

ỨNG XỬ NGANG CỦA GỐI CÁCH CHẤN ĐÀN HỒI CỐT SỢI KHÔNG LIÊN KẾT HÌNH KHỐI HỘP CHỊU CHUYỂN VỊ LỚN

Vũ Quang Việt^a, Ngô Văn Thuyết^{b,*}

^aKhoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, số 484 Lạch Tray, quận Lê Chân, Hải Phòng, Việt Nam

^bKhoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi, số 175 Tây Sơn, quận Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 03/12/2019, Sửa xong 27/12/2019, Chấp nhận đăng 31/01/2020

Tóm tắt

Gối cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết (gọi tắt là gối U-FREI) là một loại gối cách chấn tương đối mới đang được phát triển trên thế giới. Các nghiên cứu về gối U-FREI ở Việt Nam mới chỉ xem xét gối U-FREI chịu chuyển vị ngang với giá trị nhỏ (nhỏ hơn $1,0t_r$, trong đó t_r là tổng chiều dày các lớp cao su trong gối U-FREI). Trong nghiên cứu này, ứng xử ngang của gối U-FREI hình khối hộp chịu đồng thời tải trọng thẳng đứng có giá trị không đổi và chuyển vị ngang vòng lặp dạng hàm điều hòa có độ lớn tăng dần đến giá trị $2,0t_r$ được khảo sát bằng phương pháp phân tích mô hình số. Nghiên cứu chỉ ra rằng tại các chuyển vị nhỏ, độ cứng ngang của gối U-FREI giảm xuống do gối cách chấn có biến dạng cuộn, nhưng ở các chuyển vị lớn, độ cứng ngang của gối U-FREI tăng lên.

Từ khoá: gối cách chấn; gối cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết; biến dạng cuộn; ứng xử ngang; chuyển vị ngang lớn.

HORIZONTAL RESPONSE OF A SQUARE UN-BONDED FIBER REINFORCED ELASTOMERIC ISOLATOR UNDER LARGE DISPLACEMENT

Abstract

Un-bonded fiber reinforced elastomeric isolator (U-FREI) is relatively new seismic isolator which has been developed in the world. In Vietnam, research related to this U-FREI only focused on investigating its horizontal response under low displacement but not large displacement (lesser than $1.0t_r$, where t_r is total height of elastomer). In this study, the horizontal response of a square U-FREI under the simultaneous action of a constant vertical load and cyclic horizontal displacement with increasing amplitudes up to $2.0t_r$ is investigated by finite element analysis. This study indicates that at low amplitudes of displacement, the horizontal stiffness of the U-FREI is decreased due to rollover deformation; however, at large amplitudes of displacement, its horizontal stiffness is increased.

Keywords: base isolator; un-bonded fiber reinforced elastomeric isolator; rollover deformation; horizontal response; large horizontal displacement.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14\(1V\)-08](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(1V)-08) © 2020 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

Gối cách chấn đa lớp là một trong những 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 bên trên phần đài móng và bên dưới phần thân công trình. Gối cách chấn có độ cứng theo phương ngang có giá trị thấp nên công trình chịu được chuyển vị theo phương ngang với giá trị lớn của các trận động đất, nhưng có độ

*Tác giả chính. Địa chỉ e-mail: thuyet.kcct@tlu.edu.vn (Thuyết, N. V.)

cứng theo phương đứng cao nên vẫn đảm bảo chịu được trọng lượng công trình. Nhờ sử dụng hệ gối cách chấn nên chu kỳ dao động theo phương ngang của công trình cách chấn đáy được tăng lên. Các gối cách chấn đa lớp thường được cấu tạo bởi các lá thép mỏng xen kẽ và gắn kết với các lớp cao su, và hai tấm đế thép dày ở đáy và đỉnh gối để liên kết với phần đài móng và phần thân công trình. Các gối cách chấn đa lớp thường nặng, giá thành cao và phức tạp trong thi công xây lắp nên chúng thường được sử dụng cho các công trình có tầm quan trọng cao và đắt tiền.

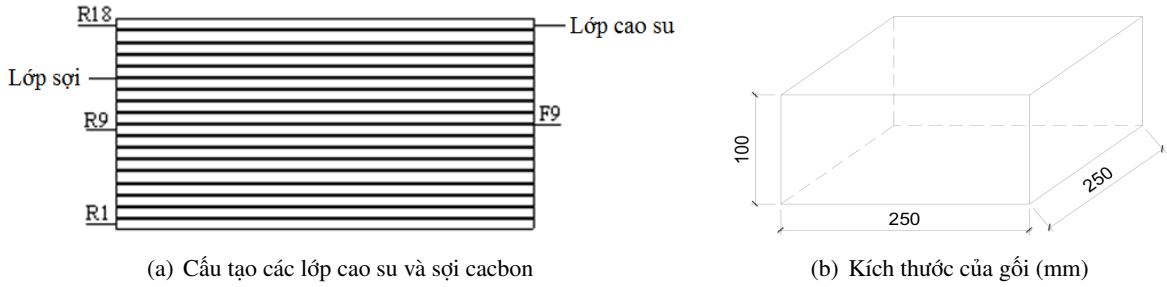
Một loại gối cách chấn đa lớp mới đang được phát triển hiện nay là gối cách chấn đàn hồi cốt sợi (fiber reinforced elastomeric isolator – gọi tắt là gối FREI). Gối FREI được đề xuất lần đầu tiên vào năm 1999 bởi Kelly [1]. Gối FREI có cấu tạo tương tự như gối cách chấn đa lớp thông thường nhưng các lớp sợi (thường là sợi cacbon) thay thế cho các lớp lá thép mỏng. Sợi cacbon có trọng lượng riêng khoảng 1600 kg/m^3 thấp hơn nhiều so với thép là 7850 kg/m^3 nên các gối FREI có trọng lượng thấp hơn nhiều so với các gối cách chấn đa lớp thông thường cùng kích thước. Việc chế tạo sợi cacbon cũng đơn giản hơn so với gia công các lá thép. Gối FREI đang được nghiên cứu, phát triển theo hai dạng: gối FREI liên kết (Bonded fiber reinforced elastomeric isolator, gọi tắt là gối B-FREI) và gối FREI không liên kết (gọi tắt là gối U-FREI). Trong khi gối B-FREI có hai tấm đế thép dày ở đáy và đỉnh gối để liên kết với phần móng và phần thân công trình thì gối U-FREI đã loại bỏ hai tấm đế thép này. Gối U-FREI được đặt trực tiếp lên bên trên phần đài móng và dưới phần thân công trình mà không cần bất kỳ một liên kết nào giữa chúng. Nhờ loại bỏ hai tấm đế thép dày, gối U-FREI có trọng lượng nhẹ hơn, dễ dàng thi công lắp dựng vào công trình hơn so với gối B-FREI. Gối U-FREI được kỳ vọng sử dụng cho các công trình dân dụng trung và thấp tầng với chi phí rẻ ở những nước đang phát triển.

