

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ KỸ THUẬT TP HCM

VƯƠNG THỊ NGỌC HÂN

ỨNG XỬ UỐN CỦA VẬT LIỆU BÊ TÔNG TÍNH NĂNG CAO GIA CƯỜNG CỐT SỢI
THÉP DƯỚI TÁC DỤNG TẢI TRỌNG TĨNH VÀ TẢI TRỌNG LẬP

Chuyên ngành: CƠ KỸ THUẬT

Mã số chuyên ngành: 9520101

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH – NĂM 2026

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Công Nghệ Kỹ thuật Tp.HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS.TS Nguyễn Duy Liêm

Người hướng dẫn khoa học 2: TS Nguyễn Huỳnh Tấn Tài

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án Cấp Cơ sở họp tại
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM vào ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Thư viện Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

Tạp chí quốc tế

1. **Thi-Ngoc-Han VUONG**, Ngoc-Thanh TRAN, Tan-Khoa NGUYEN, Duy-Liem NGUYEN *, Duc-Kien THAI. “Static and cyclic behavior of high-performance concrete reinforced with hybrid steel fibers using notched and un-notched flexural specimen”. Construction and Building Materials. Volume 449, 25 October 2024, 138430.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138430>.
2. **Thi-Ngoc-Han Vuong**, Tan-Khoa Nguyen, Duy-Liem Nguyen *, Huy-Viet Le, Ngoc-Thanh Tran. “Fiber fraction-dependent flexural behavior of high-performance fiber-reinforced concrete under static and repeated loading”. Journal of Building Engineering 79 (2023) 107808.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107808>.

Tạp chí trong nước

1. **Thi-Ngoc-Han Vuong**, Duy-Liem Nguyen*, H. T. Tai Nguyen, Tri N. M. Nguyen. “Effect of fiber content on flexural fracture parameters of high-performance steel fiber-reinforced concrete”. Journal of Science and Technology in Civil Engineering, HUCE, 2024, 18 (1): 12–23.
2. **Vuong Thi Ngoc Han**, Nguyen Duy Liem*, Nguyen Huynh Tan Tai, Le Van Bach. “Experimental And Numerical Solution Study on Beam Behavior Using High-Performance Steel Fiber-Reinforced”. Journal of Construction (09.2025).

Kỷ yếu hội nghị quốc tế

1. **Thi-Ngoc-Han Vuong**, Duy-Liem Nguyen*, H. T. Tai Nguyen. “Flexural Fatigue Responses of HPFRCs using a Simplified Model”. 7th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD) 2024. July 25-26, 2024 Ho Chi Minh City, Viet Nam.

Kỷ yếu hội nghị trong nước

1. **Vương Thị Ngọc Hân**, Nguyễn Huỳnh Tấn Tài, Nguyễn Duy Liêm*. “Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép gia cường đến sức kháng uốn của bê tông tính năng cao” Tuyển tập công trình hội nghị cơ học toàn quốc lần thứ XI, Hà Nội, 02-03/12/2022. Tiểu ban Cơ học vật rắn biến dạng, trang 13-33.

Đề tài nghiên cứu khoa học

1. Đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường (Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp.HCM): “Sức kháng uốn dưới tải trọng tĩnh của bê tông tính năng cao được gia cường bằng cốt sợi thép với các hàm lượng thay đổi.”. Mã số: T2023-152 Đã nghiệm thu năm 2023. (Chủ nhiệm đề tài).

ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong các công trình hạ tầng giao thông, các cấu kiện bê tông cốt thép (BTCT) vẫn còn tồn tại nhiều nhược điểm, ảnh hưởng đáng kể đến độ bền lâu và hiệu quả khai thác công trình. Trước hết, hiện tượng nứt do tải trọng lặp lại, biến dạng co ngót, từ biến hoặc chênh lệch nhiệt độ là vấn đề phổ biến, tạo điều kiện cho sự xâm nhập của nước và các ion gây hại. Hậu quả là cốt thép bên trong dễ bị ăn mòn, thể tích các lớp gỉ sét tăng gây phá hoại lớp bê tông bảo vệ và làm suy giảm khả năng chịu lực. Bên cạnh đó, khả năng kháng mỏi của BTCT còn hạn chế, đặc biệt dưới tác động tải trọng giao thông lặp lại nhiều chu kỳ, dễ dẫn đến suy giảm dần cường độ. Với bản chất giòn của bê tông, các cấu kiện cũng kém hiệu quả khi chịu tải trọng đột ngột, va chạm hoặc động đất. Ngoài ra, trọng lượng bản thân lớn làm tăng tải trọng tác dụng lên nền móng, gây bất lợi cho các công trình vượt nhịp lớn hoặc xây dựng trên nền đất yếu. Chất lượng thi công BTCT lại phụ thuộc nhiều vào quy trình đổ, đầm và bảo dưỡng, do đó khó tránh khỏi các sai sót dẫn đến rỗ, nứt hoặc giảm cường độ. Những hạn chế này khiến cho công tác kiểm tra, bảo trì và sửa chữa trở nên phức tạp, tốn kém, trong khi độ dẻo và khả năng biến dạng của BTCT còn thấp, thường không có dấu hiệu cảnh báo rõ ràng trước khi xảy ra hư hỏng cục bộ. Chính vì vậy, việc nghiên cứu và ứng dụng các loại vật liệu mới như Bê tông tính năng cao gia cường cốt sợi (HPFRC) là xu hướng tất yếu nhằm khắc phục các nhược điểm trên và nâng cao độ bền vững cho công trình hạ tầng giao thông. Nhờ vào các đặc tính kỹ thuật ưu việt của vật liệu HPFRC: cường độ cao, khả năng chịu tải lớn, khả năng chống nứt vượt trội và mức độ hấp thụ năng lượng tốt mà các giải pháp sử dụng HPFRC cho công tác sửa chữa hoặc gia cường cấu kiện bê tông cốt thép đã cho thấy được tính hiệu quả cao của nó bên cạnh các giải pháp truyền thống hiện hữu.

Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện nay về hiệu quả gia cường kháng uốn bằng vật liệu HPFRC cho các cấu kiện dạng dầm còn hạn chế. Các nghiên cứu hiện có chưa đề cập tường minh và lượng hóa rõ ràng ảnh hưởng của hàm lượng và loại sợi thép gia cường đến ứng xử uốn của dầm HPFRC, ảnh hưởng của cả tải trọng tĩnh và tải trọng lặp đến biến dạng của dầm và hiệu quả gia cường kháng uốn của HPFRC cho dầm. Các vấn đề vừa nêu dẫn đến sự thiếu vắng của các điều khoản thiết kế cho trường hợp cấu kiện hay dầm sử dụng HPFRC trong các hướng dẫn thiết kế hiện hành.

Luận án này nghiên cứu về ứng xử uốn của vật liệu bê tông tính năng cao gia cường cốt sợi thép dưới tác dụng tải trọng tĩnh và tải trọng lặp. Các mục tiêu chính của luận án bao gồm: 1) Đánh giá ảnh hưởng của việc sử dụng hàm lượng sợi và loại sợi gia cường khác nhau đến ứng xử uốn của HPFRC dưới tải tĩnh và tải trọng lặp. Xác định vai trò riêng rẽ của từng loại sợi trong việc cải thiện khả năng chịu uốn, độ dẻo dai, khả năng kháng nứt và tuổi thọ mỏi của dầm HPFRC. 2) Đánh giá ảnh hưởng của sự kết hợp sợi lai với mức độ kết hợp khác nhau đến ứng xử uốn của HPFRC dưới tải trọng tĩnh và tải trọng lặp nhằm phân tích hiệu ứng hiệp đồng của hai loại sợi. Thêm vào đó, các thí nghiệm trên mẫu có khía (notched) và không có khía (unnotched) nhằm làm rõ khác biệt trong sự phát triển vết nứt chính, cơ chế phá hoại và độ bền uốn của các cấu kiện nguyên vẹn và cấu kiện đã có sẵn khuyết tật. 3) Đánh giá các thông số cơ học của kết cấu dầm HPFRC với dầm có nhịp dài thông qua thí nghiệm và mô phỏng (dự kiến sử dụng dầm có chiều dài nhịp L1200 để phân tích phá hoại cắt/uốn). Từ đó đánh giá độ chính xác trong dự báo ứng xử uốn và đề xuất khuyến nghị thiết kế.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN, MỤC TIÊU VÀ NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

1.1 Tổng quan nghiên cứu

Việc sử dụng bê tông tính năng cao cốt sợi thép đã trở thành xu hướng ưu việt nhằm đáp ứng yêu cầu về độ bền và sự ổn định trong các công trình xây dựng. Đặc biệt, khả năng kháng uốn của loại vật liệu này dưới tác động của tải trọng lặp là một yếu tố then chốt ảnh hưởng đến tuổi thọ và hiệu suất làm việc của kết cấu. Tải trọng lặp thường xuyên xuất hiện trong các công trình như cầu, đường cao tốc và nhà xưởng, nơi mà sự thay đổi liên tục về tải trọng có thể dẫn đến hiện tượng nứt và hỏng hóc. Do đó, nghiên cứu khả năng kháng uốn của bê tông tính năng cao cốt sợi thép không chỉ giúp cải thiện thiết kế mà còn đảm bảo an toàn và tiết kiệm chi phí bảo trì cho các công trình trong tương lai. Việc thấu hiểu rõ nét các đặc tính này sẽ mở ra hướng đi mới cho việc nâng cao chất lượng và hiệu quả sử dụng của bê tông trong xây dựng.

Hầu hết các nghiên cứu hiện tại chủ yếu tập trung vào việc sử dụng các loại phụ gia mới, thay đổi thành phần cấp phối để cải thiện các tính chất chịu lực, chịu uốn và tăng cường độ dẻo của HPFRC mà chưa đi sâu vào phân tích ảnh hưởng của đặc tính và hàm lượng sợi gia cường đến ứng xử của kết cấu dưới tác động của những điều kiện tải trọng khác nhau. Bên cạnh tải trọng tĩnh, nghiên cứu HPFRC chịu tải trọng động đóng vai trò cực kỳ quan trọng trong ứng dụng thực tế, bởi hầu hết các kết cấu đều chịu ít hay nhiều tải động. Trong các kết cấu cầu, dầm luôn chịu tác động của gió, dòng nước, các phương tiện giao thông qua lại, thậm chí là cả động đất hay các rung chấn trong quá trình sử dụng. Vì vậy, trong thiết kế kết cấu, khả năng chống mỏi của vật liệu chịu tải trọng lặp cũng cần được xem xét cẩn trọng. Các khuyết tật hoặc vết nứt nhỏ nằm trong kết cấu ngày càng mở rộng khi số chu kỳ lặp tăng lên, sự phá hủy do mỏi sẽ xảy ra với số chu kỳ đủ tác động lên kết cấu.

1.2. Những đóng góp mới của luận án

- 1) Làm sáng tỏ ứng xử cơ học của HPFRC khi bổ sung sợi thép với hàm lượng khác nhau khi chịu tác dụng của tải trọng tĩnh và tải trọng lặp.
- 2) Định lượng hóa hàm lượng cốt sợi thép gia cường trong hỗn hợp vữa HPFRC để tăng cường khả năng kháng uốn của HPFRC dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và tải trọng lặp.
- 3) Đề xuất mô hình số mô phỏng kết cấu dầm HPFRC chịu uốn khi gia cường hỗn hợp sợi thép hỗn hợp.

1.3. Phạm vi và phương pháp nghiên cứu

1.3.1. Phạm vi nghiên cứu

Luận án tập trung nghiên cứu ứng xử cơ học của vật liệu HPFRC được chế tạo từ các loại vật liệu sẵn có ở Việt Nam, bổ sung sợi thép gia cường với hàm lượng sợi khác nhau (từ 0.5% đến 1.5%) trên các mẫu thí nghiệm có dạng lăng trụ, kích thước đồng nhất 40x40x160mm khi chịu tác dụng của tải trọng tĩnh và tải trọng lặp.

