

KHẢO SÁT ĐƯỜNG QUAN HỆ LỰC CẮT - CHUYỂN VỊ NGANG CỦA GỐI CÁCH CHẤN ĐÀN HỒI CỐT SỢI TRONG CÔNG TRÌNH CÁCH CHẤN ĐÁY CHỊU ĐỘNG ĐẤT

INVESTIGATION THE BASE SHEAR – HORIZONTAL DISPLACEMENT CURVES OF FIBER REINFORCED ELASTOMERIC ISOLATORS SUPPORTED A BASE-ISOLATED BUILDING UNDER EARTHQUAKES

NGÔ VĂN THUYẾT^{a,*}

^aKhoa Công trình, Trường Đại học Thủy Lợi, 175 Tây Sơn, Đống Đa, Hà Nội

*Tác giả đại diện: e-mail: thuyet.kcct@tlu.edu.vn, Tel: 0968092386

Ngày nhận bài: 26/11/2022, Sửa xong: 26/12/2022, Chấp nhận đăng: 30/12/2022

Tóm tắt: Gối cách chấn đàn hồi cốt sợi là một loại gối cách chấn đa lớp tương đối mới, được kỳ vọng giảm hư hỏng cho công trình dân dụng trung và thấp tầng chịu động đất. Gối cách chấn đàn hồi cốt sợi đang được nghiên cứu, phát triển theo hai loại: liên kết và không liên kết. Trong nghiên cứu này, phản ứng của công trình nhà khung kết cấu bê tông cốt thép sử dụng gối cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết chịu bằng gia tốc nền của các trận động đất đã xảy ra trong quá khứ được khảo sát bằng phân tích mô hình số sử dụng phần mềm SAP2000. Kết quả là xác định được vòng lặp trễ thể hiện mối quan hệ giữa lực cắt - chuyển vị ngang của gối cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết trong công trình chịu các bằng gia tốc nền khác nhau của các trận động đất.

Từ khóa: Gối cách chấn, gối cách chấn đàn hồi cốt sợi, gối không liên kết, vòng lặp trễ, công trình cách chấn đáy.

Abstract: Fiber reinforced elastomeric isolator (FREI) is a relatively new laminated elastomeric isolator and is expected to reduce the damage for mid and low-rise buildings under earthquakes. It has been studied and developed with two types: bonded fiber reinforced elastomeric isolator (B-FREI) and unbonded fiber reinforced elastomeric isolator (U-FREI). In this study, the response of a reinforced concrete frame building supported on U-FREIs under the action of various ground motions of recorded real earthquakes in the past is investigated by finite element analysis using SAP2000 software. Result is to determine the hysteresis loops shown the base shear - horizontal displacement curves of the U-FREI supported the base-isolated building under the action of various earthquakes.

Keywords: Base isolator, fiber reinforced elastomeric isolator, un-bonded isolator, hysteresis loop, base-isolated building

1. Đặt vấn đề

Gối cách chấn đáy là một biện pháp để giảm hư hỏng cho công trình khi động đất xảy ra. Thông thường gối cách chấn thường được đặt ở bên trên phần đài móng và bên dưới phần thân công trình. Do gối cách chấn có độ cứng theo phương ngang thấp nên công trình chịu được chuyển vị lớn của các trận động đất. Hơn nữa, tỷ số cản nhớt cao của gối cách chấn sẽ làm tiêu tán năng lượng của các trận động đất truyền lên phần thân công trình. Trong khi đó, độ cứng theo phương đứng của gối cách chấn có giá trị lớn đảm bảo chịu được trọng lượng và các tải trọng đứng tác động lên công trình.

