

So sánh ứng xử ngang của gối cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết hình khối hộp và hình trụ tròn có cùng diện tích mặt cắt ngang bằng phân tích mô hình số

Comparison of horizontal response of square and circular – unbonded fiber reinforced elastomeric isolators with same cross-sectional area by finite element analysis

> TS NGÔ VĂN THUYẾT

Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi; Email: thuyet.kcct@tlu.edu.vn; ĐT: 0968092386

TÓM TẮT:

Gối cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết (gối U-FREI) là một loại gối cách chấn đa lớp mới đang được nghiên cứu, phát triển trên thế giới. Ứng xử ngang của gối U-FREI chịu ảnh hưởng của mô-đun cắt của cao su và diện tích bề mặt tiếp xúc của gối với công trình do biến dạng cuộn. Trong nghiên cứu này, ứng xử ngang của các gối U-FREI hình khối hộp và hình trụ tròn có cùng diện tích mặt cắt ngang chịu đồng thời tải trọng thẳng đứng và chuyển vị ngang vòng lặp được khảo sát bằng phân tích mô hình số. So sánh đặc tính cơ học của hai gối U-FREI thấy rằng độ cứng ngang hiệu dụng của gối U-FREI hình trụ tròn lớn hơn giá trị tương ứng ở gối U-FREI hình khối hộp tại các chuyển vị ngang lớn.

Từ khóa: gối cách chấn đáy, gối cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết, độ cứng ngang hiệu dụng, chuyển vị ngang vòng lặp.

ABSTRACT:

Unbonded fiber reinforced elastomeric isolator (U-FREI) is a new seismic elastomeric isolator which has been studied and developed in the world. Horizontal response of an U-FREI is affected by both shear modulus of rubber as well as contact area of the isolator with the supports due to rollover deformation. In this paper, horizontal response of square and circular U-FREIs with the same cross-sectional area subjected to vertical load and cyclic horizontal displacement simultaneously is investigated by finite element analysis. Comparison the mechanical properties of these isolators shows that effective horizontal stiffness of circular U-FREI is higher than that of square U-FREI at large applied displacement.

Keywords: Base isolator, unbonded fiber reinforced elastomeric isolator, effective horizontal stiffness, cyclic horizontal displacement

1. Giới thiệu

Gối cách chấn đa lớp là một trong các thiết bị cách chấn đáy được sử dụng phổ biến hiện nay để giảm hư hỏng cho công trình chịu động đất. Gối cách chấn thường được đặt ở bên trên đài móng và dưới phần thân công trình. Gối cách chấn đa lớp có cấu tạo từ các lớp cao su xen kẽ và gắn kết với các lớp gia cường (có thể là lớp thép mỏng hoặc lớp sợi) và hai đế thép dày ở đáy và đỉnh gối để liên kết với phần đài móng và phần thân công trình.

Gối cách chấn có độ cứng theo phương ngang thấp nên công trình chịu được chuyển vị ngang lớn của các trận động đất, tuy nhiên độ cứng theo phương đứng của gối cách chấn vẫn có giá trị lớn để đảm bảo chịu được trọng lượng của công trình.

Gối cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết (unbonded fiber reinforced elastomeric isolator, gọi tắt là gối U-FREI) là một loại gối cách chấn đa lớp mới, sử dụng các lớp sợi gia cường thay thế cho các lớp thép mỏng trong cấu tạo [1] và loại bỏ hoàn toàn hai đế

thép dày ở đáy và đỉnh gối. Khác với các gối cách chấn đa lớp dạng liên kết thông thường, gối U-FREI được đặt trực tiếp lên bèn trên đài móng và dưới phần thân công trình mà không có bất kỳ liên kết vật lý nào, nên được gọi là gối không liên kết. Do vậy, khi chịu chuyển vị ngang của các trận động đất, gối U-FREI thường có biến dạng cuộn [2]. Gối U-FREI nhẹ hơn, dễ dàng chế tạo và thi công lắp đặt hơn so với gối cách chấn đa lớp thông thường nên được kỳ vọng sử dụng cho công trình dân dụng trung và thấp tầng với chi phí rẻ ở những nước đang phát triển.

