

NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ CƠ-ĐIỆN CỦA BÊ TÔNG TÍNH NĂNG CAO DƯỚI TẢI TRỌNG UỐN TRÙNG PHỤC

Phan Tấn Duy^{a,b}, Lê Bá Khánh^{a,b}, Nguyễn Duy Liêm^{c,*}, Nguyễn Văn Thuần^d, Nguyễn Hữu Nghĩa^e

^aKhoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP. Hồ Chí Minh,
268 đường Lý Thường Kiệt, quận 10, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^bĐại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, phường Linh Trung, TP. Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^cKhoa Xây dựng, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh,
01 Võ Văn Ngân, Linh Chiểu, TP. Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh

^dKhoa Kỹ thuật giao thông, Trường Đại học Nha Trang,
02 Nguyễn Đình Chiểu, Vĩnh Thọ, Nha Trang, Khánh Hòa

^eKhoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Nguyễn Tất Thành,
300A Nguyễn Tất Thành, Phường 13, Quận 4, TP. Hồ Chí Minh

Nhận ngày 10/4/2023, Sửa xong 22/6/2023, Chấp nhận đăng 03/7/2023

Tóm tắt

Bài báo trình bày tính năng thông minh tự cảm biến của bê tông tính năng cao (high-performance fiber-reinforced concrete, HPFRC) dưới tải trọng uốn trùng phục thông qua thực nghiệm. Hai loại HPFRC được gia cường cốt sợi thép khác nhau: bê tông không cốt sợi (kí hiệu HPFRC0), bê tông dùng cốt sợi nhỏ với hàm lượng 1,5% theo thể tích (kí hiệu HPFRC1). Các mẫu uốn được thí nghiệm trong giai đoạn đàn hồi dưới sơ đồ uốn ba điểm, sử dụng hai biên độ tải trọng trùng phục khác nhau. Khả năng tự cảm biến của các HPFRC được đánh giá thông qua hệ số cảm biến dựa trên mô hình được nhóm tác giả đề xuất. Kết quả thí nghiệm cho thấy tất cả loạt mẫu HPFRC đều thể hiện khả năng tự cảm biến rất tốt dưới tác động của tải trọng uốn trùng phục. Khi tăng tỷ lệ ứng suất môi từ 0,15 đến 0,50, khả năng tự cảm biến của tất cả loạt mẫu HPFRC có xu hướng giảm, mặc dù giá trị tuyệt đối của độ thay đổi điện trở tương đối tại mặt kéo và mặt nén có xu hướng tăng.

Từ khóa: quan trắc sức khỏe công trình; khả năng tự cảm biến; hệ số cảm biến; tải trọng lặp; HPFRC.

STUDY ON ELECTROMECHANICAL BEHAVIOR OF HIGH-PERFORMANCE FIBER-REINFORCED CONCRETE UNDER FLEXURE WITH REPETITIVE LOADING

Abstract

This paper deals with the self-sensing properties of HPFRCs under flexure with repetitive loading through a series of experimental tests. Two series of examined HPFRCs have different added fiber types and contents as follows: HPFRC0 (no fiber, 0.0% by volume), HPFRC1 (micro smooth fiber, 1.5% by volume). All flexural specimens were tested under two different repetitive loading amplitudes within the elastic phase using three-point bending (3PB). The self-sensing capability of the studied HPFRCs was evaluated by using a suggested gauge factor. The test results show that all HPFRCs series demonstrate good self-sensing capability under flexure with repetitive loading. As the fatigue stress ratio ranged from 0.15 to 0.50, the self-sensing capability of the HPFRCs decreased, although the absolute value of fractional change in electrical resistance at both compression and tension side increased.

Keywords: structural health monitoring; self-sensing properties; gauge factor; repetitive loading; HPFRC.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(4V\)-04](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(4V)-04) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Công tác quan trắc sức khỏe công trình (Structural Health Monitoring, SHM) là một trong những công việc quan trọng, không thể thiếu trong công tác quản lý - khai thác công trình xây dựng. Mục

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: liemnd@hcmute.edu.vn (Liêm, N. D.)

đích công tác SHM giúp phát hiện các hư hỏng hoặc suy giảm chất lượng công trình trong quá trình vận hành khai thác. Công tác SHM cũng cung cấp thông tin hữu ích về ứng xử, khả năng khai thác phục vụ của công trình tại thời điểm hiện tại như: thông tin về mức độ hư hỏng, xuống cấp, đánh giá một cách chính xác năng lực làm việc thực tế của kết cấu, khả năng ứng xử trong các sự cố hoặc ứng xử bất thường của kết cấu. Từ các thông tin quan trắc sức khỏe, các hạng mục kết cấu công trình có thể được đề xuất giảm tải, hay xây dựng phương án duy tu, sửa chữa kịp thời, để đảm bảo hoạt động bình thường của công trình. Bên cạnh đó, công tác SHM cũng cung cấp các số liệu định lượng cho công trình, các số liệu này có thể được sử dụng phục vụ công tác nghiên cứu, cải tiến phương pháp xây dựng, thiết kế công trình. Hiện nay, có nhiều kỹ thuật quan trắc khác nhau có thể liệt kê như sau: phương pháp không phá hủy kết cấu (non-destructive methods), bao gồm thí nghiệm búa hồi âm (rebound hammer test), phát xạ âm thanh (acoustic emission), kiểm tra siêu âm (ultrasonic inspection) và dùng cảm biến (sensor) truyền thống. Trong những kỹ thuật quan trắc sức khỏe công trình đã liệt kê như trên, kỹ thuật truyền thống dùng các cảm biến (sensor) gắn hay chôn sẵn vào kết cấu đã và đang được áp dụng rộng rãi tại nhiều công trình lớn tại Việt Nam như: cầu Nhật Tân, cầu Nguyễn Văn Trỗi – Trần Thị Lý, cầu Cần Thơ, cầu Cao Lãnh, cầu Nhật Lệ 2, Nút giao thông Ngã Ba Huế... Tuy nhiên, kỹ thuật quan trắc này đòi hỏi một qui trình hệ thống thiết bị rất phức tạp. Ngoài ra, việc chôn cảm biến vào kết cấu phục vụ cho công tác quan trắc cũng ảnh hưởng rất nhiều đến khả năng chịu tải trọng của kết cấu. Hơn thế nữa, các cảm biến này có chi phí cao, tuổi thọ thấp do chịu tác động trực tiếp từ điều kiện thời tiết ngoài trời.

Trong những năm gần đây, bê tông cốt sợi có tính năng cao (high-performance fiber-reinforced concrete, HPFRC) được đánh giá là một trong những vật liệu có triển vọng trong ngành xây dựng do có các đặc tính cơ học vượt trội hơn nhiều so với bê tông thường (conventional concrete, CC) và bê tông cường độ cao (high-strength concrete, HSC) [1, 2]. Các tính chất cơ học ưu việt của HPFRC bao gồm cường độ nén > 90 MPa [3], cường độ kéo > 10 MPa [4] và cường độ kéo uốn > 20 MPa [5], khả năng hấp thụ năng lượng lớn và độ bền cao [6–9], khả năng kháng nứt cao [10, 11]. Bên cạnh đó, HPFRC bước đầu được phát hiện có một số tính chất thông minh như tự hàn vết nứt (self crack-healing) [12], tự cảm biến hư hỏng (self damage-sensing) [13–15]. Cơ chế thông minh tự cảm biến hư hỏng của HPFRC được mô tả như sau: ứng suất, biến dạng, vết nứt của vật liệu HPFRC có mối liên hệ với điện trở suất (electrical resistivity), do đó xác định điện trở suất có thể xác định các thông số cơ học nêu trên. Nhiều nhà nghiên cứu đã công bố các nghiên cứu về đặc tính tự cảm của các vật liệu bê tông khác nhau [16–20]. Chen và Chung [16] đã nghiên cứu điện trở suất của vật liệu bê tông có chứa sợi carbon. Tác giả kết luận rằng bê tông chứa 0,2 đến 0,5% thể tích sợi carbon có thể cảm nhận được sự biến dạng đàn hồi, biến dạng không đàn hồi và vết nứt. Một nghiên cứu khác cũng phát hiện ra khả năng tự cảm biến của vữa bê tông chứa 0,2–4,2% hàm lượng sợi cacbon [17]. Wen và cs. [18] đã so sánh khả năng tự cảm biến của thép và vật liệu bê tông có chứa sợi dưới tác dụng của tải trọng nén lặp và tải trọng kéo lặp. Kết quả của nghiên cứu này cụ thể như sau: hệ số cảm biến của vật liệu bê tông có chứa sợi thép khi chịu kéo và nén dưới tải trọng lặp lần lượt đạt đến 1290 và 720 với hàm lượng sợi thép là 0,36% theo thể tích, đạt đến 4560 và 200 đối với hàm lượng sợi thép là 0,72% theo thể tích. Banthia và cs. [19] đã nghiên cứu điện trở suất của vật liệu bê tông có gia cường sợi thép nhỏ và sợi carbon. Nhóm tác giả kết luận rằng điện trở suất của vật liệu bê tông đã giảm đáng kể khi gia cường sợi thép và sợi cacbon. Bên cạnh đó, tác giả cũng kết luận rằng việc thêm sợi carbon vào vật liệu bê tông hiệu quả hơn so với việc thêm sợi thép. Trong một nghiên cứu khác của nhóm tác giả Azhari và Banthia [20] thí nghiệm mẫu nén với tốc độ gia tải khác nhau, kết quả cho thấy sự kết hợp của sợi carbon và nano carbon ông tạo ra độ nhạy tốt hơn so với việc chỉ sử dụng sợi carbon. Demircilioglu và cs. [21] đã nghiên cứu khả năng cảm biến của hỗn hợp bê tông chứa cốt liệu lớn có