Nghiên cứu về ứng xử ngang của gối U-FREI đã được thực hiện bằng cả thí nghiệm và phân tích mô hình số trong hơn chục năm qua. Dezfuli và Alam [2] đã tiến hành thí nghiệm điều tra các đặc tính cơ học trong ứng xử ngang của các gối U-FREI. Strauss và cs. [3] đã thí nghiệm điều tra ảnh hưởng của mô-đun cắt đến ứng xử ngang của các loại gối cách chấn đa lớp. Thuyet và cs. [4, 5] đã nghiên cứu thực nghiệm và mô hình số để đánh giá độ cứng ngang hiệu dụng và ảnh hưởng của phương chuyển vị ngang đến ứng xử ngang của nguyên mẫu gối U-FREI hình khối hộp. Ở Việt Nam, một vài nghiên cứu mô hình số về nguyên mẫu gối U-FREI cũng đã được thực hiện [6, 7]. Trong các nghiên cứu này, độ lớn của chuyển vị ngang tác dụng vào gối cách chấn thường có giá trị nhỏ, nhỏ hơn $1,0t_r$ (t_r là tổng chiều dày của các lớp cao su trong gối cách chấn). Dao động nền đất của các trận động đất lớn có thể gây ra chuyển vị lớn cho gối cách chấn. Vì vậy, ứng xử ngang của gối U-FREI chịu chuyển vị ngang có giá trị lớn nên được tiếp tục nghiên cứu.

Nghiên cứu này trình bày ứng xử ngang của gối U-FREI hình khối hộp chịu đồng thời tải trọng thẳng đứng có giá trị không đổi và chuyển vị ngang dạng hàm điều hòa có giá trị độ lớn tăng dần đến $2,0t_r$ bằng phân tích mô hình số đồng thời phân tích quá trình làm việc của gối U-FREI.

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

Gối cách chấn đàn hồi cốt sợi hình khối hộp có cạnh là $a = 250 \text{ mm}$, tổng chiều cao là $h = 100 \text{ mm}$. Gối U-FREI được cấu tạo từ 18 lớp cao su xen kẽ và gắn kết với 17 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. Mặt cắt dọc theo phương đứng và kích thước của gối cách chấn được miêu tả trong Hình 1. Các thông số chi tiết về kích thước và vật liệu của gối cách chấn được cho trong Bảng 1.



Hình 1. Cấu tạo chi tiết gỏi cách chấn đàn hồi cốt sợi

Bảng 1. Chi tiết các thông số kích thước và vật liệu của gỏi U-FREI

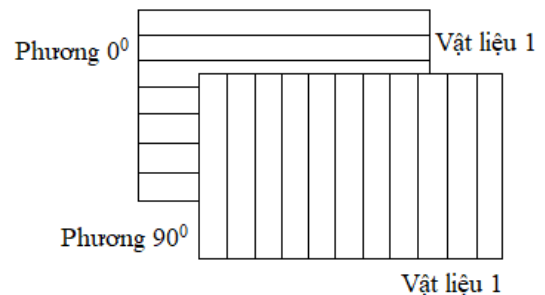
Thông số	Đơn vị	Giá trị
Kích thước của gỏi	(mm)	250 × 250 × 100
Số lớp cao su, n_e		18
Chiều dày một lớp cao su, t_e	(mm)	5,0
Tổng chiều dày lớp cao su, t_r	(mm)	90
Số lớp sợi cacbon, n_f		17
Chiều dày của một lớp sợi cacbon, t_f	(mm)	0,55
Mô-đun cắt của cao su theo phương ngang, G	(MPa)	0,90
Mô-đun đàn hồi của hỗn hợp cao su-sợi cacbon trong gỏi cách chấn theo phương ngang, E	(GPa)	40
Hệ số poisson của gỏi, μ		0,20

3. Mô hình gỏi cách chấn và tải trọng

Gỏi cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết với kích thước nêu trên được khảo sát ứng xử ngang chịu đồng thời 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 đến $2,0t_r$ bằng phương pháp mô phỏng số sử dụng phần mềm kết cấu ANSYS v.14.0.

3.1. Lựa chọn loại phần tử

Cao su trong gỏi cách chấn có biến dạng lớn trong quá trình làm việc. Ở đây, cao su được mô hình bằng phần tử khối SOLID185 với 8 nút. 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 gia cường được mô hình bằng phần tử khối SOLID46 với 8 nút và có khả năng mô hình nhiều lớp mỏng trong một tấm. Chú ý rằng phần tử sợi cacbon được đan theo hai hướng vuông góc (0° và 90°) trong một lớp như miêu tả trong Hình 2. Hai tấm thép dày (coi như rất cứng) được mô hình



Hình 2. Các lớp và phương của sợi cacbon trong gỏi U-FREI

ở đáy và đỉnh gối, để mô phỏng cho phần đài móng và phần thân công trình, cũng được mô hình bằng phần tử SOLID185.

Do gối U-FREI đặt trực tiếp lên trên phần đài móng và dưới phần thân công trình (các bộ đỡ) mà không có bất kì liên kết vật lý nào nên khi mô hình gối U-FREI trong phần mềm ANSYS các phần tử tiếp xúc mặt-tới-mặt được sử dụng. Phần tử tiếp xúc CONTA173 được dùng để định nghĩa 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 định nghĩa 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.

