

Ảnh hưởng của các dạng dao động cao lên ứng xử động của kết cấu nhà nhiều tầng chịu động đất

The influence of higher mode shapes on dynamic responses of multi-storey building structures to ground acceleration

> **KS NGUYỄN DUY HẠ^{1*}, TS PHẠM ĐÌNH TRUNG²**

¹HVCH Trường Đại học Mở TP.HCM, *Email: duyha1905@gmail.com

²Khoa Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Miền Trung

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của các dạng dao động cao lên ứng xử động của kết cấu nhà nhiều tầng chịu gia tốc nền của động đất. Kết cấu nhà nhiều tầng được chọn khảo sát là mô hình của các tòa nhà 40 tầng, 50 tầng với mặt bằng chữ nhật và chữ L được rời rạc hóa bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong bài toán phân tích ứng xử động bởi phần mềm ETABS với các gia tốc nền của trận động đất Elcentro, Santa và Lucerne. Phương pháp chồng chất dao động được áp dụng để tìm ứng xử động thông qua các đại lượng chuyển vị động, mô men chân cột và lực cắt đáy trên toàn miền thời gian. Kết quả số cho thấy rằng phản ứng động vẫn gia tăng khi có sự hiện diện của nhiều dạng dao động cao.

Từ khóa: Kết cấu nhà nhiều tầng; phân tích động lực học; gia tốc nền động đất; dạng dao động cao.

ABSTRACT

The objective of this paper is to study the influence of higher mode shapes on dynamic responses of multi-storey building structures subjected to ground acceleration of earthquakes. The selected structure in this investigation is a analytical model of a 40-storey, 50-storey building with various plan discretized by finite element method in dynamic analysis by ETABS software and the ground acceleration of the Elcentro, Santa and Lucerne earthquakes used to dynamic analysis. The method of modal superposition is applied to derive the dynamic response as displacement, bending moment and shear force in the time domain. The numerical results show that the dynamic responses are still increasing in higher mode shapes considered.

Keywords: Multi-storey building structure; dynamic analysis; ground acceleration of earthquake; higher mode shapes.

1. GIỚI THIỆU

Nhà nhiều tầng ngày càng được xây dựng phổ biến và hầu hết tại các thành phố lớn trên thế giới. Trước hết, cùng với sự phát triển kinh tế dẫn đến nhu cầu chỗ ở, văn phòng làm việc, khách sạn... cũng tăng theo. Một số công trình nhà nhiều tầng còn là biểu tượng thịnh vượng của vùng đó. Đặc trưng chủ yếu của nhà nhiều tầng là số tầng nhiều, chiều cao lớn, trọng lượng nặng, do vậy chịu tác động của tải trọng khá lớn do ảnh hưởng của trọng lượng bản thân và tác động của môi trường tự nhiên. Bài toán thiết kế kết cấu cho nhà nhiều tầng luôn là đề tài thu hút sự quan tâm của các kỹ sư thiết kế kết cấu và kể cả các nhà khoa học. Một phần rất quan trọng bài toán này khi nhà có số tầng tương đối nhiều, kết cấu của nó chịu tải trọng ngang do gió bão và động đất là rất đáng kể và tải trọng này trở thành quan trọng trong thiết kế [8,10,11]. Trong thực tiễn, động đất hay gió bão thường có tính chất tác dụng động và việc thiết kế quy

đổi sang dạng tải trọng tĩnh ngang tương đương có xét đến các thành phần tương ứng chỉ là động tác làm gần đúng do cũng chỉ xem là tác dụng tĩnh. Do vậy, bài toán kết cấu nhà nhiều tầng chịu tải trọng ngang có ý nghĩa cả về thực tiễn và học thuật và sự phân tích động lực học nên được thực hiện để thu được lời giải gần hơn với ứng xử thật của kết cấu. Tác động của các tải trọng ngang đối với ứng xử động lực học kết cấu nhà cao tầng luôn là đề tài được các nhà khoa học trong và ngoài nước quan tâm nghiên cứu [2,4,5,7] cả về vật lý là tìm kiếm mô hình phù hợp để mô tả kết cấu và nguyên nhân thì phương pháp tính cũng rất được quan tâm nhiều.