đường kính đến 15 mm và sợi thép gia cường có chiều dài 13 mm và đường kính 0,25 mm dưới tải trọng nén. Kết quả của nghiên cứu này chỉ ra rằng khả năng cảm biến tăng lên khi hàm lượng của sợi thép theo thể tích trong hỗn hợp bê tông tăng lên. Nguyen và cs. [13] đã nghiên cứu ảnh hưởng của sáu loại sợi thép đối với ứng xử tự cảm hư hỏng của bê tông cốt sợi dưới tải trọng kéo trực tiếp. Nhóm tác giả kết luận rằng điện trở suất của bê tông cốt sợi giảm đáng kể sau điểm nứt cuối cùng và có mối quan hệ chặt chẽ với việc tạo ra nhiều vết nứt nhỏ trong quá trình tăng cứng cơ học của vật liệu này. Ngoài ra, tất cả các loạt mẫu đều có hệ số cảm biến thay đổi từ 50 đến 140. Loạt mẫu được gia cường sợi thép dài và sợi thép xoắn trung bình đạt hệ số cảm biến cao nhất khoảng 140, tức là khả năng cảm biến hư hỏng tốt nhất. Gần đây, Le và cs. [22] đã nghiên cứu tính chất tự cảm biến của vật liệu thông minh bê tông siêu tính năng (UHPC) có chứa cả sợi thép và cốt liệu xi măng dưới tải trọng nén. Kết quả của nghiên cứu này chỉ ra rằng khi ứng suất nén tăng lên, điện trở suất của vật liệu UHPC giảm rõ ràng.

Mặc dù đã có một số lượng lớn các nghiên cứu như đã đề cập ở trên về đặc tính tự cảm biến của nhiều vật liệu bê tông khác nhau dưới các loại tải trọng đa dạng như tải trọng nén, kéo và ép chế. Tuy nhiên, thông tin về đặc tính tự cảm biến của HPFRC dưới tải trọng uốn trùng phục vẫn còn hạn chế, chưa được sáng tỏ; đặc tính thông minh tự cảm biến của HPFRC còn khá mới mẻ ở Việt Nam. Những đánh giá đầy đủ về tính chất cơ-điện của HPFRC ở Việt Nam còn rất ít và đặc biệt là chưa có nghiên cứu nào về tính chất thông minh tự cảm ứng của HPFRC dưới tải trọng tải trọng uốn trùng phục. Do đó, việc nghiên cứu đặc tính tự cảm biến của HPFRC dưới tải trọng uốn trùng phục là thật sự cần thiết. Kết quả nghiên cứu này hy vọng sẽ cung cấp thêm thông tin hữu ích về đặc tính tự cảm của vật liệu HPFRC, giúp ứng dụng vật liệu này đạt hiệu quả cao trong xây dựng cơ sở hạ tầng, hướng đến sự phát triển bền vững, đô thị thông minh.

2. Ứng xử uốn của HPFRC dưới tải trọng uốn trùng phục

Mối quan hệ giữa tham số ứng suất (S) và số chu kỳ (N), còn được gọi là mối quan hệ Wöhler, thường được sử dụng trong đường cong ứng xử mỗi chịu tải trọng lặp. Trong ứng xử này, số chu kỳ lặp N được xác định khi vật liệu bị phá hoại, tham số ứng suất S có thể được sử dụng dưới nhiều hình thức khác nhau. Dạng gốc của S đề cập đến biên độ ứng suất (f_a) được xác định bằng một nửa của biên độ ứng suất mỗi, $f_a = (f_{\max} - f_{\min})/2$, trong đó f_{\max} và f_{\min} lần lượt là ứng suất uốn mỗi lớn nhất và nhỏ nhất tác dụng lên mẫu thử [23, 24]. Một dạng khác của S được định nghĩa là tỷ số giữa ứng suất uốn mỗi lớn nhất (f_{\max}) và cường độ kéo uốn lớn nhất dưới tải trọng tĩnh (f_{MOR}) [25, 26], dạng này được thể hiện tại biểu thức (1) theo một hàm tuyến tính. Một số nghiên cứu khác đề cập phương trình mỗi hiển thị trong biểu thức (2) [25, 27, 28], sử dụng hệ số điều chỉnh (R), là tỷ số giữa ứng suất uốn mỗi nhỏ nhất (f_{\min}) và ứng suất uốn mỗi lớn nhất (f_{\max}). Phương trình tuyến tính được sửa đổi với hệ số R được hiển thị trong biểu thức (2) [25, 27, 28]. Để áp dụng biểu thức (2), giá trị của R phải nằm trong khoảng (0, 1), f_{\min} hoặc biên độ ứng suất mỗi ($\Delta f_{\max} = f_{\max} - f_{\min}$) phải thay đổi. Các hệ số a , b và β là các hằng số vật liệu được xác định từ thực nghiệm.

$$S = \frac{f_{\max}}{f_{MOR}} = a + b \log_{10}(N) \quad (1)$$

$$S = \frac{f_{\max}}{f_{MOR}} = 1 - \beta(1 - R) \log_{10}(N) \quad (2)$$

Trong nghiên cứu này, mẫu thử uốn HPFRC được thiết kế để duy trì ứng suất kéo ở thớ dưới của mẫu uốn trong quá trình chịu tải trọng lặp, tức là $f_{\max} > f_{\min} > 0$, và S sẽ được thể hiện dưới biểu

thức (3): bằng tỷ số giữa biên độ ứng suất môi và cường độ kéo uốn lớn nhất dưới tải trọng tĩnh.

$$S = \frac{\Delta f_{\max}}{f_{MOR}} = \frac{(f_{\max} - f_{\min})}{f_{MOR}} \quad (3)$$

trong đó, f_{\max} và f_{\min} lần lượt là ứng suất uốn môi lớn nhất và nhỏ nhất; f_{MOR} là cường độ kéo uốn lớn nhất dưới tải trọng tĩnh.

3. Thí nghiệm

3.1. Chương trình thí nghiệm

Có hai loại HPFRC thí nghiệm: không sợi (tên mẫu HPFRC0) và gia cường 1,5% hàm lượng sợi theo thể tích (tên mẫu HPFRC1). Hai mức biên độ tải trọng khác nhau lần lượt được áp dụng cho HPFRC0, HPFRC1 thông qua hai mức tỉ lệ ứng suất môi $\Delta f_{\max}/f_{MOR}$ như sau: mức 1 với $\Delta f_{\max}/f_{MOR} = 0,15$ và mức 2 với $\Delta f_{\max}/f_{MOR} = 0,50$.

3.2. Vật liệu và phương pháp chế tạo mẫu

Mẫu uốn HPFRC được thiết kế có hình dạng lăng trụ với rộng \times cao \times chiều dài là $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ (chiều dài nhịp 120 mm). Thành phần cấp phối chế tạo mẫu HPFRC theo tỉ lệ trọng lượng được cung cấp tại Bảng 1. Theo Bảng 1, thành phần cấp phối HPFRC bao gồm: xi măng, muối silic, cát thạch anh, tro bay, phụ gia hóa dẻo, nước. Xi măng sử dụng là loại INSEE PCB 40. Cát sử dụng trong nghiên cứu là sản phẩm của công ty UHPC Việt cung cấp có đường kính hạt $< 1 \text{ mm}$. Bảng 2 cung cấp tính chất cơ lý của sợi thép nhỏ dùng trong chế tạo HPFRC. Theo Bảng 2, sợi thép nhỏ trơn thẳng (smooth) đường kính 0,2 mm, dài 13 mm với hàm lượng 1,5% theo thể tích, có khối lượng riêng $7,9 \text{ g/cm}^3$, mô đun đàn hồi 200 GPa và cường độ kéo đứt lớn hơn 2500 MPa. Hình 1 mô tả thành phần phối bê tông HPFRC bằng ảnh chụp và Hình 2 mô tả hình chụp sợi thép nhỏ trong gia cường HPFRC1.

