

DỰ ĐOÁN CHUYỂN VỊ CỦA HỆ CÁCH CHẤN ĐÁY SỬ DỤNG GỐI MA SÁT CON LẮC BA

NGUYỄN VĂN NAM

Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh

nguyenvannam@iuh.edu.vn

DOIs: <https://doi.org/10.46242/jstiuh.v61i07.4729>

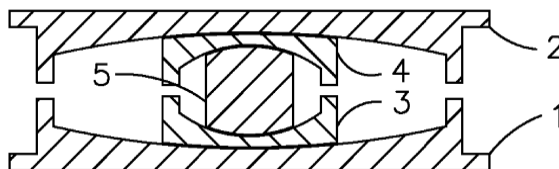
Tóm tắt. Chuyển vị ngang là một trong những bất lợi của kết cấu cách chấn. Nó cần phải được xác định một cách chính xác trong giai đoạn thiết kế. Bài báo này trình bày cách xác định chuyển vị ngang lớn nhất của hệ cách chấn sử dụng gối con lắc ma sát ba bằng phương pháp lực tuyến tính tương đương (Equivalent linear force) theo Tiêu chuẩn ASCE/SEI 7-16. Nghiên cứu tiến hành phân tích một ví dụ số hệ một bậc tự do để xác định chuyển vị ngang lớn nhất của hệ cách chấn bằng hai phương pháp: phương pháp lực tuyến tính tương đương và phương pháp phân tích phi tuyến theo lịch sử thời gian (Nonlinear time-history). Thông qua ví dụ số này, các bước trong phương pháp lực tuyến tính tương đương được làm rõ hơn, độ chính xác của nó cũng được đánh giá và một đề xuất hiệu chỉnh được đưa ra.

Từ khóa: phương pháp lực tuyến tính tương đương, gối con lắc ma sát, kết cấu cách chấn, dự đoán chuyển vị, phi tuyến theo lịch sử thời gian.

1. GIỚI THIỆU

Kỹ thuật cách chấn đáy là một giải pháp hữu hiệu để giảm thiệt hại cho công trình và con người khi động đất xảy ra. Đây là một trong những công nghệ điều khiển kết cấu bị động. Trong kỹ thuật này, một gối cách chấn có độ cứng ngang nhỏ được đặt chèn vào giữa kết cấu bên trên và kết cấu móng. Có nhiều thiết bị gối cách chấn đã được nghiên cứu và sử dụng cho những công trình thiết kế kháng chấn. Hiện nay, một thiết bị gối cách chấn cải tiến có nhiều ưu điểm và được sử dụng phổ biến nhất là gối cách chấn con lắc ma sát ba (triple friction pendulum bearing, gối TFP). Gối TFP được phát minh bởi Zayas và Low năm 2006 [1]. Cấu tạo của loại gối cách chấn này được mô tả như trên Hình 1. Theo đó, một gối cách chấn ma sát con lắc ba có hai bản thép số 1 và số 2 ngoài cùng dạng chòm cầu lõm, một bản được nối vào chân công trình, bản còn lại được nối vào móng. Giữa hai bản thép này là ba con lắc trượt tiếp xúc nhau (số 3, số 4 và số 5). Nhờ lực ma sát giữa các con lắc với nhau và giữa con lắc với các bản thép ngoài cùng mà khi lực ngang còn đủ bé thì chuyển vị trượt không xảy ra. Điều này đã giúp cho công trình đứng ổn định tại vị trí trung tâm của con lắc. Những mặt cong của gối với những bán kính tương ứng sẽ tạo nên độ cứng ngang cho gối.

Kết cấu cách chấn đáy có độ cứng ngang nhỏ, chu kỳ cơ bản lớn, điều này làm cho nó tránh xa vùng chu kỳ trội của những trận động đất. Những ưu điểm nổi bật của kỹ thuật cách chấn đáy có thể kể đến như: giảm gia tốc tuyệt đối trong các tầng, giảm chuyển vị ngang tương đối giữa các tầng. Tuy nhiên, do độ cứng ngang của kết cấu cách chấn nhỏ nên nó có chuyển vị ngang thường lớn [2], đây là một bất lợi của kỹ thuật cách chấn đáy. Với hạn chế này, nếu người thiết kế không đánh giá đúng giá trị chuyển vị lớn nhất của kết cấu sẽ để lại những mối nguy hiểm cho kết cấu khi có động đất xảy ra. Một nguy hiểm dễ nhận thấy là sự va chạm của những kết cấu gần nhau có chuyển vị ngang lớn. Sự va chạm này sẽ làm tăng lực cắt đáy trong kết cấu lên rất lớn [3]. Do đó, vấn đề dự báo chuyển vị ngang lớn nhất của hệ cách chấn đáy trong giai đoạn thiết kế là rất quan trọng.