1.3.2. Phương pháp nghiên cứu

Các phương pháp nghiên cứu chủ yếu trong luận án này thực nghiệm, phân tích so sánh và thống kê.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Các yếu tố ảnh hưởng đến tính chất cơ học của HPFRC

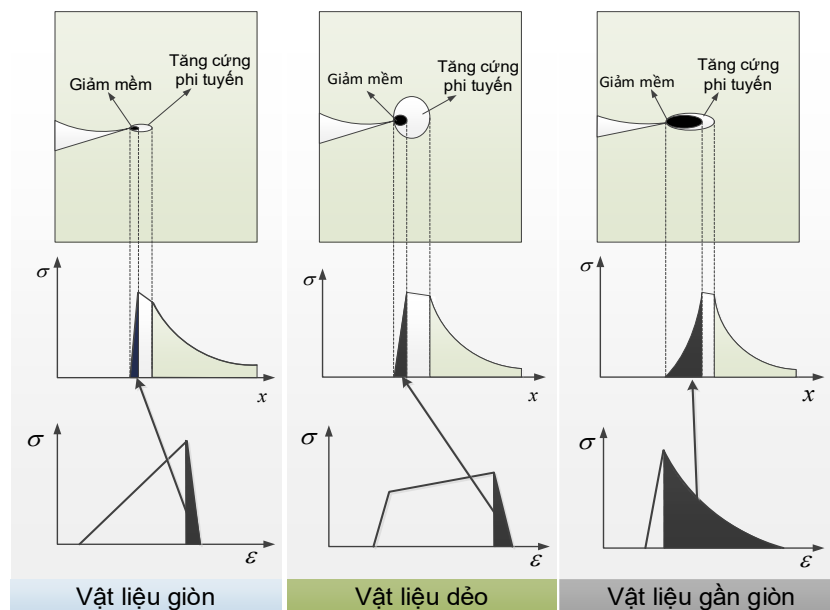
Tính chất cơ học của HPFRC phụ thuộc 3 nhóm chính: bê tông nền, cốt sợi gia cường và vùng chuyển tiếp bề mặt (ITZ - Interfacial Transition Zone)



Hình 2.1. Các nhóm yếu tố ảnh hưởng đến tính chất cơ học của HPFRC.

2.2. Vùng phát triển nứt trong HPFRC

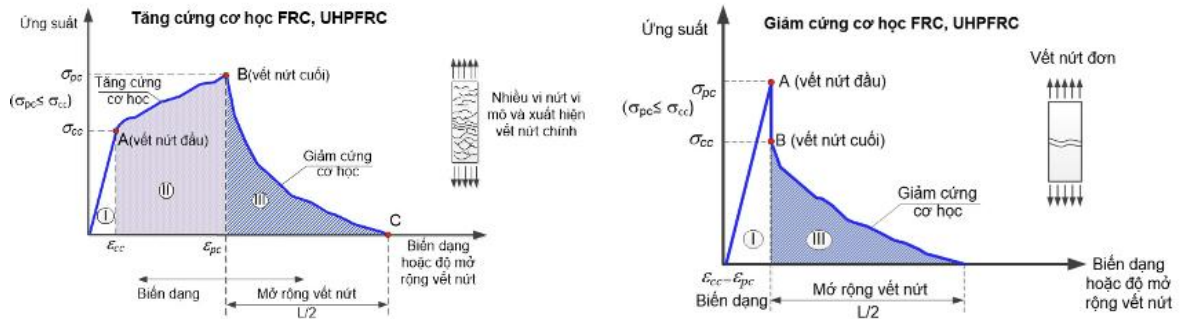
Khái niệm vùng phát triển nứt (FPZ) được làm rõ, cho thấy HPFRC là vật liệu giòn nhưng nhờ cơ chế neo chặt của sợi đã hạn chế quá trình mở rộng vết nứt.



Hình 2.2. Ứng xử phá hủy của vật liệu giòn, vật liệu dẻo và vật liệu gần giòn.

2.3. Các tính chất cơ học của HPFRC dùng cốt sợi thép gia cường

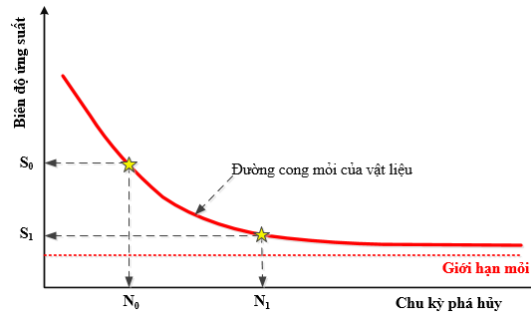
Các đặc trưng cơ học chính của HPFRC dưới tác dụng nén, kéo và uốn được trình bày, nhấn mạnh khả năng tăng cứng sau nứt và năng lực hấp thụ năng lượng vượt trội so với bê tông thường.



Hình 2.3. Dạng điển hình đường cong quan hệ ứng suất-biến dạng của HPFRC.

2.4. Độ mỏi của vật liệu.

Các đặc trưng về mỏi của cấu kiện chịu uốn dưới tải trọng lặp được biểu thị qua đường cong mỏi như hình 2.11.



Hình 2.4. Đường cong mỏi điển hình.

Để đánh giá độ bền mỏi của dầm HPFRC chịu tải trọng lặp có chu kỳ, các nghiên cứu được công bố thường sử dụng đường cong mỏi đo bằng thực nghiệm, còn gọi là đường cong S-N [24] với:

$$S = \frac{\Delta f_{max}}{f_{MOR}} = 1 + \alpha(1 - R)\log_{10}(N) \quad (2.8)$$

$$\log N = m \log \left(\frac{1}{\Delta f_{max}} \right) + \log C \quad (2.9)$$

$$(\Delta f_{max})^m = \frac{C}{N} \quad (2.10)$$

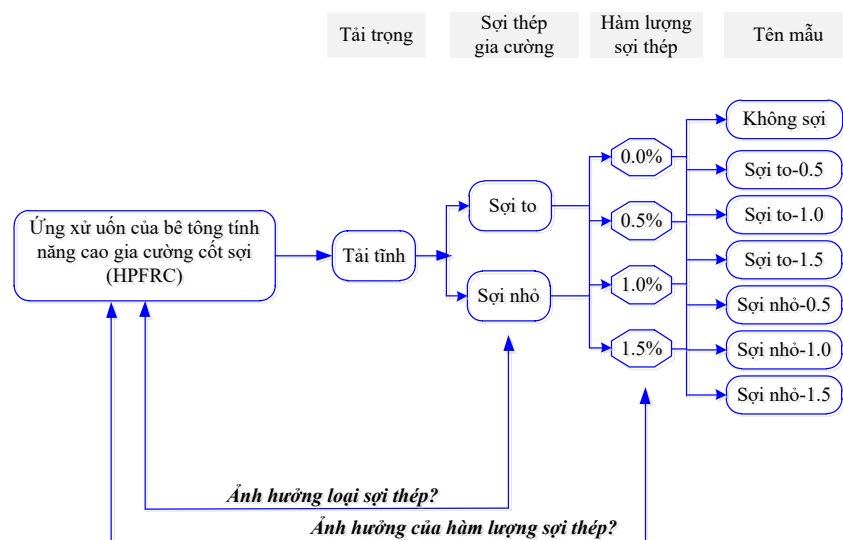
Tương quan S-N trên đường cong mỏi cho phép dự đoán hiệu suất mỏi thông qua tải trọng tác dụng và chu kỳ mỏi của vật liệu.

2.5. Lý thuyết dự báo sức kháng uốn của dầm HPFRC

Việc bổ sung sợi vào HPC làm thay đổi rõ rệt các đặc trưng cơ tính của vật liệu, đặc biệt là độ bền kéo sau nứt tăng đáng kể các ứng xử sau nứt cũng phức tạp hơn. Do đó, các ứng xử của HPFRC sẽ khác với bê tông truyền thống. Các công thức truyền thống để xác định sức kháng uốn của BTCT thông thường sẽ không còn phù hợp với kết cấu của HPFRC. Vì thế, mục này tổng hợp các lý thuyết dự báo sức kháng uốn của dầm HPFRC theo nhiều tiêu chuẩn quốc tế (AFGC/SETRA, AASHTO LRFD, FHWA, JSCE, Australia). Tuy nhiên, các phương pháp lý thuyết này còn hạn chế, chưa xét đến đầy đủ ảnh hưởng của sợi trong vùng chịu kéo, dẫn đến công thức truyền thống chưa đáp ứng yêu cầu tính toán chính xác cho HPFRC. Những cơ sở lý thuyết này đóng vai trò định hướng cho thiết kế và phân tích thí nghiệm ở các chương tiếp theo.

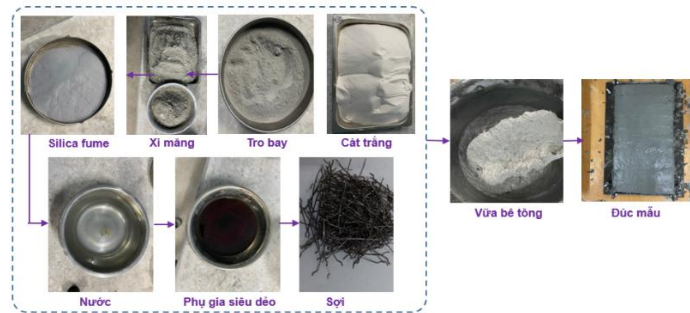
CHƯƠNG 3: NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ỨNG XỬ UỐN CỦA HPFRC GIA CƯỜNG SỢI THÉP ĐƠN

3.1. Sơ đồ thí nghiệm



3.2. Mẫu thí nghiệm

Nghiên cứu này sử dụng thành phần cấp phối vữa bê tông HPFRC theo tỉ lệ khối lượng bao gồm: xi măng, silica fume, cát trắng, tro bay, phụ gia hóa dẻo, nước như mô tả trong Bảng 3.1 và Hình 3.2. Độ bền chịu nén của HPFRC không gia cường sợi là 79,6 MPa khi nén mẫu lăng trụ 100x200 mm. Theo Bảng 3.1, xi măng sử dụng để chế tạo HPFRC là loại INSEE PCB 40, cát trắng sử dụng có với đường kính hạt nhỏ hơn 1 mm được cung cấp bởi công ty UHPC Việt. Bảng 3.2 cung cấp thành phần hóa học và tính chất vật lý của tro bay sử dụng trong nghiên cứu này. Các mẫu HPFRC thí nghiệm uốn được gia cường với 2 loại sợi thép: sợi thép to hai đầu móc và sợi thép nhỏ trơn thẳng với bốn hàm lượng sợi thép theo thể tích lần lượt là: 0,0%, 0,5%, 1,0% và 1,5% (như sơ đồ thực hiện thí nghiệm ở Hình 3.1). Hình 3.3 mô tả hai loại sợi thép sử dụng trong thí nghiệm. Bảng 3.3 cung cấp thông tin về tính chất cơ lý của hai loại sợi thép này.

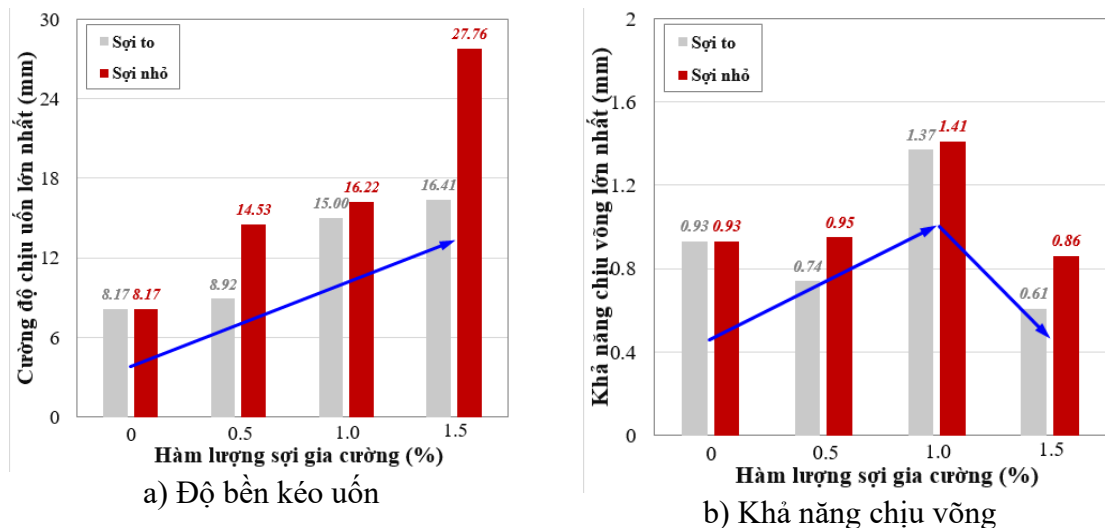


Hình 3.1. Thành phần cấp phối và chế tạo mẫu HPFRC

3.3. Kết quả thí nghiệm uốn tĩnh

3.3.1. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến ứng xử uốn của HPFRC dưới tải trọng tĩnh

Bảng 3.1. Kết quả thí nghiệm uốn dầm HPFRC dưới tải trọng tĩnh.