Bảng 1. Cấp phối vật liệu HPFRC theo tỉ lệ khối lượng

Xi măng (kg/m^3)	Muối silic (kg/m^3)	Cát (kg/m^3)	Tro bay (kg/m^3)	Phụ gia hóa dẻo (kg/m^3)	Nước (kg/m^3)
0,80	0,07	1,00	0,20	0,40	0,26

Bảng 2. Tính chất cơ lý của sợi thép nhỏ

Đường kính sợi (d)	$0,2 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$
Chiều dài sợi (L)	$13 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$
Tỉ số hình học (L/d)	65
Độ bền kéo	$> 2000 \text{ N/mm}^2$
Hình dạng	Tròn, trơn

Hỗn hợp vật liệu được trộn bằng máy trộn cưỡng bức có dung tích thùng trộn 60 lít. Xi măng, silica fume, cát silica và tro bay lúc đầu được trộn khô trong khoảng 10 phút. Sau khi trộn khô, nước được thêm vào và trộn thêm trong khoảng 5 phút. Tiếp theo, phụ gia siêu dẻo được thêm vào liên tục và trộn trong vòng 10-15 phút. Khi vữa bê tông đạt độ linh động thích hợp, sợi thép được thêm từ từ bằng tay vào hỗn hợp và trộn trong 5-10 phút. Lưu ý sự phân bố sợi thép trong hỗn hợp vữa có thể ảnh



(a) Xi măng



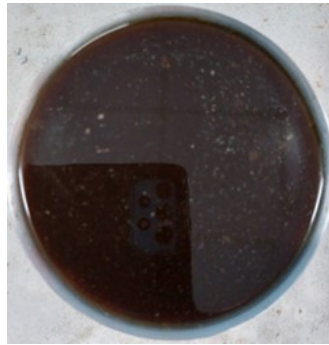
(b) Muối silic



(c) Cát trắng



(d) Tro bay



(e) Phụ gia hoá dẻo

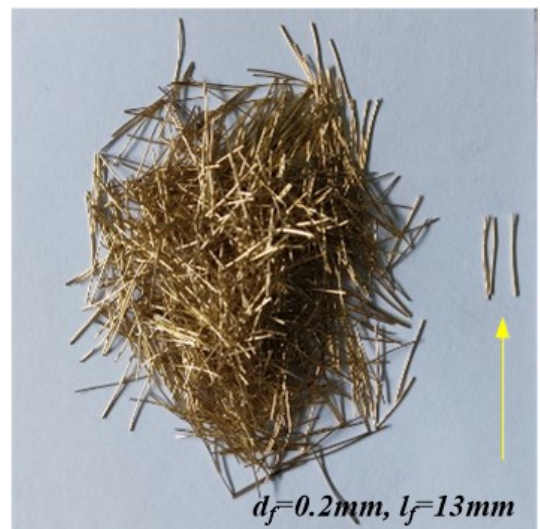


(f) Nước

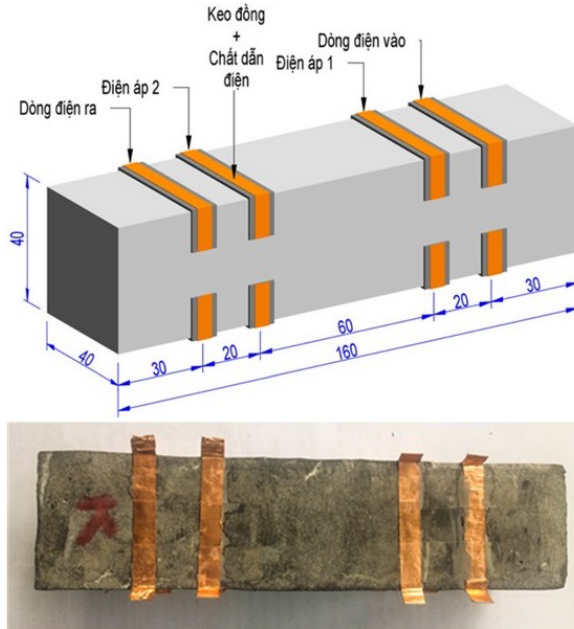
Hình 1. Ảnh chụp các thành phần vật liệu trong HPFRC

hưởng lớn đến tính chất cơ học của HPFRC. Do đó, giai đoạn trộn nên được thực hiện cẩn trọng để đạt được sự phân bố sợi thép đồng đều cao nhất. Tiếp theo, vữa bê tông có chứa sợi thép được đổ vào khuôn và lưu trong phòng thí nghiệm trong khoảng 24 giờ. Sau khi tháo ván khuôn, tất cả các mẫu đúc được bảo dưỡng trong nước ở nhiệt độ từ 22°C đến 29°C trong 28 ngày. Sau cùng, tất cả các mẫu đúc được đưa ra khỏi nước và để khô tự nhiên trong phòng thí nghiệm. Để tăng độ chính xác trong quá trình đo điện trở khi thí nghiệm, các mẫu uốn HPFRC sẽ được mài phẳng bốn bề mặt và được vệ sinh sạch bụi bằng chổi lông kết hợp khăn ẩm. Sau đó, bề mặt trên và dưới các mẫu uốn HPFRC được dán các điện cực bằng dải đồng mảnh, đảm bảo không bị bong tróc trong suốt quá trình thí nghiệm. Keo dán dải đồng vào bề mặt mẫu uốn HPFRC cũng sử dụng keo dẫn điện tốt nhằm giảm thiểu kết quả sai lệch đo điện trở.

Theo thể hiện ở Hình 3, khoảng cách giữa hai điện cực bên ngoài để đo dòng điện là 100 mm. Khoảng cách giữa hai điện cực bên trong để đo điện áp là 60 mm. Bề rộng dải đồng sử dụng là 6 mm.