Nghiên cứu về các đặc tính cơ học trong ứng xử ngang của gối U-FREI như độ cứng ngang hiệu dụng, tỷ số cản nhớt đã được thực hiện trên thế giới trong hơn chục năm qua cả bằng thí nghiệm và phân tích mô hình số [3-8]. Theo [6], ứng xử ngang của gối cách chấn đàn hồi cốt sợi liên kết thông thường phụ thuộc vào mô-đun cắt của cao su, trong khi đó ứng xử ngang của gối U-FREI phụ thuộc không những vào mô-đun cắt của cao su mà còn vào diện tích bề mặt tiếp xúc của gối U-FREI với công trình. Do vậy, khi so sánh ứng xử ngang của các gối cách chấn đàn hồi cốt sợi dạng liên kết có cùng diện tích mặt cắt ngang như nhau nhưng có hình dạng khác nhau (hình tròn và hình vuông), [9] thấy rằng ứng xử ngang của các gối cách chấn là gần tương tự nhau. Trong khi đó, đối với gối U-FREI, với các hình dạng mặt cắt ngang khác nhau thì diện tích bề mặt tiếp xúc của gối U-FREI với công trình sẽ khác nhau, điều này dẫn đến ứng xử ngang của các gối U-FREI có hình dạng mặt cắt ngang khác nhau là khác nhau. Tuy nhiên, chưa có nghiên cứu nào về so sánh ứng xử ngang của gối các U-FREI có hình dạng mặt cắt ngang khác nhau để chứng thực điều này.

Nghiên cứu này trình bày so sánh ứng xử ngang của các gối U-FREI hình khối hộp và hình trụ tròn có cùng diện tích mặt cắt ngang chịu đồng thời tải trọng thẳng đứng và chuyển vị ngang vòng lặp bằng phân tích mô hình số. Các gối U-FREI này có cùng cấu tạo và thông số vật liệu sử dụng. Từ phân tích số, các đặc tính cơ học như vòng lặp trễ, độ cứng ngang hiệu dụng, tỷ số cản nhớt của các gối U-FREI được so sánh với nhau.

2. Cấu tạo chi tiết các gối cách chấn U-FREI

Ứng xử ngang của các gối U-FREI hình khối hộp và hình trụ tròn có diện tích mặt cắt ngang như nhau nhưng khác nhau về hình dạng mặt cắt (hình vuông, ký hiệu là gối B1 và hình tròn, ký hiệu là gối B2) được lựa chọn nghiên cứu. Các gối U-FREI đều có cấu tạo từ các lớp cao su xen kẽ và gắn kết với các lớp sợi cacbon hai hướng ($0^\circ/90^\circ$). Mỗi gối có tổng cộng 18 lớp sợi cacbon, mỗi lớp dày 0.55 mm và 19 lớp cao su, mỗi lớp dày 5 mm. Tổng chiều dày các lớp cao su trong gối là $t_r = 95$ mm và tổng chiều dày của gối là 104.9 mm. Diện tích mặt cắt ngang của gối là $A = 10000$ mm², tức là gối B1 có mặt cắt ngang hình vuông cạnh là 100 mm, gối B2 có mặt cắt ngang hình tròn đường kính là 113 mm. Các thông số vật liệu của các gối U-FREI là như nhau: mô-đun cắt của cao su trong gối $G = 0.90$ N/mm², mô-đun đàn hồi của gối $E = 40000$ N/mm² và hệ số poisson của gối $\mu = 0.20$.

3. Mô hình các gối cách chấn U-FREI

Các gối U-FREI được khảo sát ứng xử ngang chịu đồng thời tải trọng thẳng đứng và chuyển vị ngang vòng lặp bằng phương pháp mô phỏng số sử dụng phần mềm ANSYS v.14.0. Theo [6-7], phân tích ứng xử ngang của gối U-FREI bằng phần mềm ANSYS cho kết quả tương đối phù hợp với kết quả xác định từ thí nghiệm.

