

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

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 LẶP

NGÀNH: CƠ KỸ THUẬT
MÃ NGÀNH: 9520101

LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. Hồ Chí Minh, Tháng 05/2026

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

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 LẶP

NGÀNH: CƠ KỸ THUẬT
MÃ SỐ NCS: 2229101

LUẬN ÁN TIẾN SĨ

GVHD1: PGS.TS. NGUYỄN DUY LIÊM
GVHD2: TS. NGUYỄN HUỖNH TẤN TÀI

TP. Hồ Chí Minh, Tháng 05/2026

QUYẾT ĐỊNH

Về việc giao đề tài luận án và người hướng dẫn NCS khóa 2022 - 2025

HIỆU TRƯỞNG TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH

Căn cứ Luật Giáo dục đại học ngày 18/6/2012 và Luật sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật Giáo dục đại học ngày 19/11/2018;

Căn cứ Nghị định 99/2019/NĐ-CP ngày 30/12/2019 của Chính phủ Quy định chi tiết và hướng dẫn thi hành một số điều của Luật sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật giáo dục đại học;

Căn cứ Quyết định số 937/QĐ-TTg ngày 30/6/2017 của Thủ tướng Chính phủ về việc phê duyệt đề án thi điểm đổi mới cơ chế hoạt động của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM;

Căn cứ Nghị quyết số 11/NQ-HĐT ngày 08/01/2021 của Hội đồng trường ban hành Quy chế tổ chức và hoạt động của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM;

Căn cứ Nghị quyết số 99/NQ-HĐT ngày 21 tháng 10 năm 2022 của Hội đồng trường về công tác cán bộ lãnh đạo Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh.

Căn cứ Thông tư số 18/2021/TT-BGDĐT ngày 28/6/2021 của Bộ trưởng Bộ Giáo dục và Đào tạo về Quy chế tuyển sinh và đào tạo trình độ tiến sĩ;

Căn cứ Quyết định số 2310/QĐ-DHSPKT ngày 28/12/2021 của Hiệu trưởng trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM về việc ban hành Quy chế tuyển sinh và đào tạo trình độ tiến sĩ của trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM;

Theo nhu cầu công tác và khả năng cán bộ;

Theo đề nghị của Trường khoa Xây dựng và Trường phòng Đào tạo.

QUYẾT ĐỊNH:

Điều 1. Giao đề tài luận án tiến sĩ và người hướng dẫn cho:

Nghiên cứu sinh : *Vương Thị Ngọc Hân*

Ngành : *Cơ kỹ thuật*

Khoá: 2022 – 2025

Tên luận án : *Ứng xử cơ học của vật liệu bê tông tính năng cao gia cường cốt sợi trong các kết cấu dạng dầm*

Người HD thứ nhất (HD chính): *TS. Nguyễn Duy Liêm*

Người HD thứ hai : *TS. Nguyễn Huỳnh Tấn Tài*

Thời gian thực hiện : *01/10/2022 đến ngày 30/9/2025*

Điều 2. Giao cho Phòng Đào tạo quản lý, thực hiện theo đúng Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ của Bộ Giáo dục & Đào tạo và Nhà trường đã ban hành.

Điều 3. Trường các đơn vị, phòng Đào tạo, các Khoa/Viện quản ngành tiến sĩ và các Ông (Bà) có tên tại Điều 1 chịu trách nhiệm thi hành quyết định này.

Quyết định có hiệu lực kể từ ngày ký. /

Nơi nhận:

- BGH (để biết);
- Như điều 2, 3;
- Lưu: VT, ĐT (5b).



KT. HIỆU TRƯỞNG
PHÓ HIỆU TRƯỞNG

PGS.TS Lê Hiếu Giang

Số: 2230/QĐ-ĐHSPKT

Tp. Hồ Chí Minh, ngày 14 tháng 8 năm 2024

QUYẾT ĐỊNH
Về việc đổi tên luận án tiến sĩ

HIỆU TRƯỞNG TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH

Căn cứ Luật Giáo dục đại học ngày 18/6/2012 và Luật sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật Giáo dục đại học ngày 19/11/2018;

Căn cứ Nghị định 99/2019/NĐ-CP ngày 30/12/2019 của Chính phủ Quy định chi tiết và hướng dẫn thi hành một số điều của Luật sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật giáo dục đại học;

Căn cứ Quyết định số 465/QĐ-BGDĐT ngày 31/01/2024 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc giao quyền tự chủ tài chính giai đoạn 2023 - 2025 cho các đơn vị sự nghiệp công lập trực thuộc;

Căn cứ Nghị quyết số 11/NQ-HĐT ngày 08/01/2021 của Hội đồng trường ban hành Quy chế tổ chức hoạt động của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh; Nghị quyết số 118/NQ-HĐT ngày 27/01/2023 và Nghị quyết số 136/NQ-HĐT ngày 14/10/2023 của Hội đồng trường về việc sửa đổi, bổ sung Quy chế tổ chức hoạt động của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh;

Căn cứ Nghị quyết số 132/NQ-HĐT ngày 14/10/2023 của Hội đồng trường về việc công tác cán bộ lãnh đạo Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh;

Căn cứ Thông tư số 18/2021/TT-BGDĐT ngày 28/6/2021 của Bộ trưởng Bộ Giáo dục và Đào tạo về Quy chế tuyển sinh và đào tạo trình độ tiến sĩ;

Căn cứ Quyết định số 294/QĐ-ĐHSPKT ngày 25/01/2024 của Hiệu trưởng trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM về việc ban hành Quy chế tuyển sinh và đào tạo trình độ tiến sĩ của trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM;

Theo đề nghị của của NCS, Khoa quản ngành và Trường phòng Đào tạo.

QUYẾT ĐỊNH:

Điều 1. Đổi tên luận án tiến sĩ cho:

Nghiên cứu sinh : **Vương Thị Ngọc Hân**

Ngành : **Cơ kỹ thuật**

Khoá: **2022 – 2025**

Tên luận án mới : **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**

Người HD thứ nhất (HD chính): **PGS. TS. Nguyễn Duy Liêm**

Người HD thứ hai : **TS. Nguyễn Huỳnh Tân Tài**

Thời gian thực hiện : **01/10/2022 đến ngày 30/9/2025**

Điều 2. Giao cho Phòng Đào tạo quản lý, thực hiện theo đúng Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ của Bộ Giáo dục & Đào tạo và Nhà trường đã ban hành.

Điều 3. Trưởng các đơn vị: phòng Đào tạo, Khoa/Viện quản ngành, phòng KHTC và các Ông (Bà) có tên ở Điều 1 chịu trách nhiệm thi hành quyết định này.

Nơi nhận:

- BGH (để chỉ đạo);
- Như điều 3;
- Lưu: VT, ĐT (4b).



Q. HIỆU TRƯỞNG

PGS.TS. Lê Hiếu Giang

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả ghi trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tác giả

Vương Thị Ngọc Hân

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu trong luận án này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) với đề tài mã số 107.01-2021.69. Tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới các Thầy hướng dẫn, **PGS.TS. Nguyễn Duy Liêm** và **TS. Nguyễn Huỳnh Tấn Tài**, đã tận tình hướng dẫn trong suốt quá trình thực hiện luận án. Tác giả chân thành cảm ơn các đồng nghiệp Phòng Thí nghiệm Cầu Đường và Phòng Thí Nghiệm Cơ Học– Trường Đại học Công Nghệ Kỹ Thuật Tp.HCM đã giúp đỡ thực hiện phần nghiên cứu thực nghiệm của luận án. Tác giả xin trân trọng cảm ơn Phòng Đào tạo Sau Đại học, các đồng nghiệp Bộ môn Cơ Học đã động viên tạo điều kiện thuận lợi để nghiên cứu sinh hoàn thành luận án. Tác giả xin chân thành cảm ơn lãnh đạo khoa Xây dựng, Trường Đại học Công Nghệ Kỹ Thuật Tp.HCM, nơi tác giả đang công tác đã tạo điều kiện thuận lợi để tác giả hoàn thành tốt luận án. Cuối cùng tác giả bày tỏ lòng biết ơn đối với người thân trong gia đình đã động viên khích lệ và chia sẻ những khó khăn với tác giả trong suốt thời gian thực hiện luận án.

TP.HCM, ngày tháng năm 2026

Tác giả luận án

Vương Thị Ngọc Hân

MỤC LỤC

Trang tựa	TRANG
LỜI CAM ĐOAN	II
LỜI CẢM ƠN	III
MỤC LỤC.....	IV
DANH SÁCH CÁC BẢNG	IX
DANH SÁCH CÁC HÌNH	X
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT	XIV
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU.....	XV
MỞ ĐẦU.....	1
1. Lý do lựa chọn đề tài	1
2. Mục tiêu và nội dung nghiên cứu	3
2.1. Mục tiêu nghiên cứu.....	3
2.2. Nội dung nghiên cứu	3
3. Nhiệm vụ nghiên cứu.....	3
4. Phạm vi nghiên cứu của luận án	5
5. Hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu.....	5
6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án.....	5
7. Cấu trúc luận án	6
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN.....	9
1.1. Giới thiệu chung	9
1.2. Tổng quan lĩnh vực nghiên cứu	11
1.2.1. Tình hình nghiên cứu và ứng dụng vật liệu HPFRC trên thế giới	12
1.2.2. Tình hình nghiên cứu vật liệu HPFRC tại Việt Nam	17
1.2.3. Mô phỏng ứng xử kết cấu dùng HPFRC.....	20
1.3. Tính cấp thiết của đề tài.....	21
1.4. Các nội dung dự kiến thực hiện trong nghiên cứu của luận án	22
1.4.1. Mục tiêu nghiên cứu.....	22
1.4.2. Nội dung nghiên cứu	22
1.4.3. Nhiệm vụ nghiên cứu	23
1.5. Kết luận chương 1.....	23

CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT	24
2.1. Các yếu tố ảnh hưởng đến tính chất cơ học của HPFRC	24
2.2. Vùng phát triển nứt trong HPFRC.....	25
2.3. Các tính chất cơ học của HPFRC dùng cốt sợi thép gia cường.....	27
2.3.1. Ứng xử nén.....	27
2.3.2. Ứng xử kéo trực tiếp	28
2.3.3. Ứng xử uốn.....	29
2.3.4. Tính chất tăng cứng cơ học và năng lượng hấp thụ	30
2.4. Tính mỏi của vật liệu	36
2.4.1. Khái niệm mỏi.....	36
2.4.2. Sức kháng mỏi của HPFRC dưới tải uốn.....	39
2.4.3. Dự đoán tuổi thọ mỏi	40
2.4.4. Các biểu thức mô tả tuổi thọ mỏi của bê tông thường	41
2.4.4.1. Biểu thức Aas-Jakobsen's S-N	41
2.4.4.2. Biểu thức S-N của Hsu	42
2.4.4.3. Biểu thức S-N của Zhang, Phillips và Wu.....	42
2.4.4.4. Biểu thức Banjara and Ramanjaneyulu	42
2.4.5. Các biểu thức mô tả tuổi thọ mỏi của bê tông cốt sợi (FRC).....	43
2.4.5.1. Biểu thức S-N của Cachim.....	43
2.4.5.2. Biểu thức S-N của Naaman và Hammoud.....	43
2.4.5.3. Biểu thức S-N của Singh and Kaushik	43
2.4.5.4. Biểu thức Banjara and Ramanjaneyulu	43
2.5. Lý thuyết dự báo sức kháng uốn của dầm HPFRC	44
2.5.1. Sức kháng uốn theo Hiệp hội kỹ sư dân dụng Pháp (AFGC\SETRA)	45
2.5.2. Sức kháng uốn theo AASHTO LRFD	47
2.5.3. Sức kháng uốn theo FHWA	48
2.5.4. Sức kháng uốn theo Hiệp hội kỹ sư xây dựng Nhật Bản (JSCE)	49
2.5.5. Chỉ dẫn thiết kế của Australia	51
2.6. Kết luận chương 2.....	53

CHƯƠNG 3: NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ỨNG XỬ UỐN CỦA HPFRC GIA CƯỜNG SỢI THÉP ĐƠN.	54
3.1. Giới thiệu chương	54
3.1.1. Sơ đồ thí nghiệm	54
3.1.2. Chế tạo mẫu thí nghiệm	55
3.1.3. Thiết lập thí nghiệm	58
3.2. Ứng xử uốn của HPFRC dưới tải trọng tĩnh.....	59
3.2.1. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến ứng xử uốn của HPFRC dưới tải trọng tĩnh.....	59
3.2.2. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến năng lượng phá hủy của HPFRC	64
3.2.3. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi thép lên độ dài nứt liên kết	67
3.2.4. Vai trò của phân bố và định hướng sợi trong HPFRC	71
3.3. Ứng xử uốn của HPFRC dưới tải trọng lặp	72
3.3.1. Thiết lập thí nghiệm	72
3.3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến ứng xử uốn của HPFRC dưới tải trọng lặp	74
3.4. Đánh giá độ tin cậy thống kê của số liệu thí nghiệm mỗi	88
3.4.1. Đặc điểm phân tán và tính hợp lý của số liệu thí nghiệm	88
3.4.2. Đánh giá độ tin cậy thông qua mức tải mỗi và trạng thái “chưa phá hoại”	89
3.4.3. Tiêu chí loại bỏ dữ liệu bất thường	89
3.4.3.1. Tiêu chí thống kê	89
3.4.3.2. Tiêu chí cơ học phá hủy.....	89
3.5. Xây dựng phương trình đường cong mỗi của vật liệu HPFRC	90
3.6. Độ nhảy của hàm lượng sợi thép gia cường với độ bền mỗi của HPFRC	93
3.7. Kết luận chương 3.....	95
CHƯƠNG 4: ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA HỆ SỢI THÉP HỖN HỢP ĐẾN CÁC ĐẶC TRƯNG CƠ HỌC CỦA HPFRC	98
4.1. Giới thiệu chương.....	98
4.1.1. Sơ đồ thí nghiệm	99

4.1.2. Chế tạo mẫu thí nghiệm	100
4.1.3. Thiết lập thí nghiệm	103
4.2. Ứng xử uốn của HPFRC gia cường hệ sợi thép hỗn hợp dưới tác dụng của tải trọng tĩnh.....	105
4.2.1. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi.....	105
4.2.2. Ảnh hưởng của vết khía ban đầu.....	111
4.2.3. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến năng lượng hấp thụ	113
4.2.4. Đánh giá khả năng chống phá hủy của HPFRC có khía	115
4.3. Ứng xử uốn của HPFRC gia cường hệ sợi thép hỗn hợp dưới tác dụng của tải trọng lặp	119
4.3.1. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi đến ứng xử uốn của HPFRC dưới tải trọng lặp	119
4.3.2. Xây dựng phương trình đường cong mô của vật liệu HPFRC gia cường hệ sợi thép hỗn hợp	124
4.4. Kết luận chương 4.....	129
CHƯƠNG 5: NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG SỐ ỨNG XỬ KẾT SỬ DỤNG HPFRC	131
5.1. Giới thiệu chương.....	131
5.2. Phân loại dầm	131
5.3. Thực nghiệm dầm HPFRC gia cường cốt thép thanh dưới tải trọng tĩnh	132
5.3.1. Chuẩn bị dầm thí nghiệm	132
5.3.2. Thiết lập thí nghiệm	134
5.3.3. Ứng xử uốn của dầm HPFRC gia cường cốt thép dưới tải trọng tĩnh ...	135
5.4. Mô hình hóa và mô phỏng ứng xử kết cấu dầm HPFRC gia cường cốt thép	139
5.4.1. Mô hình hóa ứng xử vật liệu và các quy luật phá hoại	139
5.4.2. Mô phỏng dầm HPFRC bằng phương pháp PTHH dưới tác dụng tải trọng uốn ba điểm	142
5.4.3. Kết quả mô phỏng số.....	143

5.4.4. Nguyên nhân sai khác giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm trong giai đoạn sau nứt	147
5.4.5. Đề xuất hướng cải thiện mô hình số	148
5.5. Kết luận chương 5.....	148
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	150
I. Những đóng góp mới có ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án	150
II. Hạn chế của nghiên cứu	154
III. Kiến nghị	154
III. Hướng phát triển của đề tài.....	156
DANH MỤC CÔNG BỐ KHOA HỌC	157
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	158

DANH SÁCH CÁC BẢNG

BẢNG	TRANG
Bảng 2.1. Các công trình phổ biến thường xuyên chịu tải mỗi	39
Bảng 3.1. Thành phần cấp phối của HPFRC	57
Bảng 3.2. Thành phần hóa học và tính chất vật lý của tro bay	57
Bảng 3.3. Tính chất cốt sợi được sử dụng trong chế tạo HPFRC	58
Bảng 3.4. Kết quả thí nghiệm uốn dầm HPFRC dưới tải trọng tĩnh	61
Bảng 3.5. Thông số năng lượng phá hủy của vật liệu HPFRC	66
Bảng 3.6. Tương quan giữa độ cứng và chiều dài vết nứt của HPFRC	69
Bảng 3.7. Kết quả thí nghiệm uốn dầm HPFRC dưới tải trọng lặp	74
Bảng 3.8. Phương trình đường cong mỗi của bê tông HPFRC nghiên cứu	92
Bảng 4.1. Thành phần hỗn hợp vữa HPFRC theo khối lượng và cường độ nén trung bình	101
Bảng 4.2. Thông số uốn tại MOR của HPFRC dùng sợi thép hỗn hợp chịu tải trọng tĩnh	106
Bảng 4.3. Hệ số cường độ ứng suất K_{IC} của loạt mẫu HPFRC có khía	116
Bảng 4.4. Kết quả thí nghiệm của bê tông HPFRC gia cường thép sợi hỗn hợp dưới tải trọng lặp	120
Bảng 4.5. Phương trình đường cong mỗi theo biên độ ứng suất	125
Bảng 5. 1. Các thông số cơ bản của cốt thép dọc và cốt thép đai	134
Bảng 5. 2. Các thông đặc trưng cơ tính của dầm HPFRC gia cường cốt thép	137
Bảng 5. 3. Kết quả so sánh giữa mô phỏng và thực nghiệm dầm HPFRC chịu uốn	146

DANH SÁCH CÁC HÌNH

HÌNH	TRANG
Hình 0.1. Sơ đồ tổng quát của luận án	4
Hình 1.1. Các công trình ứng dụng HPFRC trên thế giới	10
Hình 1.2. Ứng dụng HPFRC chế tạo hào kỹ thuật thành mỏng tại Việt Nam	11
Hình 2.1. Các nhóm yếu tố ảnh hưởng đến tính chất cơ học của HPFRC	24
Hình 2.2. Ứng xử phá hủy của vật liệu giòn, vật liệu dẻo và vật liệu gần giòn	26
Hình 2.3. Vùng phát triển nứt FPZ của HPFRC	26
Hình 2.4. Ứng xử nén của các loại bê tông cốt sợi theo tổng hợp của Graybeal [62]	27
Hình 2.5. Ứng xử kéo của các loại bê tông cốt sợi theo tổng hợp của Graybeal [62]	28
Hình 2.6. Đặc tính tăng cứng cơ học của HPFRC dưới tải uốn [55,63]	29
Hình 2.7. Đặc tính tăng cứng cơ học của HPFRC dưới tải kéo trực tiếp	30
Hình 2.8. Dạng điển hình đường cong quan hệ ứng suất kéo-biến dạng của HPFRC [66]	33
Hình 2.9. Đường cong ứng xử uốn của HPFRC với hàm lượng sợi gia cường khác nhau [66]	34
Hình 2.10. Biểu đồ ứng suất và biến dạng của dầm HPFRC chịu uốn theo AASHTO LRFD [67].....	35
Hình 2.11. Đường cong mô đun điển hình.....	37
Hình 2.12. Quan hệ ứng suất biến dạng theo kiến nghị của AFGC/ SETRA [17]...45	45
Hình 2.13. Phân bố ứng suất và biến dạng trên mặt cắt ngang của dầm BTCT theo AASHTO LRFD [66].....	48
Hình 2.14. Quan hệ ứng suất - biến dạng sử dụng cho dự báo sức kháng uốn dầm I - HPFRC theo FHWA [21].....	49
Hình 2.15. Ứng xử UHPC theo mô hình của tác giả Aaleti [88]	49
Hình 2.16. Đường cong ứng suất - biến dạng theo JSCE [19,20].....	50

Hình 2.17. Mô hình ứng xử của HPFRC theo JSCE [20]	51
Hình 2.18. Mô hình ứng xử của HPFRC theo đề xuất của Gowripalan [89]	52
Hình 3.1. Sơ đồ thực hiện thí nghiệm.....	55
Hình 3.2. Thành phần cấp phối và chế tạo mẫu HPFRC	56
Hình 3.3. Ảnh chụp các loại sợi thép sử dụng trong HPFRC nghiên cứu.....	58
Hình 3.4. Thiết lập thí nghiệm uốn 3 điểm dưới tải trọng tĩnh	59
Hình 3.5. Đường cong ứng xử uốn của HPFRC	63
Hình 3.6. Sự phân bố của sợi thép ngắn trong lớp bê tông nền	70
Hình 3.7. Sự phân bố của sợi thép dài có móc hai đầu lớp bê tông nền	70
Hình 3.8. Sơ đồ thực hiện thí nghiệm tải lặp.....	73
Hình 3.9. Thiết lập thí nghiệm uốn ba điểm dưới tải trọng lặp	73
Hình 3.10. Chu kỳ tải trọng lặp điển hình	74
Hình 3.11. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu Không sợi	78
Hình 3.12. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu Sợi to-0.5	79
Hình 3.13. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu Sợi to-1.0	80
Hình 3.14. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu Sợi to-1.5	82
Hình 3.15. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu Sợi nhỏ-0.5	83
Hình 3.16. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu Sợi nhỏ-1.0	84
Hình 3.17. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu Sợi nhỏ-1.5	86
Hình 3.18. So sánh giới hạn độ bền mỏi của các loại bê tông khác nhau	88
Hình 3.19. Đường cong mỏi của HPFRC nghiên cứu theo biên độ ứng suất	92
Hình 3.20. Độ nhảy của hàm lượng sợi thép đến hệ số mỏi của HPFRC	94

Hình 3.21. Mối quan hệ giữa hàm lượng sợi thép gia cường và hệ số môi của HPFRC	94
Hình 4.1. Sơ đồ thực hiện thí nghiệm.....	100
Hình 4.2. Thành phần hỗn hợp vữa HPFRC	101
Hình 4.3. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm uốn HPFRC.....	102
Hình 4.4. Thiết lập thí nghiệm uốn 3 điểm dưới tải trọng tĩnh và lặp.....	103
Hình 4.5. Chu kỳ tải trọng lặp điển hình	104
Hình 4.6. Ứng xử uốn của mẫu L05S15W-S và mẫu L05S15N-S dưới tải trọng tĩnh	108
Hình 4.7. Ứng xử uốn của mẫu L10S10W-S và L10S10N-S dưới tải trọng tĩnh ..	109
Hình 4.8. Ứng xử uốn của mẫu L15S05W-S và L15S05N-S dưới tải trọng tĩnh ..	110
Hình 4.9. So sánh các thông số thể hiện khả năng kháng uốn của HPFRC	112
Hình 4.10. So sánh khả năng hấp thụ năng lượng của các mẫu HPFRC tại MOR	113
Hình 4.11. Tiết diện phá hủy của mẫu HPFRC được nghiên cứu dưới tải trọng tĩnh	115
Hình 4.12. So sánh độ bền phá hủy của loạt mẫu HPFRC gia cường sợi thép hỗn hợp chịu uốn dưới tải trọng tĩnh.....	117
Hình 4.13. Phân bố ứng suất trong loạt mẫu HPFRC có khía.....	118
Hình 4.14. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu L05S15 có khía và không khía dưới tải trọng lặp	121
Hình 4.15. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu L10S10 có khía và không khía dưới tải trọng lặp	122
Hình 4.16. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu L15S05 có khía và không khía dưới tải trọng lặp	123
Hình 4.17. Đường cong môi của HPFRC nghiên cứu theo biên độ ứng suất	126
Hình 4.18. So sánh ứng xử môi của tất cả các loạt mẫu HPFRC gia cường sợi hỗn hợp với hàm lượng khác nhau, có khía và không khía	127
Hình 4.19. Tuổi thọ môi dựa trên cường độ bê tông khác nhau.....	128
Hình 4.20. So sánh các hệ số môi trong loạt mẫu HPFRC	129

Hình 5.1. Chuẩn bị dầm thí nghiệm	133
Hình 5.2. Hai loại sợi dùng trong thí nghiệm.....	133
Hình 5.3. Thiết lập thí nghiệm uốn 3 điểm cho dầm HPFRC	135
Hình 5.4. Đường cong ứng xử uốn của dầm HPFRC gia cường cốt thép.....	135
Hình 5.5. Biến dạng các vết nứt trong dầm HPFRC ở trạng thái tới hạn.....	136
Hình 5.6. Đặc trưng cơ tính của dầm HPFRC.....	138
Hình 5.7. Mô men kháng uốn và chỉ số dẻo của dầm HPFRC.....	139
Hình 5.8. Minh họa ứng xử của bê tông và các quy luật phá hoại	142
Hình 5.9. Mô hình chia lưới	143
Hình 5.10. So sánh sức kháng uốn giữa thực nghiệm và mô phỏng	144
Hình 5.11. Sự thay đổi khả năng kháng mô men khác nhau của dầm HPFRC.....	145
Hình 5.12. So sánh biến dạng vết nứt và cơ chế phá hoại của dầm	146

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

ACI	American Concrete Institute (Viện Bê tông Hoa Kỳ)
AFGC	Association Francaise de Genie Civil (Hiệp hội Kỹ sư xây dựng Pháp)
CSH	Calcium silicate hydrate
ECC	Engineered Cementitious Composite
FRC	Fiber Reinforced Concrete
FHWA	Federal Highway Administration (Cục đường bộ liên bang - Mỹ)
JSCE	Japan Society of Civil Engineers (Hội Kỹ sư xây dựng Nhật Bản)
HPSFRC	Ultra-high-performance Steel-fiber-reinforced concrete
HPFRC	High-performance fiber-reinforced concrete
HPC	High-performance concrete
LH	Long hooked
SFRC	Steel Fiber Reinforced Concrete
SS	Short Smooth
TCXDVN	Tiêu chuẩn xây dựng Việt Nam
TCVN	Tiêu chuẩn Việt Nam
UHPFRC	Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete
UTM	Universal Testing Machine
PTHH	Phần tử hữu hạn

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU

ε	: Ký hiệu cho các giá trị biến dạng
$e_{el}; e_{uel}$	: Biến dạng giới hạn đàn hồi; Biến dạng giới hạn đàn hồi tính toán elim
e_u, e_{lim}	: Biến dạng giới hạn; biến dạng giới hạn tính toán
$\varepsilon_{1\%}$	: Biến dạng 1%;
ε_{max}	: Biến dạng lớn nhất tương ứng với vị trí xuất hiện vết nứt cục bộ
K	: Hệ số xét đến phân tán cốt sợi;
K_t	: Hệ số điều chỉnh kích thước mẫu chịu uốn;
γ_{cf}	: Hệ số an toàn khi tính toán;
f_{ctfk}	: Giá trị đặc trưng của độ bền kéo lớn nhất sau nứt
$f_{ctk, el}$	: Giá trị đặc trưng của độ bền chịu kéo giới hạn đàn hồi
$f_{ctfk, 1\%}$	: Giá trị đặc trưng độ bền chịu kéo sau nứt ứng với biến dạng 1%.
f_x, f_{ct}, f_m	: Ứng suất chịu kéo lớn nhất trung bình sau nứt của UHPFRC
f_{cm}	: Độ bền chịu nén trung bình
f_{cd}	: Độ bền nén thiết kế của UHPFRC
f_{ck}	: Độ bền chịu nén đặc trưng
f'_c	: Độ bền chịu nén của bê tông
f_{ct}	: Độ bền chịu kéo đặc trưng
E	: Mô đun đàn hồi tính toán
E_c	: Mô đun đàn hồi đặc trưng
E_{cm}	: Mô đun đàn hồi trung bình
γ_c	: Hệ số tính toán của bê tông theo AFGC và EN 1992-1.1
w	: Ký hiệu bề rộng vết nứt trong bê tông
L_{eq}	: Chiều dài đặc trưng mối quan hệ biến dạng - bề rộng vết nứt theo JSCE

L_f	: Chiều dài cốt sợi thép
F_{ck}	: Độ bền chịu nén đặc trưng
σ	: Ký hiệu ứng suất kéo trong HPFRC
σ_i	: Ứng suất kéo ở thứ i
χ_i	: Là độ cong của mặt cắt ở bước tải i
C	: Chiều cao trục trung hòa của mặt cắt
α_i	: Là hệ số xác định chiều cao trục trung hòa ở bước thứ i
α_{cc}	: Hệ số có tính đến những ảnh hưởng lâu dài đối với độ bền nén và các tác động tiêu cực do tải trọng tác dụng
M_{cr}	: Mô men gây nứt
M_{MOR}	: Mô men uốn tại điểm bắt đầu nứt
f_{MOR}	: Ứng suất uốn tại điểm bắt đầu nứt
K_{IC}	: Hệ số cường độ ứng suất
$tr(\varepsilon^e)$	: là tổng các phần tử trên đường chéo chính của tensor biến dạng đàn hồi
ε_{eq}^p	: là đại lượng vô hướng biểu diễn độ biến dạng dẻo tương đương
λ	: Hệ số dẻo, biểu thị tốc độ biến dạng dẻo
β	: Tham số xác định ứng suất theo chiều ngược lại
M_y	: Mô men kháng uốn trong dầm tại giới hạn chảy
M_p	: Mô men kháng uốn trong dầm tại giới hạn bền cao nhất
δ_y	: Độ võng chảy
δ_p	: Độ võng tới hạn
P_y	: Tải trọng tại giai đoạn chảy
P_p	: Tải trọng tới hạn

MỞ ĐẦU

1. Lý do lựa chọn đề tài

Trong tổng thể ngành Cơ kỹ thuật, cơ học vật liệu xây dựng có vai trò đặc biệt quan trọng vì trực tiếp gắn với tính an toàn, bền vững và hiệu quả của các công trình xây dựng. Tuy nhiên, thực tế cho thấy các cấu kiện bê tông cốt thép (BTCT) vẫn còn tồn tại nhiều nhược điểm, ảnh hưởng đáng kể đến tuổi thọ làm việc cũng như hiệu quả khai thác của các công trình xây dựng. Đối với kết cấu sử dụng BTCT, 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 [1–3]. Bên cạnh đó, khả năng kháng môi của vật liệu bê tông truyền thống còn hạn chế, đặc biệt dưới tác động tải trọng giao thông lặp lại nhiều chu kỳ, dễ dẫn đến suy giảm cường độ [4–6]. Với tính 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 vào nhiều yếu tố khác nhau như quá trình đúc, đầm và bảo dưỡng...v.v. Vì thế, trong quá trình thi công và khai thác kết cấu khó tránh khỏi sự xuất hiện của các khuyết tật như rỗng, nứt hoặc suy giảm cường độ vật liệu. Bên cạnh đó, công tác kiểm tra, bảo trì và sửa chữa thường đòi hỏi chi phí lớn, trong khi khả năng chịu lực của BTCT còn thấp và 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 cần thiết nhằm khắc phục các nhược điểm trên và nâng cao độ bền vững cho công trình. Các đặc tính cơ học ưu việt của vật liệu HPFRC có thể kể đến như cường độ cao [7–9], khả năng chịu kéo lớn [10,11], kháng nứt vượt trội [12,13] và khả năng hấp thụ năng lượng lớn [14,15]. Nhờ những ưu điểm này, HPFRC đã và đang được ứng dụng rộng rãi trong nhiều công trình hạ tầng đòi hỏi độ bền chắc cao, giảm thiểu chi phí duy tu - bảo

đường trong nước và trên thế giới, điển hình là các cây cầu lớn ở Nhật, Hàn Quốc và Thụy Sĩ, các hạng mục gia cường kết cấu tại Mỹ, Trung Quốc, hay các công trình ngầm và sàn nhà cao tầng ở Châu Âu. Bên cạnh việc ứng dụng trong các công trình xây dựng mới, giải pháp sử dụng HPFRC trong sửa chữa và gia cường các cấu kiện bê tông cốt thép (BTCT) hiện hữu được đánh giá là có khả năng mang lại hiệu quả vượt trội so với các phương pháp truyền thống. Một số công trình ở Việt Nam sử dụng HPFRC gần đây có thể kể đến cầu Thăng Long ở Hà Nội (HPFRC sử dụng cho kết cấu bản mặt cầu), cầu Extradosed - dự án tuyến Mê tro số 1 ở Tp. Hồ Chí Minh (HPFRC sử dụng cho kết cấu tháp dây văng).

Mặc dù hiện nay đã có nhiều nghiên cứu tập trung vào vật liệu HPFRC, song các nghiên cứu đánh giá ứng xử của vật liệu này dưới tác động của tải trọng trùng phức vẫn còn tương đối hạn chế. Những 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. Ngoài ra, ảnh hưởng của cả tải trọng tĩnh và tải trọng lặp đến kháng uốn của HPFRC sử dụng mẫu nguyên vẹn hay mẫu có sẵn khuyết tật cần được tìm hiểu sâu thêm. Các vấn đề nêu trên cho thấy sự chưa hoàn thiện trong các hướng dẫn thiết kế hiện hành đối với kết cấu sử dụng HPFRC, do đó cần có thêm các nghiên cứu chuyên sâu để bổ sung và làm sáng tỏ.

Luận án này tập trung 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. Kết quả nghiên cứu luận án được kỳ vọng cung cấp thông tin hữu ích hỗ trợ kỹ sư thiết kế lựa chọn cấu hình vật liệu HPFRC tối ưu, đưa ra giải pháp giảm nứt, duy trì độ cứng và khả năng chịu lực của kết cấu trong quá trình xây dựng - khai thác. Ngoài ra, việc sử dụng HPFRC góp phần nâng cao an toàn sử dụng, kéo dài vòng đời công trình và giảm thiểu chi phí bảo trì, sửa chữa trong khai thác. Những kết quả thu được là cơ sở quan trọng để hoàn thiện tiêu chuẩn thiết kế về HPFRC với các khuyến nghị phù hợp, độ tin cậy cao khi ứng dụng HPFRC trong công trình thực tế.

2. Mục tiêu và nội dung nghiên cứu

2.1. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu nghiên cứu của luận án là làm sáng tỏ ứng xử uốn tĩnh và uốn lặp của HPFRC với hàm lượng và loại sợi khác nhau, xây dựng đường cong mỏi của HPFRC thông qua thí nghiệm và phân tích lý thuyết. Kết quả nghiên cứu làm cơ sở ứng dụng vật liệu này cho kết cấu chịu tải trọng trùng phục một cách hiệu quả, độ tin cậy cao.

2.2. Nội dung nghiên cứu

Lựa chọn vật liệu, thành phần bê tông tính năng cao gia cường cốt sợi (HPFRC) từ các vật liệu đã được thương mại hóa rộng rãi tại Việt Nam.

Thí nghiệm và phân tích ứng xử uốn của dầm HPFRC với hàm lượng cốt sợi gia cường thay đổi dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và tải trọng lặp.

Thí nghiệm và phân tích ứng xử uốn của dầm HPFRC có vết cắt sẵn (khía) và không có vết cắt sẵn khi gia cường hỗn hợp sợi hỗn hợp dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và tải trọng lặp.

Thí nghiệm và mô phỏng số dầm HPFRC nhằm đánh giá khả năng ứng dụng vật liệu HPFRC cho kết cấu thực tế.

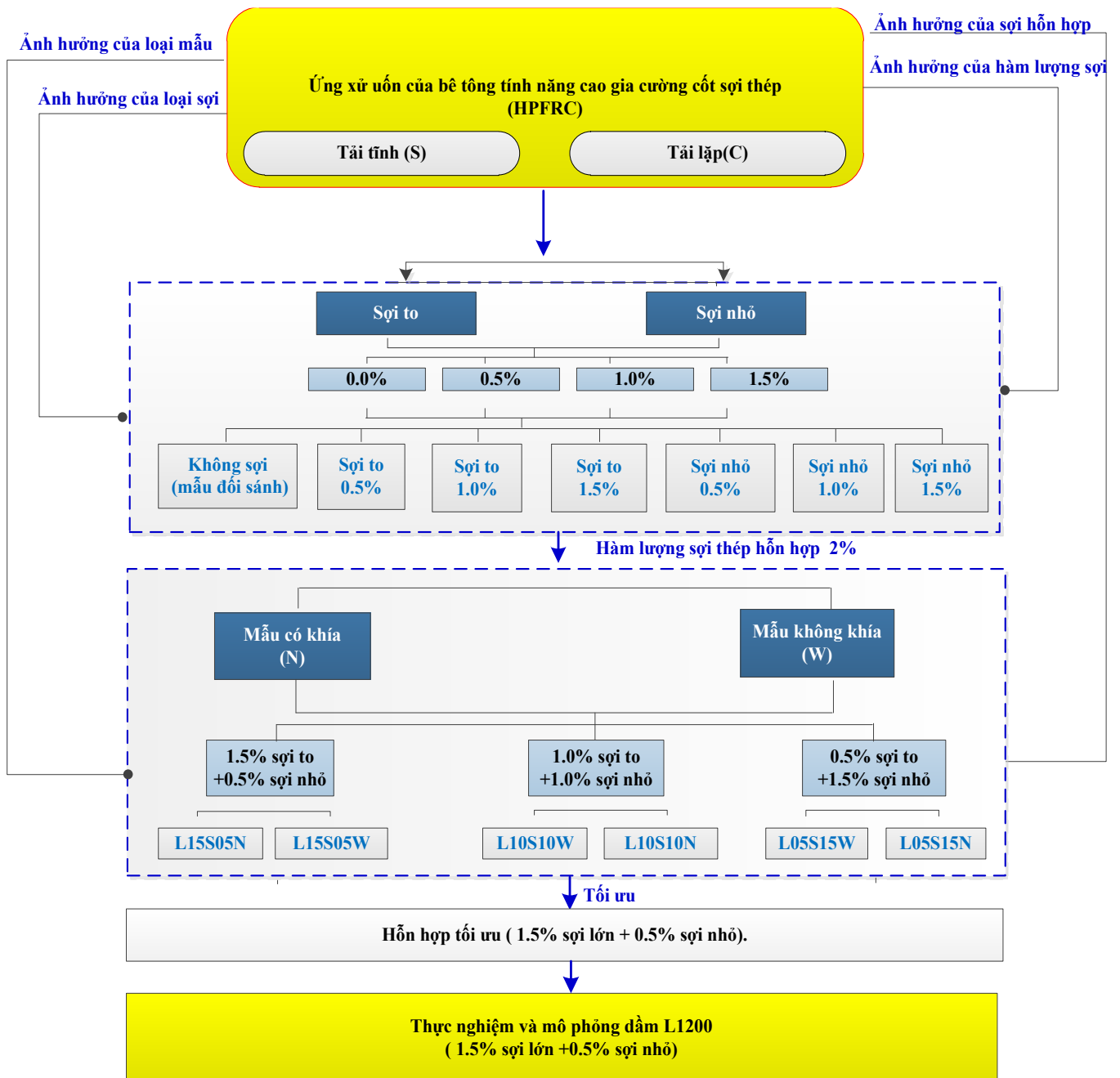
3. Nhiệm vụ nghiên cứu

Hình 0.1 thể hiện sơ đồ tổng quát của luận án. Thông qua chế tạo, thí nghiệm và phân tích, nghiên cứu tập trung vào các nhiệm vụ chính như sau:

1) Đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng và loại sợi gia cường khác nhau đến ứng xử uốn của HPFRC dưới tải trọng tĩnh và tải trọng lặp trên mẫu nguyên vẹn. Trong đó, trọng tâm nghiên cứu là xây dựng đường cong quan hệ giữa tải tác dụng và số chu kỳ lặp ($S - N$) của HPFRC.

2) Đánh giá ảnh hưởng của hỗn hợp sợi gia cường đến ứng xử uốn của HPFRC dưới tải trọng tĩnh và tải trọng lặp. Ngoài làm rõ hiệu ứng tương hỗ của các loại sợi trong hỗn hợp, các thí nghiệm thực hiện trên mẫu có khía (notched) và không có khía (unnotched) làm rõ khác biệt trong sự hình thành và phát triển vết nứt, cơ chế phá hoại và độ bền uốn của HPFRC.

3) Đánh giá các thông số cơ học của dầm HPFRC thông qua thí nghiệm và mô phỏng, từ đó đánh giá độ lệch trong dự báo khả năng kháng uốn cũng như đề xuất khuyến nghị khi thiết kế dầm HPFRC.



Hình 0.1. Sơ đồ tổng quát của luận án

4. Phạm vi nghiên cứu của luận án

- Đối tượng nghiên cứu chính là vật liệu HPFRC;
- Tải trọng nghiên cứu là tải uốn tĩnh và lặp;
- Sợi gia cường sử dụng trong HPFRC là hai loại sợi thép được thương mại hoá và phổ biến tại Việt Nam;
- Khối lượng nghiên cứu phần lớn tập trung vào ứng xử vật liệu HPFRC, phần còn lại xem xét ứng xử của dầm HPFRC.

5. Hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

- Tổng quan và phân tích tài liệu: Thu thập, tổng hợp và phân tích các công trình nghiên cứu về ứng xử cơ học của bê tông tính năng cao đã được thực hiện ở cả Việt Nam và trên thế giới.
- Nghiên cứu thực nghiệm: Tiến hành các thí nghiệm trực tiếp trên mẫu thí nghiệm trong điều kiện phòng thí nghiệm, tuân thủ các tiêu chuẩn hiện hành. Dữ liệu thu được được xử lý bằng các phương pháp thống kê và quy hoạch thực nghiệm để đảm bảo độ tin cậy.
- Phân tích so sánh: So sánh kết quả thực nghiệm của nghiên cứu này với các kết quả đã công bố từ các nghiên cứu trước đây, hoặc với kết quả từ các mô hình lý thuyết/mô phỏng số. Phương pháp này giúp đánh giá mức độ tin cậy, tính phù hợp và định vị tương đối kết quả nghiên cứu.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

Ý nghĩa khoa học

- Làm sáng tỏ ảnh hưởng của hàm lượng và loại sợi gia cường khác nhau đến ứng xử uốn của HPFRC dưới tải trọng tĩnh và tải trọng lặp trên mẫu nguyên vẹn với trọng tâm nghiên cứu là xây dựng đường cong quan hệ giữa tải trọng và số chu kỳ lặp của HPFRC.
- Làm sáng tỏ ảnh hưởng của việc sử dụng hỗn hợp sợi gia cường với mức độ kết hợp khác nhau đến ứng xử uốn của HPFRC dưới tải trọng tĩnh và tải trọng lặp; các thí nghiệm thực hiện trên mẫu có khía và không có khía làm rõ khác

biệt trong sự hình thành và phát triển vết nứt, cơ chế phá hoại và độ bền uốn của HPFRC.

- Làm sáng tỏ ứng xử của dầm HPFRC thông qua thí nghiệm và mô phỏng, từ đó đánh giá độ lệch trong dự báo khả năng kháng uốn cũng như đề xuất khuyến nghị khi thiết kế dầm HPFRC.

Ý nghĩa thực tiễn

- Những kết quả thu được trong nghiên cứu cung cấp thông tin hữu ích trong việc sử dụng HPFRC cho kết cấu dạng dầm để cải thiện các tính năng của bê tông, đặc biệt là khả năng chống thấm, chống nứt, tăng cường độ bền và khả năng chịu tải.
- Làm cơ sở cho việc nghiên cứu và ứng dụng các kết cấu HPFRC trong các công trình xây dựng cơ bản ở Việt Nam: xây dựng các tiêu chuẩn và quy phạm mới cho việc sản xuất, kiểm tra, và ứng dụng HPFRC trong các công trình xây dựng, đảm bảo tính nhất quán và an toàn.

7. Cấu trúc luận án

Luận án ***“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”*** dự kiến bao gồm phần Mở đầu và 5 chương chính và phần Kết luận. Nội dung của mỗi chương được tóm tắt như sau:

Mở đầu: Tác giả trình bày lý do lựa chọn đề tài, mục đích nghiên cứu, phạm vi nghiên cứu, hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu, ý nghĩa khoa học của đề tài nghiên cứu

Chương 1: Tổng quan

Trong chương này trình bày các nội dung như sau:

- Nghiên cứu tổng quát về tình hình sử dụng vật liệu HPFRC ở Việt Nam và trên thế giới.
- Phân tích, đánh giá một số kết quả ứng dụng vật liệu HPFRC cho các kết cấu công trình đặc biệt.
- Xác định các vấn đề cần tập trung nghiên cứu trong Luận án.

Chương 2: Cơ sở lý thuyết

Nội dung chương này như sau:

- Tìm hiểu và tổng hợp các tính năng cơ-lý và các ứng xử cơ học của vật liệu HPFRC dưới tải tĩnh và tải lặp đã được công bố.
- Trình bày thành phần cấu tạo và các thông số ảnh hưởng đến đặc tính của vật liệu HPFRC.
- Các phương trình đánh giá ứng xử môi và xác định tuổi thọ môi của dầm HPFRC chịu uốn dưới tải trọng tĩnh và tải trọng lặp.

Chương 3: Nghiên cứu thực nghiệm ứng xử uốn của HPFRC gia cường sợi thép đơn.

Nội dung chương này như sau:

- Thiết kế cấp phối, chế tạo các mẫu thí nghiệm có sử dụng cốt sợi gia cường (hỗn hợp cốt liệu, thành phần sợi gia cường) cho HPFRC từ các vật liệu được thương mại hóa rộng rãi tại Việt Nam;
- Thiết lập các thí nghiệm và trình tự gia tải để xác định ứng xử uốn của mẫu HPFRC;
- Tìm hiểu cơ chế phá hoại của HPFRC gia cường cốt sợi thép dưới tải tĩnh và lặp;
- Thí nghiệm và phân tích các kết quả thí nghiệm;
- Đánh giá và thảo luận kết quả thí nghiệm.

Chương 4: Đánh giá ảnh hưởng của hệ sợi thép hỗn hợp đến các đặc trưng cơ học của HPFRC

Nội dung chương này như sau:

- Thiết kế cấp phối, chế tạo các mẫu thí nghiệm có sử dụng cốt sợi gia cường (hỗn hợp cốt liệu, hỗn hợp sợi hỗn hợp) cho HPFRC từ các vật liệu được thương mại hóa rộng rãi tại Việt Nam;
- Thiết lập các thí nghiệm và trình tự gia tải để xác định ứng xử uốn của mẫu HPFRC dùng sợi hỗn hợp;
- Tìm hiểu cơ chế tương hỗ trong gia cường HPFRC của cốt sợi hỗn hợp dưới tải tĩnh và lặp;

- Thí nghiệm và phân tích các kết quả thí nghiệm;
- Đánh giá và thảo luận kết quả thí nghiệm.

Chương 5: Nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số ứng xử kết sử dụng HPFRC

Nội dung chương này như sau:

- Thiết kế dầm sử dụng HPFRC với chiều dài nhịp $L=1200$ mm;
- Thiết lập các thí nghiệm và trình tự gia tải để xác định ứng xử dầm sử dụng HPFRC;
- Thí nghiệm và phân tích các kết quả thí nghiệm;
- Tiến hành mô phỏng dầm sử dụng HPFRC sau đó so sánh với kết quả thí nghiệm;
- Đánh giá và thảo luận kết quả thí nghiệm/mô phỏng.

Kết luận và kiến nghị

- Những đóng góp mới của luận án;
- Những kiến nghị trong việc sử dụng HPFRC.

Chương 1:

TỔNG QUAN

1.1. Giới thiệu chung

Cơ học vật liệu là lĩnh vực nền tảng của cơ học kỹ thuật, tập trung nghiên cứu ứng xử cơ học của vật liệu dưới tác dụng của tải trọng và các điều kiện làm việc khác nhau. Trong lĩnh vực này, cơ học phá hủy và cơ học mỏi giữ vai trò then chốt trong việc mô tả các cơ chế khởi phát, lan truyền vết nứt cũng như quá trình tích lũy hư hỏng của vật liệu dưới tác dụng của tải trọng lặp và tải trọng biến đổi theo thời gian. Các lý thuyết này cung cấp cơ sở khoa học quan trọng để đánh giá các đặc trưng cơ học chủ yếu của vật liệu như cường độ, độ dẻo, khả năng tiêu tán năng lượng và tuổi thọ làm việc. Điều này đặc biệt có ý nghĩa đối với các vật liệu tiên tiến như bê tông tính năng cao gia cường cốt sợi (HPFRC), trong đó ứng xử sau nứt và cơ chế bắc cầu vết nứt của cốt sợi đóng vai trò chi phối trạng thái phá hoại và khả năng chịu tải của vật liệu. Do đó, cơ học vật liệu được xem là cầu nối giữa khoa học vật liệu và phân tích kết cấu, góp phần bảo đảm việc thiết kế, đánh giá và khai thác các kết cấu sử dụng HPFRC một cách an toàn, hiệu quả và bền vững dưới tác dụng của tải trọng tĩnh cũng như tải trọng lặp.

Trên thế giới việc nghiên cứu HPFRC đã có nhiều đánh giá, tuy nhiên vẫn chưa có tiêu chuẩn hoàn thiện về thiết kế cũng như nghiệm thu cụ thể cho cấu kiện HPFRC. Điều này gây khó khăn trong việc áp dụng HPFRC vào các công trình thực tế, đặc biệt các công trình sử dụng vốn ngân sách vốn đòi hỏi tiêu chuẩn thiết kế và nghiệm thu rõ ràng. Hiện nay, nhiều quốc gia như Anh, Pháp, Mỹ, Nhật Bản và Úc đã xây dựng các hướng dẫn cũng như dự thảo tiêu chuẩn thiết kế cho kết cấu sử dụng vật liệu HPFRC [16–21]. Các tổ chức nghiên cứu tham gia soạn thảo bao gồm Viện Bê tông Mỹ (ACI), Viện Bê tông Anh, Hiệp hội Kỹ sư Xây dựng Nhật Bản (JSCE) và Viện Kỹ thuật Xây dựng Quốc gia Hàn Quốc (KICT). Trong số đó, tài liệu hướng dẫn đầu tiên được ban hành bởi Hiệp hội Kỹ sư Dân dụng Pháp (AFGC/SETRA) [17], sau đó là các tài liệu của JSCE [19,20], Cục Quản lý Đường cao tốc Liên bang

Hoa Kỳ (FHWA) [21], cùng nghiên cứu của Camacho và các cộng sự [22]. Điểm chung của các tài liệu này là đều xét đến khả năng chịu kéo sau nứt của HPFRC – một đặc trưng quan trọng thường bị bỏ qua trong các lý thuyết thiết kế bê tông truyền thống. Sự bổ sung này phản ánh sự khác biệt cơ bản trong cơ chế làm việc giữa HPFRC và bê tông thường, đặc biệt ở vùng chịu kéo của dầm. Các công trình điển hình trên thế giới sử dụng vật liệu HPFRC có thể kể đến như là cầu Wild (Völkermarkt, Áo) - Hình 1.1a, cầu Log Čezsoški (Soča river, Bắc Slovenia) - Hình 1.1b, cầu Gärtnerplatz (Kassel, Đức), mái che nhà ga xe lửa tại Calgary (Alberta, Canada) - Hình 1.1c, cầu đi bộ (Seoul, Hàn quốc) - Hình 1.1d và một số công trình phục vụ quân sự.



a)



b)



c)



d)

Hình 1.1. Các công trình ứng dụng HPFRC trên thế giới [16-21]

Tại Việt Nam, HPFRC ngày càng được chú trọng và có nhiều dự án ứng dụng vào các kết cấu công trình như: cầu vượt tuyến Mê tro số 1 - Bến Thành – Suối Tiên (sử dụng cho kết cấu trụ tháp neo dây văng), kè chắn sóng và hồ chứa nước tại tỉnh Thái Bình, dự án Bệnh viện Hồng Đức cơ sở II - Tp. Hồ Chí Minh (hạng mục kè bờ

sông Sài Gòn. Công ty Thoát nước và phát triển đô thị tỉnh BR-VT (BUSADCO) dùng bê tông cốt sợi chế tạo hào kỹ thuật thành mông với các vách ngăn để tạo ra các ô rãnh để bố trí lắp đặt phù hợp các hệ thống hạ tầng kỹ thuật ngầm (Hình 1.2). Sản phẩm đã được ứng dụng rộng rãi tại các địa phương trong cả nước như: Bà Rịa - Vũng Tàu, Tp. Hồ Chí Minh, Đồng Nai, Quảng Ngãi, Hà Nội, Nam Định, Thái Bình, Hưng Yên, Cà Mau, Bến Tre...

Những ứng dụng rộng rãi HPFRC trên thế giới và tại Việt Nam đã phần nào minh chứng lợi ích lâu dài của loại vật liệu này. Tuy nhiên, các nghiên cứu theo hướng xây dựng mô hình vật liệu phục vụ tính toán, phân tích kết cấu còn hạn chế và chưa hoàn chỉnh, cần có những nghiên cứu chuyên sâu để có thể đưa HPFRC ứng dụng một cách phổ biến, hiệu quả.



Hình 1.2. Ứng dụng HPFRC chế tạo hào kỹ thuật thành mông tại Việt Nam [46]

1.2. Tổng quan lĩnh vực nghiên cứu

Trong hai thập kỷ qua, HPFRC đã thu hút sự quan tâm rộng rãi trong nghiên cứu và ứng dụng thực tiễn nhờ các đặc tính vượt trội, đặc biệt là cường độ chịu nén cao và khả năng chịu kéo ưu việt [23,24]. Khác với bê tông truyền thống, HPFRC sử dụng các loại cốt sợi bằng kim loại hoặc phi kim với hàm lượng thay đổi nhằm hạn chế sự phát triển vết nứt, tăng cường năng lượng hấp thụ và duy trì khả năng chịu lực

sau khi nứt [25]. Nhiều công trình nghiên cứu đã chỉ ra rằng hàm lượng và sự phối hợp các loại sợi có ảnh hưởng trực tiếp đến ứng xử cơ học của HPFRC [23,24]. Dưới tác dụng của tải trọng tĩnh, sự gia tăng hàm lượng sợi giúp nâng cao đáng kể độ bền uốn, khả năng hấp thụ năng lượng cũng như chỉ số độ dẻo dai của vật liệu. Tuy nhiên, khi chịu tải trọng lặp, vốn đặc trưng cho điều kiện khai thác thực tế của các công trình hạ tầng giao thông, tải trọng thay đổi theo chu kỳ gây ra quá trình suy giảm khả năng chịu lực, dẫn đến hư hỏng ngay cả khi kết cấu chịu tải trọng thấp hơn tải trọng tĩnh tối đa [26]. Đặc biệt, tải trọng lặp là nguyên nhân gây ra sự phát triển các vết nứt nhỏ trong lớp bê tông nền, dẫn đến sự thay đổi các thông số cơ học quan trọng [26,27]. Vật liệu HPFRC, với tỷ lệ sợi tối ưu thể hiện khả năng kháng mỏi cao hơn, hạn chế sự lan truyền vết nứt và làm chậm quá trình suy giảm khả năng chịu lực theo chu kỳ.

Các nghiên cứu gần đây cũng tập trung làm rõ cơ chế vi mô liên quan đến sự phân bố, định hướng và tương tác của sợi trong hỗn hợp bê tông, cho thấy vai trò then chốt của cốt sợi trong việc kéo dài tuổi thọ làm việc của bê tông và giảm nguy cơ phá hoại giòn [7,28–36]. Nhờ đó, HPFRC được xem là một trong những vật liệu tiềm năng có thể cải thiện tuổi thọ và độ tin cậy của các công trình hạ tầng giao thông chịu tác động phức tạp của tải trọng tĩnh và tải trọng lặp.

1.2.1. Tình hình nghiên cứu và ứng dụng vật liệu HPFRC trên thế giới

Các nghiên cứu quốc tế trong những năm vừa qua đã làm rõ đặc trưng cơ học vượt trội của bê tông tính năng cao gia cường cốt sợi (HPFRC), đặc biệt là vai trò của cốt sợi trong việc cải thiện khả năng chịu lực, độ bền và cơ chế phát triển vết nứt so với bê tông truyền thống. Các tính chất cơ học đặc biệt này đã được ứng dụng trong nhiều công trình và đã có các tiêu chuẩn ứng dụng như của Hội bê tông ACI - Mỹ, Hội bê tông Anh, Hội kỹ sư Nhật Bản JSCE, Viện kỹ thuật xây dựng quốc gia Hàn Quốc KICT [16,18–21].

Những nghiên cứu nền tảng của Naaman và các cộng sự [25,37] đã khẳng định HPFRC vượt trội rõ rệt về cường độ chịu kéo và chịu nén, nhờ cơ chế chằng vết nứt của cốt sợi. Không chỉ hàm lượng sợi, mà hình dạng, kích thước và tỷ lệ hình học của sợi được chứng minh là các thông số chi phối trực tiếp đến quá trình khởi phát vết

nứt, sự phân bố vết nứt mịn và hiện tượng tăng cứng sau nứt. Các công bố này đặt nền tảng cho việc xem HPFRC như một vật liệu bán dẻo có khả năng tiêu tán năng lượng cao, thay vì chỉ là bê tông cường độ cao thông thường.

Tiếp cận từ góc độ cấp phối vật liệu, Park và các cộng sự [7] đã thực hiện một nghiên cứu hệ thống trên 18 cấp phối HPFRC khác nhau. Kết quả cho thấy thành phần hỗn hợp – đặc biệt là tỷ lệ chất kết dính, cốt liệu mịn và hàm lượng sợi – có ảnh hưởng quyết định đến cường độ chịu nén của HPFRC. Với việc sử dụng sợi thép đường kính 0,2 mm, chiều dài 13 mm và hàm lượng 2% thể tích, các tác giả đã đề xuất một tỷ lệ cấp phối tối ưu, góp phần chuẩn hóa thiết kế hỗn hợp HPFRC cho các ứng dụng kỹ thuật.

Ở mức độ ứng xử cơ học dưới trạng thái ứng suất phức tạp, Sirijaroonchai và các cộng sự [30] đã mở rộng nghiên cứu HPFRC dưới tải nén đơn trục, hai trục và ba trục. Kết quả cho thấy hiệu quả gia cường của sợi phụ thuộc mạnh vào kiểu tải trọng và loại sợi. Đáng chú ý, sợi ngắn (polyethylene) cho thấy khả năng cải thiện đáng kể cường độ và độ dẻo dưới nén đơn trục và hai trục, trong khi tác động này suy giảm dưới trạng thái nén ba trục. Phát hiện này có ý nghĩa quan trọng trong việc hiệu chỉnh mô hình vật liệu cho HPFRC khi áp dụng trong mô phỏng số và thiết kế kết cấu chịu ứng suất đa trục.

Hướng nghiên cứu nâng cao cường độ của HPFRC được thể hiện rõ trong công trình của Fijestol và các cộng sự [38]. Với 31 cấp phối khác nhau, kết hợp cốt liệu siêu mịn, tăng hàm lượng silica fume (20–30% khối lượng xi măng) và hàm lượng sợi thép 2% thể tích, các mẫu HPFRC đạt cường độ nén 101–146 MPa ở điều kiện không bảo dưỡng nhiệt, và vượt 150 MPa khi có bảo dưỡng nhiệt. Kết quả này cho thấy cấu trúc vi mô đặc chắc đóng vai trò then chốt trong việc nâng cao cường độ nén, đồng thời mở ra tiềm năng ứng dụng HPFRC trong các kết cấu chịu tải trọng lớn và yêu cầu độ bền lâu cao.

Bên cạnh các chỉ tiêu chịu tải trọng tĩnh, Yu và các cộng sự [33,34] đã tập trung nghiên cứu khả năng kháng va đập của HPFRC khi sử dụng hỗn hợp sợi có chiều dài khác nhau. Kết quả chỉ ra rằng, với cùng hàm lượng sợi 2% thể tích, việc tăng tỷ lệ

sợi ngắn giúp cải thiện đáng kể khả năng hấp thụ năng lượng va chạm. Điều này cho thấy cơ chế không chế vết nứt vi mô và phân tán năng lượng đóng vai trò chủ đạo trong ứng xử động của HPFRC.

Gần đây, các nghiên cứu của Kim và các cộng sự [35] đã mở rộng hiểu biết về độ bền lâu và khả năng tự phục hồi của HPFRC. Khi sử dụng sợi thép độ bền cao, HPFRC thể hiện khả năng tự hàn vết nứt với bề rộng nhỏ hơn $20\text{ }\mu\text{m}$, nhờ sự kết hợp giữa vi cấu trúc đặc chắc và quá trình tái kết tinh các sản phẩm thủy hóa. Kết quả này củng cố vai trò của HPFRC như một vật liệu thông minh, có tiềm năng giảm chi phí bảo trì trong suốt vòng đời công trình.

Hầu hết các nghiên cứu hiện hữu 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 tải trọng lặp.

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. Đơn cử như các kết cấu cầu, hầm 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. Do đó, trong quá trình thiết kế kết cấu, khả năng kháng mỏi của bê tông tính năng cao gia cường cốt sợi (HPFRC) dưới tải trọng uốn lặp lại nhiều chu kỳ, là một trong những đặc trưng cơ học quan trọng quyết định tính bền lâu của kết cấu chịu tải trọng thay đổi theo thời gian. Các nghiên cứu quốc tế gần đây cho thấy ứng xử mỏi của HPFRC khác biệt bản chất so với bê tông thường, do sự tham gia tích cực của cốt sợi trong quá trình phát triển và lan truyền vết nứt. Đây là yếu tố quan trọng cần được đánh giá và xem xét cẩn thận. 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 xảy ra với số chu kỳ đủ tác động lên kết cấu.