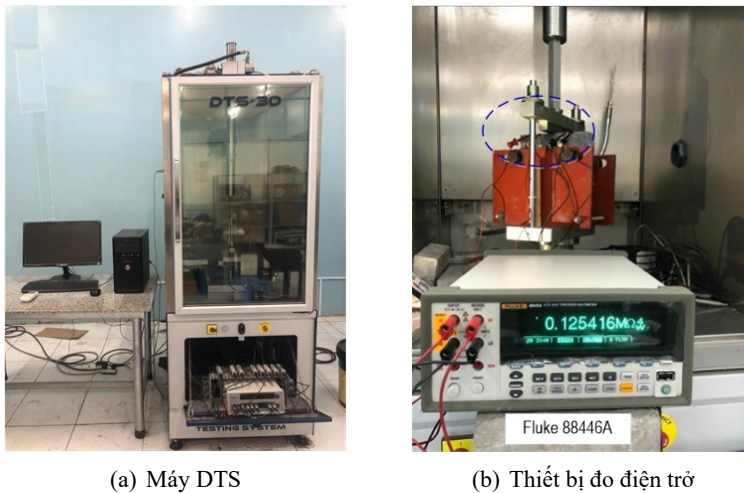


Hình 2. Ảnh chụp sợi thép nhỏ được sử dụng trong HPFRC1



Hình 3. Kích thước chi tiết mẫu uốn HPFRC

3.3. Thiết lập thí nghiệm

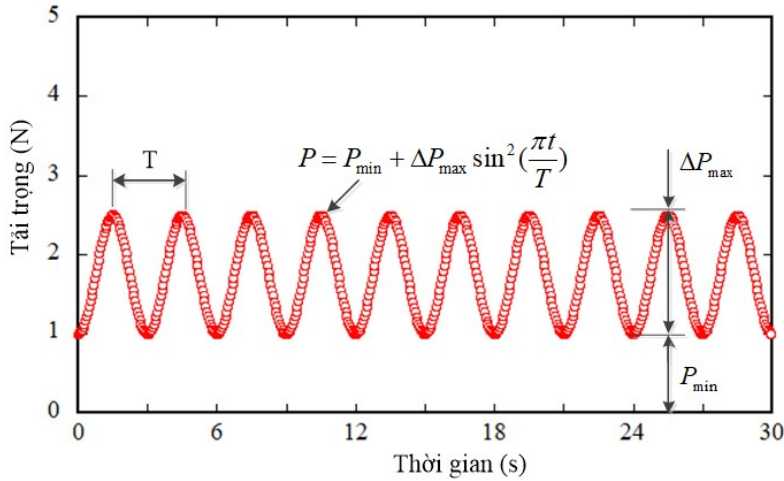


Hình 4. Ảnh chụp thiết lập thí nghiệm uốn mẫu và đo điện trở

Hình 4(a) mô tả máy thí nghiệm Dynamic Testing System (DTS) có khả năng cung cấp tải tập trung lớn nhất 30 kN. Tất cả các mẫu uốn được thí nghiệm dưới sơ đồ ba điểm uốn. Trong quá trình thí nghiệm, giá trị tải và chuyển vị trong quá trình áp tải được máy ghi lại thông qua thiết bị cảm biến. Điện trở tại thớ trên và thớ dưới của mẫu uốn lần lượt được đo bằng đồng hồ vạn năng Fluke 8846A Multimeters trong suốt quá trình áp tải như mô tả ở Hình 4(b). Do hạn chế về thiết bị đo điện trở, điện trở tại thớ trên được đo trước, sau đó đo điện trở tại thớ dưới cho cùng một mẫu thí nghiệm. Để hạn chế cấu trúc mẫu thay đổi, ví dụ vết nứt có thể xuất hiện trong lần đo điện trở thớ trên, số chu kỳ áp tải được giới hạn trong khoảng 10 chu kỳ. Hình 5 mô tả tải trọng lặp điển hình được sử dụng trong thí nghiệm uốn để nghiên cứu tính cơ-điện của HPFRC dưới tải trọng trùng phục [29]. Biểu thức (4)

trình bày công thức toán học của tải trọng lặp sử dụng trong bài báo này. Trong biểu thức (4), tải lặp tối thiểu là $P_{\min} = 1$ kN với một chu kỳ $T = 3.0$ s, thời gian nghỉ trong chu kỳ bằng 0, tải trọng lặp lớn nhất (P_{\max}) tác dụng lên mẫu thử uốn có thể được chọn từ P_{\min} đến P_{MOR} .

$$P = P_{\min} + [P_{\max} - P_{\min}] \sin^2(\pi t/T) \quad (4)$$



Hình 5. Tải trọng lặp điển hình trong thí nghiệm uốn

Bảng 3 tóm tắt kết quả cường độ chịu uốn lớn nhất dưới tải trọng tĩnh (f_{MOR}) [29] và giá trị của biên độ tải trọng lớn nhất của hai loạt mẫu HPFRC0 và HPFRC1. Giá trị f_{MOR} của các loại HPFRC được sử dụng để xác định giá trị tương ứng của Δf_{\max} thông qua tỷ lệ ứng suất môi ($\Delta f_{\max}/f_{MOR}$) được chọn là 0,15 và 0,50. Từ đó, biên độ tải trọng lớn nhất (ΔP_{\max}) được tính toán thông qua biểu thức (5).

$$\Delta P_{\max} = \frac{2bh^2}{3L} \times \Delta f_{\max} \quad (5)$$

Mỗi loại HPFRC thí nghiệm 3 mẫu sau đó lấy kết quả trung bình đánh giá, phân tích.

Bảng 3. Biên độ tải trọng dùng trong thí nghiệm

Tên mẫu	f_{MOR} (MPa)	$\Delta f_{\max}/f_{MOR}$	ΔP_{\max} (kN)
HPFRC0 (không sợi)	10,41	0,15	0,560
		0,50	1,850
HPFRC2 (sợi nhỏ, 1,5%)	27,76	0,15	1,500
		0,50	4,935

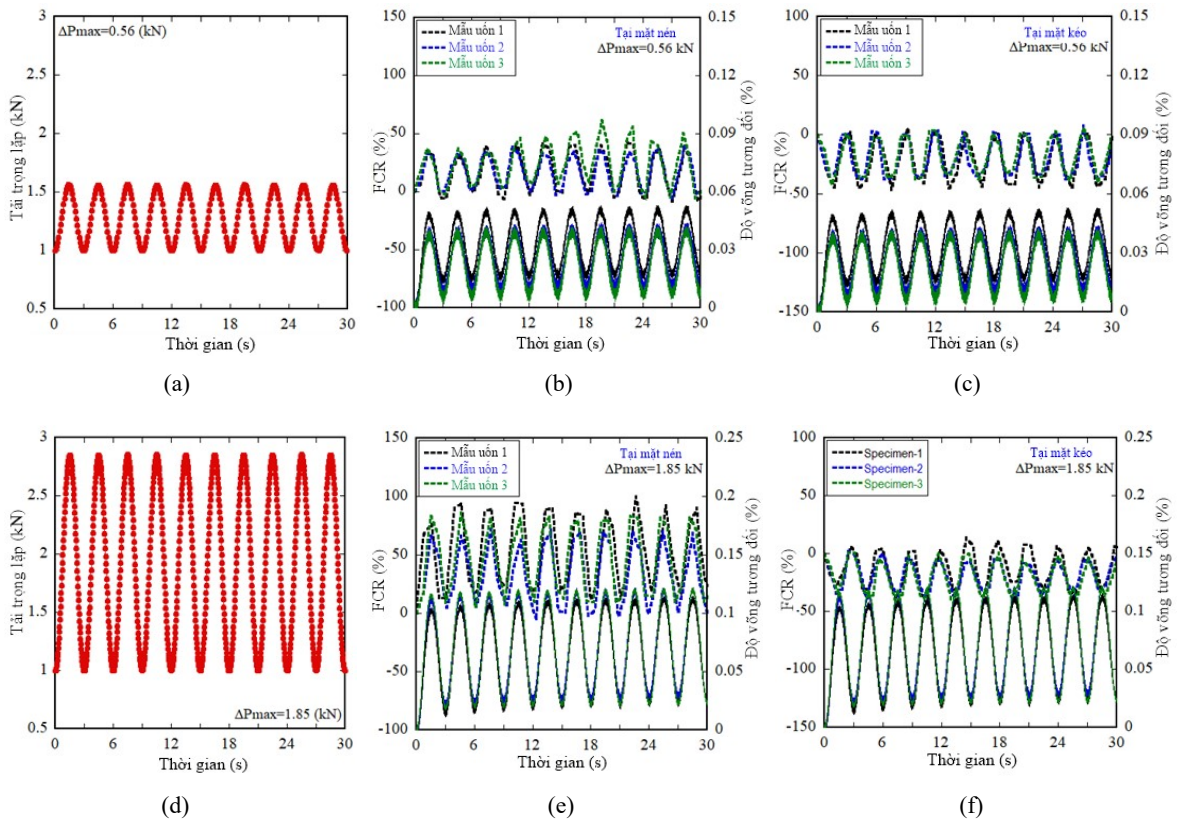
4. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

Trong bài báo này, đặc tính tự cảm biến của các loại HPFRC được đánh giá thông qua hệ số cảm biến, hệ số này chứa thông số độ thay đổi của điện trở (FCR). Biểu thức (6) được sử dụng để tính toán FCR , trong đó, R_0 là điện trở ban đầu (điện trở khi không có tải), R_i là điện trở dưới tải trọng uốn trùng phục.

$$FCR(\%) = \frac{\Delta R}{R_0} \times 100\% = \frac{R_i - R_0}{R_0} \times 100\% \quad (6)$$