Gối cách chấn đàn hồi cốt sợi (fiber reinforced elastomeric isolator, gọi tắt là gối FREI) là một loại gối cách chấn đa lớp tương đối mới đang được nghiên cứu và phát triển trên thế giới, được kỳ vọng là biện pháp giảm hư hỏng cho công trình dân dụng trung và thấp tầng chịu động đất ở các nước đang phát triển như Việt Nam. Gối FREI có hai loại: gối cách chấn đàn hồi cốt sợi liên kết (bonded fiber reinforced elastomeric isolator, gọi tắt là gối B-FREI) và gối cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết (unbonded fiber reinforced elastomeric isolator, gọi tắt là gối U-FREI). Các gối B-FREI và U-FREI đều có cấu tạo từ các lớp cao su xen kẽ và gắn kết với các lớp sợi nhưng khác nhau ở cách thức liên kết gối cách chấn với công trình: gối B-FREI có hai tấm đế thép dày ở đáy và đỉnh gối để liên kết với phần đài móng và phần thân công trình thông qua các bu lông; trong khi đó gối U-FREI được đặt trực tiếp lên

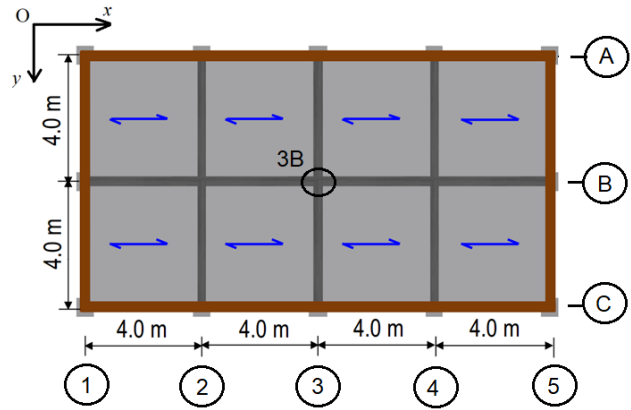
bề mặt đài móng và dưới phần thân công trình mà không cần liên kết vật lý.

Các nghiên cứu, khảo sát về ứng xử ngang của gối U-FREI để xác định các thông số về đặc tính cơ học của gối như độ cứng ngang hiệu dụng, tỷ số cản nhớt đã được thực hiện [1-9]. Ở Việt Nam, có một số nghiên cứu thực hiện khảo sát hiệu quả giảm chấn của công trình dân dụng trung và thấp tầng sử dụng gối FREI chịu động đất bằng phương pháp phân tích mô hình số sử dụng phân tích động theo thời gian [10-11]. Tuy nhiên, có rất ít nghiên cứu khảo sát đường quan hệ lực cắt - chuyển vị ngang của gối FREI trong công trình cách chấn đáy chịu băng gia tốc nền của các trận động đất đã xảy ra trong quá khứ. Đường quan hệ lực cắt - chuyển vị ngang của gối cách chấn chính là các vòng lặp trễ. Các khảo sát trước đây về vòng lặp trễ của gối cách chấn đều thực hiện với tải trọng ngang tuần hoàn [1-2, 4-5, 8-9]. Việc xác định vòng lặp trễ của gối cách chấn trong công trình cách chấn đáy chịu băng gia tốc nền của các trận động đất rất có ý nghĩa trong việc kiểm soát công trình cách chấn đáy.

Bài báo này khảo sát vòng lặp trễ thể hiện mối quan hệ lực cắt - chuyển vị ngang của gối cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết trong công trình nhà khung bê tông cốt thép (BTCT) 6 tầng giả định chịu các băng gia tốc nền khác nhau của các trận động đất đã xảy ra trong quá khứ bằng phương pháp phân tích mô hình số sử dụng phân tích động theo thời gian thông qua phần mềm SAP2000.

2. Mô tả về công trình cách chấn đáy giả định

Một công trình nhà 6 tầng kết cấu khung BTCT với các thông số về kích thước và vật liệu giả định được lựa chọn nghiên cứu. Công trình sử dụng vật liệu bê tông cấp độ bền B15 (có $R_b = 8.5 \text{ MPa}$, $R_{bt} = 0.75 \text{ MPa}$), cốt thép mác CB300-V (có $R_s = 260 \text{ MPa}$). Kích thước mặt cắt ngang dầm là $0.30 \times 0.40 \text{ m}^2$, cột là $0.30 \times 0.30 \text{ m}^2$ và sàn dày 0.12 m . Chiều cao mỗi tầng là 3.0 m . Khoảng cách nhịp theo các phương ngang trên mặt bằng đều là 4.0 m . Tường 110 được xây bao xung quanh công trình. Tổng trọng lượng của công trình là $W = 11000 \text{ kN}$. Mặt bằng tầng điển hình của công trình được thể hiện trong Hình 1.