3.2. Mô hình vật liệu

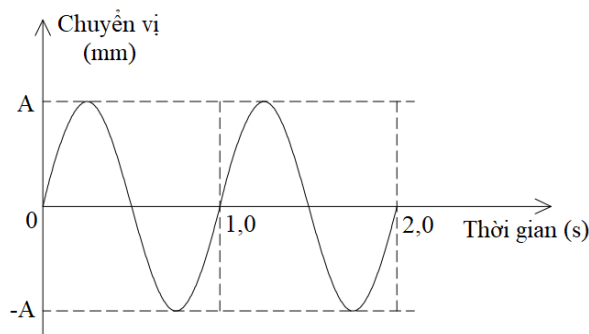
Các thông số vật liệu cho trong Bảng 1 được sử dụng để mô hình trong ANSYS. Cao su trong gối U-FREI có ứng xử phi tuyến khi chịu chuyển vị lớn nên được mô hình bằng mô hình vật liệu siêu đàn hồi và mô hình vật liệu đàn nhớt. Vật liệu đàn hồi siêu cao dùng để mô phỏng các vật liệu có thể chịu biến dạng đàn hồi lớn mà vẫn phục hồi được. Vật liệu giống như cao su và nhiều vật liệu polymer khác thuộc loại này. Vật liệu siêu đàn hồi có độ cứng thay đổi theo mức độ của ứng suất. Các nghiên cứu [8, 9] 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 cách chấn là tương đối phù hợp. Trong nghiên cứu này, cao su cũng được mô hình bằng mô hình Ogden 3-term và mô hình ứng xử cắt đàn nhớt với các thông số như sau:

- Ogden (3-term): $\mu_1 = 1,89 \times 106 \text{ (N/m}^2\text{)}$; $\mu_2 = 3600 \text{ (N/m}^2\text{)}$; $\mu_3 = -30000 \text{ (N/m}^2\text{)}$; $\alpha_1 = 1,3$; $\alpha_2 = 5$; $\alpha_3 = -2$;

- Mô hình ứng xử cắt đàn nhớt: $a_1 = 0,3333$; $t_1 = 0,04$; $a_2 = 0,3333$; $t_2 = 100$.

3.3. Tải trọng

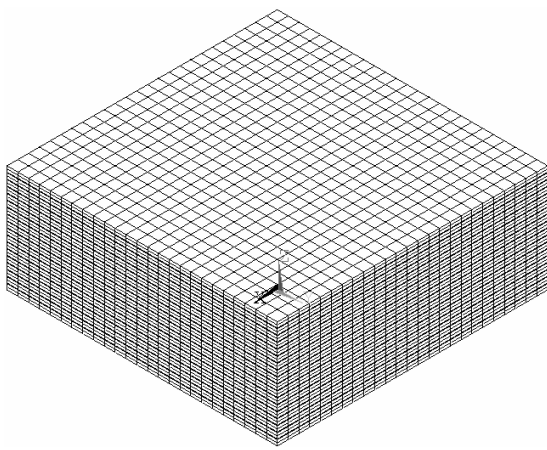
Ứng xử ngang của gối U-FREI được khảo sát chịu đồng thời tải trọng thẳng đứng có giá trị không đổi và chuyển vị ngang vòng lặp. Tải trọng thẳng đứng thiết kế cho gối là 350 kN (tương ứng với áp lực thẳng đứng lên bề mặt gối là 5,6 MPa), không đổi trong suốt quá trình điều tra. Tải trọng thẳng đứng đại diện cho lực dọc tại chân cột tác dụng vào gối cách chấn. Chuyển vị ngang theo phương X dạng hàm điều hòa hình sin theo quy định trong các tiêu chuẩn hiện hành [10, 11] về công trình cách chấn đáy, hai vòng cho một độ lớn chuyển vị, được gán vào phần đế thép phía trên của gối cách chấn. Chuyển vị ngang vòng lặp ở một độ lớn chuyển vị được miêu tả như Hình 3. Chu kỳ của chuyển vị ngang lấy bằng $T = 1 \text{ s}$ (hay tần số $f = 1 \text{ Hz}$) là phù hợp với chu kỳ trội của lịch sử chuyển vị thường xảy ra đối với các công trình dân dụng trung và thấp tầng trong thực tế. Giá trị độ lớn chuyển vị ngang được tăng dần từ 0 mm đến 180 mm ($2,0t_r$). Phần chân đế thép phía dưới được giữ cố định.



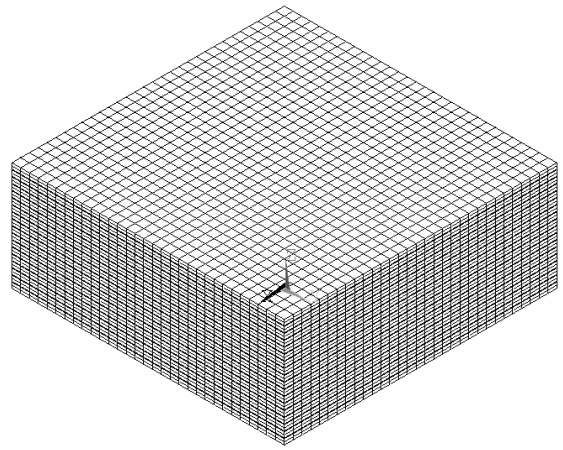
Hình 3. Chuyển vị ngang ở một giá trị độ lớn gán vào gối U-FREI