Ở cấp độ phá hủy uốn có vết nứt định hướng, Germano và các cộng sự [39] đã nghiên cứu ứng xử mỏi của HPFRC sử dụng sợi thép trơn với hàm lượng 0,5% và 1% thể tích, thông qua thí nghiệm uốn ba điểm trên mẫu có khía sẵn vết nứt. Các kết

quả được phân tích dựa trên đường cong mỏi, sự tiến triển độ mở rộng vết nứt, độ dẻo và khả năng hấp thụ năng lượng. Đáng chú ý, tuổi thọ mỏi cao nhất đạt được ở hàm lượng sợi 0,5%, trong khi việc tăng hàm lượng sợi lên 1% không mang lại hiệu quả tương ứng. Điều này cho thấy tồn tại hàm lượng sợi tối ưu cho kháng mỏi, vượt quá ngưỡng này có thể làm giảm tính đồng nhất của vật liệu, ảnh hưởng đến cơ chế truyền lực tại mặt tiếp xúc sợi–nền và làm gia tăng tập trung ứng suất cục bộ tại đầu vết nứt.

Tiếp cận vấn đề từ góc độ cơ học phá hủy, Carlesso và các cộng sự [40] đã đề xuất sử dụng quan hệ ứng suất – CMOD (Crack Mouth Open Displacement) thu được từ thí nghiệm uốn ba điểm dưới tải trọng trùng phục để đánh giá và dự đoán tuổi thọ mỏi của HPFRC. Kết quả cho thấy sự suy giảm dần độ dốc và diện tích bao bởi đường cong ứng suất–CMOD phản ánh trực tiếp mức độ suy yếu của cơ chế chằng vết nứt trong quá trình mỏi. Bên cạnh đó, việc áp dụng phương pháp xác suất thống kê cho phép mô tả sự phân tán của độ bền mỏi, vốn là đặc trưng điển hình của vật liệu composite nền xi măng, đặc biệt khi có sự tham gia của cốt sợi phân bố ngẫu nhiên.

Nghiên cứu của Medeiros và các cộng sự [41] đã cung cấp một cái nhìn toàn diện về ảnh hưởng của tần số tải trọng lặp đến ứng xử mỏi của các loại bê tông khác nhau, bao gồm bê tông thường và HPFRC gia cường bằng sợi thép và polypropylene. Kết quả cho thấy, đối với bê tông thường, việc giảm tần số gia tải dẫn đến sự suy giảm đáng kể tuổi thọ mỏi, phản ánh sự phát triển nhanh hơn của hư hỏng vi mô dưới tác dụng của tải trọng duy trì lâu hơn trong mỗi chu kỳ. Ngược lại, HPFRC thể hiện khả năng duy trì và thậm chí cải thiện tuổi thọ mỏi ở tần số thấp, nhờ cơ chế chằng vết nứt và phân tán ứng suất của cốt sợi. Phát hiện này cho thấy HPFRC ít nhạy cảm hơn với hiệu ứng thời gian–tải trọng, một ưu thế rõ rệt khi xét đến các kết cấu chịu tải trọng uốn lặp có chu kỳ dài như cầu và sàn công nghiệp.

Tổng hợp các nghiên cứu hiện có cho thấy HPFRC sở hữu khả năng kháng mỏi vượt trội so với bê tông thường nhờ cơ chế chằng vết nứt và phân tán hư hỏng của cốt sợi. Tuy nhiên, phần lớn các công trình quốc tế chỉ mới tập trung vào đánh giá tuổi thọ mỏi thông qua thí nghiệm, hoặc phân tích các chỉ tiêu tổng hợp như đường

cong S–N, quan hệ ứng suất–CMOD và số chu kỳ phá hủy. Trong khi đó, ứng xử uốn mỗi của HPFRC trong trạng thái có vết nứt sẵn, vốn phản ánh sát thực tế làm việc của kết cấu sau giai đoạn chế tạo và khai thác ban đầu, vẫn chưa được nghiên cứu một cách hệ thống và định lượng.

Đặc biệt, cơ chế phát triển hư hỏng mỗi tại vùng đầu vết nứt và sự suy giảm dần hiệu quả chằng vết nứt của cốt sợi dưới tải trọng uốn lặp chưa được mô tả đầy đủ trong các mô hình vật liệu hiện hành. Các mô hình môi truyền thống cho bê tông thường chưa phản ánh được tính bán dẻo, vùng phát triển nứt (FPZ) và sự tương tác sợi–nền đặc trưng của HPFRC, dẫn đến hạn chế trong việc dự đoán chính xác độ cứng, độ mở vết nứt và tuổi thọ mỗi của kết cấu có vết nứt ban đầu.

Mặc dù các nghiên cứu quốc tế đã đạt được nhiều kết quả quan trọng trong việc làm rõ đặc trưng cơ học, cấu trúc vi mô và khả năng chịu tải tĩnh và động của HPFRC, có thể nhận thấy rằng phần lớn các công trình nghiên cứu hiện có tập trung vào hành vi vật liệu ở cấp độ mẫu thử nguyên vẹn, trong khi ứng xử của HPFRC ở trạng thái đã có vết nứt ban đầu vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Trên thực tế, trong điều kiện khai thác, các kết cấu HPFRC thường đã tồn tại các vết nứt mịn do co ngót, từ biến, tải trọng ban đầu hoặc tác động môi trường trước khi chịu tải lặp, đặc biệt là dưới tác dụng của uốn mỗi.

Các nghiên cứu về mỗi của HPFRC chủ yếu xem xét tuổi thọ mỗi tổng thể hoặc mối quan hệ $S - N$ trên các mẫu không có vết nứt sẵn, trong khi cơ chế tiến triển mỗi từ vết nứt ban đầu, bao gồm sự mở rộng vết nứt, suy giảm khả năng bắc cầu của cốt sợi và sự phân bố lại ứng suất trong vùng quá trình phá hủy (FPZ), vẫn chưa được làm rõ một cách hệ thống. Đặc biệt, ảnh hưởng tương tác giữa độ mở vết nứt ban đầu, hàm lượng – hình học sợi và mức tải uốn lặp đến tuổi thọ mỗi và độ cứng suy giảm của kết cấu HPFRC còn thiếu các mô hình mô tả đáng tin cậy.

Bên cạnh đó, các mô hình số hiện có cho HPFRC thường được hiệu chỉnh từ thí nghiệm kéo hoặc nén đơn trục, và chưa được kiểm chứng đầy đủ cho bài toán uốn mỗi có vết nứt sẵn, nơi mà cơ chế phá hoại chịu chi phối đồng thời bởi tích lũy hư hỏng mỗi, mềm hóa sau nứt và tái phân bố ứng suất qua cốt sợi. Việc thiếu các nghiên

cứu kết hợp giữa thí nghiệm uốn mỏi và mô phỏng số với mô hình vật liệu có xét đến tiến triển hư hỏng làm hạn chế khả năng dự đoán tuổi thọ và ứng xử lâu dài của kết cấu HPFRC trong thực tế, chưa mô hình hóa được ứng xử uốn trong dài hạn cũng như tác động của các loại sợi, hàm lượng sợi khác nhau đến ứng xử uốn và độ bền mỏi của kết cấu.

Xuất phát từ những khoảng trống nêu trên, mục tiêu của đề tài là nghiên cứu một cách có hệ thống khả năng kháng mỏi của HPFRC có vết nứt sẵn dưới tác dụng của tải trọng uốn lặp, thông qua việc kết hợp kết quả thí nghiệm và mô phỏng số dựa trên cơ học phá hủy. Trọng tâm của nghiên cứu là làm rõ vai trò của vết nứt ban đầu đối với sự suy giảm độ cứng, sự phát triển hư hỏng mỏi và khả năng tiêu tán năng lượng của HPFRC dưới tải trọng lặp. Đồng thời, nghiên cứu hướng tới việc hiệu chỉnh và đánh giá khả năng áp dụng của mô hình số trong việc mô phỏng tiến trình phá hoại mỏi của HPFRC, qua đó góp phần hoàn thiện cơ sở khoa học cho thiết kế và phân tích kết cấu HPFRC chịu tải trọng lặp trong điều kiện làm việc thực tế. Kết quả nghiên cứu kỳ vọng góp phần hoàn thiện cơ sở khoa học cho việc phân tích, thiết kế và đánh giá độ bền lâu của các kết cấu sử dụng HPFRC trong điều kiện tải trọng lặp.

1.2.2. Tình hình nghiên cứu vật liệu HPFRC tại Việt Nam

Tại Việt Nam, nghiên cứu về ứng xử uốn của bê tông tính năng cao gia cường cốt sợi thép (HPFRC) đã thu hút sự quan tâm từ các trường đại học, viện nghiên cứu, và các nhà thầu xây dựng trong những năm gần đây. Từ đó các nghiên cứu trong nước về bê tông tính năng cao gia cường cốt sợi (HPFRC) đã có những bước tiến đáng kể, tập trung chủ yếu vào thiết kế cấp phối, khai thác vật liệu địa phương, đánh giá đặc trưng cơ học cơ bản và khả năng ứng dụng trong kết cấu công trình, đặc biệt là các công trình cầu và hạ tầng giao thông. Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (NUCE), Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội (HUST), Trường Đại học Bách Khoa -ĐHQG TP.HCM (và Viện Khoa học và Công nghệ Xây dựng (IBST) là những nơi tiên phong trong nghiên cứu về HPFRC. Tuy nhiên, số lượng nghiên cứu về HPFRC còn ít, nhất là từ nguyên vật liệu thành phần chế tạo HPFRC tại Việt Nam chưa phổ biến. Ngoài ra, ứng dụng triển khai các kết quả nghiên cứu cho kết cấu còn nhiều hạn chế, nhiều

vấn đề vẫn chưa được làm sáng tỏ nên hiệu quả sử dụng chưa cao. Vì vậy, việc nghiên cứu chế tạo và làm sáng tỏ ứng xử của HPFRC để áp dụng cho các công trình xây dựng hạ tầng là một đòi hỏi cần thiết và cấp bách.

Những kết quả nghiên cứu bước đầu ở Việt Nam cho thấy tiềm năng của việc nghiên cứu HPFRC để ứng dụng thực tiễn tại nước ta. Hiện tại đã có một số công trình nghiên cứu trong nước làm tiền đề cho việc nghiên cứu và ứng dụng bê tông tính năng cao cốt sợi - HPFRC.

Các nghiên cứu của Phạm Duy Hữu và các cộng sự [42] là một trong những công trình tiên phong tại Việt Nam trong lĩnh vực HPFRC. Thông qua nghiên cứu thực nghiệm thành phần vật liệu, nhóm tác giả đã chế tạo thành công ba loại cấp phối HPFRC có cường độ chịu nén đạt từ 120 đến 140 MPa, đáp ứng yêu cầu ứng dụng trong kết cấu cầu. Các kết quả này cho thấy tiềm năng lớn của HPFRC trong điều kiện vật liệu và công nghệ thi công trong nước, đồng thời đặt nền tảng cho các nghiên cứu tiếp theo về mở rộng phạm vi ứng dụng vật liệu này trong thực tế kỹ thuật.

Tiếp cận theo hướng tối ưu hóa vật liệu và phát triển bền vững, Nguyễn Công Thắng và các cộng sự [43] đã nghiên cứu khả năng thay thế một phần xi măng bằng các phụ gia khoáng hoạt tính như silica fume và tro bay trong chế tạo bê tông tính năng cao. Kết quả cho thấy sự kết hợp hợp lý các phụ gia khoáng không chỉ cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông mà còn nâng cao đáng kể cường độ chịu nén, với các mẫu thử kích thước $40 \times 40 \times 160$ mm đạt cường độ từ 150 đến 153 MPa. Nghiên cứu này khẳng định hiệu quả của giải pháp sử dụng vật liệu thay thế trong việc nâng cao chất lượng HPFRC, đồng thời góp phần giảm lượng xi măng sử dụng và tác động môi trường.

Ở cấp độ kết cấu và tiêu chuẩn thiết kế, Cù Việt Hưng và các cộng sự [44] đã tập trung tổng hợp và đánh giá các hướng dẫn thiết kế liên quan đến sức kháng uốn của cầu kiện HPFRC. Thông qua việc so sánh kết quả thí nghiệm trên các mẫu HPFRC với các hàm lượng sợi khác nhau và kết quả dự báo từ các mô hình lý thuyết trong các tiêu chuẩn hiện hành, nghiên cứu đã chỉ ra mức độ phù hợp cũng như những hạn chế của các mô hình thiết kế khi áp dụng cho HPFRC. Cách tiếp cận này có ý

nghĩa quan trọng trong việc kiểm chứng và hiệu chỉnh các phương pháp thiết kế trước khi áp dụng rộng rãi HPFRC trong các công trình thực tế tại Việt Nam.

Trong lĩnh vực tối ưu cấp phối và ứng dụng UHPC trong kết cấu công trình, các nghiên cứu của Bùi Đức Vinh và các cộng sự [45] là một trong những hướng nghiên cứu tiêu biểu tại Việt Nam về bê tông tính năng cao (HPC/UHPC), tập trung vào tối ưu hóa cấp phối, nâng cao đặc tính cơ học và mở rộng khả năng ứng dụng vật liệu trong kết cấu công trình. Thông qua việc sử dụng silica fume, tro bay hoạt tính cao, phụ gia siêu dẻo và cốt liệu mịn, nhóm nghiên cứu đã chế tạo thành công các loại bê tông tính năng cao và bê tông tính năng siêu cao có cường độ nén đạt trên 120–150 MPa, đồng thời vẫn bảo đảm tính công tác và khả năng tự đầm của hỗn hợp bê tông. Bên cạnh đó, các nghiên cứu cũng làm rõ ảnh hưởng của thành phần vật liệu đến độ bền lâu, khả năng chống thấm và ứng xử cơ học của bê tông trong điều kiện làm việc thực tế. Ngoài ra, nhóm tác giả này còn thực hiện nhiều nghiên cứu liên quan đến ứng xử kết cấu sử dụng bê tông hiệu năng cao thông qua thực nghiệm và mô phỏng số, đặc biệt đối với dầm liên hợp và cấu kiện chịu tải trọng đặc biệt. Các kết quả đạt được đã góp phần khẳng định tiềm năng ứng dụng của vật liệu bê tông tính năng cao trong điều kiện Việt Nam, đồng thời tạo cơ sở khoa học quan trọng cho việc phát triển và ứng dụng HPFRC/UHPFRC trong các công trình hạ tầng và kết cấu chịu tải trọng lớn.

Hướng nghiên cứu gần đây tập trung nhiều hơn vào vai trò của hỗn hợp sợi và cơ chế chịu lực sau nứt. Các công trình của Nguyễn Duy Liêm và các cộng sự [46–51] đã nghiên cứu ứng xử của HPFRC sử dụng hỗn hợp cốt sợi dưới tác dụng của tải trọng kéo trực tiếp và kéo uốn. Kết quả cho thấy, so với HPFRC sử dụng sợi đơn, việc phối hợp các loại sợi có đặc tính hình học và cơ học khác nhau giúp cải thiện đáng kể các thông số cơ học sau nứt, đặc biệt là cường độ kéo dư, độ dẻo và khả năng phân bố vết nứt. Các công bố này cho thấy hiệu ứng hiệp đồng của hỗn hợp sợi là một hướng đi hiệu quả để nâng cao khả năng làm việc của HPFRC trong điều kiện chịu uốn và kéo.

Nhìn chung, các nghiên cứu hiện tại thường tập trung vào các thí nghiệm cơ học nhằm xác định khả năng chịu uốn, độ bền, và ứng xử của bê tông ở mức độ thiết kế cấp phối và đánh giá đặc trưng cơ học cơ bản, với cường độ nén đạt giá trị cao, tiệm cận các nghiên cứu quốc tế. Tuy nhiên, các nghiên cứu chủ yếu vẫn tập trung vào cường độ tĩnh và ứng xử trước nứt, trong khi các vấn đề liên quan đến ứng xử sau nứt, tải trọng lặp và ảnh hưởng của vết nứt ban đầu ở cấp độ kết cấu còn hạn chế, ảnh hưởng của hàm lượng, loại sợi và phân bố của sợi trong bê tông đến ứng xử uốn vẫn chưa được nghiên cứu sâu. Đặc biệt, sự tương tác giữa sợi và bê tông nền cũng như sự phân bố sợi trong cấu kiện cần được xem xét kỹ lưỡng. Thêm vào đó, sự phát triển vết nứt và khả năng chịu tải sau nứt là một khía cạnh quan trọng trong nghiên cứu ứng xử uốn của HPFRC. Tuy nhiên, các nghiên cứu về khả năng này vẫn cần được mở rộng và đào sâu hơn, đặc biệt là với sự đa dạng của vật liệu thành phần và các dạng tải trọng khác nhau. Ngoài ra, việc kết hợp thí nghiệm với mô phỏng số để mô tả đầy đủ cơ chế hư hỏng và tiến triển mỏi của HPFRC trong điều kiện làm việc thực tế vẫn chưa được nghiên cứu một cách hệ thống. Những hạn chế này cho thấy sự cần thiết của các nghiên cứu tiếp theo nhằm kết nối giữa nghiên cứu vật liệu và phân tích kết cấu, đặc biệt đối với bài toán HPFRC có vết nứt sẵn chịu uốn mỏi, qua đó mở ra các hướng nghiên cứu mới nhằm hoàn thiện cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc ứng dụng rộng rãi vật liệu HPFRC trong các công trình xây dựng hạ tầng tại Việt Nam, đặc biệt là trong các điều kiện làm việc thực tế. Sự thiếu hụt các nghiên cứu kết hợp giữa thí nghiệm và mô phỏng số, có xét đến cơ chế phá hoại tiến triển và tương tác giữa cốt sợi – vết nứt – tải trọng lặp, cho thấy nhu cầu cấp thiết của các nghiên cứu chuyên sâu hơn về HPFRC có vết nứt sẵn chịu uốn dưới tải trọng lặp. Đây chính là hướng nghiên cứu mà đề tài này kế thừa và phát triển, nhằm thu hẹp khoảng cách giữa nghiên cứu vật liệu và ứng dụng kết cấu trong điều kiện làm việc thực tế.

1.2.3. Mô phỏng ứng xử kết cấu dùng HPFRC

Trong thiết kế kết cấu, dự báo khả năng chịu tải và chịu biến dạng khá quan trọng. Trong nghiên cứu, việc mô phỏng kết cấu giúp dự báo ứng xử phá hoại, công việc này giúp giảm thiểu khối lượng thực nghiệm vốn chiếm nhiều thời gian, chi phí

thực hiện cao. Đối với HPFRC, nhiều công trình nghiên cứu đã tập trung vào phát triển các mô hình lý thuyết và mô phỏng số. Frediani Matías và các cộng sự [52] tiến hành nghiên cứu mô phỏng dầm HPFRC với kích thước $150 \times 150 \times 600$ mm. Kết quả chỉ ra rằng dầm HPFRC được mô phỏng dưới tải trọng uốn cho thấy không phụ thuộc vào lưới phần tử hữu hạn. Bên cạnh đó, cốt sợi thép giúp làm cải thiện cường độ uốn khi tăng hàm lượng từ 40 and 80 kg/m³. Creazza và Di Marco [53] đề xuất một mô hình toán học mô tả quan hệ mô men – độ cong của dầm chịu uốn và nén lệch tâm, có khả năng xét đến tính phi tuyến vật liệu – yếu tố then chốt phản ánh đúng ứng xử thực tế. Kaklauskas và cộng sự [54] nghiên cứu ảnh hưởng của co ngót đến độ võng của cầu kiện bê tông tiết diện chữ nhật với cốt thép bố trí đối xứng và không đối xứng, đồng thời đưa ra kỹ thuật dự báo quan hệ ứng suất – biến dạng cho cầu kiện chịu kéo và uốn trong điều kiện tải ngắn hạn. Kết quả được so sánh với mô phỏng số trên phần mềm ATENA 2D. Ngoài ra, Nguyễn Thị Nhung [55] đã ứng dụng phân tích phi tuyến bằng phương pháp phần tử hữu hạn trên MIDAS FEA để dự đoán ứng xử uốn của kết cấu, cho thấy tiềm năng lớn của mô hình số trong đánh giá hiệu quả làm việc của HPFRC.

1.3. Tính cấp thiết của đề tài

Những thảm họa sụp đổ công trình gần đây trên khắp thế giới đã làm gia tăng mối quan tâm trong việc cải thiện khả năng chịu lực của các kết cấu trong điều kiện động đất, va đập hay cháy nổ. HPFRC là loại vật liệu có thể thay thế bê tông thông thường giúp cải thiện khả năng chịu lực của các tòa nhà cao tầng và các công trình hạ tầng khác vì sức chịu tải lớn, độ dẻo dai cao, khả năng hấp thụ năng lượng tốt. Khi chịu tác động của tải trọng, bê tông thông thường dễ bị nứt và phá hoại rất nhanh. Ngược lại, HPFRC có tính chất ưu việt là khả năng tăng cường cơ học sau nứt, tức là độ bền tiếp tục tăng sau vết nứt đầu tiên. Cơ chế phá hủy của HPFRC cũng giảm đột ngột (giảm mức độ giòn) so với bê tông truyền thống nhờ cốt sợi gia cường chằng vết nứt. Khả năng tăng cường cơ học của HPFRC phụ thuộc rất nhiều vào cấp phối vữa, loại sợi và các thuộc tính của vùng chuyển tiếp (ITZ) giữa bê tông nền và cốt sợi.

Tuy đã có rất nhiều công trình nghiên cứu về HPFRC, nhưng một số tính chất cơ lý của HPFRC vẫn cần được tiếp tục nghiên cứu để có thêm thông tin, đặc biệt là so sánh, phân tích sức kháng cơ học của HPFRC dưới tải trọng tĩnh và tải trọng lặp. Do đầm là kết cấu phổ biến và quan trọng trong xây dựng, tác giả tập trung nghiên cứu sức kháng uốn của vật liệu HPFRC. Những thông số cơ học của HPFRC dưới tác động của tải uốn như cường độ kéo uốn, mức độ hấp thụ năng lượng, quá trình hình thành và lan truyền vết nứt, tuổi thọ mỏi dưới tải trọng lặp cũng được nghiên cứu. Việc hiểu biết rõ ứng xử vật liệu và kết cấu sử dụng HPFRC dưới các hình thức tải trọng khác nhau giúp ứng dụng vật liệu này vào thực tiễn đúng đắn, hiệu quả trong các công trình xây dựng quan trọng.

1.4. Các nội dung dự kiến thực hiện trong nghiên cứu của luận án

1.4.1. Mục tiêu nghiên cứu

Mục đích nghiên cứu của luận án là làm sáng tỏ ứng xử uốn tĩnh và uốn lặp của HPFRC với hàm lượng và loại sợi khác nhau, xây dựng đường cong mỏi của HPFRC thông qua thí nghiệm và phân tích lý thuyết. Kết quả nghiên cứu làm cơ sở ứng dụng vật liệu này cho kết cấu chịu tải trọng trùng phục một cách hiệu quả, độ tin cậy cao.

1.4.2. Nội dung nghiên cứu

- Lựa chọn vật liệu, thành phần bê tông tính năng cao gia cường cốt sợi (HPFRC) từ các vật liệu đã được thương mại hóa rộng rãi tại Việt Nam;
- Thí nghiệm và phân tích ứng xử uốn của đầm HPFRC với hàm lượng cốt sợi gia cường thay đổi dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và tải trọng lặp;
- Thí nghiệm và phân tích ứng xử uốn của đầm HPFRC có vết cắt sẵn và không có vết cắt sẵn khi gia cường sợi hỗn hợp dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và tải trọng lặp;
- Phân tích kết quả thực nghiệm và mô phỏng số đầm HPFRC gia cường thép thanh, bê tông nền sử dụng hỗn hợp sợi thép tối ưu căn cứ trên kết quả thí nghiệm uốn vật liệu;

1.4.3. Nhiệm vụ nghiên cứu

Thông qua chế tạo, thí nghiệm và phân tích, nghiên cứu tập trung vào các nhiệm vụ sau:

i) 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 trọng tĩnh.

ii) 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 trọng lặp.

iii) Đánh giá các thông số cơ học của dầm sử dụng HPFRC thông qua thí nghiệm và mô phỏng.

1.5. Kết luận chương 1

Chương 1 đã trình bày tổng quan về HPFRC, một vật liệu tiên tiến với cường độ nén – kéo cao, khả năng biến dạng lớn và tính kháng nứt vượt trội. HPFRC hiện đã được ứng dụng tại nhiều công trình cầu, hạ tầng và gia cường kết cấu trên thế giới cũng như ở Việt Nam. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện nay còn hạn chế trong việc phân tích ảnh hưởng của loại và hàm lượng sợi đến ứng xử kết cấu dưới tải trọng lặp, cũng như trong mô hình hóa ứng xử uốn và tuổi thọ mỏi. Do đó, Chương 1 khẳng định tính cấp thiết của đề tài, làm cơ sở định hướng cho các nghiên cứu thực nghiệm và phân tích trong luận án.

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) [54,55]. Trong bê tông thường, vùng ITZ là vùng mỏng dày khoảng 20-50 μm , nằm chuyển tiếp giữa hồ xi măng bao quanh các hạt cốt liệu lớn [56]. Trong HPFRC, vùng ITZ thường xuất hiện bao quanh hạt cát hay cốt sợi do kích thước tương đối lớn hơn các vật liệu thành phần khác [57]. Vùng ITZ thường xốp hay nhiều lỗ rỗng dẫn đến tập trung ứng suất, hình thành vết nứt và lan rộng vết nứt gây phá hoại vật liệu. Hình 2.1 mô tả các nhóm yếu tố ảnh hưởng đến tính chất cơ học của HPFRC.



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

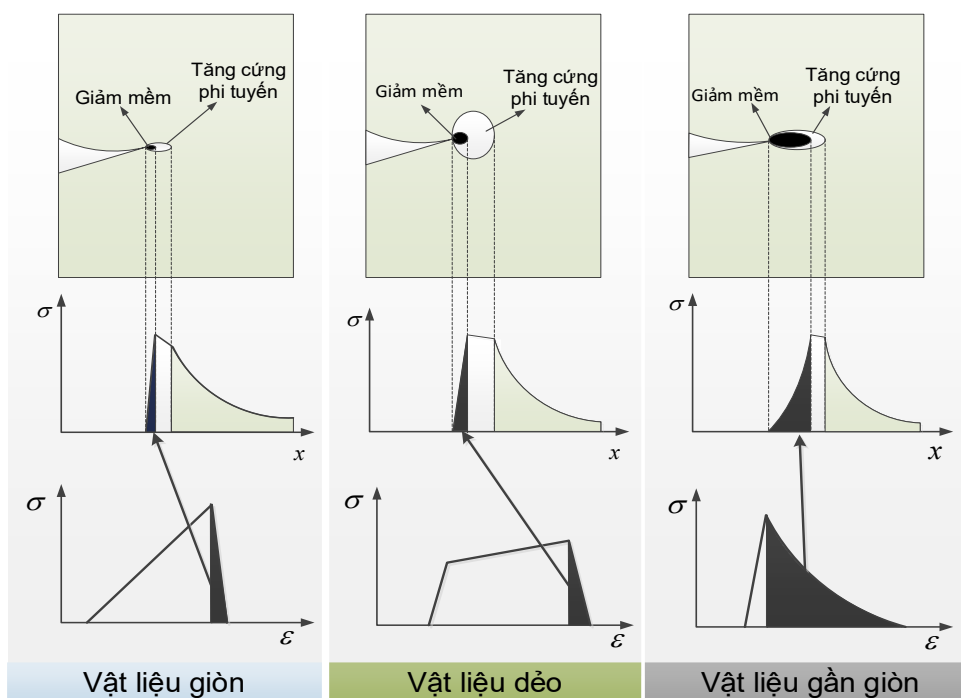
Theo Hình 2.1, các nhóm yếu tố ảnh hưởng đến tính chất cơ học của HPFRC được thể hiện như sau:

- Trong nhóm bê tông nền, các yếu tố ảnh hưởng bao gồm: cấp phối, độ bền, độ cứng, hệ số nở hông (hệ số Poisson), tuổi dưỡng hộ, điều kiện dưỡng hộ của bê tông nền.

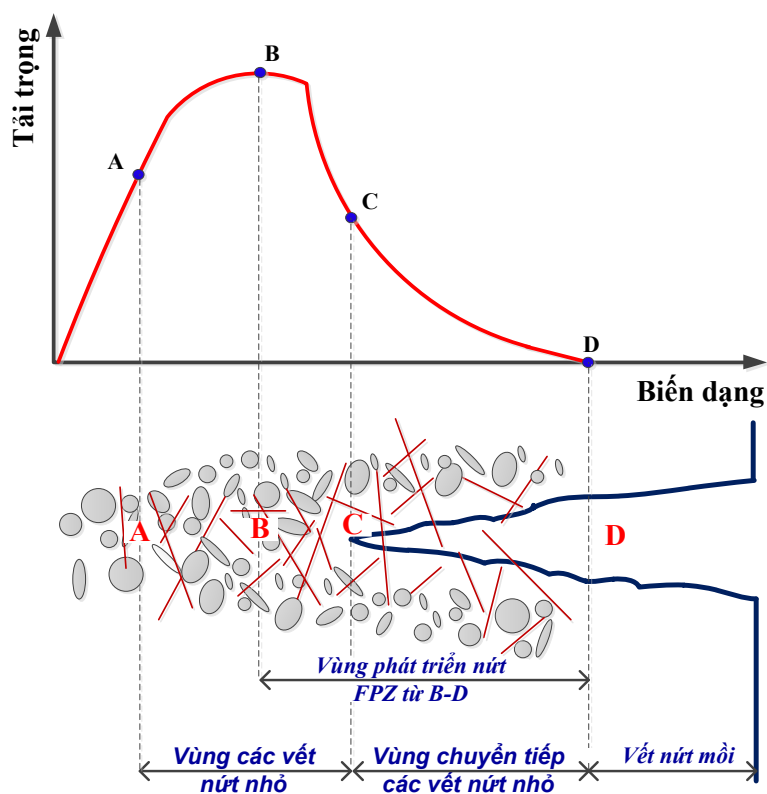
- Trong nhóm cốt sợi gia cường, các yếu tố ảnh hưởng bao gồm: hình học, độ bền, độ cứng, hệ số nở hông, chiều dài sợi, góc xoay, hàm lượng cốt sợi gia cường.
- Trong nhóm vùng chuyển tiếp bề mặt ITZ, các yếu tố ảnh hưởng bao gồm: vi cấu trúc, độ rỗng, khối lượng riêng, độ bền cục bộ, độ cứng cục bộ, xử lý vùng chuyển tiếp.

2.2. Vùng phát triển nứt trong HPFRC

Trong cơ học phá hủy, sự hình thành và phát triển của các vết nứt trong vật liệu thường được mô tả trong vùng phát triển nứt (FPZ – Fracture Process Zone). Trong cấu trúc vật liệu, vùng FPZ được định nghĩa là vùng nằm ở đầu nhọn vết nứt hiện hữu (crack tip) vốn tồn tại trong vật liệu khi chế tạo. Vết nứt phá hoại có mối quan hệ trực tiếp với đường cong ứng suất – biến dạng của vật liệu khi chịu kéo. Vùng tiến triển vết nứt (FPZ) thể hiện giai đoạn suy giảm ứng suất (softening) sau khi đạt đến cường độ cực đại của vật liệu. Hình 2.2 mô tả ứng xử phá hủy của vật liệu giòn (brittle material), vật liệu dẻo (ductile material) và vật liệu gần giòn (quasibrittle material) [58]. Vật liệu HPFRC có thể được xếp ở vật liệu gần giòn bởi cốt sợi thép gia cường có hiệu ứng chằng vết nứt, làm giảm tốc độ mở rộng vết nứt [59–61]. Theo mô tả ở Hình 2.2, vùng FPZ của vật liệu gần giòn khá dài sau đầu nhọn vết nứt, trong khi rất ngắn ở vật liệu giòn và vật liệu dẻo (đại diện là kim loại). Hình 2.3 mô tả chi tiết vùng phát triển nứt FPZ của HPFRC [62]. Theo hình này, vùng FPZ xuất phát từ B và kéo dài đến D, cũng là điểm đầu vùng nứt liên kết (cohesive crack). Điểm B là vị trí tương ứng với đỉnh đường cong ứng xử. Vùng FPZ (BD) chính là vùng giảm cứng cơ học tương ứng với nứt liên kết (cohesive crack), tức là 2 mép vết nứt không tách hẳn ra mà được liên kết bởi sợi thép chằng vết nứt (fiber bridging action). Điểm D là vị trí tương ứng cuối đường cong giảm cứng cơ học (ứng suất bằng 0), là bắt đầu của vùng nứt tự do (vùng có 2 mép vết nứt tách hẳn ra không còn liên kết (traction-free crack). Kích thước của vùng FPZ được coi là không đổi ứng với 1 loại HPFRC, nó chỉ phụ thuộc vào kích thước hạt của vật liệu thành phần và đặc trưng cốt sợi gia cường.



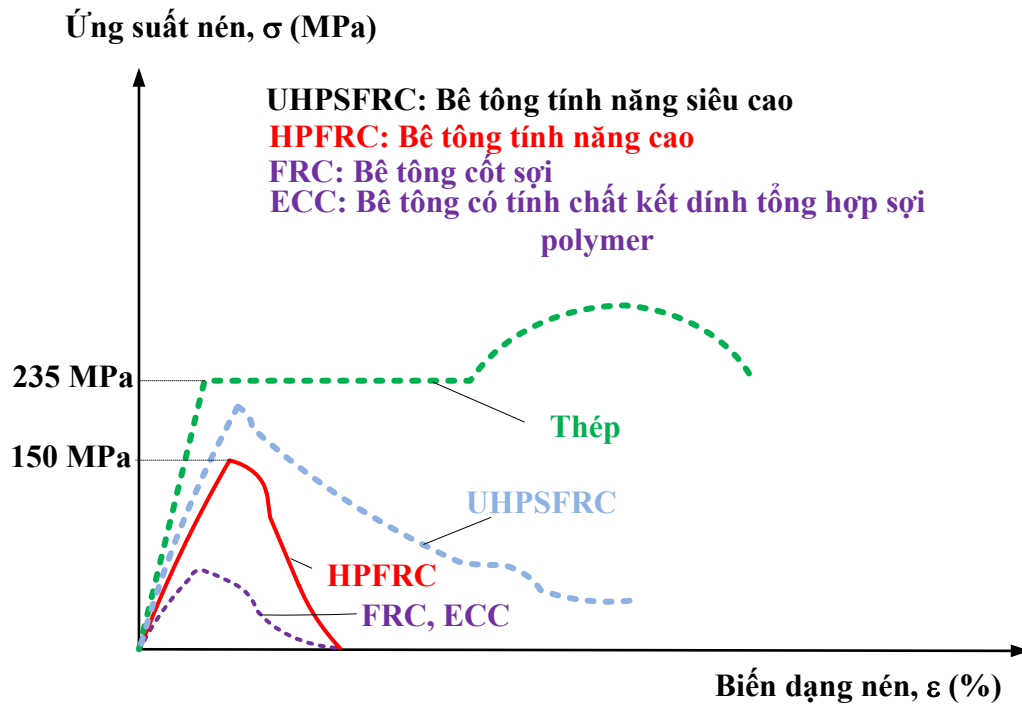
Hình 2.2. Ứng xử phá hủy của vật liệu giòn, vật liệu dẻo và vật liệu gần giòn [58]



Hình 2.3. Vùng phát triển nứt FPZ của HPFRC [62]

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

2.3.1. Ứng xử nén



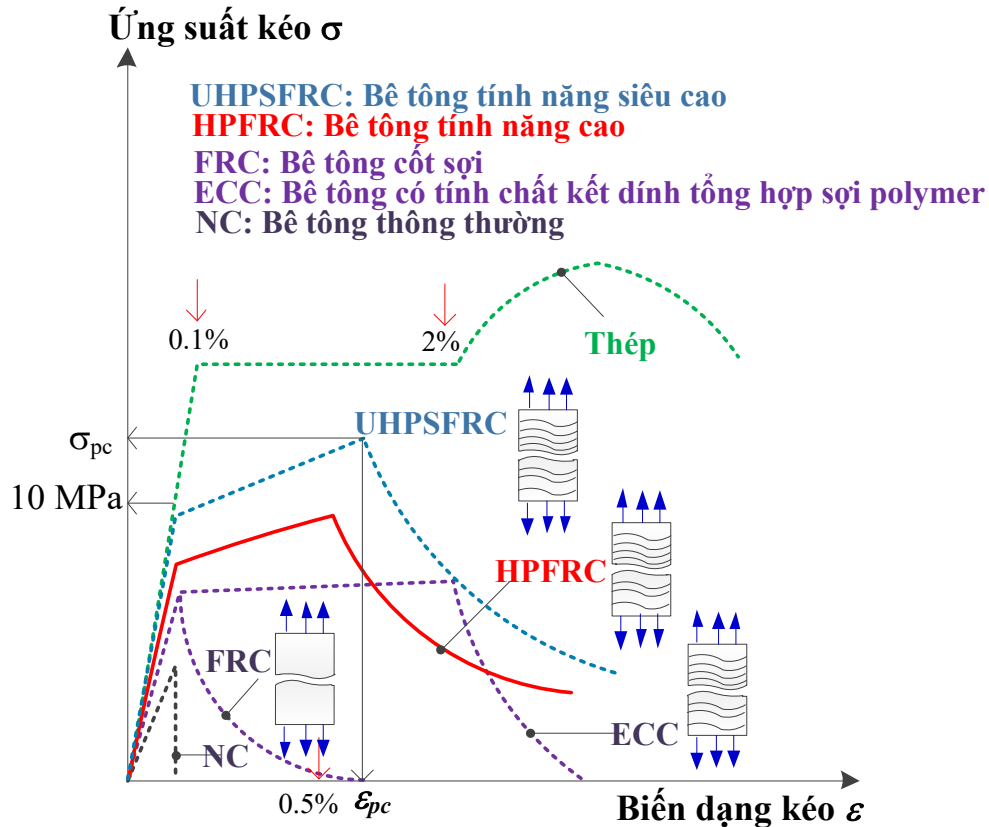
Hình 2.4. Ứng xử nén của các loại bê tông cốt sợi theo tổng hợp của Graybeal [62]

Hình 2.4 thể hiện ứng xử nén của các loại bê tông cốt sợi theo tổng hợp của Graybeal [62]. Theo phân loại ở Hình 2.4, HPFRC có độ bền nén thường ở mức 60-120 MPa, cao hơn FRC và thấp hơn UHPSFRC (> 120 MPa). Ảnh hưởng của sợi thép đến độ bền nén của HPFRC là rất ít. Đối với HPFRC có hàm lượng sợi phân bố trong phạm vi bình thường (< 2%), sự gia tăng độ bền nén so với khi chưa gia cường sợi thường dao động từ 0 đến 25% [7,55]. Việc bổ sung các sợi vào bê tông cũng cải thiện được ứng xử giòn sau đỉnh đường cong, tuy không hiệu quả như dưới tác dụng của tải kéo hay uốn. HPFRC cũng phát triển độ bền nén theo thời gian, Graybeal [62] đã đề xuất công thức tính độ bền nén của HPFRC theo thời gian t (số ngày tuổi) trong điều kiện phòng thí nghiệm theo công thức:

$$f_{ct}' = f_c' \cdot \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{t - 0.9}{3} \right)^{0.6} \right) \right] \quad (2.1)$$

Trong đó f'_{ct}, f'_c, t lần lượt là độ bền nén ở t ngày, 28 ngày với thời gian sau khi đứt mẫu tính bằng ngày.

2.3.2. Ứng xử kéo trực tiếp

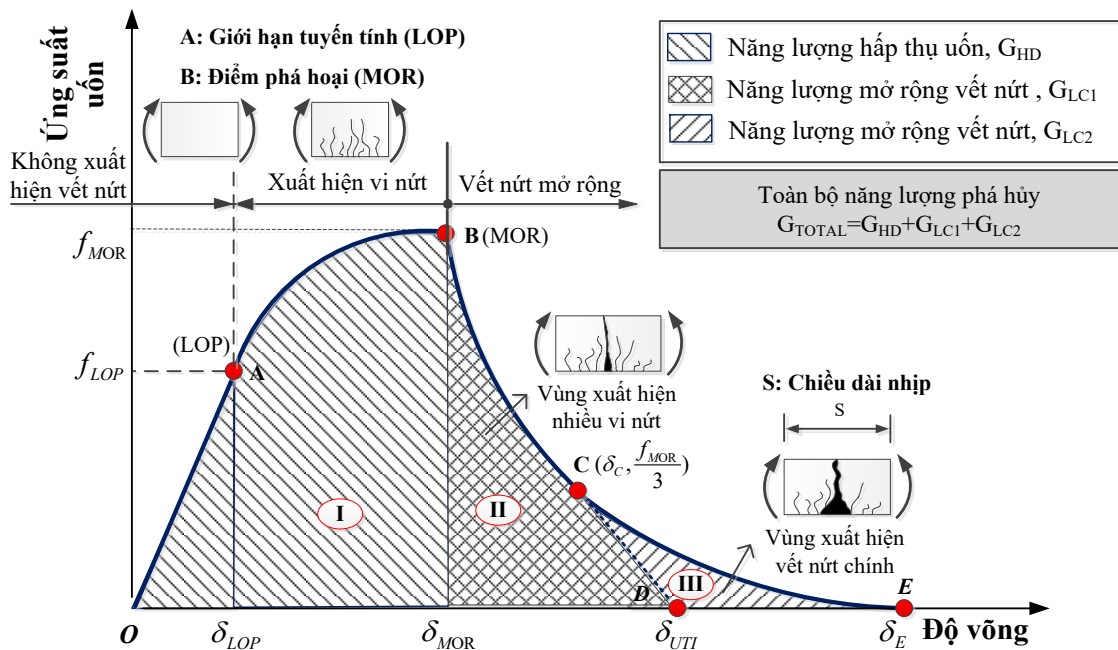


Hình 2.5. Ứng xử kéo của các loại bê tông cốt sợi theo tổng hợp của Graybeal [62]

Hình 2.5 thể hiện ứng xử kéo của các loại bê tông cốt sợi theo tổng hợp của Graybeal [62]. Bê tông thường có độ bền chịu kéo rất thấp, do vậy việc thí nghiệm kéo trực tiếp cho vật liệu này khá khó khăn (trong việc lấy tín hiệu đo). Do vậy đối với bê tông thường, thí nghiệm kéo hay dùng dưới dạng kéo gián tiếp thông qua uốn hay ép chẻ. Trái lại, HPFRC khi được thêm sợi thép gia cường với hàm lượng hợp lý có độ bền chịu kéo trực tiếp tăng lên rất nhiều, đạt từ 7÷14 MPa, khả năng chịu biến dạng cũng lớn, đạt 0,3-0,5%, có được điều này nhờ vào cơ chế chằng vết nứt của cốt sợi tạo hiệu ứng tăng cứng cơ học sau vết nứt đầu. Năng lượng hấp thu của HPFRC dưới tải kéo cũng được ghi nhận lớn hơn nhiều so với bê tông thường và FRC. Để nâng cao hiệu ứng của các đặc tính kéo trong vật liệu HPFRC, nhiều phương pháp đã được đề xuất: tăng hàm lượng sợi, pha trộn nhiều loại sợi như dùng nhiều loại sợi to

khác nhau (với hàm lượng cố định 1% thể tích) kết hợp với sợi nhỏ có hàm lượng thay đổi (từ 0%, 1%, 1,5%, theo thể tích), sử dụng sợi thép có độ bền cao và mô đun đàn hồi lớn. Đặc biệt, để đạt được cường độ kéo cao trên 10 MPa, tăng độ biến dạng (biến dạng lớn hơn 0,5%) và tăng khả năng hấp thụ năng lượng, Park và các cộng sự [7] đã nghiên cứu pha trộn hai loại sợi gia cường. Như vậy sự phối hợp giữa sợi to và sợi nhỏ có thể mang lại tính hiệp đồng (synergistic effect) nâng sức kháng cơ học vật liệu. Ngoài ra, các công bố khác đã chứng minh rằng tính chất cơ học của HPFRC phụ thuộc rất lớn vào thông số cốt sợi như: loại sợi, hình dáng sợi, hàm lượng sợi, phân bố sợi và tính chất cơ học của sợi.

2.3.3. Ứng xử uốn



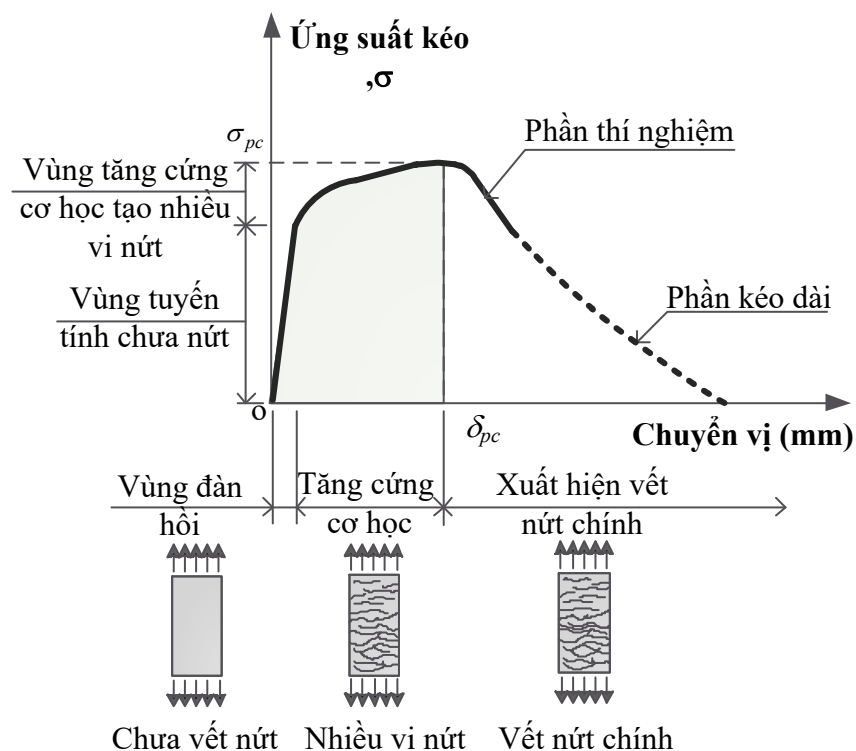
Hình 2.6. Đặc tính tăng cường cơ học của HPFRC dưới tải uốn [55,63]

Hình 2.6 thể hiện ứng xử uốn điển hình của vật liệu HPFRC. Tương tự kéo trực tiếp, việc thêm cốt sợi thép gia cường với hàm lượng hợp lý giúp HPFRC có độ bền chịu uốn tăng lên rất nhiều so với không gia cường nhờ tính chất tăng cường cơ học sau vết nứt đầu như thể hiện ở Hình 2.6. Cường độ uốn của HPFRC có thể đạt từ 20÷30 MPa [64], lớn hơn cường độ kéo trực tiếp 2-3 lần.

Dựa trên hàm lượng sợi theo thể tích có thể phân loại HPFRC thành 3 nhóm [65]. Nhóm hàm lượng sợi thép thấp ($<1\%$) chỉ giúp kiểm soát hiện tượng nứt co ngót mà không có bất kỳ sự cải thiện độ bền. Nhóm hàm lượng sợi trung bình ($1-2\%$) thường áp dụng cho các kết cấu đúc sẵn mà không yêu cầu các biện pháp trộn đặc biệt. Nhóm hàm lượng sợi cao ($\geq 2\%$) có thể giúp cải thiện độ bền khi phá hủy, tăng độ bền dẻo và độ cứng của vật liệu. Hàm lượng sợi thép gia cường thường được giới hạn ở mức 3% vì hàm lượng sợi cao thường yêu cầu phải có các kỹ thuật trộn đặc biệt để phân bố đều, tránh vón cục.

2.3.4. Tính chất tăng cứng cơ học và năng lượng hấp thụ

Dưới tác dụng của tải trọng kéo trực tiếp, ứng suất kéo trực tiếp và ứng xử kéo dọc trục của HPFRC được xác định thông qua biểu đồ quan hệ giữa tải trọng – biến dạng (Hình 2.7) gồm 3 giai đoạn chủ yếu:



Hình 2.7. Đặc tính tăng cứng cơ học của HPFRC dưới tải kéo trực tiếp [50]

- Giai đoạn I: Đây là giai đoạn ứng xử đàn hồi. Quan hệ giữa tải trọng và biến dạng là tương quan bậc nhất. Trong giai đoạn này chưa phát sinh vết nứt, và

mô đun đàn hồi khi kéo dọc trục được định nghĩa là độ dốc tuyến tính của đường cong quan hệ tải trọng – biến dạng.

- Giai đoạn II: Giai đoạn tăng cứng cơ học. Trong giai đoạn này, khi biến dạng tăng hơn gấp nhiều lần so với tốc độ tăng lực, các vết nứt tế vi bắt đầu mở rộng, biến dạng trên bề mặt HPFRC tăng lên.
- Giai đoạn III: Giai đoạn mở rộng vết nứt. Khi vết nứt tại nơi nào đó bắt kỳ mà các cốt sợi thép bị kéo tuột khỏi bê tông nền hình thành và mở rộng vết nứt, lúc này các vết nứt nhỏ ban đầu bắt đầu mở rộng và phát triển thành các vết nứt cục bộ có thể nhìn thấy rõ bằng mắt thường. Thông thường trong các thiết kế kết cấu, độ bền chịu kéo chỉ được xét đến trạng thái xuất hiện vết nứt cục bộ. Các biến dạng thực của mẫu thử kéo xảy ra trong phạm vi sau điểm ứng suất cực đại, còn biến dạng tương đối vượt qua điểm sau vết nứt là biến dạng không thực, được tính bằng cách chia độ mở của vết nứt cho chiều dài của mẫu thử kéo.

Công thức sau đây được dùng để tính toán độ bền kéo trước và sau khi hình thành vết nứt:

$$\sigma_{cc} = \left[K_1 + K_2 \cdot V_f \cdot \frac{L_f}{d_f} \right] \cdot \sigma_{HPC} \quad (2.2)$$

$$\sigma_{pc} = \left[K_3 \cdot \frac{L_f}{d_f} + K_4 \right] \cdot V_f \cdot \sigma_t \quad (2.3)$$

Với:

σ_{cc} : Giá trị ứng suất kéo trước khi hình thành vết nứt

σ_{pc} : Giá trị ứng suất kéo sau khi hình thành vết nứt

σ_{HPC} : Ứng suất kéo cực đại của bê tông tính nâng cao chưa gia cường cốt sợi thép

σ_t : Ứng suất danh định trong thí nghiệm mẫu lập phương

K_1 : Hệ số giảm độ chịu lực do tải vì có sự hiện diện của sợi thép. $K_1 = (0.9 \div 1.0)$ áp dụng cho sợi thép tròn trơn.

K_2 : Hệ số đặc trưng cho hướng sợi và liên kết sợi, $K_2 = (0.2 \div 0.3)$ áp dụng cho sợi thép tròn trơn.

K_3 : Hệ số phụ thuộc vào tính chất liên kết của sợi và độ cứng sợi

K_4 : Hệ số neo

V_f : Hàm lượng sợi theo thể tích

L_f : Độ dài sợi

d_f : Đường kính sợi

Các hệ số K thường được xác định bằng thực nghiệm.

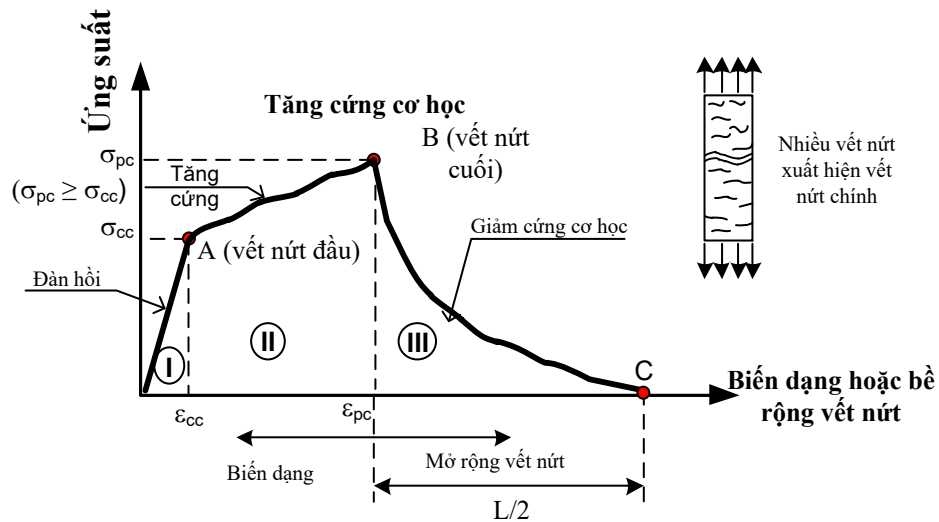
Nguyễn Duy Liêm và các cộng sự [24,46,50] đã tiến hành nhiều thí nghiệm để khảo sát ứng xử kéo trực tiếp và khả năng kháng uốn của UHPFRC. Các nghiên cứu chỉ ra rằng khả năng kháng uốn của UHPFRC bị ảnh hưởng đáng kể từ độ bền chịu kéo sau vết nứt cuối. Sự tương tác giữa cốt sợi thép và vật liệu nền là yếu tố then chốt quyết định chất lượng của HPFRC. Vai trò chính của sợi được thể hiện trong vùng có vết nứt, trong đó sợi làm nhiệm vụ là cầu nối qua vết nứt của vật liệu nền. Chức năng của sợi là làm tăng độ bền của HPFRC qua vật liệu nền bằng cách truyền ứng suất và tải trọng qua vết nứt đến sợi. Hơn nữa, sợi làm tăng độ dẻo dai của HPFRC bằng việc hấp thụ năng lượng sinh ra trong quá trình mất liên kết và bị kéo tuột ra khỏi bê tông nền.

Tính chất và ứng xử cơ học của HPFRC được mô tả qua hình dạng điển hình của đường cong ứng suất kéo - biến dạng ở 3 trạng thái (như Hình 2.8):

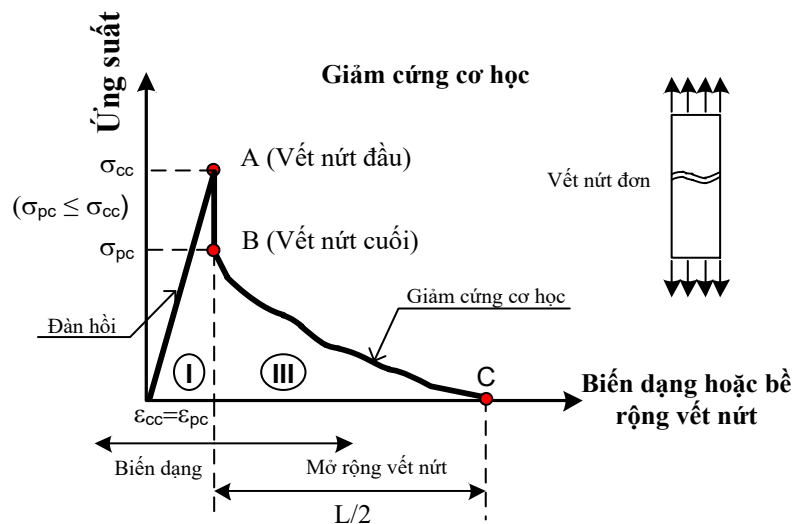
- Vùng I: Giới hạn đàn hồi, mẫu kéo đạt đến điểm nứt đầu tiên, tương quan giữa vật liệu nền và sợi thép là đàn hồi tuyến tính.
- Vùng II: Quá trình phát triển vết nứt, lúc này biến dạng trong HPFRC vượt qua biến dạng cho phép của vật liệu nền.
- Vùng III: Giai đoạn sau nứt: sợi bị giãn và kéo tuột ra khỏi vật liệu nền.

Từ các trạng thái này, các thông số đặc biệt thể hiện ứng xử của HPFRC có thể được dự đoán thông qua đường cong điển hình thể hiện mối quan hệ ứng suất - biến dạng. Trong ứng xử kéo trực tiếp, điểm nứt đầu $A (\sigma_{cc}; \varepsilon_{cc})$, điểm nứt đầu được xem

như là giới hạn đàn hồi. Điểm nút sau B ($\sigma_{pc}; \varepsilon_{pc}$) được xác định tại giá trị độ bền kéo cao nhất, quá trình tăng cứng cơ học xảy ra khi $\sigma_{pc} \geq \sigma_{cc}$, quá trình biến dạng trong giai đoạn tăng cứng cơ học cho thấy độ dẻo của vật liệu HPFRC. Diện tích dưới đường cong ứng suất biến dạng đến điểm sau nút B được ước tính là năng lượng hấp thụ.



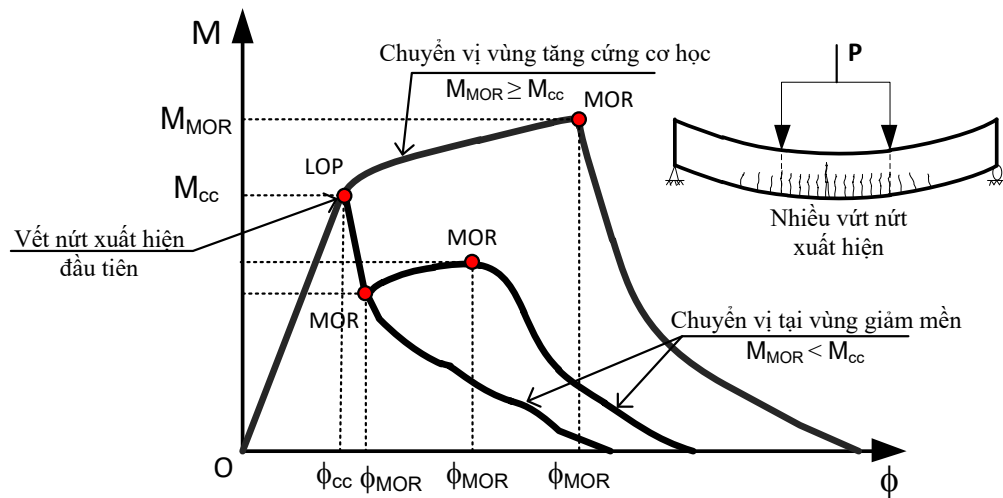
a) Tăng cứng cơ học



b) Giảm cứng cơ học

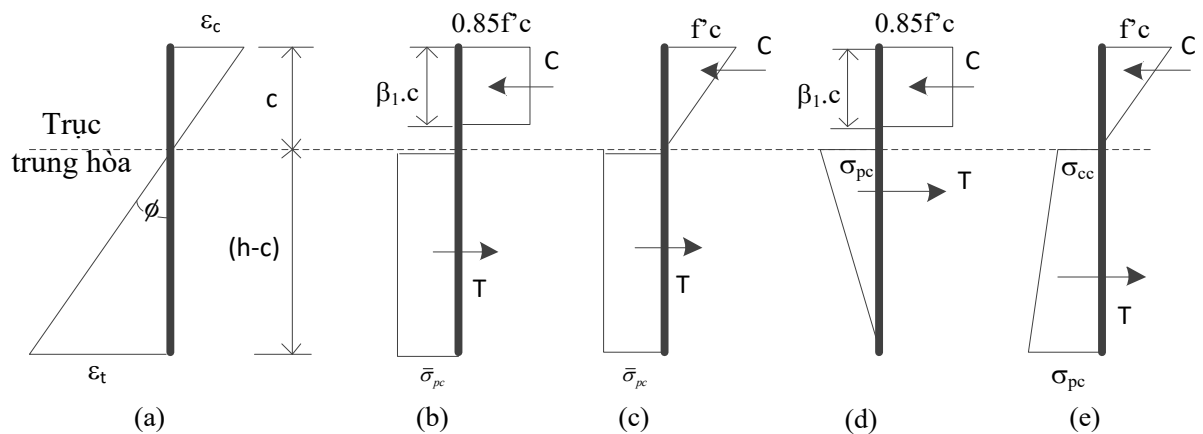
Hình 2.8. Dạng điển hình đường cong quan hệ ứng suất kéo-biến dạng của HPFRC [66]

Tương tự với ứng xử trong các thí nghiệm kéo trực tiếp, các thông số thể hiện ứng xử uốn của HPFRC (uốn 3 điểm hoặc uốn 4 điểm) được thể hiện ở hình 2.9, tại 2 điểm LOP (Limit of Proportionality - điểm A) và MOR (Modulus of Rupture - điểm B). Điểm A là nơi vết nứt đầu tiên xuất hiện, được đặc trưng bởi momen kháng uốn M_{cc} và độ cong tương ứng ϕ_{cc} , hoặc tải trọng P_{LOP} và chuyển vị δ_{LOP} .