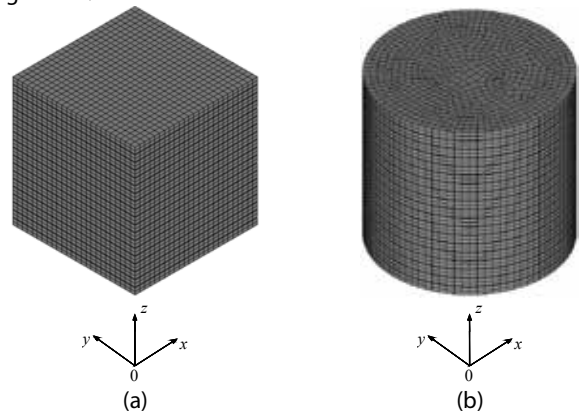
3.1. Lựa chọn loại phần tử

Cao su trong gối cách chấn có biến dạng lớn trong quá trình làm việc nên được mô hình bằng phần tử khối SOLID185. Phần tử này có khả năng mô hình hóa vật liệu siêu đàn hồi và ứng xử biến dạng lớn của vật liệu. Sợi cacbon được mô hình bằng phần tử khối SOLID46. Phần tử này có khả năng mô hình nhiều lớp mỏng trong

một tấm. Như đã trình bày ở phần 2, phần tử sợi cacbon được đan theo hai hướng vuông góc (0° và 90°) trong một lớp. Hai tấm đế thép dày (coi như rất cứng) ở đáy và đỉnh gối được mô hình bằng phần tử SOLID185 để mô phỏng cho phần đài móng và phần thân công trình.

Do gối U-FREI đặt trực tiếp lên trên phần đài móng và dưới phần thân công trình mà không có bất kỳ liên kết vật lý nào nên khi mô hình gối U-FREI các phần tử tiếp xúc mặt-tới-mặt được sử dụng. Phần tử tiếp xúc CONTA173 được dùng để khai báo cho các mặt của lớp cao su ngoài cùng (mặt mà cao su tiếp xúc với phần đài móng và phần thân công trình) và phần tử tiếp xúc TARGE170 được dùng để khai báo cho các mặt của hai đế thép ở vị trí tiếp xúc với gối cách chấn. Mô hình ma sát Coulomb được sử dụng để truyền lực cắt từ các mặt tiếp xúc đến các mặt mục tiêu với hệ số ma sát bằng 0.85.

Mô hình các gối U-FREI sau khi chia phần tử được thể hiện trong hình 1.



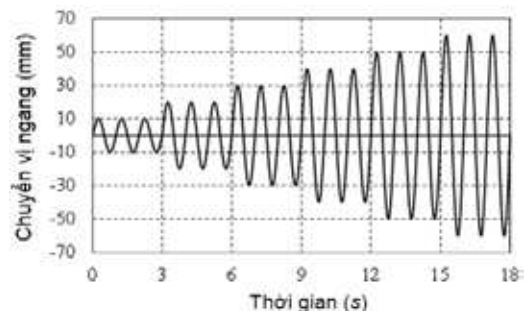
Hình 1. Mô hình các gối U-FREI (đã chia phần tử): (a) Gối B1 và (b) Gối B2

3.2. Mô hình vật liệu

Các thông số vật liệu như đã trình bày trong phần 2 được sử dụng để mô hình gối U-FREI. Cao su trong gối U-FREI có ứng xử phi tuyến khi chịu chuyển vị lớn nên được mô hình bằng mô hình vật liệu siêu đàn hồi và mô hình vật liệu đàn nhớt. Các nghiên cứu [10-11] cho thấy sử dụng mô hình Ogden 3-term và mô hình ứng xử cắt đàn nhớt để mô hình cho vật liệu cao su trong gối U-FREI là tương đối phù hợp.

