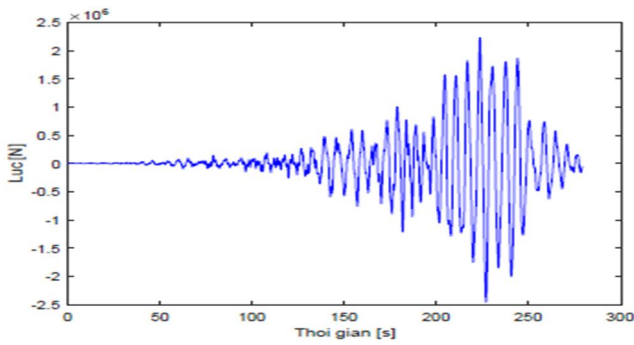
c)

Hình 4. Gia tốc của động đất

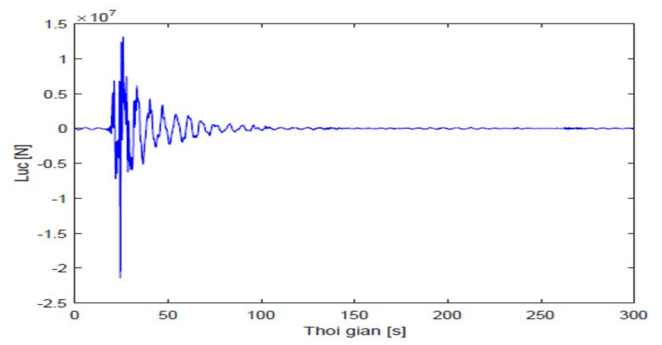
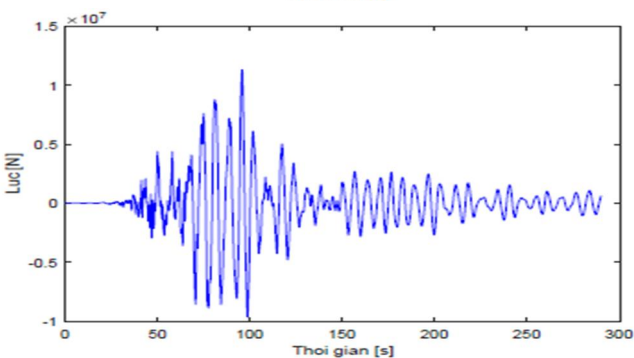
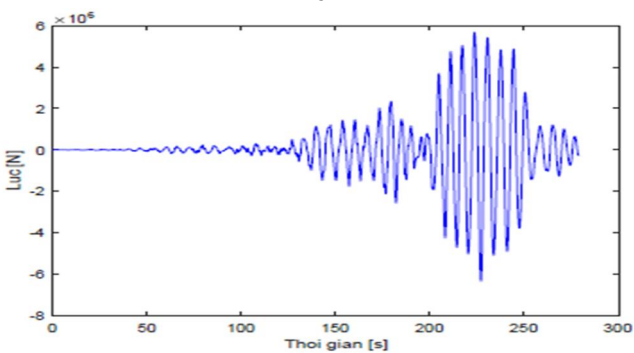
Hình 5 là kết quả mô phỏng của lực điều khiển theo với thông số đầu vào là thông số của 3 trận động đất Konohana, Tomakomai và Kumamoto. Với các bộ điều khiển được đặt ở tầng 1, tầng 30 và tầng 60 của tòa nhà.



Tầng 1



Tầng 30



Tầng 60

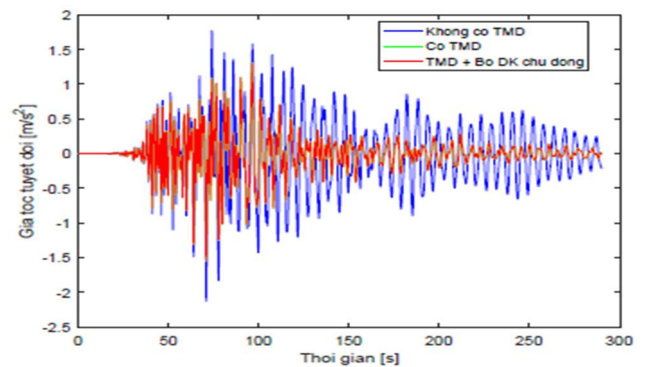
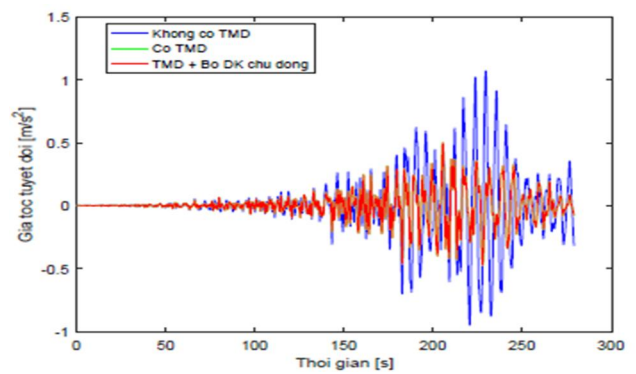
Hình 5. Đồ thị lực điều khiển

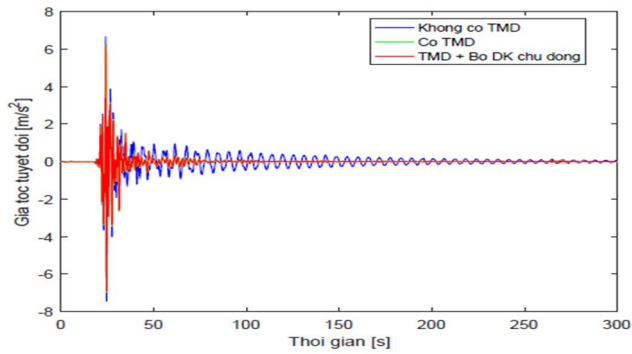
Các đồ thị biểu diễn sự thay đổi lực điều khiển theo thời gian. Nhìn vào sơ đồ có thể thấy, khi đặt bộ điều khiển ở tầng 1, tầng 30 hay tầng 60 thì hình dạng đồ thị thay đổi lực điều khiển có sự tương đồng với nhau và tương đồng với sự thay đổi của thông số đầu vào là gia tốc động đất ở hình 5. Tuy nhiên, hình dạng đồ thị lực khác nhau khi thông số đầu vào là các trận động đất khác nhau. Ta có thể thấy sự giống nhau đó là lực điều khiển khi bộ điều khiển đặt ở tầng 60 sẽ là lớn nhất, tiếp đến là tầng 30 và khi đặt ở tầng 1 là nhỏ nhất. Điều này cũng có thể thấy được qua đồ thị ở hình 5 và qua số liệu về lực điều khiển lớn nhất trong mỗi sơ đồ ở bảng 3.

Bảng 3. Giá trị lực điều khiển lớn nhất

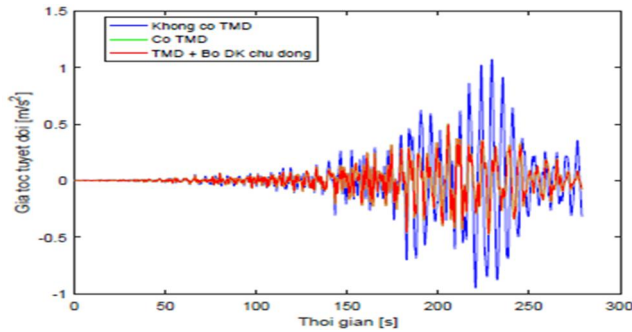
Đơn vị tính: kN

	Konohana	Tomakomai	Kumamoto
Tầng 1	1784	4066	7342
Tầng 30	2461	5392	14517
Tầng 60	6358	11305	21391

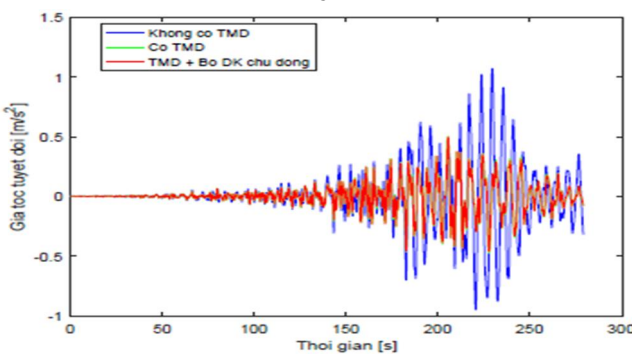




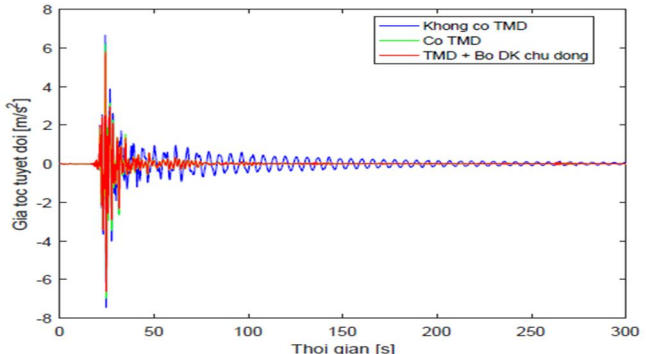
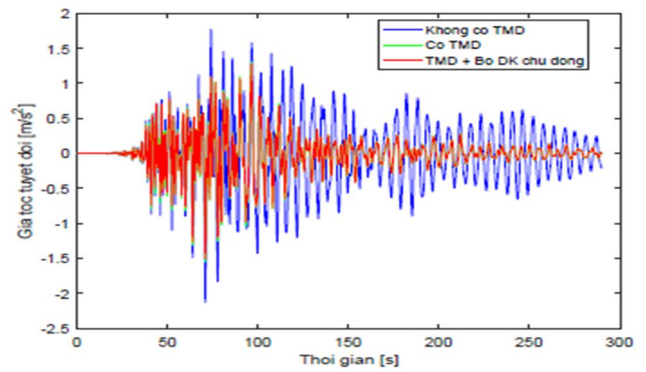
Tầng 1



Tầng 30



Tầng 60



Hình 6. Đồ thị gia tốc tuyệt đối của tầng 60

Các đồ thị trong hình 6 biểu diễn gia tốc tuyệt đối theo thời gian của tầng số 60 trong 3 trường hợp là tòa nhà không lắp đặt bộ TMD, tòa nhà có lắp bộ TMD và tòa nhà lắp cả TMD và thêm một bộ điều khiển chủ động. Với thông số đầu vào lần lượt là 3 trận động đất theo thứ tự Konohana, Tomakomai và Kumamoto và bộ điều khiển đặt ở tầng số 1, tầng 30 và tầng 60. Đường màu xanh lam là gia tốc tuyệt đối khi không lắp bộ TMD, ở trường hợp này ta thấy đường màu xanh lam là lớn hơn rất nhiều so với 2 đường kia ở hầu như tất cả các thời điểm diễn ra động đất. Điều này có thể thấy hiệu quả giảm dao động trong 2 trường hợp có TMD và TMD + bộ điều khiển chủ động là rất nhiều. Tuy nhiên với 2 trường hợp này thì sự khác biệt về gia tốc là không nhiều, như trên hình chúng ta thấy đường màu xanh lá cây và đường đỏ gần như tương đồng nhau, nhưng ở hầu hết các vị trí thì đường đỏ màu đỏ có giá trị thấp hơn nghĩa là việc sử dụng thêm bộ điều khiển là có hiệu quả hơn trong việc giảm dao động chung của tòa nhà.

Bảng 4 đưa ra số liệu gia tốc tuyệt đối lớn nhất trong các trường hợp không lắp bộ TMD, có bộ TMD và trường hợp lắp bộ TMD + bộ điều khiển chủ động. Trong đó trường hợp có thêm bộ điều khiển thì số liệu bao gồm 3 vị trí đặt bộ điều khiển khác nhau. Trong 3 trận động đất thì gia tốc tuyệt đối lớn nhất đều nằm ở tầng 60. Cũng qua bảng số liệu có thể thấy hầu như biên độ gia tốc tuyệt đối lớn nhất khi không có bộ TMD, tiếp đến là có TMD và có TMD và bộ điều khiển chủ động là nhỏ nhất. Trong đó, 2 trường hợp có TMD là có giá trị gia tốc tuyệt đối lớn nhất xấp xỉ nhau và nhỏ hơn khá nhiều khi không có TMD.

Bảng 4. Giá trị gia tốc tuyệt đối lớn nhất

Đơn vị tính: m/s²

		Konohana	Tomakomai	Kumamoto
Không có TMD		1,0716 (60)	2,1303 (60)	7,4536 (60)
Có TMD		0,5016 (60)	1,5449 (60)	6,9508 (60)
TMD + Bộ điều khiển chủ động	Tầng 1	0,5007 (60)	1,5431 (60)	6,9238 (60)
	Tầng 30	0,5009 (60)	1,5449 (60)	6,7324 (60)
	Tầng 60	0,5021 (60)	1,5042 (60)	6,6254 (60)

6. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã thực hiện tính toán và mô phỏng để đánh giá hiệu quả giảm dao động của một tòa nhà cao tầng có bộ TMD và tòa nhà có lắp đặt bộ TMD và thêm một bộ điều khiển chủ động sử dụng phương pháp điều khiển tối ưu LQR. Các kết quả mô phỏng được minh họa bằng các đồ thị cho thấy hiệu quả rõ rệt trong việc giảm dao động của tòa nhà trong 2 trường hợp này so với trường hợp không lắp đặt gì cả. Tuy nhiên, trong trường hợp có lắp thêm một bộ điều khiển thì hiệu quả giảm dao động tòa nhà là không đáng kể so với trường hợp chỉ có bộ TMD. Ngoài ra, trong trường hợp lắp thêm một bộ điều khiển chủ động kết hợp với TMD thì bộ điều khiển này lắp đặt ở tầng 1 sẽ có lực điều khiển nhỏ nhất và nhỏ hơn nhiều so với khi lắp ở tầng 30 và 60 mà hiệu quả giảm dao động là tốt hơn. Nghĩa là nếu có thêm một bộ điều khiển chủ động thì lắp ở tầng 1 là tốt nhất. Có được điều này là do tầng 1 là nơi tiếp xúc với mặt đất nên khi tầng 1 có biên độ dao động nhỏ hơn thì cũng kéo theo các tầng phía trên nhỏ hơn.

Với những kết luận trên thì nhóm tác giả đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo đó là cải thiện luật điều khiển, hoặc thiết kế thêm nhiều bộ giảm chấn chủ động đặt ở các tầng khác nhau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Lekshmi Suresh, K. M. Mini, 2019. *Effect of Multiple Tuned Mass Dampers for Vibration Control in High-Rise Buildings*. American Society of Civil Engineers Vol. 24, Issue 4.

[2]. Luciana Silva Vellar, Sergio Pastor Ontiveros-Perez, Leticia Fleck Fadel Miguel, Leandro Fleck Fadel Miguel, 2019. *Robust Optimum Design of Multiple Tuned Mass Dampers for Vibration Control in Buildings Subjected to Seismic Excitation*. Hindawi Shock and Vibration, 2019(1):1-9.

[3]. G. P. Cimellaro, T. T. Soong, and A. M. Reinhorn, 2009. *Integrated Design of Controlled Linear Structural Systems*. Journal of structure engineering, 135: 853-862.

[4]. G. P. Cimellaro, T. T. Soong, and A. M., 2009. *Intergrated design of inelastic controlled structure systems*. Structure Control and Health Monitoring, 16: 689-702.

[5]. Thuan Xuan Nguyen, Nanako Miura, Akira Sone, 2019. *Analysis and control of vibration of ropes in a high-rise elevator under earthquake excitation*. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 18: 447-460.

AUTHORS INFORMATION

Nhu Quy Tho, Nguyen Xuan Thuan, Pham Tien Hung
 Faculty of Mechanical Engineering, Hanoi University of Industry