Hình 3.3. So sánh thông số uốn của HPFRC với hàm lượng cốt sợi khác nhau

- Kết quả thí nghiệm cho thấy khi hàm lượng cốt sợi gia cường tăng, ngoài độ bền chịu kéo nén cao, bê tông tính năng cao gia cường cốt sợi còn có độ bền kéo uốn cũng rất cao, sức kháng uốn này phụ thuộc vào hàm lượng và đặc điểm của từng loại cốt sợi được gia cố như Hình 3.3.

- Khi dùng sợi thép to hay nhỏ gia cường HPFRC, cường độ kéo uốn tăng khi hàm lượng cốt sợi gia cường tăng từ 0 đến 1.5%, mặc dù mức độ tăng cường độ kéo uốn giữa hai loại sợi khác nhau. Sự gia tăng chịu võng của HPFRC cũng được ghi nhận khi hàm lượng sợi gia tăng không quá 1.0% theo thể tích.

- Cường độ kéo uốn của HPFRC cao nhất 27.76 MPa khi hàm lượng cốt sợi nhỏ đạt ở mức 1.5% theo thể tích, tăng 3.4 lần so với mẫu HPFRC không sợi.

- So với cốt sợi to, cốt sợi nhỏ gia cường tạo sức kháng uốn cho HPFRC hiệu quả cao hơn tại các hàm lượng sợi thí nghiệm.

3.3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến năng lượng phá hủy của HPFRC

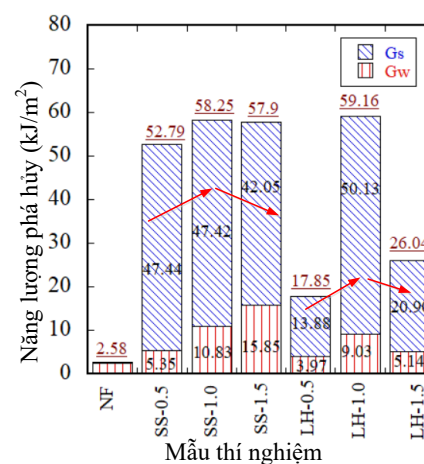
Có sự ảnh hưởng rất lớn trong việc bổ sung các sợi thép vào bê tông tính năng cao đến đặc tính kháng uốn của các dầm HPSFRC. Khi vật liệu chưa gia cường cốt sợi (loạt mẫu NF), năng lượng phá hủy rất thấp do không xảy ra quá trình tích lũy năng lượng trong giai đoạn tăng cứng cơ học và giai đoạn mềm hóa sau khi xuất hiện vết nứt đầu tiên.

Việc bổ sung các sợi thép gia cường vào HPSFRC đã làm gia tăng năng lượng phá hủy của vật liệu trong giai đoạn tăng cứng cơ học lên đến 15,58 kJ/m². Năng lượng phá hủy ở vùng tăng cứng cơ học đóng góp không đáng kể vào năng lượng phá hủy toàn phần bất kể hàm lượng sợi hay loại sợi gia cường.

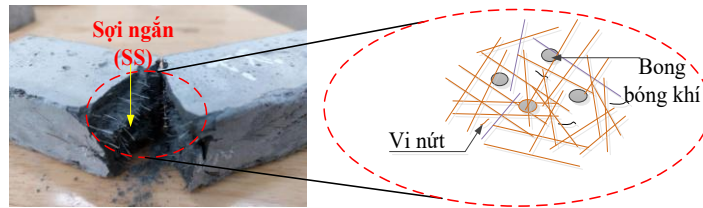
3.3.3. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép lên độ dài nứt liên kết

Bảng 3.2. Tương quan giữa mô đun đàn hồi và chiều dài vết nứt của HPFRCs

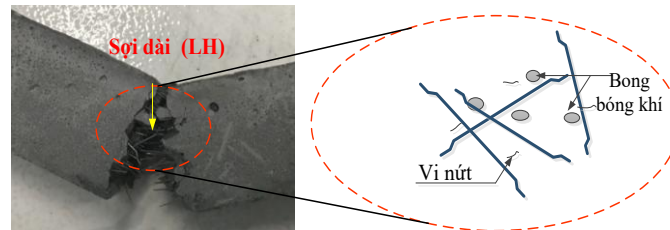
Loại mẫu	Mô đun đàn hồi, E (MPa)	Chiều dài vết nứt L_{cz} (mm)
NF	934,92	0,58
SS-0.5	2272,10	519,85
SS-1.0	1396,57	257,35
SS-1.5	4155,17	226,88
LH-0.5	896,32	152,95
LH-1.0	1277,12	284,44
LH-1.5	3144,65	243,77



Hình 3.4. So sánh thông số uốn của HPFRC



Hình 3.2. Sự phân bố của sợi thép ngắn trong lớp bê tông nền



Hình 3.3. Sự phân bố của sợi thép dài có móc hai đầu lớp bê tông nền

Chiều dài nứt liên kết theo phân tích ở HPSFRC không sợi đạt 0,58 mm. Ở loại sợi tròn ngắn hàm lượng 0,5%, chiều dài nứt liên kết là dài nhất 519,85 mm. Ở loại sợi dài có móc, chiều dài nứt liên kết là ngắn nhất 152,95mm.

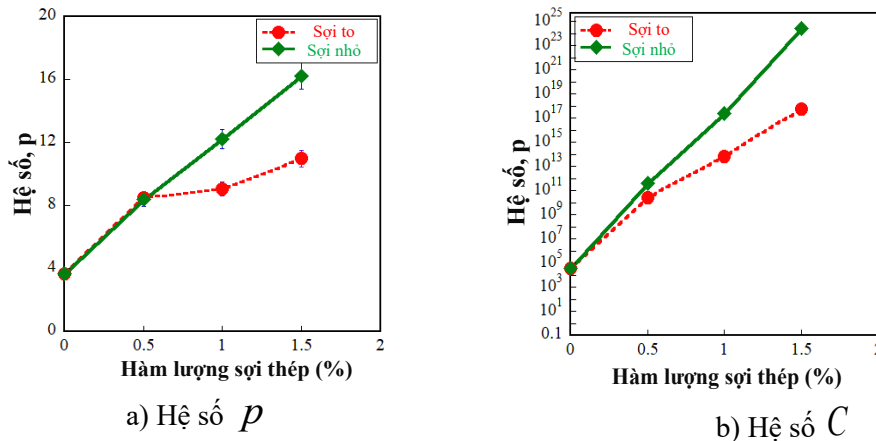
Hàm lượng cốt sợi tăng, sức kháng uốn của HPSFRC sẽ tăng do độ võng tăng lên và ứng suất giảm.

Dưới tải trọng tĩnh, cường độ chịu uốn và khả năng biến dạng ở điểm xuất hiện vết nứt chính (MOR) của HPFRC nhìn chung tăng lên khi hàm lượng thể tích của sợi nhỏ và sợi to tăng từ 0,0 lên 1,5%. Các sợi nhỏ tạo ra cường độ chịu uốn cao hơn và khả năng biến dạng thấp hơn ở hầu hết mọi hàm lượng sợi khi so sánh với các sợi to.

3.3. Kết quả thí nghiệm uốn lặp

3.3.1. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến ứng xử uốn của HPFRC dưới tải trọng lặp

Dưới tải trọng lặp, bê tông HPFRC có gia cường sợi thép không bị phá hoại ở tỷ lệ ứng suất mỗi nhỏ hơn 0,3 và giới hạn độ bền mỏi của HPFRC vượt quá 60,000 chu kỳ. Khi gia cường với hàm lượng thể tích sợi là 1,5%, giới hạn độ bền mỏi của HPFRC vượt quá 40,000 chu kỳ với tỷ lệ ứng suất mỗi nhỏ hơn 0,5. Do đó, bê tông HPFRC có thể sử dụng vào các kết cấu giao thông đường bộ.

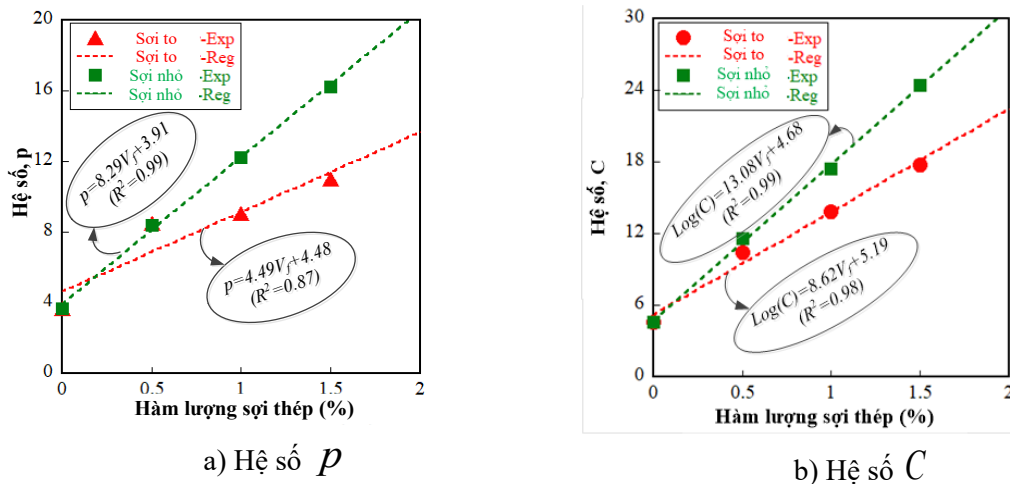


Hình 3.4. Độ nhạy của hàm lượng sợi thép đến hệ số mỗi của HPFRC

Dưới tải trọng lặp, bê tông HPFRC có gia cường sợi thép không bị phá hoại ở tỷ lệ ứng suất mỗi nhỏ hơn 0,3 và giới hạn độ bền mỗi của HPFRC vượt quá 60,000 chu kỳ. Khi gia cường với hàm lượng thể tích sợi là 1,5%, giới hạn độ bền mỗi của HPFRC vượt quá 40,000 chu kỳ với tỷ lệ ứng suất mỗi nhỏ hơn 0,5. Do đó, bê tông HPFRC có thể sử dụng vào các kết cấu giao thông đường bộ.

Khi hàm lượng thể tích sợi gia cường trong HPFRC lớn hơn dẫn đến giới hạn độ bền mỗi cao hơn đối với cả sợi nhỏ và sợi to. Các phương trình mỗi của HPFRC đường gia cường với các loại sợi và hàm lượng khác nhau cũng được phát triển bằng phân tích hồi quy để dự báo tuổi thọ mỗi của HPFRC.

Độ nhạy của HPFRC đối với các giới hạn bền mỗi giảm khi hàm lượng sợi thép gia cường tăng lên. Ngoài ra, giới hạn độ bền mỗi của bê tông HPFRC được gia cường sợi nhỏ nhạy hơn so với sợi to ở bất kỳ hàm lượng sợi nào.