3.4. Kích thước lưới chia phần tử

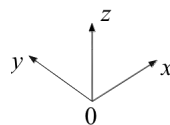
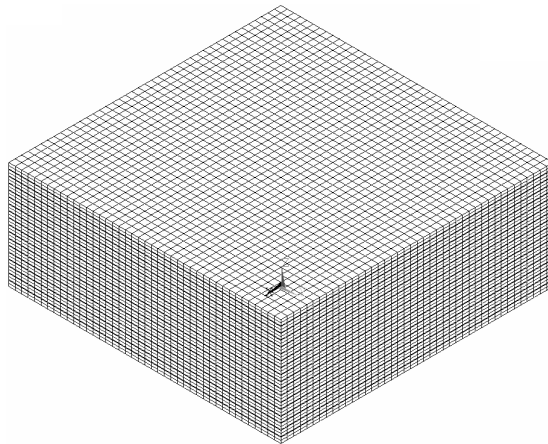
Ảnh hưởng của kích thước lưới chia phần tử đến kết quả phân tích ứng xử ngang của gối U-FREI được phân tích thông qua ba cách chia sau: (a) kích thước lưới chia lớn; (b) kích thước chia nhỏ và (c) kích thước lưới chia rất nhỏ. Trong cả ba cách chia này, các lớp cao su đều được chia theo cả phương chiều dày và phương nằm ngang; các lớp sợi cacbon do có chiều dày khá mỏng (0,55 mm) nên chỉ chia theo phương nằm ngang, phương chiều dày không chia. Theo đó, ở cách chia (a), (b), (c) các lớp cao su và sợi cacbon chia theo phương nằm ngang kích thước lần lượt là 10 mm, 8 mm, 6 mm; và phương chiều dày của các lớp cao su chia thành 2 phần. Mô hình gối U-FREI đã chia phần tử theo ba cách chia trên được thể hiện như Hình 4.



(a) Kích thước lưới chia lớn



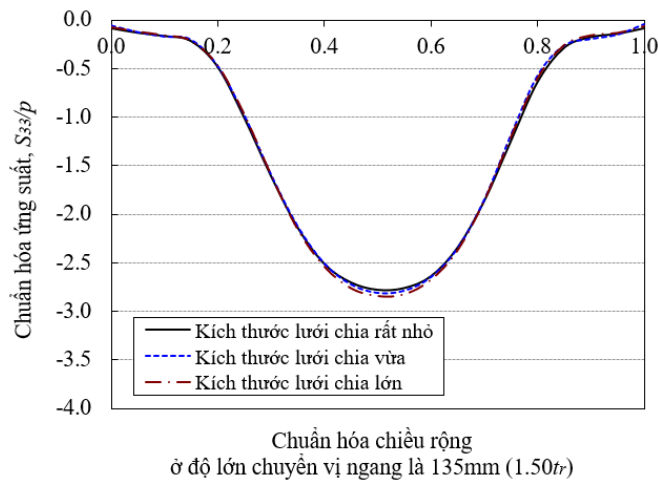
(b) Kích thước lưới chia vừa



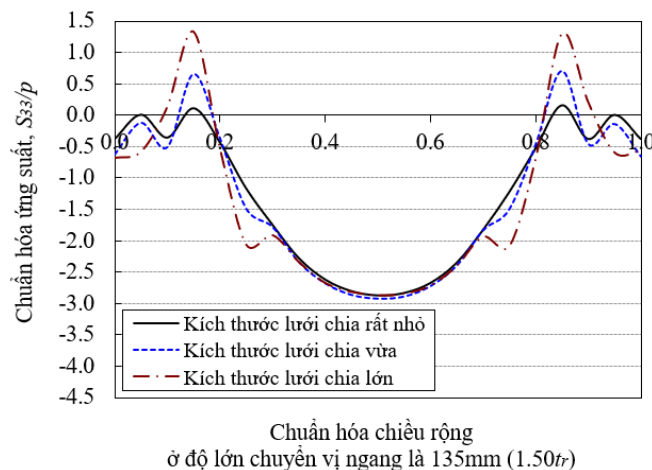
(c) Kích thước lưới chia rất nhỏ

Hình 4. Kích thước các cách chia lưới gối U-FREI

Kết quả chuẩn hóa ứng suất (tức là tỷ số ứng suất với áp lực thẳng đứng) S_{33}/p ở lớp cao su và lớp sợi cacbon ở khoảng giữa chiều dày gối U-FREI theo phương chuyển vị tại độ lớn 135 mm ($1,50t_r$) của chuyển vị ngang được thể hiện trong các Hình 5 và 6. Trong các hình này, chuẩn hóa chiều rộng là tỷ lệ giữa vị trí của điểm đang xét với chiều rộng gối U-FREI theo phương của chuyển vị ngang. Kết quả từ các hình này cho thấy rằng ứng suất trong lớp cao su ở giữa chiều dày gối U-FREI theo phương chuyển vị ngang tại độ lớn 135 mm có dạng biểu đồ và giá trị tương tự như nhau với các cách chia lưới khác nhau. Tuy nhiên, ứng suất trong lớp sợi cacbon ở giữa chiều dày gối U-FREI theo phương chuyển vị ngang tại độ lớn 135 mm có giá trị đỉnh ứng suất nén theo các cách chia khác nhau là gần như nhau, chỉ khác về dạng biểu đồ; trong đó, dạng biểu đồ của cách chia lưới (c) là mịn và trơn nhất. Các dạng biểu đồ ứng suất của cách chia lưới (c) tương đối phù hợp với các kết quả phân tích ứng suất về gối U-FREI của các nghiên cứu [12, 13]. Vì vậy, cách chia lưới phần tử (c) được chọn sử dụng trong nghiên cứu này.



Hình 5. Chuẩn hóa ứng suất S_{33}/p ở lớp cao su giữa chiều dày gối U-FREI theo phương chuyển vị tại độ lớn 135 mm theo các cách chia khác nhau



Hình 6. Chuẩn hóa ứng suất S_{33}/p ở lớp sợi cacbon giữa chiều dày gối U-FREI theo phương chuyển vị tại độ lớn 135 mm theo các cách chia khác nhau

Với cách chia lưới phần tử (c), lớp sợi cacbon chia lưới theo phương nằm ngang kích thước là 6

mm, theo chiều dày kích thước là 0,55 mm, tỷ lệ giữa chiều dài nhất và chiều ngắn nhất của phần tử là xấp xỉ 10,1 lần. Tỷ lệ này tuy lớn nhưng vẫn có thể chấp nhận được trong phân tích mô hình số. Do bài toán trong nghiên cứu này phân tích vật liệu làm việc trong miền phi tuyến và phân tích động nên yêu cầu về cấu hình thiết bị và thời gian phân tích là tương đối lớn. Vì vậy, có thể coi cách chia lưới phần tử (c) là hợp lý, phù hợp nhất trong ba cách chia cho phân tích bài toán ở nghiên cứu này.