Hình 1. Mặt bằng tầng điển hình công trình

Công trình sử dụng tổng cộng 15 gối U-FREI như nhau và được đặt lên bên trên đài móng, bên dưới hệ dầm đỡ toàn bộ chân cột tầng 1. Vị trí gối cách chấn trên mặt bằng là nơi giao nhau giữa hệ dầm ngang và dầm dọc như thể hiện trên Hình 1. Có một sàn coi là tuyệt đối cứng ở ngay bên trên vị trí đặt gối cách chấn. Gối U-FREI hình khối hộp có cạnh là $a = 380 \text{ mm}$, tổng chiều cao là $h = 133 \text{ mm}$. Gối U-FREI được cấu tạo từ 24 lớp cao su xen kẽ và gắn kết với 23 lớp sợi cacbon hai hướng vuông góc ($0^\circ/90^\circ$). Mỗi lớp cao su và sợi cacbon dày tương ứng là 5 và 0.55 mm . Tổng chiều dày của các lớp cao su là $t_r = 120 \text{ mm}$. Hệ số hình dạng của gối cách chấn là $S = 19$. Hệ số hình dạng của gối cách chấn (S) được định nghĩa bằng tỷ lệ giữa diện tích mặt cắt ngang gối với tổng diện tích xung quanh ở mặt bên của một lớp cao su [12]. Thông số vật liệu của gối U-FREI có: mô-đun cắt ban đầu $G = 0.90 \text{ N/mm}^2$, mô-đun đàn hồi $E = 40000 \text{ N/mm}^2$ và hệ số poisson $\mu = 0.20$.

3. Đặc tính cơ học của gối U-FREI

3.1. Ứng xử ngang của gối U-FREI

Các gối cách chấn sử dụng trong công trình cách chấn đáy là loại gối U-FREI. Các gối U-FREI thường có tỷ số cản nhớt nằm trong khoảng từ 6 đến 15% [1-9]. Trong nghiên cứu này, giả thiết gối U-FREI có tỷ số cản nhớt là $\beta = 8\%$.

Theo [9], độ cứng ngang hiệu dụng của gối U-FREI khi chịu chuyển vị ngang được xác định theo công thức sau:

$$K_h = \frac{G_{eff} A_{eff}}{t_r} \tag{1}$$

trong đó, A_{eff} là diện tích bề mặt tiếp xúc của gối U-FREI với phần đài móng hoặc phần thân công trình

tại một độ lớn chuyển vị ngang (u), G_{eff} là mô-đun cắt hiệu dụng của gối cách chấn. Giá trị A_{eff} xác định theo công thức đề xuất của [13]. Giá trị G_{eff} cho gối cách chấn có mặt cắt ngang hình vuông cạnh a được tính như sau:

Khi $0 \leq u \leq 1.0t_r$:

$$G_{eff} = G \left[1 - \left(\frac{p_z}{p_{crit,0} \left(1 - \left(\frac{u}{a} \right)^2 \right)} \right)^2 \right] \left(1 - \frac{u}{a} \right) \quad (2)$$

Khi $1.0t_r \leq u \leq 1.5t_r$:

$$G_{eff} = G \left[1 - \left(\frac{p_z}{p_{crit,0} \left(1 - \left(\frac{t_r}{a} \right)^2 \right)} \right)^2 \right] \left(1 - \frac{t_r}{a} \right) \quad (3)$$

u là độ lớn chuyển vị ngang, p_z là áp lực theo phương thẳng đứng lên gối, $p_{crit,0}$ là ứng suất giới hạn ổn định [14] và được tính theo công thức:

$$p_{crit,0} = \frac{P_{crit}}{a^2} \quad (4)$$

với $P_{crit} = \frac{\sqrt{2}\pi GASr}{t_r} \quad (5)$

và $r = \frac{a}{2\sqrt{3}} \quad (6)$

r là bán kính quán tính và A là diện tích mặt cắt ngang gối cách chấn ($A = a^2$).