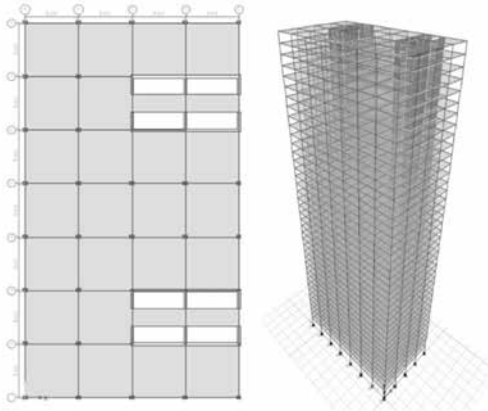
Có khá nhiều phương pháp giải trong phân tích động lực học nhà cao tầng chịu tải trọng ngang, một trong những phương pháp được sử dụng tương đối phổ biến đó là phương pháp chồng chất các dạng dao động riêng của kết cấu được dùng để giải quyết bài toán này. Trong đó, kết quả cuối cùng là do tổng hợp của nhiều

dạng dao động riêng và vì vậy số lượng dạng dao động riêng có ảnh hưởng đến kết quả ứng xử động lực học của hệ khi chịu các tải trọng khác nhau [1,3,6,9]. Hiện nay, chỉ có một số lượng ít dạng dao động riêng thấp (mode có tần số thấp) được quan tâm trong bài toán này... kết quả ứng xử động lực học thu được chỉ là gần đúng đặc biệt là các kết cấu có số tầng nhiều và tải trọng tác dụng nhanh thì các dạng dao động cao có thể tham gia đáng kể vào kết quả cuối cùng. Hơn nữa, số lượng dạng dao động được quan tâm tùy thuộc vào sự chú quan của người phân tích hoặc lấy gần đúng theo các tiêu chuẩn... nên có thể chưa thật sự đầy đủ.

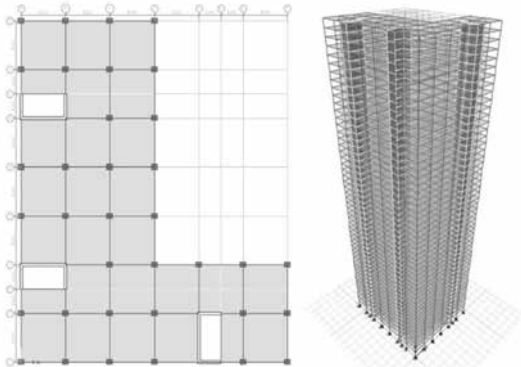
Do đó, hướng nghiên cứu của bài báo này là khảo sát ảnh hưởng của các dạng dao động cao lên ứng xử động của kết cấu nhà nhiều tầng chịu gia tốc nền của động đất là rất cần thiết, góp phần làm rõ ảnh hưởng của tải trọng ngang động tác dụng lên công trình nhà nhiều tầng. Từ đó khẳng định hoặc bổ sung việc tính toán số lượng các dao động riêng phải xét trong bài toán kết cấu nhà nhiều tầng chịu tải trọng ngang. Kết cấu được lựa chọn có số tầng từ 40 đến 50 tầng và dạng mặt bằng chữ nhật và chữ L, dạng quy mô về số tầng và mặt bằng này do sự phổ biến tại nhiều đô thị lớn ở Việt Nam.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Phần này giới thiệu về sơ đồ kết cấu nhà nhiều tầng, dữ liệu đầu vào của gia tốc nền động đất, phương pháp phân tích ứng xử động lực học và cách khai báo trong phần mềm ETABS để thực hiện bài toán này. Kết cấu nhà cao tầng khảo sát là hai dạng mặt bằng phổ biến hiện nay là dạng mặt bằng hình chữ nhật cao 40 tầng và mặt bằng hình chữ L cao 50 tầng với kết cấu bê tông cốt thép được mô tả như hình 1 và hình 2. Các thông số hình học của nhà được mô tả như bảng 1 và 2.