3.5. Sự tách lớp giữa các lớp cao su và sợi cacbon trong gôi U-FREI

Đối với các gôi cách chấn đa lớp thông thường, liên kết giữa các lớp lá thép với các lớp cao su cần có kỹ thuật/công nghệ sản xuất và chất kết dính đặc biệt để trong quá trình làm việc gôi cách chấn không bị tách lớp. Ở gôi cách chấn dạng này, chiều dày lớp lá thép cũng lớn hơn chiều dày lớp sợi trong gôi FREI nên việc tách lớp giữa các lớp lá thép và lớp cao su có thể xảy ra ở các chuyển vị ngang có giá trị nhỏ.

Tuy nhiên, đối với gôi U-FREI, chiều dày lớp sợi là tương đối nhỏ (trong nghiên cứu này chiều dày một lớp sợi cacbon là 0,55 mm), liên kết giữa các lớp sợi với các lớp cao su có độ bám dính tốt hơn nhiều so với liên kết giữa các lớp lá thép với các lớp cao su; kỹ thuật liên kết và hóa chất để liên kết giữa các lớp sợi với các lớp cao su cũng đơn giản hơn nên việc tách lớp giữa các lớp sợi với các lớp cao su cũng ít xảy ra hơn. Hơn nữa, gôi FREI làm việc trong điều kiện không liên kết nên việc tách lớp giữa các lớp cao su và các lớp sợi xảy ra ở những chuyển vị ngang có giá trị lớn. Chẳng hạn như trong nghiên cứu [14], các mẫu gôi U-FREI tách lớp ở giá trị chuyển vị ngang khoảng trên $2,75t_r$. Ở nghiên cứu này, giá trị chuyển vị ngang lớn nhất xét đến là $2,0t_r$. Do vậy, mô hình gôi U-FREI trong ANSYS ở nghiên cứu này không xét đến (bỏ qua) khả năng tách lớp giữa lớp sợi cacbon với lớp cao su.

4. Kiểm chứng kết quả phân tích mô hình số

Kết quả ứng xử ngang của gôi U-FREI ở các chuyển vị nhỏ (≤ 80 mm) xác định từ kết quả phân tích mô hình số bằng phần mềm ANSYS được so sánh với kết quả từ thí nghiệm để kiểm chứng kết quả phân tích mô hình số.

Mẫu gôi U-FREI thí nghiệm: Hai mẫu gôi cách chấn U-FREI với các thông số hình học và thông số vật liệu như Bảng 1 được sản xuất. Hình ảnh mẫu gôi U-FREI dùng trong thí nghiệm được thể hiện trong Hình 7.



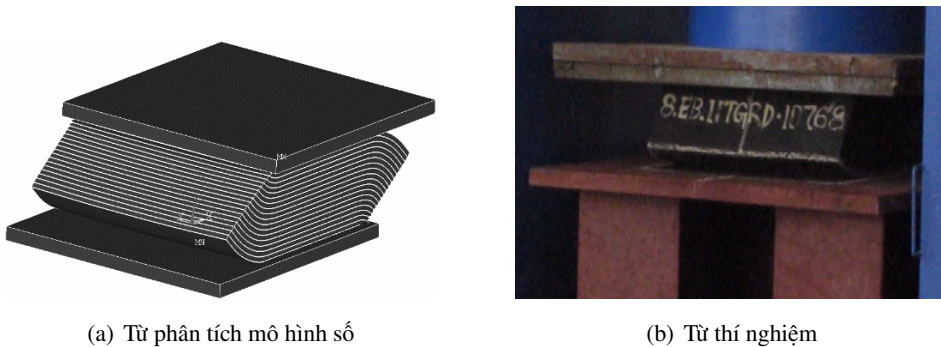
Hình 7. Mẫu gôi U-FREI dùng trong thí nghiệm



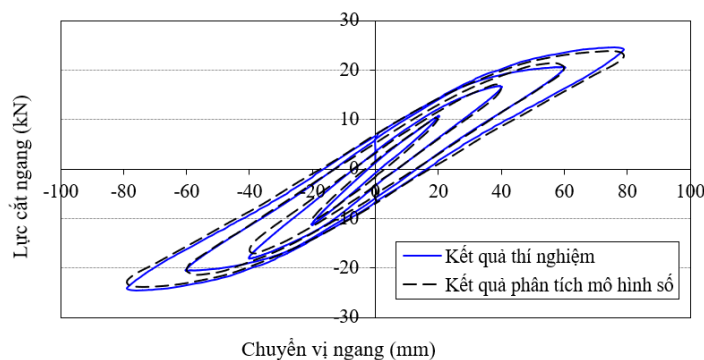
Hình 8. Mô hình thí nghiệm

Mô hình thí nghiệm: Hai mẫu gối cách chấn được thí nghiệm ứng xử ngang trong phòng thí nghiệm Kết cấu, Khoa Công trình, Học viện Công nghệ Guwahati - Ấn Độ. Mô hình thí nghiệm được miêu tả trong Hình 8. Hai mẫu gối cách chấn được đặt chồng lên nhau theo phương đứng và ngăn cách bởi một khung thép ở giữa. Các mẫu gối cách chấn được đặt trực tiếp lên các mặt của các tấm thép phía dưới và phía trên mà không có bất kỳ một liên kết vật lý nào. Một bộ truyền động thủy lực được liên kết với khung thép ở giữa hai mẫu gối cách chấn theo phương ngang. Chuyển vị ngang vòng lặp dạng hàm điều hòa hình sin được truyền vào mẫu gối cách chấn thông qua bộ truyền động này. Toàn bộ hệ thống nằm bên trong một máy nén thủy lực. Tải trọng thẳng đứng với giá trị không đổi bằng 350 kN được truyền vào hai mẫu gối cách chấn thông qua máy nén này. Chuyển vị ngang vòng lặp có giá trị độ lớn tăng dần từ 20 mm tới 80 mm, hai vòng lặp cho mỗi giá trị độ lớn của chuyển vị (như Hình 3). Trong thí nghiệm, độ lớn chuyển vị ngang lớn nhất gán vào mẫu gối cách chấn chỉ là 80 mm (nhỏ hơn so với giá trị trong nghiên cứu bằng phương pháp mô hình số), là do mẫu gối cách chấn sẽ được sử dụng vào công trình thực tế sau khi thí nghiệm nên yêu cầu mẫu gối cách chấn không bị phá hoại trong suốt quá trình thí nghiệm.