Theo tiêu chuẩn thiết kế nhà quốc tế [15], giới hạn độ lớn chuyển vị ngang thiết kế cho gối cách

chấn đáy đa lớp là $1.50t_r$. Trong nghiên cứu này, gối U-FREI chịu đồng thời tải trọng thẳng đứng có giá trị $P_z = 730$ kN (là lực dọc lớn nhất chân cột tầng 1, lấy bằng $W/15$) và chuyển vị ngang có độ lớn tăng dần từ 30 mm (tức là $0.25t_r$) đến 180 mm ($1.50t_r$). Độ cứng ngang hiệu dụng của các gối U-FREI khi chịu chuyển vị ngang có độ lớn tăng dần được tính theo công thức (1) và cho kết quả trong Bảng 1 dưới đây.

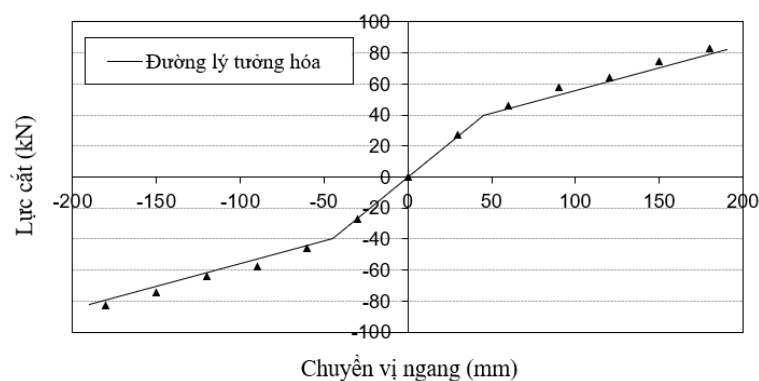
Bảng 1. Độ cứng ngang hiệu dụng của các gối U-FREI

u (mm)	u/t_r	G_{eff} (N/mm ²)	A_{eff} (mm ²)	K_h (kN/m)
30.0	0.25	0.8245	133146.95	914.83
60.0	0.50	0.7537	122652.01	770.33
90.0	0.75	0.6828	113199.45	644.06
120.0	1.00	0.6118	104718.20	533.86
150.0	1.25	0.6118	97058.23	494.81
180.0	1.50	0.6118	90069.50	459.18

Theo [15], độ cứng ngang hiệu dụng của một gối cách chấn đa lớp xác định theo công thức:

$$K_h = \frac{F}{u} \quad (7)$$

Từ đó, lực cắt ngang của các gối U-FREI ứng với mỗi độ lớn của chuyển vị ngang được xác định theo công thức $F = K_h u$. Từ các điểm có giá trị lực cắt – chuyển vị ngang đã xác định này, có thể lý tưởng hóa đường quan hệ lực cắt – chuyển vị ngang của gối U-FREI sử dụng trong công trình cách chấn đáy cho dưới dạng song tuyến (gồm hai đoạn thẳng) trong Hình 2.



Hình 2. Đường lý tưởng hóa quan hệ lực cắt - chuyển vị ngang của các gối U-FREI

3.2. Độ cứng theo phương đứng của gối U-FREI

Theo [12], độ cứng theo phương đứng của gối cách chấn đa lớp được tính theo công thức sau:

$$K_V = \frac{E_c A}{t_r} \quad (8)$$

trong đó, E_c là mô-đun chịu nén tức thời của hỗn hợp cao su – sợi gia cường, đối với gối cách chấn có mặt cắt ngang hình vuông có $E_c = 6.73GS^2$. Trong nghiên cứu này $E_c = 6.73 \times 0.90 \times 19^2 = 2186.58$ (MPa). Vậy:

$$K_v = \frac{2186.58 \times 380^2}{120} = 2631181 (kN/m).$$

4. Mô hình công trình và tải trọng

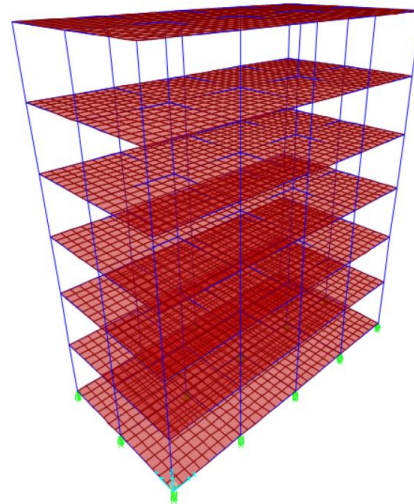
Phân tích động theo thời gian công trình cách chấn đáy chịu bằng gia tốc nền của một số trận động đất thực tế đã xảy ra trên thế giới trong quá khứ được khảo sát theo phương pháp phân tích mô hình số sử dụng phần mềm SAP2000 v.15 [16].