Hình 1. Kết cấu bê tông cốt thép 40 tầng



Hình 2. Kết cấu bê tông cốt thép 50 tầng với mặt bằng chữ L

Bảng 1. Chi tiết hình học và tiết diện của kết cấu dạng mặt bằng hình chữ nhật (dài 56m x rộng 32m) như hình 1

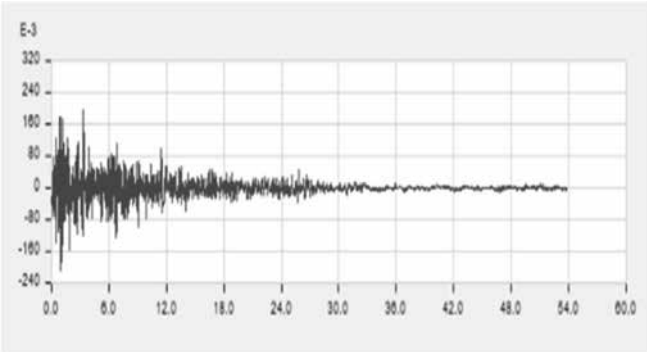
TẦNG	CỘT NHÀ 40 TẦNG	DẦM	VÁCH	SÀN
1 ĐẾN 10	C800X1000B40	D500X800B30	V500B40	S200B30
11 ĐẾN 20	C600X800B40	D500X800B30	V500B40	S200B30
21 ĐẾN 30	C400X600B40	D500X800B30	V500B40	S200B30
31 ĐẾN 40	C300X500B40	D500X800B30	V500B40	S200B30

Bảng 2. Chi tiết hình học và tiết diện của kết cấu dạng mặt bằng hình chữ L (dài 56m x rộng 48m) như hình 2

TẦNG	CỘT NHÀ 50 TẦNG	DẦM	VÁCH	SÀN
1 ĐẾN 10	C1000X1200B40	D500X800B30	V500B40	S200B30
11 ĐẾN 20	C800X1000B40	D500X800B30	V500B40	S200B30
21 ĐẾN 30	C600X800B40	D500X800B30	V500B40	S200B30
31 ĐẾN 40	C400X600B40	D500X800B30	V500B40	S200B30
41 ĐẾN 50	C300X500B40	D500X800B30	V500B40	S200B30

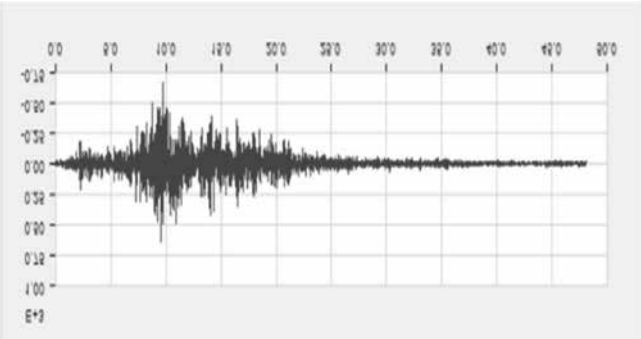
Về gia tốc nền động đất, động đất là hiện tượng vỏ trái đất rung động đột ngột. Độ mạnh yếu của trận động đất được xác định bằng độ Richter do sự dịch chuyển của các đứt gãy hay các mảng thạch quyển dưới mặt đất và truyền qua các khoảng cách lớn. Trận động đất thường kéo dài vài phút, thường ít khi quá 3 phút. Tác hại do động đất gây ra có thể kể ra như: tác động trực tiếp gây ra sự rung cuộn mặt đất, gây ra sạt lở đất, lở tuyết, gây ra nứt vỡ, sụp đổ các công trình xây dựng; Phá hủy các đường dây điện, hệ thống ống dẫn khí gây ra hỏa hoạn; Làm lở đất, biến dạng đáy biển gây ra sóng thần có thể tràn qua các đại dương và tàn phá đất liền; Có thể kích hoạt các núi lửa hoạt động... Khi động đất xảy ra, sự phản ứng của các công trình xây dựng với chuyển động của đất nền chính là nguyên nhân chủ yếu gây nên sự mất an toàn...

Dưới góc nhìn của người thiết kế kết cấu công trình xây dựng, đặc trưng quan trọng của trận động đất là ghi nhận bằng gia tốc nền; đại lượng này quyết định đến lực quán tính ngang tác dụng lên kết cấu và làm cho kết cấu chịu thêm tải trọng ngoài, dẫn đến nội



Gia tốc nền El-centro

Hình 3. Đồ thị gia tốc nền của hai trận động đất



Gia tốc nền Lucerne

lực và chuyển vị có thể tăng theo và gây nguy hiểm hơn cho kết cấu. Gia tốc nền được máy gia tốc kế hoặc các thiết bị liên quan được sử dụng để ghi nhận lại trong một trận động đất. Các thiết bị này ghi lại gia tốc nền chuyển động theo thời gian bằng các giá trị rời rạc với bước thời gian nhất định thông thường là 0,02s, tần số 50 Hz, rồi sau đó tập hợp lại thành bằng gia tốc nền được nghiên cứu và sử dụng trong nhiều lĩnh vực trong đó có phân tích ứng xử động của kết cấu. Bài báo dùng gia tốc nền của hai trận động đất được ghi nhận số liệu rõ ràng và có độ lớn vừa phải là Elcentro năm 1940 và Lucerne. Đồ thị theo thời gian của gia tốc nền từ hai trận động đất này được cho trên **hình 3**.