3.3. Tải trọng

Các gối U-FREI chịu tải trọng như nhau, gồm tải trọng thẳng đứng có giá trị không đổi và chuyển vị ngang vòng lặp dạng hàm điều hòa hình sin có giá trị độ lớn tăng dần. Tải trọng thẳng đứng tác dụng lên gối U-FREI đại diện cho lực dọc chân cột công trình truyền vào gối, có giá trị là 12 kN. Chuyển vị ngang theo phương x dạng hàm điều hòa hình sin có giá trị độ lớn tăng dần từ 10 mm đến 60 mm, ba vòng cho mỗi độ lớn chuyển vị, được thể hiện trong hình 2.



Hình 2. Chuyển vị ngang gắn vào các gối U-FREI

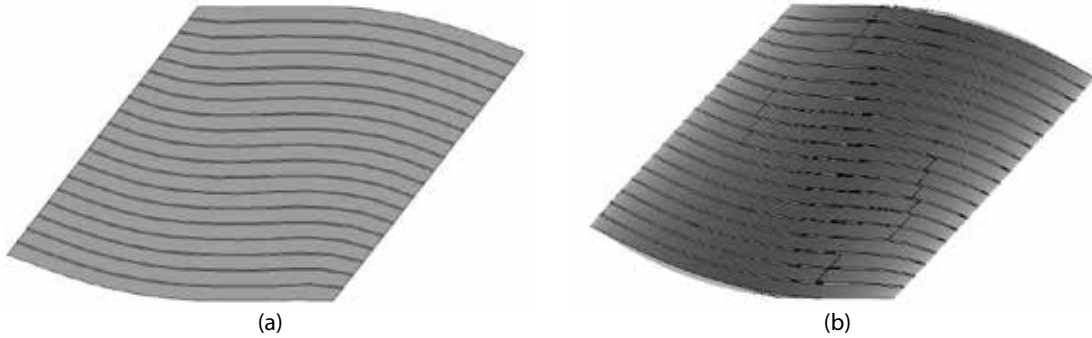
3.4. Điều kiện biên

Tải trọng thẳng đứng và chuyển vị ngang vòng lặp được gán vào phần đế thép phía trên. Phần đế thép phía dưới được giữ cố định.

4. Kết quả so sánh và bình luận

4.1. Biến dạng của các gối U-FREI

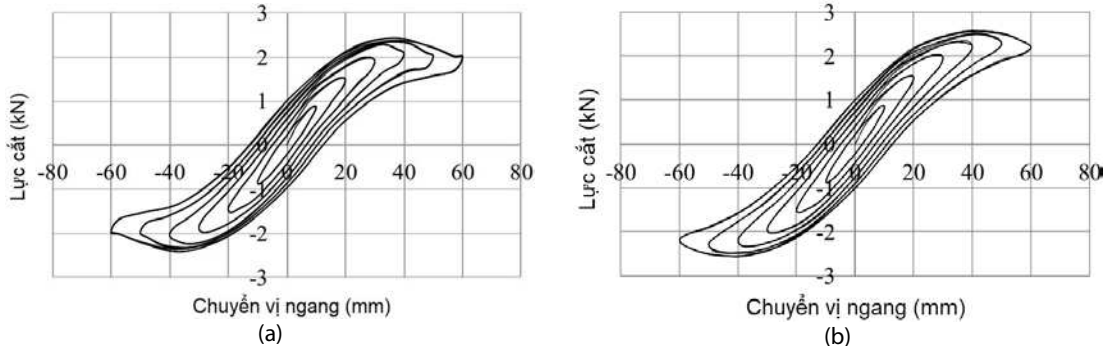
Biến dạng của các gối U-FREI B1 và B2 tại độ lớn 60 mm của chuyển vị ngang được thể hiện trong hình 3. Từ hình 3 cho thấy khi



Hình 3. Biến dạng của các gối U-FREI khi chuyển vị ngang có độ lớn 60 mm: (a) Gối B1 và (b) Gối B2