4.1. Mô hình phần thân

Công trình được mô hình không gian 3D bằng phần mềm SAP2000 với cột và dầm được mô hình bằng phần tử thanh, sàn được mô hình bằng phần tử tấm. Sàn các tầng được khai báo sàn tuyệt đối cứng. Trọng lượng tường 110 tác dụng phân phối đều lên các dầm biên.

4.2. Điều kiện biên

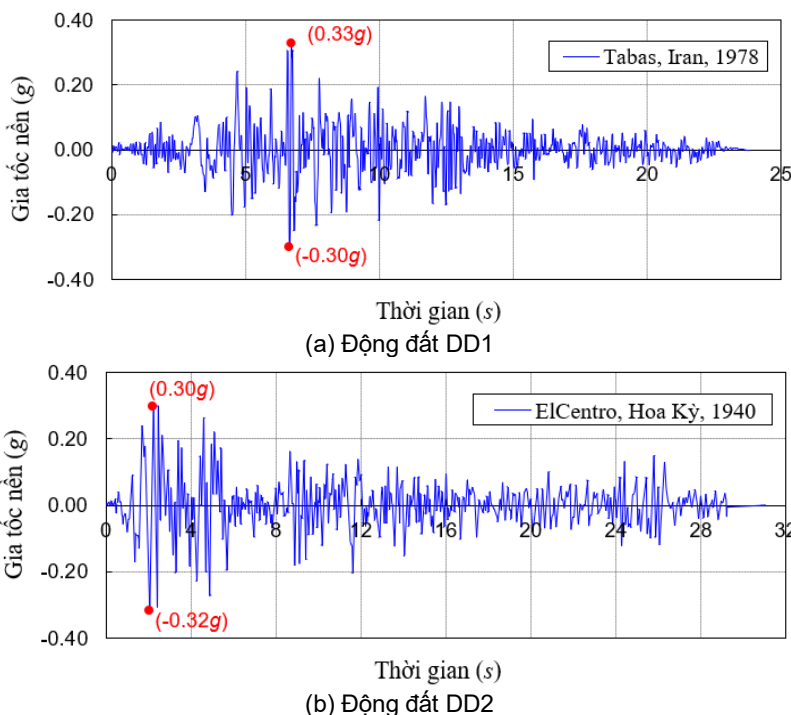
Các gối cách chấn được mô hình bằng phần tử link loại rubber isolator. Các đặc tính cơ học của gối cách chấn trong mục 3 về ứng xử ngang theo hai phương nằm ngang (X và Y) và về ứng xử đứng theo phương Z đều được sử dụng để khai báo. Ứng xử ngang của gối cách chấn được mô hình bằng mô hình vòng lặp trễ song tuyến với 4 thông số sau: Độ cứng ngang hiệu dụng K_{eff} , độ cứng ban đầu K_1 , lực cắt ngang ở vị trí chảy F_y và tỷ số độ cứng $n = K_2/K_1$. Mô hình không gian công trình cách chấn đáy được thể hiện trên Hình 3.