Khi kết cấu chịu động đất, xem kết cấu như hệ nhiều bậc tự do chịu tác dụng của tải trọng động thay đổi theo thời gian. Phương trình vi phân chủ đạo tính toán động lực học cho khung nhà nhiều tầng chịu tải trọng động như sau

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{K} \mathbf{v} = \mathbf{P}_t \quad (1)$$

trong đó $\mathbf{M}$ là ma trận khối lượng tổng thể, $\mathbf{C}$ là ma trận lực cản, $\mathbf{K}$ là ma trận độ cứng của kết cấu, các vector $\ddot{\mathbf{v}}$, $\dot{\mathbf{v}}$ và $\mathbf{v}$ phụ thuộc thời gian, đó là các vector chuyển vị, vận tốc, gia tốc của kết cấu và $\mathbf{P}_t$ là vector lực tổng thể gây ra. Đây là lý thuyết tổng quát, thực tế khi kết cấu phức tạp về số lượng phần tử thì việc thiết lập phương trình chuyển động này thường rất công phu và khó khăn. Phương pháp dùng để phân tích phản ứng động được dùng là phương pháp chống chất dạng dao động (*modes*). Nội dung chính của phương pháp này là biến đổi phương trình (1) là một hệ n phương trình vi phân liên hệ (coupled equation) thành dạng hệ có n phương trình vi

phân tách rời (uncoupled equation), mỗi một phương trình vi phân chứa một ẩn số, mỗi ẩn số đó tương ứng với một dạng dao động.

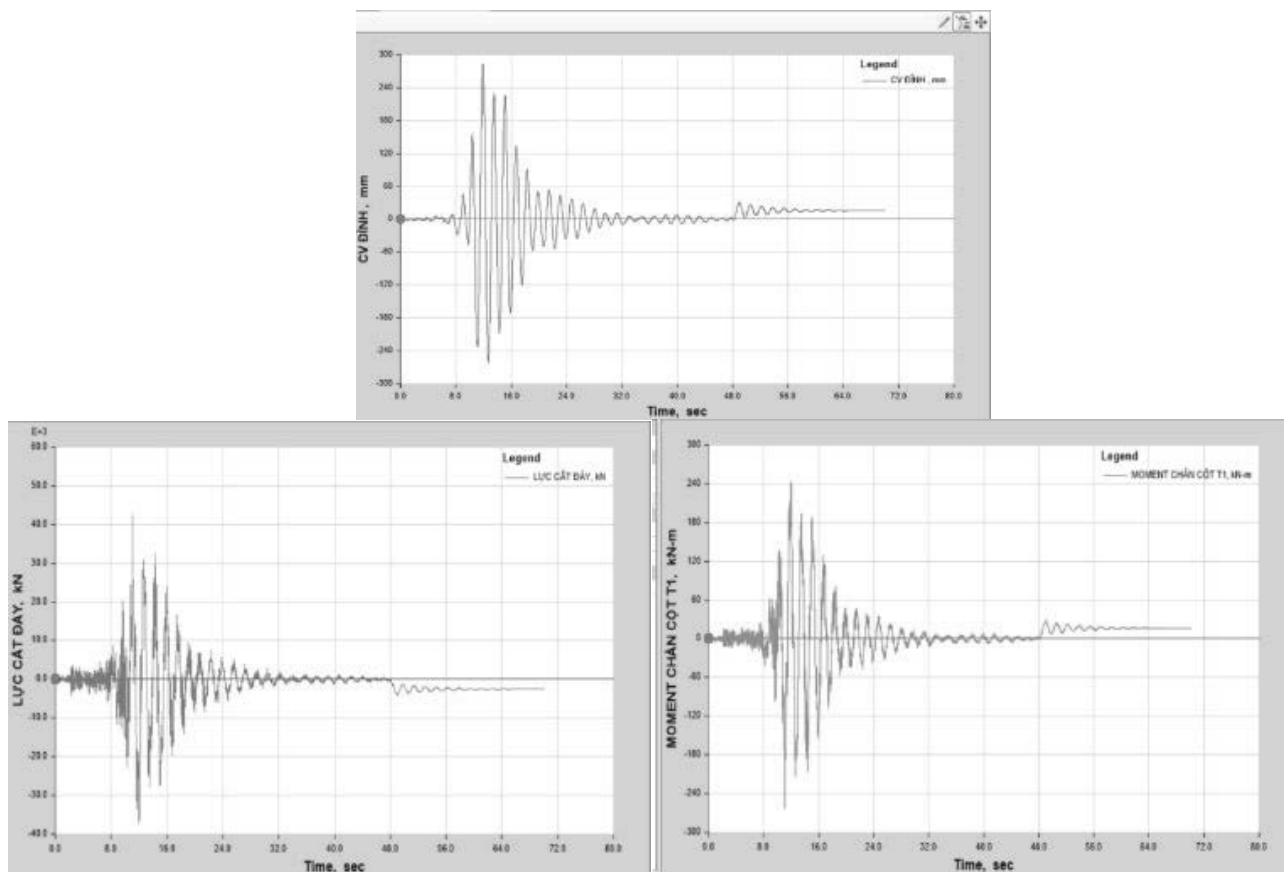
$$\mathbf{v} = \phi_1 \mathbf{Y}_1 + \phi_2 \mathbf{Y}_2 + \phi_3 \mathbf{Y}_3 + \dots$$