4.2. Vòng lặp trễ

Các vòng lặp trễ của các gối U-FREI thể hiện mối quan hệ giữa lực cắt ngang và chuyển vị ngang cho trong hình 4. Từ hình 4 cho thấy ở những chuyển vị ngang có độ lớn nhỏ, dạng vòng lặp trễ



Hình 4. Vòng lặp trễ của các gối U-FREI: (a) Gối B1 và (b) Gối B2

4.3. Độ cứng ngang hiệu dụng và tỷ số cản nhớt

Theo [12], độ cứng ngang hiệu dụng của một gối cách chấn ở một độ lớn của chuyển vị ngang được tính như sau:

$$K_{eff}^h = \frac{F_{max} - F_{min}}{u_{max} - u_{min}} \quad (1)$$

trong đó, F_{max} , F_{min} là các giá trị lớn nhất, nhỏ nhất của lực cắt ngang; u_{max} , u_{min} là các giá trị lớn nhất và nhỏ nhất của chuyển vị ngang.

Tỷ số cản nhớt, β , được tính thông qua năng lượng tiêu tán trong một chu kỳ chuyển vị, W_d . Năng lượng tiêu tán trong một chu kỳ chuyển vị được tính bằng diện tích của một vòng lặp trễ ở hình 4. Tỷ số cản nhớt được tính như sau:

$$\beta = \frac{W_d}{2\pi K_{eff}^h \Delta_{max}^2} \quad (2)$$

trong đó, $\Delta_{max} = (|u_{max}| + |u_{min}|) / 2$.

Độ cứng ngang hiệu dụng và tỷ số cản nhớt của các gối U-FREI ở các độ lớn khác nhau của chuyển vị ngang được tính toán theo công thức (1) và (2) và cho kết quả trong bảng 1. Các giá trị cho

gối U-FREI chịu chuyển vị ngang, các mặt của lớp cao su ngoài cùng của gối cách chấn có một phần tách rời với các mặt của các tấm đế thép để tạo ra biến dạng cuộn. Tại cùng một độ lớn của chuyển vị ngang, diện tích bề mặt tiếp xúc của các gối B1 và B2 với các tấm đế thép cũng khác nhau, diện tích bề mặt tiếp xúc của gối B2 lớn hơn gối B1. Điều này sẽ ảnh hưởng đến độ cứng ngang hiệu dụng của các gối U-FREI (sẽ trình bày trong mục tiếp theo).

của gối B1 và B2 là tương tự nhau, nhưng khi độ lớn của chuyển vị ngang tăng lên, dạng vòng lặp trễ của gối B1 và B2 đã có sự khác nhau. Sự khác nhau này chủ yếu do sự khác nhau về diện tích bề mặt tiếp xúc của các gối B1, B2 với các tấm đế thép.

trong bảng là giá trị trung bình cho mỗi độ lớn của chuyển vị ngang.

Bảng 1. Đặc tính cơ học của các gối U-FREI

Độ lớn chuyển vị (mm)	Gối B1		Gối B2	
	K_{eff}^h (kN/m)	β (%)	K_{eff}^h (kN/m)	β (%)
10.0	88.3	12.3	88.8	12.2
20.0	76.5	12.8	77.8	12.7
30.0	66.2	13.1	68.0	13.1
40.0	56.9	13.9	57.8	13.8
50.0	46.2	15.2	50.3	14.3
60.0	39.3	16.1	42.6	14.9