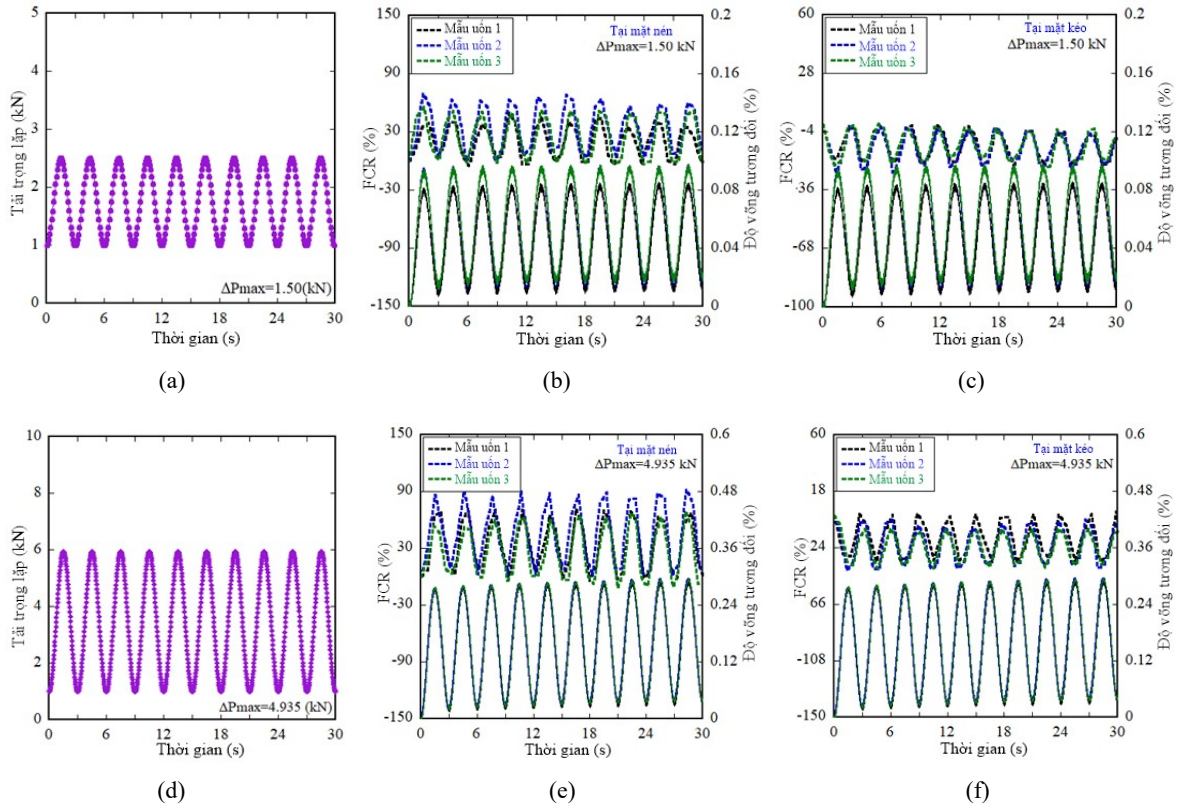
4.1. Ứng xử cơ-điện của HPFRC dưới tải trọng uốn trùng phức

Hình 6 và 7 thể hiện ứng xử cơ-điện trong 10 chu kỳ uốn đầu tiên tại mặt nén và mặt kéo khi chịu tác động của hai biên độ tải trọng uốn trùng phức khác nhau của mẫu uốn HPFRC0 (Hình 6), HPFRC1 (Hình 7). Theo Hình 6 và 7, ứng xử của FCR theo thời gian của hai loại HPFRC nghiên cứu (đường nét đứt trong các Hình 6(b, c, e, f) và Hình 7(b, c, e, f)) có mối quan hệ mật thiết với đường cong tải theo thời gian (Hình 6(a, d) và Hình 7(a, d)): tương đồng chu kỳ và cùng xu hướng tại mặt nén, tương đồng chu kỳ và trái xu hướng tại mặt kéo. Đây là một ứng xử thú vị, thể hiện khả năng tự cảm biến của HPFRC dưới tải uốn đàn hồi. Ứng xử của độ võng tương đối ($\Delta\delta/L$) theo thời gian cũng tương đồng về chu kỳ so với đường cong tải (đường nét liền trong các Hình 6(b, c, e, f) và Hình 7(b, c, e, f)). Bảng 4 và 5 lần lượt cung cấp thông số cơ-điện và thông số uốn của HPFRC0 và HPFRC1 dưới tải trọng uốn trùng phức. Theo Bảng 4 và 5, các thông số cơ-điện tại mặt kéo và mặt nén của mẫu thử nghiệm bao gồm điện trở ban đầu (R_0), biên độ điện trở (ΔR), FCR và $\Delta\delta/L$. Các kết quả trong bảng này được lấy trung bình từ ba mẫu thử nghiệm cho mỗi loạt mẫu HPFRC.



Hình 6. Ứng xử cơ-điện của HPFRC0 dưới tải trọng uốn trùng phức

Theo Hình 6 và 7, loạt mẫu HPFRC0 không gia cường sợi thép vẫn thể hiện các đặc tính tự cảm biến tốt như loạt mẫu HPFRC1. Như vậy, đặc tính tự cảm biến của bê tông tính năng cao không có cốt sợi gia cường vẫn có thể tồn tại, điều này phù hợp với kết quả nghiên cứu của Suchorzewski và cs. [30] cho vật liệu HPFRC dưới tải nén dọc trục. Ngoài ra, Ranade và cs. [31], Li và cs. [32], cũng phát hiện bê tông kỹ thuật (Engineered Cementitious Composites, ECCs) trộn sợi phi kim Polyvinyl Alcohol (PVA) cũng tạo ra được tính tự cảm biến dưới tải kéo dọc trục, mặc dù xu hướng thay đổi điện trở suất của bê tông gia cường sợi không dẫn điện và sợi gia cường dẫn điện là trái chiều nhau



Hình 7. Ứng xử cơ-điện của HPFRC1 dưới tải trọng uốn trùng phục

Bảng 4. Thông số cơ-điện và thông số uốn của HPFRC0

Tỷ lệ $\frac{\Delta f_{\max}}{f_{MOR}}$	Mẫu thử	Thông số cơ điện							
		Tại mặt nén				Tại mặt kéo			
		R_0^n (k Ω)	$ \Delta R^n $ (k Ω)	FCR_{\max} (%)	$ \Delta \delta/L $ (%)	R_0^k (k Ω)	ΔR^k (k Ω)	FCR_{\max} (%)	$\Delta \delta/L$ (%)
0,15	Mẫu 1	15,57	6,46	43,07	0,034	27,02	12,69	-50,00	0,034
	Mẫu 2	14,74	4,86	39,25	0,027	25,14	9,15	-38,43	0,027
	Mẫu 3	14,27	5,63	61,74	0,034	23,30	10,24	-42,43	0,034
	Trung bình	14,86	5,65	48,02	0,032	25,15	10,69	-43,62	0,032
	Độ lệch chuẩn	0,66	0,80	12,04	0,004	1,86	1,81	5,87	0,004
0,50	Mẫu 1	14,47	9,14	100,17	0,088	14,97	3,80	-38,74	0,088
	Mẫu 2	15,55	9,62	72,44	0,089	16,60	5,73	-37,55	0,089
	Mẫu 3	14,40	10,72	86,34	0,098	16,24	5,54	-42,79	0,098
	Trung bình	14,81	9,82	86,32	0,092	15,94	5,02	-39,70	0,092
	Độ lệch chuẩn	0,64	0,81	13,86	0,006	0,86	1,06	2,75	0,006

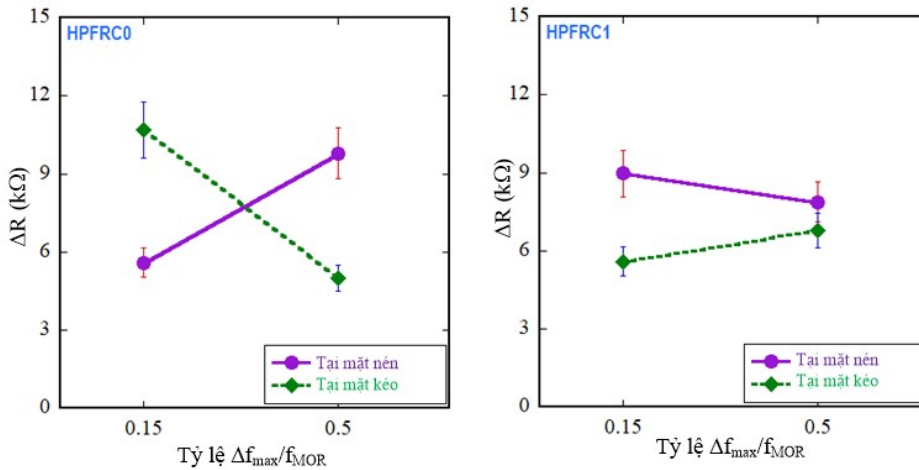
[13]. Do đó, chỉ cần có sự thay đổi điện trở tương đối rõ rệt dưới tác dụng của tải trọng cơ học là có thể thu được đặc tính tự cảm biến của bê tông. Bên cạnh đó, tại mặt nén, giá trị FCR của hai loại HPFRC tăng lên khi tải trọng tác dụng tăng và giảm dần về giá trị ban đầu khi tải trọng giảm. Ngược lại, FCR

tại mặt kéo có xu hướng ngược lại: giảm xuống khi tải trọng tác dụng tăng lên, tăng dần về giá trị ban đầu khi tải trọng giảm xuống. Xu hướng này cũng được quan sát thấy trong các thí nghiệm kéo trực tiếp dưới tải trọng tĩnh đối với vật liệu composite gia cường cốt sợi thép [13–15]. Trong cả hai trường hợp nén và kéo, giá trị tuyệt đối của FCR tăng khi ứng suất tải gia tăng có thể được giải thích là do cấu trúc tinh thể HPFRC thay đổi dưới sự gia tải dẫn đến vận tốc di chuyển các electron trong dòng điện thay đổi [33–35].