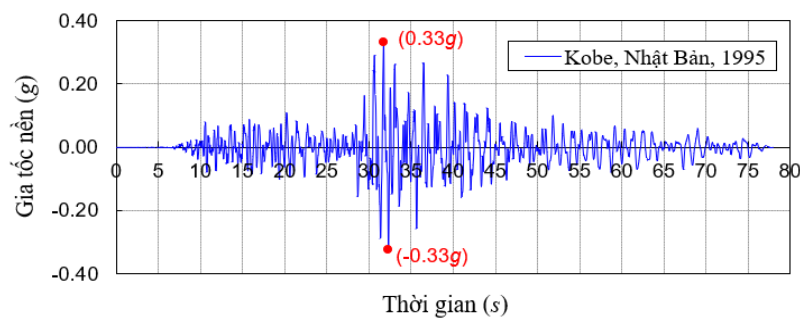


Hình 3. Mô hình công trình cách chấn đáy trong SAP2000

4.3. Bảng gia tốc nền của các trận động đất

Ba bảng gia tốc nền của ba trận động đất thực tế đã xảy ra trong quá khứ trên thế giới được lựa chọn để khảo sát, thể hiện trên Hình 4. Đó là các trận động đất: trận động đất ở Tabas, Iran (xảy ra ngày 16/09/1978) với đỉnh gia tốc nền là 0.33g, tổng thời gian dao động là $T = 23.82s$ (gọi tắt là động đất DD1); trận động đất El Centro, Hoa Kỳ (xảy ra ngày 18/05/1940) với đỉnh gia tốc nền là 0.32g, tổng thời gian dao động $T = 31.00s$ (gọi tắt là động đất DD2) và trận động đất ở Kobe, Nhật Bản (xảy ra ngày 16/01/1995) với đỉnh gia tốc nền là 0.33g, tổng thời gian dao động $T = 77.98s$ (gọi tắt là động đất DD3); trong đó g là gia tốc trọng trường ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$). Các trận động đất này có giá trị đỉnh gia tốc nền xấp xỉ nhau.





(c) Động đất DD3

Hình 4. Gia tốc nền của các trận động đất

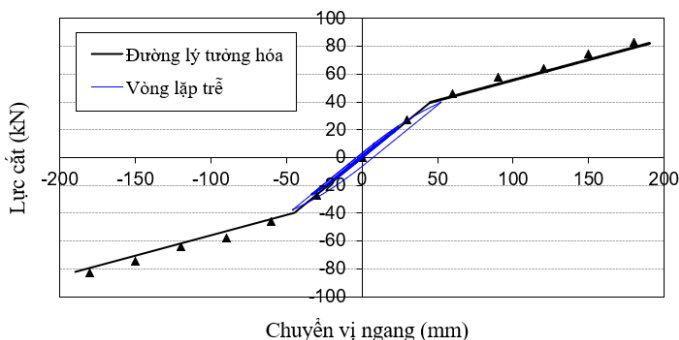
5. Kết quả và bình luận

Kết quả vòng lặp trễ thể hiện mối quan hệ lực cắt - chuyển vị ngang của gối U-FREI tại vị trí 3B (Hình 1) trong công trình nhà khung BTCT chịu các băng gia tốc nền khác nhau của các trận động đất đã xảy ra trong quá khứ được thể hiện trong Hình 5. Để dễ dàng so sánh Hình 5 cũng thể hiện đồng thời đường lý tưởng hóa quan hệ lực cắt - chuyển vị ngang của gối U-FREI trong thông số đầu vào (Hình 2).

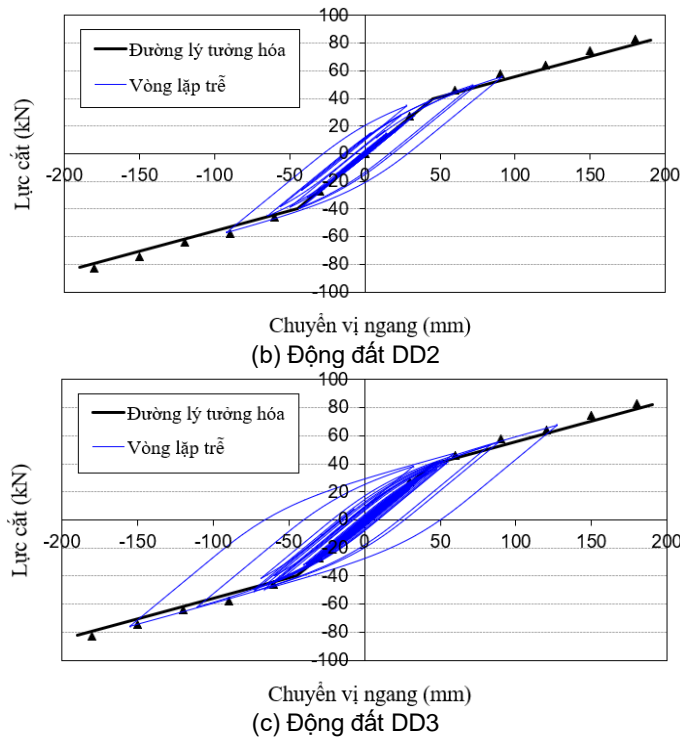
Quan sát Hình 5 thấy rằng ứng với các băng gia tốc nền của các trận động đất khác nhau thì chuyển vị ngang của gối U-FREI cũng khác nhau và cho các dạng vòng lặp trễ cũng khác nhau. Trong 3 trận động đất, đỉnh chuyển vị ngang của gối U-FREI có giá trị lớn nhất đối với trận động đất DD3 (155 mm) và giá trị nhỏ nhất đối với trận động đất DD1 (52 mm). Các trận động đất lựa chọn nghiên cứu có giá trị đỉnh gia tốc nền xấp xỉ nhau, nhưng khác nhau về tổng thời gian dao động và nội dung tần số. Từ kết quả ở Hình 5 thấy rằng vòng lặp trễ của gối cách chấn trong công trình cách chấn đáy chịu gia tốc nền của các trận động đất không chỉ phụ thuộc vào giá trị đỉnh của các băng gia tốc nền mà còn phụ thuộc vào tổng thời gian dao động và nội dung tần số của các trận động đất. Do vậy, trong thiết kế công trình cách chấn đáy, các kỹ sư thiết kế, nhà tư vấn thiết kế cần xem xét, khảo sát công trình chịu