Biến dạng của mẫu gối U-FREI tại độ lớn 80 mm của chuyển vị ngang xác định từ mô hình số và thí nghiệm được thể hiện trong Hình 9. Khi gối U-FREI chịu chuyển vị ngang, các mặt của lớp cao su ngoài cùng ở đáy và đỉnh gối có một phần không tiếp xúc (không liên kết) với các mặt của các tấm thép để tạo ra biến dạng cuộn. Biến dạng của gối U-FREI từ phân tích mô hình số và thí nghiệm là tương tự nhau.



Hình 9. Biến dạng của gối U-FREI tại độ lớn 80 mm của chuyển vị ngang

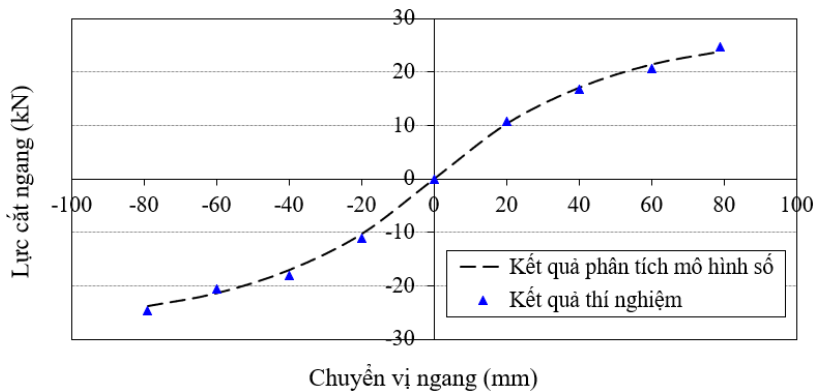


Hình 10. So sánh vòng lặp trễ của gối U-FREI xác định từ phân tích mô hình số và từ thí nghiệm

So sánh vòng lặp trễ của gối U-FREI xác định từ thí nghiệm và phân tích mô hình số khi giá trị độ lớn chuyển vị ngang tăng dần từ 20 mm đến 80 mm được thể hiện trong Hình 10. Vòng lặp trễ thể hiện mối quan hệ giữa lực cắt ngang và chuyển vị ngang trong gối cách chấn. Từ Hình 10 cho thấy sự khác biệt giữa kết quả vòng lặp trễ từ thí nghiệm và phân tích mô hình số là rất nhỏ.

Mối quan hệ giữa lực cắt ngang và chuyển vị ngang của gối U-FREI xác định từ phân tích mô hình số và thí nghiệm được thể hiện trong Hình 11. Các giá trị lực cắt ngang trong Hình 11 là giá trị lực cắt ngang lớn nhất và nhỏ nhất trong vòng lặp trễ (Hình 10) ứng với một giá trị độ lớn của chuyển vị ngang. Kết quả cho thấy mối quan hệ giữa lực cắt ngang và chuyển vị ngang của gối U-FREI xác định từ phân tích mô hình số và thí nghiệm là tương đối phù hợp.

Từ các kết quả so sánh về biến dạng, vòng lặp trễ và mối quan hệ giữa lực cắt ngang và chuyển vị ngang của gối U-FREI ở trên cho thấy rằng kết quả ứng xử ngang của gối U-FREI xác định bằng phân tích mô hình số sử dụng phần mềm ANSYS và từ thí nghiệm là tương đối phù hợp. Do vậy, mô hình số đề xuất ở trên là chính xác và đáng tin cậy trong việc phân tích ứng xử ngang của gối cách chấn đàn hồi cốt sợi dạng không liên kết.

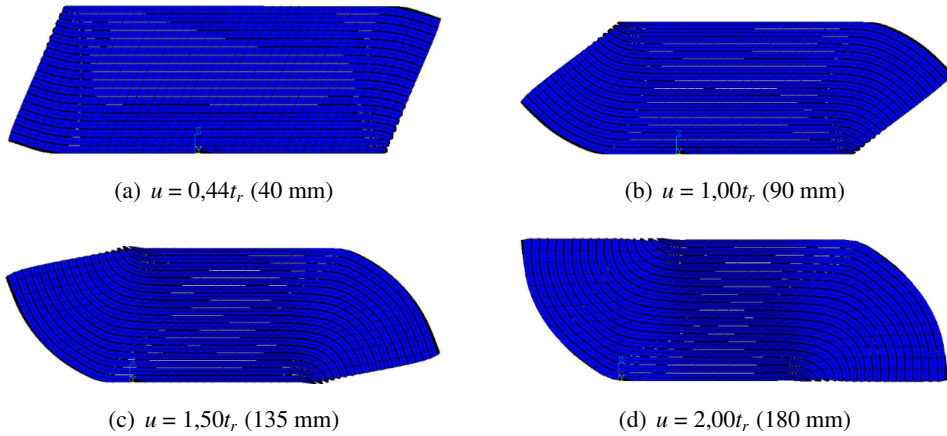


Hình 11. So sánh mối quan hệ giữa lực cắt ngang và chuyển vị ngang của gối U-FREI xác định từ phân tích mô hình số và từ thí nghiệm