Hình 1. Gối cách chấn ma sát con lắc ba [1].

Theo nhiều nghiên cứu trước đây, phương pháp phân tích phi tuyến theo lịch sử thời gian (Nonlinear Time-History, NTH) trên các mô hình giải tích có thể dự đoán tốt phản ứng của gối cách chấn cũng như hệ cách

chấn đáy sử dụng gói ma sát con lắc ba. Tuy nhiên, phương pháp này có độ phức tạp và những khó khăn nhất định trong thực hành thiết kế. Trong thực hành thiết kế hiện nay, người kỹ sư thường dùng các phương pháp phân tích gần đúng để xác định giá trị chuyển vị ngang lớn nhất của hệ kết cấu. Những phương pháp này thường có những ưu điểm: đơn giản, dễ tiếp cận và cho kết quả nhanh. Tuy nhiên, hạn chế của nó là sai số trong tính toán do không mô phỏng đúng bản chất động lực học của mô hình tính. Trong nghiên cứu này, phương pháp lực tuyến tính tương đương (Equivalent Linear Force, ELF) theo Tiêu chuẩn ASCE 7-16 [4] được vận dụng để xây dựng chi tiết một quy trình xác định nhanh chuyển vị lớn nhất của hệ cách chấn sử dụng gói con lắc ma sát ba. Nghiên cứu tiến hành phân tích một ví dụ số hệ một bậc tự do được cách chấn bằng gói TFP theo hai phương pháp: phương pháp ELF và phương pháp phân tích NTH. Thông qua ví dụ này, các bước xác định chuyển vị ngang lớn nhất của hệ bằng phương pháp ELF được làm rõ hơn. Bên cạnh đó, độ chính xác của phương pháp ELF được đánh giá và nhận xét để người thiết kế xem xét hiệu chỉnh kết quả tính theo phương pháp ELF để cho kết quả chính xác hơn.

2. PHƯƠNG PHÁP ELF

Tiêu chuẩn ASCE 7-16 cho phép sử dụng phương pháp ELF trong thiết kế cách chấn đáy. Theo phương pháp này, toàn bộ công trình bên trên được xem là một khối cứng và được thu gom thành một khối lượng tập trung. Đồng thời toàn bộ hệ cách chấn cũng được tuyến tính hóa và tập trung về khối lượng này. Ngoài ra, tính cản của hệ kết cấu bên trên cũng được bỏ qua so với tính cản do sự làm việc phi tuyến của hệ cách chấn đáy. Với những giả thiết này, toàn bộ hệ thống được xem như là hệ một bậc tự do với chu kỳ hữu hiệu là T_M và tỉ số cản là β_M tương ứng với chuyển vị lớn nhất D_M của hệ cách chấn đáy. Đây là những giả thiết cơ bản của phương pháp ELF. Để các giả thiết trên đây không quá sai lệch, những yêu cầu tối thiểu như sau phải thỏa [4]:

- Vị trí công trình phải thuộc trên nền đất loại A, B, C hoặc D.
 - Chu kỳ hiệu quả của kết cấu cách chấn tại chuyển vị lớn nhất D_M nhỏ hơn 5 s.
 - Chiều cao công trình không vượt quá 4 tầng hoặc cao hơn 19,8 m.
 - Tỉ số cản hiệu quả của kết cấu cách chấn tại chuyển vị lớn nhất D_M nhỏ hơn 30%.
 - Chu kỳ cơ bản của kết cấu cách chấn tại D_M lớn hơn 3 lần chu kỳ cơ bản của kết cấu không cách chất (trường hợp ngầm cứng tại móng).
 - Kết cấu bên trên phải đối xứng.
 - Kết cấu cách chấn phải thỏa một số tiêu chí sau: (a) độ cứng hiệu quả của kết cấu cách chấn tại chuyển vị lớn nhất D_M lớn hơn một phần ba độ cứng hiệu quả tại $0,2D_M$, (b) lực phục hồi tại D_M nhỏ hơn $0,025W$ và lớn hơn lực phục hồi tại $0,5D_M$, trong đó W là tổng trọng lượng kết cấu bên trên, (c) chuyển vị lớn nhất D_M cần xét thêm ảnh hưởng do thành phần chuyển vị xoắn.
- Khi các yêu cầu trên thỏa, chuyển vị lớn nhất D_M được xác định theo Công thức (1):

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M} \quad (1)$$

trong đó:

g là gia tốc trọng trường ($9,81 \text{ m/s}^2$)

S_{M1} là phổ gia tốc tại chu kỳ 1 s với cản 5%, xác định theo những chỉ dẫn trong Mục 11.4.4 hoặc 11.4.8 của Tiêu chuẩn nêu trên, phụ thuộc vào điều kiện chuyển động nền tại từng vị trí khác nhau [4].