nhiều dạng băng gia tốc của các trận động đất đã xảy ra trong quá khứ tại khu vực xây dựng công trình có xét đến ảnh hưởng của cả giá trị đỉnh gia tốc nền, tổng thời gian dao động và nội dung tần số của các trận động đất, chứ không chỉ xem xét đơn thuần ảnh hưởng của mỗi giá trị đỉnh gia tốc nền của trận động đất.

Từ Hình 5, vòng lặp trễ của các gối U-FREI trong công trình chịu băng gia tốc nền của các trận động đất thể hiện không đối xứng qua trục XY bởi vì tải trọng đầu vào là các băng gia tốc nền của các trận động đất có dạng không tuần hoàn. Điều này khác với các khảo sát trước đây trong các nghiên cứu [2-2, 4-5, 8-9], khi tải trọng ngang tác dụng vào gối U-FREI có dạng tuần hoàn thì vòng lặp trễ sẽ đối xứng qua trục XY. Ngoài ra, các giá trị đỉnh lực cắt tương ứng với giá trị chuyển vị ngang trong các vòng lặp trễ này đều tương đối phù hợp với giá trị tương ứng trên đường lý tưởng hóa quan hệ lực cắt - chuyển vị ngang cho cả 3 băng gia tốc nền của các trận động đất. Điều này thể hiện rằng việc phân tích động theo thời gian công trình cách chấn đáy chịu gia tốc nền của các trận động đất bằng phần mềm SAP2000 cho kết quả tương đối tin cậy. Với phương pháp này, các kỹ sư thiết kế, nhà tư vấn thiết kế có thể kiểm soát được công trình cách chấn đáy bằng mô phỏng số có độ tin cậy cao trước khi triển khai xây dựng công trình thực tế.



(a) Động đất DD1



Hình 5. Vòng lặp trễ của gối U-FREI trong công trình chịu các trận động đất

6. Kết luận

Nghiên cứu này trình bày khảo sát vòng lặp trễ thể hiện mối quan hệ lực cắt - chuyển vị ngang của gối cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết trong công trình nhà khung BTCT giả định chịu các băng gia tốc nền khác nhau của các trận động đất thực tế đã xảy ra trong quá khứ bằng phương pháp phân tích mô hình số sử dụng phân tích động theo thời gian thông qua phần mềm SAP2000. Công trình nhà khung BTCT 6 tầng sử dụng các gối cách chấn đáy loại U-FREI chịu các băng gia tốc nền của 3 trận động đất: Trận động đất Tabas, Iran, 1978, trận động đất ElCentro, Hoa Kỳ, 1940 và trận động đất Kobe, Nhật Bản, 1995. Các trận động đất này có giá trị đỉnh gia tốc nền xấp xỉ nhau nhưng khác nhau về tổng thời gian dao động và nội dung tần số. Kết quả phân tích mô hình số đã xác định được các vòng lặp trễ của gối U-FREI ứng với các băng gia tốc nền của các trận động đất. Các vòng lặp trễ này không chỉ phụ thuộc vào giá trị đỉnh của các băng gia tốc nền mà còn phụ thuộc vào tổng thời gian dao động và nội dung tần số của các trận động đất. Các vòng lặp trễ có dạng không đối xứng do các băng gia tốc nền của các trận động đất có dạng không tuần hoàn. Phương pháp xác định vòng lặp trễ của gối cách chấn trong công trình chịu băng gia tốc nền của các trận động đất trình bày trong nghiên cứu