Hình 4. Chuyển vị toàn phần của hệ được tách thành tổng của tất cả các dạng dao động

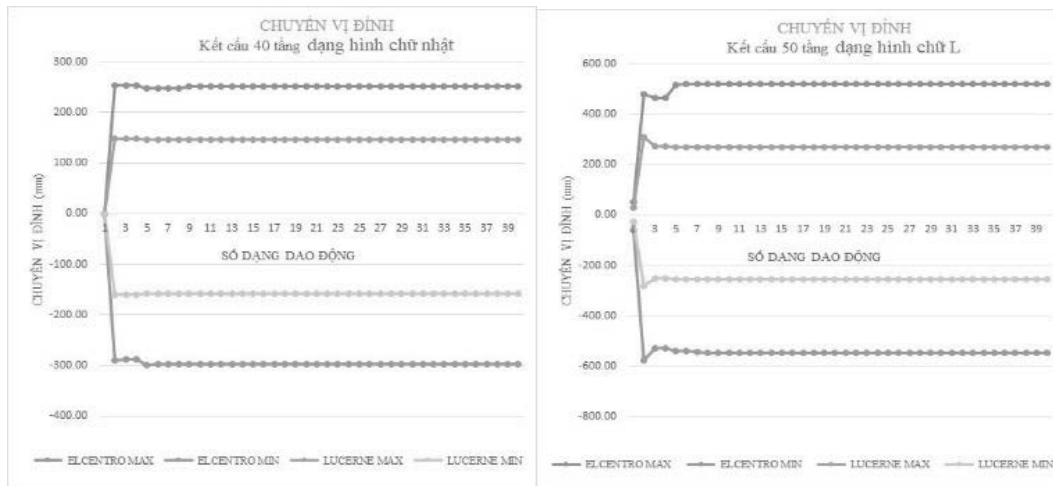
Để dùng phương pháp trên ta phải tìm hiểu tọa độ chuẩn là tọa độ suy rộng của các dạng dao động, sau đó thiết lập phương trình chuyển động tách rời của hệ Vectơ chuyển vị $[\mathbf{v}]$ của hệ N bậc tự do có thể tạo ra bằng cách tổ hợp tuyến tính của N vectơ cơ sở đã biết nào đó. Tuy nhiên, nếu chọn các vectơ cơ sở là các dạng chính (*Mode Shapes*) của dao động tự do thì sẽ có nhiều ưu điểm do tính trực giao của chúng. Các dạng chính đóng vai trò tương tự như các hàm lượng giác của chuỗi *Fourier*, và chuyển vị của hệ có thể xấp xỉ khá tốt với một số số hạng của chuỗi như trên **hình 4**, hầu hết các tài liệu tham khảo về động lực học đều có trình bày [6,7]. Vectơ chuyển vị ứng với hàm dạng $[\boldsymbol{\varphi}_n]$ là $[\hat{\mathbf{v}}_n]$ xác định bởi công thức sau