T_M là chu kỳ hiệu quả (s) của hệ cách chấn tại chuyển vị D_M .

B_M là hệ số phụ thuộc vào hệ số cản hiệu quả của hệ cách chấn β_M tại chuyển vị D_M , xác định theo Bảng 17.5-1 của Tiêu chuẩn đã dẫn [4].

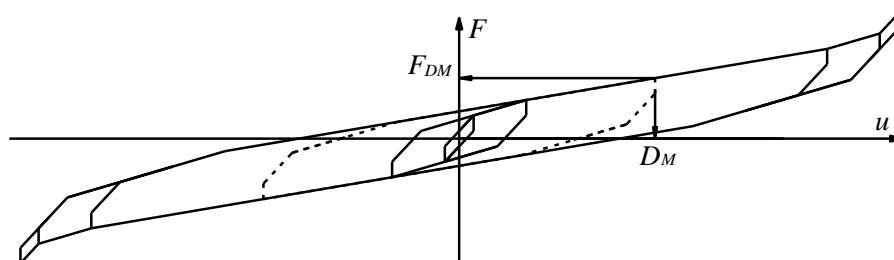
Trong Công thức (1), chu kỳ hiệu quả T_M được xác định theo các Công thức (2) [5].

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK_{eff}}} \quad (2)$$

trong đó: K_{eff} là độ cứng ngang hiệu quả của hệ cách chấn, được xác định theo Công thức (3), với các đại lượng F_{DM} là giá trị lực ngang tại chuyển vị D_M tương ứng như trên Hình 2. Độ cứng này được xem là độ cứng tương đương.

$$K_{eff} = \frac{F_{DM}}{D_M} \quad (3)$$

Hình 2 là quan hệ giữa lực và chuyển vị ngang của gối, được Fenz và cộng sự mô tả rất chi tiết trong các nghiên cứu [6] và [7], nó bao gồm 5 đoạn tuyến tính thể hiện cho 5 giai đoạn chuyển động khác nhau của gối. Ở mỗi giai đoạn, sự trượt tương đối xảy ra trên những mặt cong khác nhau phụ thuộc vào cấp độ động đất. Giai đoạn 1 là chuyển động trượt của lấc số 5 trên mặt cong số 3 và 4. Giai đoạn này xảy ra trước tiên khi lực ngang trong con lấc còn nhỏ (ứng với cấp động đất nhỏ). Đường ứng xử trở cho giai đoạn này là đường liền khép kín trong cùng, quan hệ giữa lực và chuyển vị là đoạn tuyến tính trong cùng. Khi lực ngang tăng lên, chuyển động trong gối chuyển sang Giai đoạn 2. Giai đoạn này là chuyển động trượt đồng thời của con lấc 3 trên mặt cong tấm thép 1 và con lấc 5 trượt trên mặt cong của con lấc 4. Đường ứng xử trở của giai đoạn này là đường liền khép kín tiếp theo. Giai đoạn 3 là sự trượt đồng thời trên hai mặt cong của tấm thép 1 và 2. Giai đoạn 4 là sự trượt đồng thời trên mặt cong con lấc 3 và tấm thép 2. Giai đoạn 5 là sự trượt đồng thời trên mặt cong của con lấc 3 và 4. Trong Giai đoạn 5, chuyển vị ngang trên mặt cong của tấm thép 1 và 2 là lớn nhất. Đường ứng xử trở các giai đoạn này là các đường liền khép kín tiếp theo. Đường ngoài cùng là cho Giai đoạn 5.



Hình 2. Quan hệ giữa lực và chuyển vị ngang của gối TFP.

Để xác định được giá trị B_M trong Công thức (1) được tra theo Bảng 17.5-1, phụ thuộc vào giá trị β_M được xác định như Công thức (4) [5].

$$\beta_M = \frac{E_{loop}}{2\pi K_{eff} D_M^2} \quad (4)$$

trong đó: E_{loop} là năng lượng tiêu tán trong một chu kỳ (có đơn vị: N.mm), việc xác định chính xác giá trị năng lượng tiêu tán này là rất phức tạp. Một cách gần đúng, giá trị này được xác định bằng diện tích một chu kỳ của đường ứng xử trở được giới hạn bằng chuyển vị D_M , là diện tích được giới hạn bởi đường nét đứt như trên Hình 2 [4], [5].

Trong các Công thức xác định T_M và β_M có chứa đựng giá trị cần tính D_M . Do đó, đây sẽ là một bài toán lặp bằng cách giả thiết trước D_M . Giá trị chuyển vị lớn nhất của hệ cách chấn D_M được xác định khi bài toán lặp hội tụ. Chuyển vị lớn nhất của hệ cách chấn được xác định theo phương pháp ELF có thể được tóm tắt như sau:

- Bước 1: Giả thuyết trước chuyển vị cần xác định D_M .
- Bước 2: Tính toán các giá trị T_M và β_M .
- Bước 3: Tra Bảng 17.5-1 [4] để xác định B_M .
- Bước 4: Tính D_M theo Công thức (1).
- Bước 5: Kiểm tra tính hội tụ và lặp lại Bước 1 nếu giá trị D_M ở Bước 4 và Bước 1 chưa hội tụ.