Hình 2.9. Đường cong ứng xử uốn của HPFRC với hàm lượng sợi gia cường khác nhau [66]

Vùng tăng cứng cơ học hình thành trong khoảng từ LOP đến MOR, biến dạng tại vùng tăng cứng xảy ra khi $M_{MOR} \geq M_{cc}$. Tại MOR ứng với momen uốn lớn nhất M_{MOR} , vết nứt bắt đầu mở rộng và đi dần vào vùng hóa mềm. Từ đây có thể thấy rằng độ bền uốn khác với độ bền kéo trực tiếp về quá trình biến dạng. Khi kéo trực tiếp, toàn bộ tiết diện của mẫu kéo đều tham gia chịu lực. Biểu đồ biểu diễn quá trình biến dạng là một hình chữ nhật, nhưng trong trường hợp mẫu chịu uốn, ứng suất trên mặt cắt ngang phân làm 2 vùng rõ rệt, vùng kéo và vùng nén. Vì thế biểu đồ biến dạng cũng phân làm 2 vùng kéo và nén tương ứng với ε_t và ε_c như Hình 2.10.



Hình 2.10. Biểu đồ ứng suất và biến dạng của dầm HPFRC chịu uốn theo AASHTO LRFD [67]

Từ Hình 2.9 có thể thấy rằng vật liệu HPFRC có gia cường sợi thép phát huy tác dụng trong kết cấu chịu uốn. Đối với bê tông thường, khi ứng suất uốn tăng lên, trục trung hòa trên mặt cắt được nâng lên dần dần dẫn đến diện tích vùng chịu nén giảm. Mẫu bị phá hoại giòn ngay sau ứng suất kéo uốn đạt đến đỉnh với vết nứt đơn. Nhưng đối với bê tông tính năng cao có gia cường cốt sợi thép, nhiều vi nứt hình thành trong quá trình tăng cường cơ học nhờ cốt sợi thép làm nhiệm vụ bắc cầu qua vết nứt, ngăn cản việc mở rộng vết nứt, từ đó làm tăng khả năng chịu kéo của mặt cắt và thiết lập một sự cân bằng mới. Tùy vào hàm lượng sợi thép khác nhau mà HPFRC chịu được tải trọng uốn khác nhau và ứng xử khác nhau như Hình 2.9. Đường số 1 trên đồ thị cho thấy sự phá hủy của HPC khi chưa gia cường sợi thép, trong đó, sự phá hủy xảy ra khi độ bền tại vết nứt vượt quá giới hạn cho phép. Đường 2, và 3 cho thấy sự phá hủy của HPFRC khi có gia cường sợi thép, các đường ứng xử khác nhau do sự khác nhau về hàm lượng sợi thép, kiểu sợi và tính chất sợi. Ở đường 2, sự giảm sức chịu tải khi ứng suất tại vết nứt vượt quá giới hạn cực đại là do nhiều nguyên nhân:

Hàm lượng sợi nhỏ.

Khả năng liên kết của sợi so với vật liệu nền thấp.

Độ dài sợi lớn làm cho sợi bị cắt đứt trước khi nó kịp phát huy khả năng chịu kéo.

Trong các thí nghiệm uốn 3 điểm, tải trọng tác dụng được biểu thị qua công thức như sau [65]:

$$P = \frac{4M}{L} \quad (2.4)$$

Biến dạng tại nhịp giữa của mẫu chịu uốn trong giai đoạn đàn hồi [65]:

$$\delta = \frac{\Phi.L^2}{12} \left[1 + \frac{2(1+\nu)}{\psi} \cdot \left(\frac{h}{L} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

Biến dạng tại điểm bắt đầu xuất hiện vết nứt LOP[65]:

$$\delta = \frac{\Phi.L^2}{24} \left[\Phi \cdot \left\{ 2 - \left(\frac{M_{LOP}}{M} \right)^2 - \left(\frac{M_{LOP}}{M} \right) \right\} \cdot \Phi_{LOP} \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{M_{LOP}}{M} \right) \right\} \right] + \frac{\Phi(1+\nu).L^2}{6\psi} \cdot \left(\frac{h}{L} \right)^2 \quad (2.6)$$

Biến dạng tại giới hạn phá hủy MOR của mẫu trong giai đoạn tăng cứng cơ học [65]:

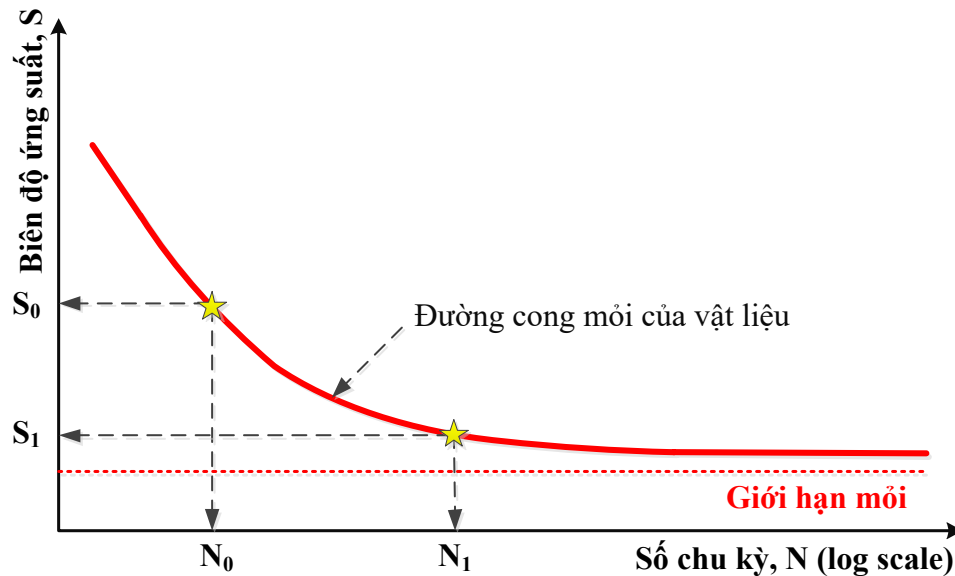
$$\delta = \frac{\Phi.L^2}{24} \left[\Phi \cdot \left\{ 2 - \left(\frac{M_{LOP}}{M_{MOR}} \right)^2 - \left(\frac{M_{LOP}}{M_{MOR}} \right) \right\} \cdot \Phi_{LOP} \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{M_{LOP}}{M_{MOR}} \right) \right\} \right] + \frac{\Phi_{MOR}(1+\nu).L^2}{6\psi} \cdot \left(\frac{h}{L} \right)^2 \quad (2.7)$$

2.4. Tính môi của vật liệu

2.4.1. Khái niệm môi

Trong quá trình sử dụng, các kết cấu trong xây dựng hoặc trong các công trình giao thông thường chịu tác dụng của tải trọng tĩnh kết hợp tải trọng động trùng phục. Với những dao động của tải trọng tác dụng diễn ra đều đặn hàng ngày, cần phải có giải pháp để kết cấu có thể làm việc lâu dài ổn định mà không bị phá hoại môi do tần suất sử dụng lớn hoặc do thiên tai như động đất. Phá hoại môi là trường hợp phá hoại hay xảy ra khi ứng suất trong kết cấu biến đổi theo thời gian. Ban đầu, vị trí bị phá hoại xuất hiện nhiều vết nứt rất nhỏ, khó nhìn thấy nên rất khó phát hiện, sau đó dưới tác dụng của tải trọng lặp, vết nứt dần lớn lên và có thể nhìn thấy bằng mắt thường, khi độ bền vết nứt tăng vượt khỏi giới hạn cực đại của vật liệu gây ra sự phá

hoại do mỏi. Đối với các công trình không thường xuyên được bảo dưỡng, phá hoại mỗi ngày càng trở nên nghiêm trọng. 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 2.11. Đường cong mỏi điển hình

Tải trọng tác động biến thiên theo tần số gây ra sự thay đổi ứng suất liên tục bên trong dầm. Hiện tượng mỏi xảy ra khi ứng suất tại một vị trí nào đó biến thiên liên tục gây ra sự phá vỡ cấu trúc vật liệu làm rạn nứt và cuối cùng phá hủy vật liệu.

Để đánh giá độ bền mỏi của dầm HPFRC chịu tải trọng lặp theo chu kỳ, các nghiên cứu được công bố thường sử dụng đường cong mỏi đo bằng thực nghiệm, còn gọi là đường cong $S - N$ [4]:

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

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

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

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. Nhiều nghiên cứu đã được thực

hiện để xác định các tham số ảnh hưởng đến độ bền mỏi: cấp độ gia tải, tỷ lệ ứng suất, tần suất tải, tính chất vật liệu... Các điều kiện chế tạo và thí nghiệm HPFRC cũng ảnh hưởng đến sự phân tán của kết quả nghiên cứu. Các điều kiện này được chia làm 3 nhóm:

- Hàm lượng sợi, sự phân bố cốt sợi và định hướng ngẫu nhiên của sự sắp xếp cốt sợi trong vật liệu;
- Quá trình chế tạo vật liệu, thành phần và tính chất của vật liệu HPFRC.
- Độ chính xác của thiết bị đo và quá trình thiết lập các thông số thí nghiệm.

Năm 2019, Carlesso và các cộng sự [40] đã thực hiện các nghiên cứu phá hủy mỏi trên các dầm HPFRC kích thước $75 \times 75 \times 275$ mm có khía sẵn chịu tác dụng của tải trọng tuần hoàn để khảo sát tuổi thọ mỏi và các ứng xử cơ học của vật liệu bằng các thí nghiệm uốn 3 điểm. Kết quả cho thấy rằng biểu đồ tương quan giữa tải trọng và độ mở rộng vết nứt có thể được dùng để tính toán biến dạng thông qua các hàm phân phối tích lũy Weibull. Thông thường hàm phân phối logarit chuẩn được sử dụng để ước tính xác suất phá hoại do mỏi trong vật liệu, nhưng khi tuổi thọ mỏi tăng lên, độ chính xác của hàm phân phối logarit lại giảm xuống, và phản ánh chính xác được hiện tượng vật lý về sự suy giảm độ bền của vật liệu do quá trình mỏi. Vì vậy, các hàm phân phối Weibull được sử dụng để mô tả thống kê dữ liệu mỏi thay cho các hàm phân phối logarit:

$$F_N(n) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n}{u} \right)^\alpha \right] \quad (2.11)$$

Với n là giá trị cụ thể của biến ngẫu nhiên N , α là tham số hình dạng của mẫu hoặc độ dốc của đường cong Weibull, u là tham số tỷ lệ thể hiện các đặc tính về độ bền của mẫu.

Ngoài ra còn có cách tiếp cận khác được sử dụng để mô tả mối quan hệ giữa $S - N - P_f$ bằng các mô hình toán học được đề xuất bởi McCall [68] và được Singh cùng các cộng sự [69,9] biến đổi một chút để phù hợp với tính chất của HPFRC theo từng vùng địa lý.

Bảng 2.1 cung cấp các công trình phổ biến chịu tác dụng của tải trọng mỗi với số chu kỳ tương ứng. Theo Bảng 2.1, tải trọng mỗi có thể được chia thành ba loại: tải chu kỳ thấp và tải chu kỳ cao và tải ở chu kỳ siêu cao, dựa trên mức ứng suất và số chu kỳ tải tác dụng.

Bảng 2.1. Các công trình phổ biến thường xuyên chịu tải mỗi

Tải mỗi ở chu kỳ thấp	Tải mỗi ở chu kỳ cao		Tải mỗi ở chu kỳ siêu cao	
1-10 ³	10 ³ -10 ⁵	10 ⁵ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁹ - ∞
Công trình chịu động đất	Sân bay Đường cao tốc Đường sắt	Mặt đường, cầu và vỉa hè đường cao tốc	Các công trình hạ tầng giao thông cỡ lớn	Các công trình biển

2.4.2. Sức kháng mỗi của HPFRC dưới tải uốn

Trong bê tông thường chịu uốn, phá hoại mỗi thường xảy ra ở vùng chịu kéo của cốt thép hoặc vùng chịu uốn của bê tông. Tuy nhiên, những công trình thường chịu tải mỗi như đường cao tốc hay sân bay, mặt đường thường không được gia cố và bê tông được yêu cầu phải chịu được ứng suất uốn [71,72]. Để khắc phục vấn đề này, các sợi thép được thêm vào trong quá trình trộn bê tông để hỗ trợ khả năng chịu kéo và làm chậm sự phát triển của vết nứt [72], từ đó cải thiện đáng kể độ bền mỗi do uốn và giới hạn bền [73]. Tuy nhiên, mức độ cải thiện này còn phụ thuộc vào hàm lượng sợi, loại sợi, định hướng sợi và biên dạng hình học của sợi. Trên cơ sở tổng hợp các thông số ảnh hưởng đến đặc tính của HPFRC, Nanni và các cộng sự [73] đã kết luận rằng các thông số khác nhau thì trạng thái mỗi cũng khác nhau. Nhóm tác giả đã thực hiện các nghiên cứu về độ bền mỗi uốn của SFRC với các mức tải khác nhau, sử dụng nhiều loại sợi thép khác nhau: sợi thép có đầu móc, sợi thép được uốn cong và được neo bằng đinh. Kết quả cho thấy tuổi thọ mỗi của những mẫu có mức độ gia tải lớn luôn rất thấp, trong khi tuổi thọ mẫu có mức độ gia tải thấp hơn có thể đạt khoảng 80% tổng số chu kỳ gây ra phá hoại mỗi. Trên cơ sở đó, nghiên cứu khuyến nghị là tăng hàm lượng sợi lên hơn 40 kg/m³ để giảm sự biến thiên của tuổi

thọ mỗi. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi, tỷ lệ khung hình và loại sợi lên tuổi thọ mỗi của công trình cũng được nghiên cứu bởi Johnston & Zemp [74] khi áp dụng hàm lượng sợi từ 0,5% đến 1,5% cho bốn loại sợi khác nhau. Quan hệ S-N được thiết lập dựa trên tỷ lệ phần trăm giữa độ bền vết nứt đầu tiên dưới tác dụng của tải trọng tĩnh (tỷ lệ khung hình), từ 47 đến 100%. Do sự sai lệch giữa độ bền tại thời điểm xuất hiện vết nứt đầu tiên với độ bền phá hủy là không lớn, nên sự khác biệt của quan hệ S-N cũng rất nhỏ. Hàm lượng sợi là yếu tố chủ yếu chi phối ảnh hưởng quan hệ S-N, tiếp theo đó là tỷ lệ khung hình (tỉ số giữa chiều dài trên đường kính) và loại sợi tương ứng. Hàm lượng sợi 1% cùng tỷ lệ khung hình ở mức 70 được xem là tốt nhất. Tỷ lệ khung hình lớn hơn 70 không cải thiện ứng xử mỗi.

Zhang và các cộng sự [73] đã tiến hành các thí nghiệm một cách có hệ thống thông qua các thử nghiệm mỗi biên độ bằng nhau trên bốn mẫu dầm để xác định ảnh hưởng của tỷ lệ thể tích sợi thép (0% -0,5% -1,0% -1,5%) đến khả năng chống nứt, đặc tính biến dạng và tuổi thọ mỗi của dầm HPFRC. Kết quả cho thấy việc bổ sung sợi thép có thể cải thiện đáng kể khả năng chống nứt của bê tông, thể hiện ở việc giảm chiều rộng vết nứt từ 35-121%. Đồng thời, sợi thép có thể ức chế hiệu quả sự phát triển độ võng của dầm trong quá trình chịu tải trọng mỗi, làm chậm tốc độ suy giảm độ cứng. Việc bổ sung sợi thép đã giảm độ võng giữa nhịp của dầm từ 15-61% và tăng tuổi thọ mỗi từ 66,9-149,9%. Dựa trên dữ liệu thực nghiệm, nghiên cứu này khẳng định rằng công nghệ gia cường bằng sợi thép là một giải pháp nâng cao hiệu suất mỗi thiết thực và có ý nghĩa kinh tế cho các kết cấu bê tông cường độ cao.

2.4.3. Dự đoán tuổi thọ mỗi

Việc dự đoán tuổi thọ mỗi của bê tông thường và SFRC chủ yếu được thực hiện theo kết quả thực nghiệm. Các thí nghiệm mỗi thường mất rất nhiều thời gian và các số liệu được trình bày dưới dạng đường cong Wöhler, còn được gọi là đường cong mỗi $S - N$. Ngoài ra, sơ đồ Goodman cũng được dùng rộng rãi để miêu tả ảnh hưởng ứng suất tối thiểu trong chu kỳ tải. Vì thế, đường cong mỗi từ các cách trình bày trên miêu tả các trạng trạng thái mỗi thông qua các biểu đồ biểu diễn mỗi quan hệ giữa $S - N$ [39,40,75,76].

Mô phỏng số cũng đã được phát triển để thực hiện việc dự đoán tuổi thọ mỏi của bê tông. Mô hình Phần tử hữu hạn (FEM) được dùng rất phổ biến để dự đoán tuổi thọ mỏi. FEM có thể cần nhiều thông số và mô hình khác nhau để miêu tả các ứng xử cơ bản của vật liệu: mô hình vật liệu, mô hình hư hỏng do mỏi, chiều dài nứt và các yếu tố ứng suất khác. Nhiều tài liệu thảo luận FEM của bê tông chịu tải mỏi đã được công bố [77–81].

Mô hình thống kê cũng được đưa vào dự đoán tải trọng mỏi bằng cách kết hợp xác suất hư hỏng do mỏi vào các đường cong $S - N$ để đảm bảo rằng việc dự đoán tuổi thọ mỏi vẫn được thực hiện nhất quán. Mô hình thống kê có thể được sử dụng cho nhiều mục đích khác nhau. Tuy nhiên, để thuận lợi về mặt toán học, hàm mật độ xác suất Logarithmic-Normal (lognormal) thường được sử dụng để mô hình hóa các biến ngẫu nhiên không âm mà phân phối của chúng phụ thuộc vào phân phối logarithmic của dữ liệu. Hàm mật độ xác suất lognormal được định nghĩa bởi phương trình [82]:

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.12)$$

Trong đó:

x : giá trị của biến ngẫu nhiên.

μ : giá trị kỳ vọng của logarithm của biến ngẫu nhiên.

σ : độ lệch chuẩn của logarithm của biến ngẫu nhiên.

Phân phối Weibul cũng là một cách tiếp cận khác được ưu tiên cho việc mô tả thống kê dữ liệu mỏi từ lúc hàm Hazard được phát hiện đã không miêu tả được hết sự suy giảm tính chất vật liệu trong quá trình mỏi.

2.4.4. Các biểu thức mô tả tuổi thọ mỏi của bê tông thường

2.4.4.1. Biểu thức Aas-Jakobsen's S-N

Aas-Jakobsen [83] đã phát triển phương trình biểu diễn đường cong $S - N$ như sau [83]:

$$\frac{\sigma_{\max}}{f_s} = 1 - (1 - R)\beta \log N \quad (2.13)$$

2.4.4.2. Biểu thức S-N của Hsu

Hsu [4] đã tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của tần số tải đến độ mỏi do ứng xử nén bằng cách sửa đổi phương trình (2.14). Phương trình (2.15) được áp dụng cho các kết cấu chịu tác động của động đất có chu kỳ mỗi thấp ($N \leq 10^3$). Phương trình (2.14) được áp dụng cho các công trình hạ tầng như mặt đường sân bay, đường cao tốc, cầu có số chu kỳ mỗi cao ($10^3 \leq N \leq 10^7$).

Chu kỳ mỗi thấp:

$$\frac{\sigma_{\max}}{f_s} = 1 - 0.0662(1 - 0.556R)\log N - 0.0294\log T \quad (2.14)$$

Chu kỳ mỗi cao:

$$\frac{\sigma_{\max}}{f_s} = 1.20 - 0.20R - 0.133(1 - 0.779R)\log N - 0.053(1 - 0.455R)\log T \quad (2.15)$$

2.4.4.3. Biểu thức S-N của Zhang, Phillips và Wu

Zhang, Phillips và Wu [84] đã sửa đổi biểu thức của phương trình (2.14) đến (2.15) thành (2.16) khi tính đến ảnh hưởng của tần số tải và sự đổi chiều ứng suất lên khả năng chịu mỗi khi uốn của bê tông thường. Biểu thức điều chỉnh này được thể hiện ở phương trình (2.16) [84]:

$$\frac{\sigma_{\max}}{f_s} = (ab\sigma^{-\log f} + c)[1 - (1 - R')\beta \log N] \quad (2.16)$$

2.4.4.4. Biểu thức Banjara and Ramanjaneyulu

Banjara & Ramanjaneyulu [1] đã đề xuất biểu thức (2.17) dựa trên các kết quả thí nghiệm ứng xử mỗi do uốn của bê tông thường, trong đó, các biểu thức ở trên được điều chỉnh để suy ra biểu thức thống nhất quan hệ $S - N$ [1]:

$$\frac{\sigma_{\max}}{f_s} = 1.1268 - 0.0776\log N \quad (2.17)$$

2.4.5. Các biểu thức mô tả tuổi thọ mỏi của bê tông cốt sợi (FRC)

2.4.5.1. Biểu thức $S-N$ của Cachim

Nghiên cứu độ bền mỏi chịu uốn của FRC được Cachim [85] thực hiện ở nhiều tần số và nhiều cấp ứng suất khác nhau. Phương trình (2.18) trong biểu thức $S-N$ được đề xuất sau khi phân tích hồi quy [84] :

$$\frac{\sigma_{\max}}{f_s} = \frac{20.156 \log N}{18.708} \quad (2.18)$$

2.4.5.2. Biểu thức $S-N$ của Naaman và Hammoud

Naaman và Hammoud [86] đã thí nghiệm độ mỏi uốn trên HPFRC sử dụng sợi thép có đầu móc ở ba mức ứng suất khác nhau. Phương trình này được phát triển như sau [86]:

$$\frac{\sigma_{\max}}{f_s} = 93 - 3.68 \log N \quad (2.19)$$

2.4.5.3. Biểu thức $S-N$ của Singh and Kaushik

Biểu thức $S-N$ trong phương trình (2.20) được phát triển bởi Singh and Kaushik [87] sau khi thực hiện các nghiên cứu thực nghiệm về tuổi thọ mỏi uốn của FRC ở các tỷ lệ và mức độ ứng suất khác nhau [87]:

$$\frac{\sigma_{\max}}{f_s} = c_1 N^{-c_2} (1 - R) \quad (2.20)$$

2.4.5.4. Biểu thức Banjara and Ramanjaneyulu

Banjara and Ramanjaneyulu [97] đã phát triển hai biểu thức thể hiện ứng xử mỏi do uốn của vật liệu FRC, phương trình (2.21) khảo sát tuổi thọ mỏi của FRC với ảnh hưởng của sợi thép, phương trình (2.21) [97] được giới thiệu cho FRC với hàm lượng sợi bất kỳ:

$$\frac{\sigma_{\max}}{f_s} = 1,1633 - 0,0783 \log N \quad (2.21)$$

Trong đó:

$\sigma_{\max}$: ứng suất tác dụng lớn nhất

f_s : độ bền uốn tĩnh của mẫu

R : hệ số ứng suất

R' : hệ số đảo chiều ứng suất

$\beta = 0.0685$: thông số vật liệu

N : tuổi thọ môi (số chu kỳ dẫn đến vật liệu bị phá hoại)

T : thời gian tác động tải lặp

a, b, c : các thông số của vật liệu

f : tần số gia tải

c_1, c_2 : hệ số dựa trên tỷ lệ ứng suất

V_f : hàm lượng sợi

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

Việc bổ sung sợi gia cường vào bê tông nền của HPFRC 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 đỉnh cũng phức tạp hơn phụ thuộc vào hàm lượng sợi gia cường. Do đó, các công thức truyền thống để xác định sức kháng uốn của BTCT thông thường không còn phù hợp với kết cấu của HPFRC - thường xét đến tính kháng kéo của HPFRC.

Hiện nay, nhiều quốc gia phát triển như Mỹ, Úc, Nhật, Pháp, Đức đã ban hành các quy định hướng dẫn và các dự thảo tiêu chuẩn cho việc xác định khả năng kháng uốn của dầm HPFRC. Một trong những hướng dẫn sớm nhất được công bố bởi Hiệp hội Kỹ sư Dân dụng Pháp (AFGC/SETRA) [17]. Sau đó, các chỉ dẫn của Hiệp hội kỹ sư Xây dựng Nhật Bản (JSCE) [19,20] và các công bố nghiên cứu của Hiệp hội đường cao tốc Hoa Kỳ [18] cũng được ban hành. Điểm chung của các tiêu chuẩn này là đưa đặc tính làm việc của vùng kéo vào mô hình tính toán sức kháng uốn, qua đó nhấn mạnh vai trò các sợi thép trong việc tăng cường độ dẻo và khả năng chịu tải của vật liệu sau khi nứt, một yếu tố mà các lý thuyết truyền thống thường bỏ qua.

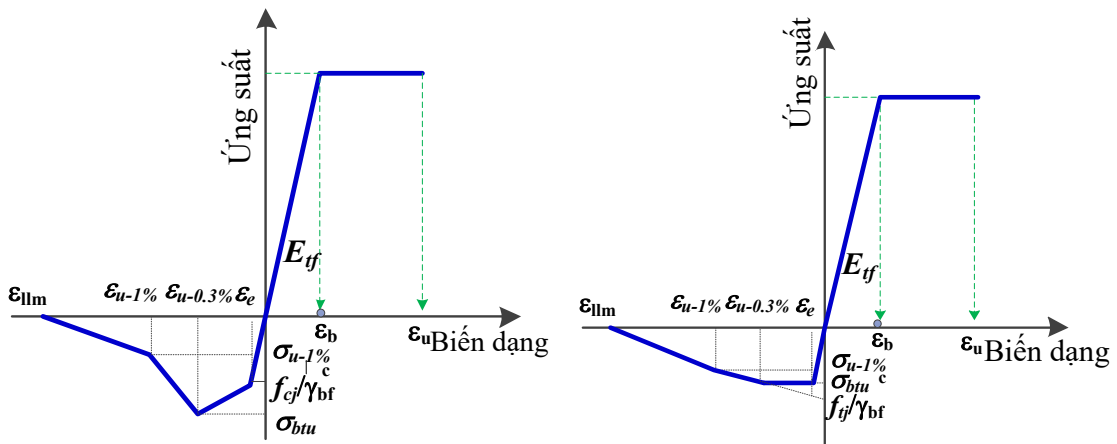
Trong thiết kế kết cấu dầm bằng vật liệu HPFRC, ứng xử uốn được thể hiện thông qua kết quả ứng xử nén và ứng xử kéo trực tiếp của HPFRC.

- Ứng xử nén được thể hiện bằng các tham số như ứng suất nén, mô đun đàn hồi và mối quan hệ giữa ứng suất-biến dạng.
- Ứng xử kéo khi uốn được thể hiện thông qua mối quan hệ ứng suất-biến dạng hoặc mối quan hệ ứng suất-độ mở rộng vết nứt phụ thuộc vào ứng xử kéo và trạng thái giới hạn tính toán.

2.5.1. Sức kháng uốn theo Hiệp hội kỹ sư dân dụng Pháp (AFGC\SETRA)

Các hướng dẫn thí nghiệm, cách xây dựng mô hình vật liệu và các phương pháp tính toán kết cấu bằng vật liệu HPFRC đã được Hiệp hội kỹ sư xây dựng Pháp ban hành đã được ứng dụng để thiết kế nhiều công trình trên thế giới [17]. Việc tính toán sức kháng uốn của dầm HPFRC được thực hiện dựa trên giả thiết quan hệ giữa ứng suất và biến dạng trong trường hợp chịu nén là tổ hợp của hai đường tuyến tính bao gồm các tham số σ_{bcu} (ứng suất tương ứng với bề rộng vết nứt) và ε_u (biến dạng đàn hồi).

$$\sigma_{bcu} = \frac{0,85f_{cj}}{b} \quad (2.22)$$



a) Ứng suất kéo tăng tiếp sau nứt

b) Ứng suất kéo duy trì một đoạn sau nứt

Hình 2.12. Quan hệ ứng suất biến dạng theo kiến nghị của AFGC/ SETRA [17]

Chỉ dẫn này đã chuyển đổi mô hình ứng suất – độ mở rộng vết nứt ($\sigma - w$) sang mô hình ứng suất – biến dạng ($\sigma - \varepsilon$) bằng cách sử dụng chiều dài tương đương l_c , trong đó $l_c = \frac{2}{3}h$ cho trường hợp dầm T và dầm chữ nhật. Để chuyển đổi sang mô

hình ứng suất – biến dạng ($\sigma - \varepsilon$) biến dạng đàn hồi và biến dạng ở bề rộng vết nứt 0.3 mm và 1% chiều cao tiết diện được tính theo công thức sau:

$$\varepsilon_e = \frac{f_{ij}}{E_{ij}} \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_{u-1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{ij}}{\gamma_{bf} E_{ij}} \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_{u-0,3} = \frac{w_{0,3}}{l_c} + \frac{f_{ij}}{\gamma_{bf} E_{ij}} \quad (2.25)$$

Trong đó:

ε_e : là biến dạng đàn hồi

$w_{0,3}$: vết nứt với bề rộng là 0,3 mm

$\varepsilon_{u-0,3}$: Biến dạng tương ứng với vết nứt rộng là 0,3 mm

$\varepsilon_{u-1\%}$ bề rộng vết nứt tương ứng 0,01h với h là chiều cao của tiết diện

γ_{bf} : hệ số an toàn

Biến dạng tới hạn khi kéo được xác định bằng $\varepsilon_{lim} = \frac{L_f}{4l_c}$ với L_f là chiều dài cốt

sợi gia cường.

Ứng suất tại $w_{0,3}$ và $w_{1\%}$ được tính như sau:

$$\sigma_{btu} = \frac{f(w_{0,3})}{K \gamma_{bf}} \quad (2.26)$$

$$\sigma_{u-1\%} = \frac{f(w_{1\%})}{K \gamma_{bf}} \quad (2.27)$$

Với K là hệ số ảnh hưởng của định hướng cốt sợi nền ứng xử kéo của bê tông.

Mô hình ứng xử kéo của bê tông được xác định bằng hai giai đoạn:

- Giai đoạn biến dạng mềm (strain softening law) (Hình 2.12a) khi ($f_{ij} \geq \sigma_{btu}$)
- Giai đoạn tăng cứng cơ học (strain hardening law) (Hình 2.12b) ($f_{ij} \leq \sigma_{btu}$)

2.5.2. Sức kháng uốn theo AASHTO LRFD

Lý thuyết dự báo sức kháng uốn của dầm HPFRC dựa trên tiêu chuẩn AASHTO LRFD [67] được áp dụng cho cả dầm BTCT thông thường và dầm HPFRC. Phương pháp này đơn giản hóa việc xác định chiều cao trong vùng chịu nén của tiết diện bằng cách chuyển đổi khối ứng suất thực tế (Hình 2.13c) thành một khối ứng suất hình chữ nhật tương đương (Hình 2.13d). Cách tiếp cận này cho phép sử dụng các phương pháp phân tích quen thuộc để đánh giá khả năng chịu uốn của dầm HPFRC, qua đó tạo cầu nối giữa lý thuyết thiết kế truyền thống và vật liệu thế hệ mới. Từ đó, công thức tính toán khoảng cách từ trục trung hòa đến thớ chịu nén xa nhất của dầm bê tông cốt thép thông thường được xác định như sau:

$$c = \frac{A_s f_s - A'_s f'_s}{0,85 f'_c \beta_1 b} \quad (2.28)$$

Trong đó:

A_s ; A'_s : lần lượt là tiết diện cốt thép đặt ở vùng chịu kéo và chịu nén của dầm.

f_s ; f'_s : là giá trị ứng suất tại vùng kéo chảy của cốt thép đặt ở vùng chịu kéo và chịu nén.

f'_c : cường độ chịu nén của bê tông

β_1 : hệ số phụ thuộc vào độ bền của bê tông

b : bề rộng của phần diện tích nén.

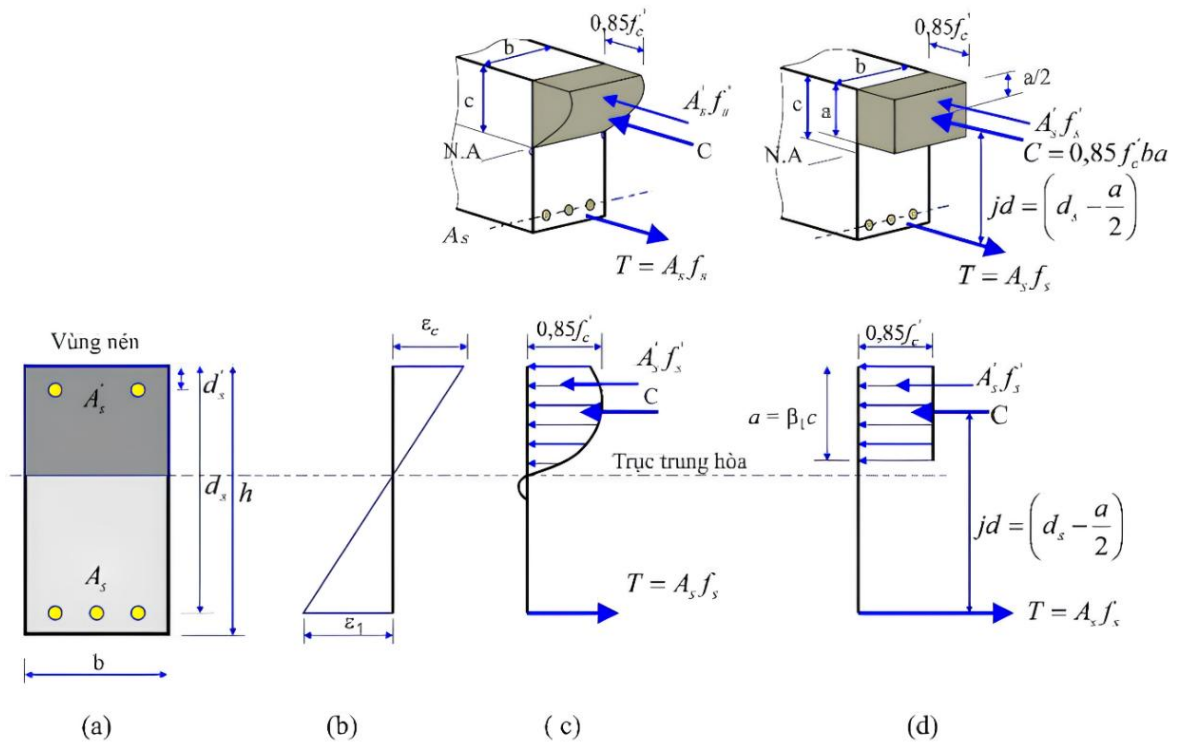
Độ bền nén danh định của dầm BTCT truyền thống được tính theo công thức:

$$M_n = A_s f_s \left(d_s - \frac{a}{2} \right) - A'_s f'_s \left(d'_s - \frac{a}{2} \right) \quad (2.29)$$

Trong đó:

$a = \beta_1 c$ là chiều cao khối ứng suất hình chữ nhật.

Việc sử dụng các công thức của AASHTO LRFD để dự báo sức kháng uốn của dầm BTCT được trình bày như trên là quá đơn giản và khá an toàn khi bỏ qua sự làm việc trong vùng chịu kéo của bê tông. Do đó, cách tính này không phù hợp với HPFRC vì độ bền chịu kéo của HPFRC cao hơn gấp nhiều lần so với bê tông truyền thống.



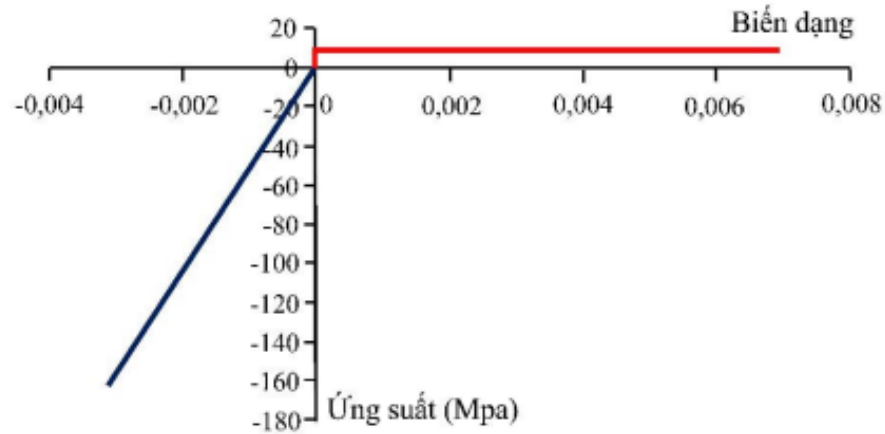
Hình 2.13. Phân bố ứng suất và biến dạng trên mặt cắt ngang của dầm BTCT theo AASHTO LRFD [66]

2.5.3. Sức kháng uốn theo FHWA

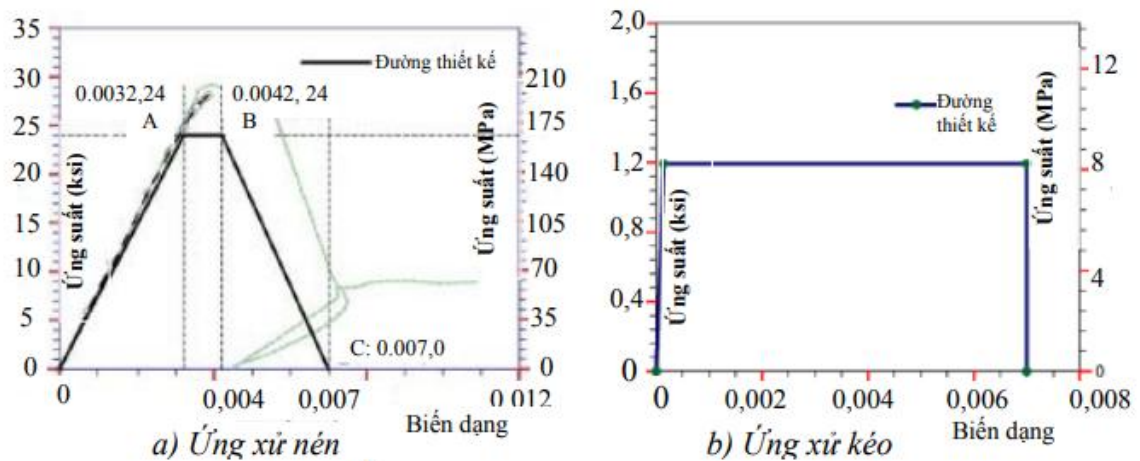
Đây là phương pháp dự báo sức kháng uốn của dầm HPFRC có hàm lượng sợi thép 2% thể tích dựa trên biểu đồ quan hệ giữa ứng suất và biến dạng có tính đến sự làm việc của bê tông trong vùng chịu kéo với ba giả thuyết theo đề xuất của FHWA như Hình 2.14 [21]:

- Giả thuyết 1: bê tông được xem là có ứng xử đàn hồi tuyến tính trong vùng chịu nén. Ứng suất nén cực đại được giả định bằng 0,85 lần giới hạn bền nén, tương ứng với biến dạng do nén là 0,0032.
- Giả thuyết 2: Trong vùng chịu kéo, vật liệu thể hiện ứng xử đàn dẻo, với ứng suất chịu kéo được giả định bằng 0,5 lần độ bền kéo của bê tông tại thời điểm bắt đầu nứt. Biến dạng tương ứng là 0,007, và cường độ chịu kéo được giữ không đổi ở mức 8 MPa (tương đương 1,2 ksi).

- Giả thuyết 3: Mô đun đàn hồi của vật liệu HPFRC cần được xác định cụ thể thông qua các thí nghiệm trực tiếp trên mẫu thử hình lăng trụ.



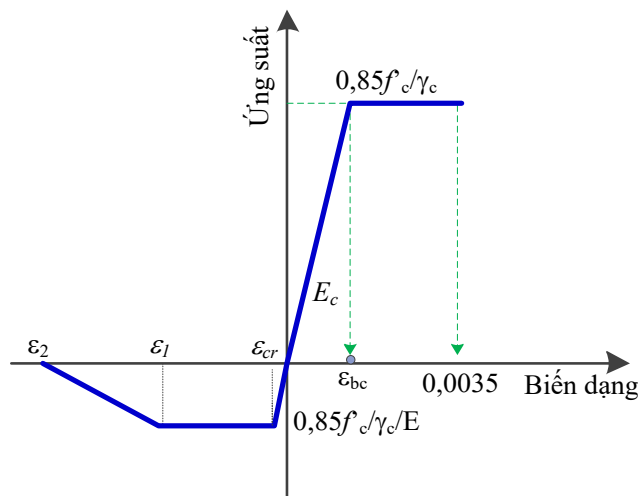
Hình 2.14. Quan hệ ứng suất - biến dạng sử dụng cho dự báo sức kháng uốn dầm I - HPFRC theo FHWA [21]



Hình 2.15. Ứng xử UHPC theo mô hình của tác giả Aaleti [88]

2.5.4. Sức kháng uốn theo Hiệp hội kỹ sư xây dựng Nhật Bản (JSCE)

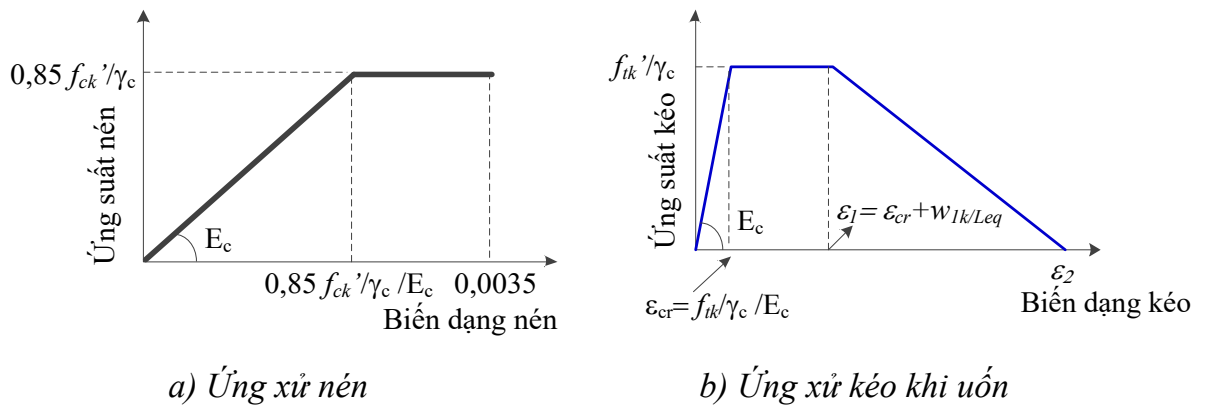
Theo hướng dẫn từ [19,20], mô hình vật liệu HPFRC sử dụng 2% sợi thép đường kính nhỏ, biểu đồ quan hệ giữa ứng suất-biến dạng khi nén đã được lý tưởng hóa như Hình 2.16



Hình 2.16. Đường cong ứng suất - biến dạng theo JSCE [19,20]

Hướng dẫn này được áp dụng để thiết kế những kết cấu chịu lực dọc và các cấu kiện chịu uốn ở trạng thái ứng suất giới hạn, ở trạng thái này, quan hệ giữa ứng suất và biến dạng trong ứng xử nén có thể được coi là tuyến tính với mô đun đàn hồi xấp xỉ 50 GPa.

- Ứng xử nén: Mô hình ứng xử nén của HPFRC (Hình 2.17a). Trong đó: f_{ck}' là cường độ nén đặc trưng trên mẫu thử hình trụ đường kính 100 mm, 180 MPa, E_c là mô đun đàn hồi của bê tông.
- Ứng xử kéo: Ứng xử kéo của UHPFRC (Hình 2.17b), có thể xác định bằng thí nghiệm kéo trực tiếp hoặc sử dụng kết quả phân tích ngược (inverse analysis) từ thí nghiệm uốn. Cường độ chịu kéo đặc trưng tính toán: $f_{tk} = 8,8$ MPa.

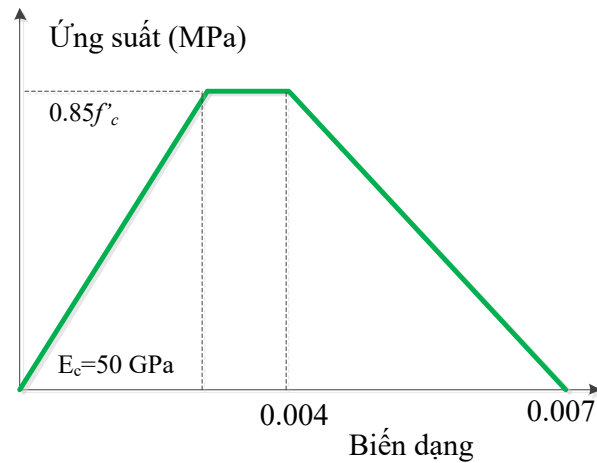


Hình 2.17. Mô hình ứng xử của HPFRC theo JSCE [20]

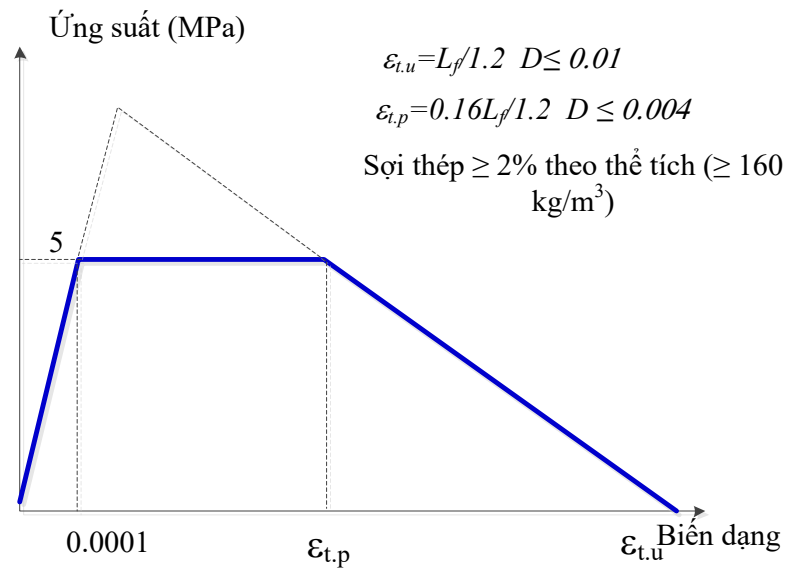
2.5.5. Chỉ dẫn thiết kế của Australia

Trong hướng dẫn thiết kế dầm HPFRC chịu tác dụng của ứng suất trước có cường độ nén đạt 150 MPa và mô đun đàn hồi 50 GPa, được gia cường sợi thép với hàm lượng 2% theo thể tích được đề xuất bởi Gowripalan và Gilbert [89]. Ứng xử nén và ứng xử kéo uốn được biểu diễn bằng quan hệ ứng suất-biến dạng như sau:

- Ứng xử nén (Hình 2.18a): Trong biểu đồ quan hệ này, đoạn đầu tiên bắt đầu từ điểm ứng suất biến dạng bằng 0 đến điểm ứng suất bằng $0,85 f'_c$ và biến dạng tương ứng bằng $0,85 f'_c / E_c$, được xem là tuyến tính, đoạn thứ 2 nằm ngang kéo dài đến điểm biến dạng bằng $0,004\varepsilon$ và đường thứ 3 suy giảm từ từ và ứng suất về 0 tại điểm biến dạng bằng $0,007\varepsilon$
- Ứng xử kéo uốn (hình 2.18b): Theo [66], độ bền kéo uốn của HPFRC đạt khoảng 5 MPa ở mức biến dạng tương ứng bằng $0,0001\varepsilon$ và không đổi đến khi biến dạng đạt mức ε_{LD} , khi nó xảy ra phá hoại dẻo và mức ứng suất giảm dần về 0 ở ε_{tu} .



a) Mô hình ứng xử nén



b) Mô hình ứng xử kéo

Hình 2.18. Mô hình ứng xử của HPFRC theo đề xuất của Gowripalan [89]

Tất cả các mô hình vừa liệt kê ở trên vẫn chưa dự báo được sức kháng uốn của HPFRC một cách hoàn chỉnh vì chưa kể đến ảnh hưởng của cốt sợi trong vùng chịu kéo, nên không phản ánh chính xác hết các ứng xử phức tạp của dầm xảy ra trong quá trình biến dạng dẻo. Việc tổng hợp và phân tích các hướng dẫn này trong việc khảo sát và tính toán ứng xử uốn của các kết cấu dầm HPFRC vẫn còn hạn chế, chưa đầy đủ nên gây ra nhiều khó khăn cho các kỹ sư xây dựng khi thiết kế và thi công các công trình sử dụng HPFRC.

2.6. Kết luận chương 2

Chương 2 đã trình bày nền tảng lý thuyết cho nghiên cứu, tổng hợp các kiến thức cơ bản và chuyên sâu về HPFRC. Nội dung tập trung vào các yếu tố ảnh hưởng đến tính chất cơ học, gồm bê tông nền, cốt sợi gia cường và vùng chuyển tiếp bề mặt (ITZ). Khái niệm vùng phát triển nứt (FPZ) được làm rõ, cho thấy HPFRC là vật liệu giòn nhờ cơ chế neo chặt của sợi đã hạn chế quá trình mở rộng vết nứt. 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. Đồng thời, chương này phân tích cơ chế phá hoại do mỏi, khái niệm tuổi thọ mỏi và phương pháp dự đoán thông qua đường cong $S - N$.

Ngoài ra, Chương 2 còn 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. Giới thiệu chương

Như đã nêu trong phần Mở đầu, Tổng quan và Chương 1, vật liệu HPFRC được xem là vật liệu xây dựng tiên tiến, khắc phục nhiều hạn chế của bê tông truyền thống, đặc biệt về khả năng kháng nứt, độ dẻo dai và khả năng hấp thụ năng lượng lớn. Tuy nhiên, để ứng dụng hiệu quả HPFRC trong các kết cấu chịu uốn, nhất là dưới tác động của tải trọng lặp, cần có những nghiên cứu định lượng chuyên sâu về ảnh hưởng của từng yếu tố cấu thành vật liệu. Việc phân tích ứng xử cơ học của HPFRC khi chỉ sử dụng một loại sợi gia cường với các hàm lượng khác nhau là bước nền tảng quan trọng nhằm đánh giá vai trò riêng biệt của từng loại sợi.

Trong chương này, tác giả trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm ban đầu về ứng xử uốn của HPFRC sử dụng cốt sợi đơn chịu tải trọng tĩnh và lặp. Nghiên cứu tập trung vào hai loại sợi thép đơn lẻ (sợi lớn có móc và sợi nhỏ trơn thẳng) được sử dụng để gia cường bê tông nền HPFRC với các hàm lượng 0,5%, 1,0% và 1,5% theo thể tích. Các thí nghiệm được thiết kế để phân tích cơ chế phá hoại, khả năng chịu uốn, năng lượng phá hủy, quá trình hình thành – lan truyền vết nứt, cũng như xác định tuổi thọ mỏi và giới hạn bền mỏi của vật liệu. Kết quả thu được nhằm cung cấp cơ sở dữ liệu để định lượng thành phần cốt sợi, làm rõ hiệu quả của từng loại sợi và hàm lượng cụ thể, đồng thời tạo tiền đề cho các nghiên cứu chuyên sâu và phức tạp hơn.

3.1.1. Sơ đồ thí nghiệm

Quá trình thực hiện thí nghiệm gồm các bước như sau:

- Thiết kế thí nghiệm:
Thiết lập sơ đồ thí nghiệm và các mô hình thí nghiệm
Thiết kế mẫu thí nghiệm
- Tiến hành thí nghiệm:

Xác định độ bền chịu uốn của HPFRC dưới tải trọng tĩnh

Xác định năng lượng phá hủy của mẫu uốn HPFRC

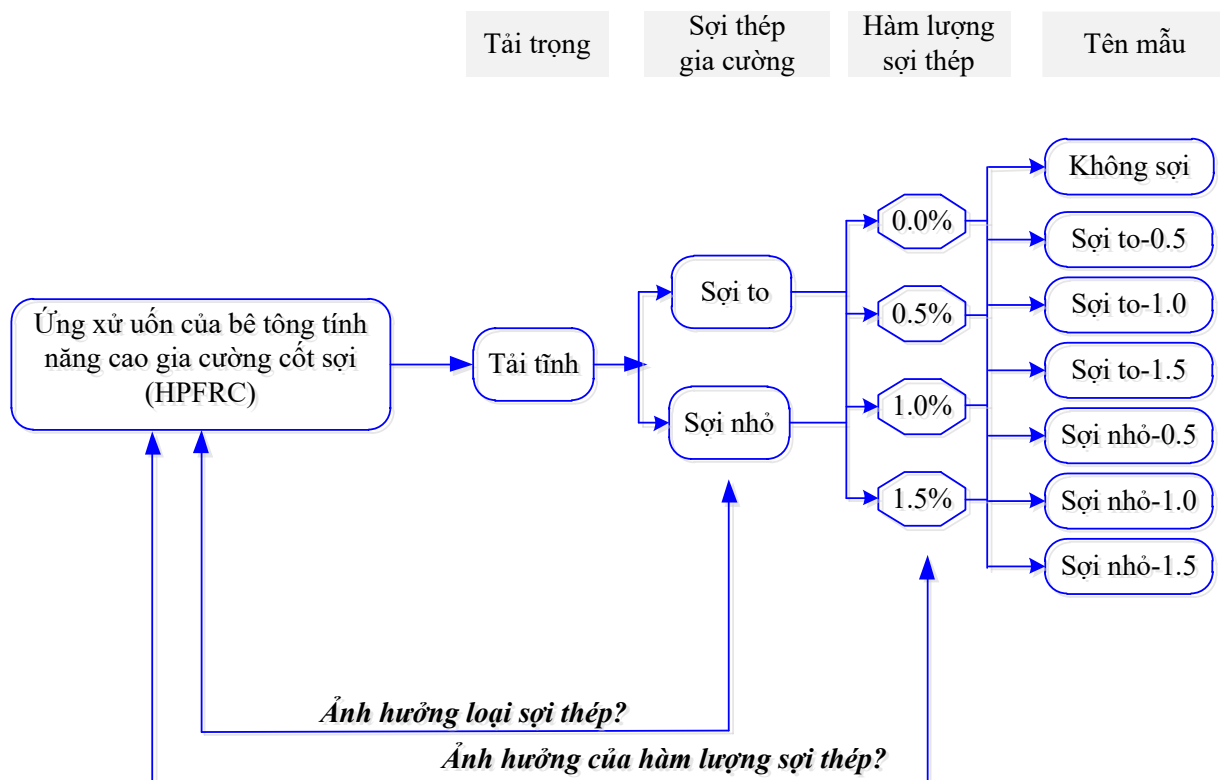
- Đánh giá và xử lý kết quả thí nghiệm

Xác định giá trị tải trọng tương ứng với thời điểm mẫu HPFRC bắt đầu xuất hiện vết nứt f_{LOP} và khả năng chịu lực lớn nhất f_{MOR} bằng thực nghiệm.

Xây dựng đường cong ứng suất- chuyển vị, nhận xét cơ chế phá hoại của mẫu uốn.

Tính toán năng lượng phá hủy của mẫu uốn.

Sơ đồ tổng thể chương trình thí nghiệm thực hiện trong nghiên cứu này được mô tả trong Hình 3.1.



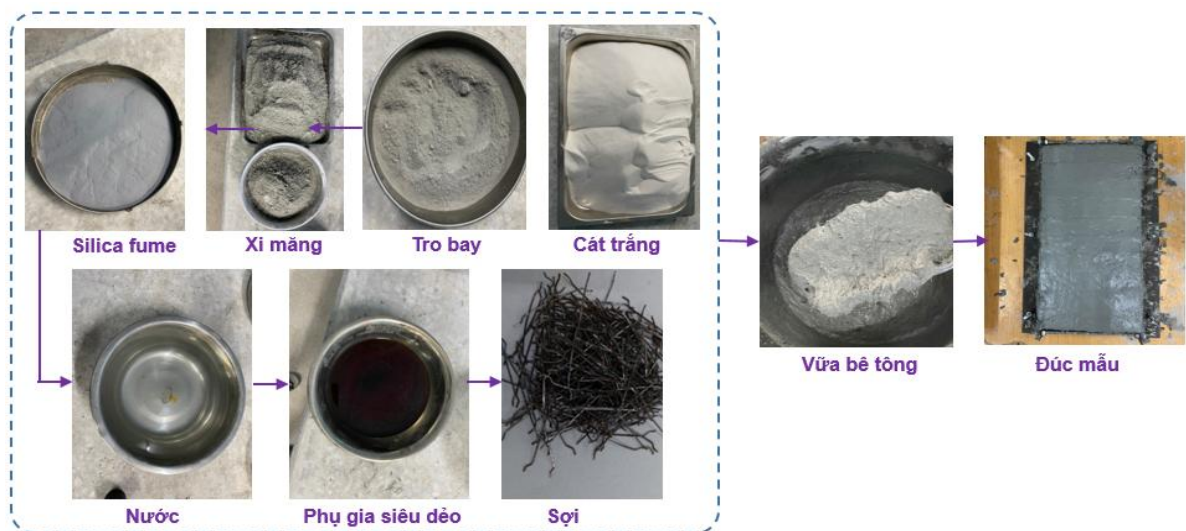
Hình 3.1. Sơ đồ thực hiện thí nghiệm

3.1.2. Chế tạo mẫu thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, các mẫu thí nghiệm được thiết kế và cấu tạo dựa trên TCVN 12392:2018 [90] với tỷ lệ 1:1. Mẫu thí nghiệm dạng lăng trụ có kích thước đồng nhất 40×40×160 mm. Kích thước này phù hợp với thiết bị thí nghiệm uốn lặp

(30 kN – Dynamic Testing System, hãng Pavetest), vốn có tải trọng cực đại 30 kN và buồng chứa mẫu với kích thước hạn chế. Mặc dù cạnh mẫu 40 mm chưa đáp ứng khuyến nghị tối thiểu bằng ba lần chiều dài sợi thép 35 mm nhằm bảo đảm khả năng định hướng ngẫu nhiên theo ba chiều của sợi, kích thước này vẫn phù hợp với các kết cấu thành mỏng hoặc bản mỏng trong thực tế. Do đó, việc sử dụng kích thước mẫu trên vẫn mang tính ứng dụng thực tiễn cao.

Vật liệu nền HPFRC được chế tạo từ các loại vật liệu sẵn có ở Việt Nam, đáp ứng các chỉ tiêu cơ bản trong tiêu chuẩn hiện hành về chế tạo bê tông nặng. Quá trình bảo dưỡng mẫu được thực hiện trong môi trường phòng thí nghiệm ở nhiệt độ phòng, đảm bảo điều kiện chuẩn cho việc đánh giá vật liệu. Dựa trên cơ sở đó, các kết quả và thành phần cấp phối đã được tham khảo và kế thừa từ các công trình nghiên cứu trước đó của Nguyễn Duy Liêm và các cộng sự [50,66,91].



Hình 3.2. Thành phần cấp phối và chế tạo mẫu HPFRC

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 100×200 mm [51]. 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 lần lượt là: 0,0% - 0,5% - 1,0% và 1,5% theo thể tích (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. Theo như thể hiện ở Hình 3.3 và Bảng 3.3, sợi thép to hai đầu móc có đường kính 0,5 mm, dài 35 mm; sợi thép nhỏ trơn thẳng có đường kính 0,2 mm, dài 13 mm. Hai loại sợi thép đều có khối lượng riêng và mô đun đàn hồi lần lượt là 7,9 g/cm³ và 200 GPa nhưng khác biệt ở độ bền kéo. Cụ thể, độ bền kéo sợi to lớn hơn 1200 MPa trong khi độ bền kéo của sợi nhỏ lớn hơn 2500 MPa.