$$[\hat{\mathbf{v}}_n] = [\boldsymbol{\varphi}_n] \mathbf{Y}_n(t) \quad (2)$$

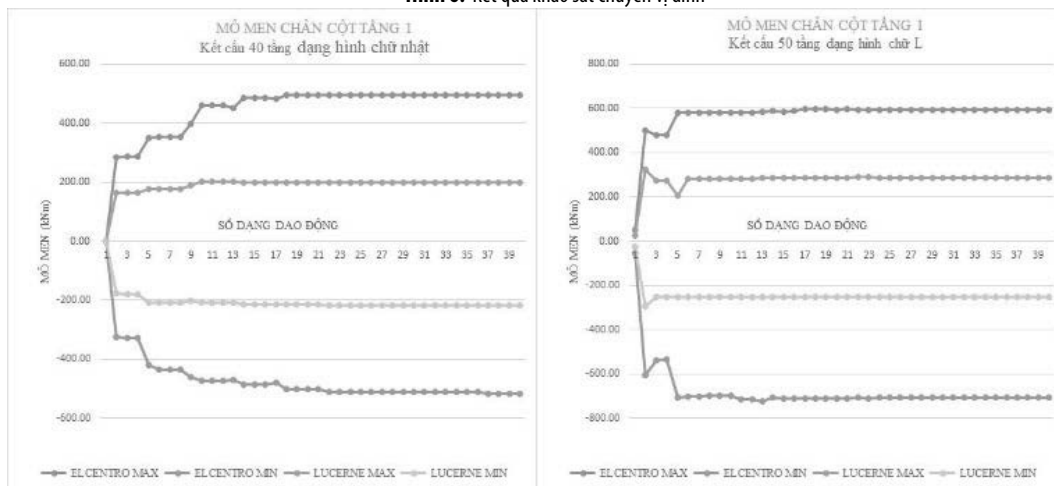
trong đó: $\mathbf{Y}_n(t)$ là tọa độ suy rộng ứng với hàm dạng $[\boldsymbol{\varphi}_n]$. Chuyển vị toàn phần $[\mathbf{v}]$ được phân tích thành tổng các dạng chính như sau:



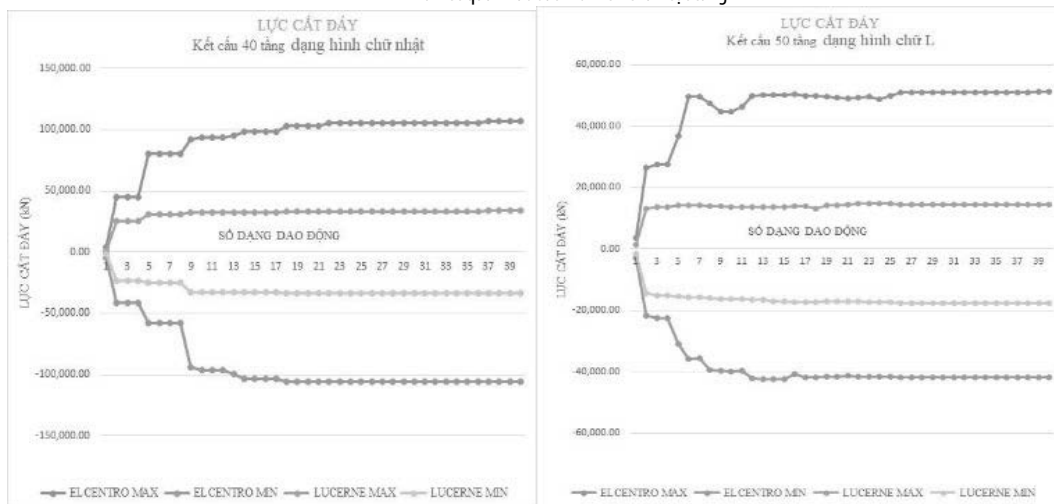
Hình 5. Chuyển vị, lực cắt và mô men theo thời gian



Hình 6. Kết quả khảo sát chuyển vị đỉnh



Hình 7. Kết quả khảo sát mô men chân cột tầng 1



Hình 8. Kết quả khảo sát Lực cắt đáy

$$[v] = [\phi_1]Y_1 + [\phi_2]Y_2 + \dots + [\phi_n]Y_n = \sum_{n=1}^N [\phi_n][Y_n] \quad (3)$$