Bảng 5. Thông số cơ-điện và thông số uốn của HPFRC1

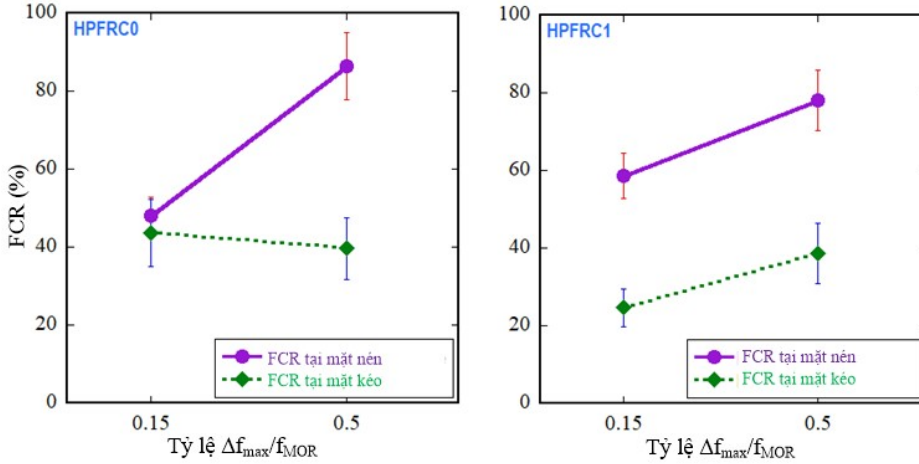
Tỷ lệ $\frac{\Delta f_{\max}}{f_{MOR}}$	Mẫu thử	Thông số cơ điện							
		Tại mặt nén				Tại mặt kéo			
		R_0^n (k Ω)	$ \Delta R^n $ (k Ω)	FCR_{\max} (%)	$ \Delta \delta/L $ (%)	R_0^k (k Ω)	ΔR^k (k Ω)	FCR_{\max} (%)	$\Delta \delta/L$ (%)
0,15	Mẫu 1	16,35	8,09	50,35	0,069	25,37	4,44	-22,80	0,069
	Mẫu 2	14,89	9,77	69,96	0,082	25,62	6,79	-26,77	0,082
	Mẫu 3	16,78	9,27	55,83	0,077	24,99	5,62	-24,30	0,077
	Trung bình	16,00	9,04	58,71	0,076	25,33	5,61	-24,62	0,076
	Độ lệch chuẩn	0,99	0,86	10,12	0,007	0,32	1,17	2,01	0,007
0,50	Mẫu 1	12,57	7,83	71,95	0,255	20,62	6,53	-35,52	0,255
	Mẫu 2	11,52	8,98	92,86	0,252	21,50	7,95	-41,07	0,252
	Mẫu 3	13,32	6,95	69,68	0,253	22,12	5,93	-39,15	0,253
	Trung bình	12,47	7,92	78,16	0,253	21,41	6,80	-38,58	0,253
	Độ lệch chuẩn	0,90	1,01	12,78	0,001	0,75	1,04	2,82	0,001

4.2. Ảnh hưởng tỷ lệ ứng suất môi đến thông số cơ-điện của HPFRC

Hình 8. Ảnh hưởng của $S = \Delta f_{\max}/f_{MOR}$ đến ΔR của các loại HPFRC

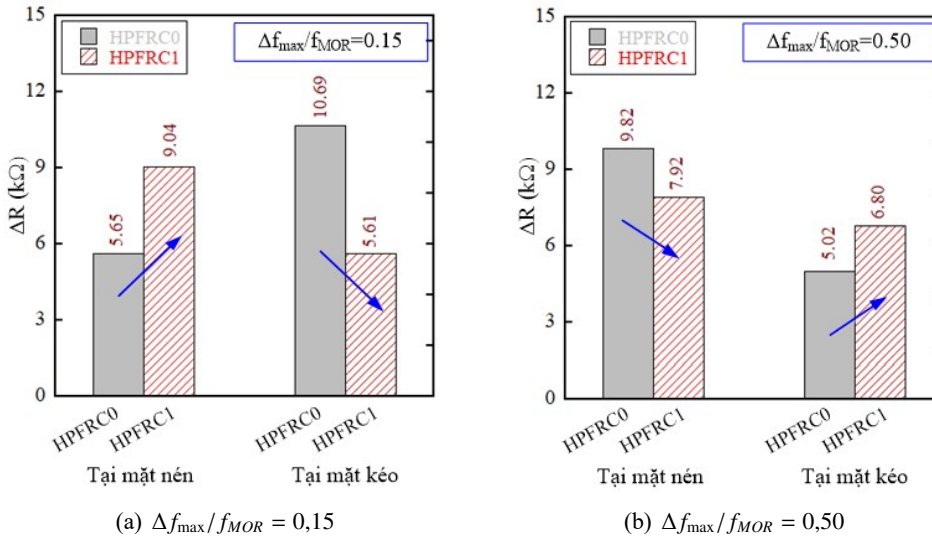
Hình 8 và Hình 9 lần lượt thể hiện sự ảnh hưởng tham số ứng suất môi ($S = \Delta f_{\max}/f_{MOR}$) đến hai thông số ΔR và FCR của loạt mẫu HPFRC0 (Hình 8) và HPFRC1 (Hình 9). Theo Hình 8, giá trị ΔR của loạt mẫu HPFRC0 có xu hướng giảm tại mặt nén và tăng tại mặt kéo khi $S = \Delta f_{\max}/f_{MOR}$ tăng từ 0,15 đến 0,50. Đối với loạt mẫu HPFRC1, giá trị ΔR tạo ra xu hướng ngược lại với loạt mẫu

HPFRC0, tức là, giá trị ΔR có xu hướng tăng tại mặt nén và giảm tại mặt kéo khi $S = \Delta f_{\max}/f_{MOR}$ tăng từ 0,15 đến 0,50. Theo Hình 9, giá trị FCR tại mặt nén có xu hướng tăng lên ở cả hai loạt mẫu HPFRC0 và HPFRC1 khi $S = \Delta f_{\max}/f_{MOR}$ tăng từ 0,15 đến 0,50. Tại mặt kéo, giá trị FCR thể hiện xu hướng giảm đối với loạt mẫu HPFRC0 và xu hướng tăng đối với loạt mẫu HPFRC1 với sự gia tăng $S = \Delta f_{\max}/f_{MOR}$ từ 0,15 đến 0,50. Hơn nữa, giá trị FCR tại mặt nén của cả loạt mẫu HPFRC1 và HPFRC2 tạo ra giá trị cao hơn tại mặt kéo khi $S = \Delta f_{\max}/f_{MOR}$ tăng từ 0,15 đến 0,5.

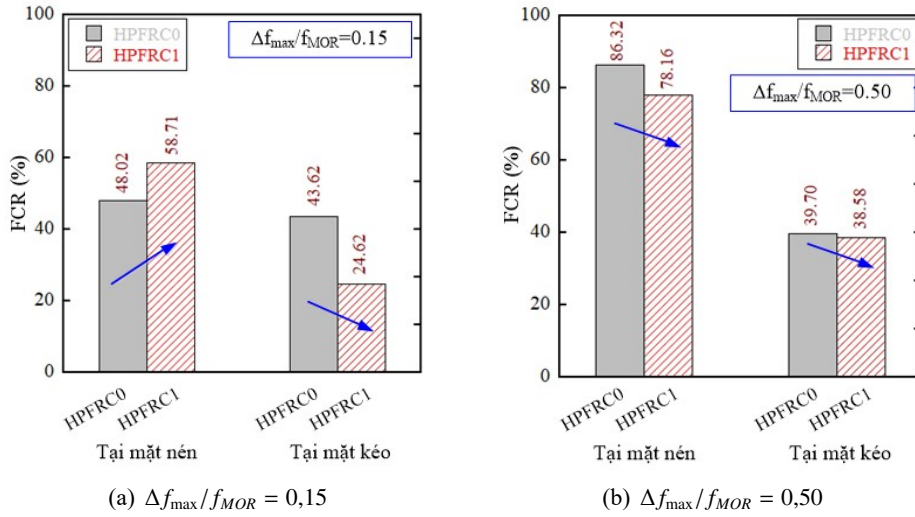


Hình 9. Ảnh hưởng của $S = \Delta f_{\max}/f_{MOR}$ đến FCR của các loại HPFRC

Hình 10 và Hình 11 lần lượt so sánh hai thông số ΔR và FCR giữa hai loạt mẫu HPFRC0 và HPFRC1 tại $\Delta f_{\max}/f_{MOR} = 0,15$ (Hình 10) và tại $\Delta f_{\max}/f_{MOR} = 0,50$ (Hình 11) dưới tải trọng uốn trùng trục. Theo Hình 10, giá trị ΔR thay đổi trong khoảng 5,02 – 10,69 (kΩ) đối với loạt mẫu HPFRC0 và trong khoảng 5,62 – 9,04 (kΩ) đối với loạt mẫu HPFRC1. Theo Hình 11, giá trị FCR thay đổi trong khoảng 39,70 – 86,32 (%) đối với loạt mẫu HPFRC0 và trong khoảng 24,62 – 78,16 (%) đối với loạt mẫu HPFRC1. Loạt mẫu HPFRC0 tạo ra giá trị ΔR và FCR cao hơn HPFRC1.