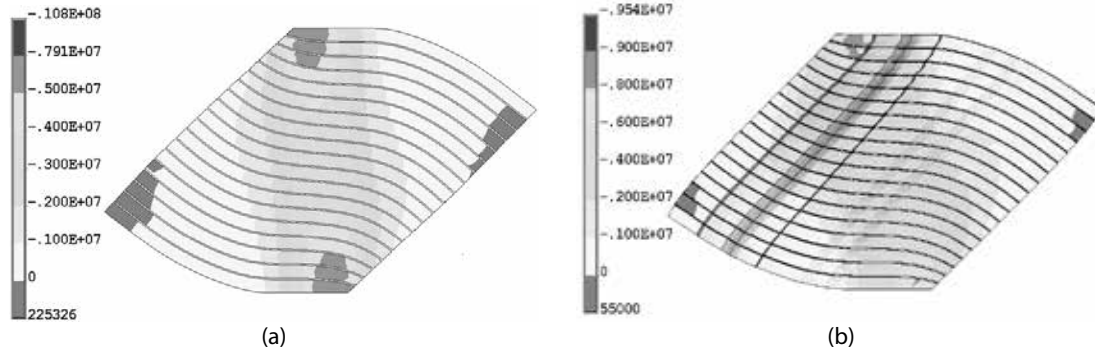
Kết quả trong bảng 1 cho thấy độ cứng ngang hiệu dụng của các gối U-FREI giảm và tỷ số cản nhớt tăng lên khi độ lớn của chuyển vị ngang tăng lên. Có được điều này là do có biến dạng cuộn khi gối U-FREI làm việc. Khi độ lớn chuyển vị ngang tăng lên, phần biến dạng cuộn sẽ càng tăng, phần diện tích bề mặt tiếp xúc của gối U-FREI với các đế thép sẽ càng giảm, làm cho độ cứng ngang hiệu dụng của gối U-FREI cũng giảm theo. Ngoài ra, so sánh đặc tính cơ học của các gối B1 và B2 thấy rằng ở các độ lớn chuyển

vị ngang nhỏ, độ cứng ngang hiệu dụng và tỷ số cản nhớt của các gối B1 và B2 là xấp xỉ nhau do giá trị diện tích bề mặt tiếp xúc của các gối U-FREI với các đế thép là gần như nhau. Tuy nhiên, ở những giá trị chuyển vị ngang lớn, độ cứng ngang hiệu dụng của gối B2 lớn hơn giá trị tương ứng ở gối B1 do gối B2 có diện tích bề mặt tiếp xúc với các đế thép lớn hơn ở gối B1, trong khi tỷ số cản nhớt của gối B2 lại nhỏ hơn giá trị tương ứng ở gối B1. Chẳng hạn, ở độ

lớn chuyển vị ngang là 60 mm, độ cứng ngang hiệu dụng của gối B2 lớn hơn gối B1 là 8.4%.

4.4. Ứng suất trong các lớp cao su của gối U-FREI

Các gối U-FREI chịu chuyển vị ngang theo phương x. Quy ước các phương của phần tử 1, 2, 3 song song với các phương tổng thể x, y, z. Ứng suất S_{33} trong các lớp cao su của các gối U-FREI tại chuyển vị ngang có độ lớn bằng 60 mm được thể hiện trong hình 5.



Hình 5. Ứng suất S_{33} (N/mm²) trong các lớp cao su của các gối U-FREI tại độ lớn chuyển vị ngang 60 mm: (a) Gối B1 và (b) Gối B2 (giá trị dương thể hiện chịu kéo)

Từ hình 5 cho thấy ứng suất nén trong các gối U-FREI nằm ở phần lõi, xuyên suốt từ đáy lên đỉnh gối trong vùng nổi chông giữa đáy và đỉnh gối; trong khi đó, ứng suất kéo nằm ngoài vùng nổi chông đó. Ngoài ra, khi so sánh ứng suất trong các lớp cao su của các gối B1 và B2 cho thấy giá trị lớn nhất ứng suất nén và kéo của gối B1 luôn lớn hơn giá trị tương ứng ở gối B2. Điều này là do diện tích bề mặt tiếp xúc của gối B1 với các đế thép nhỏ hơn giá trị tương ứng ở gối B2 với các đế thép, trong khi tải trọng tác dụng lên các gối cách chấn là như nhau, do đó ứng suất nén và kéo trong gối B1 lớn hơn trong gối B2.