Dạng ma trận: $[v] = [\phi][Y(t)]$ với $[\phi]$: ma trận vuông của các dạng chính và $[Y]$: véc tơ các tọa độ suy rộng, cũng được gọi là các tọa độ chuẩn. Các thành phần Y_n của véc tơ $[Y]$ có thể tìm nhờ tính trực giao của các hàm dạng bằng cách nhân 2 vế của (2) với $[\phi]^T[M]$ được

$$[\phi_n]^T[M][v] = [\phi_n]^T[M][\phi][Y] \quad (4)$$

áp dụng tính trực giao $[\phi_i]^T[M][\phi_j] = 0$ với $i \neq j$, vế phải (4) được triển khai thành

$$[\phi_n]^T[M][\phi][Y] = [\phi_n]^T[M][\phi_1][Y_1] + [\phi_n]^T[M][\phi_2][Y_2] + \dots + [\phi_n]^T[M][\phi_n][Y_n] = [\phi_n]^T[M][\phi_n][Y_n] \quad (5)$$

Phương trình chuyển động tách rời của hệ có cản được thiết lập từ (1) bằng cách biến đổi và lời dùng tính trực giao

$$[\phi_n]^T [M] [\dot{Y}] [\phi] + [\phi_n]^T [C] [\dot{Y}] [\phi] + [\phi_n]^T [K] [Y] [\phi] = [\phi_n]^T [p(t)] \quad (6)$$

Phương trình (6) trở thành:

$$M_n \ddot{Y}_n + M_n \dot{Y}_n + M_n Y_n = P_n(t) \quad (7)$$

Giải phương trình (7) là phương trình chuyển động tách rời (*uncoupled*) và tổng hợp các dạng dao động tìm được lời giải của phương trình (1) ban đầu. Phép biến đổi sang tọa độ chuẩn đã biến hệ N phương trình vi phân liên quan với nhau thành N phương trình tách biệt. Đó chính là ưu điểm cơ bản của phương pháp chống chắt các dạng dao động. Ngoài ra, do tính hội tụ cao nên thường dùng chỉ cần chống chắt một số mode có tần số thấp. Trong phần mềm ETABS, bài toán này được giải quyết toàn bộ khi khai báo đặc trưng kết cấu và gia tốc nền và phương pháp giải phương trình (1) theo cơ sở lý thuyết của phương pháp chống chắt các dạng dao động như vừa trình bày. Tuy nhiên, sự hội tụ của lời giải tùy thuộc vào số lượng các dạng dao động tham gia và sự hội tụ của nghiệm ít được quan tâm. Bài báo dùng cơ sở lý thuyết này và áp dụng phần mềm ETABS để đánh giá kết quả và làm rõ sự tham gia của các dạng dao động cao vào phản ứng động của hệ.

3. KẾT QUẢ SỐ

Kết cấu nhà nhiều tầng dùng để phân tích là hai sơ đồ mô tả như phần 2, hai dạng mặt bằng khác nhau, chữ nhật và chữ L và dữ liệu động đất là gia tốc nền Elcentro và Lucerne, số lượng dạng dao động được khảo sát lần lượt từ 1, 2, 3, ..., cho đến 40 dạng. Các thông số hình học của nhà được mô tả như **bảng 1** và **2**. Đại lượng đánh giá là chuyển vị đỉnh, lực cắt đáy và mô men chân cột. Những đại lượng này biến thiên theo thời gian do gia tốc nền gây ra trong kết cấu và các đồ thị điển hình như trên **hình 5**. Phản ứng động lớn nhất thông qua ba đại lượng này được lọc và thể hiện theo số lượng dạng dao động được vẽ trên các đồ thị trên **hình 6, 7** và **8**.

Để đạt kết quả này, bài báo đã phân tích 240 bài toán cho các trường hợp khác, cho 02 dạng kết cấu và 02 trận động đất với số dạng dao động lần lượt là 1, 2, 3, ..., 40; tốn khá nhiều tài nguyên máy tính và thời gian phân tích vì qui mô kết cấu lớn. Đánh giá kết quả từ khảo sát như trên cho thấy rằng:

- Chuyển vị đỉnh của cả 02 kết cấu hội tụ tốt với một vài dạng dao động ban đầu, một cách sơ bộ có thể phân tích khoảng 10 dạng dao động là đủ, ... như trên hình 6.
- Mô men động hội tụ nhưng chậm hơn chuyển vị như trên hình 7, mô men vẫn còn tăng khi khảo sát khoảng 10 dạng dao động... và xem như hội tụ khi số dạng xấp xỉ 20; điều này cho thấy nếu chỉ quan tâm đến ít dạng dao động thì chưa đủ an toàn.
- Lực cắt động hội tụ chậm hơn chuyển vị rất nhiều và số lượng dạng dao động phải hơn 20...

