

ĐIỀU KHIỂN BỊ ĐỘNG CỦA KẾT CẤU DÙNG THIẾT BỊ NỐI GIỮA HAI CÔNG TRÌNH

Nguyễn Trọng Phước *

Nguyễn Huy Ân**

Bài báo này trình bày một giải pháp điều khiển bị động kết cấu bằng cách dùng thiết bị nối giữa hai kết cấu gần nhau. Thiết bị nối là mô hình của một hệ đàn hồi dùng để liên kết hai công trình. Mô hình của toàn hệ gồm có hai kết cấu, thiết bị nối được thiết lập. Phân tích động lực học của hệ chịu tác động của gia tốc nền của động đất được thực hiện để đánh giá sự hiệu quả của thiết bị. Kết quả số cho thấy rằng sự hiệu quả khi sử dụng thiết bị nối có thể làm giảm chuyển vị so với kết cấu đứng độc lập.

Từ khóa: Điều khiển bị động, Gia tốc nền, Kết cấu đôi

1. Giới thiệu

Bài toán điều khiển kết cấu khi chịu tác động của động đất đang là đề tài có tính thời sự, ngày càng thu hút sự quan tâm của các nhà nghiên cứu. Có nhiều kết quả tích cực trong vấn đề điều khiển kết cấu khi chịu động đất, gió.... Trong số đó, một vài giải pháp điều khiển kết cấu khi hai công trình gần nhau được quan tâm nhiều trong thời gian rất gần đây. Có nhiều nghiên cứu đã được trình bày bởi Christenson R. E.[3, 4], bắt đầu từ ý tưởng điều khiển, đã thiết lập mô hình cho một số trường hợp hệ rời rạc, và ông còn làm một vài thí nghiệm để kiểm chứng kết quả khi sử dụng hệ nối hai kết cấu gần nhau. Tuy nhiên, cũng còn nhiều hạn chế các mô hình phân tích, sự hiệu quả ứng với các yếu tố đầu vào khác nhau [1, 5],...

Bài báo này phát triển ý tưởng từ [3, 4] bằng việc gắn thêm thiết bị bên ngoài hai hệ kết cấu gần nhau. Mô hình phân tích toàn hệ chịu động đất được thiết lập để đánh giá sự hiệu quả thiết bị. Phương pháp Newmark được sử dụng để tích phân phương trình

chuyển động của hệ khi chịu gia tốc nền của hai trận động đất. Sự ảnh hưởng các đặc tính của thiết bị đến hiệu quả điều khiển cũng được nghiên cứu bằng phân tích số.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Phương trình chuyển động

Phương trình chuyển động của hệ kết cấu nhiều bậc tự do chịu tác dụng tải trọng động được thiết lập như sau

$$(1)$$

Trong đó M , C , K lần lượt là các ma trận khối lượng, cản, và độ cứng của hệ; các véc tơ lần lượt là các véc tơ gia tốc, vận tốc, chuyển vị của hệ; là véc tơ tải trọng ngoài. Trong trường hợp hệ chịu gia tốc nền động đất thì tải trọng được tính bởi phương trình sau [2, 6]

$$P(t) \quad (2)$$

Với là gia tốc nền của động đất.

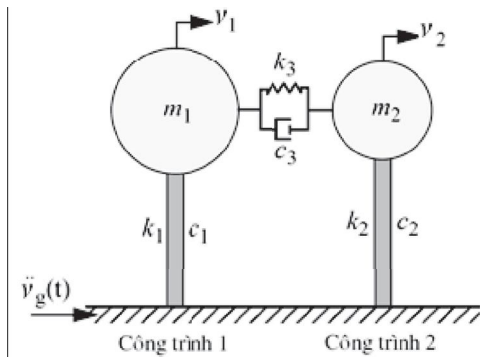
2.2 Mô hình phân tích

* Bộ Môn Sức Bền Kết Cấu, Khoa Kỹ Thuật Xây Dựng, Trường Đại học Bách Khoa TP HCM

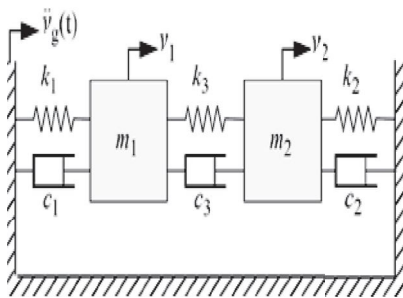
** Công Ty TNHH Thiết Kế Xây Dựng ANGIA, 95/3 Bắc Hải, Q.10, TP HCM

Mô hình kết nối toàn hệ thống được trình bày trong phần này gồm có 2 công trình, mỗi công trình được xem như là một kết cấu 1 bậc tự do, với khối lượng m_1 và m_2 , độ cứng k_1 và k_2 và hệ số cản c_1 và c_2 tương ứng với mỗi công trình; và thiết bị nối được thể hiện là một lò xo độ cứng k_3 và giảm chấn c_3 đặt vào liên kết giữa 2 khối lượng như hình 1. Hệ thống này được mô hình như hệ hai bậc tự do trên hình 2. Hệ chịu gia tốc nền của động đất là .

Hình 1. Sơ đồ toàn hệ



Hình 2. Mô hình rời rạc



Các ma trận tính chất, véc tơ tải trọng của hệ này được thiết lập và kết quả được trình bày như sau:

Ma trận khối lượng, cản, độ cứng là

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_3 & -c_3 \\ -c_3 & c_2 + c_3 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_3 & -k_3 \\ -k_3 & k_2 + k_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Véc tơ tải trọng động đất do gia tốc nền gây ra được xác định bởi

$$(4)$$

Mô hình trên phù hợp khi hệ kết cấu chỉ dao động theo một mode thấp nhất, lúc này cả hai kết cấu đều có thể xem như hệ một bậc tự do. Trường hợp các hệ kết cấu cần điều khiển có dạng phân bố hay là dao động với số modes dao động nhiều hơn (thường trong nhà cao tầng khoảng 5 modes thấp nhất là được quan tâm và các modes cao hơn ít ảnh hưởng đến kết quả), có thể dùng các dạng dao động riêng để đưa về hệ 2 bậc tự do suy rộng, mô hình được thể hiện như trên Hình 3. Các đặc tính cũng được thiết lập tương tự và kết quả được trình bày như sau:

Phương trình chuyển động của hệ:

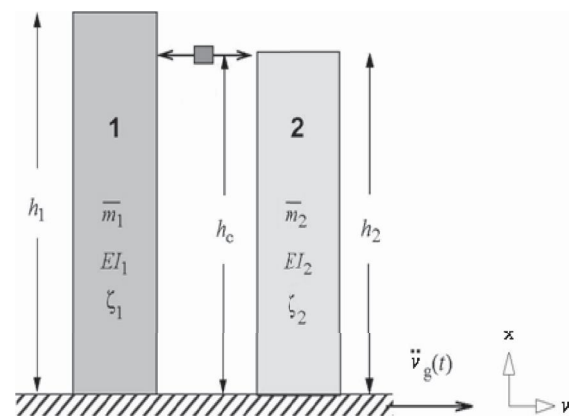
$$(5)$$

Trong đó:

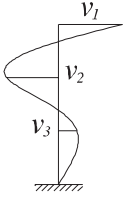
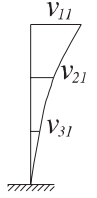
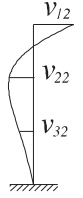
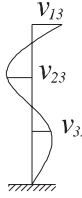
$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y}(t) = \begin{bmatrix} Y_1(t) \\ Y_2(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Hình 3. Sơ đồ hệ phân bố



Dùng phương pháp chồng chất mode [2, 6] để khảo sát chuyển động của hệ. Cách thức phân tích được thể hiện trên hình 4.

	=		+		+	
$v = \phi Y$		$v_1 = \phi_1 Y_1$		$v_2 = \phi_2 Y_2$		$v_3 = \phi_3 Y_3$

Ứng với mode thứ n , chuyển vị $[\hat{v}_n]$ được xác định bởi $[\hat{v}_n] = [\phi_n] Y_n(t)$ (8)

Chuyển vị toàn phần được tính như sau:

$$[v] = [\phi_1] Y_1 + [\phi_2] Y_2 + \dots + [\phi_n] Y_n = \sum_{n=1}^N [\phi_n] Y_n \quad (9)$$

Hàm dạng ϕ_n được xác định bằng phương pháp Galerkin như sau:

$$\Phi_k = [\phi_1 \ \phi_2 \ \dots \ \phi_n]_k = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \dots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \dots & \phi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \dots & \phi_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Các ma trận:

$$M_k = \overline{m}_k \int_0^{h_k} \phi_k^T(x) \times \phi_k(x) dx \quad (11)$$

$$G_k = \overline{m}_k \int_0^{h_k} \phi_k^T(x) dx \quad (12)$$

$$P_k f(t) = \phi_k^T(h_c) \times \phi_k(h_c) \times (c Y_k(t) + k Y_k(t)) \quad (13)$$

$$K_k = (EI)_k \int_0^{h_k} \phi_k^T(x) \times \left(\frac{\delta^4}{\delta x^4} \phi_k(x) \right) dx \quad (14)$$

$$C_k = M_k \Phi_k \overline{C}_k \Phi_k^{-1} \quad (15)$$

Lực tác động của liên kết lên hệ thứ nhất và thứ hai được xác định như sau:

$$P_1 f(t) = \int_0^{h_1} \phi_1^T (c(v_1 - v_2) + k_c(v_1 - v_2)) dx \quad (16)$$

$$P_2 f(t) = \int_0^{h_2} \phi_2^T (c(v_2 - v_1) + k_c(v_2 - v_1)) dx \quad (17)$$

Phân tích các giá trị P_1 và P_2 và thay vào phương trình chuyển động, ta có thể viết lại phương trình chuyển động của hệ như sau

$$MY(t) + C_0 Y(t) + K_0 Y(t) = -G v_g(t) \quad (18)$$

Trong đó:

$$C_0 = \begin{bmatrix} C_1 - P_{11} \times c & P_{12} \times c \\ P_{21} \times c & C_2 - P_{22} \times c \end{bmatrix}$$

$$K_0 = \begin{bmatrix} K_1 - P_{11} \times k_c & P_{12} \times k_c \\ P_{21} \times k_c & K_2 - P_{22} \times k_c \end{bmatrix} \quad (19)$$

2.3. Phương pháp giải

Vì gia tốc nền biến thiên khá phức tạp, là đại lượng được ghi bằng máy đo, không biết qui luật nên để tìm lời giải của bài toán, Phương pháp Newmark được sử dụng để tích phân phương trình chuyển động. Ý tưởng của phương pháp là từ giá trị của nghiệm đã biết tại thời điểm suy ra giá trị của nó tại bằng các giả thiết khác nhau về sự biến thiên của gia tốc. Đây là phương pháp rất nổi tiếng được dùng rộng rãi trong các phần mềm phân tích kết cấu như SAP2000, ETABS, ... và cũng rất tổng quát để giải bài toán động lực học kết cấu [2, 6]. Các công thức cơ bản được trình bày như sau

$$\mathbf{v}_{i+1} = \mathbf{v}_i + (1 - \gamma) \Delta t \mathbf{v}_i + \gamma \Delta t \mathbf{v}_{i+1}$$

$$\mathbf{v}_{i+1} = \mathbf{v}_i + \mathbf{v}_i \Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \Delta t^2 \mathbf{v}_i + \beta \Delta t^2 \mathbf{v}_{i+1} \quad (20)$$

$$\mathbf{M} \mathbf{v}_{i+1} + \mathbf{C} \mathbf{v}_{i+1} + \mathbf{K} \mathbf{v}_{i+1} = \mathbf{P}_{i+1}$$

Với γ , β là các thông số của phương pháp Newmark. Sự thay thế 2 phương trình đầu của (20) vào phương trình thứ 3 thu được hệ phương trình đại số tuyến tính với ẩn số là gia tốc tại thời điểm $i+1$ là dưới dạng

$$\mathbf{M}_{\text{eff}} \mathbf{v}_{i+1} = \mathbf{P}_{\text{eff}} \quad (21)$$

Trong đó khối lượng hiệu dụng và tải trọng hiệu dụng được xác định bởi

$$\mathbf{M}_{\text{eff}} = \mathbf{M} + \gamma \Delta t \mathbf{C} + \beta \Delta t^2 \mathbf{K}$$

$$\mathbf{P}_{\text{eff}} = \mathbf{P}_{i+1} - \mathbf{C}[\mathbf{v}_i + (1 - \gamma)\Delta t \mathbf{v}_i] -$$

$$\mathbf{K} \left[\mathbf{v}_i + \mathbf{v}_i \Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \Delta t^2 \mathbf{v}_i \right] \quad (22)$$

Tính lặp các phương trình (20), (21), và (22) trong từng bước thời gian, nghiệm của hệ tại các thời điểm rời rạc được tìm. Theo đánh giá của các tài liệu về động lực học kết cấu thì phương pháp này tỏ ra hiệu quả về

độ chính xác và kết quả thu được là xác đáng nếu bước thời gian được chọn là phù hợp. Trong bài toán kết cấu chịu tác dụng của gia tốc nền động đất biến thiên theo thời gian thì phương pháp Newmark là phương pháp duy nhất để phân tích ứng xử của hệ theo thời gian [2]. Bài báo này áp dụng phương pháp Newmark để phân tích phản ứng động của hệ.

3. Kết quả số

3.1 Mô hình rời rạc

Bài toán với mô hình như hình 2, các đặc trưng của hệ được cho trong bảng 1. Thiết bị nổi có các đặc trưng là: độ cứng $k3 = 5\%k1$ và hệ số cản $c3 = 5\%c1$. Hệ chịu gia tốc nền của trận động đất Altadena có như đồ thị như Hình 5.

	Khối lượng m^1	Khối lượng m^2
Khối lượng (m)	2.7612×10^7 kg	1.8401×10^7 kg
Độ cứng (k)	4.3629×10^7 N/m	4.4315×10^7 N/m
Tỷ số cản (ξ)	2%	2%
Tần số dao động riêng	0.200 Hz	0.247 Hz

Bảng 1. Số liệu mô tả đặc tính của hệ

Thực hiện phân tích số, bao gồm có gắn hệ điều khiển và không gắn hệ điều khiển. Quá trình tính toán khá phức tạp do đặc thù của bài toán động lực học và gia tốc nền. Các chương trình được viết bằng ngôn ngữ MATLAB để giải quyết bài toán trên. Phương pháp Newmark được áp dụng để tích phân trực tiếp phương trình chuyển động của hệ bao gồm có và không có lắp thiết bị nổi. Bước thời gian phân tích được chọn cùng với bước ghi của gia tốc nền là 0.02s, so với chu kỳ dao động tự nhiên của hệ là vài giây, khoảng từ 4-5s thì kết quả đủ tin cậy. Kết quả chuyển vị khi hệ chịu động đất được trình bày trên hình 6.

Trong bài toán động lực học kết cấu chịu tác dụng của gia tốc nền động đất, chuyển vị và các đại lượng ứng xử của hệ đều phụ thuộc vào thời gian. Để đánh giá kết quả thì giá trị lớn nhất của chuyển vị được quan tâm và tất nhiên nội lực và ứng suất cũng sẽ tỷ lệ theo chuyển vị nên có thể dùng chuyển vị lớn nhất để đánh giá phản ứng của hệ. Sơ lược kết quả, chuyển vị lớn nhất của $m1$ và $m2$ là 3.59cm và 3.88cm.

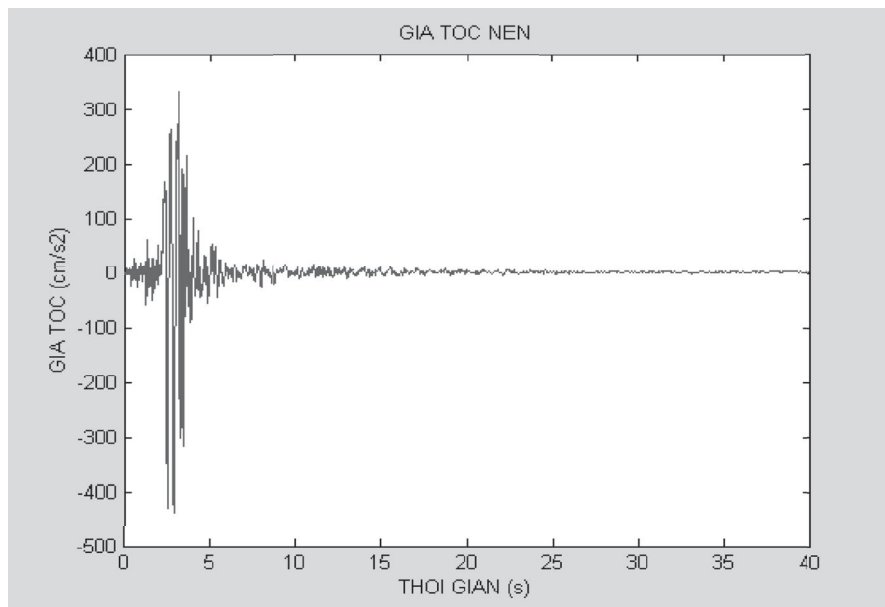
Trong trường hợp không đặt kết cấu nổi tức là mỗi công trình đứng độc lập và đều chịu tác dụng của gia tốc nền như trên thì chuyển vị lớn nhất tương ứng là 3.979cm và 4.316cm. So sánh kết quả và đánh giá sự hiệu quả của phản ứng có thể nhận xét rằng

hệ nổi có tác dụng làm giảm phản ứng của hệ khoảng 12%.

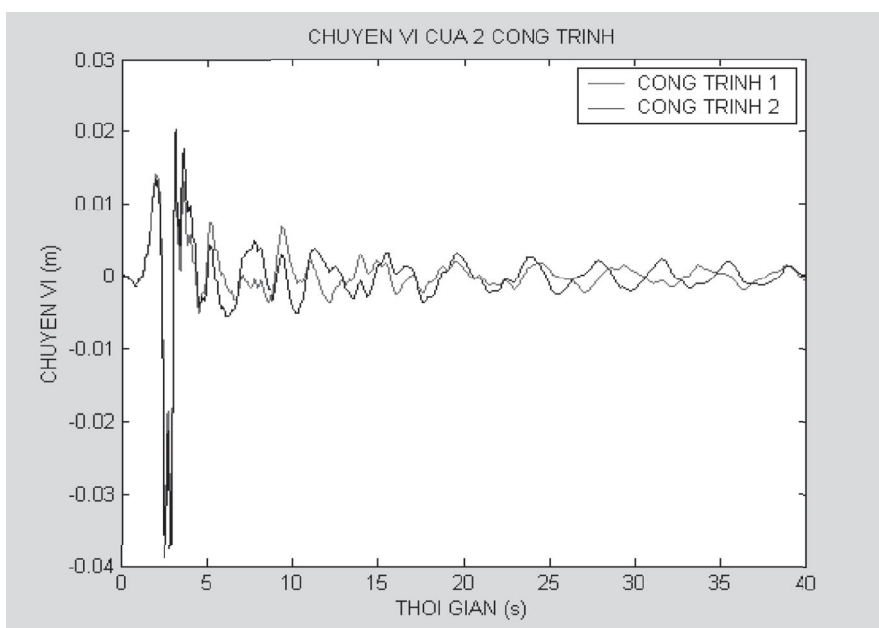
Tiếp tục thay đổi giá trị các thông số của hệ nổi như tăng độ cứng từ 5% lên 10%

so với độ cứng của kết cấu cơ bản thì kết quả thu được cũng tương tự như thí dụ này. Một số kết quả số được trình bày trong [7].

Hình 5. Gia tốc nền của trận động đất Altadena, bước thời gian là 0.02s



Hình 6. Đồ thị chuyển vị của m_1 và m_2 tức là của công trình 1 và 2



3.2 Mô hình hệ liên tục

Bài toán với mô hình như hình 3, các đặc trưng của hệ được cho trong bảng 2. Hệ nổi

có đặc trưng là (Ns/m) và (N/m) . Chiều cao đặt liên kết $h_c = h_1$. Một số đặc trưng của hệ đã được khảo sát chi tiết trong [7].

	Công trình 1	Công trình 2
Chiều cao công trình (h_k)	20 m	20 m
Khối lượng phân bố $(\bar{m}_k)$	300 kg/m	200 kg/m
Độ cứng công trình $(EI)_k$	$9 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^2$	$7 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^2$

Bảng 2. Số liệu mô tả đặc tính của hệ

Các hàm dạng của công trình được xác định bởi phương trình sau:

$$\phi_k^i(x) = a_{i,k} \left[\begin{aligned} &(\sin b_i h_k - \sinh b_i h_k) \times (\sin b_i x - \sinh b_i x) \\ &+ (\cos b_i h_k + \cosh b_i h_k) \times (\cos b_i x - \cosh b_i x) \end{aligned} \right]$$

Hai công trình có cùng chiều cao : $\phi_1^i = \phi_2^i = \phi^i$

Xét với 5 mode dao động đầu tiên và chuẩn hóa các hàm dạng ứng với các mode dao động chính tại đỉnh của công trình ($\phi^i(h_k) = 1$), có thể mô tả các hàm dạng của công trình như sau:

$$\phi^1(x) = 0.367 \times (\sin(0.0938x) - \sinh(0.0938x)) - 0.5(\cos(0.0938x) - \cosh(0.0938x))$$

$$\phi^2(x) = -0.5092 \times (\sin(0.2347x) - \sinh(0.2347x)) + 0.5(\cos(0.2347x) - \cosh(0.2347x))$$

$$\phi^3(x) = 0.4996 \times (\sin(0.3927x) - \sinh(0.3927x)) - 0.5(\cos(0.3927x) - \cosh(0.3927x))$$

$$\phi^4(x) = -0.5 \times (\sin(0.5498x) - \sinh(0.5498x)) + 0.5(\cos(0.5498x) - \cosh(0.5498x))$$

$$\phi^5(x) = 0.5 \times (\sin(0.7069x) - \sinh(0.7069x)) - 0.5(\cos(0.7069x) - \cosh(0.7069x))$$

Và xác định được:

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 \\ 0.7255 & 0.700 & -0.3951 & -0.6430 & -0.6004 \\ 0.4611 & -0.5895 & -0.4735 & 0.3265 & 0.7003 \\ 0.2299 & -0.6835 & 0.5261 & 0.3156 & -0.6965 \\ 0.0639 & -0.3011 & 0.6044 & -0.7538 & 0.6596 \end{bmatrix};$$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 \\ 0.7255 & 0.700 & -0.3951 & -0.6430 & -0.6004 \\ 0.4611 & -0.5895 & -0.4735 & 0.3265 & 0.7003 \\ 0.2299 & -0.6835 & 0.5261 & 0.3156 & -0.6965 \\ 0.0639 & -0.3011 & 0.6044 & -0.7538 & 0.6596 \end{bmatrix}$$

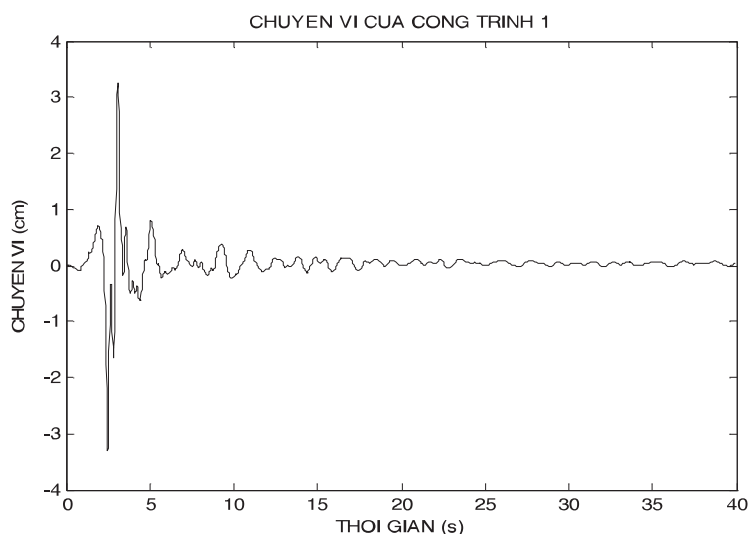
Và tương tự cho các hàm dạng cho các mode dao động tiếp theo của hệ. Kết quả trình bày chi tiết trong [7].

Hệ chịu gia tốc nền của trận động đất Al-tadena như trong thí dụ trước như đồ thị như Hình 5. Kết quả phản ứng của hệ gồm có chuyển vị của cả hai kết cấu theo thời gian được mô tả trong hình 7 và hình 8. Chuyển vị lớn nhất của công trình 1 là 3.255cm và

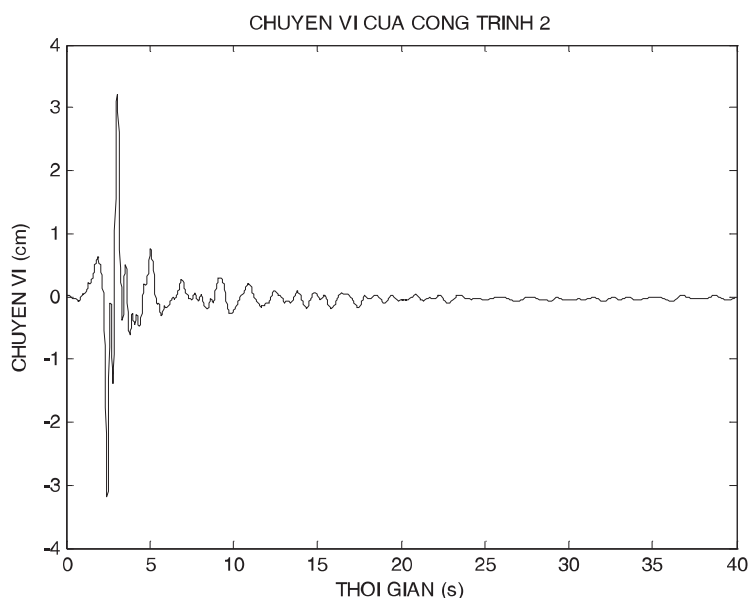
công trình 2 là 3.22cm trong trường hợp có hệ nối.

Cũng tương tự như thí dụ trên, để đánh giá sự hiệu quả của hệ nối, bài toán mỗi công trình độc lập chịu động đất được giải lại và kết quả là chuyển vị lớn nhất của công trình 1 là 3.4402cm, và công trình 2 là 3.3822cm.

Hình 7. Chuyển vị theo thời gian của công trình 1



Hình 8. Chuyển vị của công trình 2



So sánh kết quả chuyển vị của các công trình trong trường hợp liên kết các công trình và các công trình độc lập với nhau: khi các công trình chịu tác động của trận động đất Altadena: trường hợp liên kết các công trình có khả năng giảm 5.383% và 4.796% chuyển vị lớn nhất đối với công trình 1, 2.

Khi độ cứng thiết bị nối tăng lên thì sự hiệu quả cũng cải thiện đáng kể. Một số tính huống sự hiệu quả này có thể lên đến 18%.

4. Kết luận

Từ các kết quả khảo sát một giải pháp giảm chấn bằng cách liên kết các công trình gần nhau, các nhận xét được thể hiện như sau:

- Bài toán điều khiển kết cấu chịu tác dụng của tải trọng động là vấn đề có tính thời sự. Do vậy, công việc được thực hiện trong bài báo này là có ý nghĩa.

Tài liệu tham khảo

- [1] Anupam, S. A., Ananth, R., (2004), "Coupled optimal design of building with TMD", *Proceedings of ICTAM*, 15–21 August 2004, Warsaw, Poland.
- [2] Chopra, A. K. (2001), *Dynamics of Structures*, McGraw - Hill.
- [3] Christenson, R. E. (2001), *Semiactive Control of Civil Structures for Natural Hazard Mitigation: Analytical and Experimental Studies*. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering and Geological Sciences, University of Notre. Indiana, USA.
- [4] Christenson, R. E., Spencer, B. F., Hori, N., Seto, K. (2000) "Experimental Verification of Coupled Building Control", *Proc. of the Fourteenth Engineering Mechanics Conference*, Austin, Texas.
- [5] Cimellaro G.P. (2003) "Coupled building control", *Proceedings of 16th ACSE Engineering Mechanics Conference* July 16-18, University of Washington, Seattle.
- [6] Clough, R. W., Penzien, J. (1993), *Dynamics of Structures*", McGraw - Hill.

- Thiết lập sơ đồ tính và tìm ứng xử của hệ dựa vào hai mô hình: mô hình hai bậc tự do rời rạc, dùng để đánh giá sơ bộ hiệu quả của thiết bị nối và mô hình liên tục hệ suy rộng để khảo sát bài toán thực tế hơn như nhiều dạng dao động, cao độ đặt thiết bị giảm chấn, ... đều được quan tâm.

- Kết quả số cho thấy sự hiệu quả của thiết bị giảm chấn gắn ngoài là đáng kể, nên đây là hướng đi phù hợp trong bài toán điều khiển kết cấu.

- Tuy nhiên sự hiệu quả còn phụ thuộc vào các đặc tính hệ nối như giá trị độ cứng, cản, vị trí thích hợp nối; và sự khác nhau về tần số của hai hệ kết cấu cần điều khiển. Sự khảo sát sẽ được tiếp tục thực hiện.

Lời cảm ơn

Bài báo này được hoàn thành với sự hỗ trợ của Quỹ Nghiên Cứu Phát Triển - Công ty TNHH ANGIA.

[7] Nguyễn Huy Ân (2006), *Khảo sát ảnh hưởng của thiết bị chống dao động bố trí giữa các công trình*, Luận án Thạc sĩ, Trường ĐHBK TP HCM.

The passive control of coupled buildings using single coupling link

Abstract. *This paper presents the passive control of coupled buildings using single coupling link in order to connect two buildings. The link is modeled by elastic systems with mass, damping and stiffness properties. The analytical model of structures is formulated by finite element method and dynamic equilibrium of forces. Dynamic analysis of structures due to ground acceleration using Newmark method and modal superposition method is carried out. The reduced response of coupling buildings shows the effect of this solution.*

Keywords: Ground acceleration, Coupled Buildings, Passive Control.