Hình 3.5. Mối quan hệ giữa hàm lượng sợi thép gia cường và hệ số mỗi của HPFRC

Dưới tải trọng lặp, bê tông HPFRC có sợi gia cường sợi thép không bị phá hoại ở tỷ lệ ứng suất mỗi nhỏ hơn 0,3 và giới hạn độ bền mỗi của HPFRC vượt quá 60,000 chu kỳ. Khi gia cường với hàm lượng thể tích sợi là 1,5%, giới hạn độ bền mỗi của HPFRC vượt quá 40,000 chu kỳ với tỷ

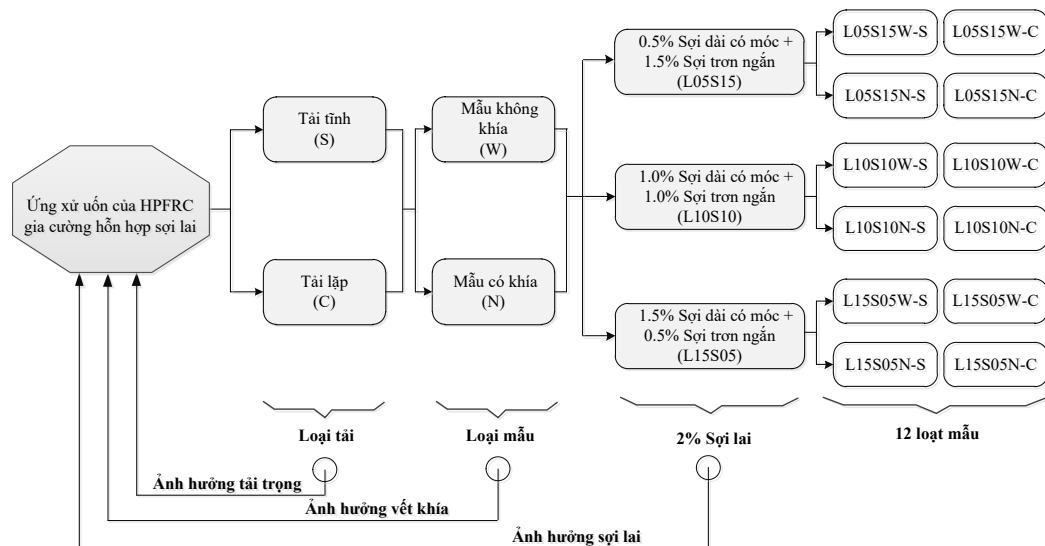
lệ ứng suất mỗi nhỏ hơn 0,5. Do đó, bê tông HPFRC có thể sử dụng vào các kết cấu giao thông đường bộ.

Khi hàm lượng thể tích sợi gia cường trong HPFRC lớn hơn dẫn đến giới hạn độ bền mỗi cao hơn đối với cả sợi nhỏ và sợi to. Các phương trình mỗi của HPFRC đường gia cường với các loại sợi và hàm lượng khác nhau cũng được phát triển bằng phân tích hồi quy để dự báo tuổi thọ mỗi của HPFRC.

Độ nhạy của HPFRC đối với các giới hạn bền mỗi giảm khi hàm lượng sợi thép gia cường tăng lên. Ngoài ra, giới hạn độ bền mỗi của bê tông HPFRC được gia cường sợi nhỏ nhạy hơn so với sợi to ở bất kỳ hàm lượng sợi nào.

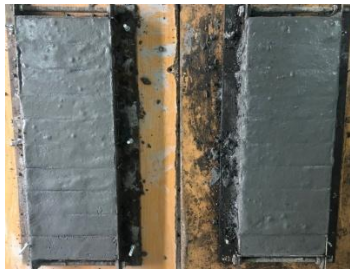
CHƯƠNG 4. ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA HỆ SỢI THÉP HỖN HỢP ĐẾN CÁC ĐẶC TRƯNG CƠ HỌC CỦA HPFRC

4.1. Sơ đồ thực hiện thí nghiệm



Hình 4.1. Sơ đồ thực hiện thí nghiệm

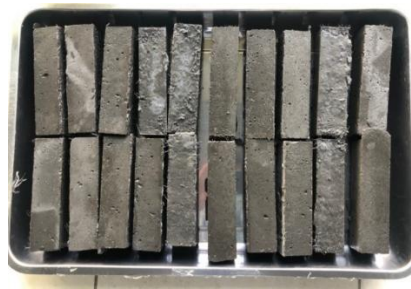
4.2. Mẫu thí nghiệm



a) Đúc mẫu



b) Bảo dưỡng mẫu trong nước



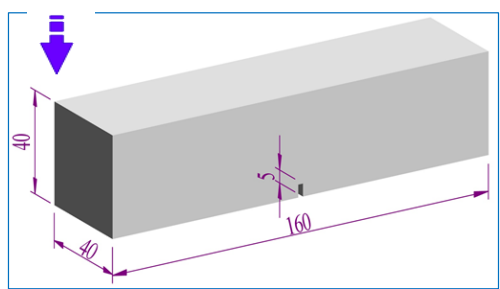
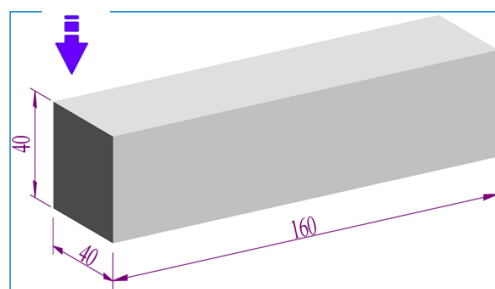
c) Mẫu được vớt ra sau khi bảo dưỡng trong nước



Mẫu không khía



Mẫu có khía



d) Kích thước mẫu (đơn vị: mm)

Hình 4.2. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm uốn HPFRC

4.3. Kết quả thí nghiệm uốn tĩnh

4.2.1. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi

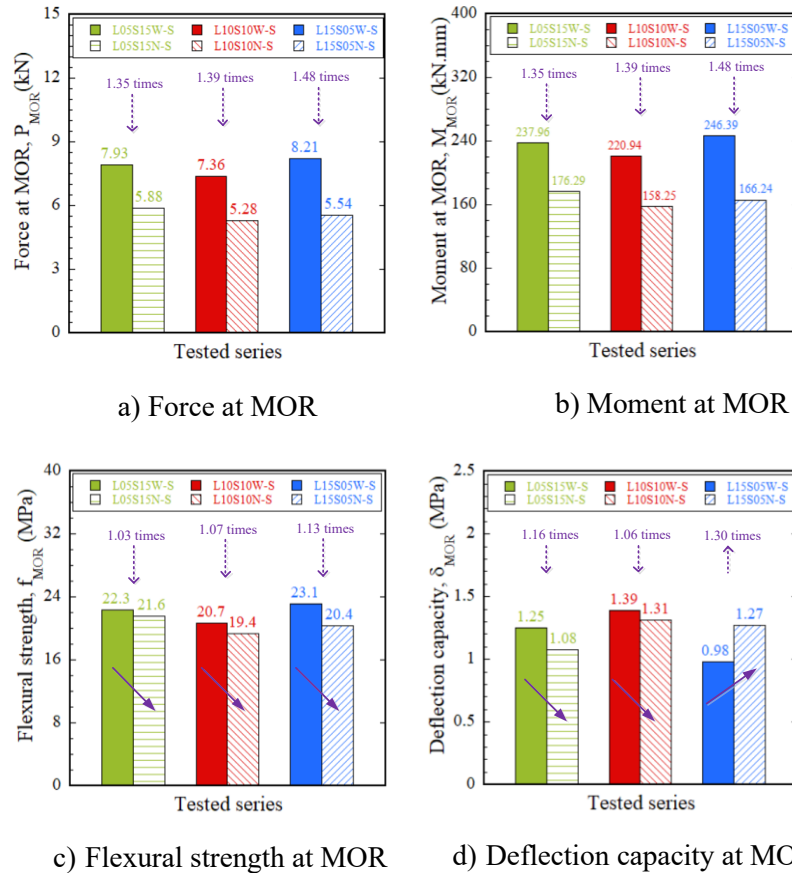
Loại mẫu HPFRC gia cường thép sợi lai kháng uốn tốt nhất ở dòng mẫu L15S05W-S với các tham số $P_{MOR} = 8.21 \text{ kN}$, $M_{MOR} = 246.39 \text{ kN.m}$, $f_{MOR} = 23.1 \text{ MPa}$, $\delta_{MOR} = 0.98$.

Tỷ lệ sợi to càng tăng, sức kháng uốn càng tốt.

Momen uốn tại MOR lớn nhất, độ võng trên dầm có giá trị nhỏ nhất ($M_{MOR}=246.39 \text{ kN.mm}$; $\delta_{MOR}=0.98$) ở dòng mẫu L10S10W. Sự phân bố đồng đều của cốt sợi sẽ giúp cải thiện tính chất cơ học tổng thể của vật liệu, bao gồm cả sức kháng uốn. Xu hướng tăng momen uốn trái ngược với xu hướng tăng độ võng.

Tỷ lệ sợi nhỏ càng cao, năng lượng hấp thụ của mẫu càng lớn. Năng lượng hấp thụ lớn nhất ở dòng mẫu L05S15W.

4.3.2. Ảnh hưởng của vết khía ban đầu



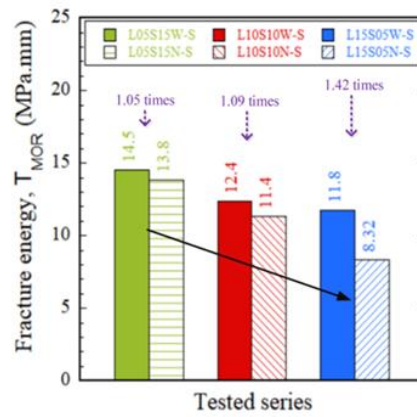
Hình 4.3. So sánh các thông số thể hiện khả năng kháng uốn của HPFRCs.

Dưới tác dụng tải trọng *tĩnh*, loạt mẫu HPFRC gia cường sợi thép lai có khía giảm momen tại MOR so với mẫu không khía từ 1.35 đến 1.48 lần, cường độ chịu uốn giảm từ 1.03 đến 1.13 lần, độ võng giảm từ 1.06 đến 1.16 lần, năng lượng hấp thụ giảm từ 1.05 đến 1.41 lần.

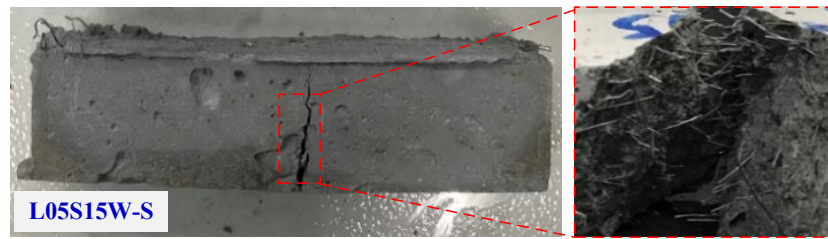
Hệ số cường độ ứng suất K_{IC} trong loạt mẫu có vết khía thay đổi từ 1.85 đến $2.06 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ tùy theo hàm lượng gia cường sợi thép lai, cao hơn so với bê tông thường.

Các thông số đặc trưng cho sức kháng uốn của loạt mẫu có khía luôn thấp mẫu không khía. Vết khía làm giảm diện tích chịu lực ban đầu của mẫu, dẫn đến giảm khả năng chịu uốn trước khi xuất hiện vết nứt

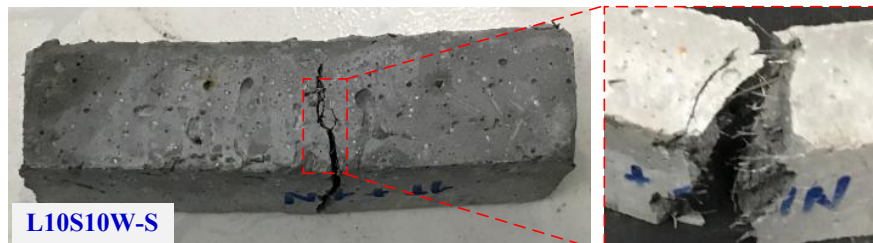
4.3.3. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến năng lượng hấp thụ



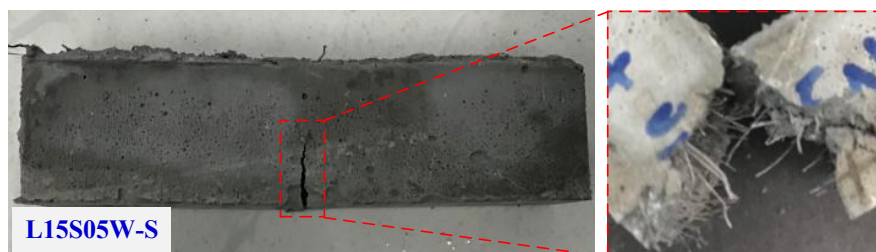
Hình 4.4. So sánh khả năng hấp thụ năng lượng của các mẫu HPFRC tại MOR



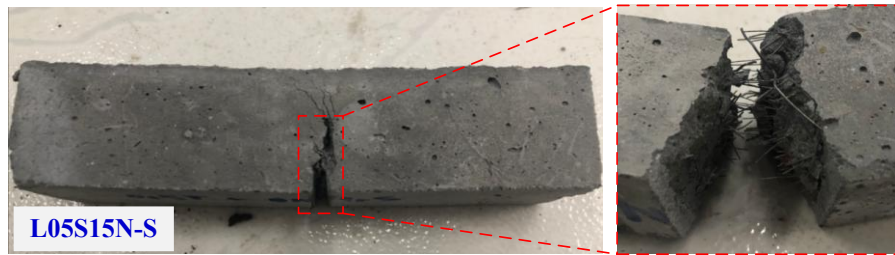
a) L05S15W-S series



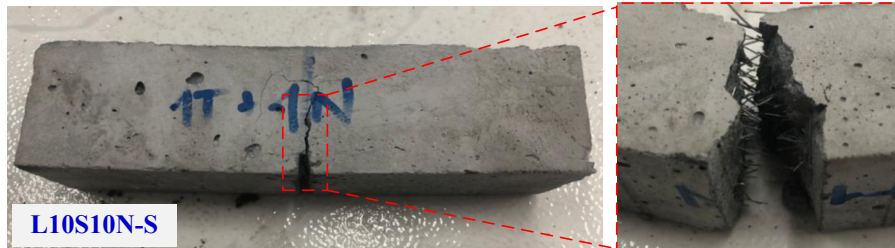
b) L10S10W-S series



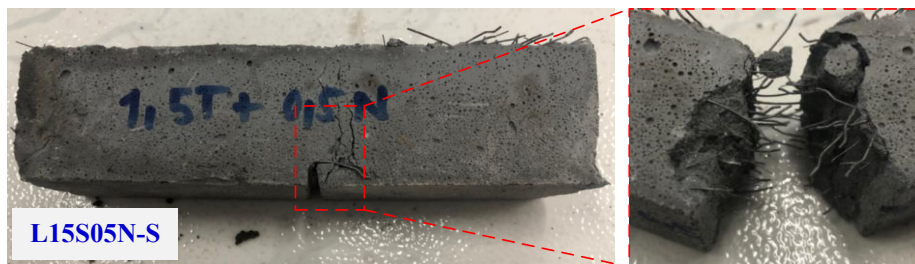
c) L15S05W-S series



d) L05S15N-S series



e) L10S10N-S series



f) L15S05N-S series

Hình 4.5. Tiết diện phá hủy của mẫu HPFRC được nghiên cứu dưới tải trọng tĩnh.

4.3.4. Đánh giá khả năng chống phá hủy của HPFRC có khía

Giá trị K_{IC} liên quan đến ứng suất uốn tại đỉnh vết nứt (điểm B) trong khi vùng hóa mềm (BCD) lại liên quan đến vùng phát triển vết nứt (FPZ), nằm trước vùng đầu vết nứt tự do (The traction-free crack tip). K_{IC} là ngưỡng mà tại đó ứng suất tại đầu vết nứt vượt quá khả năng chịu đựng của vật liệu, dẫn đến sự mất kiểm soát trong sự phát triển vết nứt. Thông thường, sợi nhỏ được phân bố đều hơn trong hỗn hợp vữa bê tông HPFRC so với sợi lớn, làm tăng diện tích tiếp xúc giữa sợi với lớp bê tông nền, nhờ đó làm tăng khả năng liên kết giữa sợi và vữa bê tông, tăng khả năng truyền tải lực qua các điểm nứt góp phần làm tăng năng lượng cần thiết để phá hủy vật liệu. Khi hàm lượng sợi nhỏ tăng, năng lượng phá hủy cũng tăng lên, giúp HPFRC trở nên bền vững và hiệu quả hơn trong việc chịu tải trọng phức tạp.

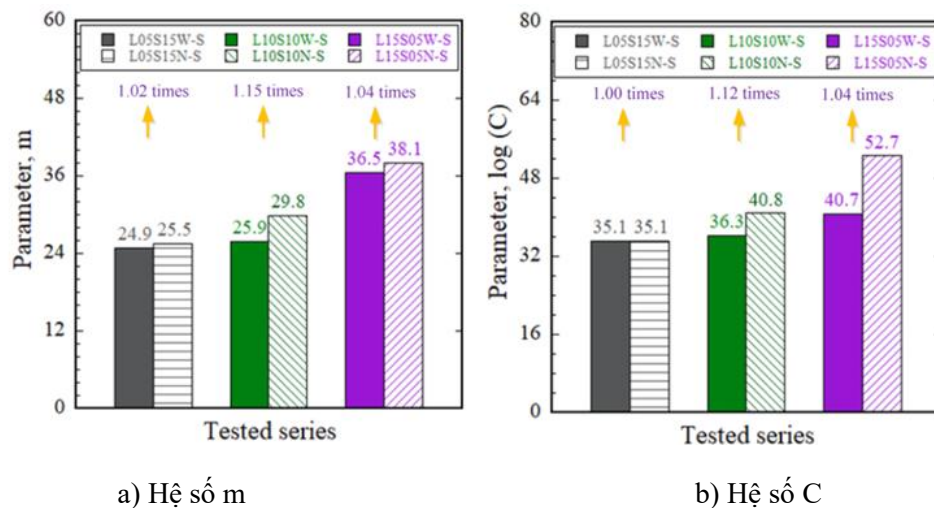
4.4. Kết quả thí nghiệm uốn lặp

4.4.1. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến ứng xử uốn của HPFRC dưới tải trọng lặp

Dưới tác dụng của tải trọng lặp, khi giảm mức tải trọng tác dụng, số chu kỳ phá hủy tăng lên.

Dòng mẫu L05S15W với 0.5% sợi dài và 1.5% sợi ngắn chịu được số chu kỳ cao nhất, cường độ uốn tĩnh cao nhất nhưng giới hạn bền mỗi thấp nhất. Từ đó có thể kết luận rằng mẫu có cường độ uốn tĩnh cao thì giới hạn bền mỗi sẽ thấp.

Sợi lai giúp giảm đi sự tập trung ứng suất tại các điểm yếu nhất trong bê tông, từ đó giảm nguy cơ nứt gãy, giúp HPFRC duy trì được độ bền lâu hơn so với bê tông không sợi hoặc chỉ gia cường sợi đơn.



Hình 4.6. So sánh các hệ số mỗi trong loạt mẫu HPFRC

4.4.2. Ảnh hưởng vết khía đến sức kháng uốn của HPFRC gia cường sợi thép hỗn hợp dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và tải trọng lặp.

Dưới tác dụng tải trọng tĩnh, loạt mẫu HPFRC gia cường sợi thép lai có khía giảm momen tại MOR so với mẫu không khía từ 1.35 đến 1.48 lần, cường độ chịu uốn giảm từ 1.03 đến 1.13 lần, độ võng giảm từ 1.06 đến 1.16 lần, năng lượng hấp thu giảm từ 1.05 đến 1.41 lần.

Hệ số cường độ ứng suất K_{IC} trong loạt mẫu có vết khía thay đổi từ 1.85 đến 2.06 MPa. $\sqrt{m}$ tùy theo hàm lượng gia cường sợi thép lai, cao hơn so với bê tông thường.

Các thông số đặc trưng cho sức kháng uốn của loạt mẫu có khía luôn thấp mẫu không khía.

Vết khía làm giảm diện tích chịu lực ban đầu của mẫu, dẫn đến giảm khả năng chịu uốn trước khi xuất hiện vết nứt.

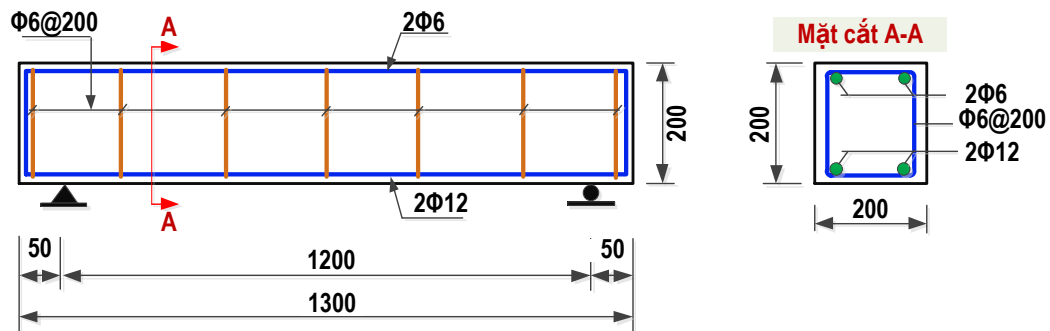
CHƯƠNG 5. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG SỐ ỨNG XỬ KẾT CẤU DÀM SỬ DỤNG HPFRC

Trong Chương 3 và Chương 4, luận án đã nghiên cứu thực nghiệm ứng xử uốn của bê tông tính năng cao gia cường cốt sợi (HPFRC) dưới tải trọng tĩnh và tải trọng lặp. Kết quả cho thấy sợi nhỏ giúp tăng cường khả năng chịu uốn, trong khi sợi lớn giúp nâng cao năng lượng phá hủy; sự kết hợp hệ thống sợi hỗn hợp (2.0% thể tích) tạo nên hiệu ứng hiệp đồng, cải thiện đáng kể khả năng kháng uốn và độ bền phá hủy, mặc dù có tồn tại sự đánh đổi giữa cường độ uốn tĩnh và giới hạn mỗi. Những phát hiện này cung cấp cơ sở quan trọng để hiểu rõ hơn ứng xử phức tạp của HPFRC.

Tuy nhiên, do thí nghiệm có giới hạn về chi phí, thời gian và khả năng quan sát cơ chế nội tại, Chương 5 tiếp tục nghiên cứu mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trên phần mềm ATENA. Mô hình dầm HPFRC kích thước thực tế ($200 \times 200 \times 1300$ mm) với hệ sợi hỗn hợp điển hình (1.5% sợi lớn có móc + 0.5% sợi nhỏ trơn) được sử dụng để kiểm chứng kết quả thực nghiệm và phân tích chi tiết hơn phân bố ứng suất, cơ chế biến dạng và quá trình hình thành vết nứt. Đây là bước quan trọng nhằm xây dựng cơ sở dữ liệu tin cậy, phục vụ đề xuất thiết kế tối ưu và ứng dụng bền vững HPFRC trong xây dựng.

5.1. Thực nghiệm ứng xử uốn của dầm HPFRC gia cường cốt thép dưới tải trọng tĩnh

Trong chương này, mẫu thí nghiệm là một dầm HPFRC có kích thước $200 \times 200 \times 1300$ mm với chiều dài nhịp 1200 mm, thành phần hỗn hợp vữa được thiết kế và chế tạo giống như những chương trước. Dầm được gia cường bằng hai thanh thép tròn có đường kính lần lượt là 6 mm và 12 mm như Hình 5.1a. Hỗn hợp HPFRC được thêm vào cốt sợi hỗn hợp, bao gồm bao gồm 1.5% thể tích sợi lớn có móc và 0.5% thể tích sợi nhỏ thẳng trơn với kích thước và đặc trưng cơ tính giống như các phần trước được thể hiện như trên Hình 5.2.



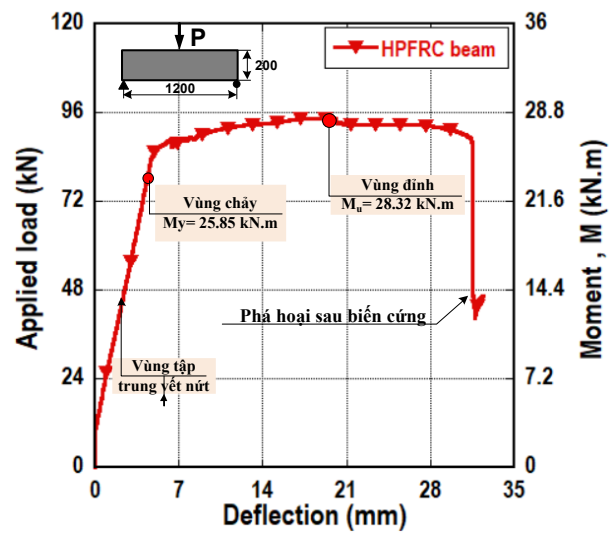
a) Kích thước chi tiết dầm HPFRC (đơn vị: mm)



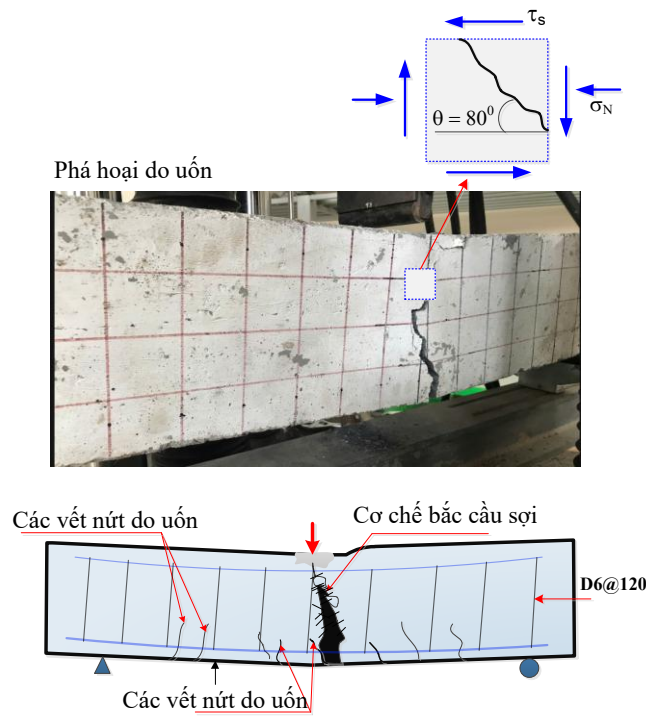
b) Dầm HPFRC sau khi dưỡng hộ

Hình 5.1. Chuẩn bị dầm thí nghiệm

5.2. Kết quả thí nghiệm



Hình 5.2. Đường cong ứng xử uốn của dầm HPFRC gia cường cốt thép

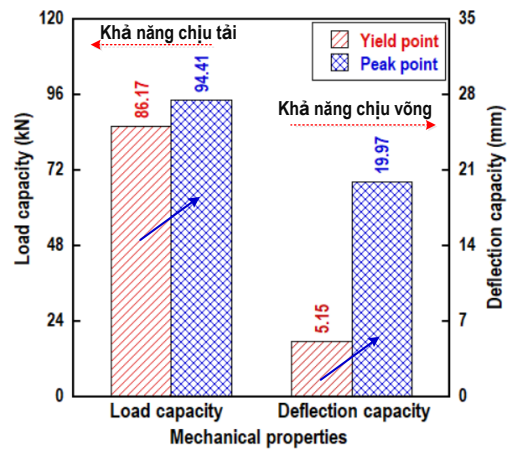


Hình 5.3. Biến dạng các vết nứt trong dầm HPFRC ở trạng thái tối hạn

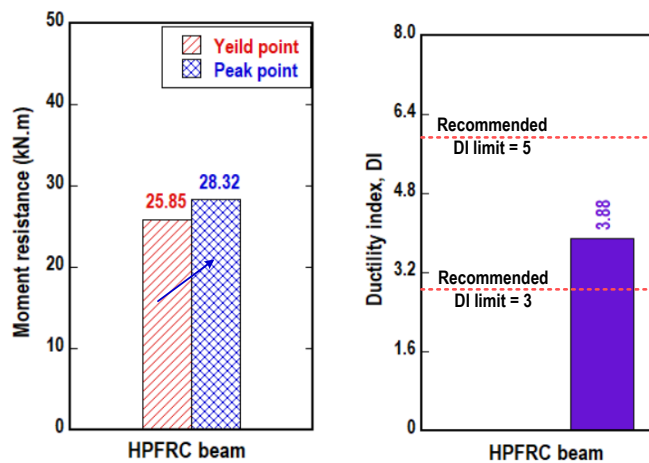
Bảng 5.1. Các thông đặc trưng cơ tính của dầm HPFRC gia cường cốt thép

Đại lượng đo	Đơn vị	Độ lớn
--------------	--------	--------

Tải trọng chảy, P_y	kN	86.17
Độ võng chảy, δ_y	mm	3.53
Tải trọng tới hạn, P_u	kN	94.41
Độ võng tới hạn, δ_u	mm	19.97
Độ dẻo, DI	-	3.88
θ (góc nghiêng vết nứt)	Độ	80
Kiểu phá hoại		Mô men



Hình 5.4. Đặc trưng cơ tính của dầm HPFRC



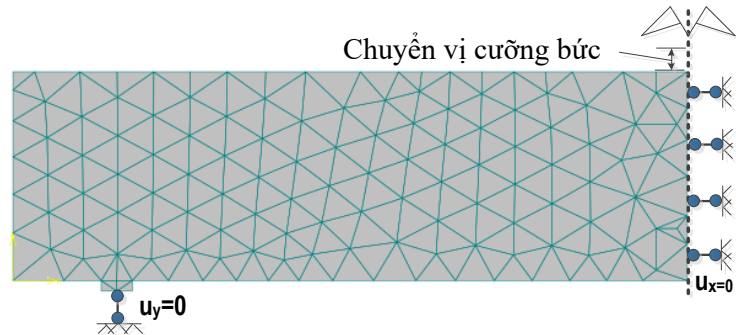
a) Mô men kháng uốn

b) Chỉ số thể hiện độ dẻo

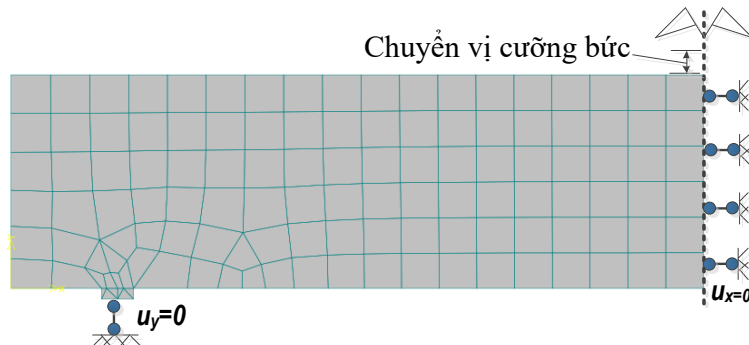
Hình 5.5. Mô men kháng uốn và chỉ số dẻo của dầm HPFRC

5.2. Mô hình hóa và mô phỏng ứng xử kết cấu dầm HPFRC gia cường cốt thép

Mô hình PTHH (FEM) sử dụng phần mềm ATENA phiên bản V5.0 [72] được sử dụng để khảo sát ứng xử dầm HPFRC dưới tác dụng tải trọng uốn 3 điểm.



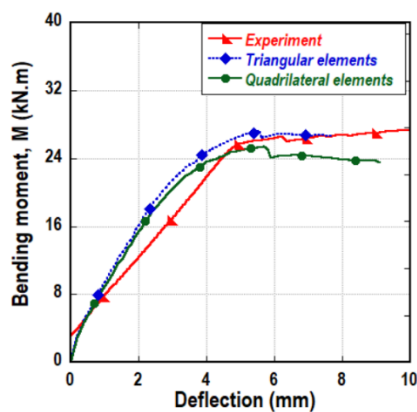
a) Phần tử tam giác



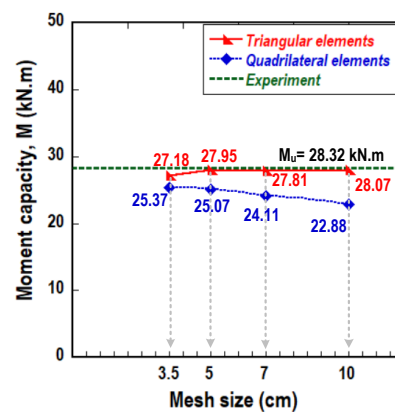
b) Phần tử tứ giác

Hình 5.6. Mô hình chia lưới

5.4.3. Kết quả mô phỏng số



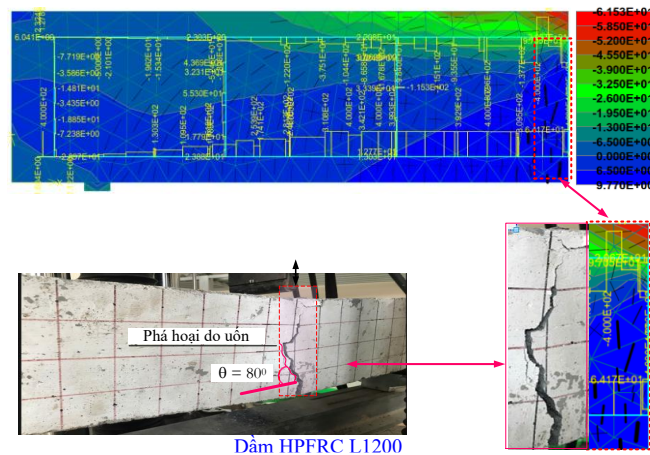
Hình 5.7. So sánh sức kháng uốn giữa thực nghiệm và mô phỏng



Hình 5.8. Sự thay đổi khả năng kháng mô men khác nhau của dầm HPFRC

Bảng 5.2. Kết quả so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm dầm HPFRC chịu uốn

Mô men kháng uốn					
Thực nghiệm		Mô phỏng (phần tử tam giác)		Sai số	
M_u (kN.m)	δ_u (mm)	M_u (kN.m)	δ_u (mm)	M_{MOR} (%)	δ_{MOR} (%)
28.32	19.97	27.18	5.58	4.03	72.06
		Mô phỏng (phần tử tứ giác)		Sai số	
		25.37	8.46	10.42	57.64

**Hình 5.9.** So sánh biên dạng vết nứt và cơ chế phá hoại của dầm

Chương 5 trình bày nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số đối với dầm HPFRC kích thước thực tế (200×200×1300 mm), gia cường bằng cốt thép và sợi hỗn hợp (0.5% sợi lớn, 1.5% sợi nhỏ) dưới tải trọng uốn tĩnh ba điểm. Kết quả thí nghiệm cho thấy dầm làm việc theo ba giai đoạn (đàn hồi – dẻo – phá hủy), đạt chỉ số dẻo cao ($DI = 3.88$) và mô men kháng uốn cực hạn 28.32 kN·m. Sợi thép giúp phân tán ứng suất, hạn chế nứt, trong khi quan sát cho thấy các vết nứt thẳng đứng tập trung ở đáy và các vết chéo xuất hiện gần giữa nhịp.

Mô phỏng bằng FEM trên ATENA tái hiện tốt cơ chế làm việc của dầm với sai số dưới 5%, đồng thời khẳng định lưới tam giác và kích thước ≤ 3.5 cm cho kết quả tin cậy hơn. Mô phỏng cũng cho phép quan sát chi tiết hình thành vết nứt và cho thấy cốt thép ngang chưa đủ kháng uốn. Những kết quả này củng cố hiểu biết về ứng xử kết cấu của HPFRC và chứng minh FEM là công cụ hiệu quả hỗ trợ thiết kế khi thực nghiệm bị hạn chế.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

KẾT LUẬN

Dựa trên các kết quả thí nghiệm và phân tích, có thể rút ra những kết luận chính của luận án như sau:

1. Việc bổ sung hàm lượng sợi thép gia cường giúp tăng cường hiệu quả làm việc của vật liệu HPFRC trong các kết cấu. Ứng xử uốn của các mẫu đầm bê tông tính năng cao gia cường cốt sợi thể hiện nhiều ưu điểm vượt trội hơn so với bê tông truyền thống như: tăng tính dẻo, giảm phá hoại giòn trong vùng chịu kéo, tăng khả năng hấp thu năng lượng.
2. Nghiên cứu thực nghiệm đã được tiến hành với sự quan sát liên tục và tỉ mỉ từ lúc bắt đầu gia tải đến khi xảy ra các cơ chế phá hoại. Kết quả cho thấy khi tăng hàm lượng sợi thép gia cường, khả năng chịu tải trọng lặp của các mẫu đầm HPFRC tăng lên đáng kể. Đồng thời, có sự cải thiện đáng kể khả năng phân tán năng lượng của các mẫu, đáp ứng các tiêu chí về độ dẻo và độ võng của kết cấu.
3. Việc nghiên cứu song song hai dạng tải trọng không chỉ làm rõ cơ chế nứt, phát triển biến dạng và suy giảm độ cứng của HPFRC, mà còn cung cấp cơ sở khoa học để dự đoán tuổi thọ, độ bền mỏi và khả năng duy trì độ bền lâu dài của kết cấu. Thực tế cho thấy, tải trọng uốn tĩnh giúp đánh giá chính xác khả năng chịu lực cực hạn và mức độ dẻo dai của kết cấu, trong khi tải trọng uốn lặp lại phản ánh điều kiện làm việc thực tế của nhiều công trình như cầu, sàn hay các bộ phận chịu tải trọng động và rung.
4. Trong luận án tiến hành mô phỏng số sử dụng phân tích PTHH trên phần mềm ATENA, nghiên cứu ứng xử của đầm HPFRC gia cường cốt thép để đối chiếu với kết quả thí nghiệm. Từ kết quả phân tích PTHH có thể thấy rằng kích thước lưới phần tử ảnh hưởng đáng kể đến tính chính xác của kết quả tính toán, lưới phần tử dưới 35 mm là phù hợp nhất đối với cả phần tử tam giác lẫn phần tử tứ giác. Bên cạnh đó, việc sử dụng mô hình “liên kết hoàn hảo” trong phần mềm ATENA giúp quan sát được biên dạng vết nứt, dạng phá hoại và ứng xử của đầm trong suốt quá trình gia tải.

KIẾN NGHỊ

Để phát huy tối đa tiềm năng ứng dụng của HPFRC trong các kết cấu chịu uốn, cần tiếp tục có nhiều nghiên cứu sâu hơn về ứng xử của vật liệu này dưới nhiều tải trọng phức tạp khác nhau khi hàm lượng sợi thép gia cường thay đổi. Trong thực tiễn xây dựng, nhiều kết cấu chịu uốn không chỉ làm việc dưới tải trọng tĩnh mà còn thường xuyên chịu tác động lặp lại do xe cộ, gió, rung động hoặc tải trọng chu kỳ khác. Việc nghiên cứu sâu hơn ứng xử của HPFRC dưới cả tải trọng uốn tĩnh và uốn lặp vì thế mang ý nghĩa thiết thực: giúp đánh giá chính xác khả năng chịu lực, tuổi thọ mỏi và độ bền lâu dài của kết cấu. Kết quả nghiên cứu sẽ hỗ trợ kỹ sư thiết kế lựa chọn cấu hình vật liệu tối ưu, đưa ra giải pháp giảm nứt, duy trì độ cứng và khả năng chịu lực của kết cấu trong suốt quá trình khai thác. Đồng thời, điều này góp phần nâng cao an toàn sử dụng, kéo dài vòng đời công trình và giảm thiểu chi phí bảo trì, sửa chữa trong thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N.K. Banjara, K. Ramanjaneyulu, Experimental Investigations and Numerical Simulations on the Flexural Fatigue Behavior of Plain and Fiber-Reinforced Concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 30 (2018). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002351](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002351).
- [2] X. Yu, Z. Yan, J. Li, Comprehensive study on corrosion induced structural deterioration of steel bars in reinforced concrete beams, *J. Constr. Steel Res.* 214 (2024) 108504. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108504>.
- [3] Y. Li, G. Zhang, J. Yang, J. Zhang, Q. Ding, A review on damage mechanism of ultra-high performance concrete under loading and erosion, *Mater. Today Commun.* 35 (2023) 106258. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106258>.
- [4] Thomas T. C. Hsu, Fatigue of Plain Concrete, *ACI J. Proc.* 78 (1981). <https://doi.org/10.14359/6927>.
- [5] M.K. Lee, B.I.G. Barr, An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete, *Cem. Concr. Compos.* 26 (2004) 299–305. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00139-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00139-7).
- [6] D.C. González, M.A. Vicente, S. Ahmad, Effect of Cyclic Loading on the Residual Tensile Strength of Steel Fiber–Reinforced High-Strength Concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 27 (2015). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001200](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001200).
- [7] S.H. Park, D.J. Kim, G.S. Ryu, K.T. Koh, Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete, *Cem. Concr. Compos.* 34 (2012) 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.009>.
- [8] A. Naaman, Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites, *High Perform. Fiber Reinf. Cem. Compos.* (2003) 95–113.
- [9] S.A. Paschalis, A.P. Lampropoulos, Developments in the use of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete as strengthening material, *Eng. Struct.* 233 (2021) 111914. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111914>.
- [10] D. joo Kim, S. El-Tawil, A.E. Naaman, Rate-dependent tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites, *Mater. Struct.* 42 (2009) 399–414. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9390-x>.
- [11] Y. Han, R. Liang, Y. Qin, J. Ran, Y. Kang, Experimental and theoretical investigation on axial tensile behavior of UHPC based on steel fiber properties using DIC technology, *J. Build. Eng.* 117 (2026) 114863. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.114863>.
- [12] Z.F. Akbulut, T.A. Tawfik, P. Smarzewski, S. Guler, Advancing Hybrid Fiber-Reinforced Concrete: Performance, Crack Resistance Mechanism, and Future Innovations, *Buildings* 15 (2025) 1247. <https://doi.org/10.3390/buildings15081247>.

- [13] Y. Abutahnat, L. Sorelli, A. El Refai, Tensile behavior of fiber-reinforced cementitious matrix with ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete (UHP-FRCM) with enhanced crack width control, fracture energy, and ultimate strength, *Constr. Build. Mater.* 489 (2025) 142430. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142430>.
- [14] D.-L. Nguyen, T.-K. Nguyen, K.-K. Lam, D.-K. Thai, N.-T. Tran, Assessing fracture characteristics of high-performance fiber-reinforced concrete using notched flexural specimens, *Theor. Appl. Fract. Mech.* 143 (2026) 105427. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2025.105427>.
- [15] A.M. Yassin, M. Mohie Eldin, M.A. Hafez, M.A. Elnaggar, The Flexural Behavior and Mechanical Properties of Super High-Performance Concrete (SHPC) Reinforced Using the Hybridization of Micro Polypropylene and Macro Steel Fibers, *Buildings* 14 (2024) 1887. <https://doi.org/10.3390/buildings14071887>.
- [16] R.T. 162-TDF, Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – σ - ϵ design method, *Mater. Struct.* 36 (2003) 560–567. <https://doi.org/10.1617/13837>.
- [17] J. Resplendino, Ultra High Performance Concrete: New AFGC Recommendations, in: *Des. Build. with UHPFRC*, Wiley, 2011: pp. 713–722. <https://doi.org/10.1002/9781118557839.ch47>.
- [18] ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete, ACI 318-14 (2014).
- [19] JSCE, Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures, JSCE Guidel. 9 (2006).
- [20] JSCE, Recommendations for Design and Construction of HPFRCC, Tokyo, Japan, (2008).
- [21] FHWA, Manual for Design, Construction, and Maintenance of Orthotropic Steel Deck Bridges, FHWA-IF 027 (2012).
- [22] and P.S.R. E. Camacho, J. A. López, Definition of three levels of performance for UHPFRC-HPFRC, *Proc. 3rd Int. Symp. UHPC* (2012) 249–256.
- [23] J. Song, D.L. Nguyen, C. Manathamsombat, D.J. KIM, Effect of fiber volume content on electromechanical behavior of strain-hardening steel-fiber-reinforced cementitious composites, *J. Compos. Mater.* 49 (2015) 3621–3634. <https://doi.org/10.1177/0021998314568169>.
- [24] D.-L. Nguyen, D.-K. Thai, M.N.-T. Lam, Synergy in Flexure of High-Performance Fiber-Reinforced Concrete with Hybrid Steel Fibers, *J. Mater. Civ. Eng.* 34 (2022). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004232](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004232).
- [25] A.E. Naaman, H.W. Reinhardt, Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response, *Mater. Struct.* 39 (2007) 547–555. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9103-2>.
- [26] Á. Mena-Alonso, D.C. González, J. Mínguez, M.A. Vicente, Size effect on the flexural

- fatigue behavior of high-strength plain and fiber-reinforced concrete, *Constr. Build. Mater.* 411 (2024) 134424. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134424>.
- [27] N.R. de A. Cerqueira, V.M. de A. Monteiro, F.R. de Souza, D.C.T. Cardoso, F. de A. Silva, Mechanical degradation of ultra-high performance concrete under flexural fatigue loading, *Constr. Build. Mater.* 391 (2023) 131877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131877>.
- [28] D.-Y. Yoo, J.-H. Lee, Y.-S. Yoon, Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites, *Compos. Struct.* 106 (2013) 742–753. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.07.033>.
- [29] R. Sovják, P. Máca, T. Imlauf, Effect of Fibre Length on the Fracture Energy of UHPFRC, *Procedia Eng.* 193 (2017) 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.188>.
- [30] K. Sirijaroonchai, S. El-Tawil, G. Parra-Montesinos, Behavior of high performance fiber reinforced cement composites under multi-axial compressive loading, *Cem. Concr. Compos.* 32 (2010) 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.003>.
- [31] A.K. Akhnoukh, C. Buckhalter, Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges, *Case Stud. Constr. Mater.* 15 (2021) e00559. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00559>.
- [32] S.A. Paschalis, A.P. Lampropoulos, Investigation of key parameters affecting the use of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) as strengthening material, *Structures* 62 (2024) 106257. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106257>.
- [33] R. Yu, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC), *Cem. Concr. Res.* 56 (2014) 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.002>.
- [34] R. Yu, L. van Beers, P. Spiesz, H.J.H. Brouwers, Impact resistance of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) under pendulum impact loadings, *Constr. Build. Mater.* 107 (2016) 203–215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.157>.
- [35] D. Kim, S. Kang, T.-H. Ahn, Mechanical Characterization of High-Performance Steel-Fiber Reinforced Cement Composites with Self-Healing Effect, *Materials (Basel)*. 7 (2014) 508–526. <https://doi.org/10.3390/ma7010508>.
- [36] D.-L. Nguyen, D.-J. Kim, D.-K. Thai, Enhancing Damage-Sensing Capacity of Strain-Hardening Macro-Steel Fiber-Reinforced Concrete by Adding Low Amount of Discrete Carbons, *Materials (Basel)*. 12 (2019) 938. <https://doi.org/10.3390/ma12060938>.
- [37] A.E. Naaman, Tensile strain-hardening FRC composites: Historical evolution since the 1960, in: *Adv. Constr. Mater. 2007*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, n.d.: pp. 181–202. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72448-3_19.
- [38] and P.S. P. Fidjestol, R. T. Thorsteinsen, Making UHPC with local materials – The way forward, *Proc. 3rd Int. Symp* (2012).

- [39] F. Germano, G.A. Plizzari, Post-Peak Cyclic Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete under Bending, in: 2012: pp. 313–320. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2436-5_38.
- [40] D.M. Carlesso, A. de la Fuente, S.H.P. Cavalaro, Fatigue of cracked high performance fiber reinforced concrete subjected to bending, *Constr. Build. Mater.* 220 (2019) 444–455. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.038>.
- [41] A. Medeiros, X. Zhang, G. Ruiz, R.C. Yu, M. de S.L. Velasco, Effect of the loading frequency on the compressive fatigue behavior of plain and fiber reinforced concrete, *Int. J. Fatigue* 70 (2015) 342–350. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.08.005>.
- [42] P.D. Huu, Nghiên cứu công nghệ chế tạo bê tông có độ bền siêu cao ứng dụng trong kết cấu cầu và nhà cao tầng, Đề Tài Khoa Học và Công Nghệ Cấp Bộ, Trường Đại Học Giao Thông Vận Tải, Hà Nội, Việt Nam (2011).
- [43] N.C. Thang, Nghiên cứu chế tạo bê tông tính năng siêu cao gia cường cốt sợi sử dụng silica fume và xỉ lò cao nghiền mịn ở Việt Nam, *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng* (2013) 15.
- [44] and P.D.H. C. V. Hung, N. D. Phuc, N. C. Thang, N. N. Tuyen, Dự báo sức kháng uốn của dầm bê tông chất lượng siêu cao (UHPC), *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng* 12 (2018) 1–13.
- [45] Thi Hai Vinh, Chu & Vinh, Bui & Nguyen, Tue. (2023), Effect of Aggregate Grading and Steel Fiber on the Properties of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete, 10.1007/978-981-99-7434-4_76.
- [46] D. Nguyen, D. Thai, H.T.T. Nguyen, N.T. Tran, T. Phan, D.J. Kim, Mechanical behaviors and their correlations of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes with various steel fiber types, *Struct. Concr.* 24 (2023) 1179–1200. <https://doi.org/10.1002/suco.202100184>.
- [47] D.-L. Nguyen, H.-V. Le, T.-B.-N. Vu, V.-T. Nguyen, N.-T. Tran, Evaluating fracture characteristics of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete in flexure and tension with size impact, *Constr. Build. Mater.* 382 (2023) 131224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131224>.
- [48] K. Lam, D. Nguyen, H.T.T. Nguyen, K. Le-Trung, N. Tran, H. Le, Notch depth-dependent flexural behavior of high-performance fiber-reinforced concrete under static and cyclic loading, *Struct. Concr.* (2025). <https://doi.org/10.1002/suco.70365>.
- [49] D.-L. Nguyen, M. Ngoc-Tra Lam, D.-J. Kim, J. Song, Direct tensile self-sensing and fracture energy of steel-fiber-reinforced concretes, *Compos. Part B Eng.* 183 (2020) 107714. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107714>.
- [50] D.L. Nguyen, J. Song, C. Manathamsombat, D.J. Kim, Comparative electromechanical damage-sensing behaviors of six strain-hardening steel fiber-reinforced cementitious composites under direct tension, *Compos. Part B Eng.* 69 (2015) 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.09.037>.
- [51] D.-L. Nguyen, D.-K. Thai, T.-T. Ngo, T.-K. Tran, T.-T. Nguyen, Weibull modulus from size

- effect of high-performance fiber-reinforced concrete under compression and flexure, *Constr. Build. Mater.* 226 (2019) 743–758. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.234>.
- [52] M. Shafieifar, M. Farzad, A. Azizinamini, Experimental and numerical study on mechanical properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC), *Constr. Build. Mater.* 156 (2017) 402–411. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.170>.
- [53] G. Creazza, R. Di Marco, Bending moment-mean curvature relationship with constant axial load in the presence of tension stiffening, *Mater. Struct.* 26 (1993) 196–206. <https://doi.org/10.1007/BF02472612>.
- [54] G. Kaklauskas, V. Gribniak, D. Bacinskas, P. Vainiunas, Shrinkage influence on tension stiffening in concrete members, *Eng. Struct.* 31 (2009) 1305–1312. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.10.007>.
- [55] Y. Liu, J. Pang, Q. Chen, W. Yao, Study on Mechanical Properties and Pore Structure of Hybrid Fiber Reinforced Rubber Concrete, *Crystals* 11 (2021) 1307. <https://doi.org/10.3390/cryst11111307>.
- [56] M. Königsberger, B. Pichler, C. Hellmich, Micromechanics of ITZ–Aggregate Interaction in Concrete Part I: Stress Concentration, *J. Am. Ceram. Soc.* 97 (2014) 535–542. <https://doi.org/10.1111/jace.12591>.
- [57] J.J. Kim, D.J. Kim, S.T. Kang, J.H. Lee, Influence of sand to coarse aggregate ratio on the interfacial bond strength of steel fibers in concrete for nuclear power plant, *Nucl. Eng. Des.* 252 (2012) 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.07.004>.
- [58] B. Luccioni, F. Isla, D. Forni, E. Cadoni, Modelling UHPFRC tension behavior under high strain rates, *Cem. Concr. Compos.* 91 (2018) 209–220. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.001>.
- [59] Q. Zheng, C. Li, B. He, Z. Jiang, Revealing the effect of silica fume on the flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete by acoustic emission technique, *Cem. Concr. Compos.* 131 (2022) 104563. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104563>.
- [60] M. Gesoglu, E. Güneyisi, G.F. Muhyaddin, D.S. Asaad, Strain hardening ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites: Effect of fiber type and concentration, *Compos. Part B Eng.* 103 (2016) 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.08.004>.
- [61] Q. Yu, W. Zhuang, C. Shi, Research progress on the dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete under high strain rates, *Cem. Concr. Compos.* 124 (2021) 104258. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104258>.
- [62] Graybeal, B. A., I. De La Varga, and L. F. Maya Duque, Fiber Reinforcement Influence on the Tensile Response of UHPFRC in Proc. 1st Int. Interactive Symp. on Ultra-High Performance Concrete, Ames, IA, USA, 2016, doi: 10.21838/uhpc.2016.86.
- [63] T.-N.-H. Vuong, D.-L. Nguyen, H.T.T. Nguyen, T.N.M. Nguyen, Effect of fiber content on flexural fracture parameters of high-performance steel fiber-reinforced concrete, *J. Sci. Technol. Civ. Eng. - HUCE* 18 (2024) 12–23. [https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18\(1\)-](https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18(1)-)

02.

- [64] J.-Y. Wang, J.-Y. Guo, Damage investigation of ultra high performance concrete under direct tensile test using acoustic emission techniques, *Cem. Concr. Compos.* 88 (2018) 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.01.007>.
- [65] L. Soufeiani, S.N. Raman, M.Z. Bin Jumaat, U.J. Alengaram, G. Ghadyani, P. Mendis, Influences of the volume fraction and shape of steel fibers on fiber-reinforced concrete subjected to dynamic loading – A review, *Eng. Struct.* 124 (2016) 405–417. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.029>.
- [66] D.-L. Nguyen, D.-K. Thai, D.-J. Kim, Direct tension-dependent flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes, *J. Strain Anal. Eng. Des.* 52 (2017) 121–134. <https://doi.org/10.1177/0309324716689625>.
- [67] L. Aashto, Bridge design specifications, (1998).
- [68] J.T. McCall, PROBABILITY OF FATIGUE FAILURE OF CONCRETE, in: 1956. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:127708651>.
- [69] S.P. Singh, B. Singh, S. Kaushik, Probability of fatigue failure of steel fibrous concrete, *Mag. Concr. Res. - MAG CONCR RES* 57 (2005) 65–72. <https://doi.org/10.1680/mac.57.2.65.58701>.
- [70] S.P. Singh, S. Kaushik, Flexural Fatigue Life Distributions and Failure Probability of Steel Fibrous Concrete, *Aci Mater. J.* 97 (2000) 658–667.
- [71] Q. Chen, J. Zhang, Z. Wang, T. Zhao, Z. Wang, A review of the interfacial transition zones in concrete: Identification, physical characteristics, and mechanical properties, *Eng. Fract. Mech.* 300 (2024) 109979. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.109979>.
- [72] A. Bentur, S. Mindess, *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, CRC Press, 2006. <https://doi.org/10.1201/9781482267747>.
- [73] M. Zhang, J. Jing, S. Zhang, Effect of steel fiber content on fatigue performance of high-strength concrete beams, *Sci. Rep.* 15 (2025) 11815. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96217-x>.
- [74] C.D.J. and R.W. Zemp, Flexural Fatigue Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete--Influence of Fiber Content, Aspect Ratio, and Type, *ACI Mater. J.* 88 (1991). <https://doi.org/10.14359/1875>.
- [75] J. Lee, M.M. Lopez, An Experimental Study on Fracture Energy of Plain Concrete, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 8 (2014) 129–139. <https://doi.org/10.1007/s40069-014-0068-1>.
- [76] B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk, S. Amziane, Flexural behaviour of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading, *Constr. Build. Mater.* 126 (2016) 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.035>.
- [77] S.O. Afolabi, B.I. Oladapo, C.O. Ijagbemi, A.O.M. Adeoye, J.F. Kayode, Design and finite

- element analysis of a fatigue life prediction for safe and economical machine shaft, *J. Mater. Res. Technol.* 8 (2019) 105–111. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.10.007>.
- [78] X. Guo, Y. Wang, P. Huang, Z. Chen, Finite element modeling for fatigue life prediction of RC beam strengthened with prestressed CFRP based on failure modes, *Compos. Struct.* 226 (2019) 111289. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111289>.
- [79] G. Zheng, Z. Cao, Y. Wang, R. Talemi, Fatigue response of open hole plates: A finite element simulation investigating the influence of dynamic and static cold expansion processes, *Finite Elem. Anal. Des.* 230 (2024) 104085. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2023.104085>.
- [80] P. Ilie, A. Ince, Three-dimensional fatigue crack growth simulation and fatigue life assessment based on finite element analysis, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 45 (2022) 3251–3266. <https://doi.org/10.1111/ffe.13815>.
- [81] X.-B. Luu, S.-K. Kim, Finite Element Modeling of Interface Behavior between Normal Concrete and Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete, *Buildings* 13 (2023) 950. <https://doi.org/10.3390/buildings13040950>.
- [82] H. Fataar, R. Combrinck, W.P. Boshoff, An Experimental Study on the Fatigue Failure Mechanisms of Pre-damaged Steel Fibre Reinforced Concrete at a Single Fibre Level, in: 2021: pp. 199–208. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58482-5_18.
- [83] K. Aas-Jakobsen, *Fatigue of Concrete Beams and Columns*, Tapir, 1970. <https://books.google.com.vn/books?id=2McQNAAACAAJ>.
- [84] B. Zhang, D. V. Phillips, K. Wu, Effects of loading frequency and stress reversal on fatigue life of plain concrete, *Mag. Concr. Res.* 48 (1996) 361–375. <https://doi.org/10.1680/mac.1996.48.177.361>.
- [85] P.B. Cachim, J.A. Figueiras, P.A.. Pereira, Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression, *Cem. Concr. Compos.* 24 (2002) 211–217. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00019-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00019-1).
- [86] A.E. Naaman, H. Hammoud, Fatigue characteristics of high performance fiber-reinforced concrete, *Cem. Concr. Compos.* 20 (1998) 353–363. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00004-3).
- [87] S.P. Singh, S.K. Kaushik, Fatigue strength of steel fibre reinforced concrete in flexure, *Cem. Concr. Compos.* 25 (2003) 779–786. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00102-6).
- [88] S. Aaleti, S. Sritharan, Investigation of a Suitable Shear Friction Interface between UHPC and Normal Strength Concrete for Bridge Deck Applications, (2017).
- [89] N. Gowripalan, R. Gilbert, *Design Guidelines for RPC Prestressed Concrete Beams*, (2000).
- [90] TCVN 12392-1:2018, Sợi cho bê tông cốt sợi – Phần 1: Sợi thép (Fibres for fiber-reinforced concrete – Part 1: Steel fibre), (2018).
- [91] D.-L. Nguyen, D.-K. Thai, H.T.T. Nguyen, T.-Q. Nguyen, K. Le-Trung, Responses of

- composite beams with high-performance fiber-reinforced concrete, *Constr. Build. Mater.* 270 (2021) 121814. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121814>.
- [92] S. Khalilpour, E. BaniAsad, M. Dehestani, A review on concrete fracture energy and effective parameters, *Cem. Concr. Res.* 120 (2019) 294–321. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.013>.
- [93] F. Wittmann, Modulus of Rupture, Tensile Strength, and Fracture Energy - An Application of Non-linear Fracture Mechanics, *Restor. Build. Monum.* 11 (2005) 141–150.
- [94] A. Hillerborg, M. Modéer, P.-E. Petersson, Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cem. Concr. Res.* 6 (1976) 773–781. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(76\)90007-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(76)90007-7).
- [95] W. Wu, X. He, Z. Yi, Z. Zhu, J. He, W. Wang, C. Zhao, Flexural fatigue behaviors of high-content hybrid fiber-polymer concrete, *Constr. Build. Mater.* 349 (2022) 128772. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128772>.
- [96] E. Parant, P. Rossi, C. Boulay, Fatigue behavior of a multi-scale cement composite, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.04.006>.
- [97] N.K. Banjara, K. Ramanjaneyulu, S. Sasmal, V. Srinivas, Flexural Fatigue Performance of Plain and Fibre Reinforced Concrete, *Trans. Indian Inst. Met.* 69 (2016) 373–377. <https://doi.org/10.1007/s12666-015-0770-y>.
- [98] F. Germano, G. Tiberti, G. Plizzari, Post-peak fatigue performance of steel fiber reinforced concrete under flexure, *Mater. Struct.* 49 (2016) 4229–4245. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0783-3>.
- [99] A. Tridello, C. Boursier Niutta, M. Rossetto, F. Berto, D.S. Paolino, Statistical estimation of fatigue design curves from datasets involving failures from defects, *Int. J. Fatigue* 176 (2023) 107882. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107882>.
- [100] O.H. Basquin, The exponential law of endurance tests, in: n.d. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:222450133>.
- [101] J.-K. Kim, Y.-Y. Kim, Experimental study of the fatigue behavior of high strength concrete, *Cem. Concr. Res.* 26 (1996) 1513–1523. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00151-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00151-2).
- [102] S. Seitzl, P. Miarka, I. Rozsypalová, K. Pokorná, Z. Keršner, J. Katzer, P.K. Zarzycki, Mechanical fracture properties of concrete with lunar aggregate simulant, *MATEC Web Conf.* 323 (2020) 01014. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032301014>.
- [103] Č. Consulting, ATENA Program Documentation – Part 1: Theory, Červenka Consulting, (n.d.).