Tính định tính của các nhận xét này có thể suy đoán được nhưng thường cho bài toán tính với số lượng dạng dao động khá ít, khoảng 3-5 dạng... tuy nhiên bài toán ứng xử động thì kết quả này cho thấy phải quan tâm nhiều dạng dao động hơn để thu được kết quả phù hợp hơn.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã khảo sát ảnh hưởng của các dạng dao động cao lên ứng xử động của kết cấu nhà nhiều tầng chịu gia tốc nền động đất. Mô hình nhà 40 tầng và 50 tầng có dạng mặt bằng phổ biến là hình chữ nhật và hình chữ L dưới tác động của trận động đất Elcentro và Lucerne. Kết quả cho thấy rằng sự ảnh hưởng của

các dạng dao động cao lên ứng xử động của kết cấu nhà nhiều tầng chịu động đất là đáng kể và có ảnh hưởng lớn đến giá trị nội lực như lực cắt đáy, mô men chân cột tầng 1... số lượng dạng dao động cần khảo sát đủ nhiều lên hàng vài chục để lời giải có thể hội tụ. Điều này cho thấy cần có sự quan tâm hơn đến các dạng dao động cao trong quá trình thiết kế kết cấu nhà nhiều tầng chịu tác động của động đất. Tuy vậy, phạm vi bài báo này mới khảo sát 02 mô hình kết cấu và 02 dữ liệu gia tốc nền động đất đã ghi nhận nên cần có thêm các nghiên cứu ở nhiều mô hình kết cấu khác cũng như nhiều dữ liệu động đất khác để có thể khẳng định mạnh hơn về ảnh hưởng này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Do KQ and Nguyen TP (2010) Các phương pháp số trong động lực học kết cấu. Available at: <https://lib.hcmut.edu.vn/cac-phuong-phap-so-trong-dong-luc-hoc-ket-cau> (Accessed: 10 January 2022).
2. Le V. Binh (2011) 'Phân tích các giải pháp kết cấu trong nhà nhiều tầng chịu động đất', Tạp chí khoa học ĐH Mở Thành phố Hồ Chí Minh - [Preprint]. Available at: <https://vjol.info.vn/index.php/DHM-KTCN/article/view/54127> (Accessed: 11 January 2022).
3. Nguyễn Anh Dũng, Phương pháp xác định chu kỳ dao động riêng của nhà nhiều tầng, Tạp chí khoa học & công nghệ nông nghiệp, Tập 3(2) - 2019.
4. Nguyen DM, T. (2010) 'phương pháp phổ phản ứng nhiều dạng dao động và tính toán nhà cao tầng chịu động đất theo TCXDVN 375: 2006', *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, Số, 4, p. 2010.
5. Nguyen, H. (2015) 'Nghiên cứu sự làm việc của nhà cao tầng bê tông cốt thép có tầng cứng chịu tác động của động đất ở Việt Nam', *Luận án Tiến sĩ kỹ thuật* [Preprint].
6. Chopra, A.K. (2017) *Dynamics of structures*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall.
7. Clough R.W. (2003) *Dynamics of Structures*. Computers & Structures.
8. Hosseini, M. and Rao, N.V.R. (2018) 'Study the Impact of the Drift (Lateral Deflection) of the Tall Buildings Due to Seismic Load in Concrete Frame Structures with Different Type of RC Shear Walls', *Global Journal of Research In Engineering*, 18.
9. Kappos, A.J. (1991) 'Analytical prediction of the collapse earthquake for R/C buildings: Suggested methodology', *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 20(2), pp. 167-176.
10. Kumar, P.S. et al. (2016) 'Response study of a building with different elevations under earthquake and wind loads', *International Journal of Engineering Research*, 5(08), p.187-191.
11. Tuken, A. and Abbas, Y. (2018) 'Dynamic Response of a MDOF System subjected to Harmonic and Impulsive Loadings and Free Vibration: An Analytical Approach', *Journal of Structural Technology*, 3 (3), pp.1-14.