Hình 10. So sánh ΔR của các HPFRC

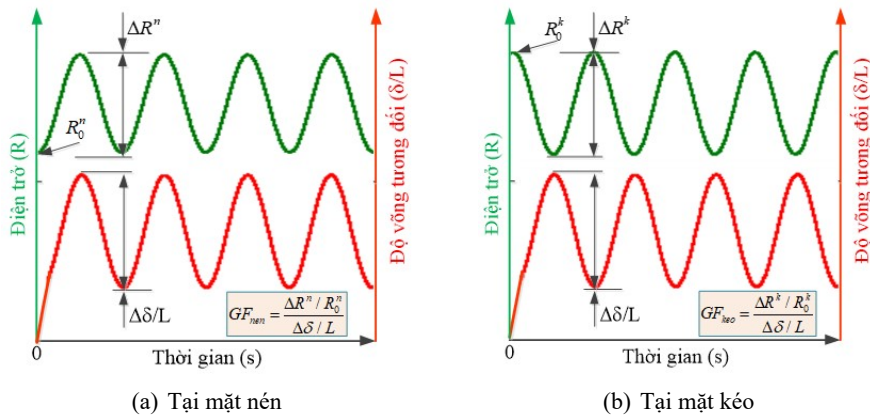
Hình 11. So sánh giá trị FCR của các HPFRC

4.3. Đề xuất mô hình mới tính toán hệ số cảm biến của HPFRC

Để định lượng đặc tính tự cảm biến của các loại HPFRC thí nghiệm, một mô hình mới xác định các hệ số cảm biến của các HPFRC dưới tải trọng uốn trùng phục được đề xuất theo như mô tả trong Hình 12. Theo Hình 12, có hai hệ số cảm biến được đề xuất: hệ số cảm biến cho miền nén (kí hiệu là GF_{nen}) và cho miền kéo (kí hiệu là GF_{keo}) lần lượt được xác định theo biểu thức (7) và (8). Trong các biểu thức này, R_0^n và R_0^k lần lượt là điện trở ban đầu tại mặt nén và mặt kéo của mẫu uốn khi chưa chịu tác động của tải trọng, $\Delta\delta/L$ là biên độ độ võng tương đối của mẫu uốn, ΔR^n và ΔR^k lần lượt là biên độ của điện trở tại mặt nén và mặt kéo của mẫu uốn. Trong mô hình đề xuất này, giá trị ΔR^n và ΔR^k được tính toán ở chu kỳ đầu tiên trong khoảng thời gian từ 0,15 đến 0,3 giây. Cần lưu ý rằng, vật liệu có hệ số cảm biến càng cao, khả năng tự cảm biến của vật liệu đó càng lớn.

$$GF_{nen} = \left| \frac{\Delta R^n / R_0^n}{\Delta\delta / L} \right| \quad (7)$$

$$GF_{keo} = \frac{\Delta R^k / R_0^k}{\Delta\delta / L} \quad (8)$$

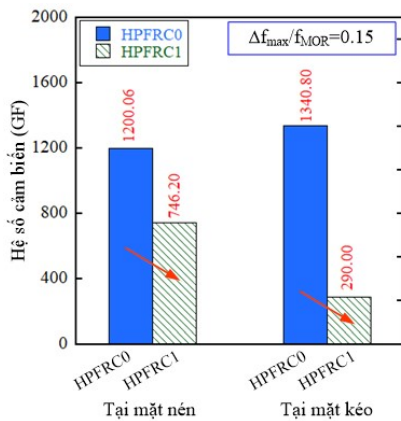
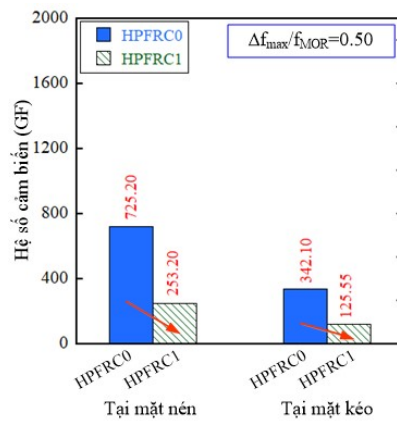


Hình 12. Mô hình tính toán hệ số cảm biến của HPFRC dưới tải trọng uốn trùng phục

Bảng 6 cung cấp hệ số cảm biến của các HPFRC dưới tải trọng uốn trùng phục thông qua mô hình đề xuất. Các kết quả trong bảng này được lấy trung bình từ ba mẫu thử cho mỗi loạt mẫu HPFRC. Hình 13 thể hiện sự so sánh hệ số cảm biến của các HPFRC tại mặt nén và mặt kéo của mẫu uốn dưới tải trọng uốn trùng phục tại $\Delta f_{\max}/f_{MOR} = 0,15$ (Hình 13(a)) và tại $\Delta f_{\max}/f_{MOR} = 0,50$ (Hình 13(b)). Kết quả so sánh cho thấy loạt mẫu HPFRC0 tạo ra giá trị GF_{nen} và GF_{keo} cao hơn so với loạt mẫu HPFRC1, khi tỷ lệ ứng suất mỗi thay đổi từ 0,15 đến 0,50. Cụ thể, sự chênh lệch GF_{nen} giữa HPFRC0 và HPFRC1 là 1,61 lần (1200,06/746,20) tại $\Delta f_{\max}/f_{MOR} = 0,15$ và 2,86 lần (725,20/253,2) tại $\Delta f_{\max}/f_{MOR} = 0,50$. Sự chênh lệch GF_{keo} giữa HPFRC0 và HPFRC1 là 4,62 lần (1340,8/290,0) tại $\Delta f_{\max}/f_{MOR} = 0,15$ và 2,72 lần (342,1/125,55) tại $\Delta f_{\max}/f_{MOR} = 0,50$. Có thể kết luận rằng loạt mẫu HPFRC0 tạo ra khả năng tự cảm nhận tốt hơn HPFRC1 dưới tải trọng uốn trùng phục trong giai đoạn đàn hồi. Ngoài ra, giá trị GF_{nen} và GF_{keo} của các loạt mẫu HPFRC giảm rõ rệt khi tăng tỷ lệ ứng suất mỗi từ 0,15 lên 0,5. Nhìn chung, giá trị GF_{nen} và GF_{keo} của các HPFRC dưới tải trọng uốn trùng phục trong nghiên cứu này lớn hơn rất nhiều so với giá trị hệ số cảm biến của kim loại (giá trị hệ số cảm biến là 2) [36].

Bảng 6. Hệ số cảm biến của HPFRC dưới tải trọng uốn trùng phục

Tỷ lệ $\frac{\Delta f_{\max}}{f_{MOR}}$	Mẫu thử	Tên mẫu			
		HPFRC0		HPFRC1	
		GF_{nen}	GF_{keo}	GF_{nen}	GF_{keo}
0,15	Mẫu 1	1220,4	1381,4	719,5	254,6
	Mẫu 2	1221,0	1348,2	800,8	323,4
	Mẫu 3	1160,5	1292,7	718,3	292,1
	Trung bình	1200,6	1340,8	746,2	290,0
	Độ lệch chuẩn	34,7	44,8	47,3	34,4
0,50	Mẫu 1	720,5	289,8	244,2	124,2
	Mẫu 2	696,9	389,0	309,2	146,7
	Mẫu 3	758,1	347,3	206,2	105,8
	Trung bình	725,2	342,1	253,2	125,55
	Độ lệch chuẩn	30,8	49,8	52,06	20,45

(a) $\Delta f_{\max}/f_{MOR} = 0,15$ (b) $\Delta f_{\max}/f_{MOR} = 0,50$

Hình 13. So sánh hệ số cảm biến của các HPFRC

5. Kết luận

Dựa trên kết quả thí nghiệm và phân tích, các nhận xét và kết luận trong nghiên cứu này có thể được tóm tắt sau đây:

- Hai loại HPFRC thí nghiệm đều thể hiện các tính năng tự cảm biến rất tốt dưới tác dụng của tải trọng uốn trùng trục. Khả năng cảm biến của HPFRC không sợi tốt hơn HPFRC được gia cường sợi thép.