3. PHÂN TÍCH VÍ DỤ SỐ

Phần này trình bày một ví dụ bằng số hệ một bậc tự do được cách chấn bằng gối TFP. Toàn bộ kết cấu bên trên được giả thiết với hệ có một bậc tự do, được thu gom về một khối lượng giả thiết là $m_s = 3.10^5/g$ N.s²/mm chịu một thành phần chuyển vị ngang. Độ cứng ngang của kết cấu bên trên giả thiết là $k_s = 10^4$ N/mm, tỉ số cản của vật liệu $\zeta = 5\%$. Kết cấu này sẽ được cách chấn trên gối TFP có cấu tạo như trên Hình 1, những thông số kỹ thuật của gối bao gồm bán kính cong hiệu quả và hệ số ma sát trên các mặt cong được giả thiết cho như sau: bán kính mặt cong hiệu quả của con lấc bên trong 3 và 4 là bằng nhau và có giá trị là $R_{eff3} = R_{eff4} = 460$ mm, bán kính cong hiệu quả của tấm thép 1 và 2 là $R_{eff1} = R_{eff2} = 2900$ mm, hệ số ma sát trên mặt cong của con lấc 3 và 4 là $f_3 = f_4 = 0,02$, hệ số ma sát trên mặt cong tấm thép 1 là $f_1 = 0,06$, hệ số ma sát trên mặt cong tấm thép 2 là $f_2 = 0,1$. Khả năng dịch chuyển ngang của các con lấc trên mặt cong của

DỰ ĐOÁN CHUYỂN VỊ...

con lắc 3 và 4 là $d_3 = d_4 = 60$ mm và trên mặt cong của tấm thép 1 và 2 $d_1 = d_2 = 500$ mm. Khả năng chuyển vị ngang lớn nhất của gối là $60 + 60 + 500 + 500 = 1120$ mm. Tổng trọng lượng kết cấu bên trên gối, bao gồm trọng lượng toàn bộ kết cấu bên trên và một phần ngay trên gối, là $W = 36 \cdot 10^4$ N.

Giá trị phổ S_{M1} tại chu kỳ 1 s với cán 5% được xác định với giả thiết động đất tại vị trí Monterey, Bắc California. Vị trí này thuộc nền đất loại D, có các giá trị $S_1 = 0,5$, giá trị $F_v = 1,8$, khi đó giá trị S_{M1} là 0,9 [4]. Đường ứng xử trễ cho 5 giai đoạn chuyển động của gối được xác định [6] theo các thông số kỹ thuật của kết cấu và của gối. Trong đó, chuyển vị giới hạn ở từng giai đoạn sẽ được tính toán cụ thể. Tiến hành thực hiện các bước như trong Mục 2, giá trị chuyển vị lớn nhất của hệ kết cấu cách chấn D_M khi tính toán theo phương pháp ELF sau các bước tính lập đến hội tụ là $D_{M,ELF} = 500$ mm. Tại chuyển vị lớn nhất này, chu kỳ hiệu quả của kết cấu cách chấn T_M là 3,6 s, độ cứng ngang hiệu quả K_{eff} là 112,8 N/mm, hệ số cản hiệu quả của hệ cách chấn β_M tại chuyển vị này là 25%. Bên cạnh đó, những yêu cầu cho phép sử dụng phương pháp ELF phải được kiểm tra thỏa điều kiện.