5. Kết quả phân tích và bình luận

5.1. Biến dạng của gối U-FREI

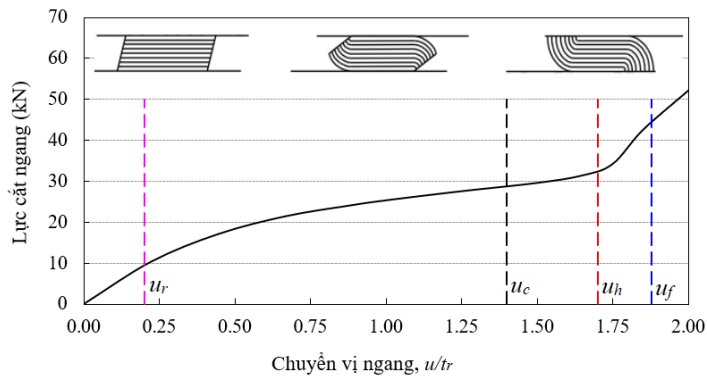
Biến dạng của gối U-FREI ở các giá trị độ lớn khác nhau của chuyển vị ngang được thể hiện trong Hình 12. Khi gối cách chấn chịu chuyển vị ngang, các mặt của lớp cao su ngoài cùng của gối bắt đầu tách rời với hai đế thép ở đáy và đỉnh gối để tạo ra biến dạng cuộn. Biến dạng cuộn là đặc trưng cơ bản của gối cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết. Từ Hình 12 cho thấy, khi giá trị độ lớn của chuyển vị ngang tăng lên thì vùng biến dạng cuộn cũng tăng lên, đồng thời vùng lớp cao su ngoài cùng của gối cách chấn tiếp xúc với các đế thép cũng giảm đi, điều này sẽ làm giảm độ cứng ngang hiệu dụng của gối U-FREI. Khi giá trị độ lớn của chuyển vị ngang đạt đến một giá trị độ lớn nhất định, các mặt bên (mặt hông) của gối U-FREI bắt đầu tiếp xúc với các đế thép. Đến một giá trị độ lớn nào đó của chuyển vị ngang, toàn bộ mặt bên của gối U-FREI tiếp xúc hoàn toàn với các đế thép (Hình 12(d)). Việc tiếp xúc giữa các mặt bên của gối U-FREI với các đế thép sẽ làm gia tăng lực cắt ngang và đồng thời làm tăng độ cứng ngang của gối cách chấn. Các giai đoạn của quá trình ứng xử ngang của gối U-FREI sẽ được trình bày chi tiết hơn ở mục tiếp theo.



Hình 12. Biến dạng của gối U-FREI tại các độ lớn khác nhau của chuyển vị ngang

5.2. Quan hệ giữa lực cắt ngang và chuyển vị ngang

Quan hệ giữa lực cắt ngang và giá trị độ lớn chuyển vị ngang của gối U-FREI được thể hiện trong Hình 13. Lưu ý rằng trong phân tích kết quả mô hình số bằng ANSYS, lực cắt ngang trong gối U-FREI được lấy bằng tổng của tất cả các lực ngang ở tất cả các nút ở tâm thép phía trên của gối cách chân.



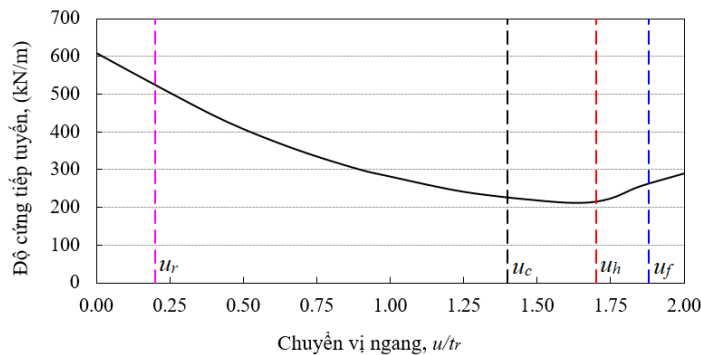
Hình 13. Quan hệ giữa lực cắt ngang và chuyển vị ngang của gối U-FREI

Từ kết quả trong Hình 13, quá trình ứng xử ngang của gối U-FREI khi chịu chuyển vị ngang có giá trị độ lớn tăng dần có thể chia ra thành 4 giai đoạn. Trong giai đoạn đầu, ở các chuyển vị có giá trị nhỏ, gối U-FREI chưa xuất hiện biến dạng cuộn, các mặt cao su ngoài cùng của gối cách chân vẫn tiếp xúc với các bệ đỡ. Ứng xử ngang của gối U-FREI là tương đối tuyến tính trong giai đoạn này. Quá trình này tiếp diễn đến một giá trị chuyển vị mà ở đó các lớp cao su ngoài cùng của gối U-FREI bắt đầu tách rời các bệ đỡ để tạo ra biến dạng cuộn. Giá trị chuyển vị đó được kí hiệu là u_r , ở đây $u_r = 18 \text{ mm}$ ($0,20t_r$). Khi giá trị chuyển vị tiếp tục tăng lên, vùng biến dạng cuộn cũng tăng lên và diện tích vùng cao su ngoài cùng tiếp xúc với các đế thép cũng giảm xuống. Điều này làm cho ứng xử của gối U-FREI trở nên phi tuyến và đồng thời độ cứng ngang của gối U-FREI cũng giảm xuống. Đến một giá trị độ lớn nhất định của chuyển vị, kí hiệu là u_c , các mặt bên của gối U-FREI bắt đầu tiếp xúc với các bệ đỡ, việc tiếp xúc này sẽ làm tăng lực cắt ngang của gối cách chân tức là tăng độ cứng của gối U-FREI. Trong nghiên cứu này, $u_c = 126 \text{ mm}$ ($1,40t_r$) gối U-FREI bắt đầu có sự tiếp

xúc giữa các mặt bên và các bệ đỡ. Khi chuyển vị tiếp tục tăng lên, vùng tiếp xúc giữa mặt bên của gối với các bệ đỡ càng tăng. Đến một giá trị rất lớn của chuyển vị, kí hiệu là u_f , toàn bộ mặt bên của gối tiếp xúc với các mặt của bệ đỡ. Ở đây, $u_f = 168 \text{ mm}$ ($1,87t_r$ hoặc $1,68h$). Khi chuyển vị tiếp tục tăng lên ($u > u_f$), biến dạng của gối không thay đổi, tức là toàn bộ mặt bên của gối tiếp xúc với các mặt của bệ đỡ, nhưng độ lớn của lực cắt ngang tăng lên, tức là tăng độ cứng của gối U-FREI. Trong giai đoạn chuyển vị tăng từ u_c đến u_f , độ cứng ngang của gối chịu ảnh hưởng của hai yếu tố: độ cứng giảm xuống nhờ biến dạng cuộn và độ cứng tăng lên nhờ tiếp xúc giữa các mặt bên và các mặt của bệ đỡ. Do đó, tồn tại một giá trị chuyển tiếp giữa sự giảm đi và tăng lên của độ cứng đó, kí hiệu là u_h , ở đây $u_h = 155 \text{ mm}$ ($1,70t_r$). Khi $u > u_h$ việc tăng độ cứng của gối do tiếp xúc giữa các mặt bên và các mặt của bệ đỡ bắt đầu vượt qua việc giảm độ cứng do biến dạng cuộn. Theo [15], giá trị chuyển vị u_h được xem là giá trị chuyển vị lớn nhất có thể chịu được của hệ kết cấu sử dụng gối cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết.