- Độ thay đổi điện trở tương đối (FCR) theo thời gian giữa mặt nén và mặt kéo trái chiều nhau, trong đó mặt nén cùng xu hướng với đường cong tải theo thời gian.

- Trị số tuyệt đối của FCR tại tỷ lệ ứng suất mỗi 0,50 cao hơn so với tại 0,15, tại mặt nén cao hơn so với tại mặt kéo.

- Một mô hình xác định hệ số cảm biến chịu tải uốn trùng trục đã được đề xuất để định lượng khả năng tự cảm biến của HPFRC. Hệ số cảm biến của HPFRC chịu tải uốn trùng trục giảm rõ rệt khi tăng tỷ lệ ứng suất mỗi từ 0,15 lên 0,5.

- Hệ số cảm biến của HPFRC chịu tải uốn trùng trục được đánh giá lớn hơn rất nhiều so với hệ số cảm biến của sensor thương mại truyền thống dùng kim loại. Như vậy, việc định hướng dùng HPFRC như một loại sensor tự cảm biến cho quan trắc sức khỏe kết cấu công trình là hoàn toàn khả dụng.

Tài liệu tham khảo

- [1] Wille, K., Kim, D. J., Naaman, A. E. (2010). [Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents](#). *Materials and Structures*, 44(3):583–598.
- [2] Schmidt, M., Fehling, E. (2005). Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe. *Proceeding of 7th International Symposium on the Utilization of High-Strength and HighPerformance Concrete*, ACI Washington, 228(1):51–78.
- [3] Graybeal, B. (2007). [Compressive behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete](#). *ACI Materials Journal*, 104(2):146–152.
- [4] Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S., Koh, K. T. (2012). [Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete](#). *Cement and Concrete Composites*, 34(2):172–184.
- [5] Kim, D. J., Park, S. H., Ryu, G. S., Koh, K. T. (2011). [Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers](#). *Construction and Building Materials*, 25(11):4144–4155.
- [6] Wille, K., Kim, D. J., Naaman, A. E. (2010). [Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents](#). *Materials and Structures*, 44(3):583–598.
- [7] Nguyen, D. L., Vu, T. B. N., Do, X. S., Tran, M. P. (2019). [Using carbon black and ground granulated blast furnace slag for improvement of self-sensing capacity of high performance fiber-reinforced concretes](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)–HUCE*, 13(4V):151–158.
- [8] Naaman, A. E., Reinhardt, H. W. (2006). [Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response](#). *Materials and Structures*, 39(5):547–555.
- [9] Nguyen, D. L., Ryu, G. S., Koh, K. T., Kim, D. J. (2014). [Size and geometry dependent tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete](#). *Composites Part B: Engineering*, 58:279–292.
- [10] Naaman, A. E., Reinhardt, H. W. (1996). Characterization of high performance fiber reinforced cement composites—HPFRCC. *Proceedings of 2nd international workshop on HPFRCC, Chapter 41, RILEM, No. 31, E.& FNSpon, London*, 2:1–24.
- [11] Naaman, A. E. (2002). Toughness, ductility, surface energy and deflection-hardening FRC composites. *Proceedings of JCI Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC)- Application and Evaluation*, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, 33–57.
- [12] Kim, D., Kang, S., Ahn, T.-H. (2014). [Mechanical characterization of high-performance steel-fiber reinforced cement composites with self-healing effect](#). *Materials*, 7(1):508–526.
- [13] Nguyen, D. L., Song, J., Manathamsombat, C., Kim, D. J. (2015). [Comparative electromechanical damage-sensing behaviors of six strain-hardening steel fiber-reinforced cementitious composites under direct tension](#). *Composites Part B: Engineering*, 69:159–168.

- [14] Song, J., Nguyen, D. L., Manathamsombat, C., Kim, D. J. (2015). [Effect of fiber volume content on electromechanical behavior of strain-hardening steel-fiber-reinforced cementitious composites](#). *Journal of Composite Materials*, 49(29):3621–3634.
- [15] Kim, M. K., Kim, D. J., An, Y.-K. (2018). [Electro-mechanical self-sensing response of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete in tension](#). *Composites Part B: Engineering*, 134:254–264.
- [16] Chen, P.-W., Chung, D. D. L. (1995). [Carbon-fiber-reinforced concrete as an intrinsically smart concrete for damage assessment during dynamic loading](#). *Journal of the American Ceramic Society*, 78(3):816–818.
- [17] Chen, P.-W., Chung, D. D. L. (1996). [Concrete as a new strain/stress sensor](#). *Composites Part B: Engineering*, 27(1):11–23.
- [18] Wen, S., Chung, D. D. L. (2003). [A comparative study of steel- and carbon-fibre cement as piezoresistive strain sensors](#). *Advances in Cement Research*, 15(3):119–128.
- [19] Banthia, N., Djeridane, S., Pigeon, M. (1992). [Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements](#). *Cement and Concrete Research*, 22(5):804–814.
- [20] Azhari, F., Banthia, N. (2012). [Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing](#). *Cement and Concrete Composites*, 34(7):866–873.
- [21] Demircilioglu, E., Teomete, E., Ozbulut, O. E. (2019). [Strain sensitivity of steel-fiber-reinforced industrial smart concrete](#). *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 31(1):127–136.
- [22] Le, H. V., Lee, D. H., Kim, D. J. (2020). [Effects of steel slag aggregate size and content on piezoresistive responses of smart ultra-high-performance fiber-reinforced concretes](#). *Sensors and Actuators A: Physical*, 305:111925.
- [23] Lee, Y.-L., Taylor, D. (2005). [Stress-based fatigue analysis and design](#). *Fatigue Testing and Analysis*, Elsevier, 103–180.
- [24] Bai, Y., Jin, W. L. (2016). *Marine structural design*. 2nd edition, Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- [25] Kesler, C. E. (1953). [Effect of speed of testing on flexural fatigue strength of plain concrete](#). *Highway Research Board*, 32:251–258.
- [26] Ballinger, C. A. (1971). [Cumulative fatigue damage characteristics of plain concrete](#). *Highway Research Record*, (370):48–60.
- [27] Oh, B. H. (1991). [Fatigue life distributions of concrete for various stress levels](#). *ACI Materials Journal*, 88(2):122–128.
- [28] Tepfers, R., Kutti, T. (1979). [Fatigue strength of plain, ordinary, and lightweight concrete](#). *ACI Journal Proceedings*, 76(5):635–652.
- [29] Nguyen, D.-L., Thai, D.-K., Lam, M. N.-T. (2022). [Synergy in flexure of high-performance fiber-reinforced concrete with hybrid steel fibers](#). *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(6).
- [30] Suchorzewski, J., Prieto, M., Mueller, U. (2020). [An experimental study of self-sensing concrete enhanced with multi-wall carbon nanotubes in wedge splitting test and DIC](#). *Construction and Building Materials*, 262:120871.
- [31] Ranade, R., Zhang, J., Lynch, J. P., Li, V. C. (2014). [Influence of micro-cracking on the composite resistivity of engineered cementitious composites](#). *Cement and Concrete Research*, 58:1–12.
- [32] Li, M., Lin, V., Lynch, J., Li, V. C. (2012). [Multifunctional carbon black engineered cementitious composites for the protection of critical infrastructure](#). *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6*, Springer Netherlands, 99–106.
- [33] Hong, S.-H., Yuan, T.-F., Choi, J.-S., Yoon, Y.-S. (2020). [Effects of steelmaking slag and moisture on electrical properties of concrete](#). *Materials*, 13(12):2675.
- [34] Hong, Y., Li, Z., Qiao, G., Ou, J., Cheng, W. (2018). [Pressure sensitivity of multiscale carbon-admixtures-enhanced cement-based composites](#). *Nanomaterials and Nanotechnology*, 8: 184798041879352.
- [35] Lee, S.-J., You, I., Zi, G., Yoo, D.-Y. (2017). [Experimental Investigation of the Piezoresistive Properties of Cement Composites with Hybrid Carbon Fibers and Nanotubes](#). *Sensors*, 17(11):2516.
- [36] Chung, D. D. L. (1998). [Self-monitoring structural materials](#). *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 22(2):57–78.