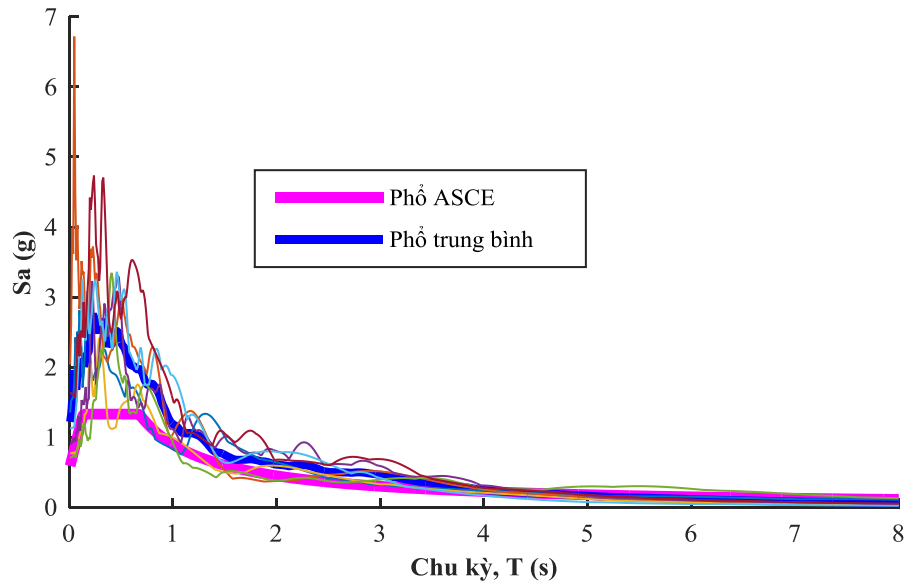
Trong trường hợp thứ hai, kết cấu cách chấn như trên sẽ được phân tích theo phương pháp NTH để xác định giá trị chuyển vị lớn nhất của hệ cách chấn. Theo như nội dung thực hiện của phương pháp này, các bước tiến hành sẽ bao gồm: xây dựng phổ MCER theo ASCE; lựa chọn và hiệu chỉnh các băng gia tốc nền; chọn mô hình tính và tiến hành phân tích để xác định giá trị chuyển vị lớn nhất. Để đảm bảo so sánh được kết quả từ hai phương pháp và đánh giá sự sai khác giữa chúng, những thông số vật lý của kết cấu và dữ liệu gia tốc nền phân tích phải lấy giống nhau.

Theo ASCE, trong phân tích NTH, giá trị thiết kế được lấy bằng giá trị trung bình từ các phân tích khi số lượng băng gia tốc phân tích không dưới 7 băng gia tốc. Trong ví dụ này, số lượng băng gia tốc phân tích là 7 nên giá trị thiết kế sẽ được lấy theo giá trị trung bình. Dữ liệu các băng gia tốc nền từ những trận động đất thực được trung tâm nghiên cứu động đất Thái Bình Dương của Đại học Berkeley, Mỹ (PEER) [8] ghi nhận và lưu trữ sẽ được sử dụng trong phân tích. Bảy băng gia tốc được lựa chọn có những đặc trưng được trình bày trong Bảng 1. Những băng gia tốc này phù hợp với nền đất loại D, có vận tốc truyền sóng cắt ở độ sâu 30 m ($v_{s,30}$) từ 180 m/s đến 360 m/s. Đây là những chuyển động nền mạnh, có gia tốc đỉnh PGA lớn hơn 0,2g và vận tốc đỉnh PGV lớn hơn 15 cm/s. Những băng gia tốc trong Bảng 1 sẽ được chuẩn hóa theo giá trị trung bình vận tốc đỉnh PGV hoặc theo giá trị trung bình gia tốc đỉnh PGA để loại bỏ những sự khác biệt do có sự khác nhau những đặc điểm của những chuyển động nền như: nguồn động đất, khoảng cách đến nguồn phát sinh động đất [9]. Trong nghiên cứu này, những băng gia tốc sẽ được chuẩn hóa theo giá trị trung bình của PGV. Sau đó, phổ trung bình từ 7 băng gia tốc đã được chuẩn hóa theo PGV sẽ được chuẩn hóa theo điều kiện đường phổ trung bình này không nhỏ hơn đường cong phổ ASCE trong khoảng chu kỳ ảnh hưởng từ $0,75T_M$ đến $1,25T_M$ [4]. Để chuẩn hóa phổ gia tốc trung bình, chu kỳ ảnh hưởng T_M được xác định theo phương pháp ELF là 3,6 s.

Bảng 1: Gia tốc nền trong phân tích NTH [8].

Trận động đất	Vị trí	Năm	M_w	R_{jb} (km)	$v_{s,30}$ (m/s)	PGA (g)	PGV (cm/s)
Imperial Valley-02	El Centro Array #9	1940	6,95	6,1	213	0,28	31
Gazli, USSR	Karakyr	1976	6,8	3,9	260	0,70	65
Imperial Valley-06	El Centro Array #8	1979	6,53	3,9	206	0,61	55
Erzican, Turkey	Erzincan	1992	6,69	0	352	0,50	80
Northridge-01	Arleta - Nor. Fire Sta	1994	6,69	3,3	297	0,31	23
Chi-Chi, Taiwan	TCU055	1999	7,62	6,3	359	0,24	34
Duzce, Turkey	Duzce	1999	7,14	0	282	0,40	71

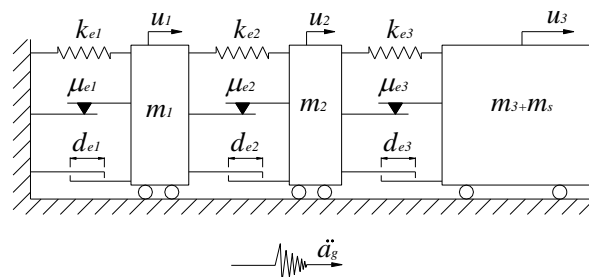
Trên Hình 3 thể hiện phổ động đất tại vị trí Monterey, Bắc California được xây dựng (gọi là phổ ASCE) theo chỉ dẫn trong ASCE [4]. Đường cong phổ trung bình của bảy băng gia tốc sau hai lần chuẩn hóa là đường màu Xanh đậm. Quan sát trên Hình 3, đường phổ trung bình luôn nằm trên đường Phổ ASCE trong đoạn chu kỳ ảnh hưởng là 2,7 s đến 4,5 s.



Hình 3. Phổ gia tốc.

Mô hình hệ kết cấu cách chấn bằng gối TFP khi phân tích NTH được trình bày như Hình 4. Theo đó, gối TFP được mô hình gồm ba bậc tự do tương ứng với các khối lượng m_1 , m_2 và m_3 . Khối lượng m_1 là rất nhỏ, mô hình cho chuyển động trượt trên mặt cong của con lăn 3 và con lăn 4. Khối lượng m_2 mô hình cho chuyển động trượt trên mặt 1, giá trị m_2 lấy rất nhỏ. Khối lượng m_3 mô hình cho sự trượt trên mặt 2, giá trị m_3 có thể lấy gần đúng bằng khối lượng một tầng ngay bên trên gối. Độ cứng ngang k_{ei} , hệ số ma sát μ_{ei} và khả năng dịch chuyển ngang d_{ei} của mỗi khối lượng được xác định như trong nghiên cứu của Fenz [6], phụ thuộc vào các thông số kỹ thuật của gối và kết cấu. Toàn bộ kết cấu bên trên được thu gom về một khối lượng là m_s . Để có sự tương thích khi so sánh kết quả giữa hai phương pháp ELF và NTH, khối lượng m_s phải được giả thiết là tuyệt đối cứng (theo giả thiết của phương pháp ELF). Khi đó, độ cứng ngang của kết cấu k_s và tỉ số cản vật liệu ξ cho như trên sẽ được bỏ qua. Mô hình sẽ có sự thu gom khối lượng m_s vào m_3 chung thành một khối lượng.

Áp dụng nguyên lý cân bằng động d'Alembert cho mỗi khối lượng trong mô hình như Hình 4, ta sẽ thiết lập được các phương trình vi phân chuyển động của hệ kết cấu chịu gia tốc nền \ddot{a}_g . Giải hệ phương trình vi phân chuyển động này bằng hàm ode15s trong ngôn ngữ Matlab [11] để xác định được ứng xử của kết cấu. Kết quả chuyển vị lớn nhất của hệ cách chấn $D_{M,NTHi}$ xác định theo phương pháp NTH sẽ được tìm ra cho từng băng gia tốc cụ thể và được trình bày như trong Bảng 2. Giá trị trung bình của bảy phân tích chính là giá trị chuyển vị lớn nhất của hệ cách chấn xác định theo phương pháp NTH, $D_{M,NTH}$ là 628 mm.



Hình 4. Mô hình phân tích.

Theo như kết quả này, nghiên cứu có thể chỉ ra được sự chênh lệch về kết quả chuyển vị lớn nhất của hệ cách chấn khi sử dụng hai phương pháp. Cụ thể, khi tính toán theo phương pháp ELF sẽ cho kết quả nhỏ hơn khi tính toán theo phân tích NTH (500 mm so với 628 mm). Giá trị chênh lệch này có thể ước lượng khoảng 25%. Quan sát kết quả phân tích cho từng băng gia tốc, băng gia tốc cho kết quả chuyển vị lớn nhất là 777 mm (trận động đất Imperial Valley-06), giá trị này lớn hơn khoảng 55% so với giá trị $D_{M,ELF}$ như trên. Băng gia tốc cho giá trị nhỏ nhất là trận động đất Duzce, Turkey (517 mm) cũng lớn hơn khoảng 3,5%.

DỰ ĐOÁN CHUYỂN VỊ...

Theo đó, một đề xuất cho mối quan hệ giữa hai kết quả tính toán theo hai phương pháp ELF và NTH cho trường hợp phân tích trên như Công thức (5).

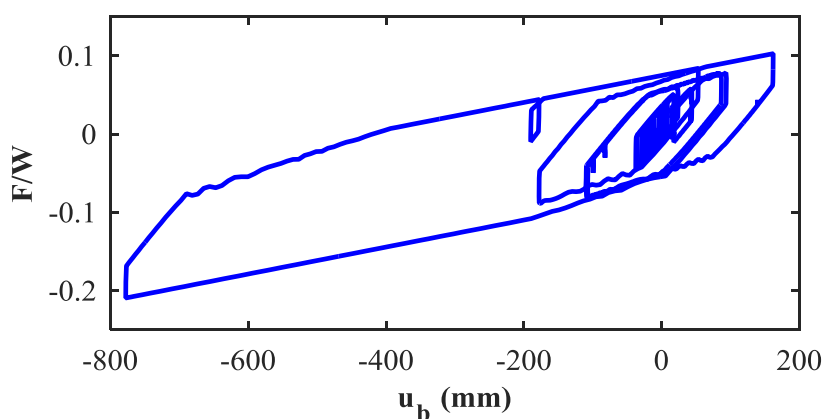
$$D_{M,NTH} = 1,25D_{M,ELF} \quad (5)$$

Bảng 2: Kết quả chuyển vị lớn nhất

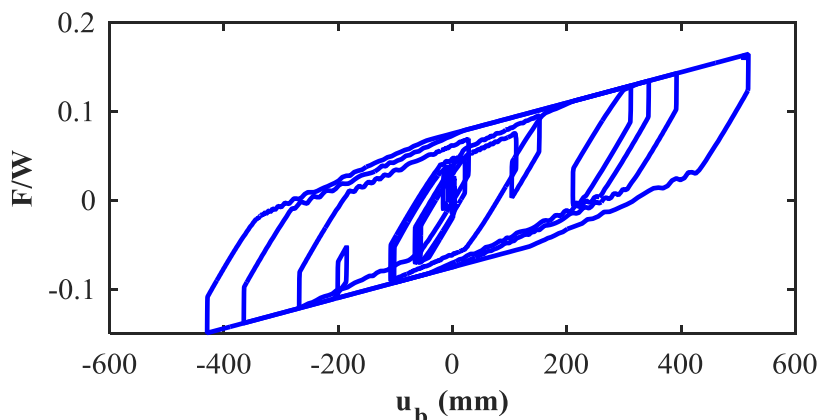
Trận động đất	Vị trí	Năm	$D_{M,NTH}$ (mm)	Giá trị trung bình, $D_{M,NTH}$ (mm)
Imperial Valley-02	El Centro Array #9	1940	633	628
Gazli, USSR	Karakyr	1976	634	
Imperial Valley-06	El Centro Array #8	1979	777	
Erzican, Turkey	Erzincan	1992	549	
Northridge-01	Arleta - Nor. Fire Sta	1994	619	
Chi-Chi, Taiwan	TCU055	1999	667	
Duzce, Turkey	Duzce	1999	517	

Trong kết quả nghiên cứu của Dao và cộng sự [9] được thực hiện trên mô hình kết cấu cách chấn bằng gối đàn hồi, chuyển vị lớn nhất của hệ cách chấn trong theo phân tích NTH lớn hơn khi xác định bằng phương pháp ELF khoảng 10%. Nó có xu hướng là lớn hơn 10% khi chuyển vị lớn nhất vượt trên 500 mm, và không quá 34,11%. Và cũng trong nghiên cứu này, kết quả khi phân tích với những chuyển động xa phay đứt gãy là 3,20% và không vượt quá 51,40%; những chuyển động gần phay đứt gãy cho kết quả tương ứng là 7,60% và 44,40%. Với những kết quả này, sự sai khác được đánh giá trong nghiên cứu này phù hợp với nghiên cứu của Dao và cộng sự, nó thể hiện độ tin cậy của kết quả nghiên cứu.

Đường ứng xử trễ thể hiện quan hệ giữa lực và chuyển vị ngang trong gối cho hai trường hợp có chuyển vị gối lớn nhất và nhỏ nhất như trong Bảng 2 tương ứng với hai băng gia tốc của trận động đất Imperial Valley-06 và Duzce, Turkey được trình bày như Hình 5 và Hình 6. Những băng gia tốc khác có kết quả tương tự và không trình bày ở đây. Độ tin cậy của những kết quả này có thể được đánh giá là cao khi so sánh với kết quả thí nghiệm mô hình được thực hiện bởi Ryan và cộng sự [11]. Ryan và cộng sự đã tiến hành một thí nghiệm mô hình nhà 5 tầng cách chấn bằng gối TFP chịu 19 băng gia tốc nền khác nhau. Kết quả chuyển vị theo phương X có giá trị từ 3,1 cm đến 69,9 cm. Quan sát trong một nghiên cứu khác được thực hiện bởi Dao và cộng sự [9], nhóm tác tác này đã tiến hành phân tích số trên 540 mô hình, kết quả phân tích nhìn chung cũng tương tự như trong nghiên cứu này.



Hình 5. Đường ứng xử trễ với trận động đất Imperial Valley-06.



Hình 6. Đường ứng xử trễ với trận động đất Duzce, Turkey.

Mặc khác, Quan sát kết quả trình bày trong Hình 5 và Hình 6, ta nhận thấy hình dạng của đường ứng xử trễ trong gói cho kết quả gần như các nghiên cứu trước [6] và [7]. Điều này một lần nữa cho thấy mô hình đang lựa chọn cho phân tích theo phương pháp NTH có độ tin cậy.

4. KẾT LUẬN

Bằng cách vận dụng Tiêu chuẩn ASCE/SEI 7-16 và những kết quả nghiên cứu trước về gói con lắc ma sát ba, nghiên cứu đã trình bày các bước xác định chuyển vị ngang lớn nhất của hệ cách chấn bằng gói con lắc ma sát ba bằng phương pháp bằng phương pháp lực tuyến tính tương đương (ELF). Thông qua một ví dụ số cho một trường hợp nghiên cứu, các bước trong phương pháp ELF cũng được minh họa rõ hơn. Quan trọng hơn, khi so sánh kết quả của phương pháp ELF với kết quả phân tích động phi tuyến theo lịch sử thời gian (NTH), nghiên cứu chỉ ra được sai số của phương pháp ELF trên một hệ cụ thể. Theo đó, phương pháp ELF có thể cho kết quả chuyển vị nhỏ hơn nhiều so với chuyển vị tính theo phương pháp phân tích NTH. Cụ thể, kết quả tính theo phân tích NTH lớn hơn 25% so với kết quả khi tính theo phương pháp ELF. Điều này cho thấy cần phải thực hiện thêm các nghiên cứu chi tiết tiếp theo để đánh giá mức độ tin cậy của phương pháp ELF.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh cấp kinh phí thông qua Đề tài Nghiên cứu khoa học cấp Trường có Mã số: 21/1XD01.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] V. Zayas and S. Low, *Sliding pendulum seismic isolation system*, US Patent Application Publication, 2006.
- [2] J. Stanton and C. Roeder, Advantages and limitations of seismic isolation, *Earthquake Spectra*, vol 7, no. 2, pp. 301- 324, 1991.
- [3] F. Khoshnoudian and A. T. Hemmati, Impact of structures with double concave friction pendulum bearings on adjacent structures, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, vol. 167, no. 1, pp. 41-53, 2014.
- [4] ASCE 7-16, *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*, ASCE/SEI 7-16, 2017.
- [5] F. Fadi and M. C. Constantinou, Evaluation of simplified methods of analysis for structures with triple friction pendulum isolators, *Earthquake engineering & Structural Dynamics*, vol 39, no. 1, pp. 5-22, 2010
- [6] D. M. Fenz and M. C. Constantinou, Modeling triple friction pendulum bearings for response-history analysis, *Earthquake Spectra*, vol 24, no. 4, pp. 1011-1028, 2008
- [7] D. M. Fenz and M. C. Constantinou, *Mechanical behavior for Multi-Spherical Sliding Bearings*, Technical Report MCEER-08-0007, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, NY, 2008.
- [8] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). (2020) Ground motion database. [Online]. Available: <http://ngawest2.berkeley.edu/>.

- [9] N. D. Dao, H. V. Nguyen, H. T. Nguyen, and A. B. Chung, A new statistical equation for predicting nonlinear time history displacement of seismic isolation systems, *Structures*, vol 24: pp. 177-190, 2020.
- [10] The MathWork Inc., *Matlab Data Analysis*, The MathWork Inc., Massachusetts, USA, 2018.
- [11] K. L. Ryan, E. Sato, T. Sasaki, T. Okazaki, J. Guzman, N. D. Dao, S. Soroushian, and C. Coria, *Full Scale 5-story Building with Triple Pendulum Bearings at E-Defense*, Network for Earthquake Engineering Simulation (distributor), Dataset, 2013.

PREDICTING THE DISPLACEMENT OF SEISMIC BASE ISOLATION SYSTEM USING TRIPLE FRICTION PENDULUM BEARING

NAM V. NGUYEN

*Faculty of Civil Engineering, Industrial University of Ho Chi Minh City
nguyenvannam@iuh.edu.vn*

Abstract. Horizontal displacement is one of the disadvantages of base isolated structures. It needs to be determined correctly during the design process. This paper presents how to determine peak horizontal displacement of the seismic base isolation systems using triple friction pendulum bearings by equivalent linear force procedure according to ASCE/SEI 7-16 standard. The study conducted to analyze a numerical example of single degree-of-freedom systems to determine the peak horizontal displacement of the seismic isolation system by two methods: the equivalent linear force procedure and the nonlinear time history analysis. Through this numerical example, the steps in the equivalent linear force procedure are further clarified, its accuracy is also evaluated, and a correction recommendation is given.

Keywords: equivalent linear force procedure, friction pendulum bearings, seismically isolated structures, displacement prediction, nonlinear time history.

Ngày gửi bài: 24/08/2021

Ngày chấp nhận đăng: 03/12/2021