Bảng 3.1. Thành phần cấp phối của HPFRC

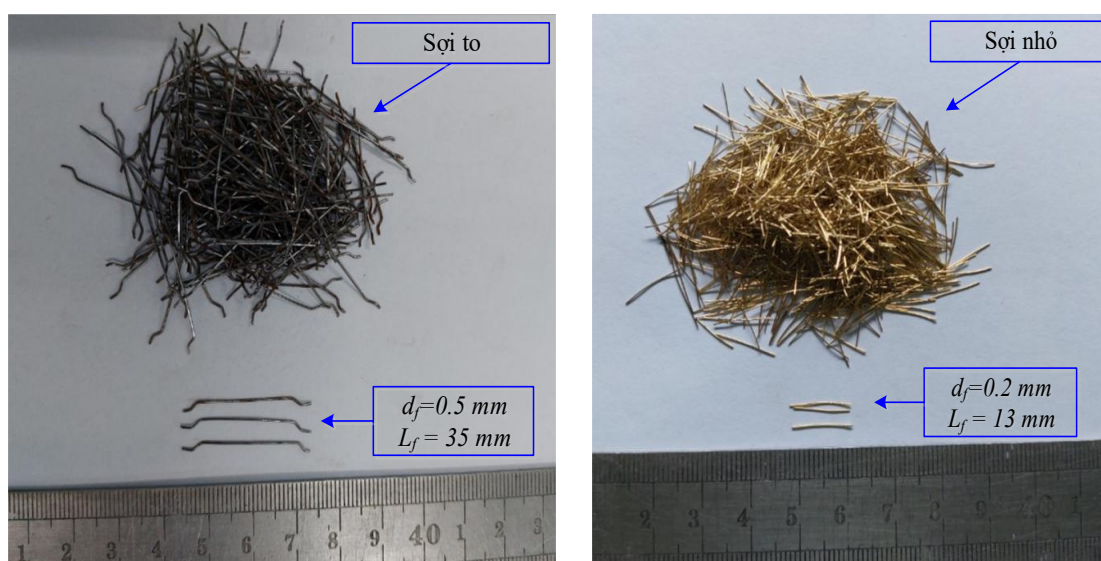
Thành phần	Hàm lượng theo tỷ lệ khối lượng (g/cm³)
Xi- măng (INSEE, PC40)	0,80
Silicafume	0,07
Cát trắng	1,00
Tro bay	0,20
Phụ gia siêu dẻo	0,04
Nước	0,26

Bảng 3.2. Thành phần hóa học và tính chất vật lý của tro bay

Thành phần hóa học (%)	SiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO	Fe₂O₃	SO₃	K₂O + Na₂O	MKN
Giá trị	56,25	20,04	1,90	1,30	3,48	0,58	1,02	9,52
Tính chất vật lý	Khối lượng riêng (g/cm³)				Khối lượng thể tích (g/cm³)			
Giá trị	2,50				1,41			

Bảng 3.3. Tính chất cốt sợi được sử dụng trong chế tạo HPFRC

Loại sợi	Đường kính (mm)	Chiều dài (mm)	Tỷ lệ (L_f / d_f)	Khối lượng riêng (g/cm ³)	Độ bền kéo (MPa)
Sợi to	0,5	35	70	7,9	> 1200
Sợi nhỏ	0,2	13	65	7,9	> 2500



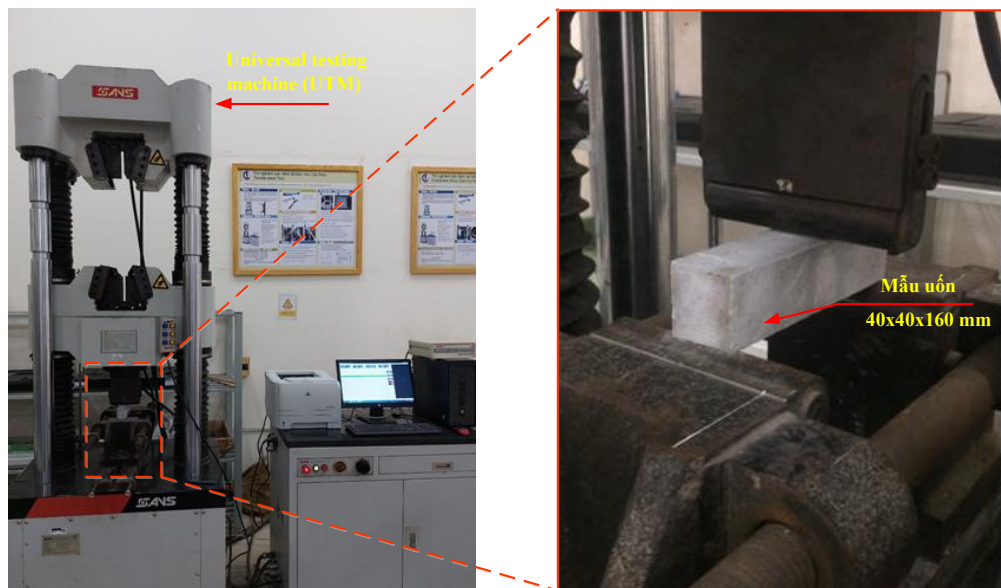
Hình 3.3. Ảnh chụp các loại sợi thép sử dụng trong HPFRC nghiên cứu

3.1.3. Thiết lập thí nghiệm

Hình 3.4 mô tả quá trình thiết lập thí nghiệm uốn 3 điểm của các mẫu uốn HPFRC dưới tải trọng tĩnh. Tất cả các mẫu thử uốn HPFRC đều có tiết diện vuông, kích thước 40×40×160 mm, khoảng cách giữa 2 gối trong thí nghiệm uốn ba điểm là 120 mm. Thí nghiệm được tiến hành trên máy kéo – nén – uốn đa năng (Universal Testing Machine - UTM) có khả năng gia tải đến 1000 kN, tốc độ gia tải 0,2 kN/s. Trong suốt quá trình thí nghiệm, tải trọng và chuyển vị được tự động ghi lại bằng cảm biến lực được cài đặt trực tiếp trong UTM và extensometer tích hợp trong cảm biến vị trí được cài đặt trong DCS Parameter để xử lý số liệu đầu ra. Tất cả thí nghiệm được tiến hành trong môi trường phòng thí nghiệm được kiểm soát chặt chẽ với nhiệt độ phòng là $28 \pm 5^\circ\text{C}$ và độ ẩm 70 – 80%. Độ bền uốn lớn nhất ($f_{\max}$) của mẫu uốn

HPFRC được tính theo công thức (3.1). Trong đó, P_{max} là tải trọng cực đại được tự động ghi lại trong quá trình thí nghiệm, b và h lần lượt là chiều rộng và chiều cao của mẫu thử uốn, L là chiều dài nhịp giữ hai gối đỡ. Mỗi loạt mẫu thí nghiệm có ít nhất 3 mẫu, giá trị cuối cùng được lấy để đánh giá và phân tích là kết quả trung bình nhằm giảm sai số ngẫu nhiên và phản ánh chính xác đặc trưng cơ học của vật liệu. Cần lưu ý rằng các thông số lực (P), mô men (M) và ứng suất kéo uốn (f) có mối liên hệ chặt chẽ với nhau thông qua các đặc trưng hình học của mẫu thí nghiệm. Việc trình bày đồng thời nhiều thông số nhằm phục vụ các mục đích đánh giá khác nhau, như khả năng chịu tải, nội lực tác dụng và đặc tính cơ học của vật liệu, từ đó tạo thuận lợi cho việc so sánh và phân tích kết quả nghiên cứu.

$$f_{max} = \frac{3P_{max}L}{2bh^2} \quad (3.1)$$



Hình 3.4. Thiết lập thí nghiệm uốn 3 điểm dưới tải trọng tĩnh

3.2. Ứng xử uốn của HPFRC dưới tải trọng tĩnh

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

Trong Bảng 3.4, các thông số quan trọng được phân tích bao gồm: tải trọng uốn lớn nhất (P_{max}) - đánh giá khả năng chịu lực tối đa của vật liệu, mô men uốn lớn nhất

(M_{max}), cường độ chịu uốn lớn nhất (f_{max}) và khả năng võng lớn nhất (δ_{MOR}) - đo lường biến dạng tối đa của mẫu dưới tác động của tải trọng. Hình 3.6 thể hiện đường cong ứng xử mối quan hệ giữa ứng suất và độ võng của bảy các loạt mẫu HPFRC: Không sợi (Hình 3.5a), Sợi to-0.5 (Hình 3.5b), Sợi nhỏ-0.5 (Hình 3.5c), Sợi to-1.0 (Hình 3.5d), Sợi nhỏ-1.0 (Hình 3.5f) Sợi to-1.5 (Hình 3.5e), Sợi nhỏ-1.5 (Hình 3.5g).

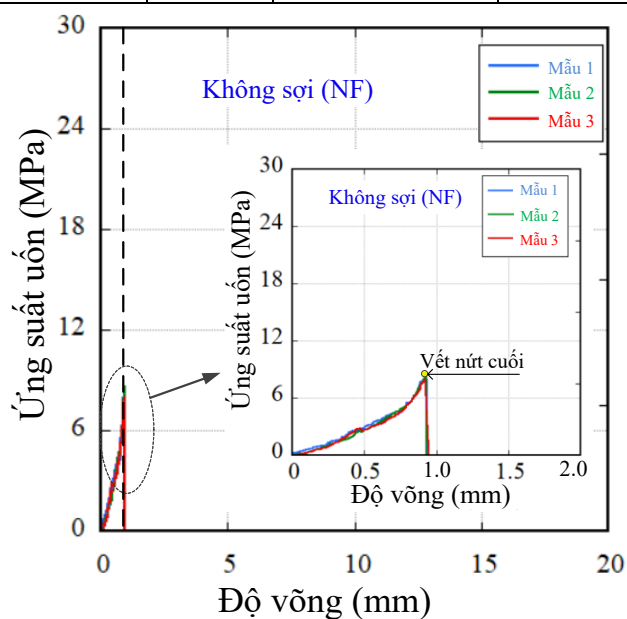
Theo như quan sát ở Hình 3.5, loạt mẫu Không sợi thể hiện khả năng chịu tải yếu nhất trong khi Sợi nhỏ-1.5 (Hình 3.5g) cho thấy sức kháng uốn tốt nhất. Tại Hình 3.5a, các đường cong tương đối tập trung gần như tuyến tính đến đỉnh sau đó suy giảm nhanh chóng khi tải trọng giảm đột ngột. Hiện tượng này có thể giải thích là do không có sợi thép gia cường trong mẫu Không sợi nên phá hoại diễn ra rất nhanh và gây ra phá hoại giòn. Khác với mẫu Không sợi, các loạt mẫu khi gia cường sợi thép thể hiện các đường cong tương đối nhất quán, tuyến tính đến đỉnh sau đó ngày càng phân tán và suy giảm từ từ khi vượt qua đỉnh, như mô tả ở các Hình 3.5c, 3.5d, 3.5f và 3.5g.

Theo Bảng 3.4, kết quả thí nghiệm chỉ ra rằng khi hàm lượng sợi thép tăng từ 0 đến 1,5% giá trị ứng suất uốn cực đại tăng mạnh (xấp xỉ gấp 2–3 lần). Đây là hệ quả trực tiếp của cơ chế bắc cầu sợi (fiber bridging) sau nứt, sợi đóng vai trò truyền lực kéo và phân tán ứng suất qua vết nứt, làm tăng khả năng chịu ứng suất tiết diện sau khi lớp bê tông nền đã nứt. Điều này phản ánh sự mở rộng và ổn định hóa vùng phát triển nứt (FPZ), cho phép vật liệu duy trì trạng thái chịu lực ở mức ứng suất cao hơn so với bê tông không sợi, phản ánh cơ chế phá hoại mang tính dẻo của vật liệu. Nhìn chung, khi gia cường sợi thép trong vữa HPFRC cho thấy những cải thiện rõ ràng về sức kháng uốn, sợi thép đóng vai trò kiểm soát sự mở rộng vết nứt, qua đó cải thiện đáng kể khả năng chịu uốn và độ dẻo của vật liệu. Đặc biệt, mẫu chứa 1,5% sợi nhỏ (Hình 3.5g) cho thấy hiệu suất cơ học vượt trội so với các trường hợp khác. Những cải thiện này được thảo luận chi tiết trong Chương 4.

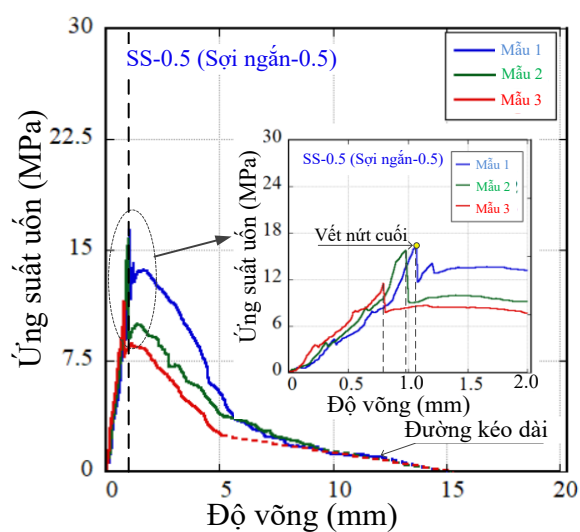
Bảng 3.4. Kết quả thí nghiệm uốn dầm HPFRC dưới tải trọng tĩnh

Tên mẫu	Ký hiệu mẫu	Lực $P_{\max}$ (kN)	Mô men M_{MOR} (kN.mm)	Cường độ chịu uốn, f_{MOR} (MPa)	Độ võng tại MOR, δ_{MOR} (mm)
Không sợi (đối chứng)	Mẫu thử 1	2,83	84,80	7,95	0,94
	Mẫu thử 2	3,07	92,10	8,63	0,93
	Mẫu thử 3	2,82	84,60	7,93	0,92
	Giá trị TB	2,91	87,17	8,17	0,93
	<i>Độ lệch chuẩn</i>	<i>0,14</i>	<i>4,27</i>	<i>0,40</i>	<i>0,01</i>
Sợi to- 0.5	Mẫu thử 1	2,77	83,10	7,79	0,76
	Mẫu thử 2	3,35	100,50	9,42	0,77
	Mẫu thử 3	3,39	101,70	9,53	0,70
	Giá trị TB	3,17	95,10	8,92	0,74
	<i>Độ lệch chuẩn</i>	<i>0,35</i>	<i>10,41</i>	<i>0,98</i>	<i>0,04</i>
Sợi to - 1.0	Mẫu thử 1	5,75	172,50	16,17	1,66
	Mẫu thử 2	4,38	131,40	12,32	1,16
	Mẫu thử 3	5,87	176,10	16,51	1,28
	Giá trị TB	5,33	160,00	15,00	1,37
	<i>Độ lệch chuẩn</i>	<i>0,83</i>	<i>24,83</i>	<i>2,33</i>	<i>0,26</i>
Sợi to - 1.5	Mẫu thử 1	5,66	170	15,93	0,62
	Mẫu thử 2	5,74	172	16,15	0,61
	Mẫu thử 3	6,10	183	17,16	0,61
	Giá trị TB	5,84	175	16,41	0,61
	<i>Độ lệch chuẩn</i>	<i>0,23</i>	<i>6,98</i>	<i>0,65</i>	<i>0,00</i>
Sợi nhỏ- 0.5	Mẫu thử 1	5,82	174,60	16,37	1,07
	Mẫu thử 2	5,59	167,70	15,72	0,98
	Mẫu thử 3	4,09	122,70	11,50	0,79
	Giá trị TB	5,17	155,00	14,53	0,95
	<i>Độ lệch chuẩn</i>	<i>0,94</i>	<i>28,18</i>	<i>2,64</i>	<i>0,14</i>
Sợi nhỏ - 1.0	Mẫu thử 1	6,16	184,80	17,33	1,29
	Mẫu thử 2	5,70	171,00	16,03	1,62

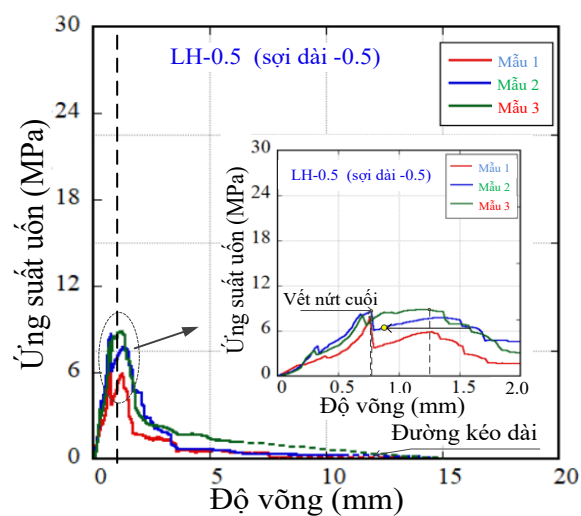
	Mẫu thử 3	5,44	163,20	15,30	1,31
	Giá trị TB	5,77	173,00	16,22	1,41
	Độ lệch chuẩn	0,36	10,94	1,03	0,19
Sợi nhỏ - 1.5	Mẫu thử 1	9,66	290	27,17	0,86
	Mẫu thử 2	10,00	300	28,13	0,85
	Mẫu thử 3	9,95	299	27,98	0,86
	Giá trị TB	9,87	296	27,76	0,86
	Độ lệch chuẩn	0,18	5,51	0,52	0,01



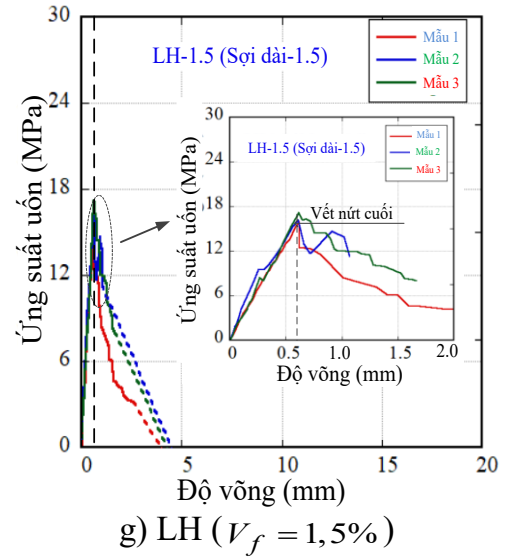
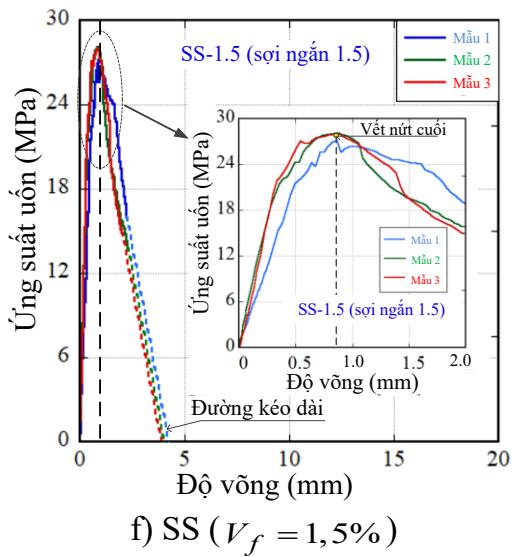
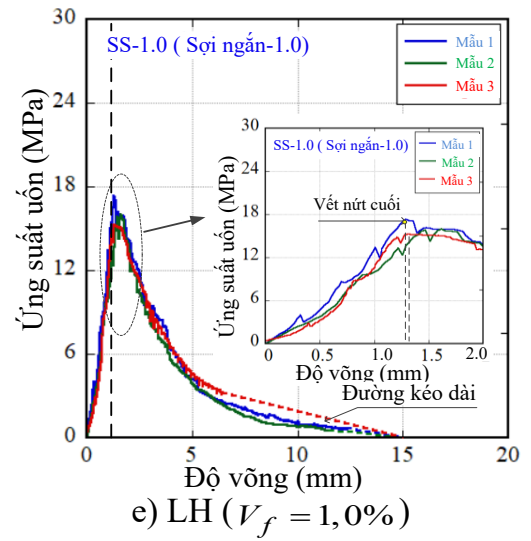
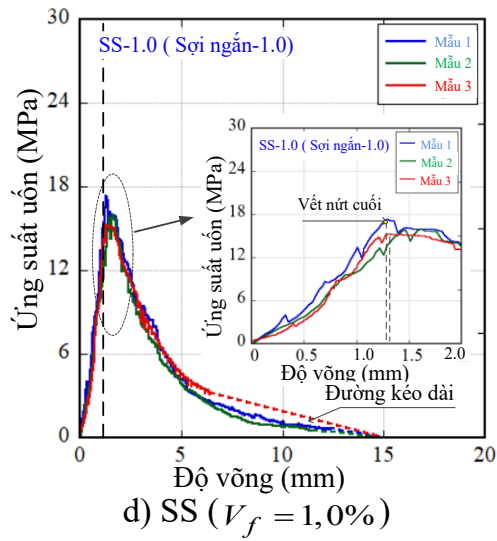
a) Không sợi (NF; $V_f = 0,0\%$)



b) SS ($V_f = 0,5\%$)



c) LH ($V_f = 0,5\%$)



Hình 3.5. Đường cong ứng xử uốn của HPFRC

Dựa trên quan sát ở Hình 3.5a, nhóm mẫu Không sợi thể hiện tính chất cơ học kém nhất, với cường độ chịu uốn trung bình (f_{MOR}) là 8,17 MPa và độ võng (δ_{MOR}) là 0,93 mm. Ngược lại, nhóm Sợi ngắn-1.5 thể hiện tính chất cơ học tốt nhất với $f_{MOR} = 27,76$ MPa, độ võng $\delta_{MOR} = 0,86$ mm dưới tác dụng của tải trọng uốn. Các đường cong tương đối tập trung và gần như tuyến tính cho đến khi đạt đỉnh, sau đó giảm đột ngột khi mẫu bị phá hoại. Hiện tượng này xảy ra do mẫu không có sợi thép gia cường, dẫn đến phá hoại nhanh và giòn. Ngược lại với mẫu Không sợi, các mẫu có sợi gia cường thể hiện các đường cong tương đối nhất quán và tuyến tính cho đến đỉnh. Sau

khi vượt qua đỉnh, các đường cong bắt đầu phân tán và suy giảm từ từ, như mô tả trong Hình 3.5c, 3.5d, 3.5f và 3.5g.

Mặc dù ứng suất uốn tăng theo hàm lượng sợi, nhưng mức độ gia tăng không tuyến tính, Ứng suất tăng mạnh từ mẫu không sợi đến mẫu 1,0% chứa hàm lượng sợi, sau đó có xu hướng tiệm cận ở mức 1,5%. Kết quả này cho thấy tại hàm lượng sợi cao, hiệu quả gia cường kháng uốn bị chi phối bởi sự bão hòa mật độ sợi trong vùng phát triển nứt (FPZ). Khả năng tương tác sợi - sợi và phân bố sợi không hoàn toàn đồng nhất. Về bản chất, vùng FPZ đã đạt đến trạng thái “bão hòa sợi” để kìm hãm sự lan truyền vết nứt, nên việc bổ sung thêm sợi không mang lại lợi ích nhiều.

So với mẫu không sợi có độ võng rất nhỏ, các mẫu HPFRC có sợi thể hiện độ võng tại MOR lớn hơn rõ rệt, đặc biệt với hàm lượng sợi lớn hơn 1,0%. Điều này phản ánh quá trình mở rộng vết nứt ổn định thay vì bị phá hoại giòn. Khả năng tiêu tán năng lượng lớn hơn thông qua việc sợi bị kéo tuột. Trong cơ học phá hủy, độ võng lớn hơn đồng nghĩa với năng lượng phá hủy toàn phần cao hơn. Vì thế, việc gia cường sợi thép trong HPFRC giúp cải thiện rõ ràng về sức kháng uốn, hạn chế tốc độ mở rộng vết nứt phá hoại sau khi đạt tải tối đa. Hàm lượng sợi đóng vai trò là tham số điều khiển chuyển tiếp từ phá hoại giòn sang phá hoại dẻo trong HPFRC. Quan trọng hơn, sự kết hợp giữa ứng suất uốn cao và độ võng lớn ở các mẫu có hàm lượng sợi trung bình–cao cho thấy HPFRC không chỉ mạnh hơn mà còn an toàn hơn về mặt phá hoại, đặc biệt phù hợp cho các cấu kiện chịu uốn và tải trọng lặp.

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

Các phân tích về ứng xử phá hủy của HPFRC có thể được tham chiếu theo nhiều hệ tiêu chuẩn khác nhau như ASTM International, EN 14651 hoặc RILEM. Trong luận án này, các thông số phá hủy được xác định dựa trên các định nghĩa phổ biến trong lĩnh vực cơ học phá hủy vật liệu xi măng, đồng thời được đối chiếu và đánh giá thông qua các kết quả nghiên cứu công bố gần đây phù hợp với vật liệu HPFRC.

Năng lượng phá hủy là thông số cơ học quan trọng để mô tả quá trình hình thành và lan truyền vết nứt, khả năng kháng nứt của vật liệu, thường được ký hiệu là G_{II} (năng lượng phá hủy) [91,92]. G_{II} được xác định trên cơ sở năng lượng tiêu tán trong

thí nghiệm uốn, thông qua việc tích phân diện tích dưới đường cong tải trọng–độ võng $(f - \delta)$ thu được từ thí nghiệm. Về mặt cơ học, năng lượng phá hủy toàn phần được xem là tổng năng lượng tích lũy trong hai giai đoạn đặc trưng của quá trình chịu tải, bao gồm: giai đoạn tăng cứng cơ học và giai đoạn giảm cường độ sau nứt được gắn với sự mở rộng và lan truyền vết nứt.

+ Năng lượng phá hủy vùng tăng cứng cơ học hay được gọi là năng lượng hấp thụ (ký hiệu G_w): được xác định là phần diện tích dưới đường cong $(f - \delta)$ kể từ khi bắt đầu gia tải $\delta = 0$ đến điểm B như thể hiện trong công thức (3.2), tương ứng với ứng suất uốn cực đại (MOR) của mẫu thử. Điểm B được xem là mốc chuyển tiếp giữa trạng thái làm việc đàn hồi–tăng cứng và trạng thái mềm do sự hình thành vết nứt chính.

$$G_w = \int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon=\varepsilon_{MOR}} (f(\varepsilon)d(\varepsilon)) \times S = \int_0^{S\varepsilon_{MOR}} f(S\varepsilon)d(S\varepsilon) = \int_{\delta=0}^{\delta=\delta_{MOR}} f(\delta)d(\delta) \quad (3.2)$$

+ Năng lượng phá hủy vùng giảm cứng cơ học (ký hiệu là G_s): là phần diện tích trên biểu đồ $(f - \delta)$ bắt đầu từ điểm B (MOR) đến khi kết thúc đường kéo dài (điểm E) được mô tả trong công thức (3.3).

$$G_s = \int_{\varepsilon=\varepsilon_{MOR}}^{\varepsilon=\varepsilon_e} (f(\varepsilon)d(\varepsilon)) \times S = \int_{\varepsilon_{MOR}S}^{\varepsilon_e S} (f(\varepsilon S)d(\varepsilon S)) = \int_{\delta=\delta_{MOR}}^{\delta=\delta_E} f(\delta)d(\delta) \quad (3.3)$$

+ Năng lượng phá hủy toàn phần (G_{tt}): được xác định bằng tổng năng lượng tích lũy vùng tăng cứng cơ học (G_w) và vùng mềm hóa (G_s) được trình bày thông qua biểu thức (3.4):

$$G_{tt} = \sum G = G_w + G_s = \int_{\delta=0}^{\delta=\delta_{MOR}} f(\delta)d(\delta) + \int_{\delta=\delta_{MOR}}^{\delta=\delta_E} f(\delta)d(\delta) \quad (3.4)$$

trong đó:

S: chiều dài nhịp

δ_{MOR} : độ võng ở vết nứt sau (điểm B)

δ_E : độ võng tại điểm kết thúc đường biến dạng (điểm E)

ε : độ dãn dài tương đối của dầm

Bảng 3.5. Thông số năng lượng phá hủy của vật liệu HPFRC

Tên mẫu	Ký hiệu mẫu	δ	f_t	G_w	G_s	G_u	G_s / G_u
		mm	MPa	kJ/m ²	kJ/m ²	kJ/m ²	
Không sợi (NF)	Mẫu thử 1	0,94	7,95	2,63	0,00	2,63	0,015
	Mẫu thử 2	0,93	8,63	2,62	0,00	2,62	
	Mẫu thử 3	0,92	7,93	2,49	0,12	2,61	
	Giá trị TB	0,93	8,17	2,58	0,04	2,62	
	<i>Độ lệch chuẩn</i>	0,01	0,40	0,08	0,07	0,15	
Sợi nhỏ-0.5 (SS-0.5)	Mẫu thử 1	1,07	16,37	6,36	58,04	64,41	0,900
	Mẫu thử 2	0,98	15,72	5,53	46,20	51,74	
	Mẫu thử 3	0,79	11,50	4,16	38,07	42,24	
	Giá trị TB	0,95	14,53	5,35	47,44	52,79	
	<i>Độ lệch chuẩn</i>	0,14	2,64	1,11	10,04	11,12	
Sợi nhỏ -1.0 (SS-1.0)	Mẫu thử 1	1,29	17,33	10,38	49,29	59,67	0,810
	Mẫu thử 2	1,62	16,03	13,48	38,90	52,38	
	Mẫu thử 3	1,31	15,30	8,62	54,08	62,70	
	Giá trị TB	1,41	16,22	10,83	47,42	58,25	
	<i>Độ lệch chuẩn</i>	0,19	1,03	2,46	7,76	5,31	
Sợi nhỏ -1.5 (SS-1.5)	Mẫu thử 1	0,86	27,17	14,35	47,06	61,41	0,730
	Mẫu thử 2	0,85	28,13	15,85	40,62	56,47	
	Mẫu thử 3	0,86	27,98	17,34	38,46	55,80	
	Giá trị TB	0,86	27,76	15,85	42,05	57,90	
	<i>Độ lệch chuẩn</i>	0,01	0,52	1,50	4,47	3,06	
Sợi to-0.5 (LH-0.5)	Mẫu thử 1	0,76	7,79	2,08	9,20	11,28	0,780
	Mẫu thử 2	0,77	9,42	3,20	15,07	18,28	
	Mẫu thử 3	0,70	9,53	6,62	17,36	23,99	
	Giá trị TB	0,74	8,91	3,97	13,88	17,85	
	<i>Độ lệch chuẩn</i>	0,04	0,97	2,37	4,21	6,36	

Sợi to -1.0 (LH-10)	Mẫu thử 1	1,66	16,17	12,60	67,94	80,54	0,850
	Mẫu thử 2	1,16	12,32	5,78	40,15	45,93	
	Mẫu thử 3	1,28	16,51	8,71	42,31	51,02	
	Giá trị TB	1,37	15,00	9,03	50,13	59,16	
	<i>Độ lệch chuẩn</i>	0,26	2,33	3,42	15,46	18,69	
Sợi to -1.5 (LH-1.5)	Mẫu thử 1	0,62	15,93	5,10	14,44	19,54	0,800
	Mẫu thử 2	0,61	16,15	5,62	25,47	31,09	
	Mẫu thử 3	0,61	17,16	4,69	22,80	27,50	
	Giá trị TB	0,61	16,41	5,14	20,90	26,04	
	<i>Độ lệch chuẩn</i>	0,00	0,65	0,47	5,76	5,91	

Bảng 3.5 cung cấp các thông số phá hủy của các loạt mẫu HPFRC dưới tải trọng uốn. Theo Bảng 3.5, loạt mẫu NF tạo ra năng lượng phá hủy là thấp nhất trong cả ba tham số G_w , G_s và G_{tt} . Thông số G_w của các loạt mẫu được sắp xếp như sau: SS-1.5 > SS-1.0 > LH-1.0 > SS-0.5 > LH-1.5 > LH-0.5 > NF, trong khi đó, thông số G_s của các loạt mẫu được sắp xếp theo thứ tự như sau: LH-1.0 > SS-1.0 > SS-0.5 > SS-1.5 > LH-1.5 > LH-0.5 > NF. Nhìn chung, năng lượng phá hủy toàn phần là lớn nhất ở hàm lượng 1,0% sợi cho cả hai loại sợi trơn ngắn và sợi dài có móc.

Sự khác biệt giữa loại sợi (sợi lớn có móc và sợi nhỏ trơn) cũng phản ánh rõ trong phân bố năng lượng phá hủy. Các mẫu sử dụng sợi lớn cho giá trị G_{tt} và G_s cao hơn, cho thấy vai trò trội của sợi lớn trong việc truyền lực kéo qua vết nứt và duy trì khả năng chịu lực ở độ mở vết nứt lớn. Ngược lại, sợi nhỏ góp phần kiểm soát vi nứt và tăng tính ổn định ban đầu của FPZ, nhưng mức năng lượng tiêu tán tổng thể thấp hơn.

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

Chiều dài nứt liên kết L_{cz} là tham số then chốt trong cơ học phá hủy, phản ánh kích thước đặc trưng của vùng FPZ và mức độ phi cục bộ của quá trình phá hoại và được xác định theo biểu thức (3.5). Đây là phương trình dùng tính toán L_{cz} của

HPFRC dựa trên mô hình song tuyến tính của giá trị ứng suất tại vị trí mở rộng vết nứt, được phát triển bởi Hillerborge cùng các cộng sự [93]. Trong luận án này, chiều dài nứt liên kết được xem là một đại lượng mang tính quy ước theo lý thuyết, không phải là một chiều dài vật lý thực sự.

$$L_{cz} = \frac{EG_s}{(f_{MOR})^2} \quad (3.5)$$

Trong đó:

E : là mô đun đàn hồi của HPFRC, biểu thị độ cứng của vật liệu này

f_{MOR} : là độ bền uốn lớn nhất của mẫu uốn HPFRC

Mô đun đàn hồi E phản ánh ứng xử đàn hồi tuyến tính ban đầu của vật liệu, chủ yếu do lớp bê tông nền quyết định. Tuy nhiên, kết quả thí nghiệm cho thấy khi tăng hàm lượng sợi từ 0- 0,5% - 1,0% - 1,5%, giá trị E có xu hướng tăng, đặc biệt rõ với các mẫu có hàm lượng sợi thường (SS-1.5, LH-1.5). Kết quả này cho thấy sợi thép không chỉ tham gia vào giai đoạn sau nứt mà còn đóng vai trò gia cường vi mô, hạn chế sự hình thành và mở rộng các vết nứt nhỏ ngay từ giai đoạn đàn hồi.

Sự gia tăng mô đun đàn hồi E phản ánh mức độ cố định biến dạng sớm của vùng FPZ tiềm năng, tức là vùng vật liệu chịu tổn thương trước nứt trở nên “cứng” hơn khi có sự hiện diện của sợi. Mẫu không sợi có L_{cz} rất nhỏ, phản ánh FPZ hẹp và phá hoại giòn, nơi vết nứt tập trung mạnh tại mũi nứt. Khi bổ sung sợi, L_{cz} tăng đột biến, đặc biệt ở hàm lượng sợi thấp–trung bình (SS-0,5, SS-1,0), cho thấy FPZ được mở rộng đáng kể nhờ cơ chế bắc cầu sợi. Ở hàm lượng sợi cao hơn ($\approx 1,5\%$), L_{cz} có xu hướng giảm hoặc tiệm cận, cho thấy sự ổn định hóa FPZ: vết nứt không cần lan rộng thêm để tiêu tán năng lượng, mà năng lượng được hấp thụ chủ yếu thông qua kéo tuột và biến dạng của sợi. Về bản chất, sợi làm chuyển cơ chế phá hoại từ tập trung cục bộ sang phân bố không gian, dẫn đến L_{cz} lớn hơn so với bê tông không sợi [46].

Điều đáng chú ý là các mẫu có E cao hơn không nhất thiết có L_{cz} lớn hơn. Từ đây cho thấy E và L_{cz} phản ánh hai khía cạnh cơ học khác nhau:

- E được định nghĩa là độ cứng đàn hồi ban đầu,
- L_{cz} được định nghĩa đặc trưng phá hoại và mức độ phi cục bộ của FPZ.

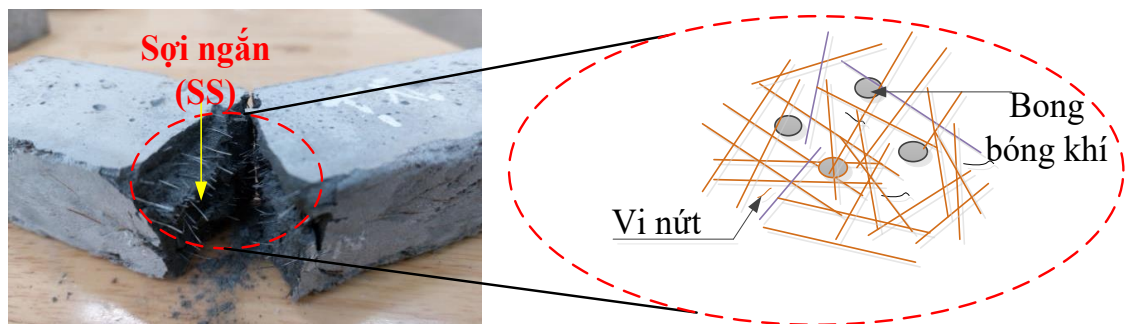
Sự kết hợp giữa E tương đối cao và L_{cz} lớn vừa phải (điển hình ở các mẫu có hàm lượng sợi trung bình–cao) là biểu hiện của ứng xử uốn tối ưu, vừa đủ cứng ở giai đoạn đầu, vừa đủ dẻo và ổn định trong giai đoạn sau nứt.

Do đó, việc lựa chọn và hiệu chỉnh E và L_{cz} theo hàm lượng sợi là điều kiện tiên quyết để mô phỏng chính xác ứng xử uốn tĩnh và uốn mỏi của HPFRC.

Bảng 3.6. Tương quan giữa độ cứng và chiều dài vết nứt của HPFRC

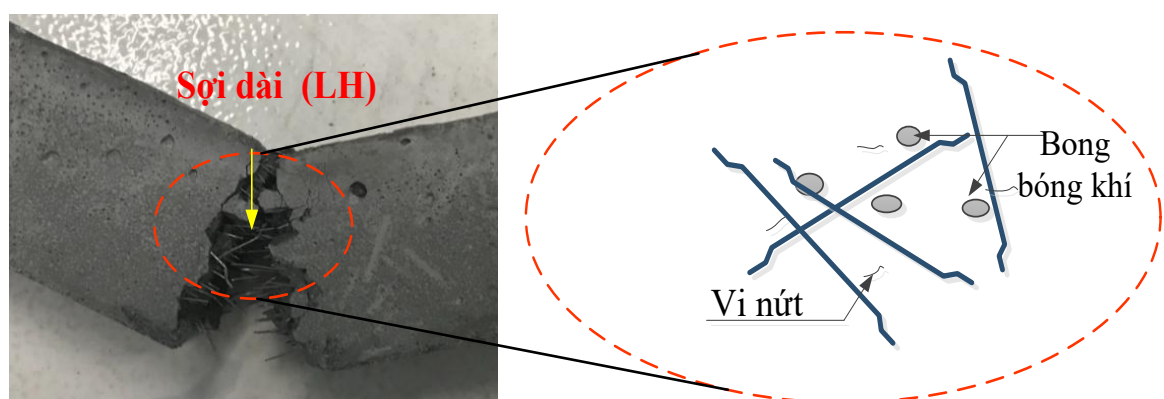
Loại mẫu	Độ cứng, E (MPa)	Chiều dài vết nứt L_{cz} (mm)
NF	934,92	0,58
SS-0.5	2272,10	519,85
SS-1.0	1396,57	257,35
SS-1.5	4155,17	226,88
LH-0.5	896,32	152,95
LH-1.0	1277,12	284,44
LH-1.5	3144,65	243,77

Với loại sợi trơn ngắn, năng lượng phá hủy luôn cao hơn loại sợi dài có móc hai đầu, vì khi các sợi thẳng, chiều dài cần thiết của sợi thép để cung cấp đủ diện tích tiếp xúc với lớp bê tông nền, số lượng sợi thép phân bố trong một đơn vị diện tích bề mặt tăng lên, làm tăng giá trị ứng suất kéo bên trong sợi thép như có thể thấy ở Hình 3.6. Rõ ràng, khi hàm lượng sợi tăng lên, mật độ phân bố sợi dày đặc hơn nên năng lượng phá hủy cũng tăng theo.



Hình 3.6. Sự phân bố của sợi thép ngắn trong lớp bê tông nền

Với sợi dài có móc hai đầu, khả năng xuất hiện vết nứt đầu tiên ở vùng giữa sợi là rất thấp, do đó, khoảng cách từ vết nứt đến cuối sợi trong nhiều trường hợp trở nên ngắn hơn, điều này gây ra sự suy giảm ứng suất do sự mất mát năng lượng ở mặt tiếp xúc của sợi và lớp bê tông nền khiến sợi bị kéo tụt ra ngoài. Sợi có móc hai đầu tạo nên lực neo cơ học rất rõ ràng quanh vị trí phát triển vết nứt, dẫn đến sức kháng uốn lớn hơn vì cho sự phân bố lại ứng suất trong phần lớp bê tông nền bao quanh sợi được thấy ở Hình 3.7. Thêm vào đó, chiều dài sợi lớn làm cho các sợi thép bị rơi và vón cục trong quá trình phối trộn, làm cho mật độ phân bố của sợi thép trong lớp bê tông nền không đồng đều. Và trong trường hợp sợi quá dài, sợi có thể bị cắt đứt trước khi bị kéo đứt vì sợi bị uốn do chiều dài quá lớn.



Hình 3.7. Sự phân bố của sợi thép dài có móc hai đầu trong lớp bê tông nền

Kết quả cho thấy hàm lượng sợi ảnh hưởng đồng thời đến mô đun đàn hồi và chiều dài nứt liên kết của HPFRC. Sự gia tăng mô đun đàn hồi E phản ánh vai trò gia cường vi mô của sợi trong việc hạn chế hình thành các vết nứt rất nhỏ ở giai đoạn đàn

hồi, trong khi sự thay đổi của L_{cz} cho thấy vùng FPZ được mở rộng và ổn định hơn nhờ cơ chế bắc cầu sợi. Xu thế tiệm cận của L_{cz} ở hàm lượng sợi cao cho thấy sự bão hòa của cơ chế phá hoại không cục bộ. Đây là cơ sở quan trọng cho việc hiệu chỉnh mô hình Damage–Plastic khi mô phỏng ứng xử uốn của HPFRC.

3.2.4. Vai trò của phân bố và định hướng sợi trong HPFRC

Kết quả thí nghiệm từ Bảng 3.5 và 3.6 cho thấy việc gia cường sợi làm thay đổi rõ rệt ứng xử cơ học của HPFRC so với loạt mẫu không sợi. Loạt mẫu không sợi có năng lượng phá hủy toàn phần rất thấp, trong đó gần như toàn bộ năng lượng tập trung ở giai đoạn tăng cứng, được tích lũy trước khi xuất hiện vết nứt chính, phản ánh ứng xử phá hủy giòn với vùng phát triển nứt (FPZ) ngắn. Ngược lại, các mẫu có sợi thể hiện sự gia tăng đáng kể năng lượng hấp thu, chủ yếu ở giai đoạn giảm mềm, G_s/G_u dao động từ 0,73–0,90. Đây là bằng chứng rõ ràng cho thấy cơ chế bắc cầu sợi đã chuyển phá hủy từ giòn sang phá hủy tiêu tán năng lượng, đặc trưng của HPFRC. Mẫu không sợi (NF) có mô đun đàn hồi thấp nhất, ($E \approx 935$ MPa), điều này chứng tỏ ứng xử cơ học trong mẫu không sợi chịu quyết định hoàn toàn bởi tính chất của nền bê tông, không có cơ chế chuyển tải ứng suất qua vết nứt vi mô. Khi bổ sung sợi, mức độ hấp thu năng lượng, mô đun đàn hồi E , chiều dài vết nứt liên kết tăng đáng kể nhưng không theo quy luật tuyến tính với hàm lượng sợi, cho thấy hiệu quả cơ học phụ thuộc nhiều hơn vào mức độ định hướng và phân bố đồng đều của sợi. Điều này thể hiện vai trò chi phối của cơ chế bắc cầu sợi trong việc duy trì khả năng chuyển tải ứng suất và làm chậm quá trình phát triển vết nứt ngay từ giai đoạn chịu tải ban đầu. Đồng thời vùng FPZ được mở rộng đáng kể so với bê tông không sợi, góp phần ổn định quá trình hình thành và lan truyền vết nứt. Chiều dài vết nứt quan sát được ở các mẫu có sợi lớn hơn đáng kể so với mẫu không sợi, cho thấy sự mở rộng của vùng phát triển nứt (FPZ) nhờ cơ chế cầu nối của sợi. Các mẫu có định hướng sợi thuận lợi thể hiện chiều dài vết nứt lớn hơn, phản ánh khả năng làm giảm tập trung ứng suất tại đầu mút vết nứt và thúc đẩy quá trình lan truyền vết nứt ổn định. Ngược lại, ở hàm lượng sợi cao, mặc dù độ cứng vật liệu tăng, chiều dài vết nứt có xu hướng giảm, cho thấy sự xuất hiện của hiện tượng tập trung phá hủy cục bộ do

tương tác sợi–sợi và sự suy giảm hiệu quả phân bố sợi. Các kết quả cho thấy mô đun đàn hồi chủ yếu phản ánh độ cứng ban đầu của vật liệu, trong khi khả năng kháng nứt và ứng xử sau nứt của HPFRC phụ thuộc mạnh vào năng lượng tiêu tán và sự phát triển của vùng FPZ. Do đó, việc đánh giá và thiết kế HPFRC cần được thực hiện trên cơ sở kết hợp các chỉ tiêu đàn hồi với các tham số phá hủy, nhằm phản ánh đầy đủ bản chất cơ học của quá trình hình thành và lan truyền vết nứt.

3.3. Ứng xử uốn của HPFRC dưới tải trọng lặp

3.3.1. Thiết lập thí nghiệm

Quá trình thí nghiệm uốn 3 điểm dưới tải trọng lặp và phân tích dữ liệu được tiến hành sau thí nghiệm uốn tĩnh.

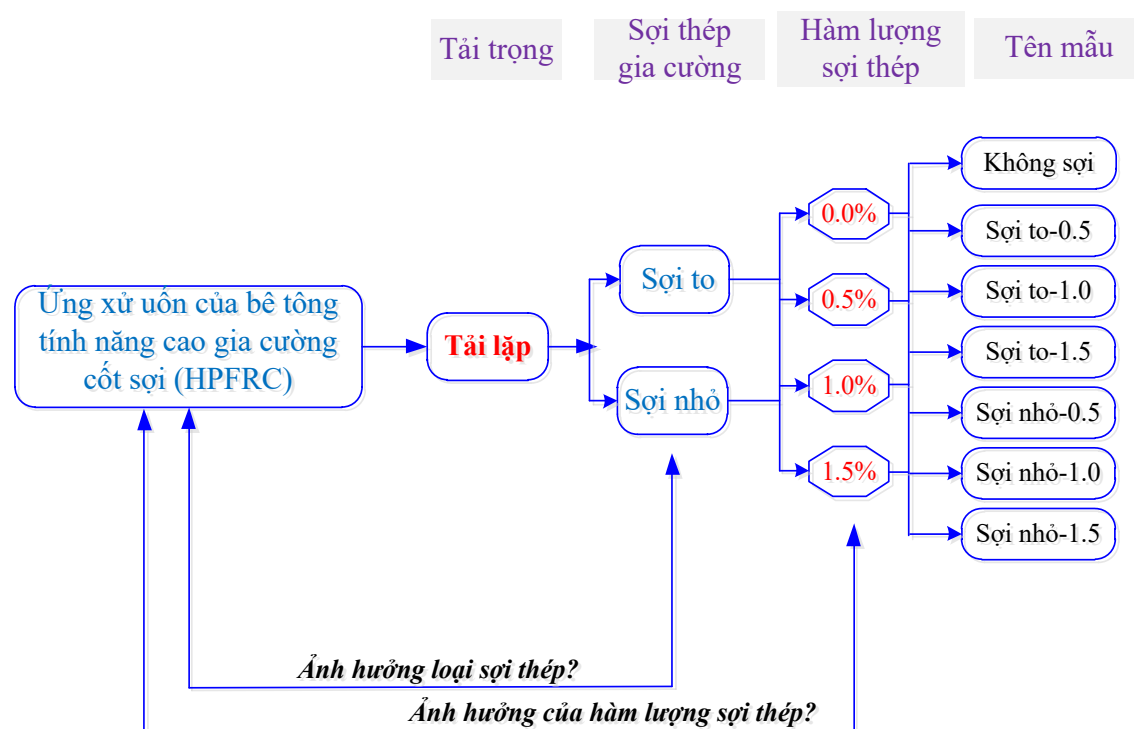
Thí nghiệm được thực hiện trên máy Dynamic Testing System (DTS) có công suất gia tải đến 30 kN. Tất cả các mẫu uốn HPFRC được chế tạo ở dạng lăng trụ có kích thước $40 \times 40 \times 160$ mm, khoảng cách giữa 2 gối được giữ cố định 120 mm.

Trong quá trình thí nghiệm, biên độ tải trọng ở mỗi chu kỳ và số chu kỳ được máy ghi nhận lại sau khi tác động tải lặp đến khi mẫu bị phá hủy. Tải trọng lặp tác dụng lên các mẫu uốn lăng trụ theo quy luật hình sin với $P = P_{\min} + \Delta P_{\max} \sin^2\left(\frac{\pi t}{T}\right)$. Trong

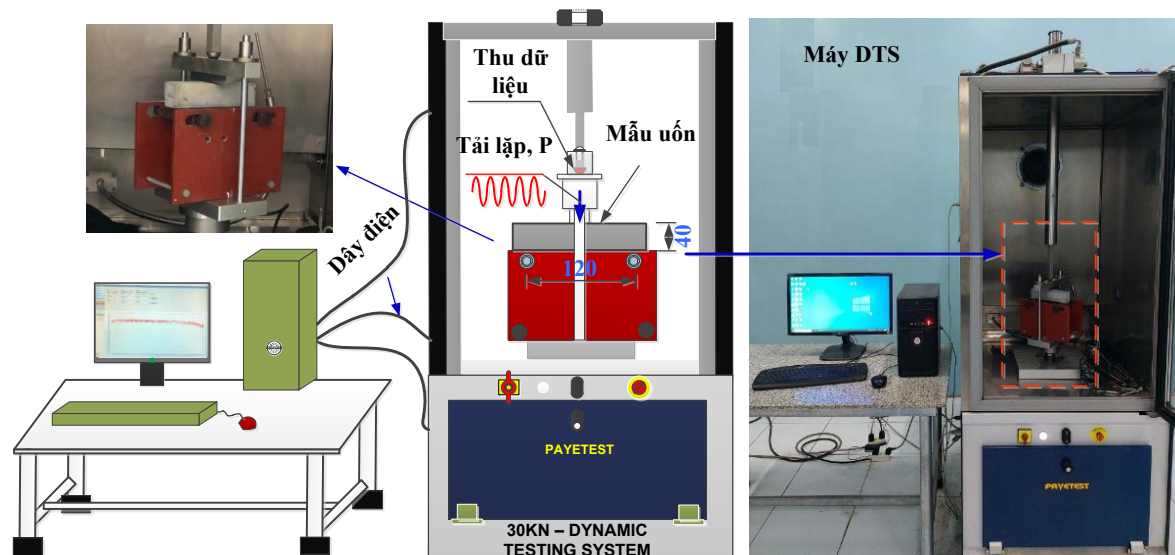
đó Hàm $\sin^2$ đảm bảo cho tải luôn luôn dương và $P_{\min} = 1$ kN giúp mẫu uốn luôn chịu tác động của tải trọng uốn. $P_{\max}$ là tải trọng lặp tác dụng lớn nhất không vượt quá giá trị P_{MOR} ; $\Delta P_{\max} = P_{\max} - P_{\min}$ là biên độ tải trọng lặp tương ứng với ứng suất uốn trong ngưỡng $0 < f_{\min} < f_{\max} < f_{\text{MOR}}$. Chu kỳ tải trọng chọn $T = 0,05$ s.

Hiện nay chưa có tiêu chuẩn thống nhất quy định cụ thể tần số tải lặp đối với thí nghiệm mỏi của HPFRC. Nếu tần số tải quá cao, hiệu ứng quán tính, phát nhiệt nội tại và ảnh hưởng động lực học có thể làm thay đổi cơ chế phá hủy thực của vật liệu. Ngược lại, nếu tần số quá thấp, thời gian thí nghiệm kéo dài đáng kể và khó bảo đảm tính ổn định của hệ thí nghiệm trong quá trình gia tải nhiều chu kỳ. Trong luận án này, chu kỳ tải trọng lặp $T = 0,05$ s (tương ứng tần số $f = 20$ Hz) được lựa chọn nhằm bảo đảm sự cân bằng giữa thời gian thí nghiệm và độ tin cậy của kết quả nghiên

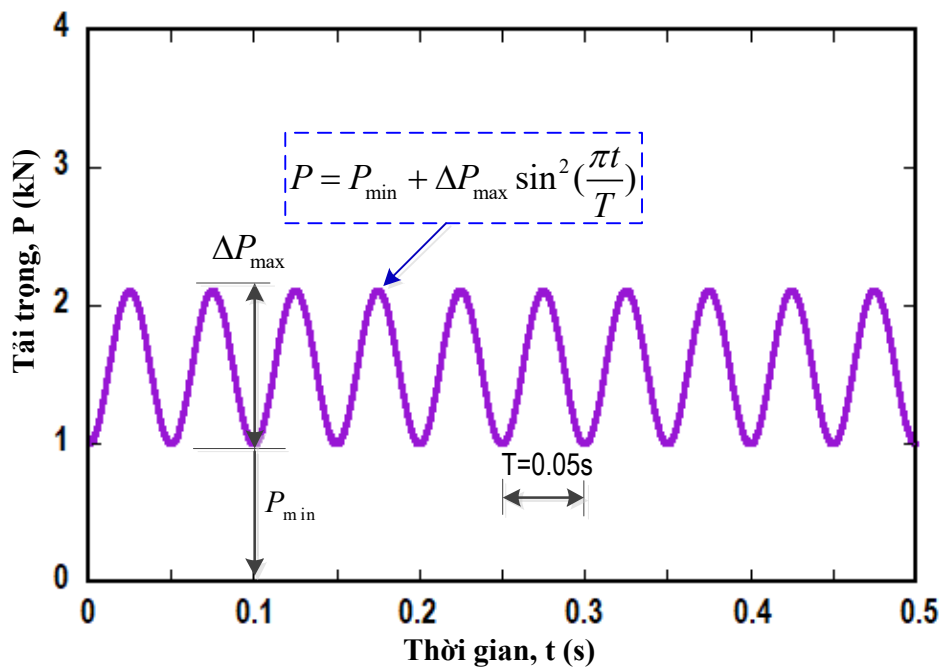
cứu mỗi (với mức tải thấp mẫu phá hoại trong ngày). Ảnh hưởng của tần số tải đến sức kháng mỗi của HPFRC cần có các nghiên cứu chuyên sâu tiếp theo.



Hình 3.8. Sơ đồ thực hiện thí nghiệm tải lặp



Hình 3.9. Thiết lập thí nghiệm uốn ba điểm dưới tải trọng lặp



Hình 3.10. Chu kỳ tải trọng lặp điển hình

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

Bảng 3.7 trình bày tất cả các thông số của bảy loạt mẫu, bao gồm biên độ tải trọng (ΔP_{max}), ứng suất phá hoại dưới tải tĩnh f_{MOR} , tỷ số giữa biên độ ứng suất cao nhất và cường độ uốn tĩnh ($\Delta f_{max} / f_{MOR}$), số chu kỳ (N).

Bảng 3.7. Kết quả thí nghiệm uốn dầm HPFRC dưới tải trọng lặp

Loạt mẫu	Biên độ tải trọng, ΔP_{max} (kN)	f_{MOR} (MPa)	Tỷ số $\Delta f_{max} / f_{MOR}$	Số chu kỳ, N
Không sợi	4,02	12,58	0,90	6
	3,13		0,70	15
	2,68		0,60	21
	2,24		0,50	26
	1,85		0,41	28
	1,34		0,30	320
	1,11		0,25	1657
	0,67		0,15	3689

	0,56		0,13	5266
	0,47		0,11	8273
Sợi to-0.5	3,83	11,24	0,90	71
	3,40		0,80	217
	2,98		0,70	997
	2,25		0,53	5102
	2,13		0,50	8691
	1,57		0,37	191909
Sợi to-1.0	7,38	19,77	0,90	49
	6,56		0,80	82
	6,15		0,75	3541
	5,74		0,70	5765
	5,33		0,65	22282
	4,92		0,6	162061
	4,10		0,50	665085 (chưa phá hoại)
	2,46		0,30	703330 (chưa phá hoại)
Sợi to-1.5	11,21	31,11	0,90	83
	9,96		0,80	244
	8,72		0,70	845
	8,09		0,65	4231
	6,23		0,50	44506
	3,74		0,30	620169 (chưa phá hoại)
Sợi nhỏ-0.5	5,40	16,87	0,90	11
	4,20		0,70	42
	3,78		0,63	459
	3,00		0,50	3351
	2,28		0,38	9415
	1,80		0,30	604790 (chưa phá hoại)
Sợi nhỏ-1.0	7,74	23,10	0,90	28

	6,88		0,80	62
	6,02		0,70	210
	5,16		0,60	4580
	4,30		0,50	23960
	2,58		0,30	585382 (chưa phá hoại)
Sợi nhỏ-1.5	10,76	31,49	0,90	21
	9,57		0,80	31
	8,97		0,75	82
	8,37		0,70	192
	7,77		0,65	299
	7,18		0,60	11009
	5,89		0,50	601778 (chưa phá hoại)
	3,59		0,30	706577 (chưa phá hoại)

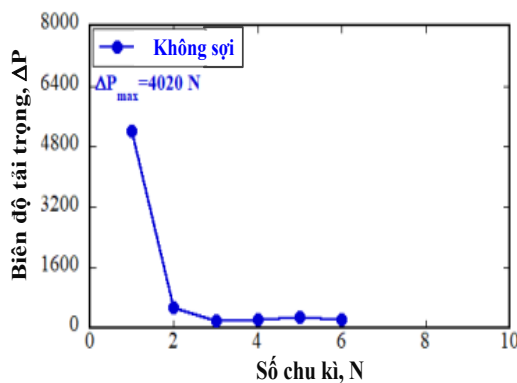
Các kết quả trong Bảng 3.7 cho thấy hàm lượng sợi có ảnh hưởng trực tiếp đến tuổi thọ mỏi của HPFRC dưới tải trọng uốn lặp, đặc biệt thông qua cơ chế kiểm soát sự lan truyền vết nứt. Với mẫu không sợi, tuổi thọ mỏi giảm rất nhanh khi tỷ số ứng suất $\frac{\Delta f_{\max}}{f_{MOR}}$ tăng; ở mức $\geq 0,6$, số chu kỳ phá hoại chỉ vài chục chu kỳ, phản ánh trạng thái fatigue–crack dominated với tốc độ mở vết nứt lớn và năng lượng tiêu tán thấp.

Khi tăng hàm lượng sợi từ (0,5–1,0%), tuổi thọ mỏi tăng lên, đặc biệt ở vùng có tỷ số ứng suất trung bình đến thấp (0,3–0,6), cho thấy vai trò rõ rệt của cơ chế bắc cầu sợi (fiber bridging) trong việc giảm biên độ mở vết nứt chu kỳ và làm chậm tốc độ lan truyền nứt mỏi. Ở các mẫu hàm lượng sợi cao ($\approx 1,5\%$), hiện tượng “chưa phá hoại” tại $N > 10^5$ – 10^6 chu kỳ xuất hiện, chứng tỏ vật liệu đã chuyển sang cơ chế mỏi được chi phối bởi tiêu tán năng lượng qua kéo–trượt–rút sợi, thay vì phá hoại giòn do bê tông nền.

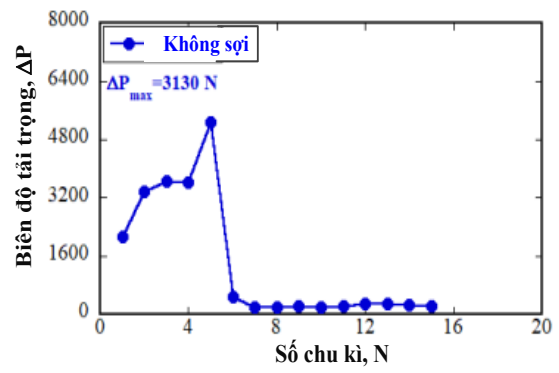
Ngoài ra, sự khác biệt giữa sợi lớn có móc và sợi nhỏ trơn cho thấy không chỉ hàm lượng mà mật độ sợi hiệu dụng và khả năng phân bố trong vùng FPZ cũng quyết

định tuổi thọ mỗi; sợi nhỏ với mật độ lớn có xu hướng ổn định vết nứt tốt hơn ở ứng suất thấp, trong khi sợi lớn hiệu quả hơn ở vùng ứng suất cao. Tổng thể, kết quả khẳng định rằng tuổi thọ mỗi của HPFRC tỷ lệ chặt chẽ với năng lượng phá hủy tích lũy G_{tt} và khả năng duy trì bắc cầu sợi theo chu kỳ.

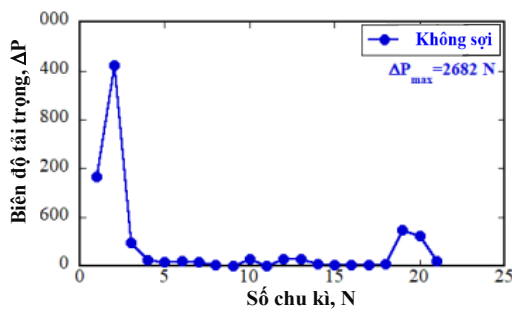
Theo xu hướng đó, loạt mẫu không sợi dễ dàng bị phá hủy ngay cả khi giá trị của tỷ số $\Delta f_{\max} / f_{MOR}$ ở mức thấp nhất. Nhưng với loạt mẫu có gia cường sợi thép, khi tỷ số $\Delta f_{\max} / f_{MOR}$ ở mức thấp nhất, vật liệu vẫn không bị phá hoại.



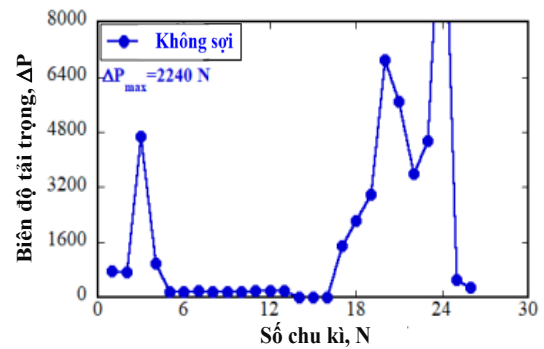
a)



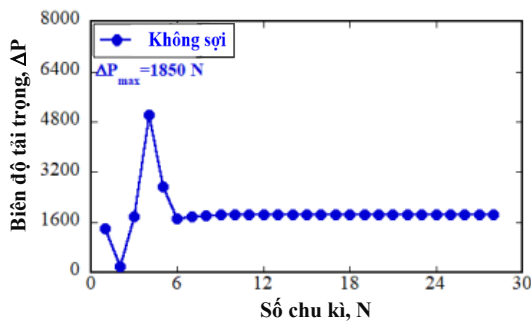
b)



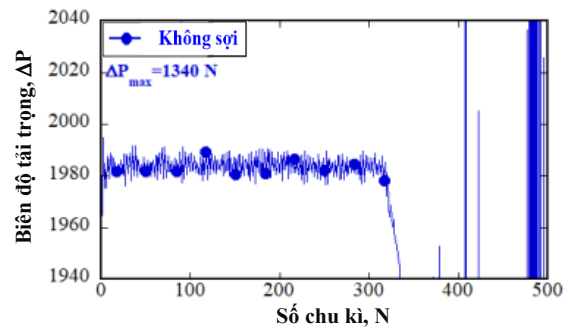
c)



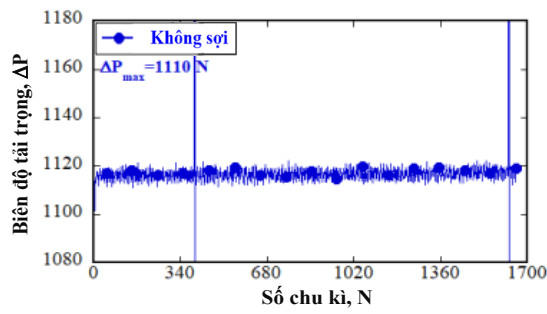
d)



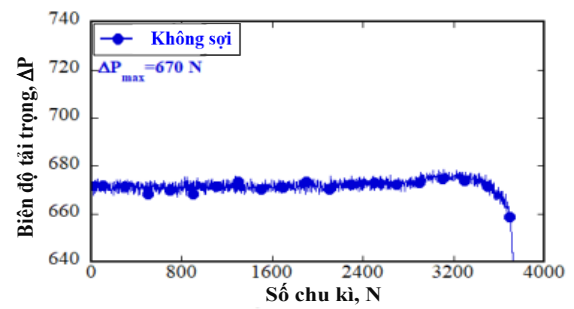
e)



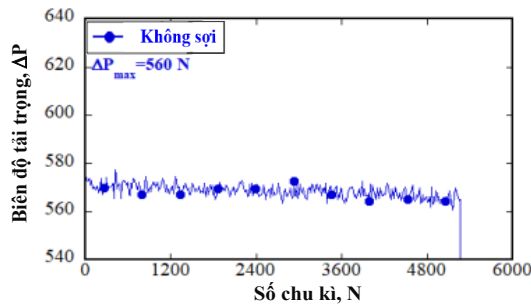
f)



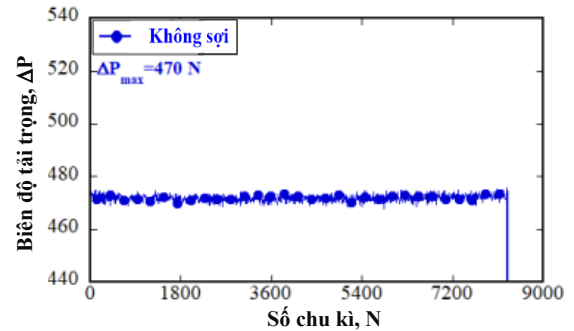
g)



h)



i)



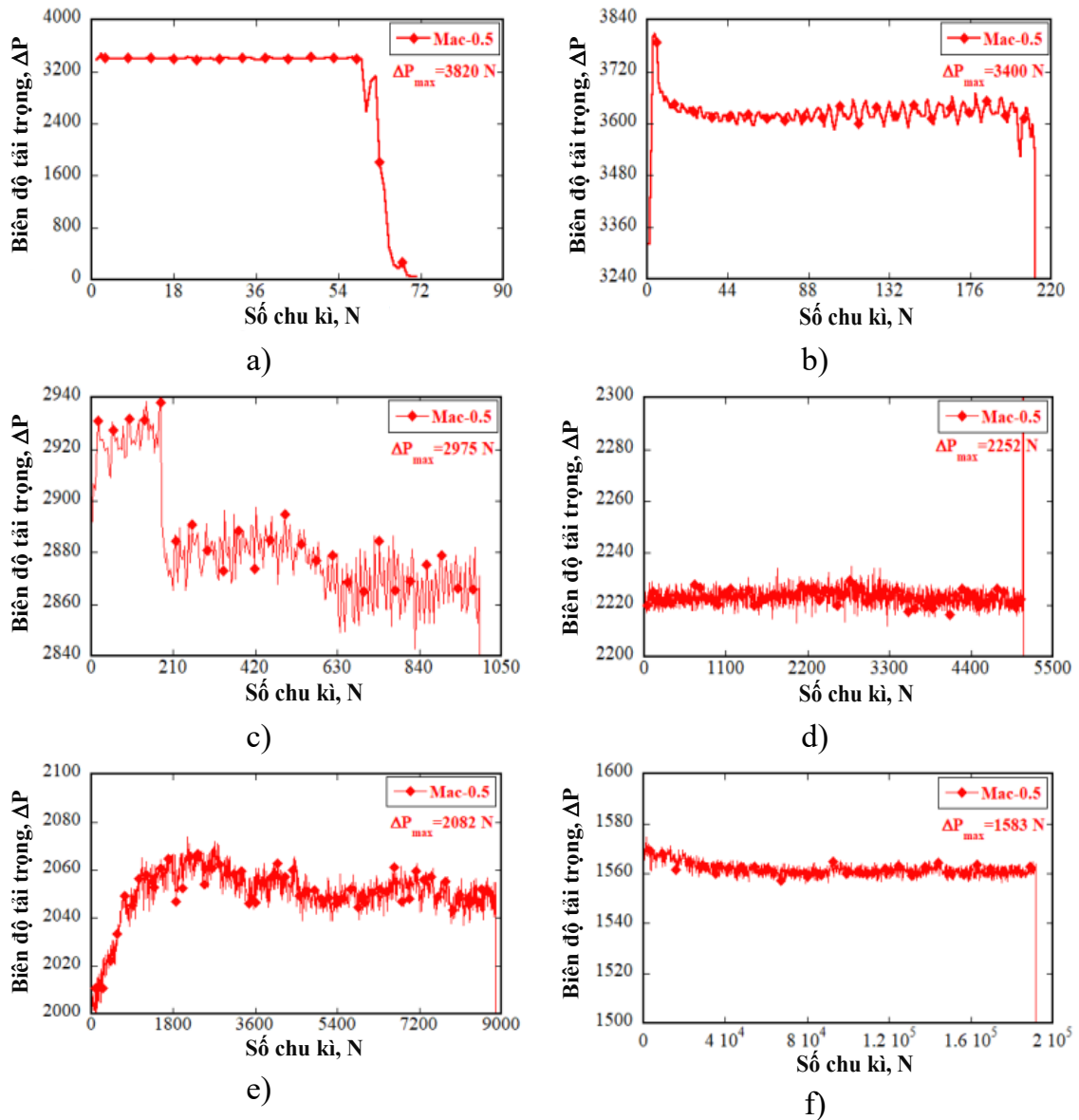
j)

Hình 3.11. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu Không sợi

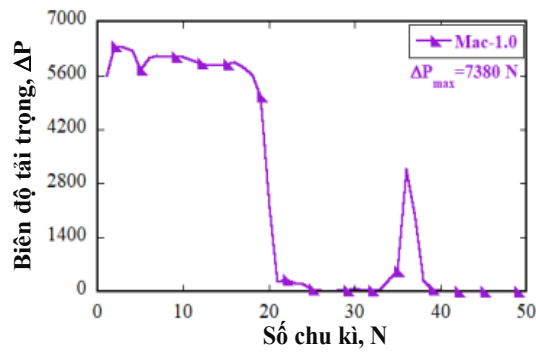
Hình 3.11 thể hiện mối quan hệ giữa biên độ tải trọng suy giảm ΔP và số chu kỳ tải N của loạt mẫu HPFRC không gia cường sợi dưới tác dụng của tải trọng lặp. Kết quả cho thấy ứng xử mỗi của vật liệu diễn biến theo xu hướng đặc trưng của vật liệu nền xi măng giòn, với khả năng kháng mỗi suy giảm nhanh khi biên độ tải trọng tăng cao. Ở các mức tải trọng lớn tương ứng với các mẫu (a), (b), (c) và (d), giá trị ΔP biến thiên mạnh ngay trong những chu kỳ đầu tiên, đồng thời số chu kỳ phá hủy rất nhỏ. Điều này cho thấy vật liệu không sợi gần như không có khả năng tái phân bố ứng suất sau khi xuất hiện vi nứt đầu tiên. Dưới tác động của tải trọng lặp, các vi nứt trong vùng chịu kéo nhanh chóng liên kết và phát triển thành vết nứt vĩ mô dẫn đến phá hoại đột ngột. Đặc biệt, sự xuất hiện các đỉnh dao động lớn của ΔP ở các mẫu tải cao phản ánh quá trình mất ổn định cục bộ trong vùng phát triển nứt (FPZ), khi năng lượng tích lũy vượt quá khả năng tiêu tán của nền bê tông.

Ở các mức tải trung bình và thấp hơn như các mẫu (e), (f), (g) và (h), tuổi thọ mỗi tăng đáng kể. Biên độ tải trọng suy giảm duy trì tương đối ổn định trong phần lớn quá trình thí nghiệm trước khi xuất hiện giảm mạnh ở giai đoạn cuối. Đây là biểu

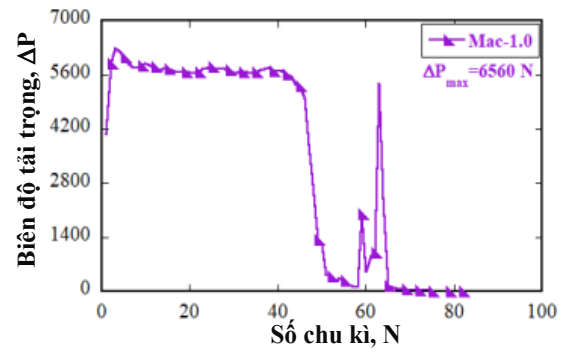
hiện diễn hình của quá trình tích lũy hư hỏng mỗi trong vật liệu giòn: giai đoạn đầu xuất hiện và phát triển vi nứt ổn định, sau đó là giai đoạn tăng tốc lan truyền nứt dẫn đến phá hủy cuối cùng. Đối với các mẫu chịu tải thấp, tốc độ phát triển vi nứt nhỏ nên vật liệu có thể duy trì trạng thái cân bằng trong thời gian dài hơn.



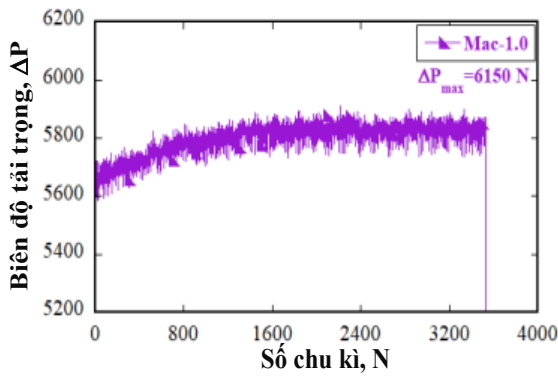
Hình 3.12. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu Sợi to-0,5



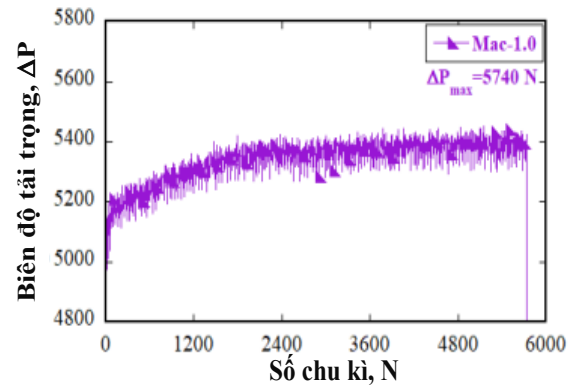
a)



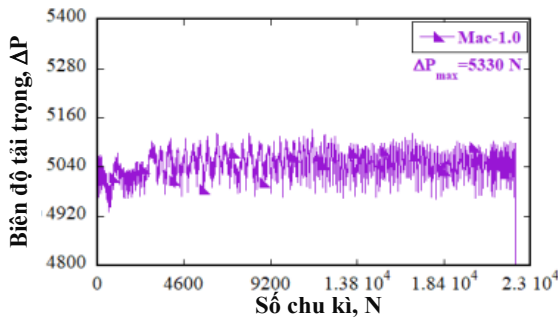
b)



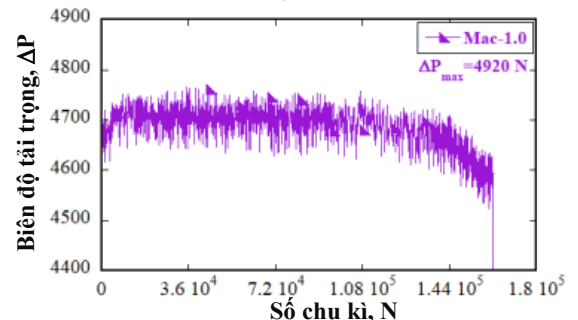
c)



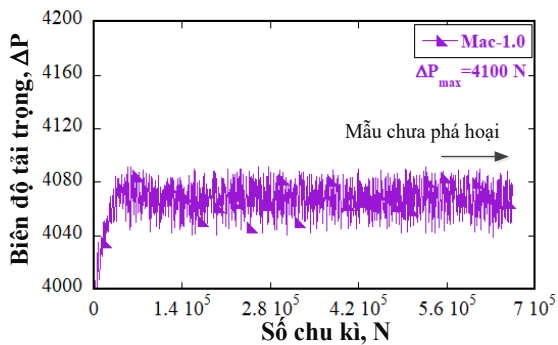
d)



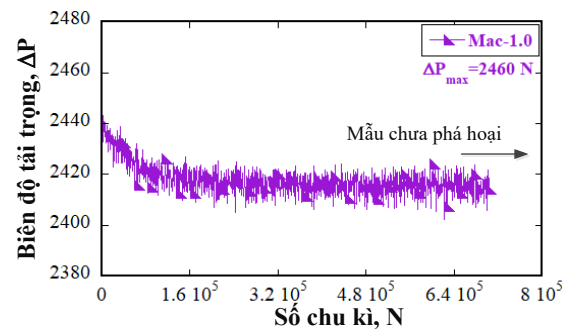
e)



f)



g)



h)

Hình 3.13. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu Sợi to-1,0

Một đặc điểm đáng chú ý là các mẫu không sợi thể hiện ứng xử phá hoại mang tính giòn rất rõ rệt. Sau khi đạt đến ngưỡng tới hạn, sự suy giảm độ cứng và khả năng chịu lực xảy ra nhanh, gần như không tồn tại giai đoạn chuyển tiếp dẻo. Điều này phản ánh hạn chế cơ bản của vật liệu nền xi măng không gia cường sợi, do không có cơ chế “bắc cầu vết nứt” để hạn chế mở rộng vết nứt và phân tán ứng suất. Vì vậy, tuổi thọ mỏi của loạt mẫu không sợi phụ thuộc rất lớn vào mức tải tác dụng.

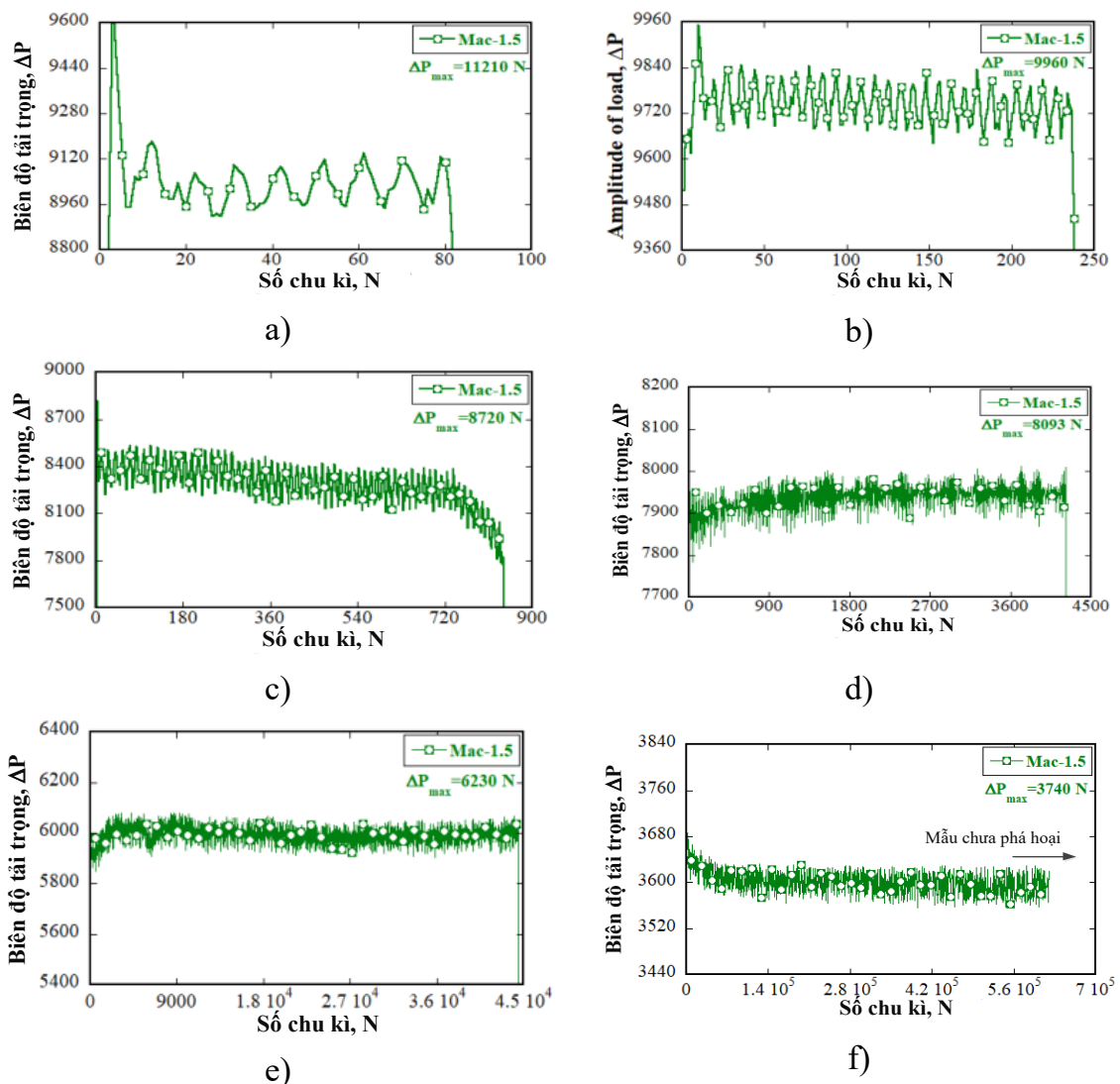
Kết quả trên Hình 3.12 cho thấy việc bổ sung 0,5% sợi to đã cải thiện đáng kể ứng xử mỏi của HPFRC dưới tải trọng lặp so với mẫu không sợi. Ở các mức tải cao, vật liệu vẫn phá hủy sau số chu kỳ nhỏ, tuy nhiên quá trình suy giảm khả năng chịu lực diễn ra ổn định hơn và không còn mang tính giòn đột ngột. Khi mức tải giảm, tuổi thọ mỏi tăng rõ rệt, biên độ tải trọng ΔP duy trì tương đối ổn định trong phần lớn quá trình thí nghiệm trước khi suy giảm nhanh ở giai đoạn cuối. Đặc biệt ở các mức tải thấp, mẫu có khả năng làm việc ổn định trong thời gian dài với dao động nhỏ của ΔP , cho thấy tốc độ phát triển vi nứt thấp và độ cứng uốn được duy trì tốt. Kết quả này phản ánh hiệu quả của cơ chế bắc cầu vết nứt do cốt sợi tạo ra, giúp hạn chế lan truyền vết nứt, tăng khả năng tiêu tán năng lượng và chuyển cơ chế phá hoại của vật liệu từ giòn sang giả dẻo hơn dưới tác dụng của tải trọng lặp.

Hình 3.13 cho thấy việc tăng hàm lượng sợi thép dài lên 1,0% đã cải thiện rất rõ khả năng kháng mỏi của HPFRC dưới tải trọng lặp. So với mẫu chứa 0,5% sợi, tuổi thọ mỏi của vật liệu tăng đáng kể, đặc biệt ở các mức tải trung bình và thấp. Biên độ tải trọng ΔP duy trì ổn định trong phần lớn quá trình thí nghiệm với dao động nhỏ, cho thấy độ cứng uốn của vật liệu được bảo toàn tốt và tốc độ phát triển vi nứt diễn ra chậm.

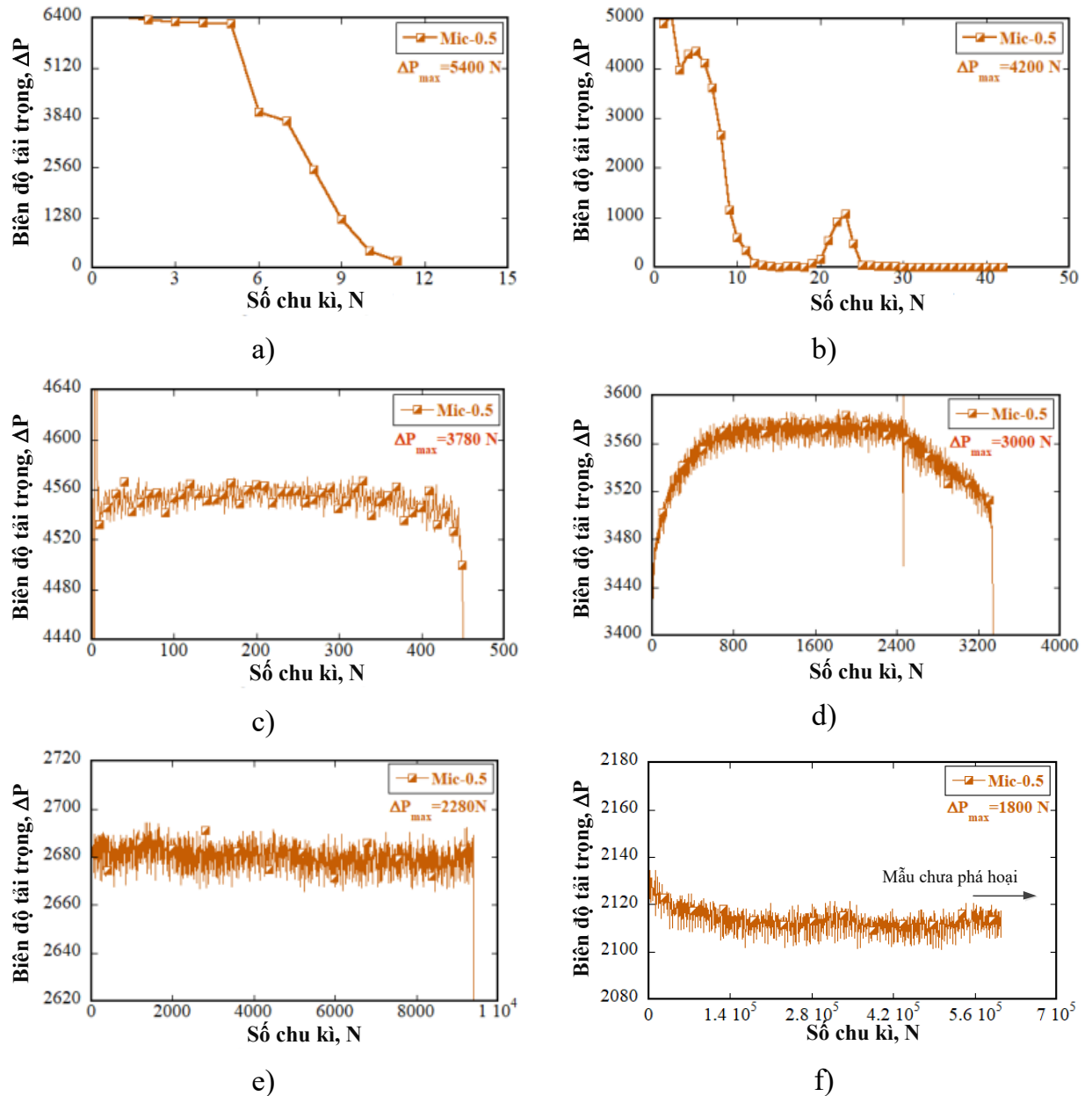
Ở các mức tải cao, mẫu vẫn phá hủy sau số chu kỳ tương đối nhỏ, tuy nhiên quá trình suy giảm khả năng chịu lực diễn ra ổn định hơn so với mẫu không sợi và mẫu có hàm lượng sợi thấp. Sự xuất hiện các dao động cục bộ của ΔP phản ánh quá trình kéo trượt và tái phân bố ứng suất giữa sợi và nền vật liệu trong vùng phát triển nứt. Đối với các mức tải trung bình và thấp, vật liệu thể hiện giai đoạn làm việc ổn định kéo dài với biên độ tải trọng gần như không thay đổi đáng kể theo số chu kỳ. Một số

mẫu vẫn chưa phá hủy sau hàng trăm nghìn chu kỳ, chứng tỏ ngưỡng mỏi của vật liệu đã được nâng cao rõ rệt. Điều này cho thấy hệ sợi với hàm lượng 1,0% đã hình thành cơ chế bắc cầu vết nứt hiệu quả hơn, giúp hạn chế mở rộng vết nứt, tăng khả năng tiêu tán năng lượng và làm chậm quá trình tích lũy hư hỏng mỏi.

Nhìn chung, kết quả khẳng định việc tăng hàm lượng sợi thép dài từ 0,5% lên 1,0% giúp cải thiện đáng kể độ bền mỏi và tính ổn định cơ học của HPFRC dưới tác dụng của tải trọng lặp, đồng thời làm chuyển biến rõ rệt cơ chế phá hoại của vật liệu theo hướng giả dẻo hơn.



Hình 3.14. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu Sợi to-1,5



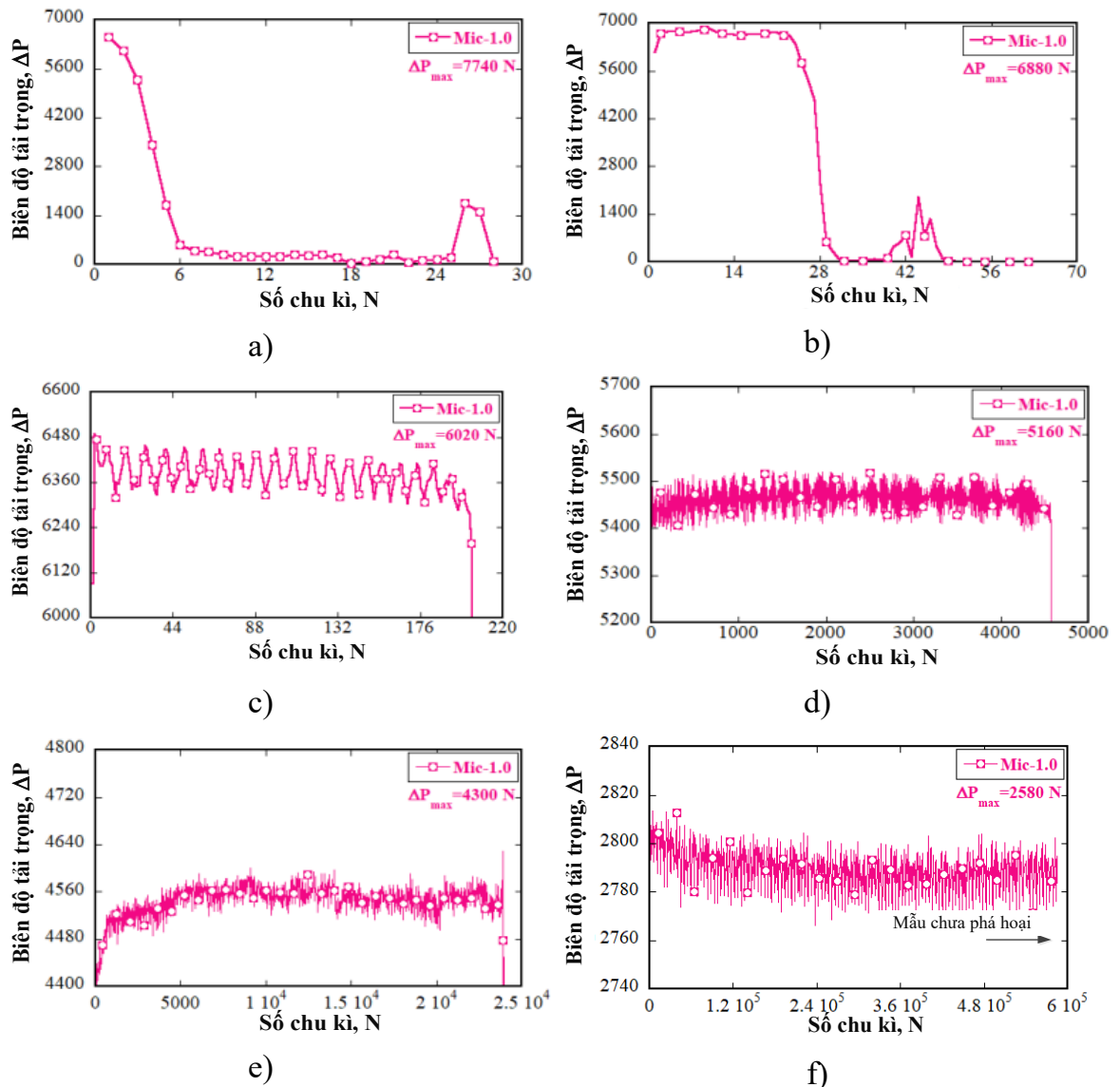
Hình 3.15. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu Sợi nhỏ-0,5

Kết quả trên Hình 3.14 cho thấy mẫu HPFRC chứa 1,5% sợi thép to có khả năng kháng mỏi và duy trì độ ổn định cơ học rất tốt dưới tác dụng của tải trọng lặp. So với các hàm lượng sợi thấp hơn, biên độ tải trọng ΔP dao động nhỏ và duy trì tương đối ổn định trong phần lớn quá trình thí nghiệm, cho thấy độ cứng uốn của vật liệu được bảo toàn hiệu quả và tốc độ phát triển vi nứt diễn ra chậm.

Ở các mức tải cao, vật liệu vẫn phá hủy sau số chu kỳ tương đối nhỏ, tuy nhiên quá trình suy giảm khả năng chịu lực diễn ra từ từ hơn, phản ánh hiệu quả của cơ chế

bắc cầu vết nứt do hệ sợi tạo ra. Khi mức tải giảm, tuổi thọ mỏi tăng mạnh; một số mẫu vẫn chưa phá hủy sau hàng trăm nghìn chu kỳ, chứng tỏ ngưỡng mỏi của vật liệu đã được cải thiện đáng kể.

Nhìn chung, việc tăng hàm lượng sợi thép lên 1,5% đã nâng cao rõ rệt khả năng tiêu tán năng lượng, hạn chế lan truyền vết nứt và làm chuyển cơ chế phá hoại của HPFRC từ giòn sang dẻo hơn dưới tải trọng lặp.



Hình 3.16. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu Sợi nhỏ-1,0

Các kết quả thí nghiệm như Hình 3.15 thể hiện mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu Sợi nhỏ - 0,5%. So với mẫu HPFRC sử dụng sợi thép to

cùng hàm lượng, mẫu sử dụng sợi thép nhỏ cho thấy sự khác biệt đáng kể về khả năng kháng mỏi và cơ chế suy giảm độ cứng dưới tải trọng lặp.

Ở mức tải trọng cao, mẫu sợi nhỏ 0,5% vẫn xuất hiện phá hoại tương đối trễ, tuy nhiên số chu kỳ chịu tải trước phá hoại nhìn chung thấp hơn đáng kể so với mẫu sợi to ở tải lớn, đồng thời quá trình suy giảm biên độ tải diễn ra đột ngột hơn. Điều này cho thấy sợi đường kính lớn có khả năng neo giữ và bắc cầu vết nứt hiệu quả hơn, làm chậm quá trình lan truyền nứt vĩ mô, và khả năng duy trì trạng thái chịu tải ổn định của mẫu sợi nhỏ trước phá hoại được cải thiện rõ rệt.

Kết quả thí nghiệm chứng minh rằng việc bổ sung 0,5% sợi thép nhỏ đã cải thiện đáng kể khả năng chịu tải lặp của HPFRC, đặc biệt trong vùng tải trung bình và thấp.

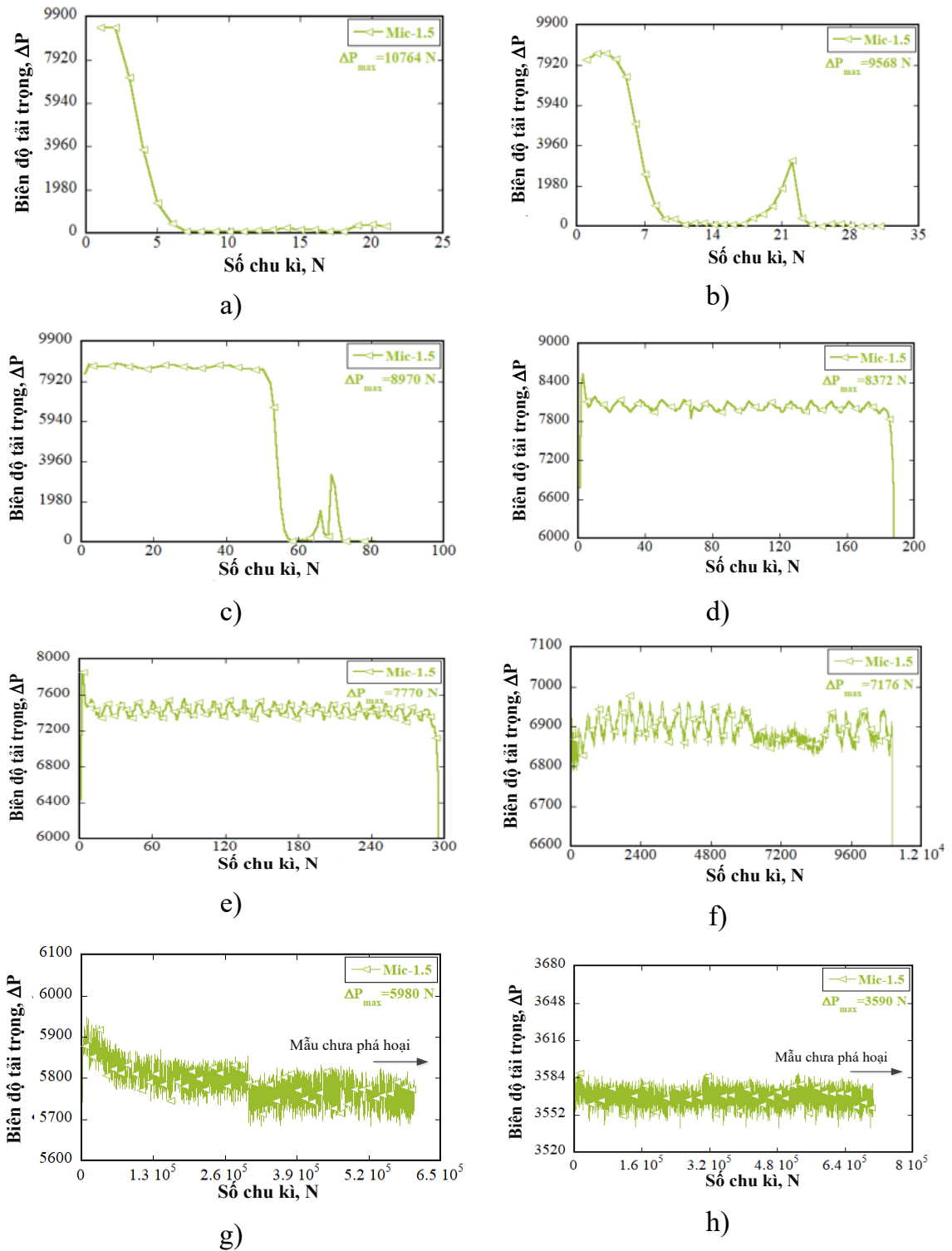
Kết quả thí nghiệm cho thấy việc tăng hàm lượng sợi thép nhỏ từ 0,5% lên 1% đã cải thiện rất lớn về ứng xử uốn mỏi của HPFRC: số chu kỳ phá hoại tăng mạnh, sự suy giảm độ cứng diễn ra chậm hơn, và khả năng duy trì tải sau nứt vượt trội hơn rõ rệt.

Nhìn chung, với cùng hàm lượng 1%, loạt mẫu sợi to ưu thế hơn về độ bền mỏi và khả năng trì hoãn phá hoại vĩ mô, còn sợi nhỏ hiệu quả hơn trong kiểm soát hình thành vi nứt ban đầu; sự khác biệt chủ yếu đến từ cơ chế gia cường của kích thước sợi hơn là hàm lượng sợi.

So với dầm HPFRC sử dụng 0,5% và 1% sợi thép, mẫu 1,5% thể hiện sự vượt trội rõ rệt về tuổi thọ mỏi và tính ổn định tải trọng. Ở hàm lượng 0,5%, mật độ sợi thấp nên khoảng cách giữa các sợi lớn, hiệu quả bắc cầu hạn chế, dẫn đến vết nứt dễ tập trung và lan truyền nhanh. Vì vậy, các mẫu 0,5% thường phá hoại sớm, độ dao động tải lớn và tốc độ suy giảm độ cứng cao hơn đáng kể. Ứng xử sau nứt của nhóm này mang tính giòn hơn, đặc biệt ở tải trọng lặp cao.

Đối với dầm sử dụng 1% sợi thép, khả năng kháng mỏi đã được cải thiện đáng kể so với 0,5%, tuy nhiên vẫn thấp hơn nhóm 1,5%. Ở mức 1%, cơ chế đa vi nứt bắt đầu hình thành rõ rệt hơn và tuổi thọ mỏi tăng lên nhiều lần. Tuy nhiên, phân bố sợi vẫn chưa đủ dày để duy trì ổn định lâu dài dưới tải lặp lớn. Khi tăng lên 1,5%, hiệu

ứng tương tác sợi–nền trở nên hiệu quả hơn, số lượng sợi bắc qua mặt nứt tăng đáng kể, làm giảm tốc độ mở rộng vết nứt và tăng khả năng tiêu tán năng lượng trong mỗi chu kỳ tải.

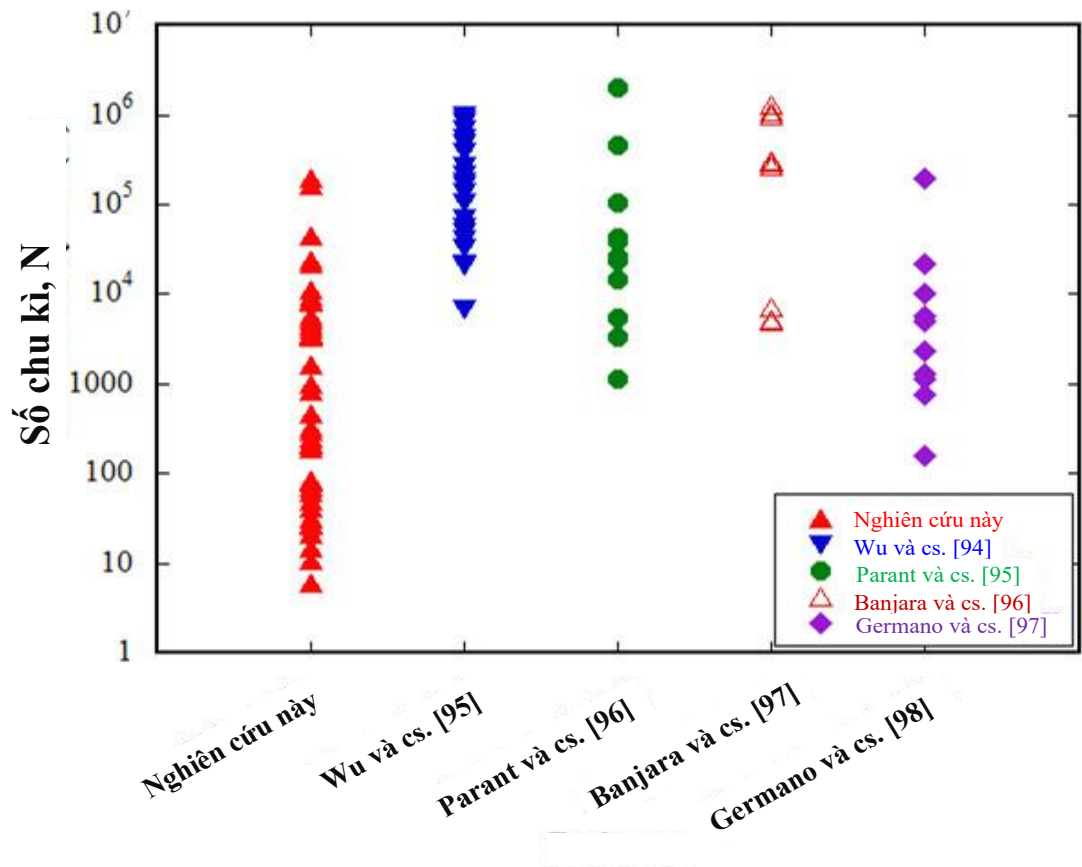


Hình 3.17. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu Sợi nhỏ-1.5

Nhìn tổng thể, kết quả thí nghiệm chứng minh rằng việc tăng hàm lượng sợi thép từ 0,5% $\rightarrow$ 1,0% $\rightarrow$ 1,5% tạo ra sự chuyển biến rõ rệt từ ứng xử phá hoại giòn sang ứng xử dẻo dưới tải trọng mới. Hàm lượng 1,5% cho thấy hiệu quả tối ưu nhất trong việc nâng cao độ bền mỏi, ổn định độ cứng và kéo dài tuổi thọ làm việc của dầm HPFRC, đặc biệt trong các kết cấu chịu tải trọng lặp như cầu, mặt đường, dầm cầu trục và công trình chịu rung động chu kỳ cao.

Từ đó, có thể nhận định rằng sợi thép to ưu thế hơn về khả năng kháng lan truyền vết nứt và duy trì ổn định cơ học dưới tải lặp, trong khi sợi nhỏ hiệu quả hơn trong kiểm soát vi nứt phân tán nhờ mật độ sợi lớn hơn. Do đó, sự khác biệt giữa hai loại sợi phản ánh cơ chế gia cường khác nhau: sợi nhỏ thiên về kiểm soát khởi phát vi nứt, còn sợi to hiệu quả hơn trong giai đoạn bắc cầu và trì hoãn phá hoại vĩ mô.

Hình 3.18 so sánh giới hạn độ bền mỏi khi chịu tải trọng uốn của các loại bê tông khác nhau: HPFRC trong nghiên cứu này, bê tông polyme gia cường sợi hỗn hợp với hàm lượng cao (HCHFPC) [95], hỗn hợp vật liệu bê tông liên hợp nhiều tỷ lệ (MSCC) [95] và bê tông cốt sợi (SFRC) [97,98]. Giới hạn độ bền mỏi khi uốn của các vật liệu bê tông này thường nằm trong khoảng 10^4 – 10^6 chu kỳ; do đó, giới hạn của HPFRC thu được trong nghiên cứu này không phải là bất thường.



Hình 3.18. So sánh giới hạn độ bền mỏi của các loại bê tông khác nhau

3.4. Đánh giá độ tin cậy thống kê của số liệu thí nghiệm mỏi

3.4.1. Đặc điểm phân tán và tính hợp lý của số liệu thí nghiệm

Số liệu thí nghiệm mỏi trong Bảng 3.7 cho thấy mối quan hệ điển hình giữa tỷ số ứng suất mỏi $\Delta f_{\max} / f_{MOR}$ và số chu kỳ phá hoại N . Theo Bảng 3.7, N tăng nhanh khi mức biên độ tải trọng mỏi giảm. Mỗi hàm lượng sợi có số mẫu dao động từ 8 đến 12 mẫu. Đối với các mẫu không sợi, số chu kỳ phá hoại tập trung chủ yếu trong vùng $N < 10^3$ khi tỷ số ứng suất lớn hơn 0,3, cho thấy khả năng kháng mỏi hạn chế và mức độ phân tán tương đối thấp. Điều này phù hợp với cơ chế phá hoại giòn, trong đó FPZ nhỏ và khả năng tiêu tán năng lượng sau nứt không đáng kể.

Ngược lại, các mẫu HPFRC thể hiện độ phân tán số chu kỳ phá hoại lớn hơn, đặc biệt tại các mức tải mỏi trung bình và thấp. Hiện tượng này phản ánh bản chất ngẫu nhiên của phân bố và định hướng sợi trong vật liệu, cũng như sự chi phối của cơ chế cầu nối sợi trong giai đoạn lan truyền vết nứt ổn định. Mặc dù độ phân tán

tăng, xu hướng tổng thể của các đường $S - N$ vẫn rõ ràng và nhất quán, cho thấy tập dữ liệu có độ tin cậy chấp nhận được trong nghiên cứu mối vật liệu dị hướng.

3.4.2. Đánh giá độ tin cậy thông qua mức tải mỗi và trạng thái “chưa phá hoại”

Việc xuất hiện các mẫu “chưa phá hoại” tại số chu kỳ lớn (đến hàng trăm nghìn chu kỳ) ở mức tải mỗi thấp là hiện tượng thường gặp trong thí nghiệm mỗi HPFRC. Các dữ liệu này không được xem là bất thường mà được coi là dữ liệu kiểm duyệt phải (right-censored data), phản ánh sự tồn tại của ngưỡng mỗi hoặc tuổi thọ mỗi rất cao.

Trong phân tích thống kê, các mẫu này được xử lý riêng và không dùng trực tiếp để tính giá trị trung bình hoặc độ lệch chuẩn của N , nhưng được sử dụng để:

- Xác định xu hướng tiệm cận của đường cong mỗi;
- So sánh định tính khả năng kháng mỗi giữa các cấp phối;
- Đánh giá hiệu quả gia cường sợi ở vùng tải mỗi thấp.

Cách tiếp cận này giúp tránh việc làm sai lệch kết quả thống kê trong khi vẫn bảo toàn ý nghĩa cơ học của dữ liệu.

3.4.3. Tiêu chí loại bỏ dữ liệu bất thường

Việc xác định và loại bỏ dữ liệu bất thường trong thí nghiệm mỗi được thực hiện dựa trên kết hợp tiêu chí thống kê và tiêu chí cơ học phá hủy, nhằm đảm bảo tính khách quan và tránh làm mất đi các đặc trưng vật lý quan trọng của vật liệu [98].

3.4.3.1. Tiêu chí thống kê

Một giá trị số chu kỳ phá hoại N_i được xem là bất thường nếu thỏa mãn điều kiện $|\log N_i - \log N| > 2\sigma_{\log N}$. Trong đó $\log N$ và $\sigma_{\log N}$ lần lượt là giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của $\log N$ tại cùng mức tải mỗi. Việc sử dụng thang logarit là cần thiết do phân bố số chu kỳ phá hoại trong thí nghiệm mỗi thường tuân theo phân bố log-normal.

3.4.3.2. Tiêu chí cơ học phá hủy

Các dữ liệu bị loại bỏ phải đồng thời thỏa mãn ít nhất một trong các điều kiện cơ học sau:

- Phá hoại xảy ra đột ngột ở số chu kỳ rất nhỏ do trượt gối, lệch tâm tải hoặc lỗi thiết bị;
- Cơ chế phá hoại không phù hợp với phá hoại mỏi uốn (ví dụ: phá hoại cục bộ ngoài vùng vết khía);
- Dạng đường cong tải–độ võng hoặc tải–CMOD trong quá trình mỏi cho thấy mất ổn định sớm không liên quan đến tích lũy hư hỏng mỏi.

Các điểm dữ liệu có giá trị N lớn nhưng phù hợp với cơ chế cầu nối sợi và mở rộng FPZ không bị loại bỏ, ngay cả khi nằm xa giá trị trung bình, do phản ánh đúng bản chất ngẫu nhiên của vật liệu cốt sợi.

Từ những tiêu chí trên cho thấy số liệu thí nghiệm mỏi ở Bảng 3.7 có độ tin cậy tốt ở cấp độ xu hướng và cơ chế phá hủy. Mặc dù tồn tại độ phân tán lớn, đặc biệt đối với các mẫu HPFRC, điều này là đặc trưng nội tại của vật liệu dị hướng và không làm suy giảm giá trị khoa học của kết quả. Việc áp dụng các tiêu chí loại bỏ dữ liệu bất thường một cách chặt chẽ và có cơ sở cơ học giúp đảm bảo rằng các kết luận rút ra phản ánh đúng ứng xử mỏi của vật liệu.

3.5. Xây dựng phương trình đường cong mỏi của vật liệu HPFRC

Đường cong mỏi $S-N$ được tính toán bằng cách sử dụng biên độ ứng suất ($S = \Delta f_{\max}$), dựa trên mô hình mỏi do Basquin đề xuất [100]:

$$(\Delta f_{\max})^p = \frac{C}{N} \text{ hoặc } \log N = p \log(1 / \Delta f_{\max}) + \log C \quad (3.6)$$

Trong đó, p là hệ số mỏi và C là hằng số vật liệu được xác định từ thí nghiệm.

Phương trình (3.6) là phương trình tuyến tính với $y = px + q$, trong đó $y = \log N$, $x = \log(1 / \Delta f_{\max})$ và $q = \log C$. Áp dụng kỹ thuật bình phương tối thiểu với hồi quy tuyến tính, giá trị của p và q có thể được xác định lần lượt bằng các phương trình (3.7) và (3.8):

$$p = \frac{\sum_i [(y_i - y_{av})(x_i - x_{av})]}{\sum_i (x_i - x_{av})^2} \quad (3.7)$$

$$q = y_{av} - \frac{\sum_i [(y_i - y_{av})(x_i - x_{av})]}{\sum_i (x_i - x_{av})^2} \times x_{av} \quad (3.8)$$

Phương trình (3.6) có thể được viết lại thành phương trình (3.9) sử dụng hệ số ứng suất ($S = \Delta f_{\max} / f_{MOR}$) trong ứng xử mỗi $S - N$ của HPFRC

$$\left(\frac{\Delta f_{\max}}{f_{MOR}} \right)^p = \frac{C / (f_{MOR})^p}{N} = \frac{C_1}{N} \quad (3.9)$$

Lấy logarit thập phân ở cả hai vế của phương thức (7), ta có:

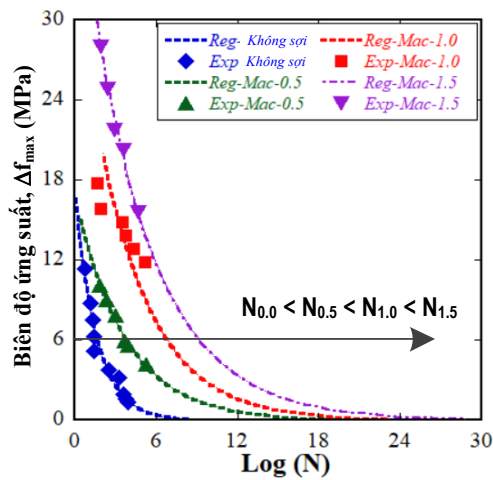
$$\log N = p \log(f_{MOR} / \Delta f_{\max}) + \log C - p \log(f_{MOR}) \quad (3.10)$$

Bảng 3.8 cung cấp các phương trình mỗi của HPFRC dựa trên kết quả đo của mẫu thí nghiệm, ngoại trừ các mẫu không bị phá hoại ở mức tải trọng thấp. Theo phương trình (3.6), với những thay đổi về $\Delta f_{\max}$, hệ số mỗi cao hơn cho thấy độ nhạy cao hơn đối với số chu kỳ. Theo Bảng 3.8, giá trị thấp nhất ($p=3,68$) được quan sát tại loạt mẫu Không sợi, trong khi giá trị cao nhất ($p=16,22$) thu được từ loạt mẫu Sợi to-1.5.

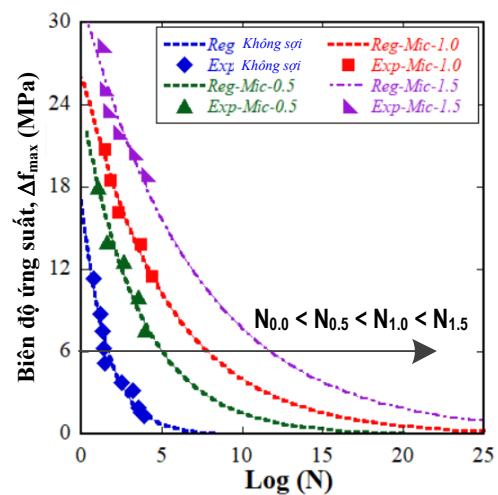
Hình 3.19 thể hiện đường cong mỗi của HPFRC được gia cường với hàm lượng sợi khác nhau sử dụng phương trình (3.6). Theo Hình 3.19, với cùng một giá trị $\Delta f_{\max}$, hàm lượng sợi cao hơn tạo ra giới hạn độ bền mỗi cao hơn đối với cả hai loại sợi to (Hình 3.19a) và sợi nhỏ (Hình 3.19b). Hình 3.20 trình bày các đường cong mỗi của HPFRC được gia cường với các hàm lượng sợi khác nhau sử dụng phương trình (3.9); các phương trình đường cong mỗi này cũng được cung cấp trong Bảng 3.8. Đáng chú ý, các giá trị p trong phương trình (3.6) và (3.9) là giống nhau hoàn toàn cho từng loạt mẫu HPFRC.

Bảng 3.8. Phương trình đường cong mỏi của bê tông HPFRC nghiên cứu

Loại mẫu	Hệ số p	Hệ số C	Phương trình mỏi (3.6)	Phương trình mỏi (3.9)
Không sợi	3,68	3.55×10^4	$(\Delta f_{\max})^{3.68} = \frac{3.55 \times 10^4}{N}$	$\left(\frac{\Delta f_{\max}}{f_{MOR}}\right)^{3.68} = \frac{3.19}{N}$
Sợi to-0.5	8,49	2.73×10^{10}	$(\Delta f_{\max})^{8.49} = \frac{2.73 \times 10^{10}}{N}$	$\left(\frac{\Delta f_{\max}}{f_{MOR}}\right)^{8.49} = \frac{32.75}{N}$
Sợi to-1.0	9,04	7.30×10^{13}	$(\Delta f_{\max})^{9.04} = \frac{7.30 \times 10^{13}}{N}$	$\left(\frac{\Delta f_{\max}}{f_{MOR}}\right)^{9.04} = \frac{140.42}{N}$
Sợi to-1.5	10,98	5.92×10^{17}	$(\Delta f_{\max})^{10.98} = \frac{5.92 \times 10^{17}}{N}$	$\left(\frac{\Delta f_{\max}}{f_{MOR}}\right)^{10.98} = \frac{23.99}{N}$
Sợi to-0.5	8,39	4.00×10^{11}	$(\Delta f_{\max})^{8.39} = \frac{4.00 \times 10^{11}}{N}$	$\left(\frac{\Delta f_{\max}}{f_{MOR}}\right)^{8.39} = \frac{20.26}{N}$
Sợi to-1.0	12,24	2.54×10^{17}	$(\Delta f_{\max})^{12.24} = \frac{2.54 \times 10^{17}}{N}$	$\left(\frac{\Delta f_{\max}}{f_{MOR}}\right)^{12.24} = \frac{5.18}{N}$
Sợi to-1.5	16,22	2.62×10^{24}	$(\Delta f_{\max})^{16.22} = \frac{2.62 \times 10^{24}}{N}$	$\left(\frac{\Delta f_{\max}}{f_{MOR}}\right)^{16.22} = \frac{1.31}{N}$



a) Sợi to



b) Sợi nhỏ

Hình 3.19. Đường cong mỏi của HPFRC nghiên cứu theo biên độ ứng suất

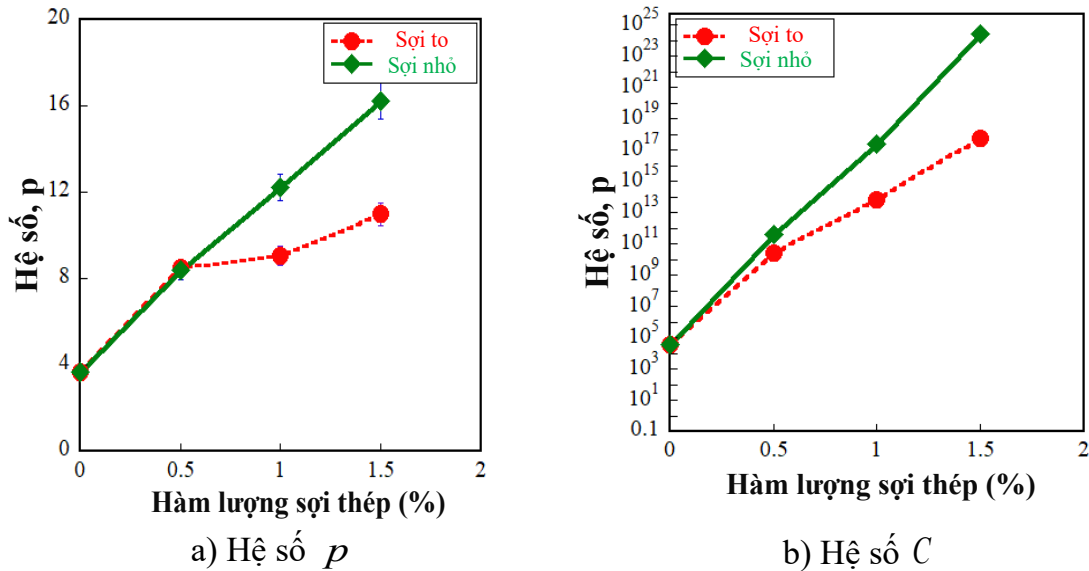
Hệ số p tăng mạnh khi hàm lượng sợi tăng (từ $p \approx 3,68$ với mẫu không sợi lên tới $p > 10-16$ với mẫu sợi 1,0%–1,5%). Hệ số p biểu thị độ nhạy của tuổi thọ môi đối với biên độ ứng suất. Giá trị p lớn cho thấy vật liệu ít nhạy hơn với thay đổi ứng suất môi, tức là khi giảm nhẹ $\Delta f_{\max}$, tuổi thọ môi tăng rất nhanh. Điều này phản ánh sự chuyển dịch cơ chế phá hoại từ lan truyền nứt nhanh trong bê tông nền sang lan truyền nứt được kiểm soát bởi bắc cầu sợi và tiêu tán năng lượng.

Việc đánh giá loạt mẫu HPFRC với các hàm lượng sợi gia cường khác nhau như sau: hàm lượng sợi cao hơn rõ ràng tạo ra giới hạn độ bền môi cao nhất ở mức $< 0,35$ đối với sợi to và ở mức $< 0,60$ đối với sợi nhỏ. Tuy nhiên, xu hướng này trở nên không rõ ràng khi giá trị $S = \Delta f_{\max} / f_{\text{MOR}}$ ở mức cao. Theo hiển thị ở Hình 3.20, xu hướng chính của giới hạn độ bền môi là hàm lượng thể tích sợi cao hơn tạo ra giới hạn độ bền môi cao hơn ở cả hai loại sợi to và sợi nhỏ. Xu hướng này đã thay đổi một chút khi $\Delta f_{\max} / f_{\text{MOR}}$ ở mức cao. Điều này có thể giải thích tương tự như dưới tải trọng tĩnh, khi hàm lượng thể tích sợi gia cường tăng lên dẫn đến sự phân bố sợi trong vữa bê tông dày đặc hơn, do đó khả năng hàn gắn vết nứt tốt hơn.

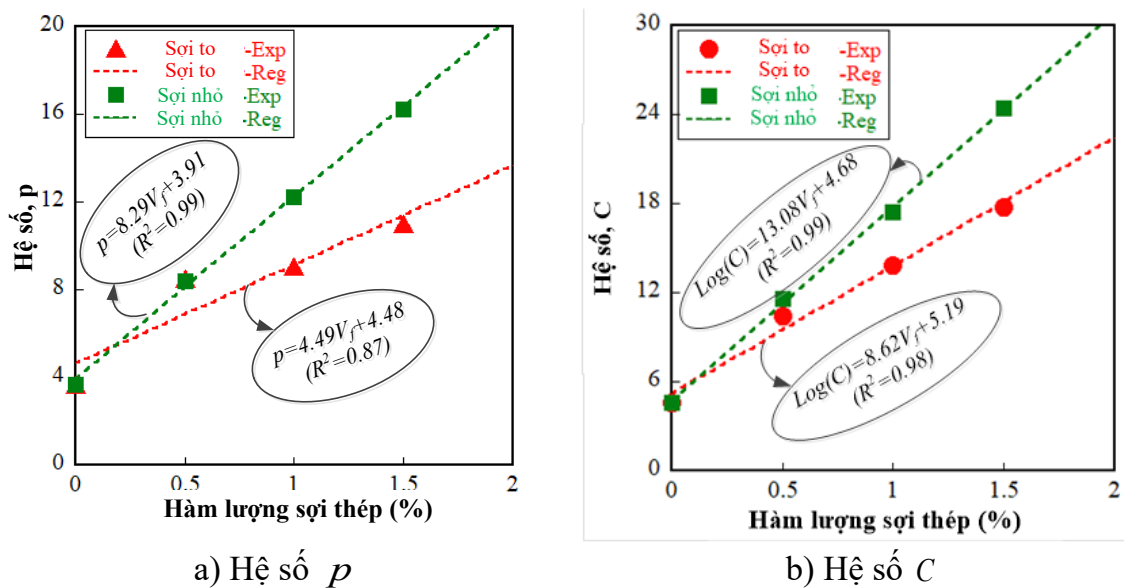
3.6. Độ nhạy của hàm lượng sợi thép gia cường với độ bền môi của HPFRC

Như đã đề cập ở phần trước, sự thể hiện của HPFRC về hệ số môi (p) và hằng số thực nghiệm (C) cao hơn trong biểu thức (3.6) biểu thị độ nhạy cao hơn đối với số chu kỳ với các sự thay đổi khác nhau của $\Delta f_{\max}$. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi gia cường đến các thông số vật liệu, bao gồm p và C , lần lượt được hiển thị trong Hình 3.21a và 3.21b. Theo hiển thị Hình 3.21, nhìn chung, giá trị p và C tăng lên khi hàm lượng sợi thép gia cường tăng từ 0,0 đến 1,5% theo thể tích, bất kể các loại sợi. Tại bất kỳ hàm lượng sợi thép gia cường, các sợi nhỏ tạo ra giá trị p và giá trị C cao hơn so với các sợi to. Dựa trên độ dốc của các đường cong thể hiện trong Hình 3.21, độ nhạy đối với số chu kỳ nhìn chung là giảm khi hàm lượng sợi thép gia cường tăng lên và lớn hơn khi sử dụng sợi nhỏ. Đối với cả hai loại sợi, tại hàm lượng sợi thép gia cường là 0,5% theo thể tích là nhạy cảm nhất với số chu kỳ. Sự khác biệt giữa các

nhóm sợi (sợi to – sợi nhỏ) cho thấy p và C không chỉ phụ thuộc vào hàm lượng sợi, mà còn phụ thuộc vào mật độ sợi hiệu dụng trong vùng FPZ. Các mẫu có mật độ sợi cao và phân bố đồng đều đạt giá trị p lớn hơn, thể hiện sự lan truyền nứt mỗi ổn định hơn và ít phá hoại tập trung.



Hình 3.20. Độ nhạy của hàm lượng sợi thép đến hệ số mỗi của HPFRC



Hình 3.21. Mối quan hệ giữa hàm lượng sợi thép gia cường và hệ số mỗi của HPFRC

Để ứng dụng vào thực tế, mối quan hệ tuyến tính đã được đề xuất trong nghiên cứu này đối với hệ số mỗi (p) và hằng số vật liệu (C) tùy thuộc vào hàm lượng sợi

thép gia cường (V_f) của sợi to và sợi thép nhỏ. Sử dụng các kết quả thực nghiệm và phương pháp hồi quy tuyến tính, mối liên hệ giữa hệ số p và V_f đối với sợi to và sợi nhỏ được cung cấp bởi biểu thức (3.11) và được hiển thị trong Hình 3.22a. Tương tự, mối liên hệ giữa hệ số C và V_f đối với sợi to và sợi nhỏ được cung cấp trong biểu thức (3.12) và được hiển thị trong Hình 3.22b. Các hàm hồi quy là đáng tin cậy và hữu ích trong việc dự đoán hệ số mô và hằng số vật liệu của HPFRC với bất kỳ hàm lượng sợi thép nào gia cường trong vữa bê tông.

$$p = 4.49V_f + 4.48, R^2 = 0.87 \quad \text{Sợi to} \quad (3.11)$$

$$p = 8.29V_f + 3.91, R^2 = 0.99 \quad \text{Sợi nhỏ}$$

$$\log C = 8.62V_f + 5.19, R^2 = 0.98 \quad \text{Sợi to} \quad (3.12)$$

$$\log C = 13.08V_f + 4.68, R^2 = 0.99 \quad \text{Sợi nhỏ}$$

Mặc dù các hàm hồi quy được đề xuất trong nghiên cứu hiện tại có thể chấp nhận được nhưng độ chính xác của các hàm hồi quy này phải được cải thiện trong các nghiên cứu trong tương lai phù hợp với dữ liệu thực nghiệm nhiều hơn để đạt được các đánh giá đáng tin cậy hơn.

3.7. Kết luận chương 3

Các kết quả nghiên cứu trong chương này góp phần tiếp cận một góc độ mới trong việc tìm hiểu sức kháng uốn của bê tông tính năng cao dưới tải trọng tĩnh và tải trọng lặp được gia cường bằng cốt sợi thép với các hàm lượng thay đổi. Dựa trên các kết quả thí nghiệm và phân tích, những nhận xét và kết luận có thể rút ra trong phần nghiên cứu này như sau:

- 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.
- 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 HPFRC. 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 HPFRC đã làm gia tăng năng lượng phá hủy của vật liệu trong giai đoạn tăng cứng cơ học lên đến $15,58 \text{ kJ/m}^2$. 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.
- Chiều dài nứt liên kết theo phân tích ở HPFRC không sợi đạt $0,58 \text{ mm}$. Ở loại sợi trơn ngắn hàm lượng $0,5\%$, chiều dài nứt liên kết là dài nhất $519,85 \text{ mm}$. Ở loại sợi dài có móc, chiều dài nứt liên kết là ngắn nhất $152,95 \text{ mm}$.
- Dưới tác dụng của tải trọng tĩnh, cường độ chịu uốn và khả năng biến dạng ở đỉnh đường cong ứng xử (tại MOR) của HPFRC nhìn chung tăng lên khi hàm lượng thể tích của sợi nhỏ và sợi to tăng từ 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.
- Sức kháng uốn của HPFRC khả năng có thể tăng tiếp nếu gia cường thêm cốt sợi, điều này được làm rõ trong chương kế tiếp.

Sự gia tăng ứng suất uốn và độ võng của HPFRC khi tăng hàm lượng sợi cho thấy vai trò chi phối của cơ chế cầu nối sợi trong việc ổn định quá trình lan truyền vết nứt và mở rộng vùng phát triển nứt (FPZ). Dưới tác dụng của tải trọng lặp, đặc trưng ứng xử sau nứt này có ý nghĩa quyết định đến khả năng duy trì độ cứng và kéo dài tuổi thọ mỏi của cấu kiện. Các mẫu có hàm lượng sợi cao hơn thể hiện khả năng phân tán hư hỏng tốt hơn, làm chậm sự tích lũy hư hỏng theo chu kỳ. Điều này phù hợp với cách tiếp cận của mô hình Damage–Plastic trong ATENA, trong đó sự suy giảm độ cứng và phát triển hư hỏng được chi phối bởi năng lượng phá hủy và quy luật phá hoại sau nứt. Do đó, các thông số thu được từ thí nghiệm uốn tĩnh, đặc biệt là ứng xử sau nứt và năng lượng hấp thụ, đóng vai trò quan trọng trong việc hiệu chỉnh mô hình số để mô phỏng chính xác ứng xử mỏi của dầm HPFRC. Kết quả này khẳng định tính nhất quán giữa quan sát thực nghiệm và cơ sở lý thuyết của mô hình Damage–Plastic.

Nội dung Chương 3 được dựa theo các công trình đã công bố như sau:

- 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.
- 2) **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.
- 3) **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>

Chương 4:

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

4.1. Giới thiệu chương

Trong Chương 3, luận án đã trình bày các nghiên cứu thực nghiệm chi tiết về ảnh hưởng của từng loại sợi thép gia cường (sợi lớn có móc và sợi nhỏ trơn thẳng) ở các hàm lượng thể tích riêng lẻ (0,5% - 1,0% và 1,5%) đến ứng xử uốn của bê tông tính năng cao gia cường sợi (HPFRC) dưới cả tải trọng tĩnh và tải trọng lặp. Kết quả cho thấy việc bổ sung sợi thép từ 0 đến 1,5%, dù là sợi lớn hay sợi nhỏ, đều giúp cải thiện đáng kể khả năng chịu uốn, năng lượng phá hủy và tuổi thọ mỏi của HPFRC so với mẫu không sợi. Như vậy, sức kháng cơ học của HPFRC khả năng có thể tăng tiếp nếu gia cường thêm cốt sợi, Chương 4 này làm rõ tại mức hàm lượng sợi 2,0%.

Theo các kết quả nghiên cứu trước đây [62,80], sợi nhỏ thường giúp tăng cường độ chịu uốn nhưng khả năng chịu võng thấp hơn so với sợi lớn; sợi lớn đóng góp nhiều hơn vào năng lượng phá hủy tổng thể ở một số hàm lượng nhất định. Tuy nhiên, phân tích cũng chỉ ra một hạn chế quan trọng: khi chỉ sử dụng một loại sợi duy nhất, hiệu quả cải thiện tính năng của vật liệu chưa thật sự tối ưu. Với sợi nhỏ, vật liệu kiểm soát vết nứt vi mô tốt và dẻo dai hơn, nhưng hiệu quả chịu tải uốn lớn lại chưa cao do khả năng neo giữ hạn chế. Ngược lại, khi chỉ dùng sợi lớn, độ bền và khả năng chịu tải tăng lên, nhưng hiệu quả kiểm soát vết nứt nhỏ kém, làm cho vật liệu dễ phá hoại giòn hơn. Để khắc phục những hạn chế này và tận dụng đồng thời ưu điểm của cả hai loại sợi, một hướng tiếp cận tiên tiến hơn là sử dụng hệ sợi thép hỗn hợp. Sự kết hợp giữa sợi nhỏ và sợi lớn hứa hẹn tạo ra hiệu ứng hiệp đồng, vừa kiểm soát tốt sự hình thành và phát triển vết nứt vi mô, vừa tăng khả năng chịu tải và độ bền sau nứt. Trên cơ sở đó, Chương 4 mở rộng nghiên cứu thực nghiệm để đánh giá ứng xử uốn của HPFRC khi được gia cường bằng hệ thống sợi thép hỗn hợp. Các thí nghiệm khảo sát nhiều tổ hợp pha trộn khác nhau giữa sợi lớn có móc và sợi nhỏ trơn thẳng, với tổng hàm lượng sợi giữ cố định ở mức 2,0% thể tích, dưới cả tải trọng tĩnh và tải

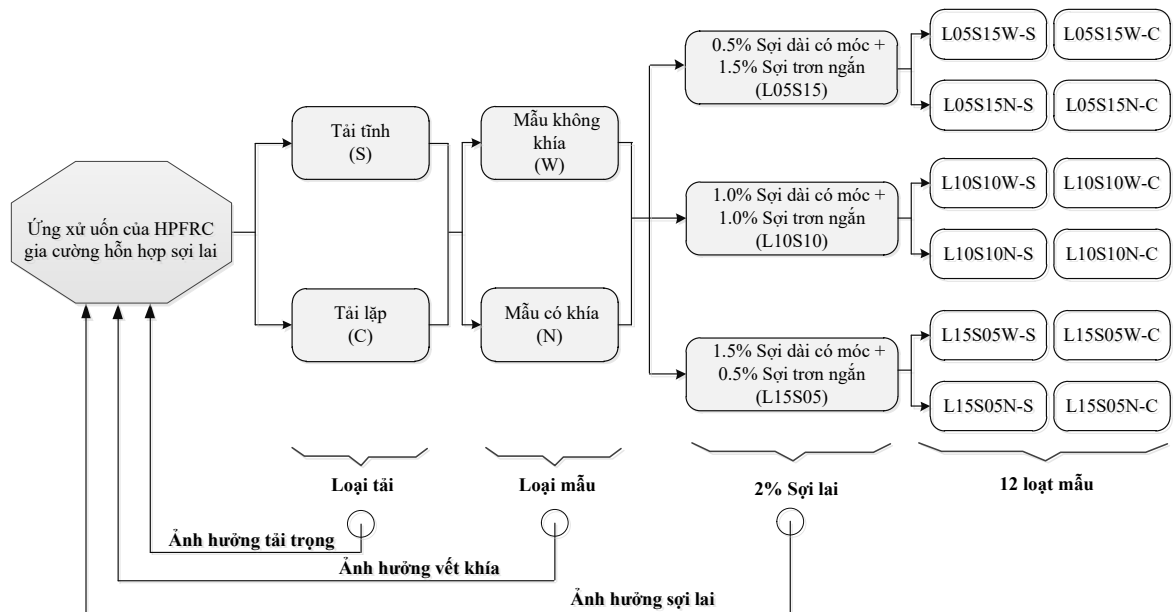
trọng lặp. Đồng thời, chương này cũng phân tích ảnh hưởng của vết khía ban đầu trên mẫu thử nhằm làm rõ cơ chế hình thành – lan truyền vết nứt, khả năng kháng phá hủy và kháng môi của HPFRC trong điều kiện có khuyết tật. Đây là một hướng nghiên cứu có ý nghĩa thực tiễn, nhằm cung cấp cái nhìn toàn diện hơn về ứng xử cơ học của vật liệu bê tông vốn có nhiều vết nứt sẵn hay khuyết tật khi chế tạo, góp phần nâng cao hiệu quả và tính bền vững trong ứng dụng thực tế của HPFRC.

4.1.1. Sơ đồ thí nghiệm

Quá trình thực hiện thí nghiệm gồm các bước như sau:

- Thiết kế thí nghiệm:
 - Thiết lập sơ đồ thí nghiệm và các mô hình thí nghiệm
 - Thiết kế mẫu thí nghiệm
- Tiến hành thí nghiệm:
 - Xác định cường độ chịu uốn của HPFRC dưới tải trọng tĩnh của loạt mẫu có khía và không khía.
 - Xác định tuổi thọ mỏi của cả hai loạt mẫu có khía và không khía dưới tác dụng của tải trọng lặp.
 - Đánh giá khả năng kháng uốn của HPFRC đối với mẫu có khía và không khía thông qua tham số của hệ số cường độ ứng suất (K_{IC}).
- Đánh giá và xử lý kết quả thí nghiệm
 - Xác định bằng thực nghiệm giá trị tải trọng tương ứng với thời điểm dầm HPFRC bắt đầu xuất hiện vết nứt đầu f_{LOP} và khả năng chịu lực lớn nhất f_{MOR} .
 - Xây dựng đường cong mỏi, nhận xét cơ chế phá hoại uốn lặp.
 - Tính toán năng lượng phá hủy của mẫu uốn dưới tác dụng của tải trọng tĩnh.

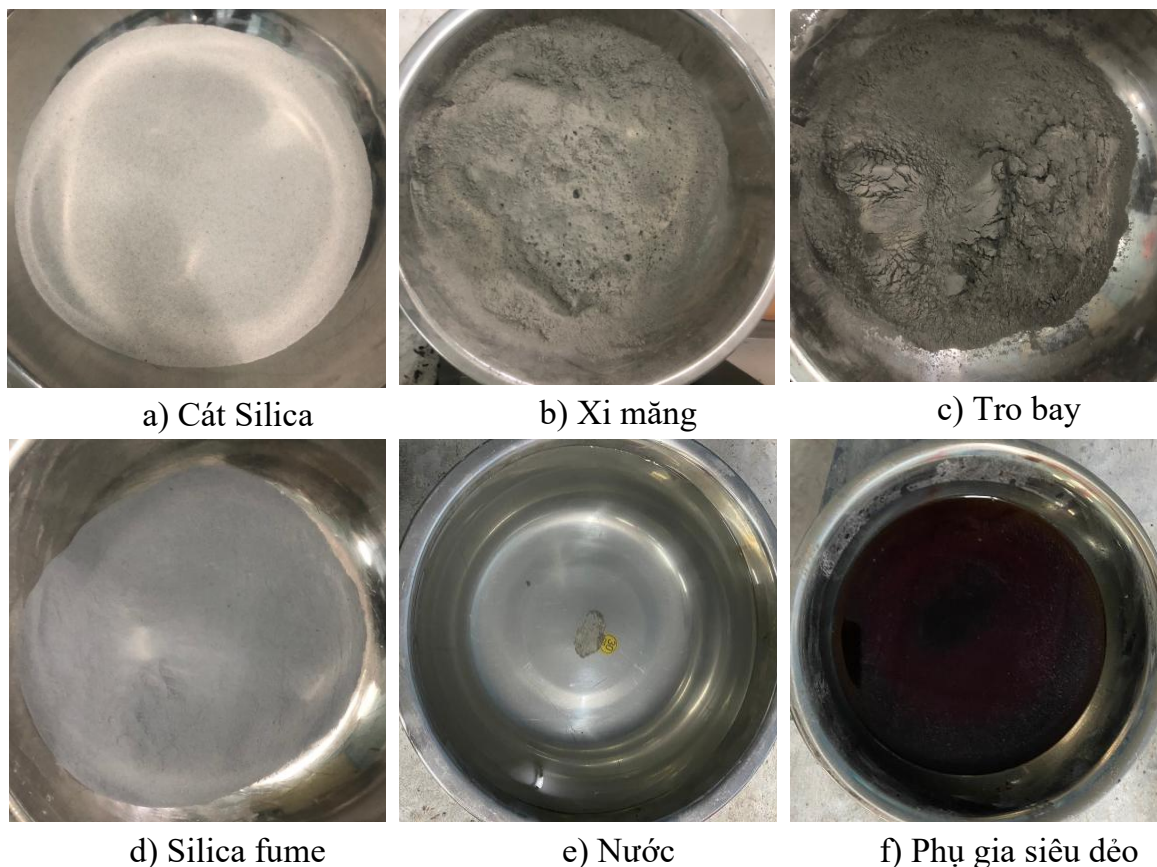
Sơ đồ tổng thể chương trình thí nghiệm thực hiện trong chương này được mô tả trong Hình 4.1.



Hình 4.1. Sơ đồ thực hiện thí nghiệm

4.1.2. Chế tạo mẫu thí nghiệm

Trong phần này, các mẫu thí nghiệm có dạng lăng trụ có cùng kích thước $40 \times 40 \times 160$ mm, thành phần hỗn hợp vữa được thiết kế và chế tạo giống chương 3. Tất cả các mẫu thí nghiệm đều được thiết kế theo hình lăng trụ có cùng kích thước $40 \times 40 \times 160$ mm (chiều rộng $\times$ chiều cao $\times$ chiều dài). Ba loạt mẫu HPFRC được sản xuất từ cùng một loại vữa, chứa cùng hàm lượng sợi với tổng thể tích là 2,0%, nhưng hệ thống sợi hỗn hợp khác nhau như sau: sợi móc dài với hàm lượng 0,5% - 1,0% - 1,5% pha trộn sợi trơn ngắn 1,5% - 1,0% - 0,5% được ký hiệu cụ thể như sau: 0,5% Sợi dài có móc + 1,5% Sợi trơn ngắn (L05S15); 1,0% Sợi dài có móc + 1,0% Sợi trơn ngắn (L10S10); 1,5% Sợi dài có móc + 0,5% Sợi trơn ngắn (L15S05). Hai loại mẫu được sử dụng: mẫu không khía (W) và mẫu có khía (N) với độ sâu 5 mm ở đáy mẫu (0,125 lần chiều cao mẫu uốn). Độ sâu khía mẫu được chọn dựa theo nghiên cứu hiện hữu có thể thay đổi trong khoảng 0,08-0,33 lần chiều cao mẫu uốn [72]. Các loạt mẫu đã được thí nghiệm dưới tải trọng tĩnh (S) và tải trọng lặp (C) bằng cách sử dụng thí nghiệm uốn ba điểm được trình bày tóm lược như hình 4.1.

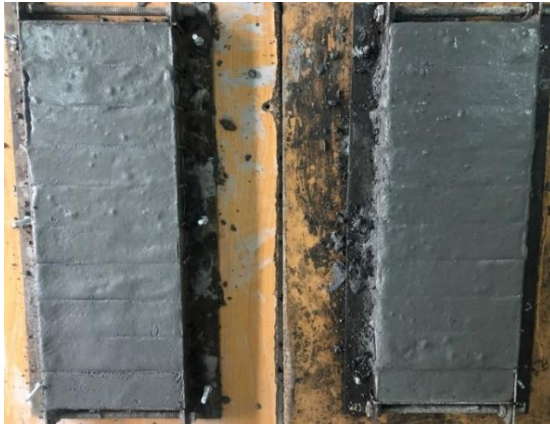


Hình 4.2. Thành phần hỗn hợp vữa HPFRC

Bảng 4.1. Thành phần hỗn hợp vữa HPFRC theo khối lượng và cường độ nén trung bình

Xi măng	Silica fume	Cát Silica	Tro bay	Phụ gia siêu dẻo	Nước	Cường độ nén trung bình (MPa)
0,80	0,07	1,00	0,20	0,04	0,26	72

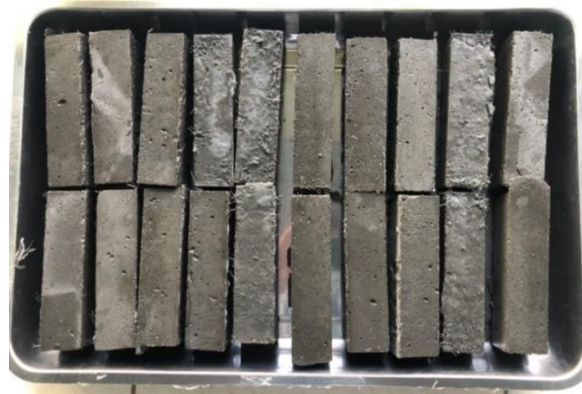
Bảng 4.1 liệt kê thành phần hỗn hợp vữa HPFRC và cường độ nén trung bình của hỗn hợp vữa này là 72 MPa khi nén mẫu hình trụ có kích thước 100×200 mm (đường kính $\times$ chiều cao). Hai loại sợi thép được sử dụng có cùng chủng loại và đặc tính như trong Chương 3. Quá trình trộn mẫu và bảo dưỡng tương tự như mô tả trong Chương 3.



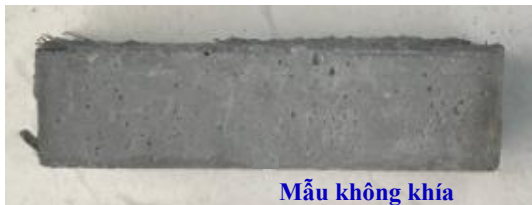
a) Đúc mẫu



b) Bảo dưỡng mẫu trong nước



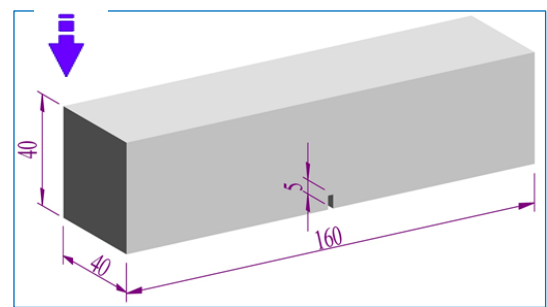
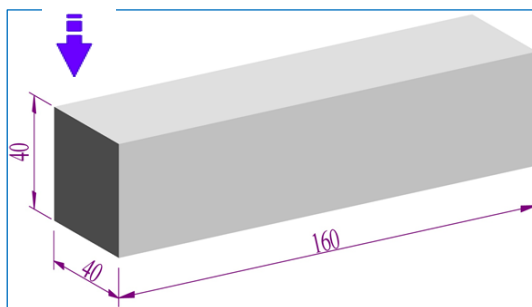
c) Mẫu sau khi bảo dưỡng trong nước



Mẫu không khía



Mẫu có khía



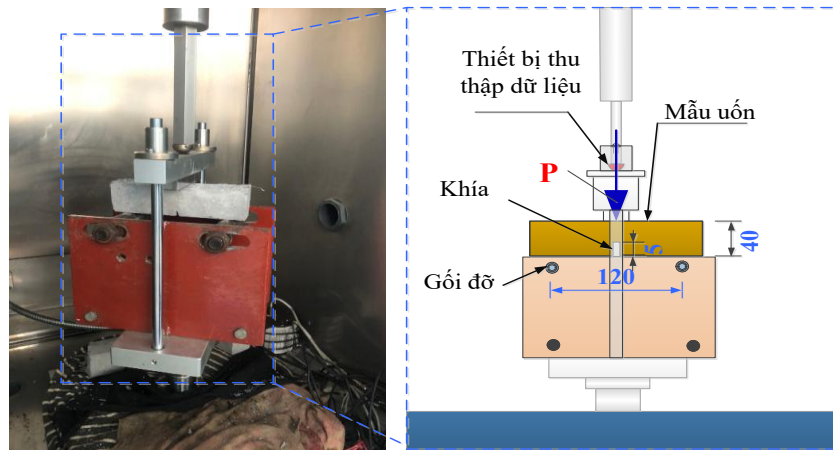
d) Kích thước mẫu (đơn vị: mm)

Hình 4.3. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm uốn HPFRC

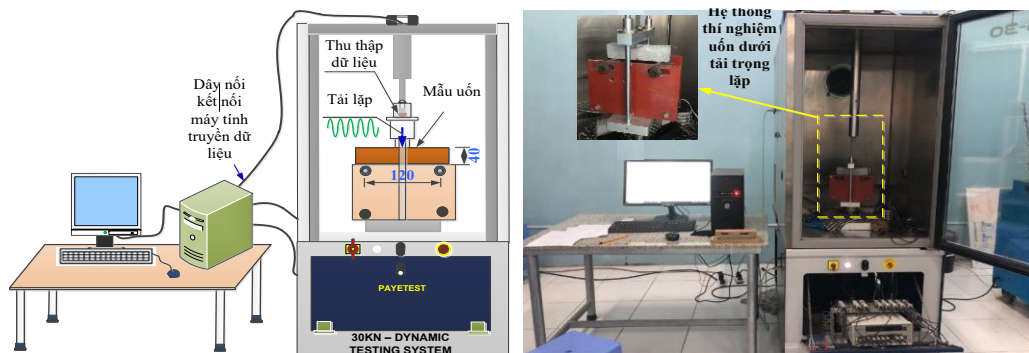
4.1.3. Thiết lập thí nghiệm

Thiết lập thí nghiệm cho các mẫu uốn chịu tải trọng tĩnh và tải trọng lặp được thể hiện lần lượt trong Hình 4.4a và Hình 4.4b. Theo Hình 4.4, cả thí nghiệm uốn dưới tải tĩnh và tải lặp đều được thực hiện trên máy DTS (Dynamic Testing System) có khả năng chịu tải 30 kN. Quá trình thí nghiệm và cách thức thu thập dữ liệu được thực hiện từng bước như sau:

- Đầu tiên, 2 mẫu từ mỗi loạt mẫu được thí nghiệm bằng phương pháp uốn ba điểm ở tải trọng tĩnh, tác động lực ở tốc độ 1mm/ phút. Sau đó, độ võng tại nhịp giữa (δ) được thu thập với tần số 1Hz.



a) Thiết lập thí nghiệm uốn dưới tải trọng tĩnh



b) Thiết lập thí nghiệm uốn dưới tải trọng lặp

Hình 4.4. Thiết lập thí nghiệm uốn 3 điểm dưới tải trọng tĩnh và lặp

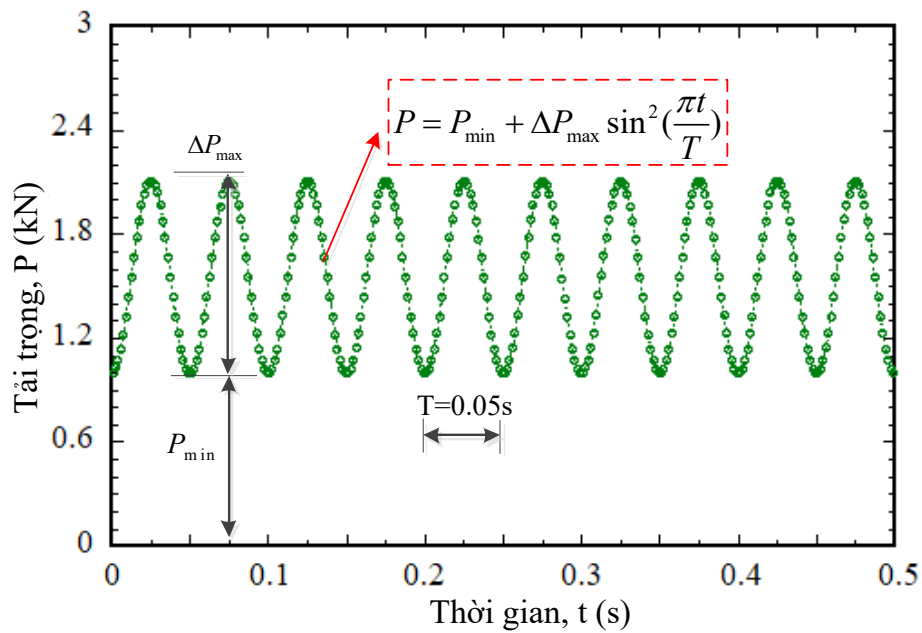
Ứng suất uốn (f_r) được tính dựa trên lực tác dụng (F) được ghi lại trong quá trình thí nghiệm bằng công thức:

$$f_r = \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{(bh)^2} \quad \text{cho loạt mẫu không khía} \quad (4.1)$$

$$f_r = \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{b(h-a)^2} \quad \text{cho loạt mẫu có khía} \quad (4.2)$$

Trong đó, F là tải trọng lớn nhất gây phá hủy, lấy tại đỉnh của biểu đồ tương quan giữa lực và biến dạng khi uốn của mẫu thí nghiệm; $(b \times h)$ tương ứng với (chiều rộng $\times$ chiều cao) của mẫu, a là chiều sâu vết khía. Sau khi thực hiện thí nghiệm uốn, ta thu được mối quan hệ giữa ứng suất-biến dạng hoặc tải trọng tác dụng- độ võng. Sau thí nghiệm uốn tĩnh, quy trình thí nghiệm mỏi và thu thập dữ liệu được thực hiện từng bước như sau:

- Đầu tiên, thiết lập biên độ tải và giá trị tải trọng lặp dựa vào tải trọng phá hủy ở tải trọng tĩnh. Sau khi thực hiện thí nghiệm, kết quả thu được là số chu kỳ phá hủy và đường cong mỏi dựa trên mối quan hệ Wohler theo quy luật hình sin như Hình 4.5.



Hình 4.5. Chu kỳ tải trọng lặp điển hình

4.2. Ứng xử uốn của HPFRC gia cường hệ sợi thép hỗn hợp dưới tác dụng của tải trọng tĩnh

4.2.1. Ảnh hưởng của hàm lượng sợi

Bảng 4.2 trình bày các thông số uốn được nghiên cứu bao gồm tải trọng uốn lớn nhất (P_{MOR}), mô men uốn lớn nhất (M_{MOR}), cường độ chịu uốn lớn nhất (f_{MOR}) và khả năng võng lớn nhất (δ_{MOR}) của 12 loạt mẫu HPFRC được gia cường sợi thép hỗn hợp, bao gồm 6 mẫu HPFRC không có vết nứt trước (không khía) và 6 mẫu HPFRC có vết nứt trước (có khía). Hình 4.6 thể hiện đường cong ứng xử mối quan hệ giữa tải trọng- độ võng và ứng suất - độ võng của các loạt mẫu HPFRC gia cường sợi thép hỗn hợp có khía và không khía dưới tác dụng của tải trọng tĩnh.

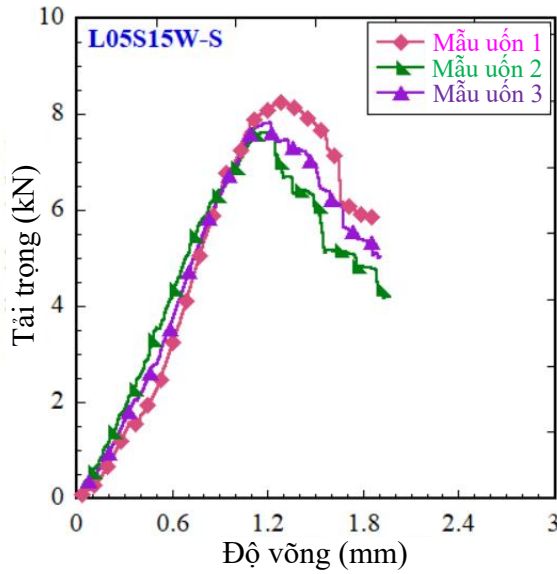
Trong loạt mẫu ký hiệu L05S15W-S (gia cường 0,5% sợi dài có móc và 1,5% sợi ngắn trơn – không khía), mối quan hệ giữa tải trọng và độ võng được thể hiện ở Hình 4.6a cho thấy ở giai đoạn đàn hồi ban đầu, tải trọng tăng đều với độ võng, điều này thể hiện có sự phối hợp giữa hỗn hợp vữa bê tông và các sợi trong quá trình chịu lực. Khi tải trọng đạt tới P_{MOR} trung bình 7,93 kN, đường cong giảm dần đều, thể hiện cơ chế chịu lực sau nứt tốt hơn, khả năng dẻo dai cao hơn so với mẫu HPFRC chỉ gia cường 0,5% loại sợi đơn (Sợi nhỏ 0,5 hoặc Sợi to 0,5). Hình 4.6b biểu diễn mối quan hệ giữa ứng suất – độ võng của L05S15W-S, biểu đồ cho thấy ứng xử tổng thể ổn định hơn, đường cong sau đỉnh lồi hơn nên mẫu có độ dẻo tốt hơn, thích hợp cho các ứng dụng cần khả năng biến dạng lớn hoặc duy trì khả năng chịu tải sau nứt.

So với loạt mẫu L05S15W-S, loạt mẫu L05S15N-S (gia cường 0,5% sợi dài có móc và 1,5% sợi ngắn trơn - có khía) chịu lực kém hơn với tải trọng P_{MOR} trung bình 5,88 kN. Giá trị trung bình của các tiêu chí thấp hơn cho thấy khả năng kháng uốn kém hơn.

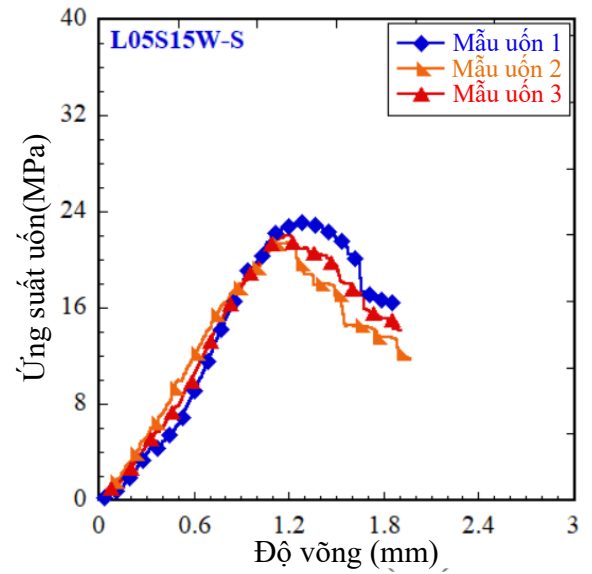
Bảng 4.2. Thông số uốn tại MOR của HPFRC dùng sợi thép hỗn hợp chịu tải trọng tĩnh

Loạt mẫu HPFRC	Tải trọng, P_{MOR} (kN)	Momen, M_{MOR} (kN.mm)	Ứng suất uốn, f_{MOR} (MPa)	Độ võng, δ_{MOR} (mm)	Năng lượng hấp thụ, T_{MOR} (MPa.mm)
L05S15W-S	7,92	237,60	22,28	1,25	14,52
	8,25	247,50	23,20	1,30	15,13
	7,61	228,30	21,40	1,20	13,94
Giá trị TB (Độ lệch chuẩn)	7,93 (0,32)	237,80 (9,60)	22,29 (0,90)	1,25 (0,05)	14,53 (0,60)
L05S15N-S	5,89	176,64	21,63	1,08	13,82
	6,19	185,55	22,72	1,24	15,80
	5,57	167,04	20,45	0,93	11,85
Giá trị TB (Độ lệch chuẩn)	5,88 (0,31)	176,41 (9,26)	21,60 (1,13)	1,08 (0,16)	13,83 (1,98)
L10S10W-S	7,34	220,20	20,64	1,39	12,38
	7,66	229,80	21,54	1,72	16,24
	7,07	212,10	19,88	1,07	8,47
Giá trị TB (Độ lệch chuẩn)	7,36 (0,30)	220,70 (8,86)	20,69 (0,83)	1,39 (0,32)	12,36 (3,89)
L10S10N-S	5,30	159,00	19,47	1,31	11,33
	5,22	156,60	19,18	1,22	11,52
	5,33	159,90	19,58	1,40	11,20
Giá trị TB (Độ lệch chuẩn)	5,28 (0,06)	158,50 (1,71)	19,41 (0,21)	1,31 (0,09)	11,35 (0,16)
L15S05W-S	8,21	246,30	23,09	0,99	11,75
	8,55	256,50	24,05	1,03	12,70

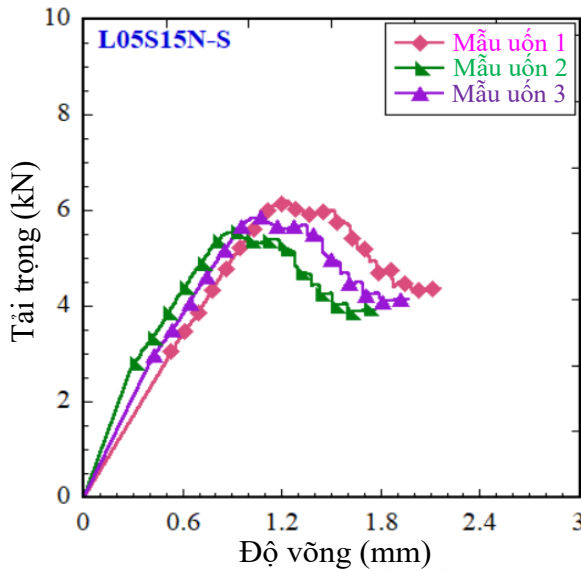
	7,88	236,40	22,16	0,93	10,81
Giá trị TB <i>(Độ lệch chuẩn)</i>	8,21 <i>(0,34)</i>	246,40 <i>(10,05)</i>	23,10 <i>(0,94)</i>	0,98 <i>(0,05)</i>	11,76 <i>(0,95)</i>
L15S05N-S	5,54	166,20	20,35	1,26	8,33
	5,62	168,60	20,64	0,96	8,92
	5,46	163,80	20,06	1,58	7,72
Giá trị TB <i>(Độ lệch chuẩn)</i>	5,54 <i>(0,08)</i>	166,20 <i>(2,40)</i>	20,35 <i>(0,29)</i>	1,27 <i>(0,31)</i>	8,32 <i>(0,60)</i>



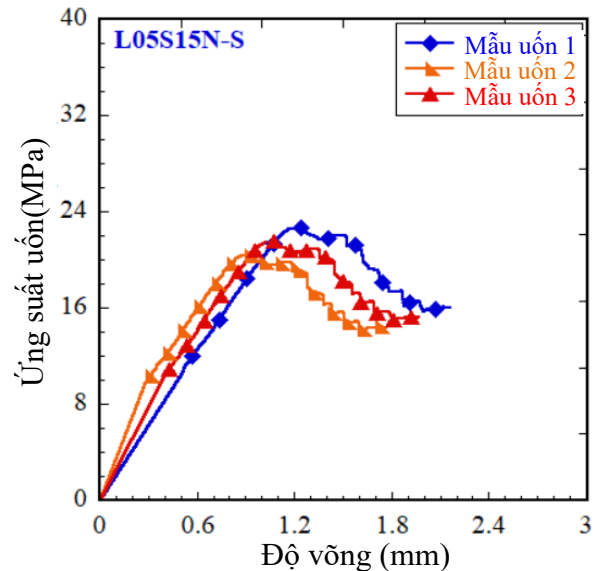
a) Tải trọng (Loạt mẫu L05S15W-S)



b) Ứng suất (Loạt mẫu L05S15W-S)



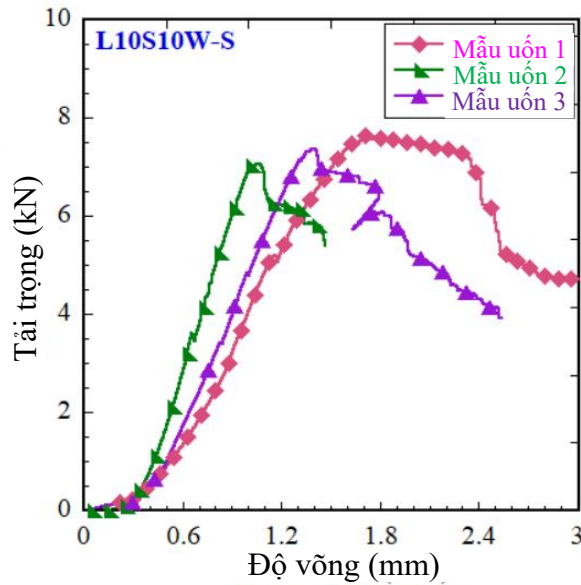
c) Tải trọng (Loạt mẫu L05S15N-S)



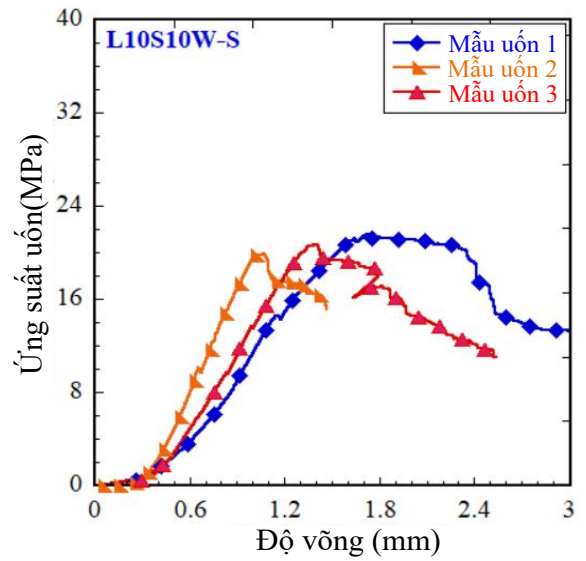
d) Ứng suất (Loạt mẫu L05S15N-S)

Hình 4.6. Ứng xử uốn của mẫu L05S15W-S và mẫu L05S15N-S dưới tải trọng tĩnh

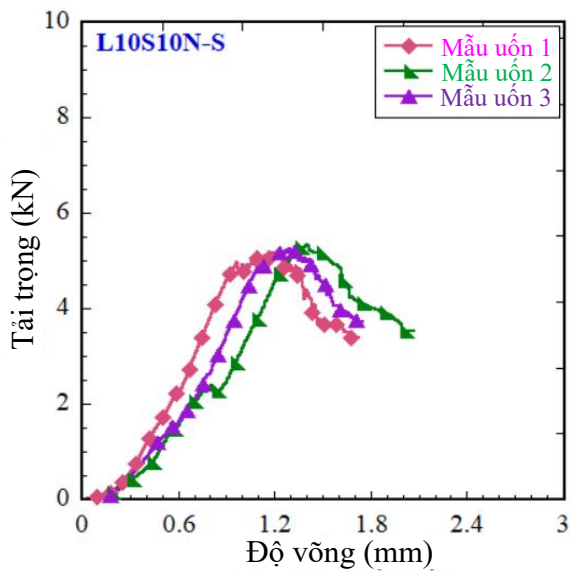
Kết quả thí nghiệm như trên Hình 4.6 thấy cả hai loại mẫu HPFRC đều có ứng xử hóa dẻo sau nứt, thể hiện qua việc tải trọng và ứng suất tiếp tục tăng sau giai đoạn nứt đầu tiên trước khi đạt đỉnh. Mẫu L05S15W-S (hàm lượng sợi nhỏ 15%) đạt khả năng chịu tải và ứng suất uốn cao hơn so với mẫu L05S15N-S. Đồng thời, đường cong của L05S15W-S có đoạn sau đỉnh giảm từ từ hơn, cho thấy khả năng duy trì tải và độ dai phá hủy tốt hơn, phản ánh hiệu quả bắc cầu vết nứt của hệ sợi cao hơn.



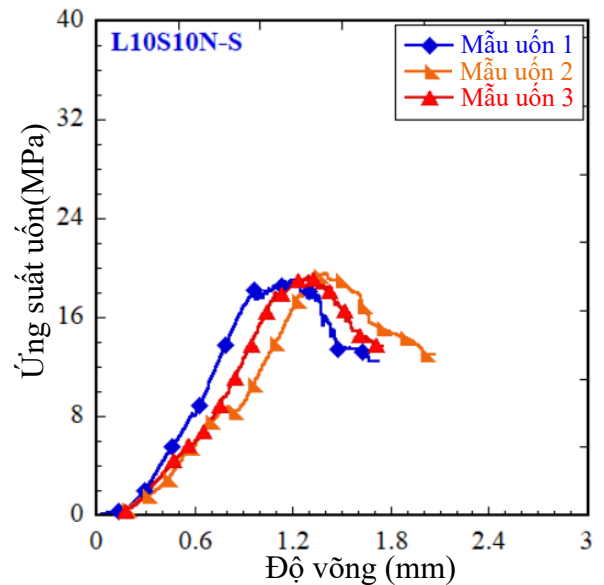
a) Tải trọng (L10S10W-S)



b) Ứng suất (Loạt mẫu L10S10W-S)



c) Tải trọng (Loạt mẫu L10S10N-S)

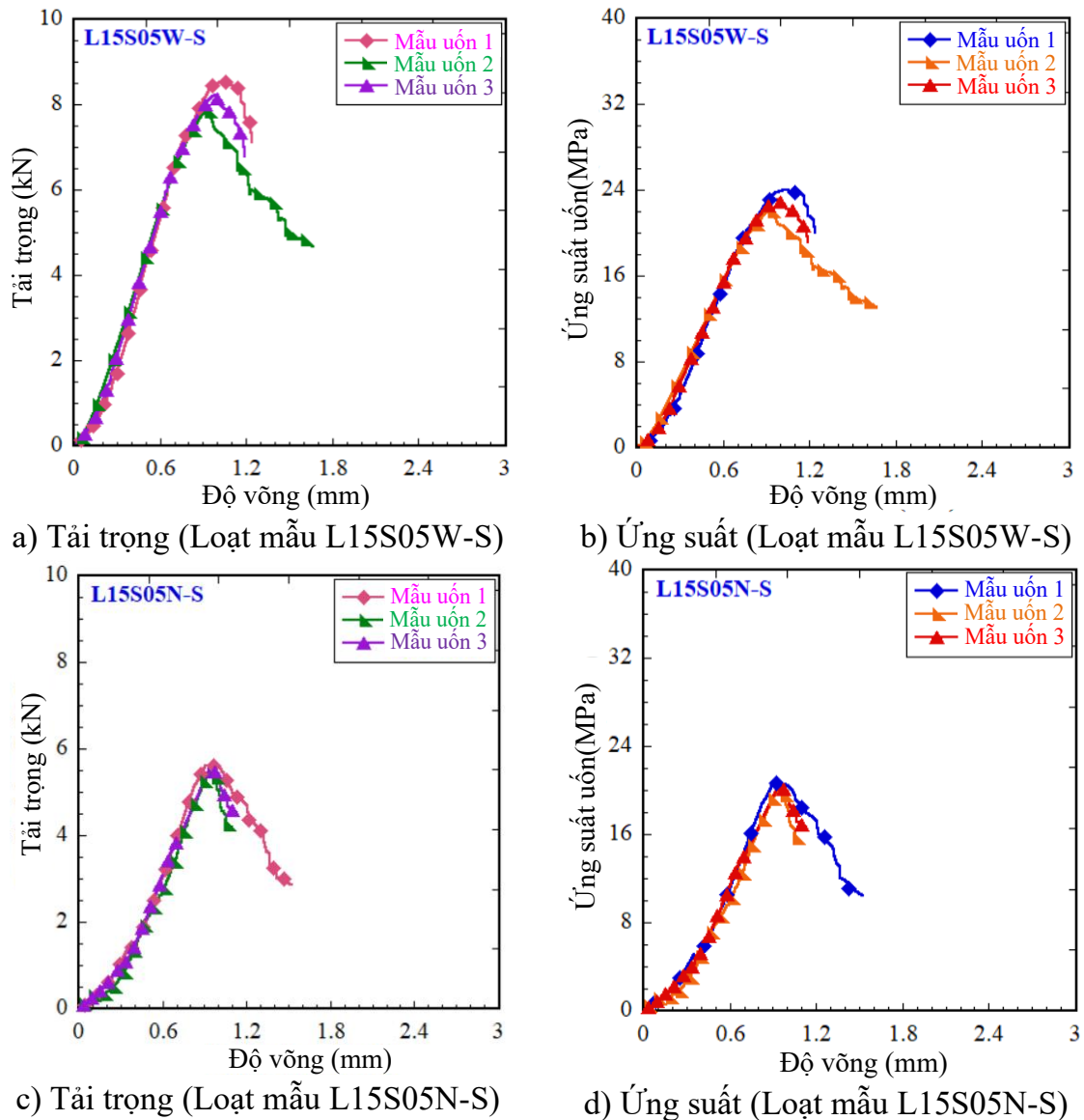


d) Ứng suất (Loạt mẫu L10S10N-S)

Hình 4.7. Ứng xử uốn của mẫu L10S10W-S và L10S10N-S dưới tải trọng tĩnh

Đối với loạt mẫu ký hiệu L10S10W-S ở Hình 4.7a và Hình 4.7b, khi tăng hàm lượng cốt sợi dài có móc bằng với hàm lượng cốt sợi ngắn ở mức 1,0% thể tích, khả năng kháng uốn ổn định hơn so với L05S15W-S do tỷ lệ cốt sợi đồng đều hơn. Ở giai đoạn đàn hồi ban đầu, góc hợp bởi đường cong ứng xử với trục hoành (trục biến dạng) lớn hơn, lực và độ võng tăng dần đều, điều này cho thấy sự phối hợp cực kỳ hiệu quả giữa hỗn hợp vữa bê tông và các sợi thép gia cường. Ở giai đoạn này chưa xuất hiện vết nứt hoặc chỉ có các vết nứt nhỏ. Ở giai đoạn sau cực đại, ứng suất suy giảm từ từ

cho thấy sự phân tán ứng suất tốt hơn, đây là minh chứng cho sự cải thiện khả năng chịu tải sau nứt của hệ thống sợi hỗn hợp. Riêng đối với loạt mẫu L10S10N-S có vết khía, cường độ uốn tại MOR có giá trị là 5,28 kN và độ võng tại MOR là 1,31 mm đều thấp hơn mẫu L10S10W-S. Độ dốc sau đỉnh cũng lớn hơn. Vết nứt đầu làm tăng tốc độ phát triển của vết nứt lớn, làm cho mẫu uốn giảm khả năng chịu tải sau nứt, qua đó, độ dẻo dai của mẫu cũng giảm theo nhưng không đáng kể



Hình 4.8. Ứng xử uốn của mẫu L15S05W-S và L15S05N-S dưới tải trọng tĩnh

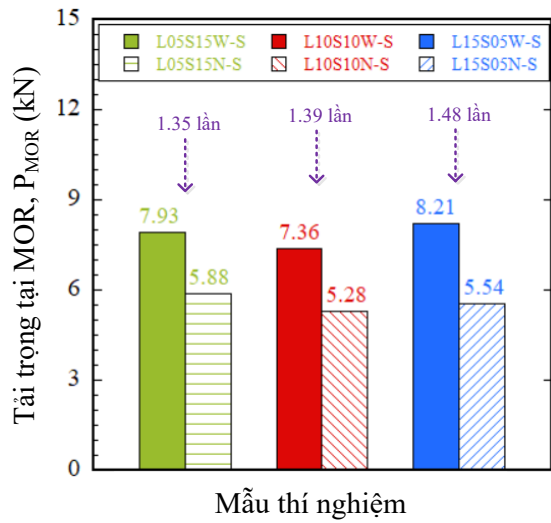
Ngoài ra, ứng xử của một số loạt mẫu trong Hình 4.6 và Hình 4.7 vẫn còn phân tán và chưa thể hiện xu hướng thật sự rõ ràng. Do đó, cần có thêm các nghiên cứu bổ sung nhằm nâng cao độ tin cậy của kết quả.

Như có thể thấy ở Hình 4.8a và Hình 4.8b, mối tương quan giữa tải trọng- độ võng, giữa ứng suất- độ võng trong loạt mẫu L15S05W-S khá tương đồng. Khi hàm lượng sợi dài có móc tăng lên gấp 3 lần sợi ngắn tron dẫn đến độ cứng ban đầu cao hơn và làm chậm quá trình xuất hiện vết nứt đầu tiên. Khi tỷ lệ sợi dài có móc tăng lên, cường độ chịu kéo và khả năng chống nứt của vật liệu cũng được cải thiện nhờ cơ chế neo giữ của sợi có móc. Hình 4.8c và Hình 4.8d thể hiện quan hệ giữa tải trọng – độ võng và ứng suất – độ võng của mẫu L15S05N-S có khía. Khả năng chịu lực của loạt mẫu này ở mức 5,54 kN, thấp hơn mẫu L15S05W-S ở mức 8,21 kN. Có thể thấy từ Hình 4.9, loạt mẫu L15S05W có khả năng kháng uốn tốt nhất ứng với các thông số: ($P_{MOR} = 8,21$ kN, $M_{MOR} = 246,40$ kN.m, $f_{MOR} = 23,1$ MPa, $\delta_{MOR} = 0,98$ mm).

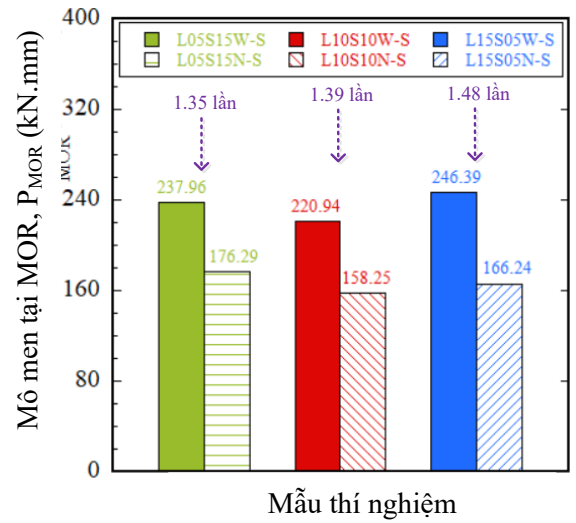
Các kết quả trong Bảng 4.2 cho thấy hàm lượng và tổ hợp sợi hỗn hợp chi phối rõ rệt ứng xử uốn tĩnh của HPFRC thông qua ba đại lượng then chốt: độ võng tại MOR, sức kháng uốn và năng lượng phá hủy. Trước hết, các cấp phối có hàm lượng sợi cao hơn hoặc phân bố sợi hiệu quả (ví dụ nhóm L10S10W-S và L15S05W-S) thể hiện mô men và ứng suất uốn lớn hơn, phản ánh khả năng truyền ứng suất sau nứt tốt hơn nhờ cơ chế bắc cầu vết nứt và huy động đồng thời nhiều sợi trong vùng FPZ. Đồng thời, độ võng tại MOR tăng đáng kể ở các mẫu có hàm lượng sợi tối ưu, cho thấy sự phát triển biến dạng sau nứt ổn định hơn và quá trình lan truyền vết nứt bị kìm hãm.

4.2.2. Ảnh hưởng của vết khía ban đầu

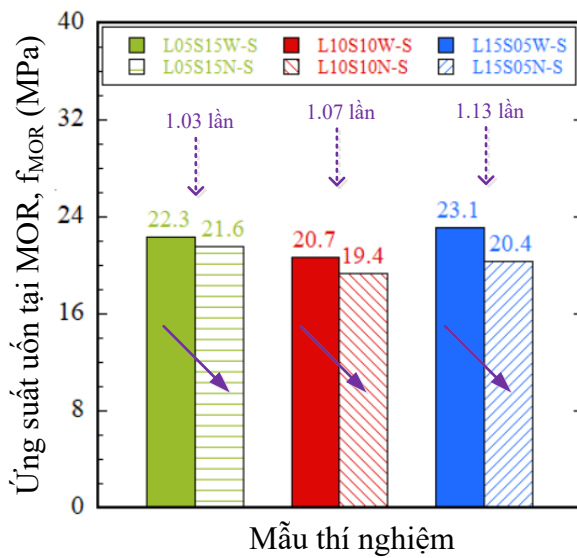
Hình 4.9 so sánh khả năng kháng uốn của tất cả các loạt mẫu HPFRC có khía và không khía dưới tải trọng tĩnh. Các thông số uốn tĩnh của loạt mẫu HPFRC không khía đều cao hơn các tham số của chuỗi có khía. Theo quan sát, các tỷ lệ về tải trọng uốn lớn nhất (P_{MOR}), mô men uốn lớn nhất (M_{MOR}), cường độ chịu uốn lớn nhất (f_{MOR}) và độ võng lớn nhất (δ_{MOR}) của các chuỗi có khía và không khía tương ứng là 1,35; 1,35 1,03; 1,16 và 1,05 lần đối với L05S15; 1,39, 1,39, 1,07, 1,06 và 1,09 lần đối với L10S10; 1,48, 1,48, 1,13, 0,77 và 1,42 lần đối với L15S05. Xu hướng của khả năng chịu uốn (δ_{MOR}) nhìn chung trái ngược với xu hướng của M_{MOR} với sự gia tăng



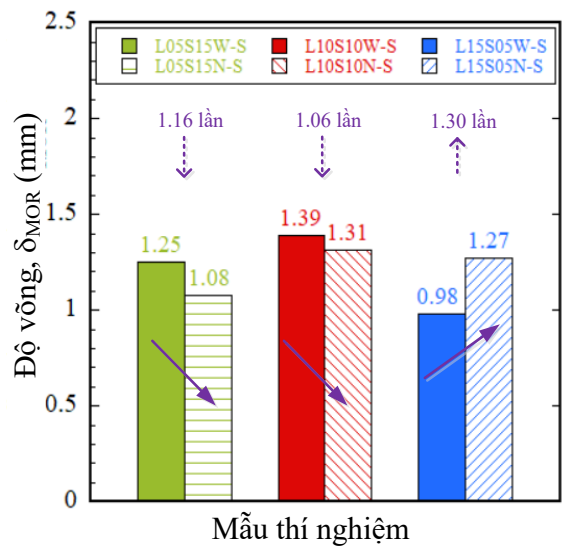
a) Tải trọng tại MOR



b) Mô men tại MOR



c) Ứng suất uốn tại MOR



d) Độ võng tại MOR

Hình 4.9. So sánh các thông số thể hiện khả năng kháng uốn của HPFRC

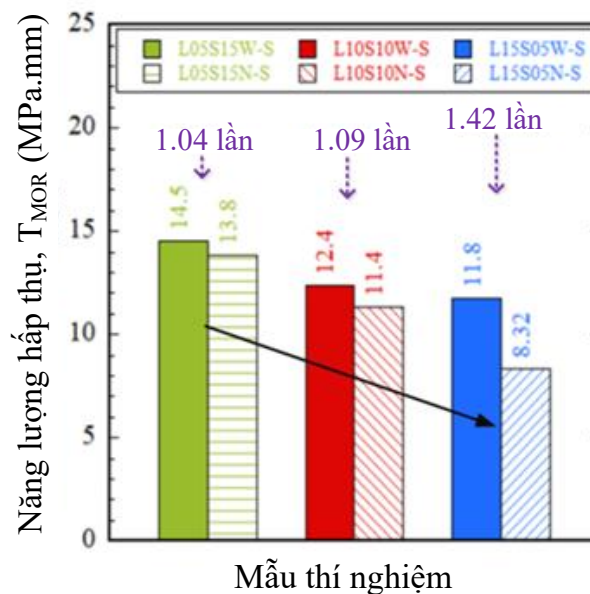
hàm lượng sợi nhỏ trong các hệ thống sợi hỗn hợp.

Có thể thấy từ Hình 4.9a và Hình 4.9b, loại L15S05W chịu được tải trọng P_{MOR} lớn nhất 8.21kN tương ứng với $M_{MOR} = 246,40$ kN.m. Tuy nhiên từ Hình 4.9c, 4.9d, cả 2 loại L10S10W và L10S10S đều có ứng suất uốn f_{MOR} thấp nhất nhưng độ võng δ_{MOR} cao nhất. Bên cạnh đó các loạt mẫu HPFRC không có khía cao hơn các loạt mẫu HPFRC có khía từ 1,06 đến 1,16 lần, ngoại trừ mẫu L15S05 thấp hơn 1,30 lần (trường hợp này cần được xác nhận thêm bằng các nghiên cứu khác sau này). Hầu hết, các

mẫu HPFRC có khía, các thông số kháng uốn đều thấp hơn các mẫu HPFRC không khía do mặt cắt yếu hơn, vết khía trước tạo ra sự tập trung ứng suất, làm suy giảm khả năng chịu lực của mẫu.

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

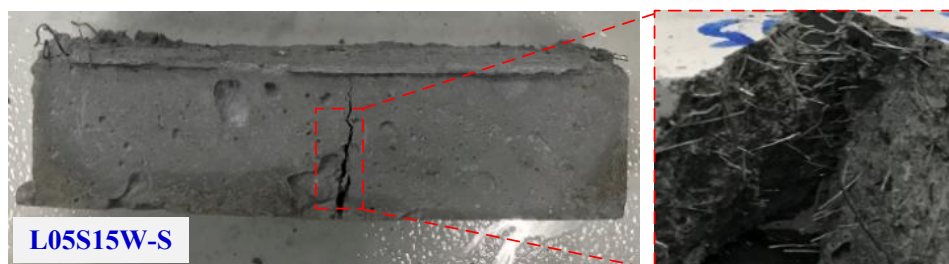
Hình 4.10 so sánh năng lượng hấp thụ (T_{MOR}) của loạt mẫu HPFRC có khía và không khía dưới tải trọng uốn tĩnh. Năng lượng hấp thụ tăng dần khi tăng hàm lượng sợi nhỏ và giảm hàm lượng sợi lớn. Điều này xảy ra là do sợi nhỏ có khả năng kết nối các hạt cốt liệu ở cấp độ vi mô, do đó diện tích tiếp xúc của sợi gia cường với hỗn hợp vữa lớn hơn so với sợi lớn, làm tăng sự phân tán ứng suất tại các vết nứt nhỏ. Từ đó, trì hoãn sự hình thành các vết nứt lớn và kiểm soát hiệu quả các vết nứt nhỏ, làm tăng khả năng hấp thụ năng lượng.



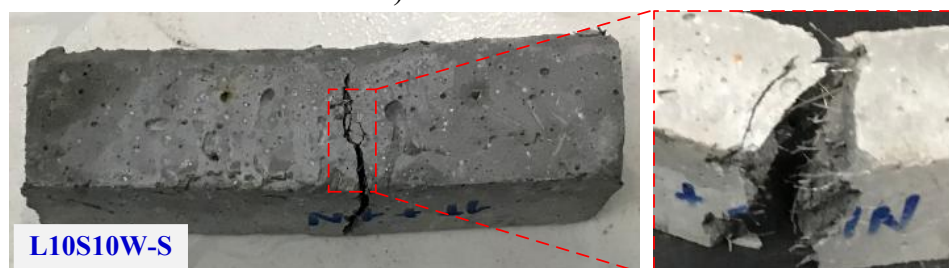
Hình 4.10. So sánh khả năng hấp thụ năng lượng của các mẫu HPFRC tại MOR

Hình 4.11 cho thấy ứng xử nứt ở trạng thái phá hủy của loạt mẫu HPFRC dưới tác dụng của tải trọng uốn tĩnh. Như có thể thấy ở hình 4.11a, b, c, vết nứt lớn dẫn đến phá hủy của mẫu chủ yếu tập trung ở giữa dầm, mặt cắt phá hủy thô và xù xì do sự hiện diện của các sợi thép. Khi tải trọng đạt ở trạng thái P_{MOR} , dầm xuất hiện vết nứt lớn dẫn đến phá hủy, các sợi thép bị kéo tuột ra và không có dấu hiệu đứt gãy. Từ đó có thể kết luận rằng cơ chế phá hủy được tạo ra do sự mất liên kết giữa sợi thép

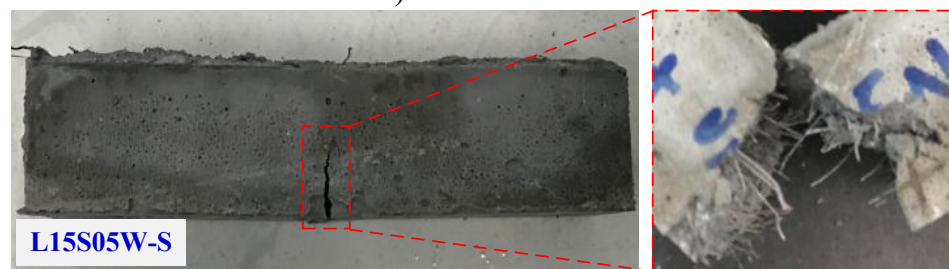
và bê tông nền. Hình 13d, e, f cho thấy các vết nứt chính của loạt mẫu có khía chủ yếu bắt đầu tại vết khía có sẵn và lan truyền theo phía tải trọng tác dụng.



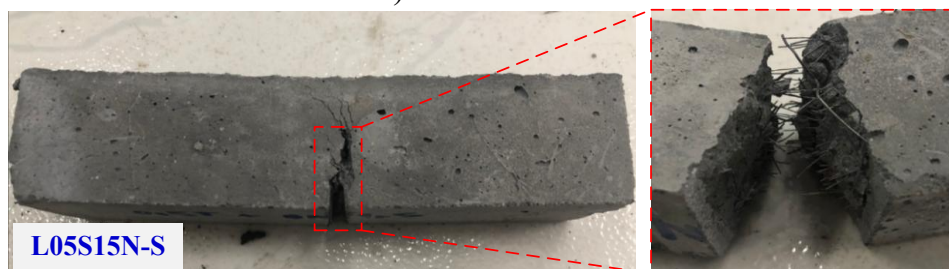
a) L05S15W-S



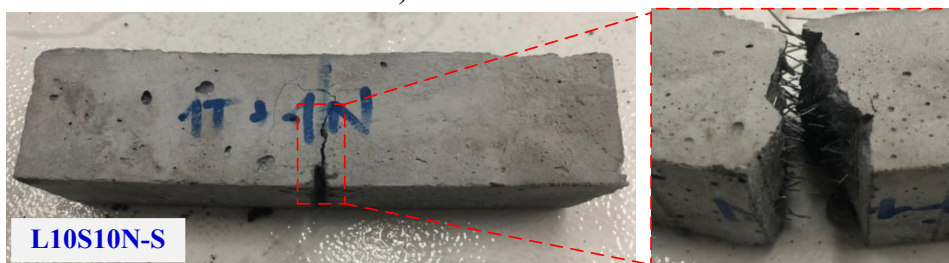
b) L10S10W-S



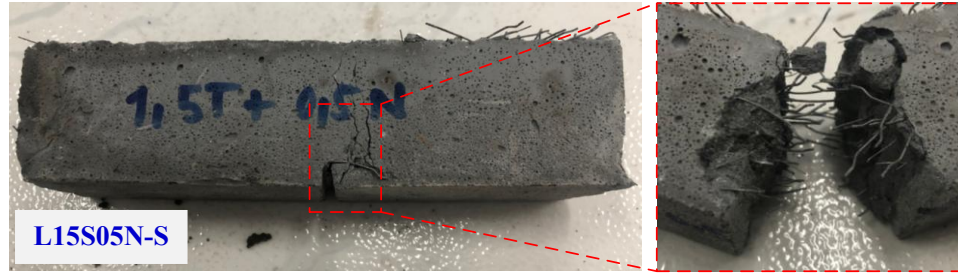
c) L15S05W-S



d) L05S15N-S



e) L10S10N-S



f) L15S05N-S

Hình 4.11. Tiết diện phá hủy của mẫu HPFRC được nghiên cứu dưới tải trọng tĩnh

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

Khả năng chống phá hủy của HPFRC có khía được đánh giá thông qua hệ số cường độ ứng suất (K_{IC}), hệ số này được xem xét dựa trên độ bền phá hủy của vật liệu, phản ánh khả năng chống lại sự phát triển của vết nứt [85,86]. Trong vật liệu HPFRC gia cường sợi thép hỗn hợp, K_{IC} có ý nghĩa đặc biệt vì nó liên quan trực tiếp đến việc cải thiện cơ tính của vật liệu. Hệ số K_{IC} của mẫu HPFRC dưới tải trọng uốn ba điểm được tính theo Karihaloo [84] như sau:

$$M_{MOR} = \frac{f_{MOR} b (h-a)^2}{6} \quad (4.3)$$

$$K_{IC} = 6R(\alpha) M_{MOR} \cdot \frac{\sqrt{a}}{bh^2} = R(\alpha)(1-\alpha) f_{MOR} \sqrt{a} \quad (4.4)$$

Với M_{MOR} và f_{MOR} là momen uốn và cường độ uốn tại MOR; a , b và h lần lượt là chiều sâu vết khía, chiều rộng và chiều cao của mẫu. $R(\alpha)$ là hệ số điều chỉnh phụ thuộc vào kích cỡ và chiều sâu vết khía của mẫu dưới tải trọng uốn ba điểm, được tính như trong [84]:

$$R(\alpha) = \frac{[1.99 - (1-\alpha)(2.15 - 3.93 + 2.7\alpha^2)]}{(1+2)(1-\alpha)^{1.5}} \quad (4.5)$$

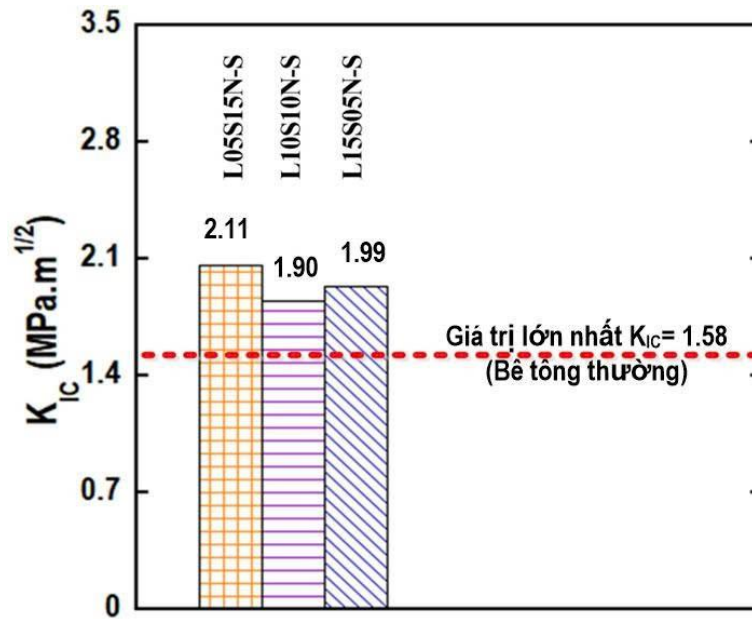
Với giá trị của α : $0 \leq \alpha = \frac{a}{h} \leq 1$

Trong nghiên cứu này, giá trị của $\alpha = 0,125 \left(\frac{a}{h} = \frac{5}{40} \right)$, tương ứng như cách tính trong công thức (4.5), ta nhận được giá trị của $R(\alpha) = 1,76$

Bảng 4.3. Hệ số cường độ ứng suất K_{IC} của loạt mẫu HPFRC có khía

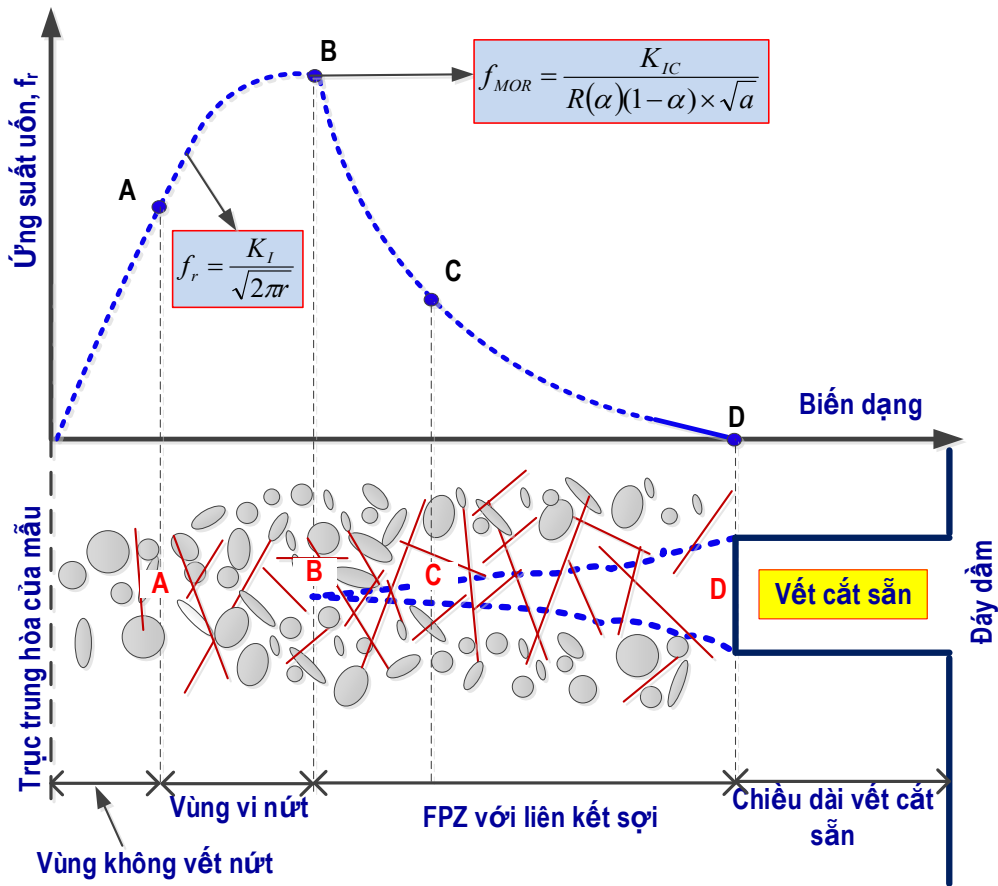
Loạt mẫu HPFRC	Tỷ số $\alpha = \frac{a}{h}$	Momen uốn M_{MOR} (kN.mm)	Đánh giá hệ số cường độ ứng suất K_{IC} (MPa. $\sqrt{mm}$)
L05S15N-S	0,125	176,64	2,12
		185,55	2,22
		167,04	2,00
Giá trị TB (Độ lệch chuẩn)	-	176,41 (9,26)	2,11 (0,11)
L10S10N-S	0,125	159,00	159,00
		156,60	156,60
		159,90	159,90
Giá trị TB (Độ lệch chuẩn)	-	158,50 (1,71)	1,90 (0,02)
L15S05N-S	0,125	166,20	1,99
		168,60	2,02
		163,80	1,96
Giá trị TB (Độ lệch chuẩn)	-	166,20 (2,40)	1,99 (0,03)

Bảng 4.3 trình bày giá trị của hệ số cường độ ứng suất K_{IC} của loạt mẫu HPFRC có khía. Theo bảng 4.3, giá trị trung bình của K_{IC} trong loạt mẫu có ký hiệu từ L05S15N-S; L10S10N-S; L15S05N-S dao động trong khoảng từ 1,90 đến 2,11 (MPa. $\sqrt{mm}$), so với bê tông thường có giá trị từ 0,18-1,58 (MPa. $\sqrt{mm}$) [69,70]. Rõ ràng, loạt mẫu HPFRC được gia cường sợi thép lại có hệ số K_{IC} cao hơn hẳn từ 1,3 đến 10 lần như Hình 4.12. Giá trị K_{IC} càng cao, khả năng chịu ứng suất tại đầu vết nứt càng tốt, giúp vật liệu khó bị phá hủy dưới tác dụng của tải trọng.



Hình 4.12. So sánh độ bền phá hủy của loạt mẫu HPFRC gia cường sợi thép hỗn hợp chịu uốn dưới tải trọng tĩnh

Điều này cho thấy vai trò quan trọng của các sợi gia cường đến sự phân bố ứng suất trong loạt mẫu HPFRC có khía. Nhờ có sự hiện diện của cốt sợi, vật liệu trở nên dẻo dai hơn và có sức kháng uốn tốt hơn. Sợi có hệ số cường độ ứng suất K_{IC} lớn nhất là 2,11 (MPa. $\sqrt{mm}$) có ký hiệu L05S15N-S. Khi hàm lượng sợi to ít nhất và sợi nhỏ nhiều nhất, mẫu HPFRC có độ bền phá hủy tốt nhất. Sợi nhỏ giúp kiểm soát các vết nứt, trong khi sợi lớn chịu tải và giữ cho lớp bê tông nền không bị phá vỡ ngay khi đã hình thành các vết nứt lớn. Sự phối hợp này làm tăng độ dẻo dai và khả năng hấp thụ năng lượng, góp phần giảm đi sự tập trung ứng suất tại các vùng có khuyết tật (lỗ rỗng hoặc vùng vật liệu không đồng nhất). Hệ thống sợi hỗn hợp hoạt động như một mạng lưới chống nứt, giúp phân phối lại ứng suất ở đầu vết nứt như trong minh họa ở Hình 4.13.



Hình 4.13. Phân bố ứng suất trong loạt mẫu HPFRC có khía

Như Hình 4.13, 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.

4.3. Ứng xử uốn của HPFRC gia cường hệ sợi thép hỗn hợp dưới tác dụng của tải trọng lặp

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

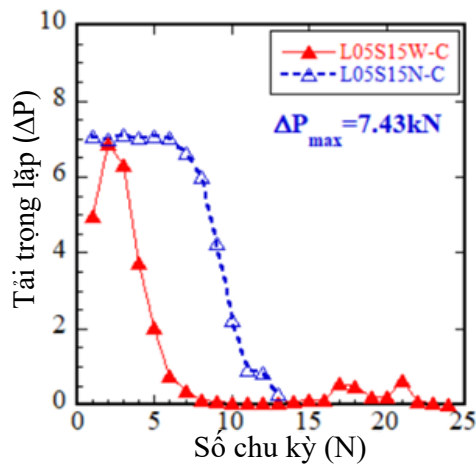
Bảng 4.4 trình bày tất cả các thông số của tất cả các loạt mẫu có khía và không khía, bao gồm biên độ tải trọng ($\Delta P_{\max}$), ứng suất phá hoại f_{MOR} , tỷ số giữa biên độ ứng suất cao nhất và cường độ uốn tĩnh ($\Delta f_{\max} / f_{\text{MOR}}$), số chu kỳ (N).

Dựa vào Bảng 4.4, có thể thấy rằng số chu kỳ phá hoại N của loạt mẫu có khía luôn thấp hơn nhiều so với loạt mẫu không khía. Có ít nhất 5 mức gia tải khác nhau cho tất cả các loạt mẫu. Với biên độ tải cao nhất 0,9, loạt mẫu L05S15W-C và L05S15N-C có số chu kỳ phá hoại thấp nhất lần lượt là 24 chu kỳ và 12 chu kỳ. Khi tăng hàm lượng sợi to, số chu kỳ phá hoại cũng tăng dần lên. Số chu kỳ phá hoại cao nhất ở biên độ tải 0,7 của loạt mẫu L15S05W-C là 169.686 chu kỳ, và loạt mẫu L15S05N-C là 161.000 chu kỳ.

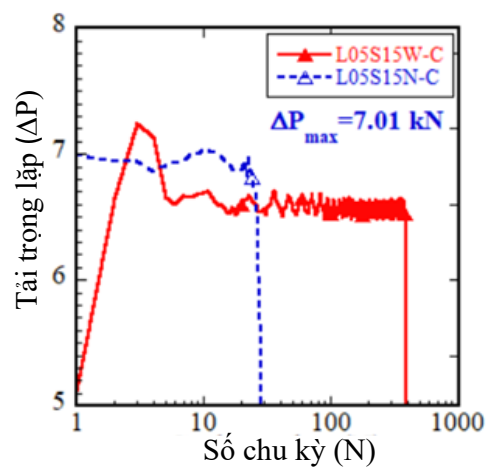
Hình 4.14 thể hiện mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu L05S15 có khía và không khía dưới tải trọng lặp với sáu mức tải trọng khác nhau từ 0,65 đến 0,9. Khi biên độ tải trọng dao động từ 5,36 kN đến 7,43 kN, tương ứng với biên độ ứng suất từ 15,08 MPa đến 20,88 MPa, số chu kỳ phá hoại của loạt mẫu L05S15W giảm từ 90503 chu kỳ còn 24 chu kỳ ở đường đồ thị màu xanh và loạt mẫu L05S15N giảm từ 42839 chu kỳ về còn 13 chu kỳ ở đường đồ thị màu đỏ.

Bảng 4.4. Kết quả thí nghiệm của bê tông HPFRC gia cường thép sợi hỗn hợp dưới tải trọng lặp

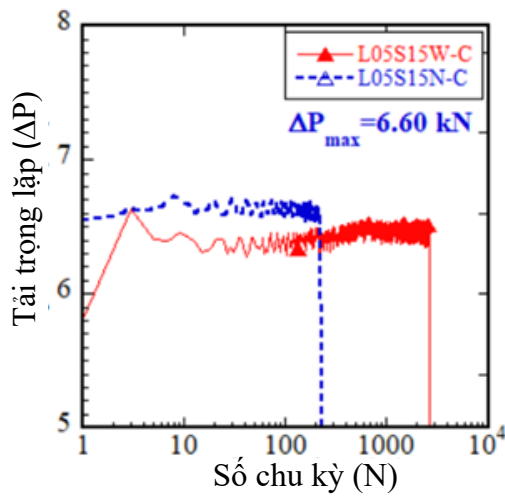
Biên độ tải tối đa $\Delta P_{\max}$ (kN)		Biên độ ứng suất tối đa $\Delta f_{\max}$ (MPa)		Tỷ số $\frac{\Delta f_{\max}}{f_{MOR}}$	Số chu kỳ N	
Loạt mẫu thí nghiệm						
L05S15W-C	L05S15N-C	L05S15W-C	L05S15N-C	-	L05S15W-C	L05S15N-C
7,43	7,43	20,88	20,88	0,90	24	13
7,01	7,01	19,72	19,72	0,85	401	45
6,60	6,60	18,56	18,56	0,80	2724	233
6,19	6,19	17,40	17,40	0,75	4557	251
5,78	5,78	16,24	16,24	0,70	67200	13272
5,36	5,36	15,08	15,08	0,65	90503	42839
Loạt mẫu thí nghiệm						
L10S10W-C	L10S10N-C	L10S10W-C	L10S10N-C	-	L10S10W-C	L10S10N-C
6,89	6,89	19,39	19,39	0,90	93	19
6,51	6,51	18,31	18,31	0,85	122	24
6,13	6,13	17,24	17,24	0,80	6276	2598
5,75	5,75	16,16	16,16	0,75	11642	8185
5,36	5,36	15,08	15,08	0,70	60090	40755
4,98	4,98	14,00	14,00	0,65	277563	148647
Loạt mẫu thí nghiệm						
L15S05W-C	L15S05N-C	L15S05W-C	L15S05N-C	-	L15S05W-C	L15S05N-C
7,70	7,70	21,64	21,64	0,90	59	32
7,27	7,27	20,44	20,44	0,85	132	103
6,84	6,84	19,24	19,24	0,80	931	607
6,41	6,41	18,04	18,04	0,75	136100	95461
5,99	5,99	16,83	16,83	0,70	169686	161000



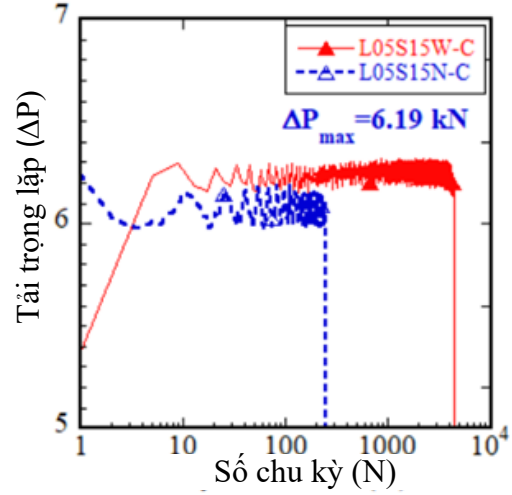
a)



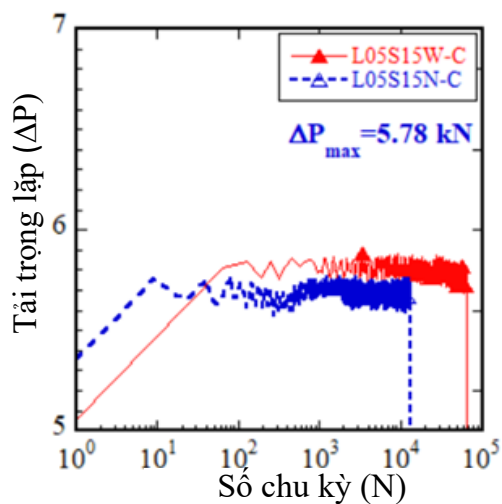
b)



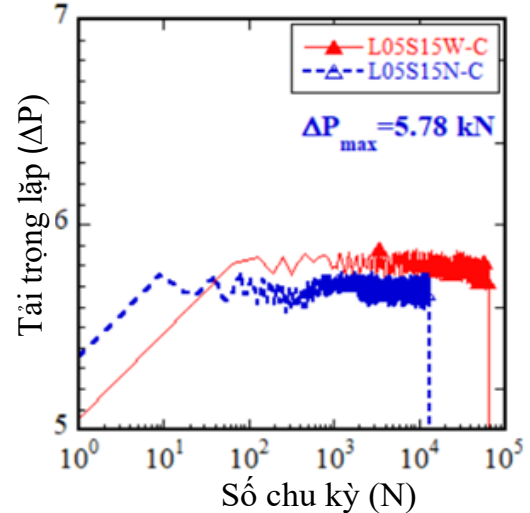
c)



d)

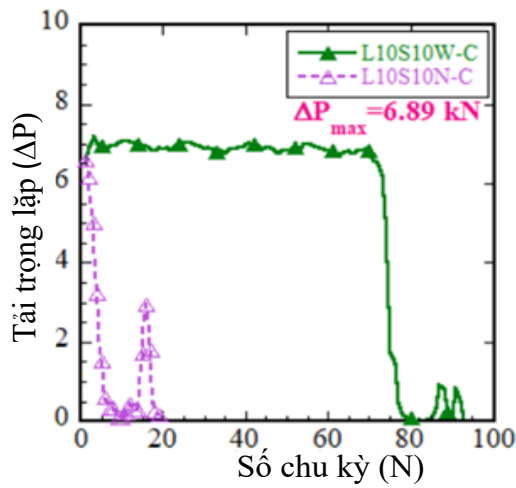


e)

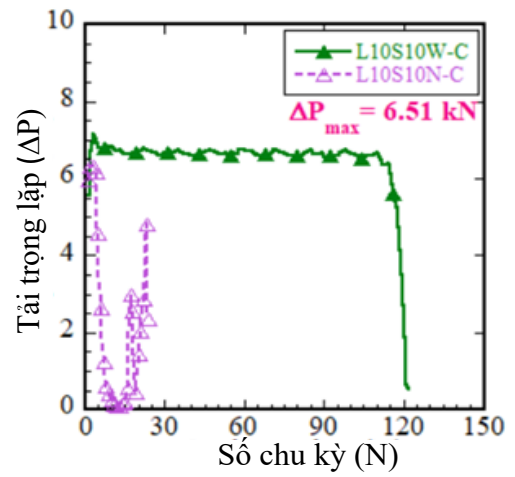


f)

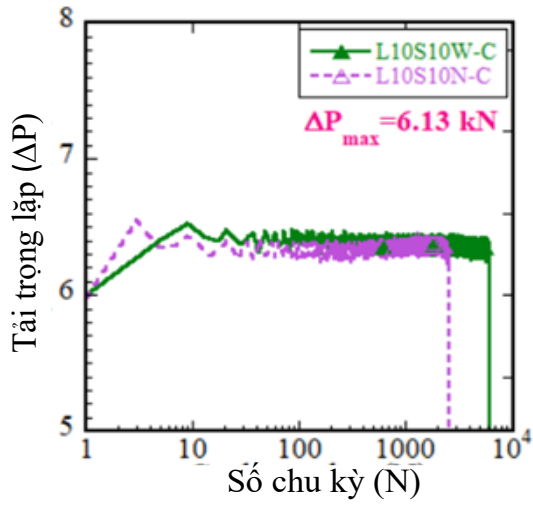
Hình 4.14. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu L05S15 có khía và không khía dưới tải trọng lặp



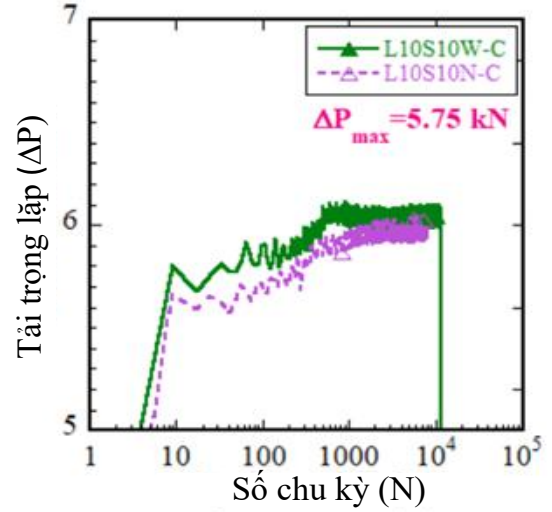
a)



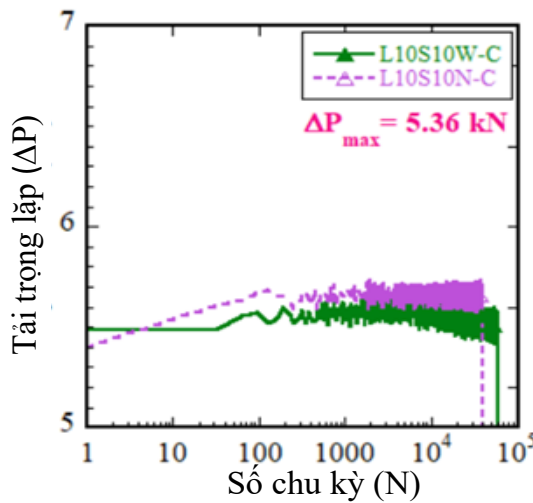
b)



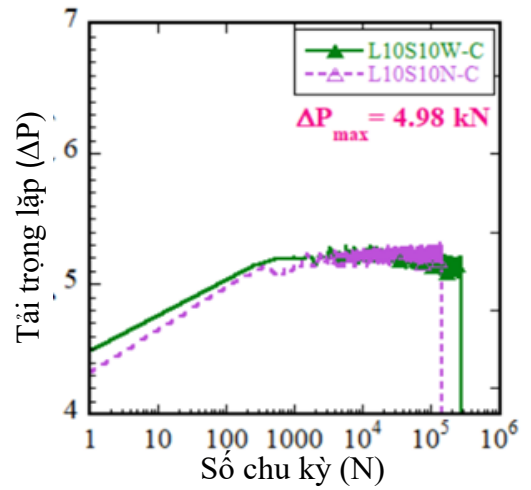
c)



d)

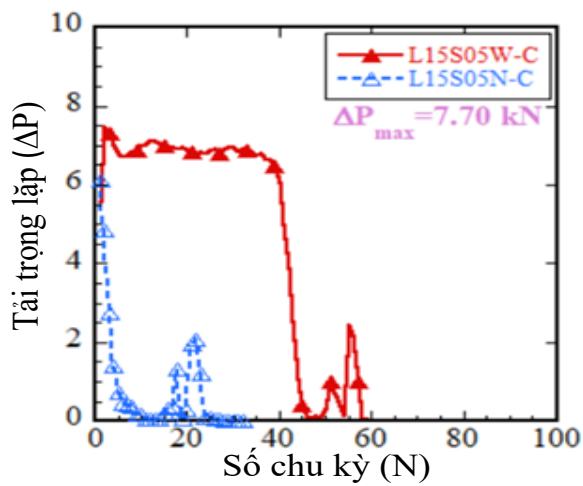


e)

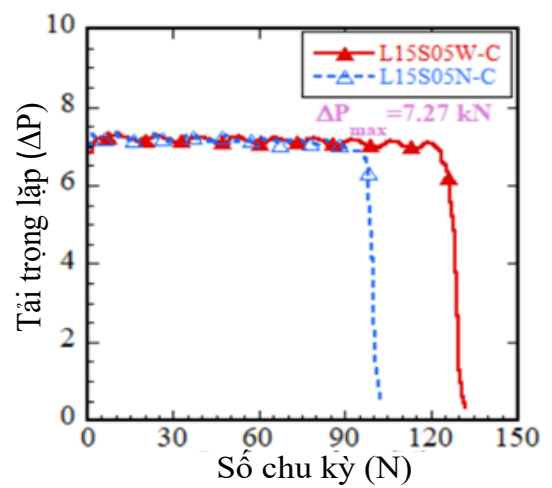


f)

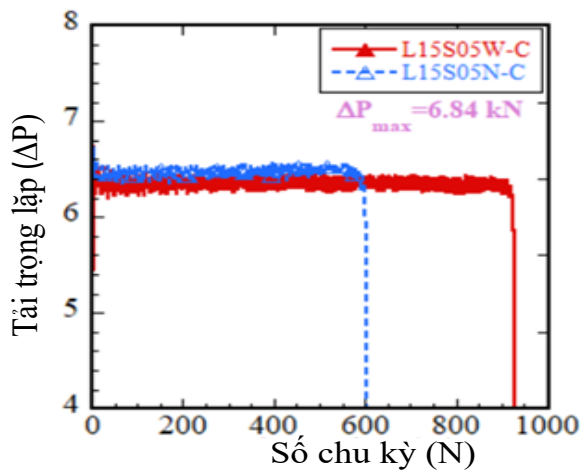
Hình 4.15. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu L10S10 có khía và không khía dưới tải trọng lặp



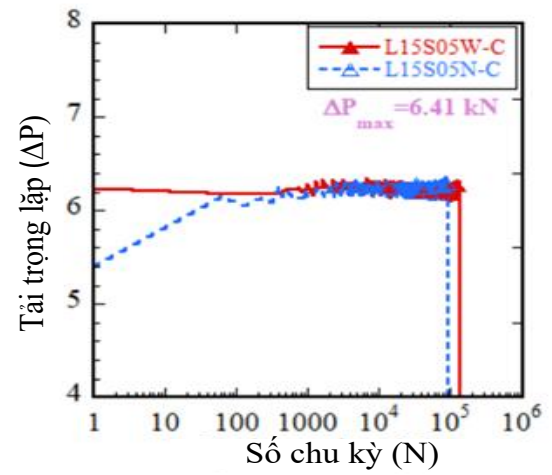
a)



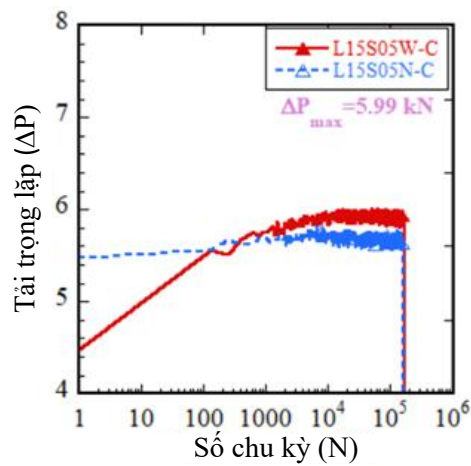
b)



c)



d)



e)

Hình 4.16. Mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu L15S05 có khía và không khía dưới tải trọng lặp

Hình 4.15 thể hiện mối liên hệ giữa biên độ tải trọng và số chu kỳ của loạt mẫu L10S10W-C và L10S10N-C, khi $\Delta P_{\max}$ thay đổi từ 6,89 kN về 4,98 kN, và tỷ số $\frac{\Delta f_{\max}}{f_{MOR}}$ giảm từ 0,9 đến 0,65, số chu kỳ phá hủy tăng dần. Loạt mẫu L10S10W-C chịu được số chu kỳ cao nhất là 93 chu kỳ ở mức tải 0,9, cao nhất trong tất cả các loạt mẫu. Khi biên độ tải trọng giảm dần, số chu kỳ phá hủy của loạt mẫu L10S10W-C tăng từ 93 chu kỳ lên đến 277563 chu kỳ, và tương ứng L10S10N-C tăng từ 19 chu kỳ lên đến 148647 chu kỳ.

Ở loạt mẫu L15S05W-C và L15S05N-C, mức độ chênh lệch của số chu kỳ phá hoại đối với mẫu có khía và không khía ở 5 mức tải khác nhau không đáng kể như thể hiện trên Hình 4.16. Số chu kỳ phá hoại của mẫu L15S05W-C ở mức tải thấp nhất 0,7 là 169868 chu kỳ và mẫu L15S05N-C là 161000 chu kỳ. Khi biên độ tải tăng, tương ứng biên độ ứng suất tăng thì số chu kỳ phá hoại giảm mạnh. Đây là hiện tượng đặc trưng khi phân tích mỏi. Ở mức tải trọng cao, vật liệu chịu ứng suất gần với giới hạn chịu lực P_{MOR} dẫn đến phá hoại nhanh nên số chu kỳ N thấp. Khi mức tải trọng giảm dần, vật liệu xuất hiện sự suy giảm ứng suất khi số chu kỳ tăng dần dần đến tích lũy biến dạng, và khi ứng suất suy giảm vượt quá khả năng chịu lực của vật liệu, sự phá hoại 1 diễn ra nhanh chóng sau một số chu kỳ tải đáng kể.

4.3.2. Xây dựng phương trình đường cong mỏi của vật liệu HPFRC gia cường thép sợi hỗn hợp

Đường cong mỏi $S-N$ được tính toán bằng cách sử dụng biên độ ứng suất ($S = \Delta f_{\max}$), dựa trên mô hình mỏi do Basquin đề xuất [100]:

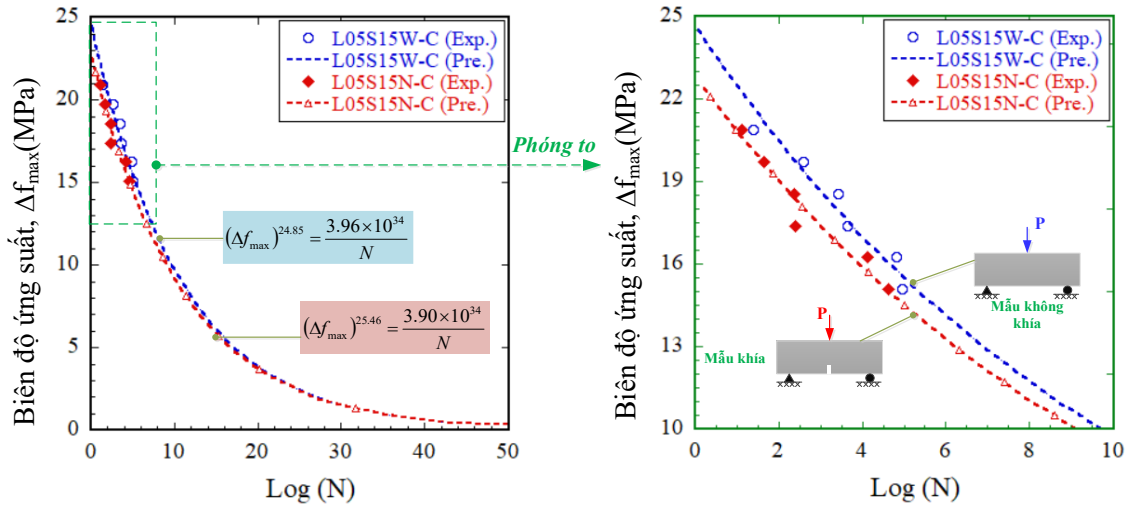
$$(\Delta f_{\max})^m = \frac{C}{N} \text{ hoặc } \log N = p \log(1/\Delta f_{\max}) + \log C \quad (4.6)$$

Dựa vào cơ sở lý thuyết tại mục 3.4, sử dụng phương pháp bình phương cực tiểu với đường hồi quy tuyến tính. Các hệ số m và C được cung cấp trong Bảng 4.5.

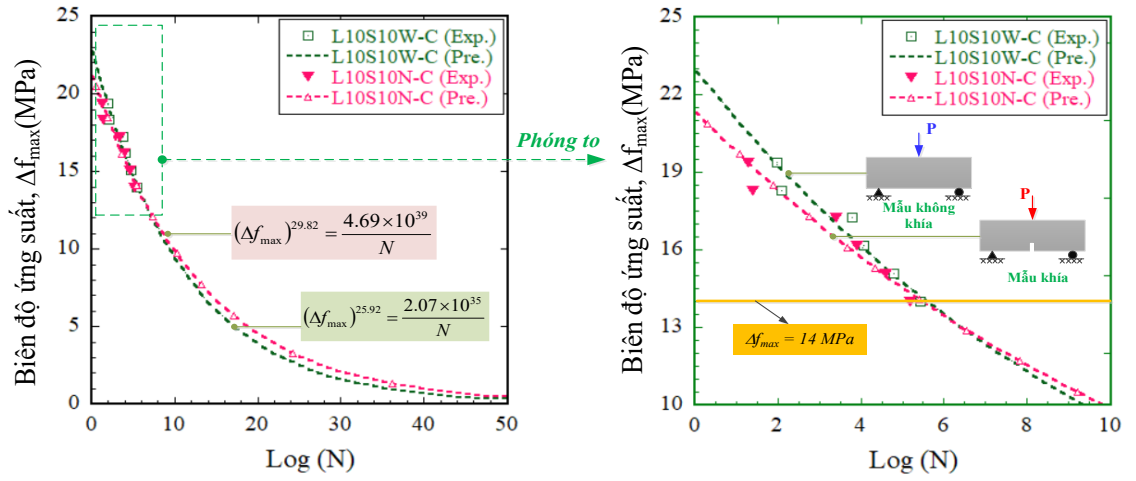
Bảng 4.5. Phương trình đường cong mỗi theo biên độ ứng suất

Loại mẫu HPFRC	Hệ số m	Hệ số C	Phương trình đường cong mỗi
L05S15W-C	24,85	$3,96 \times 10^{34}$	$(\Delta f_{\max})^{24,85} = \frac{3,96 \times 10^{34}}{N}$
L05S15N-C	25,46	$3,90 \times 10^{34}$	$(\Delta f_{\max})^{25,46} = \frac{3,90 \times 10^{34}}{N}$
L10S10W-C	25,92	$2,07 \times 10^{35}$	$(\Delta f_{\max})^{25,92} = \frac{2,07 \times 10^{35}}{N}$
L10S10N-C	29,82	$4,69 \times 10^{39}$	$(\Delta f_{\max})^{29,82} = \frac{4,69 \times 10^{39}}{N}$
L15S05W-C	36,45	$1,56 \times 10^{50}$	$(\Delta f_{\max})^{36,45} = \frac{1,56 \times 10^{50}}{N}$
L15S05N-C	38,07	$1,32 \times 10^{52}$	$(\Delta f_{\max})^{38,07} = \frac{1,32 \times 10^{52}}{N}$

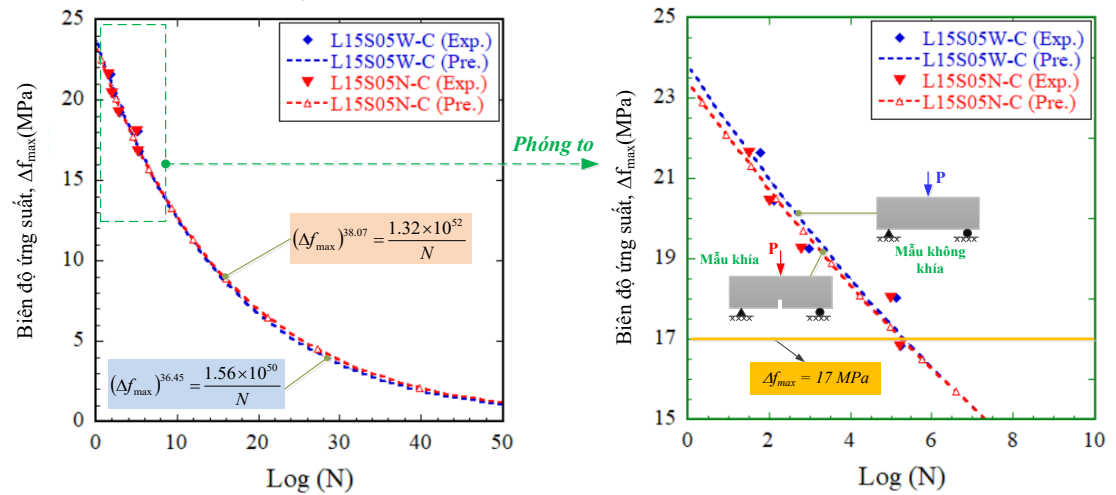
Như đã thể hiện trên Bảng 4.5, loạt mẫu L05S15W-C có hệ số m thấp nhất ($m=24,85$) và loạt mẫu L15S05N-C có hệ số m cao nhất ($m=38,07$). Hệ số m phản ánh độ nhạy của vật liệu với sự thay đổi của biên độ ứng suất. Hệ số m càng lớn, đường cong mỗi càng dốc, nghĩa là số chu kỳ phá hoại giảm càng nhanh khi tăng biên độ ứng suất.



a) Loạt mẫu L05S15W-C và L05S15N-C



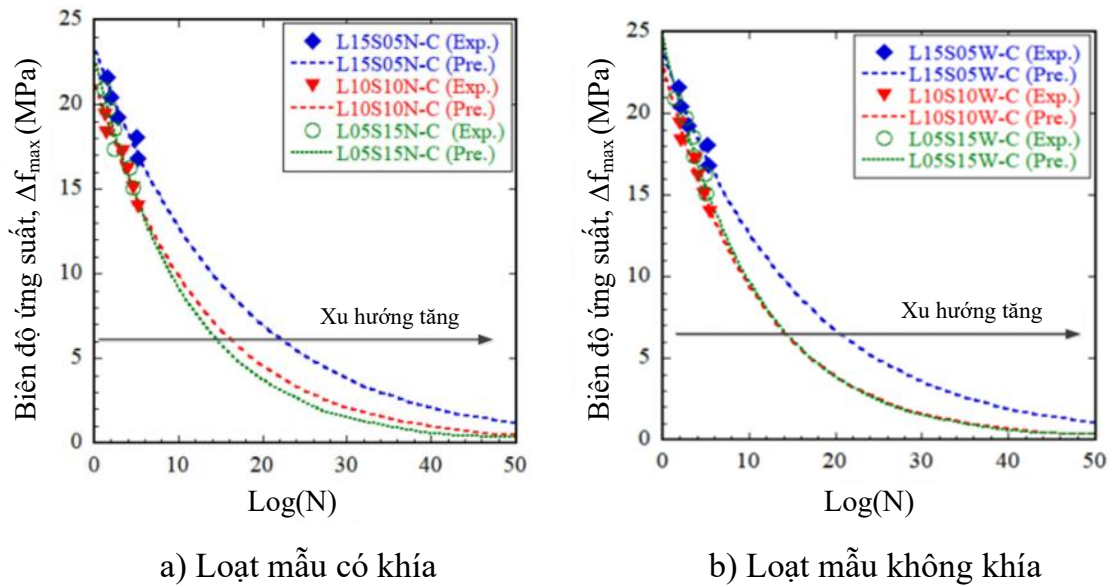
b) Loạt mẫu L10S10W-C và L10S10N-C



c) Loạt mẫu L15S05W-C và L15S05N-C

Hình 4.17. Đường cong mỏi của HPFRC nghiên cứu theo biên độ ứng suất

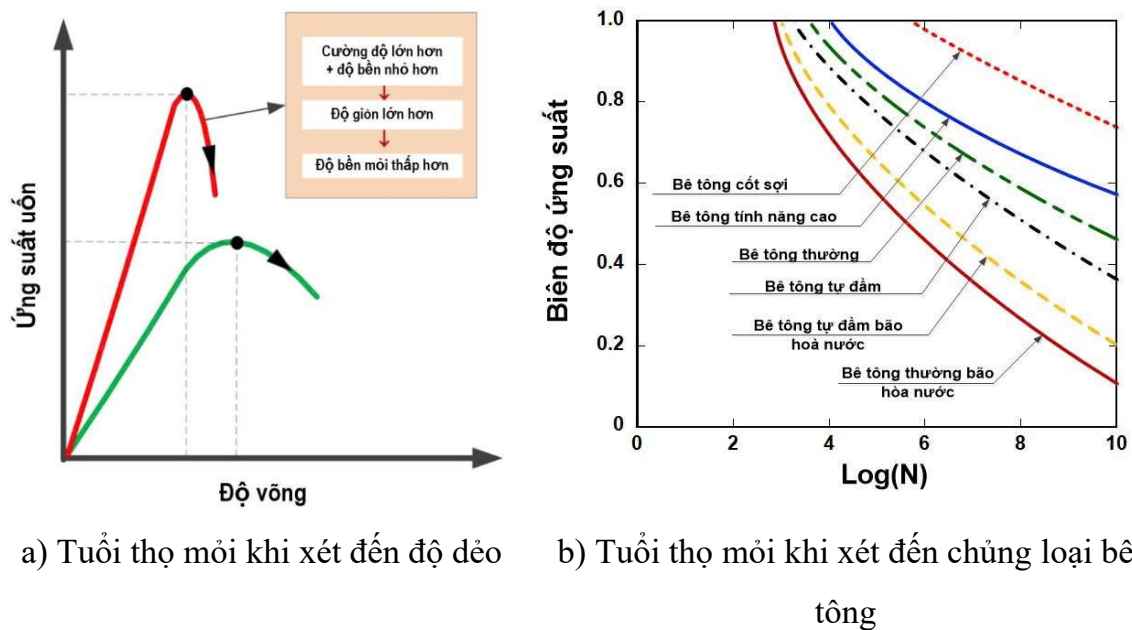
Hình 4.17 biểu diễn đường cong mỏi của tất cả các loạt mẫu có khía và không khía theo biên độ ứng suất. Đường cong mỏi của mẫu có khía không dốc hơn so với mẫu không khía và gần như song song; đường cong nằm bên phải biểu thị độ bền mỏi cao hơn với cùng biên độ ứng suất. Tại Hình 4.17a, đường cong của loạt mẫu L05S15W-C luôn nằm bên phải đường cong L05S15N-C. Tại Hình 4.17b, đường cong của loạt mẫu L10S10W-C nằm bên phải đường cong L10S10N-C khi biên độ ứng suất $\Delta f_{max} \geq 14 \text{ MPa}$. Tại Hình 4.17c, đường cong của loạt mẫu L15S05W-C nằm bên phải đường cong L15S05N-C khi biên độ ứng suất $\Delta f_{max} \geq 17 \text{ MPa}$.



Hình 4.18. So sánh ứng xử mỏi của tất cả các loạt mẫu HPFRC gia cường sợi hỗn hợp với hàm lượng khác nhau, có khía và không khía

Hình 4.18 so sánh ứng xử mỏi của tất cả các loạt mẫu HPFRC gia cường sợi hỗn hợp với hàm lượng khác nhau, có khía và không khía, với cùng biên độ ứng suất Δf_{max} . Thứ tự giới hạn bền mỏi của các loạt mẫu được thể hiện trên biểu đồ như sau: $L15S05 > L10S10 > L05S15$ cho cả mẫu có khía và không khía. Từ đây có thể thấy rằng khả năng kháng mỏi hoàn toàn trái ngược với khả năng kháng uốn dưới tải trọng tĩnh. Đơn cử loạt mẫu L05S15 có độ bền uốn dưới tải trọng tĩnh cao nhất nhưng khả năng chịu mỏi lại thấp nhất trong tất cả các loạt mẫu. Đây cũng là xu hướng chung trong tất cả các loạt mẫu HPFRC gia cường thép sợi hỗn hợp được nghiên cứu trong

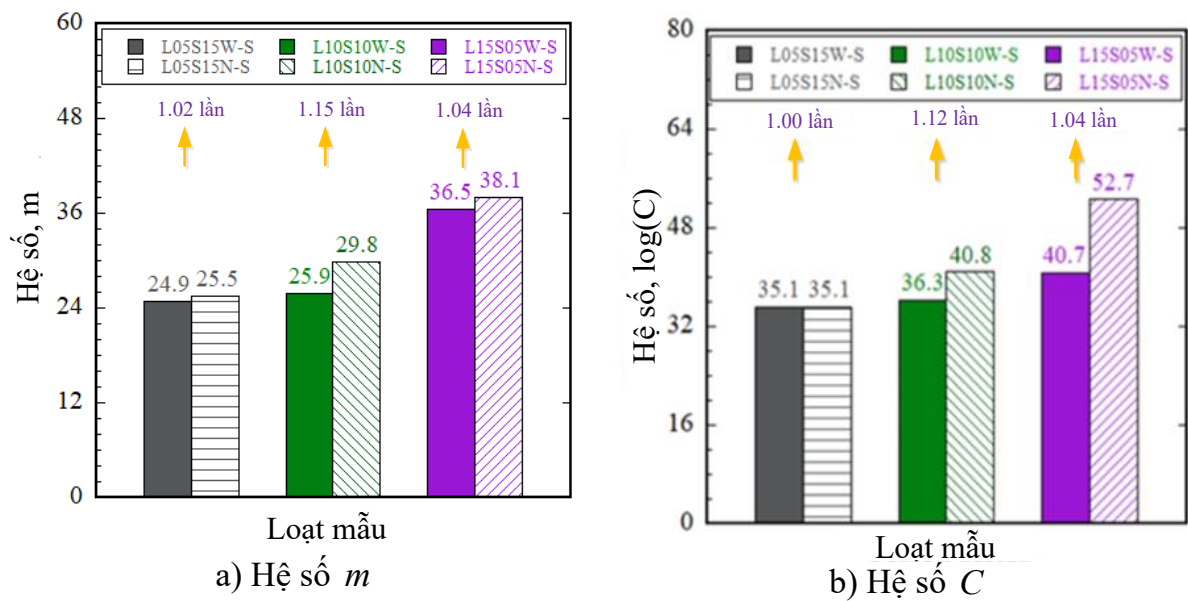
quá trình làm thực nghiệm. Từ đó có thể kết luận được rằng vật liệu HPFRC có độ bền uốn tĩnh cao hơn thì giới hạn chịu mỏi thấp hơn. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với một số nghiên cứu trước đây về HPFRC [24], bê tông cường độ cao [100] và bê tông thường [101]. Với cùng một loại bê tông, cường độ càng cao thường đi kèm với khả năng biến dạng/độ võng thấp hơn, đồng thời tuổi thọ mỏi cũng thấp hơn do vật liệu giòn hơn như đã minh họa trong Hình 4.19.



a) Tuổi thọ mỏi khi xét đến độ dẻo b) Tuổi thọ mỏi khi xét đến chủng loại bê tông

Hình 4.19. Tuổi thọ mỏi dựa trên cường độ bê tông khác nhau

Hình 4.20 so sánh các hệ số mỏi bao gồm hệ số m và hệ số C trong tất cả các loạt mẫu HPFRC có khía và không khía. So với loạt mẫu không khía, hệ số m trong loạt mẫu có khía cao hơn từ 1,02 đến 1,15 lần, hệ số C trong loạt mẫu không khía cũng cao hơn loạt mẫu có khía từ 1,00 đến 1,12 lần.



Hình 4.20. So sánh các hệ số môi trong loạt mẫu HPFRC

4.4. Kết luận chương 4

Chương 4 trình bày kết quả thí nghiệm về ứng xử uốn của HPFRC gia cường bằng hệ thống sợi thép hỗn hợp (tổng hàm lượng 2,0%). Dưới tải trọng tĩnh, mẫu L15S05W-S (1,5% sợi to + 0,5% sợi nhỏ, không khía) đạt khả năng kháng uốn cao nhất; sợi to chủ yếu tăng sức kháng uốn, còn sợi nhỏ cải thiện năng lượng hấp thụ. Các mẫu có vết khía cho thấy suy giảm rõ rệt do tập trung ứng suất, song hệ số K_{IC} vẫn cao hơn bê tông thường, chứng tỏ khả năng kháng phá hủy vượt trội.

Dưới tải trọng lặp, khi giảm tải trọng tác dụng, số chu kỳ phá hủy tăng lên; mẫu có khía luôn kém bền hơn mẫu không khía. Đáng chú ý, mẫu có cường độ uốn tĩnh cao lại cho giới hạn bền mỏi thấp, phù hợp với xu hướng nghiên cứu trước đây. Hệ thống sợi hỗn hợp giúp giảm tập trung ứng suất, hạn chế nứt gãy và duy trì độ bền lâu dài. Các phương trình dự báo mỏi của HPFRC được xây dựng làm cơ sở cho thiết kế và ứng dụng thực tiễn.

Nội dung Chương 4 được dựa theo các công trình đã công bố như sau:

4) **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.

5) **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>.

Chương 5:

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG SỐ

ỨNG XỬ KẾT SỬ DỤNG HPFRC

5.1. Giới thiệu chương

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 mỏi. Theo kết quả Chương 4, hỗn hợp sợi gồm 1,5% sợi to + 0,5% sợi nhỏ đạt cường độ uốn cao nhất. Hỗn hợp này được chọn để chế tạo và thí nghiệm dầm HPFRC trong Chương 5.

Chương 5 tiến hành thực nghiệm kết hợp mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trên phần mềm ATENA cho dầm HPFRC gia cường thép thanh. Dầm nghiên cứu có kích thước thực tế (200×200×1300 mm, chiều dài nhịp $L = 1200$ mm) với bê tông nền HPFRC chứa hệ sợi hỗn hợp 1,5% sợi lớn có móc + 0,5% sợi nhỏ trơn.

5.2. Phân loại dầm

Theo phân loại, dầm ngắn và dầm dài được xác định dựa trên tỷ lệ giữa chiều dài nhịp (L) và chiều cao tiết diện (h) của dầm. Tỷ lệ này phản ánh cách thức truyền tải trọng và phân bố ứng suất trong dầm, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến cơ chế phá hoại, biến dạng và phương pháp tính toán. Khi tỷ lệ $L/h < 5$, dầm được xem là dầm ngắn; ngược lại, khi tỷ lệ này lớn hơn, dầm được xem là dầm dài.

Về ứng xử cơ học, dầm ngắn đặc trưng bởi ứng xử cắt chiếm ưu thế, với phân bố ứng suất phức tạp và sự phi tuyến mạnh của ứng suất nén – kéo trong vùng chịu cắt – uốn kết hợp. Loại dầm này thường xuất hiện nứt xiên hoặc nứt cắt gần gối do ứng suất cắt lớn, trong khi biến dạng uốn nhỏ và độ võng không đáng kể. Ngược lại,

dầm dài chủ yếu chịu uốn thuần túy, với phân bố ứng suất uốn gần tuyến tính theo chiều cao tiết diện. Dầm dài có biến dạng lớn hơn và thường xuất hiện vết nứt uốn ở vùng giữa nhịp.

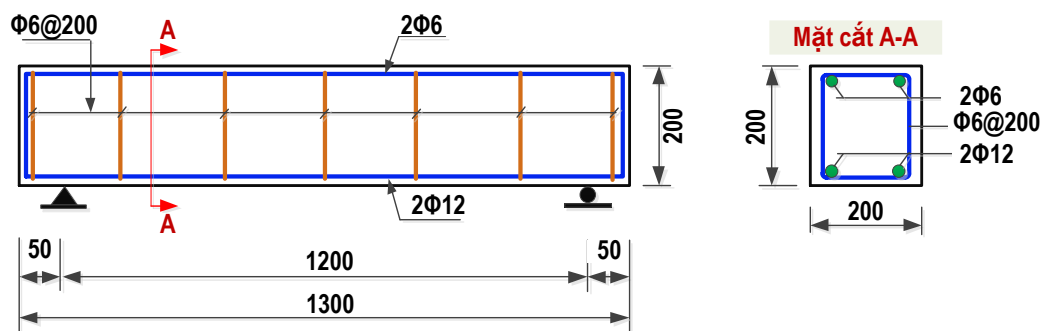
Về phương pháp tính toán, dầm ngắn thường được phân tích theo lý thuyết dầm Timoshenko, chú trọng kiểm tra ứng suất cắt và ứng suất xiên. Dạng phá hoại dầm ngắn chủ yếu là cắt giòn. Trong khi đó, dầm dài thường được tính toán theo lý thuyết dầm Euler–Bernoulli, tập trung vào khả năng chịu uốn, kiểm tra mô men và độ võng để đảm bảo khả năng sử dụng lâu dài. Dạng phá hoại dầm dài chủ yếu là uốn dẻo.

Trong nghiên cứu này, dầm HPFRC được thiết kế có tỷ lệ $L/h = 6$, được xếp vào loại dầm dài. Sự khác biệt giữa dầm dài và dầm ngắn không chỉ nằm ở tỷ lệ hình học, mà còn thể hiện rõ ở bản chất ứng xử cơ học và cơ chế phá hoại. Việc hiểu rõ các đặc trưng này giúp kỹ sư lựa chọn mô hình tính toán, cấu tạo cốt thép và biện pháp gia cường hợp lý, góp phần đảm bảo tính an toàn, hiệu quả và kinh tế cho công trình.

5.3. Thực nghiệm dầm HPFRC gia cường cốt thép thanh dưới tải trọng tĩnh

5.3.1. Chuẩn bị dầm thí nghiệm

Dầm HPFRC có kích thước $200 \times 200 \times 1300$ mm với chiều dài nhịp $L = 1200$ mm. Cấp phối bê tông nền HPFRC 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 tại thớ trên và 12 mm tại thớ dưới như thể hiện Hình 5.1a và Hình 5.1b. Các thông số cơ bản của cốt thép dọc, cốt thép đai được thể hiện như Bảng 5.1. Hàm lượng cốt dọc (chỉ xét D12 chịu kéo) là 0,28%. Vật liệu HPFRC chứa hệ sợi hỗn hợp 1,5% sợi lớn có móc + 0,5% sợi nhỏ trơn như thể hiện tại Hình 5.2. Vật liệu HPFRC sử dụng có cường độ nén 80,65 Mpa, cường độ kéo trực tiếp 9,81 MPa [91].

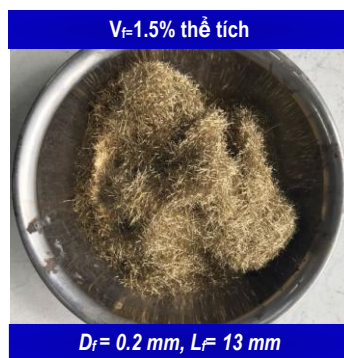


a) Kích thước chi tiết dầm HPFRC (đơn vị: mm)

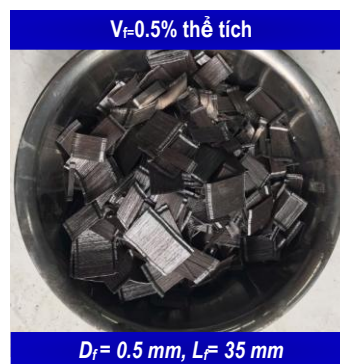


b) Dầm HPFRC sau khi dưỡng hộ

Hình 5.1. Chuẩn bị dầm thí nghiệm



a) Sợi nhỏ



b) Sợi lớn

Hình 5.2. Hai loại sợi dùng trong thí nghiệm

Bảng 5. 1. Các thông số cơ bản của cốt thép dọc và cốt thép đai

Loại thép	Giới hạn chảy (MPa)	Độ bền kéo (MPa)	Mô đun đàn hồi (GPa)	Đặc tính bề mặt	Hình ảnh thực tế
D6	240	380	200	trơn	
D12	400	570	200	gân	

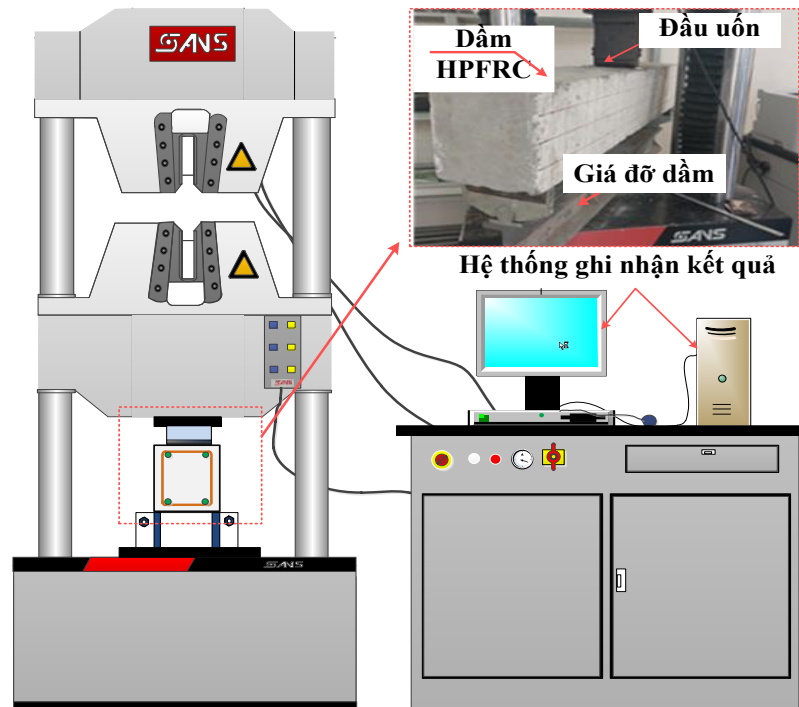
5.3.2. Thiết lập thí nghiệm

Thí nghiệm uốn ba điểm dầm HPFRC được thực hiện trên máy kéo – nén – uốn đa năng (Universal Testing Machine - UTM) có khả năng gia tải đến 1000 kN, tốc độ gia tải 0,2 kN/s. Tải trọng và chuyển vị tương ứng được ghi lại nhờ vào các cảm biến lực và extensometer được cài đặt trực tiếp trong máy khi thực hiện thí nghiệm ở tần số 1 Hz. Mô men kháng uốn trong dầm tại giới hạn chảy (M_y) và tại giới hạn bền cao nhất (M_p) ở giữa nhịp được tính toán dựa trên tải trọng tại giai đoạn chảy dẻo và tải trọng tại giai đoạn bền tương ứng với chiều dài nhịp L được tính như sau:

$$M_y = \frac{P_y L}{4} \quad \text{Tại điểm chảy} \quad (5.1)$$

$$M_p = \frac{P_p L}{4} \quad \text{Tại đỉnh} \quad (5.2)$$

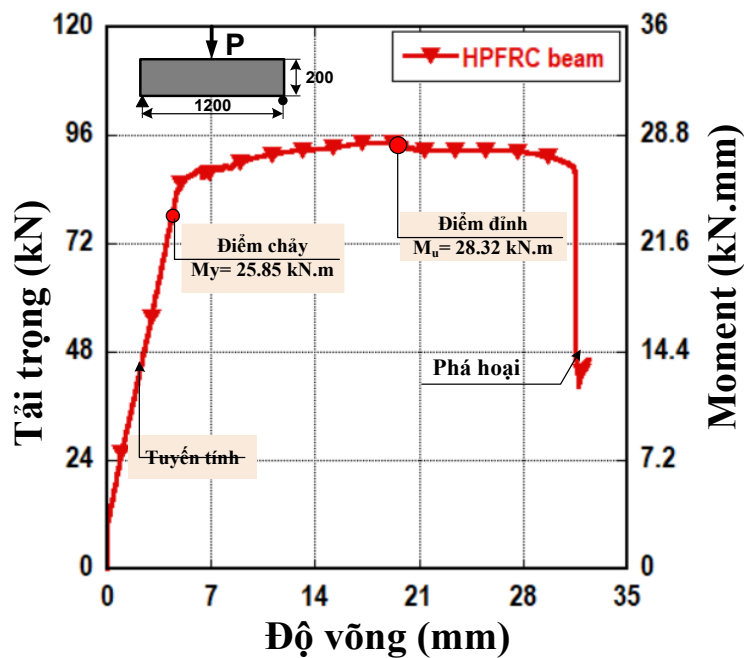
Tất cả các thí nghiệm được thực hiện ở nhiệt độ phòng $28 \pm 5^\circ\text{C}$ và độ ẩm 70 – 80%.



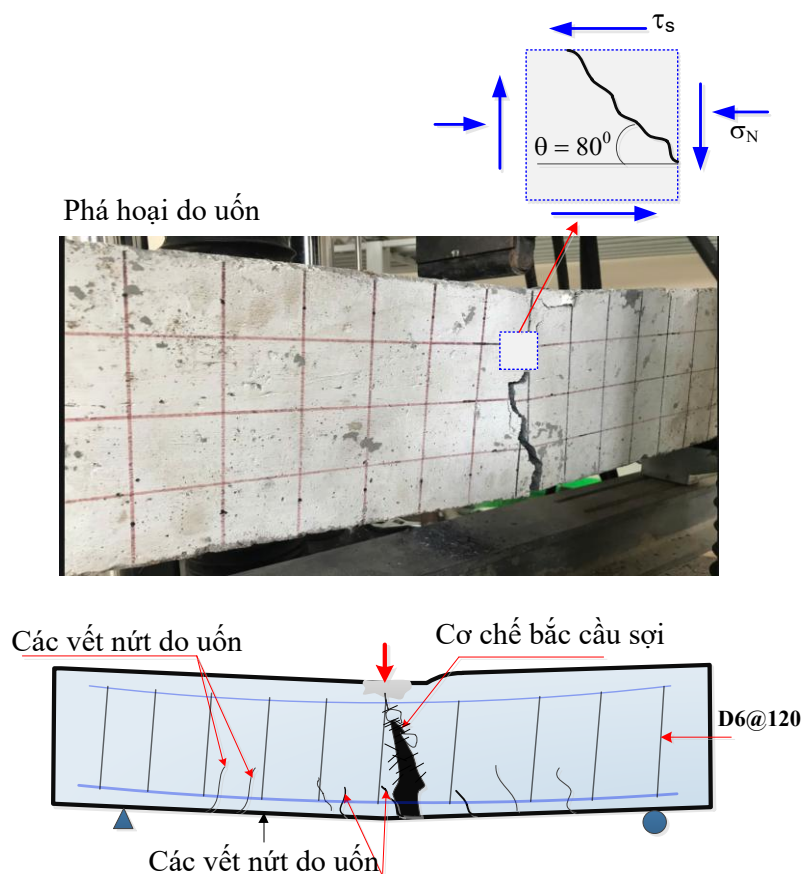
Hình 5.3. Thiết lập thí nghiệm uốn 3 điểm cho dầm HPFRC

5.3.3. Ứng xử uốn của dầm HPFRC gia cường cốt thép dưới tải trọng tĩnh

Dựa trên quan sát thực nghiệm và mối quan hệ giữa tải trọng – độ võng được đo ở giữa nhịp của mẫu thí nghiệm như Hình 5.4, hiện tượng chảy dẻo ban đầu xảy ra ở phía cốt thép bị kéo dọc, bê tông trong vùng nén ở vị trí giữa nhịp bị vỡ.



Hình 5.4. Đường cong ứng xử uốn của dầm HPFRC gia cường cốt thép



Hình 5.5. Biến dạng các vết nứt trong dầm HPFRC ở trạng thái tới hạn

Phân tích đường cong ứng xử uốn của dầm HPFRC như Hình 5.4 cho thấy mẫu uốn trải qua ba giai đoạn từ khi chịu lực cho đến khi phá hủy. Trong giai đoạn đầu tiên, dầm thể hiện ứng xử đàn hồi được biểu hiện bởi mối quan hệ tuyến tính giữa tải trọng và độ võng, trong giai đoạn này, tải trọng tăng nhanh chóng nhưng biến dạng không đáng kể. Các vết nứt bắt đầu hình thành khi ứng suất kéo trong bê tông tại điểm đặt tải đạt đến trạng thái tới hạn. Sự bắt đầu của vết nứt báo hiệu sự suy giảm độ cứng trong dầm, gây ra sự thay đổi đáng kể về độ dốc của đường cong tải trọng – độ võng. Sau vết nứt ban đầu, dầm HPFRC bước vào giai đoạn biến dạng dẻo, độ võng tăng, độ dốc đường cong tải trọng – độ võng giảm dần cho đến khi cốt thép gia cường bên trong dầm đạt đến hiện tượng chảy dẻo. Sự suy giảm độ cứng xảy ra một cách từ từ tại vùng xuất hiện vết nứt do cơ chế bắc cầu sợi của các sợi thép gia cường trong dầm HPFRC trong vùng chịu kéo, các sợi thép chịu trách nhiệm hạn chế mở rộng các vết nứt nhờ vậy dầm HPFRC có khả năng tăng sức chịu tải trong quá trình

chuyển đổi từ giai đoạn nứt sang giai đoạn chảy. Sau giai đoạn chảy, các vết nứt của dầm được thể hiện trong Hình 5.5.

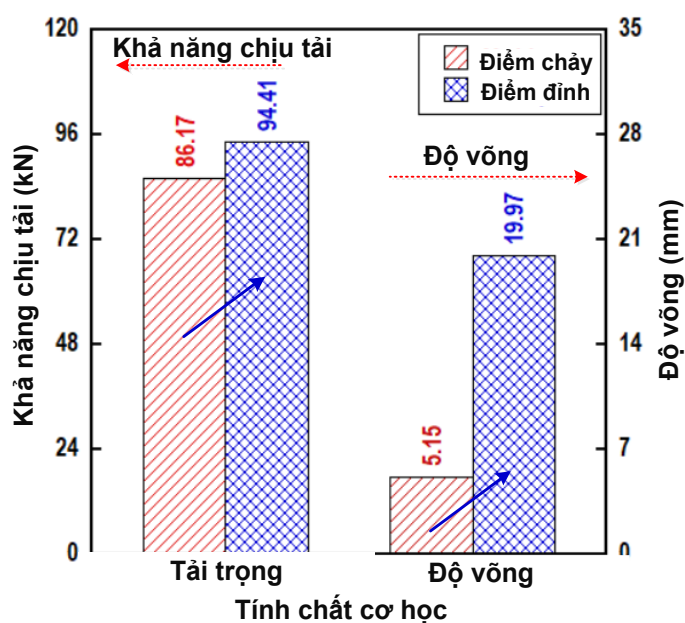
Khi tiếp tục gia tải đến tải trọng phá hủy, các vết nứt thẳng đứng ban đầu xuất hiện trong khu vực giữa dầm ở bề mặt đáy bắt đầu mở rộng. Mô men uốn tăng chậm gần như không đổi khi biến dạng tăng; cốt thép thanh chủ phía dưới đáy dầm trạng thái chảy dẻo gánh trọng trách lớn lực căng kéo. Khi vết nứt chính thẳng đứng lan truyền gần như hết tiết diện, biến dạng vượt quá giá trị cực hạn dẫn đến dầm bị phá hoại với bê tông HPFRC thớ nén bị vỡ, tải trọng rút thẳng đứng như thể hiện trên đường cong ứng xử tại Hình 5.4. Hình 5.5 thể hiện rõ biến dạng và các vết nứt quan sát được của dầm HPFRC dưới tải trọng tĩnh bị phá hoại. Góc nghiêng giữa vết nứt chéo và trục dọc của dầm đo được là $\theta = 80^\circ$, có thể xem như phá hoại uốn.

Về tổng thể, ứng xử của dầm HPFRC khi bị phá hoại - thép thanh chảy dẻo thớ dưới và bê tông bị vỡ thớ trên – tương tự dầm BTCT truyền thống. Tuy nhiên sức chịu tải của dầm HPFRC cao hơn do bê tông nền HPFRC có cường độ nén và kéo tốt hơn bê tông thường. Việc gia cường cốt sợi thép trong hỗn hợp vữa HPFRC có tác dụng hỗ trợ sức chịu tải thớ kéo và cải thiện khả năng kháng nứt [98,90].

Bảng 5. 2. Các thông đặc trưng cơ tính của dầm HPFRC gia cường cốt thép

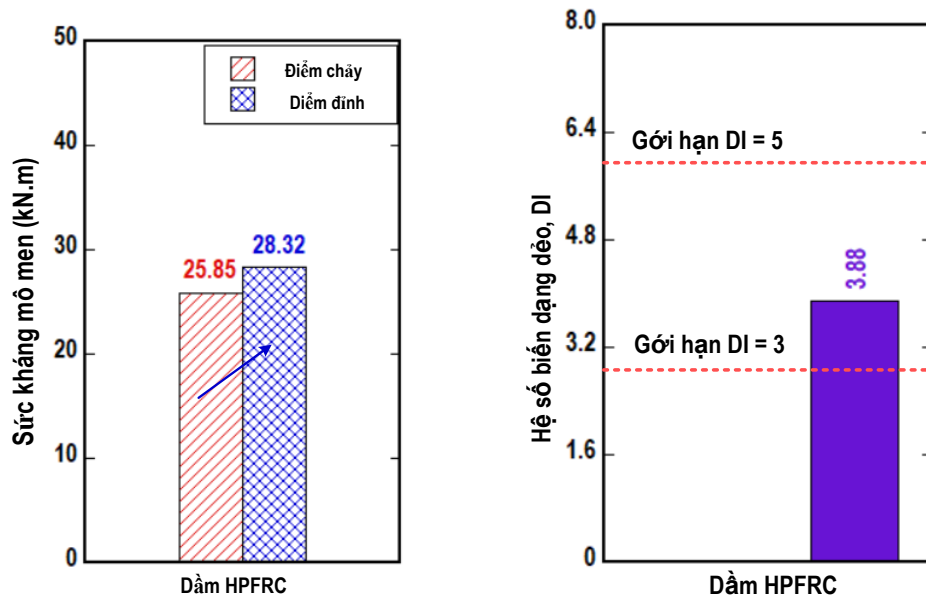
Đại lượng đo	Đơn vị	Độ lớn
Tải trọng chảy, P_y	kN	86,17
Độ võng chảy, δ_y	mm	3,53
Tải trọng tới hạn, P_u	kN	94,41
Độ võng tới hạn, δ_u	mm	19,97
Độ dẻo, DI	-	3,88
θ (góc nghiêng vết nứt)	Độ	80
Kiểu phá hoại		uốn dẻo

Bảng 5.1 cung cấp các thông số đặc trưng cơ tính của của HPFRC, bao gồm tải trọng tại giai đoạn chảy (P_y), độ võng tại giai đoạn chảy (δ_y) tải trọng tới hạn (P_p), và độ võng tại tải trọng tới hạn (δ_p). Như đã thấy ở Bảng 5.1, Giá trị các tham số đặc trưng cơ tính lần lượt bao gồm $P_y = 86,17$ kN, $\delta_y = 3,53$ mm, $P_p = 94,41$ kN, $\delta_u = 19,97$ mm.



Hình 5.6. Đặc trưng cơ tính của dầm HPFRC

Hình 5.6 thể hiện các đặc trưng cơ tính của dầm HPFRC chịu uốn dưới tải trọng tĩnh tại điểm chảy và điểm tải trọng tới hạn. Khả năng chịu võng theo quan sát tăng từ 5,15 mm đến 19,97 mm từ giai đoạn chảy đến giai đoạn phá hoại. Kết quả này cho thấy sau giai đoạn chảy dẻo, dầm HPFRC vẫn duy trì được độ võng lớn trước khi phá hoại, phản ánh khả năng biến dạng dẻo cao của kết cấu.



a) Mô men kháng uốn b) Chỉ số thể hiện độ dẻo
Hình 5.7. Mô men kháng uốn và chỉ số dẻo của dầm HPFRC

Hình 5.7 cho thấy khả năng chịu mô men (Hình 5.7a) và chỉ số dẻo (Hình 5.7b) của dầm HPFRC. Theo Hình 5.7a, dầm HPFRC có khả năng tăng cường trạng thái chịu uốn từ giai đoạn chảy đến giai đoạn chịu tải tới hạn (tăng 9,6%). Tại Hình 5.7b, dầm đạt chỉ số dẻo $DI=3,88$, cao hơn giới hạn tối thiểu với $DI=3$, nhưng chưa đạt mức khuyến nghị với $DI=5$ nghĩa là kết cấu có khả năng biến dạng dẻo nhất định sau khi chảy, đảm bảo mức độ an toàn chấp nhận được trong điều kiện làm việc thông thường. Tuy nhiên, giá trị DI chưa đủ cao để đáp ứng các yêu cầu về khả năng phân tán năng lượng trong tất cả các tác động cực đoan như động đất hoặc tải trọng lặp phức tạp.

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

5.4.1. Mô hình hóa ứng xử vật liệu và các quy luật phá hoại

Để hiểu rõ hơn về cơ chế làm việc và quy luật phá hoại của dầm HPFRC, bên cạnh thí nghiệm, việc mô hình hóa đóng vai trò quan trọng nhằm tái hiện ứng xử cơ học của kết cấu dưới tác động tải trọng, phục vụ dự báo trong thiết kế, phân tích kết cấu. Trong nghiên cứu này, phần mềm ATENA được sử dụng để xây dựng mô hình số cho dầm HPFRC với việc sử dụng các mô hình SBeta Material và 3D Nonlinear Cementitious 2 User. Mô hình SBeta Material cho phép mô tả chính xác mối quan hệ

ứng suất – biến dạng phi tuyến của bê tông có tính dẻo và khả năng phân tán năng lượng, trong khi mô hình 3D Nonlinear Cementitious 2 User hỗ trợ tái hiện sự hình thành và phát triển vết nứt ba chiều cũng như cơ chế suy giảm ứng suất khi chịu kéo và nén [103]. Việc kết hợp hai mô hình này không chỉ giúp phân tích sâu hơn quá trình làm việc của dầm HPFRC từ giai đoạn đàn hồi cho đến khi phá hoại, mà còn tạo cơ sở để so sánh, hiệu chỉnh và mở rộng kết quả thực nghiệm, hướng tới dự báo đáng tin cậy ứng xử của kết cấu trong điều kiện thực tế.

Kết quả thí nghiệm trên dầm HPFRC cho thấy dầm đạt mô men kháng uốn cực hạn 28,32 kN.m và chỉ số độ dẻo $DI = 3,88$, phản ánh rõ ràng cơ chế tăng cường sức kháng uốn nhờ sự kết hợp thép thanh chủ kết hợp sợi thép gia cường, đồng thời thể hiện mức độ dẻo chấp nhận được. Tuy nhiên, thí nghiệm chỉ cung cấp dữ liệu ở một số điểm đặc trưng (yield point, peak point, DI), trong khi các thông tin chi tiết về sự phân bố ứng suất, cơ chế hình thành và phát triển vết nứt hay diễn biến hư hỏng trong toàn bộ quá trình chịu tải lại khó quan sát trực tiếp. Do đó, việc sử dụng mô phỏng số bằng phần mềm ATENA với các mô hình vật liệu SBeta Material và 3D Nonlinear Cementitious 2 User trở nên cần thiết nhằm tái hiện toàn diện quá trình làm việc của dầm HPFRC, hướng đến mở rộng khả năng dự báo ứng xử kết cấu trong các điều kiện tải trọng khác nhau.

Quy ước tổng Einstein được áp dụng xuyên suốt nghiên cứu, trừ khi có trạng thái khác. Tensor biến dạng được phân tích thành các thành phần đàn hồi, dẻo và nứt, được xác định theo phương chính tại thời điểm hình thành vết nứt như sau [102]:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^p + \boldsymbol{\varepsilon}^f \quad (5.3)$$

Tensor ứng suất trong vật liệu liên quan đến biến dạng đàn hồi thông qua định luật Hook:

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{E}{(1+\nu)} \boldsymbol{\varepsilon}^e + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}^e) \cdot \mathbf{I} \quad (5.4)$$

Trong đó E, ν là mô đun đàn hồi ban đầu và hệ số Poisson; $\text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}^e)$ là tổng các phần tử trên đường chéo chính của tensor biến dạng đàn hồi.

Trong ATENA, hướng vật liệu được xác định theo hướng chính thực tế hoặc hướng chính khi bắt đầu nứt. Bê tông bị nghiền nát được mô hình hóa bằng bề mặt giới hạn chảy Menétrey–Willam có xét đến cơ chế hóa bền và hóa mềm:

$$f(\sigma) = \left(\sqrt{1.5} \frac{\rho}{f'_c} \right)^2 + m \left[\frac{\rho}{\sqrt{6} \cdot f'_c} r(\theta, e) + \frac{\xi}{\sqrt{3} \cdot f'_c} \right] - c \quad (5.5)$$

Với f'_c là cường độ nén, và ρ, ξ, θ được định nghĩa như sau:

$$\xi = \frac{I_1}{\sqrt{3}}; I_1 = \sigma_{ii}; \quad (5.6)$$

$$\rho = \sqrt{2J_2}; J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}; \quad (5.7)$$

$$\cos(3\theta) = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{\frac{3}{2}}}; J_3 = \frac{1}{3} s_{ij} s_{jk} s_{ki}; \quad (5.8)$$

Trong đó: m , $r(\theta, e)$ liên quan đến độ bền kéo, độ bền nén và độ tròn của bề mặt chịu kéo, được kiểm soát bởi tham số e , được tính dựa vào biểu thức sau:

$$m = 3 \frac{f'_c{}^2 - f'_t{}^2}{f'_c{}^2 f'_t{}^2} \frac{e}{e+1}; \quad (5.9)$$

$$r(\theta, e) = \frac{4(1-e^2)\cos^2(\theta) + (2e-1)^2}{2(1-e^2)\cos(\theta) + (2e-1) \left[4(1-e^2)\cos^2(\theta) + 5e^2 - 4e \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (5.10)$$

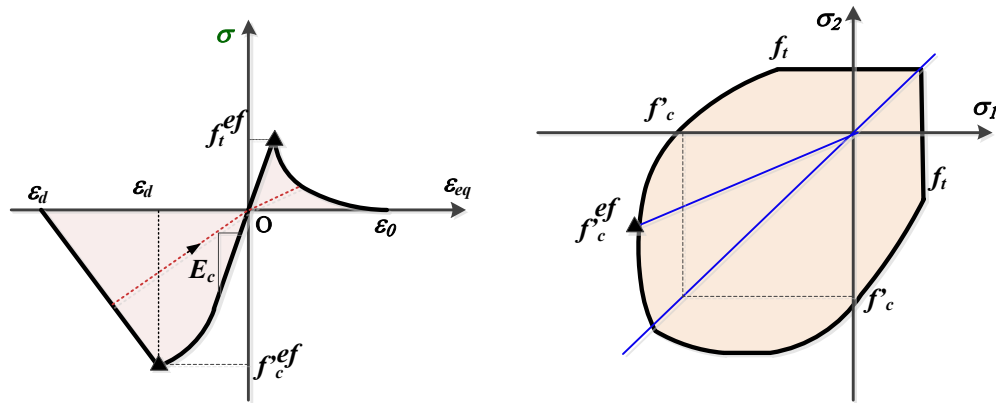
Trong biểu thức (5.4), tham số $c = \frac{f'_c(\varepsilon_{eq}^p)}{f'_c}$ liên quan đến giai đoạn chảy/ phá hoại, ε_{eq}^p là đại lượng vô hướng biểu diễn độ biến dạng dẻo tương đương; hàm $f'_c(\varepsilon_{eq}^p)$ hàm biểu thị sức kháng nén đơn trục.

Giai đoạn chảy dẻo tuân theo quy luật thể hiện trong biểu thức (5.11):

$$\dot{\varepsilon}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial g(\sigma)}{\partial \sigma}; g(\sigma) = \beta \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 + \sqrt{2J_2} \quad (5.11)$$

Với $\dot{\lambda}$ là hệ số dẻo, biểu thị tốc độ biến dạng dẻo, và β là tham số xác định ứng suất theo chiều ngược lại.

Các ứng xử kéo và nén đơn trục được thể hiện trong Hình 5.8a, trong khi vùng cho phép chịu ứng suất theo hai phương chính được minh họa trong Hình 5.8b. Các tham số của mô hình được hiệu chỉnh thông qua phương pháp thử - sai nhằm đảm bảo sự phù hợp với kết quả thực nghiệm.



a) Quan hệ ứng suất – biến dạng

b) Quan hệ phá hoại hai trục

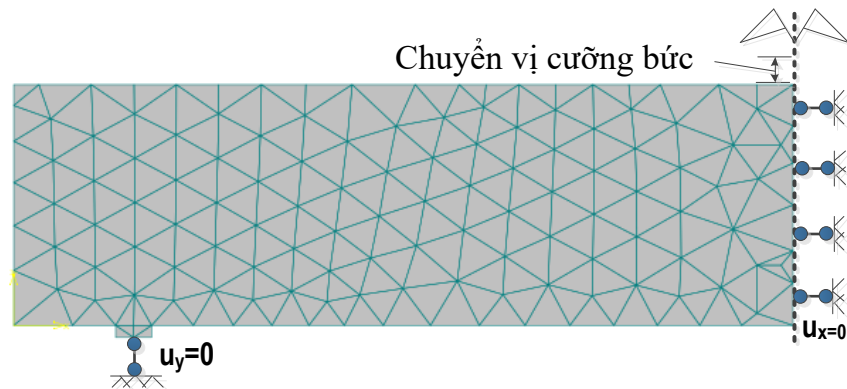
Hình 5.8. Minh họa ứng xử của bê tông và các quy luật phá hoại

5.4.2. Mô phỏng dầm HPFRC bằng phương pháp PTHH dưới tác dụng tải trọng uốn ba điểm

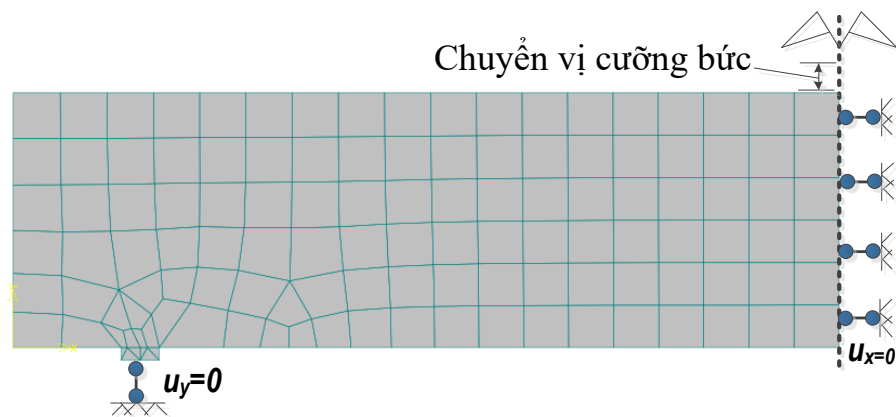
Mô hình PTHH (FEM) sử dụng phần mềm ATENA phiên bản V5.0 [103] được sử dụng để khảo sát ứng xử dầm HPFRC dưới tác dụng tải trọng uốn 3 điểm.

Vì phân tích được thực hiện ở chế độ Demo, nên tổng số phần tử bị giới hạn ở mức 300. Hình 5.9 thể hiện bố cục chia lưới theo phần tử tam giác và phần tử tứ giác trên nửa dầm (do tính đối xứng của tải trọng và để tiết kiệm số phần tử), trong đó, cốt thép gia cường được mô hình hóa bằng các phần tử giàn. Do giới hạn của chế độ Demo, kích thước phần tử được chọn là 3,5 cm – gần sát giới hạn nhằm đảm bảo sự hội tụ. Chuyển vị của tất cả các nút dọc theo trục đối xứng được cố định theo phương ngang và độ lệch tại nút giữa ở đáy giá đỡ thép được cố định theo phương thẳng đứng. Tải trọng tác dụng lên dầm là độ lệch quy định của gia số tác dụng lên các nút gần trục đối xứng như minh họa trong Hình 5.9. Tương tác giữa cốt thép và lớp hỗn hợp vữa HPFRC được giả định là “liên kết hoàn hảo” (không có trượt tương đối tại mặt phân cách; biến dạng dọc của thanh thép gia cường trùng với biến dạng của bê tông

tại vị trí cốt thép). Vì bài toán phi tuyến tính, phương pháp Newton-Raphson đã được sử dụng để giải phương trình. Dung sai hội tụ là 0,01 cho sai số chuyển vị, sai số dư và sai số dư tuyệt đối và 0,0001 cho sai số năng lượng. Số lần lặp tối đa trên mỗi gia số được chọn là 40.



a) Phần tử tam giác



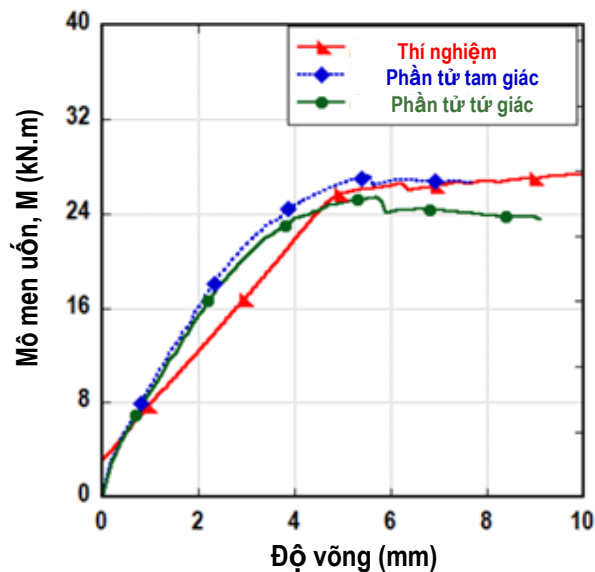
b) Phần tử tứ giác

Hình 5.9. Mô hình chia lưới

5.4.3. Kết quả mô phỏng số

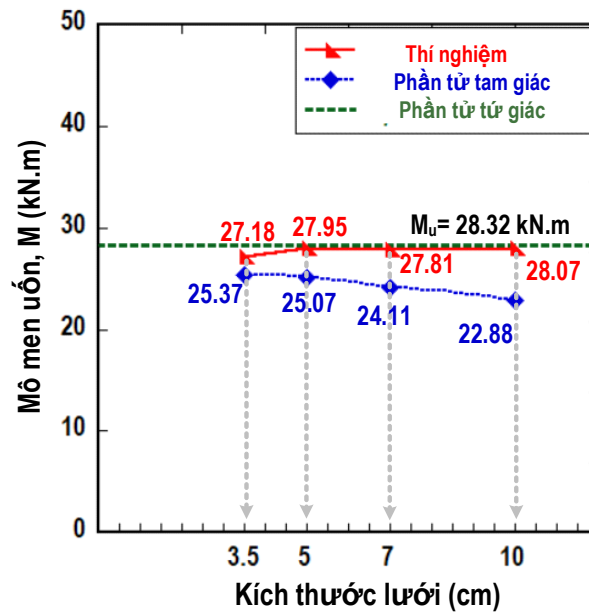
Phân tích được thực hiện cho phần tử tứ giác lẫn phần tử tam giác, với kích thước lưới giống nhau là 3,5 cm. Hình 5.10 thể hiện đường cong ứng xử mô phỏng dầm. Bảng 5.2 thể hiện kết quả so sánh giữa thực nghiệm và mô phỏng dầm HPFRC bao gồm khả năng chịu mô men uốn và độ võng tương ứng. Theo Bảng 5.2, kết quả mô phỏng sử dụng phần tử tam giác cho kết quả $M_p = 27,18 \text{ kN.m}$ và độ võng tương

ứng là 5,58 mm, trong khi mô phỏng sử dụng phần tử tứ giác cho kết quả $M_p = 25,37$ kN.m và độ võng tương ứng 8,46 mm.



Hình 5.10. So sánh sức kháng uốn giữa thực nghiệm và mô phỏng

Kết quả trên cho thấy khi chia lưới bằng loại phần tử khác nhau (tam giác và tứ giác) đường cong ứng xử dầm khác nhau: sức kháng uốn dùng phần tử tứ giác thấp hơn so với dùng phần tử tam giác (xem Hình 5.10). Hình 5.11 minh họa sự thay đổi khả năng kháng mô men khác nhau của dầm HPFRC khi chia lưới bằng phần tử tam giác và phần tử tứ giác với các kích thước khác nhau: 3,5, 5, 7 và 10 cm. Kết quả cho thấy khi kích thước lưới tăng, mô men kháng uốn dự đoán có xu hướng tiệm cận gần hơn với giá trị thực nghiệm ($M_p = 28,32$ kN.m). Tuy nhiên, điều này không có nghĩa rằng việc chia lưới thưa hơn mang lại kết quả tốt hơn - bởi về nguyên tắc, lưới phần tử càng mịn thường cho độ chính xác cao hơn. Thay vào đó, kết quả phản ánh rằng hệ số hiệu chỉnh trong mô hình số cần được điều chỉnh tăng lên khi sử dụng lưới mịn hơn để đảm bảo sự tương thích giữa mô phỏng và thực nghiệm.



Hình 5.11. Sự thay đổi khả năng kháng mô men khác nhau của dầm HPFRC

Đối với phần tử tứ giác, khả năng kháng mô men dự đoán trong cùng khoảng kích thước lưới lại thấp hơn đáng kể so với thực nghiệm (22,88 – 24,11 kN.m), điều này cho thấy kích thước phần tử lớn có thể dẫn đến việc đánh giá thấp ứng suất cục bộ cũng như ứng xử sau nứt. Tại kích thước lưới mịn nhất 3,5 cm, kết quả kháng mô men trên dầm HPFRC khi chia lưới bằng phần tử tứ giác đạt 25,37 kN.m, tiệm cận gần với giá trị thực nghiệm dù vẫn còn thấp hơn.

Đối với phần tử tam giác, khả năng kháng mô men thay đổi từ 27,18 kN.m đến 28,07 kN.m khi kích thước lưới tăng từ 3,5 đến 10 mm, xu hướng trái chiều phần tử tứ giác. Sự khác biệt này có thể là do điểm tích phân (Gauss points) khác vị trí nhau ứng với dạng phần tử khác nhau. Tuy nhiên, khi lưới được chia mịn hơn, kết quả giữa phần tử tam giác và tứ giác có xu hướng hội tụ, nghĩa là cả hai loại phần tử đều tiến gần đến nghiệm đúng của bài toán nếu mật độ lưới đủ lớn.

Kết quả phân tích mô phỏng trên cho thấy việc sử dụng phần mềm ATENA là hoàn toàn tin cậy trong việc mô phỏng ứng xử uốn của dầm bê tông, miễn là người sử dụng lựa chọn loại phần tử và kích thước lưới hợp lý. Đồng thời, kết quả này cũng cung cấp cơ sở để hiệu chỉnh tham số mô hình số, nhằm đạt được sự tương thích tốt nhất với kết quả thực nghiệm. Việc dùng lưới thưa giúp tiết kiệm thời gian, hữu ích

5.4.4. Nguyên nhân sai khác giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm trong giai đoạn sau nứt

Kết quả so sánh cho thấy mô hình số có khả năng dự báo tương đối tốt mô men kháng uốn và độ võng tại trạng thái giới hạn, với sai số nằm trong khoảng chấp nhận được đối với mô phỏng vật liệu dị thể như HPFRC. Tuy nhiên, trong giai đoạn sau nứt, vẫn tồn tại sai khác đáng kể giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm, đặc biệt liên quan đến độ võng và mức độ suy giảm độ cứng sau nứt. Những sai khác này có thể được lý giải bởi các nguyên nhân sau:

- + Mô hình vật liệu được sử dụng trong mô phỏng (Damage–Plastic) chủ yếu dựa trên các tham số hiệu chỉnh từ thí nghiệm tĩnh và phản ứng xử trung bình của vật liệu. Trong khi đó, giai đoạn sau nứt của HPFRC chịu sự chi phối mạnh của cơ chế cầu nối sợi, bao gồm trượt sợi, kéo tuột và đứt sợi, vốn mang tính không liên tục và phụ thuộc mạnh vào phân bố cũng như định hướng sợi tại vùng nứt. Các cơ chế vi mô này chưa được mô tả tường minh trong mô hình, dẫn đến việc mô phỏng chưa tái hiện đầy đủ khả năng duy trì ứng suất và độ dẻo sau nứt của vật liệu.

- + Việc sử dụng các tham số phá hủy tương đương, chẳng hạn năng lượng phá hủy hoặc quan hệ ứng suất–biến dạng sau nứt trung bình, có thể làm “làm mượt” quá trình lan truyền vết nứt trong mô phỏng. Điều này dẫn đến sự khác biệt trong tốc độ suy giảm độ cứng và mức độ mở rộng vết nứt so với thực nghiệm, nơi quá trình phá hủy thường diễn ra cục bộ và không đồng nhất trong vùng quá trình phá hủy (FPZ).

- + Sai khác cũng có thể bắt nguồn từ ảnh hưởng của lưới phần tử và kỹ thuật regularization. Mặc dù đã áp dụng các biện pháp hạn chế phụ thuộc lưới, chiều dài đặc trưng của phần tử vẫn ảnh hưởng đến độ rộng FPZ trong mô phỏng. Điều này đặc biệt nhạy cảm trong giai đoạn sau nứt, khi biến dạng tập trung cao và sự phát triển vết nứt mang tính cục bộ mạnh.

- + Trong mô phỏng, điều kiện biên và điều kiện tiếp xúc tại gối tựa và điểm đặt tải thường được giả thiết là lý tưởng. Trong thực nghiệm, sự tồn tại của ma sát, độ

cứng hữu hạn của hệ gá và các sai lệch nhỏ trong quá trình gia tải có thể ảnh hưởng đáng kể đến độ võng đo được, đặc biệt ở giai đoạn sau nứt khi kết cấu làm việc trong trạng thái phi tuyến mạnh.

5.4.5. Đề xuất hướng cải thiện mô hình số

Để nâng cao độ chính xác của mô phỏng trong giai đoạn sau nứt, một số hướng cải thiện mô hình có thể được xem xét trong các nghiên cứu tiếp theo. Thứ nhất, cần hiệu chỉnh chi tiết hơn quan hệ ứng suất–biến dạng sau nứt hoặc quan hệ ứng suất–độ mở vết nứt dựa trên dữ liệu thực nghiệm, đặc biệt là các tham số mô tả giai đoạn bắc cầu sợi. Việc sử dụng mô hình softening đa đoạn hoặc các luật hiến định có xét đến cơ chế kéo tuột sợi giúp mô phỏng chính xác hơn ứng xử sau nứt. Thứ hai, việc áp dụng các mô hình phá hủy có xét đến chiều dài đặc trưng vật liệu một cách rõ ràng, hoặc các phương pháp regularization tiên tiến hơn, giúp giảm ảnh hưởng của kích thước phần tử và cải thiện mô tả FPZ trong mô phỏng. Thứ ba, có thể xem xét tích hợp các mô hình vật liệu có khả năng mô tả sự suy giảm dần đặc tính dưới tác dụng của tải trọng lặp hoặc kết hợp damage–plastic–fatigue, nhằm nâng cao khả năng dự báo ứng xử của HPFRC không chỉ dưới tải trọng tĩnh mà còn trong điều kiện tải trọng lặp.

5.5. Kết luận chương 5

Chương 5 trình bày nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số ứng xử của dầm HPFRC với kích thước 200×200×1300 mm. Dầm được gia cường bằng cốt thép thanh và hỗn hợp sợi thép 2% chịu tải trong sơ đồ uốn 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 với dạng phá hoại là uốn dẻo.

Kết quả mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn trên phần mềm ATENA tái hiện tốt cơ chế làm việc của dầm, với sai số mô men kháng uốn nhỏ hơn 5% so với thực nghiệm. Bên cạnh đó, ảnh hưởng của độ mịn và dạng phần tử lưới cũng được phân tích, qua đó làm rõ vai trò của các yếu tố mô hình trong độ chính xác của kết quả. Kết quả nghiên cứu mô phỏng cung cấp cơ sở quan trọng cho việc hiệu chỉnh các tham số của mô hình số, nhằm đạt được sự tương thích cao nhất với kết quả thực

nghiệm. Những kết quả đạt được góp phần khẳng định tính hiệu quả và độ tin cậy của phần mềm ATENA trong phân tích ứng xử uốn của dầm HPFRC.

Nội dung Chương 5 được dựa theo công trình đã công bố như sau:

6) **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, pp.252-256.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

I. Những đóng góp mới có ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

Cơ học vật liệu xây dựng giữ vai trò đặc biệt quan trọng trong tổng thể ngành Cơ kỹ thuật, bởi đây là lĩnh vực trực tiếp gắn liền với tính an toàn, độ bền vững và hiệu quả sử dụng của công trình. Trong bối cảnh hiện nay, nhu cầu phát triển các loại vật liệu xây dựng mới nhằm đáp ứng yêu cầu ngày càng cao về độ bền cơ học, tuổi thọ và tính bền vững môi trường đang trở nên cấp thiết. Trong số đó, bê tông HPFRC được xem là một vật liệu đầy triển vọng, do đó được lựa chọn làm đối tượng nghiên cứu chính của luận án.

Mặc dù đã có nhiều công trình nghiên cứu và công bố khoa học liên quan đến vật liệu này, song ứng xử cơ học của HPFRC, đặc biệt là dưới tác động của tải trọng lặp, vẫn còn nhiều khoảng trống nghiên cứu cần được tiếp tục làm sáng tỏ. Luận án tiếp cận vấn đề một cách hệ thống, nghiên cứu cả về vật liệu lẫn kết cấu, kết hợp giữa thực nghiệm và mô hình lý thuyết, qua đó mang lại một số đóng góp mới có ý nghĩa khoa học và thực tiễn, cụ thể như sau:

1. Làm sáng tỏ ứng xử uốn tĩnh và lặp của HPFRC với hàm lượng và loại sợi khác nhau

Kết quả nghiên cứu của luận án đã cho thấy ứng xử uốn của HPFRC không chỉ phụ thuộc vào cường độ của hỗn hợp vữa bê tông nền mà còn chịu tác động lớn từ loại sợi gia cường, hàm lượng sợi và sự kết hợp các loại sợi. Kết quả thực nghiệm cho thấy sợi thép nhỏ, tròn trơn đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát sự hình thành vết nứt nhỏ, trong khi sợi thép dài có móc giúp duy trì khả năng chịu lực sau nứt và nâng cao độ dẻo dai tổng thể. Ngoài ra, việc dùng kết hợp giữa sợi ngắn và sợi dài có thể tạo ra sự cộng hưởng tích cực, giúp tăng đáng kể khả năng chịu cơ học, cải thiện chỉ số dẻo dai và hạn chế suy giảm độ cứng đột ngột khi vết nứt mở rộng và phát triển. Đây là một cơ sở học thuật quan trọng, góp phần hoàn thiện lý thuyết về

ảnh hưởng gia cường của cốt sợi thép cho vật liệu HPFRC trong việc dự báo khả năng chịu cơ học của kết cấu.

2. Làm sáng tỏ ứng xử phá hủy của HPFRC với ảnh hưởng vết nứt có sẵn ban đầu dưới tải uốn tĩnh và uốn lặp

Luận án tiến hành nghiên cứu và phân tích đồng thời các mẫu có khía và không khía, qua đó làm rõ vai trò của khuyết tật ban đầu đối với quá trình phát triển vết nứt và cơ chế phá hủy của vật liệu HPFRC. Kết quả cho thấy, so với mẫu không khía, sức kháng cơ học của mẫu có khía suy giảm đáng kể, phản ánh sát thực tế điều kiện tiết diện bị giảm, yếu do tồn tại hư hỏng ban đầu. Bên cạnh đó, vai trò của cốt sợi gia cường trong vùng phát triển nứt (Fracture Process Zone, FPZ) đã được đánh giá và chứng minh có khả năng hạn chế sự mở rộng cũng như lan truyền vết nứt. Việc làm sáng tỏ sự khác biệt trong ứng xử uốn giữa mẫu có khía và không khía không chỉ đóng góp về mặt lý luận trong việc hiểu rõ cơ chế phá hoại của HPFRC, mà còn mang ý nghĩa thiết thực cho công tác thiết kế và gia cường các kết cấu thực tế sử dụng loại vật liệu này.

3. Đóng góp vào cơ sở lý thuyết về độ bền mỏi và tuổi thọ của HPFRC

Các thí nghiệm uốn dưới tải trọng lặp trong luận án đã cho thấy mối quan hệ chặt chẽ giữa số chu kỳ – tải trọng, sự suy giảm độ cứng và quá trình phát triển biến dạng tích lũy của vật liệu HPFRC. Trên cơ sở đó, luận án đã xây dựng đường cong độ bền mỏi đặc trưng cho HPFRC thông qua các hệ số rút ra từ kết quả thực nghiệm. Đây là đóng góp quan trọng, bổ sung cho cơ sở lý thuyết về ứng xử mỏi của HPFRC, vốn còn hạn chế trong các nghiên cứu trước đây. Bên cạnh đó, việc phân tích sự khác biệt giữa các tổ hợp sợi và điều kiện mẫu cũng cung cấp dữ liệu tham chiếu hữu ích cho việc dự báo tuổi thọ công trình sử dụng HPFRC chịu tải trọng lặp lại.

4. Khả năng ứng dụng vật liệu HPFRC cho kết cấu thực tế

Luận án đã thực hiện thí nghiệm kết hợp với mô phỏng số trên dầm HPFRC có cốt thép gia cường. Do trọng tâm nghiên cứu của luận án tập trung vào làm sáng tỏ sức kháng cơ học của vật liệu HPFRC nên khối lượng phân tích kết cấu còn hạn chế.

Tuy vậy, kết quả nghiên cứu về ứng xử của dầm đã chỉ ra sự tương đồng cũng như khác biệt giữa mô phỏng và thực nghiệm. Trên cơ sở đó, tác giả đề xuất bổ sung các tham số điều chỉnh phản ánh sai khác này, góp phần hoàn thiện công cụ dự báo sức kháng cơ học của kết cấu dầm sử dụng bê tông nền HPFRC. Tuy nhiên, để các tham số này đạt được độ tin cậy cao, cần có thêm các nghiên cứu tiếp theo với số lượng thí nghiệm đủ lớn, được thực hiện dưới nhiều điều kiện vật liệu gia cường cũng như các dạng tải trọng đa dạng. Từ các kết quả đạt được, nghiên cứu kiến nghị HPFRC nên được ưu tiên ứng dụng trong các kết cấu chịu tải trọng lặp, đặc biệt là:

- Kết cấu cầu, bản mặt cầu, dầm cầu chịu tác động của tải trọng giao thông lặp lại nhiều chu kỳ;
- Kết cấu công trình giao thông, công nghiệp và hạ tầng chịu rung động;
- Các cấu kiện mảnh hoặc có vết nứt sẵn, nơi khả năng kháng lan truyền nứt đóng vai trò then chốt.

5. Hàm ý học thuật và ứng dụng thực tiễn

Những kết quả đạt được của luận án không chỉ có ý nghĩa về mặt lý luận mà còn mở ra những hướng ứng dụng vật liệu HPFRC rõ nét trong thực tiễn. Về phương diện học thuật, luận án đã bổ sung một cách có hệ thống cơ sở dữ liệu về ứng xử uốn tĩnh và lặp của HPFRC, qua đó góp phần hoàn thiện lý thuyết về vật liệu bê tông cường độ cao gia cường sợi. Thông qua các công bố trong và ngoài nước, kết quả nghiên cứu còn là cơ sở cho việc xây dựng các khuyến nghị thiết kế, góp phần nâng cao tuổi thọ công trình sử dụng HPFRC, giảm chi phí bảo trì, đảm bảo an toàn khai thác và hướng tới mục tiêu phát triển bền vững. Bên cạnh đó, các kết quả của luận án cũng là nguồn tài liệu tham khảo hữu ích cho sinh viên, học viên cao học và các nhà nghiên cứu.

Mặc dù các kết quả thực nghiệm và phân tích trong luận án đã làm rõ ảnh hưởng của hàm lượng và tổ hợp sợi thép đến ứng xử uốn tĩnh và uốn lặp của vật liệu HPFRC, các kết luận thu được vẫn cần được xem xét trong phạm vi giới hạn của chương trình nghiên cứu đã thực hiện:

Trước hết, nghiên cứu chỉ khảo sát hai loại sợi thép thương mại hóa phổ biến tại Việt Nam, bao gồm sợi thép dài có móc hai đầu và sợi thép ngắn bề mặt trơn với các kích thước hình học cố định. Do đó, hiệu ứng hiệp đồng, khả năng bắc cầu vết nứt và đặc tính tiêu tán năng lượng được ghi nhận trong nghiên cứu chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi tỷ số hình học, chiều dài neo bám, độ cứng và cơ chế tương tác riêng của hai loại sợi này với nền vật liệu. Các kết luận liên quan đến độ bền uốn, khả năng kháng mỏi hay cơ chế phá hủy sau nứt vì vậy chưa thể khái quát hoàn toàn cho các loại sợi khác như sợi xoắn, sợi gợn sóng, sợi polymer, sợi basalt hoặc các tổ hợp lai có cơ chế neo bám và mô đun đàn hồi khác biệt.

Bên cạnh đó, toàn bộ nghiên cứu thực nghiệm vật liệu được thực hiện trên mẫu kích thước nhỏ và cố định $40 \times 40 \times 160$ mm. Mặc dù kích thước này phù hợp với điều kiện thí nghiệm và thiết bị hiện có, đồng thời cho phép đánh giá tương đối rõ cơ chế phá hủy uốn của vật liệu HPFRC, nhưng vẫn tồn tại ảnh hưởng nhất định của hiệu ứng kích thước mẫu, khi các mẫu nhỏ thường cho thông số cơ học cao hơn so với mẫu kích thước lớn hoặc kết cấu thực tế. Ngoài ra, cạnh mẫu 40 mm cũng chưa bảo đảm khả năng phân bố và định hướng ngẫu nhiên theo ba chiều của sợi thép dài 35 mm.

Trong thí nghiệm dưới tải lặp, việc chưa xem xét giới hạn mỏi tại các cấp tải thấp cũng như ảnh hưởng của tần số tải đến sức kháng mỏi của HPFRC vẫn là một hạn chế của luận án. Do đó, các kết luận thu được chủ yếu mang tính tham khảo và góp phần cung cấp cơ sở dữ liệu cho các nghiên cứu tiếp theo. Việc xây dựng các thông số đặc trưng và đề xuất đưa vào tiêu chuẩn thiết kế HPFRC cần được nghiên cứu sâu hơn với cơ sở dữ liệu nhiều hơn nhằm đạt độ tin cậy cao hơn.

Đối với phần mô phỏng số, khối lượng thực hiện còn hạn chế và các tham số vật liệu chủ yếu được hiệu chỉnh dựa trên kết quả thực nghiệm của chương trình nghiên cứu hiện tại. Do đó, tính khái quát và khả năng áp dụng của mô hình đối với các cấu kiện HPFRC có kích thước khác nhau hoặc hàm lượng sợi thép khác nhau vẫn cần được tiếp tục nghiên cứu và kiểm chứng thông qua các chương trình thực nghiệm và mô phỏng mở rộng.

II. Hạn chế của nghiên cứu

Mặc dù luận án đã làm rõ được nhiều đặc trưng quan trọng về ứng xử uốn, khả năng tiêu tán năng lượng và cơ chế phá hủy của HPFRC dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và tải trọng lặp, nhưng vẫn tồn tại một số hạn chế như sau:

- Số lượng mẫu thí nghiệm hạn chế, đặc biệt trong thí nghiệm mỏi; tính ngẫu nhiên của phân bố và định hướng sợi gây độ phân tán lớn về tuổi thọ mỏi, làm giảm độ tin cậy thống kê và chỉ phản ánh ứng xử trung bình của vật liệu.
- Phạm vi thí nghiệm còn giới hạn, chủ yếu là uốn ba điểm với hình học và điều kiện biên cố định; ảnh hưởng của tỷ lệ hình học, sơ đồ chịu lực khác.
- Ảnh hưởng của đặc trưng tải mỏi (tần số, dạng sóng, tỷ số tải) chưa được xem xét đầy đủ, trong khi các yếu tố này có thể tác động mạnh đến cơ chế tích lũy hư hỏng và bắt đầu sợi.
- Xác định năng lượng phá hủy mang tính gián tiếp, phụ thuộc vào độ chính xác hệ đo và độ cứng hệ thống thí nghiệm, có thể ảnh hưởng đến giá trị tuyệt đối của các tham số năng lượng sau nứt.
- Mô hình số Damage–Plastic được hiệu chỉnh từ thí nghiệm tĩnh, chưa xét đến sự suy giảm đặc tính vật liệu dưới tải trọng lặp, nên khả năng dự báo tuổi thọ mỏi còn hạn chế.

III. Kiến nghị

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 phương tiện giao thông, gió, rung động hoặc các tải trọng chu kỳ khác. Do đó, việc nghiên cứu chuyên sâu ứng xử của bê tông HPFRC dưới cả tải trọng uốn tĩnh và uốn lặp có ý nghĩa thực tiễn quan trọng, giúp đánh giá chính xác khả năng chịu lực, tuổi thọ mỏi và độ bền lâu dài của kết cấu. Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học hữu ích cho kỹ sư thiết kế, trong việc lựa chọn cấu hình vật liệu tối ưu, đề xuất giải pháp hạn chế nứt, duy trì độ cứng và nâng cao khả năng chịu lực của kết cấu trong suốt quá trình khai thác. Với những ưu

điểm vượt trội về cơ học và độ bền, HPFRC xứng đáng được khuyến khích ứng dụng rộng rãi trong thực tế, nhằm nâng cao mức độ an toàn, kéo dài tuổi thọ công trình và giảm thiểu chi phí bảo trì, sửa chữa trong suốt vòng đời khai thác.

Trên cơ sở các hạn chế của nghiên cứu hiện tại, có thể thấy rằng các kết luận của luận án mang ý nghĩa định hướng và làm rõ cơ chế ứng xử của HPFRC trong phạm vi khảo sát cụ thể, hơn là xây dựng một quy luật phổ quát cho mọi loại HPFRC. Các hướng nghiên cứu tiếp theo được đề xuất nhằm mở rộng phạm vi, nâng cao độ tin cậy và tăng khả năng ứng dụng của kết quả nghiên cứu về ứng xử uốn của HPFRC dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và tải trọng lặp:

- Thứ nhất, cần mở rộng quy mô thí nghiệm với số lượng mẫu lớn hơn cho mỗi cấp phối, đặc biệt đối với thí nghiệm mỏi, nhằm cải thiện độ tin cậy thống kê và cho phép xây dựng các mô hình xác suất mô tả tuổi thọ mỏi của HPFRC. Việc áp dụng các phương pháp thống kê nâng cao, chẳng hạn phân bố Weibull hoặc log-normal có xét đến dữ liệu bị kiểm duyệt phải, giúp đánh giá đầy đủ hơn sự phân tán và độ không chắc chắn của dữ liệu mỏi.
- Thứ hai, các nghiên cứu tiếp theo nên khảo sát ảnh hưởng của hình học mẫu, tỷ lệ kích thước và sơ đồ chịu lực khác nhau (uốn bốn điểm, kéo trực tiếp hoặc kéo gián tiếp) đến sự hình thành và phát triển vùng quá trình phá hủy. Hướng nghiên cứu này góp phần làm rõ hiệu ứng kích thước và khả năng khái quát hóa các tham số phá hủy từ thí nghiệm quy mô phòng thí nghiệm sang cấu kiện thực tế.
- Thứ ba, cần nghiên cứu sâu hơn ảnh hưởng của các tham số tải trọng lặp, bao gồm tần số tải, dạng sóng và tỷ số tải tối thiểu–tối đa, đến cơ chế tích lũy hư hỏng mỏi và sự suy giảm dần khả năng cầu nối sợi. Việc kết hợp thí nghiệm mỏi với quan trắc sự phát triển vết nứt theo chu kỳ giúp làm rõ mối liên hệ giữa tiến hóa FPZ và tuổi thọ mỏi của HPFRC.
- Thứ tư, việc cải tiến phương pháp xác định năng lượng phá hủy là một hướng nghiên cứu quan trọng, trong đó cần kết hợp các phép đo trực tiếp như CMOD, kỹ thuật tương quan ảnh số (DIC) hoặc đo trường biến dạng cục bộ

nhằm giảm phụ thuộc vào độ võng toàn dầm và hạn chế sai số hệ đo. Điều này cho phép đánh giá chính xác hơn sự phân bố và tiêu tán năng lượng trong các giai đoạn khác nhau của quá trình phá hủy.

- Thứ năm, về mô phỏng số, các nghiên cứu tiếp theo cần phát triển hoặc tích hợp các mô hình vật liệu có khả năng mô tả suy giảm đặc tính theo chu kỳ tải, chẳng hạn các mô hình damage–fatigue hoặc coupled damage–plastic–fatigue, nhằm nâng cao khả năng dự báo ứng xử mỏi của dầm HPFRC. Việc hiệu chỉnh các tham số mô hình dựa trên dữ liệu mỏi thực nghiệm giúp tăng tính nhất quán giữa mô phỏng và thí nghiệm.
- Thứ sáu, cần xem xét mô phỏng ảnh hưởng của phân bố và định hướng sợi ở cấp độ vi mô thông qua các mô hình đa thang hoặc các phương pháp tiếp cận dựa trên phần tử ngẫu nhiên. Hướng nghiên cứu này không chỉ giúp mô tả chính xác hơn cơ chế cầu nối sợi và sự phát triển không đồng đều của FPZ, mà còn tạo cơ sở cho việc tối ưu hóa thiết kế cấp phối và cấu trúc HPFRC theo yêu cầu làm việc cụ thể.

III. Hướng phát triển của đề tài

Các nghiên cứu chuyên sâu hơn về dầm và cột sử dụng HPFRC là cần thiết nhằm cung cấp cái nhìn toàn diện hơn về khả năng chịu tải - ứng xử phá hoại của vật liệu này. Ngoài ra, cần làm rõ ứng xử uốn của HPFRC dưới các dạng tải trọng phức tạp (kết hợp uốn – cắt hoặc uốn – xoắn). Mở rộng nghiên cứu mỏi cho HPFRC có vết nứt ban đầu, kết hợp tải mỏi và môi trường xâm thực, cũng như xây dựng các mô hình mỏi dựa trên năng lượng phá hủy nhằm nâng cao độ tin cậy trong thiết kế và dự báo tuổi thọ kết cấu HPFRC trong điều kiện làm việc thực tế. Nghiên cứu mô phỏng số cũng cần được phát triển bằng cách tích hợp các mô hình khác nhau có tính đến quá trình hình thành vết nứt, suy giảm độ cứng và khả năng kháng mỏi, qua đó nâng cao độ chính xác trong dự báo khả năng làm việc lâu dài. Các thí nghiệm trên quy mô lớn và thử nghiệm ngoài hiện trường là hết sức cần thiết để kiểm chứng kết quả trong phòng thí nghiệm, đánh giá tính khả thi trong thực tiễn và xây dựng các khuyến nghị thiết kế đáng tin cậy cho HPFRC áp dụng trong kết cấu thực tế.

DANH MỤC CÔNG BỐ KHOA HỌC

- 1) **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 ISI-Q1*)
- 2) **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> (*Tạp chí ISI-Q1*)
- 3) **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.
- 4) **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.
- 5) **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.
- 6) **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, pp.252-256.

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.jobbe.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\(1\)-02](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/macr.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/matecconf/202032301014>.
- [103] Č. Consulting, ATENA Program Documentation – Part 1: Theory, Červenka Consulting, (n.d.).