5. Kết luận

Nghiên cứu này trình bày so sánh ứng xử ngang của các gối cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết hình khối hộp và hình trụ tròn có cùng các lớp cấu tạo, vật liệu và diện tích mặt cắt ngang như nhau, chịu đồng thời tải trọng thẳng đứng không đổi và chuyển vị ngang vòng lặp có giá trị tăng dần bằng phân tích mô hình số sử dụng phần mềm ANSYS. Các kết luận rút ra từ nghiên cứu như sau:

- Độ cứng ngang hiệu dụng của các gối U-FREI giảm và tỷ số cản nhớt tăng lên khi độ lớn của chuyển vị ngang tăng lên do gối U-FREI có biến dạng cuộn.
- Ứng xử ngang của gối U-FREI phụ thuộc vào diện tích bề mặt tiếp xúc của gối U-FREI với công trình.
- Ở những độ lớn chuyển vị ngang nhỏ, độ cứng ngang hiệu dụng và tỷ số cản nhớt của gối U-FREI hình khối hộp và hình trụ tròn là xấp xỉ nhau do giá trị diện tích bề mặt tiếp xúc của các gối U-FREI với công trình gần như nhau. Tuy nhiên, ở những giá trị chuyển vị ngang lớn, độ cứng ngang hiệu dụng của gối U-FREI hình trụ tròn lớn hơn giá trị tương ứng ở gối U-FREI hình khối hộp do có diện tích bề mặt tiếp xúc với công trình lớn hơn.
- Giá trị ứng suất nén và kéo lớn nhất của các lớp cao su trong gối U-FREI hình khối hộp lớn hơn giá trị tương ứng ở gối U-FREI hình trụ tròn ở cùng một độ lớn chuyển vị ngang do có diện tích bề mặt tiếp xúc với công trình nhỏ hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Kelly, J.M. (1999). *Analysis of Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators*. Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 2(1), 19-34.
- [2] Ngô Văn Thuyết (2018). *Nghiên cứu ứng xử ngang của nguyên mẫu gối cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết*. Tạp chí khoa học công nghệ xây dựng, Đại học Xây dựng (NUCE), 12(6), 39-48.
- [3] Nezhad, H.T., 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, 134(10), 1627-1637.
- [4] Engelen, N.C.V., Osgoeei, P.M., Tait, M.J., Konstantinidis, D. (2014). *Experimental and finite element study on the compression properties of Modified Rectangular Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators (MR-FREIs)*. Engineering Structures, 74, 52-64.
- [5] Osgoeei, 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, 113, 164-173.
- [6] Ngo, V.T., Dutta, A., Deb, S.K., (2017). *Evaluation of horizontal stiffness of fibre reinforced elastomeric isolators*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 46(11), 1747-1767.
- [7] Ngo, V.T., Deb, S.K., Dutta, A. (2018). *Effect of horizontal loading direction on performance of prototype square un-banded fiber reinforced elastomeric isolator*. Structural Control and Health Monitoring, 25(3), 1-18.
- [8] Ngô Văn Thuyết (2020). *Nghiên cứu hiệu quả cách chấn và đề xuất giải pháp ứng dụng gối cách chấn đàn hồi cốt sợi FREI áp dụng cho công trình dân dụng thấp tầng chịu tải trọng động đất ở Việt Nam*. Báo cáo tổng kết đề tài, mã số RD 35-18, Bộ Xây dựng.
- [9] Nguyễn Văn Thắng (2018). *So sánh ứng xử ngang của gối cách chấn đàn hồi cốt sợi FREI hình tròn và hình vuông bằng phân tích số*. Tạp chí Xây dựng Việt Nam, Bộ Xây dựng, năm thứ 57, số tháng 9, 229-231.
- [10] Ogden, R.W. (1972). *Large deformation isotropic elasticity - on the correlation of theory and experiment for incompressible rubber-like solids*. Proc. R. Soc. Lond. A., 326, 565-584.
- [11] Holzapfel, G.A. (1996). *On large strain visco-elasticity: Continuum formulation and finite element applications to elastomeric structures*. International Journal for Numerical methods in Engineering, 39(22), 3903-3926.
- [12] IBC-2000. *International Building Code*. USA.