5.3. Độ cứng ngang

Độ dốc của đường quan hệ giữa lực cắt ngang và chuyển vị ngang thể hiện trong Hình 13 chính là độ cứng tiếp tuyến của gối cách chấn. Độ cứng tiếp tuyến của gối U-FREI được tính toán từ kết quả ANSYS và được thể hiện kèm theo các giá trị chuyển vị u_r , u_c , u_h và u_f như trong Hình 14. Như đã phân tích, độ cứng của gối U-FREI giảm dần khi chuyển vị tăng từ không đến u_h và tăng dần khi chuyển vị tăng từ u_h đến $2,0t_r$.



Hình 14. Quan hệ giữa độ cứng tiếp tuyến và chuyển vị ngang của gối U-FREI

Từ Hình 14 thấy rằng độ cứng tiếp tuyến của gối U-FREI luôn có giá trị dương khi chuyển vị ngang tăng từ không đến giá trị rất lớn là 180 mm ($2,0t_r$). Theo [16], gối U-FREI bị mất ổn định lật tại giá trị chuyển vị ngang nào đó (lớn hơn không) khi độ cứng ngang tiếp tuyến của gối U-FREI về giá trị bằng không ở chuyển vị ngang đó. Quan sát từ Hình 14 thấy rằng gối U-FREI không bị mất ổn định lật ứng với tải trọng đứng thiết kế (350 kN).

6. Kết luận

Nghiên cứu này trình bày ứng xử ngang của gối cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết khi chịu đồng thời tải trọng thẳng đứng không đổi và chuyển vị ngang vòng lặp có giá trị độ lớn tăng dần từ không đến $2,0t_r$ bằng phân tích mô hình số. Kết quả phân tích cho thấy gối U-FREI có ứng xử ngang phi tuyến khi chịu chuyển vị nhỏ nhờ có biến dạng cuộn. Ở các giá trị chuyển vị nhỏ, độ cứng ngang của gối U-FREI giảm dần. Khi giá trị chuyển vị ngang tăng lên đến một giá trị nhất định, độ cứng

ngang của gối cách chấn tăng lên nhờ sự tiếp xúc giữa các mặt bên của gối U-FREI với các mặt của các phần móng và phần thân công trình. Tồn tại một giá trị chuyển vị ngang (u_h) mà ở đó sự giảm độ cứng của gối U-FREI do biến dạng cuộn và sự tăng độ cứng của gối cách chấn do tiếp xúc giữa các mặt bên của gối và các mặt của bộ đỡ là bằng nhau. Giá trị chuyển vị (u_h) được xem là giá trị chuyển vị lớn nhất có thể chịu được của hệ kết cấu sử dụng gối cách chấn đàn hồi cốt sợi không liên kết.

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] Hedayati Dezfuli, F., Alam, M. S. (2014). [Performance of carbon fiber-reinforced elastomeric isolators manufactured in a simplified process: experimental investigations](#). *Structural Control and Health Monitoring*, 21(11):1347–1359.
- [3] Strauss, A., Apostolidi, E., Zimmermann, T., Gerhaer, U., Dritsos, S. (2014). [Experimental investigations of fiber and steel reinforced elastomeric bearings: Shear modulus and damping coefficient](#). *Engineering Structures*, 75:402–413.
- [4] Thuyet, N. V., Dutta, A., Deb, S. K. (2017). [Evaluation of horizontal stiffness of fibre-reinforced elastomeric isolators](#). *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(11):1747–1767.
- [5] Thuyet, N. V., Deb, S. K., Dutta, A. (2018). [Effect of horizontal loading direction on performance of prototype square unbonded fibre reinforced elastomeric isolator](#). *Structural Control and Health Monitoring*, 25(3):e2112.
- [6] Thuyet, N. V. (2018). [Effect of shear modulus on the performance of prototype un-bonded fiber reinforced elastomeric isolators](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - NUCE*, 12(5): 10–19.
- [7] Thuyết, N. V. (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 (KHCN XD)-ĐHXD*, 12(6):39–48.
- [8] Ogden, R. W. (1972). [Large deformation isotropic elasticity—on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids](#). *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, The Royal Society London, 326(1567):565–584.
- [9] Holzapfel, G. A. (1996). [On large strain viscoelasticity: continuum formulation and finite element applications to elastomeric structures](#). *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 39(22): 3903–3926.
- [10] ASCE/SEI 7-05 (2006). *Minimum design load for buildings and other structure*. American Society of Civil Engineers, Virginia, USA.
- [11] *International Building Code*.
- [12] Toopchi-Nezhad, H., Tait, M. J., Drysdale, R. G. (2011). [Bonded versus unbonded strip fiber reinforced elastomeric isolators: finite element analysis](#). *Composite Structures*, 93(2):850–859.
- [13] Osgooei, 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.
- [14] de Raaf, M. G. P., Tait, M. J., Toopchi-Nezhad, H. (2011). [Stability of fiber-reinforced elastomeric bearings in an unbonded application](#). *Journal of Composite Materials*, 45(18):1873–1884.
- [15] Toopchi-Nezhad, H., Tait, M. J., Drysdale, R. G. (2008). [Testing and modeling of square carbon fiber-reinforced elastomeric seismic isolators](#). *Structural Control and Health Monitoring*, 15(6):876–900.
- [16] Kelly, J. M., Calabrese, A. (2012). *Mechanics of fiber reinforced bearings*. PEER Report, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA.