

GIẢM CHẤN CHO KẾT CẤU 20 TẦNG CHỊU TẢI TRỌNG ĐỘNG ĐẤT BẰNG HỆ CẢN CHẤT LỎNG NHỚT ĐƯỢC ĐIỀU KHIỂN BỊ ĐỘNG KHI XÉT ĐẾN PHI TUYẾN VẬT LIỆU

ThS. Phạm Nhân Hòa

PGS. TS. Chu Quốc Thắng

Trường Đại học Quốc Tế - Đại học Quốc gia TP. HCM

ThS. Lê Minh Thành

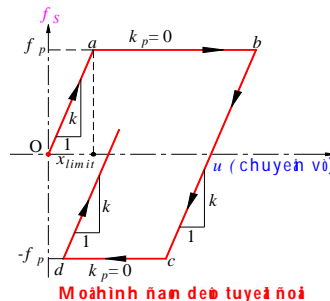
Công ty TNHH Tham & Wong Việt Nam

TÓM TẮT: Bài báo trình bày mô hình cơ học khi dao động (với giả thiết sàn tuyệt đối cứng), phương trình vi phân chuyển động, và thuật toán để giải phương trình này cho kết cấu khung phẳng với vật liệu cột làm việc theo mô hình đàn dẻo tuyệt đối đồng thời được điều khiển bị động bằng hệ cản VFD. Ví dụ số là kết cấu khung phẳng 20 tầng bằng thép chịu tải trọng động đất Kobe được phân tích đàn hồi, đàn dẻo, có hoặc không có hệ cản VFD. Các kết quả ví dụ số này nhằm so sánh hiệu quả giảm đáp ứng giữa kết cấu được điều khiển bằng hệ cản VFD mà vật liệu của nó làm việc trong miền đàn hồi và kết cấu cũng được điều khiển bằng hệ cản VFD nhưng vật liệu của nó làm việc ngoài miền đàn hồi.

Từ khóa: Động lực học công trình, Điều khiển dao động, Kết cấu thông minh, Điều khiển bị động, Hệ cản chất lỏng nhớt

1. Giới thiệu

Các giải pháp chống động đất cho công trình từ lâu đã được thế giới quan tâm, đặc biệt trong hoàn cảnh thế giới ngày càng nhiều trận động đất xảy ra với cường độ lớn do sự biến đổi khí hậu toàn cầu. Điều khiển dao động công trình ra đời đã trở thành một lĩnh vực ngày càng được các kỹ sư chú ý đến nhờ hiệu quả kháng chấn cho công trình của nó. Đối với kết cấu thấp tầng và cao tầng sử dụng hệ cản chất lỏng nhớt (Viscous Fluid Dampers - VFD) được điều khiển bị động chịu tải trọng động đất mạnh, các nghiên cứu trong nước [2], [3], [4] và ngoài nước [6], [7], [8] hiện nay chủ yếu phân tích sự hiệu quả giảm chấn của VFD cho kết cấu mà vật liệu của nó chỉ làm việc trong miền đàn hồi mà chưa đi sâu vào phân tích vật liệu làm việc ngoài miền đàn hồi. Vì vậy, việc thực hiện nghiên cứu mô hình tính toán và phân tích đáp ứng động lực học của kết cấu sử dụng hệ cản VFD làm việc ngoài miền đàn hồi của vật liệu (như Hình 1) là cần thiết. Trong Hình 1, k là độ cứng động lực học của cột khi làm việc trong miền đàn hồi được xác định theo mô hình shear frame 1, k_p là độ cứng của cột khi làm việc trong giai đoạn chảy dẻo (để đơn giản trong việc tính toán lấy $k_p = 0$); f_s là lực đàn hồi trong cột; f_p là lực giới hạn dẻo của cột.



Hình 1. Mô hình làm việc của vật liệu ngoài miền đàn hồi

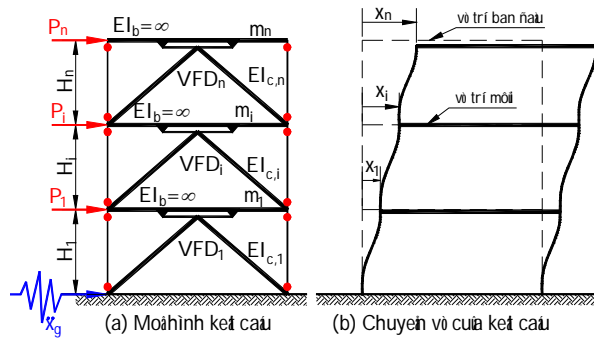
2. Mô hình, phương trình vi phân chuyển động và thuật giải tìm đáp ứng cho kết cấu phi tuyến vật liệu được trang bị hệ cản VFD

2.1. Mô hình cơ học và phương trình vi phân chuyển động

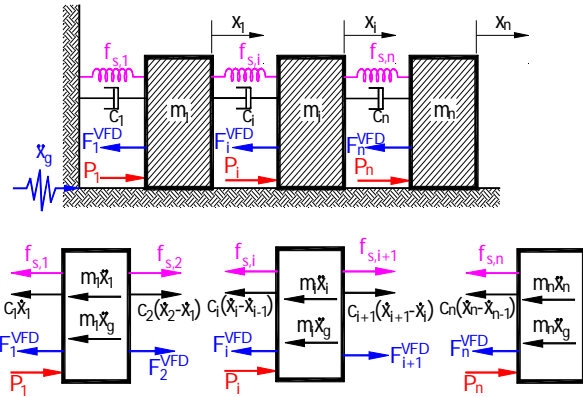
Với một kết cấu khung phẳng n tầng nhiều nhịp, do giả thiết sàn là tuyệt đối cứng nên kết cấu được quy về nhiều tầng một nhịp như

Hình 2, trong đó mỗi tầng là một bậc tự do mang khối lượng m_i . Sử dụng nguyên lý Đalămbe, kết cấu được đưa về dạng mô hình tính toán như Hình 3 trong đó, E mô đun đàn hồi của vật liệu kết cấu, $I_{c,i}$ và $I_{b,i}$ lần lượt là

mômen quán tính của cột và dầm; c_i và k_i lần lượt là hệ số cản và độ cứng chuyển vị ngang của kết cấu ở tầng thứ i^{th} được xác định theo [1].



Hình 2. Mô hình kết cấu khi dao động



Hình 3. Mô hình cơ học của kết cấu

x_i, \dot{x}_i và \ddot{x}_i lần lượt là chuyển vị, vận tốc và gia tốc của kết cấu; P_i là ngoại lực tác động vào kết cấu; \ddot{x}_g là bằng gia tốc nền của tải trọng động đất. Với mô hình cơ học này, phương trình vi phân chuyển động của kết cấu được viết ở dạng ma trận như sau:

$$M.\ddot{x} + C.\dot{x} = -M.I.\ddot{x}_g + P - F_{VFD} - F_S \quad (1)$$

Trong đó,

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ \vdots & m_i & \vdots \\ sym & & m_n \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & -c_i & c_i + c_{i+1} & -c_{i+1} & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ sym & & & -c_n & c_n \end{bmatrix}$$

lần lượt là các ma trận khối lượng và ma

trận cản của kết cấu;

$$r = \{1 \dots 1 \dots 1\}^T; \quad x = \{x_1 \dots x_i \dots x_n\}^T, \quad \dot{x} = \frac{dx}{dt}, \quad \text{và} \quad \ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

lần lượt là các véc tơ chuyển vị, vận tốc và gia tốc của kết cấu; $P = \{P_1 \dots P_i \dots P_n\}^T$ là các véc tơ ngoại lực tác dụng tại các tầng; $F_S = \{f_1^s - f_2^s, \dots, f_i^s - f_{i+1}^s, \dots, f_n^s\}^T$ là véc tơ lực đàn hồi sinh ra trong cột và giả thiết rằng khớp dẻo hình thành trong chân cột các tầng, với f_i^s được xác định theo đồ thị Hình 1 khi đó:

$$\text{Nếu } |f_i^s| < f_i^p \text{ thì } \begin{cases} k_i = k \\ f_i^s = k_i \cdot (x_i - x_{i-1}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{Nếu } |f_i^s| \geq f_i^p \text{ thì } \begin{cases} k_i = 0 \\ f_i^s = f_i^p \\ f_i^s = -f_i^p \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Đặt} \quad (4)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \\ & -k_i & k_i + k_{i+1} & -k_{i+1} & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \\ sym & & & -k_n & k_n \end{bmatrix}$$

và F_{VFD} là véc tơ lực cản sinh ra trong VFD,

$$F_{VFD} = \{F_1^{VFD} - F_2^{VFD}, \dots, F_i^{VFD} - F_{i+1}^{VFD}, \dots, F_n^{VFD}\}^T \quad (5)$$

với $F_i^{VFD} = C_i^{VFD} |\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}|^{\alpha_i} \text{sign}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1})$ trong đó, C_i^{VFD} và α_i là tham số điều khiển trong hệ cản VFD tại tầng thứ i^{th} .

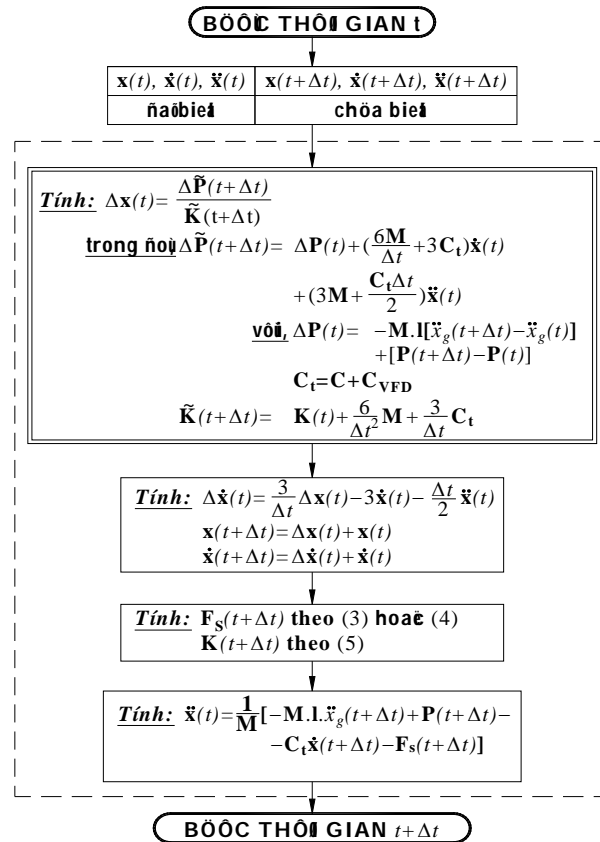
Khi $\alpha_i = 1$ ở tất cả các tầng, phương trình vi phân được viết lại như sau:

$$M.\ddot{x} + (C + C_{VFD}).\dot{x} = -M.I.\ddot{x}_g + P - F_S \quad (6)$$

2.2. Thuật giải tìm đáp ứng

Do tính chất phi tuyến vật liệu của bài toán nên bài báo đề xuất giải phương trình vi phân chuyển động dựa trên phương pháp số Time-Newtonmark (sử dụng xấp xỉ gia tốc tuyến tính) nhưng được hiệu chỉnh lại cho phù hợp với sự xuất hiện của hệ số C_{VFD} và số hạng F_S . Với sự trợ giúp của máy tính, việc tính toán tìm đáp ứng được lập trình với ngôn ngữ MATLAB với lưu đồ thuật toán được chỉ ra như

Hình 4. Sai số của bài toán được đánh giá bằng sự hội tụ của năng lượng khi chia nhỏ bước thời gian [5].



Hình 4. Lưu đồ thuật toán của phương pháp số

3. Ví dụ tính toán

3.1. Mô tả kết cấu

Để phân tích đáp ứng động lực học cũng như tính hiệu quả của hệ cản VFD được điều khiển bị động, xét kết cấu 20 tầng được làm bằng thép có $E=2.10^4 kN/cm^2$ và tỉ số cản của kết cấu ở mode 1 và mode 2 là $\zeta=5\%$. Đây là kết cấu mẫu (*Benchmark Buildings*) được sử dụng trong các bài báo điều khiển dao động 9 nhằm tạo điều kiện thuận lợi cho việc so sánh kết quả giữa các nghiên cứu. Các đặc trưng động lực học của kết cấu được cho trong Bảng 1, trong đó ba chu kỳ dao động tự nhiên đầu tiên lần lượt là $T_1 = 0.88s$; $T_2 = 0.34s$; $T_3 = 0.21s$. Tổng số cột trong một mặt bằng sàn là 42 cột. Thời gian phân tích đáp ứng được lấy 25 chu kỳ thứ 1 và bước thời gian phân tích được lấy $5 \Delta t=0,1s/8=0,00125s$. Để kết cấu làm việc trong miền chảy dẻo của vật liệu, cho kết cấu chịu tải trọng động đất Kobe có gia tốc đỉnh (PGA) $\ddot{x}_g = 0.833g$ ($g = 9.81m/s^2$) và có giới hạn đàn hồi f_i^p như

Bảng 1. Đáp ứng của kết cấu 20 tầng được khảo sát với 4 trường hợp: (A) - vật liệu chỉ làm việc trong miền đàn hồi và không được điều khiển bằng VFD; (B) - vật liệu làm việc trong miền chảy dẻo và không được điều khiển; (C) - vật liệu chỉ làm việc trong miền đàn hồi và được điều khiển; và (D) - vật liệu làm việc trong miền chảy dẻo và được điều khiển bằng VFD với các thông số điều khiển được lấy như [4].

$$\begin{cases} C_i^{VFD} = 10c_i \\ \alpha_i = 1 \end{cases}$$

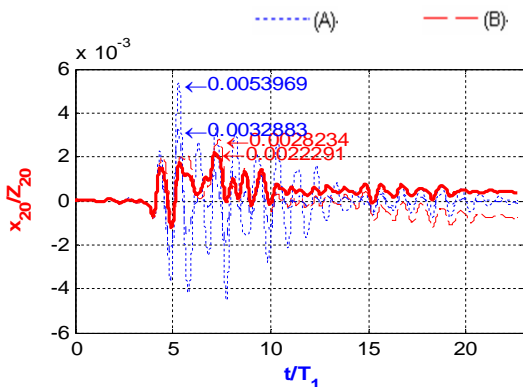
Trong đó c_i là hệ số cản trong ma trận cản C.

Kết quả đáp ứng đàn hồi của kết cấu được lấy từ kết quả của phân tích đàn dẻo nhưng sử dụng $f_i^p = \infty$.

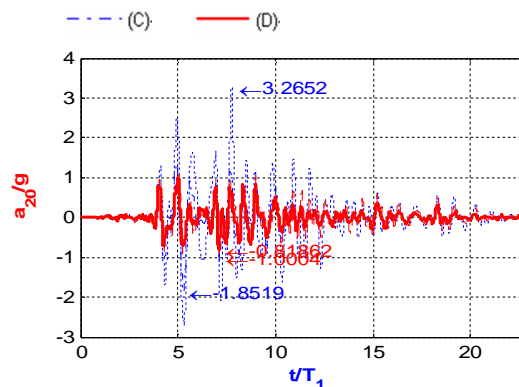
Bảng 1. Các đặc trưng động lực học kết cấu 20 tầng

Tầng i^{th}	Số hiệu tiết diện	$m_i (\times 10^3 \text{ kg})$	$k_i (\text{kN/cm})$	$f_i^p (\times 10^3 \text{ kN})$	Cao độ tầng $Z_i (\text{m})$
1 st	W24x335	563	30 173	18,40	5,49
2 nd	W24x335	552	80 400	18,40	9,45
3 rd	W24x335	552	80 400	18,40	13,41
4 th	W24x335	552	80 400	18,40	17,37
5 th	W24x229	552	51 686	12,56	21,33
6 th	W24x229	552	51 686	12,56	25,29
7 th	W24x229	552	51 686	12,56	29,25
8 th	W24x229	552	51 686	12,56	33,21
9 th	W24x229	552	51 686	12,56	37,17
10 th	W24x229	552	51 686	12,56	41,13
11 th	W24x192	552	42 295	10,53	45,09
12 th	W24x192	552	42 295	10,53	49,05
13 th	W24x192	552	42 295	10,53	53,01
14 th	W24x131	552	27 160	7,20	56,97
15 th	W24x131	552	27 160	7,20	60,93
16 th	W24x131	552	27 160	7,20	64,89
17 th	W24x117	552	23 917	6,43	68,85
18 th	W24x117	552	23 917	6,43	72,81
19 th	W24x84	552	16 012	4,62	76,77
20 th	W24x84	584	16 012	4,62	80,73

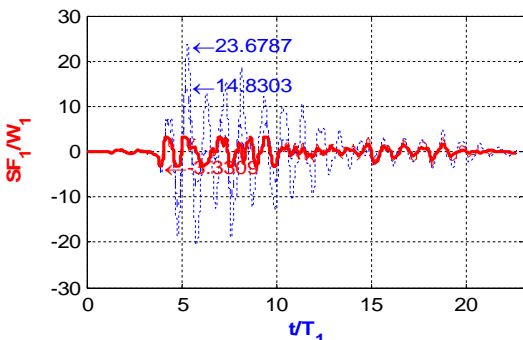
3.2. Đáp ứng của kết cấu với tải trọng động đất Kobe



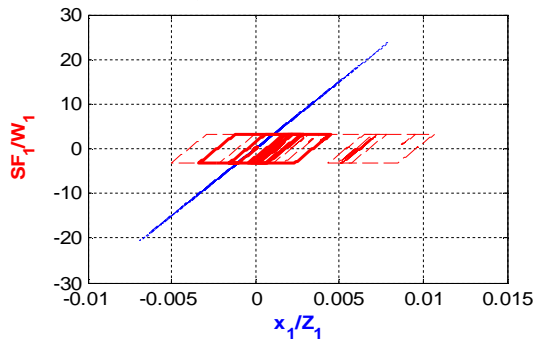
Hình 5. Đáp ứng chuyển vị tầng đỉnh x_{20} so với cao tầng tầng đỉnh Z_{20}



Hình 6. Đáp ứng gia tốc tầng đỉnh a_{20} so với gia tốc trọng trường g

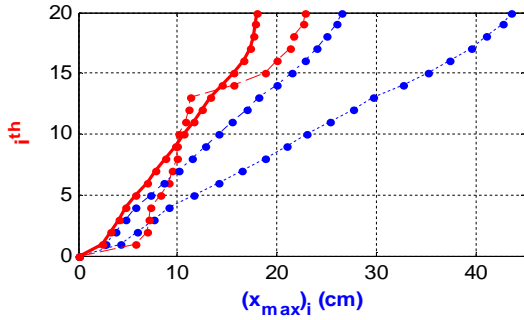


Hình 7. Đáp ứng lực cắt chân cột tầng 1st SF_1

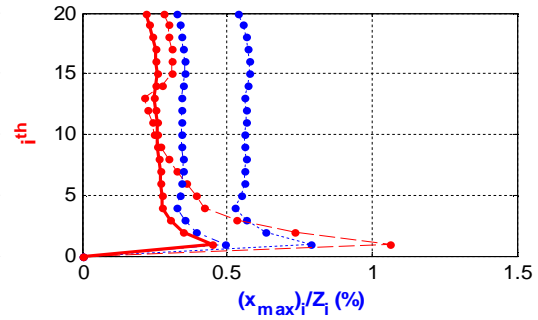


Hình 8. Chu trình tiêu tán năng lượng do biến dạng

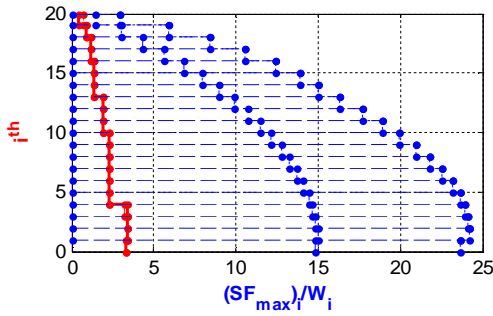
so với trọng lượng tầng 1 W_1



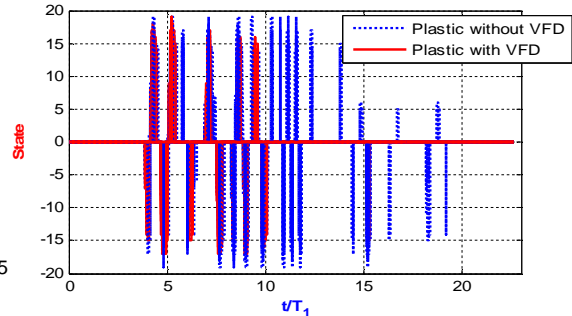
Hình 9. Đáp ứng chuyển vị lớn nhất các tầng



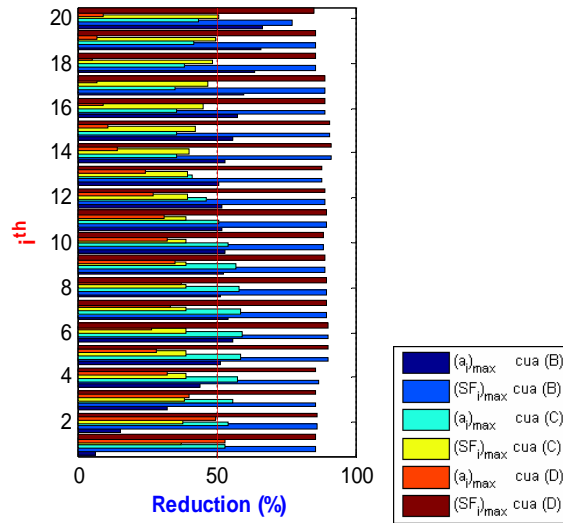
Hình 10. Đáp ứng chuyển vị lớn nhất so với cao độ



Hình 11. Đáp ứng lực cắt chân cột các tầng



Hình 12. Trạng thái chảy dẻo các tầng theo thời gian



Hình 13. Độ giảm đáp ứng gia tốc lớn nhất $(a)_{max}$ và lực cắt lớn nhất $(SF)_{max}$ với 3 trường hợp (B), (C) và (D)

Xét về đáp ứng chuyển vị, sau động đất, các đáp ứng chuyển vị tầng đỉnh khi phân tích dẻo chỉ ra rằng kết cấu phải chịu một biến dạng không hồi phục và cân bằng ở một vị trí mới (Hình 5) cho cả trường hợp không điều khiển (B) và có điều khiển bằng hệ cân VFD (D). Trường hợp kết cấu có sử dụng hệ cân VFD (D) cho biến dạng dư là nhỏ hơn so với trường hợp không sử dụng VFD (B). Bên cạnh đó, khi kết cấu 20 tầng chịu tải trọng động đất đủ lớn để cột làm việc trong miền dẻo, đáp ứng chuyển vị lớn nhất ở các tầng 1, 2, và 3 (Hình 9 và Hình 10) khi chảy dẻo ở trường hợp (B) luôn lớn hơn chuyển vị của kết cấu làm việc đàn hồi (A) và (C). Chuyển vị lớn nhất tầng 3 này là tích lũy chuyển vị của các tầng 1 và 2 bên dưới. Hơn nữa, kết cấu khi sử dụng VFD và được phân tích đàn dẻo (D) cho kết quả giảm chuyển vị lớn nhất ở các tầng (Hình 9) tốt hơn cả kết cấu khi sử dụng VFD và được phân tích đàn hồi (C) do biến dạng dẻo cũng đóng vai trò là một hệ cân tiêu tán năng lượng. Mặt khác, từ biểu đồ chuyển vị lớn nhất so với cao độ tầng (Hình 10), độ lệch chuyển vị tầng 1st là lớn nhất vì tầng 1st có độ cứng bé hơn độ cứng các tầng từ 2nd đến 13th. Vì vậy, khi dao động, các tầng phía trên là một khối. Điều này làm lực cắt dồn về tầng một và làm cho kết cấu dễ sập đổ. Để

khắc phục tình trạng này, kết cấu có thể {1} dùng phương pháp truyền thống là tăng độ cứng chân cột ở tầng 1st hoặc {2} tăng số lượng hệ cản VFD ở tầng này để sinh ra lực kháng chuyển vị ngang. Xét về lực cắt trong chân cột, chu trình tiêu tán năng lượng và trạng thái chảy dẻo, khi kết cấu có sử dụng VFD, năng lượng mà kết cấu phải tiêu tán vào biến dạng dẻo bị giảm đi đáng kể (Hình 8) và chảy dẻo ở chân cột các tầng cũng ít hơn (Hình 12) vì VFD đã tiêu tán một phần năng lượng động đất. Và không như đáp ứng lực cắt chân cột tầng 1st trong ứng xử đàn hồi, lực cắt này trong ứng xử đàn dẻo không tăng mãi mãi và không bao giờ vượt quá giá trị f_p (Hình 7, Hình 8 và Hình 11). Mặt khác, gia tốc của tầng đỉnh khi cột bị chảy dẻo giảm đáng kể so với gia tốc trong trường hợp đàn hồi (Hình 6) do kết cấu “mềm” hơn. Cuối cùng, đối với kết cấu 20 tầng (cao tầng), nhìn chung hệ cản VFD được điều khiển bị động (D) cho hiệu quả giảm đáp ứng lực cắt lớn nhất và gia tốc lớn nhất ở mức chấp nhận được (Hình 13).

4. Kết luận

Khi các công trình trong thực tế chịu tải trọng động đất, chúng nếu không bị sụp đổ thì bị biến dạng và cân bằng ở một vị trí mới và điều này cũng được chứng minh trong kết quả tính toán số của bài báo bằng một biến dạng dư không hồi phục. Hơn nữa, đáp ứng của kết cấu sử dụng hệ cản VFD khi chịu các tải trọng động đất không những phụ thuộc vào tham số điều khiển của hệ cản, vào độ cứng kết cấu (khi phân tích đàn hồi) mà còn phụ thuộc vào giới hạn chảy dẻo của vật liệu làm cột. Do đó, mặc dù mức độ tính toán cho việc xét đến biến dạng dẻo là phức tạp hơn so với chỉ xét đàn hồi (bước thời gian phải đủ nhỏ, khối lượng tính toán lớn hơn) nhưng điều này là cần thiết cho việc khảo sát và đánh giá toàn diện độ giảm đáp ứng cho bài toán điều khiển dao động kết cấu sử dụng hệ cản VFD chịu tải trọng động đất lớn. Nhìn chung, đối với kết cấu 20 tầng, VFD không chỉ làm giảm biến dạng chảy dẻo cho cột, giảm chuyển vị lớn nhất trong các tầng, mà còn có nhiệm vụ làm giảm độ lệch chuyển vị so với cao độ tầng ở các tầng có độ cứng chuyển vị ngang bé.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. **Anil K.Chopra** (2012) – *Dynamics of Structures*, 4th Editor – Prentice Hall Press.
2. **Bùi Đông Hoàn, Nguyễn Hữu Anh Tuấn, Chu Quốc Thắng** (2006) – Ảnh hưởng của sự phân bố hệ cản chất lỏng nhớt đến khả năng kháng chấn của kết cấu – Tạp chí phát triển KH&CN, Tập 9, Số 4.
3. **Chu Quốc Thắng, Phạm Nhân Hòa, Đặng Duy Khanh** (2010) – Điều khiển bị động hệ cản kết hợp giữa hệ cản có độ cứng thay đổi và hệ cản chất lỏng nhớt – Hội nghị Khoa học toàn quốc Cơ học Vật rắn biến dạng lần X – Thái Nguyên.
4. **Phạm Nhân Hòa, Hồ Việt Tiên Phước, Chu Quốc Thắng** (2013) – Điều khiển dao động hai kết cấu liền kề được trang bị hệ cản chất lỏng nhớt và hệ cản ma sát – Tạp chí Khoa học công nghệ xây dựng, Vol. 3+4, pp. 8-17
5. **Lê Minh Thành, Phạm Nhân Hòa, Nguyễn Đình Hùng, Lê Hữu Huy, Chu Quốc Thắng** (2012) – Phương pháp số cho bài toán kết cấu phi tuyến vật liệu chịu tải trọng động đất – Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ IX, Vol.1, Động Lực Học Công Trình – Hà Nội.
6. **M. D. Symans, M. C. Constantinou** – Passive fluid viscous damping systems for seismic energy dissipation – ISET Journal Earthquake Technology, Paper No. 382, Vol. 35, No. 4, Dec 1998, pp.185-206.
7. **M. D. Symans, M. C. Constantinou, D. P. Taylor, and K. D. Garnjost** – Semi-active fluid viscous dampers for seismic response control – <http://www.taylordevices.com/Tech-Paper-archives/literature-pdf/>
8. **Robert J. MCNAMARA and Douglas P. Taylor** (2003) – Fluid viscous dampers for high-rise buildings – *The structural design of tall and special buildings* – Vol.12, pp.145–154
9. **Y.Ohtori, R. E. Christenson, B. F. Spencer** (2004) – Benchmark Control Problems for Seismically Excited Nonlinear Buildings – *Journal of Engineering Mechanics* © ASCE

Ngày nhận bài: 30/12/2013.

Seismic resistance of non-linear 20-story building using passive viscous fluid dampers with consideration to nonlinearity of material

MEng. PHAM NHAN HOA, A/Prof.Dr. CHU QUOC THANG, MEng. LE MINH THANH

The paper presents the mechanic model (assumed as a shear frame model), differential equation of motion, and algorithm to calculate the response of a 2D frame where material has a perfect elastic-plastic behavior and the frame is equipped with passive viscous fluid dampers (VFD). A numerical example is a 20 storey plane steel frame subjected to the Kobe earthquake. The structure is analyzed for four cases: elastic behavior, inelastic behavior, with VFD and without VFD. The results from example of numerical analysis serve to compare the effectiveness in reducing response of a structure using passive VFD and elastic behavior with that of a structure using passive VFD and inelastic behavior.