này sẽ giúp các kỹ sư thiết kế, nhà tư vấn thiết kế có thể kiểm soát được công trình cách chấn đáy bằng mô phỏng số với độ tin cậy cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Toopchi-Nezhad, H., Tait, M.J., Drysdale, R.G. (2007), "Testing and Modeling of Square Carbon Fiber-reinforced Elastomeric Seismic Isolators", Structural Control and Health Monitoring, Vol. 15(6), pp. 876-900.

[2] Toopchi-Nezhad, H., Tait, M.J., Drysdale, R.G. (2008), "Lateral response evaluation of fiber-reinforced neoprene seismic isolator utilized in an unbonded application", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 134(10), pp. 1627-1637.

[3] Toopchi-Nezhad, H., Tait, M.J., Drysdale, R.G. (2011), "Bonded versus Unbonded Strip Fiber Reinforced Elastomeric Isolators: Finite Element Analysis", Composite structures, Vol. 93(2), pp. 850-859.

[4] Raaf, M.G.P.D, Tait, M.J., Toopchi-Nezhad H. (2011), "Stability of Fiber-reinforced Bearings in an Un-bonded Application", Journal of Composite Materials, SAGE, Vol. 45(18), pp. 1873-1884.

[5] Dezfuli, F.H., Alam, M.S. (2014), "Performance of carbon fiber-reinforced elastomeric isolators manufactured in a simplified process: experimental

- investigations*", Structural Control and Health Monitoring, Vol. 21(11), pp. 1347-1359.
- [6] Osgoee, P.M., Tait, M.J., Konstantinidis, D. (2014), "Finite element analysis of unbonded square fiber-reinforced elastomeric isolators (FREIs) under lateral loading in different directions", Composite Structures, Vol. 113, pp. 164-173.
- [7] Strauss, A., Apostolidi, E., Zimmermann, T., Gerhaher, U., Dritsos, S. (2014), "Experimental investigations of fiber and steel reinforced elastomeric bearings: Shear modulus and damping coefficient", Engineering Structures, Vol. 75, pp. 402-413.
- [8] Das, A., Dutta, A., Deb, S.K. (2014), "Performance of fiber-reinforced elastomeric base isolators under cyclic excitation", Structural Control and Health Monitoring, Vol. 22(2), pp. 197-220.
- [9] Ngo, V.T., Dutta, A., Deb, S.K. (2017), "Evaluation of horizontal stiffness of fibre reinforced elastomeric isolators", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 46(11), pp. 1747-1767.
- [10] Ngô Văn Thuyết, Nguyễn Văn Thắng (2018), "Hiệu quả cách chấn của nhà khung bê tông cốt thép sử dụng gối cách chấn đàn hồi cốt sợi FREI chịu động đất", Tạp chí Xây dựng, Bộ Xây dựng, tập 606, tr. 150-153.
- [11] Ngô Văn Thuyết (2021), "So sánh hiệu quả cách chấn của nhà khung bê tông cốt thép thấp tầng sử dụng gối cách chấn đàn hồi cốt sợi dạng liên kết và không liên kết chịu động đất", Tạp chí Người Xây dựng, tập 353&354, tr. 68-73.
- [12] Naeim, F., Kelly, J.M. (1999), "Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice", John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- [13] Trương Việt Hùng, Ngô Văn Thuyết (2020), "Phương pháp gần đúng xác định diện tích mặt tiếp xúc của gối U-FREI hình khối hộp với các bộ đỡ", Tạp chí khoa học công nghệ xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (HUCE), tập 14(3V), tr. 36-45.
- [14] Kelly, J.M. (2003), "Tension Buckling in Multilayer Elastomeric Bearings", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 129(12), pp. 1363-1368.
- [15] IBC-2000. International Building Code, USA.
- [16] SAP2000 v.15 (2014), CSI Analysis Reference Manual, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA.