BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO **BỘ QUỐC PHÒNG**

Trần Trung Hiếu

NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ CỦA NÚT KHUNG BIÊN SỬ DỤNG BÊ TÔNG CỐT SỢI THÉP TÍNH NĂNG SIÊU CAO CHỊU TẢI TRỌNG LẶP

Chuyên nghành: Kỹ thuật Xây dựng Công trình Đặc biệt
Mã chuyên ngành: 9 58 02 06

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SỸ

HÀ NỘI – NĂM 2020

CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ – BỘ QUỐC PHÒNG

Người hướng dẫn khoa học: **TS. Lê Anh Tuấn**
PGS.TS Vũ Quốc Anh

Phản biện 1: GS.TSKH Nguyễn Đông Anh – Viện HLKH&CNVN

Phản biện 2: PGS.TS Vũ Ngọc Anh – Vụ KHCN&MT, Bộ Xây dựng

Phản biện 3: PGS.TS Vũ Hoàng Hưng – Đại học Thủy lợi

Luận án sẽ được bảo vệ tại Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện theo quyết định số 4073/QĐ-HV, ngày 16 tháng 11 năm 2020 của Giám đốc Học viện Kỹ thuật Quân sự, họp tại Học viện Kỹ thuật Quân sự vào hồi giờ ngày tháng năm 2020

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Kỹ thuật Quân sự
- Thư viên Quốc gia

MỞ ĐẦU

Lý do chọn đề tài

Kết cấu khung bê tông cốt thép có độ cứng không gian lớn, chịu được tải trọng lặp điển hình theo phương ngang (tải trọng gió, động đất, …) tương đối hiệu quả. Một trong những vấn đề cần lưu ý đối với kết cấu khung này là việc thiết kế, cấu tạo và thi công phải phù hợp để đảm bảo sự làm việc cho kết cấu. Tuy nhiên, trong một số trường hợp, khi thi công tại công trường, bê tông khó có thể lấp kín tại vị trí nút liên kết dầm – cột (nút khung) nếu hàm lượng cốt thép dọc và đường kính cốt thép trong dầm lớn. Điều đó có thể dẫn đến việc khó đảm bảo các yêu cầu về cấu tạo neo trong vùng nút khi cột có tiết diện mảnh.

Vì vậy, để khắc phục vấn đề có thể phát sinh như đã nêu ở trên, một số nghiên cứu về vật liệu composite đã ra đời nhằm thay thế thành phần cốt thép ngang trong vùng nút. Đặc biệt, trong khoảng 30 năm trở lại đây, một loại vật liệu mới xuất hiện là bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao (UHPSFRC – Ultra High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete) với nhiều tính chất cơ học ưu việt hơn so với bê tông thông thường: cường độ chịu nén, uốn, kéo vượt trội, có khả năng tăng cường ứng xử kéo sau đàn hồi trong bê tông. Việc bổ sung thành phần sợi thép trong hỗn hợp bê tông này giúp cải thiện độ dẻo dai; khả năng tiêu tán năng lượng và bám dính giữa bê tông và cốt thép tăng lên; bề rộng vết nứt nhỏ hơn.

Xuất phát từ những lý do trên, nghiên cứu sinh lựa chọn đề tài **“Nghiên cứu ứng xử của nút khung biên sử dụng bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao chịu tải trọng lặp”**.

Mục tiêu nghiên cứu

- Nghiên cứu ứng xử và đánh giá hiệu quả của phương pháp tăng cường đối với nút khung biên bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao (UHPSFRC).
- Khảo sát ảnh hưởng của các tham số đến sự làm việc nút khung biên bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao như: khoảng cách tăng cường, lực dọc cột và hàm lượng cốt sợi thép.

Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- *Đối tượng nghiên cứu*

Nút khung biên phẳng sử dụng bê tông UHPSFRC và không có sàn liên kết chịu tải trọng lặp.

- *Phạm vi nghiên cứu*

Nghiên cứu trạng thái ứng suất – biến dạng nút khung biên bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao (UHPSFRC).

Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu thực nghiệm và phân tích PTHH bằng phần mềm mô phỏng số ABAQUS.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn đề tài

- *Ý nghĩa khoa học*

Cung cấp cơ sở khoa học về ứng xử nút khung biên bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao theo cách tiếp cận bằng thực nghiệm trên mô hình thật và phân tích PTHH bằng mô phỏng số.

Khảo sát các tham số ảnh hưởng như: khoảng cách tăng cường UHPSFRC, lực dọc cột và hàm lượng cốt sợi thép đến ứng xử của nút khung.

- *Ý nghĩa thực tiễn*

Những kết quả thu được sẽ là cơ sở thực tiễn nhằm giải quyết các vấn đề đang hạn chế trong công tác thi công thực tế, khi bê tông khó xâm nhập vào vùng nút khung.

Đề xuất kỹ thuật tăng cường mới cho các nút khung biên chịu tải trọng lặp. Từ những kết quả thu được từ thực nghiệm và khảo sát số có thể kiến nghị về thiết kế và cấu tạo của nút khung biên được tăng cường.

Bố cục luận án

Nghiên cứu bao gồm 130 trang thuyết minh nội dung chính, 144 tài liệu tham khảo và 45 trang phụ lục. Ngoài phần mở đầu, kết luận, kiến nghị và phụ lục, luận án này gồm có bốn chương với nội dung như sau:

Chương 1. Tổng quan về các vấn đề nghiên cứu

Chương 2. Nghiên cứu thực nghiệm ứng xử của nút khung biên bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao

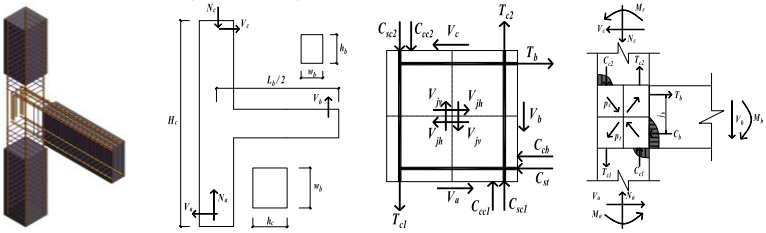
Chương 3. Phân tích kết quả thí nghiệm

Chương 4. Nghiên cứu ứng xử nút khung biên bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao bằng phân tích PTHH

Chương 1. Tổng quan về các vấn đề nghiên cứu

Nội dung chương này trình bày tổng quan về nút khung BTCT như: dạng hình học, cơ chế truyền lực, dạng phá hoại; các kết quả nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm về ứng xử nút khung biên thông thường và nút khung biên được tăng cường chịu tải trọng lặp; các tham số ảnh hưởng đến ứng xử của nút khung; giới thiệu tóm tắt về đặc trưng cơ học của vật liệu bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao (UHPSFRC). Qua nghiên cứu tổng quan cho thấy rằng các nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm đã được thực

hiện về ứng xử nút khung biên BTCT đều tập trung nghiên cứu các thông số ảnh hưởng chính đến khả năng kháng cắt của nút như cường độ chịu nén bê tông (f_c'), cấu tạo neo trong khu vực nút, lực dọc cột, tỷ lệ kích thước hình học (h_b/h_c) và hàm lượng cốt thép (ρ_b, ρ_c). Tuy nhiên, một số các tham số khác như thành phần ứng suất kéo, nén chính trong vùng nút (p_t, p_c) không được khảo sát hoặc khảo sát không đầy đủ về sự ảnh hưởng của tất cả các tham số đó (Hình 1.1).



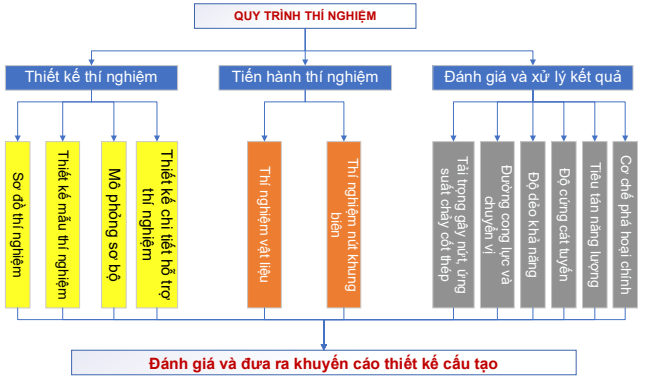
Hình 1.1 Các thành phần lực tác dụng nút khung biên

Ngoài ra, các nghiên cứu về nút khung biên được tăng cường bằng nhiều phương pháp khác nhau cũng được đề cập. Tuy nhiên, hạn chế của các nghiên cứu này là sử dụng mô hình thu nhỏ hoặc đã ứng bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao nhưng chỉ dừng ở mức dán bao bọc bằng keo epoxy xung quanh vùng nút khung. Vì vậy, trong luận án tiến hành nghiên cứu với những mục tiêu như sau:

- Nghiên cứu ứng xử của nút khung biên bê tông tính năng siêu cao bằng phương pháp thực nghiệm.
- Nghiên cứu ứng xử của nút khung bằng phân tích PTHH sử dụng phần mềm mô phỏng số.

Chương 2. Nghiên cứu thực nghiệm ứng xử của nút khung biên bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao

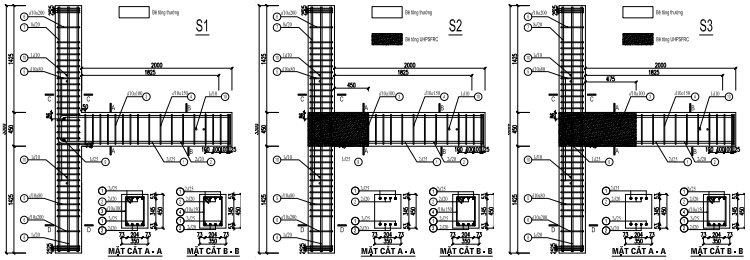
2.1. Mục tiêu và giới thiệu quy trình nghiên cứu thực nghiệm



Hình 2.1 Quy trình thí nghiệm

2.2. Cơ sở thiết kế và cấu tạo chi tiết mẫu thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, mẫu thí nghiệm được thiết kế và cấu tạo dựa trên tiêu chuẩn Eurocode 8 với tỷ lệ 1:1. Công trình thuộc nhóm công trình đặc biệt được thiết kế theo cấp độ dẻo cao (DCH). Có ba mẫu nút khung biên được thiết kế, chế tạo và thí nghiệm cho đến khi bị phá hoại. Trong đó, 01 mẫu là mẫu đối chứng, 02 mẫu còn lại dựa trên thiết kế của mẫu đối chứng nhưng được tăng cường bằng bê tông UHPSFRC và loại bỏ hoàn toàn cốt đai trong khu vực được tăng cường như Hình 2.4.

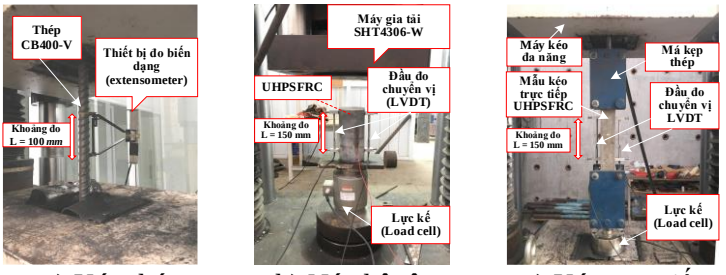


a) Mẫu S1 b) Mẫu S2 c) Mẫu S3

Hình 2.4 Chi tiết cấu tạo các mẫu thí nghiệm

2.3. Đặc trưng cơ lý của vật liệu chế tạo mẫu thí nghiệm

Thí nghiệm bao gồm các nội dung: thí nghiệm kéo thép, thí nghiệm nén mẫu bê tông thường và bê tông UHPSFRC, thí nghiệm kéo trực tiếp bê tông UHPSFRC.

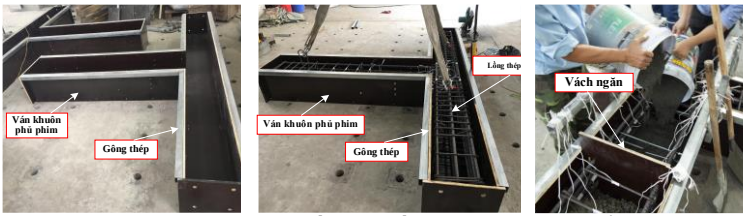


a) Kéo thép b) Nén bê tông c) Kéo trực tiếp

Hình 2.5 Thí nghiệm vật liệu

2.4. Chế tạo mẫu thí nghiệm

Các mẫu thí nghiệm được đúc theo vị trí nằm ngang với tỷ lệ 1:1. Hai loại hỗn hợp bê tông thông thường và UHPSFRC được đổ đồng thời và ngăn cách nhau bằng tấm gỗ để tránh sự trộn lẫn.



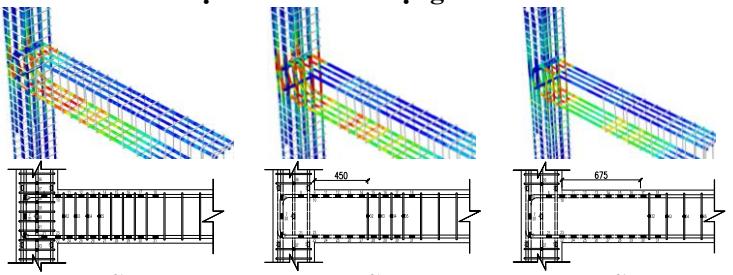
a) Ván khuôn b) Cấu tạo lồng thép c) Đổ bê tông

Hình 2.8 Chi tiết quá trình đúc mẫu thí nghiệm

2.5. Bố trí các thiết bị đo trong quá trình thí nghiệm

Tất cả các mẫu thí nghiệm trong nghiên cứu này được bố trí các thiết bị đo bên trong và bên ngoài tương ứng với phiến điện trở đo biến dạng (strain gage) và đầu đo chuyển vị (LVDT).

2.5.1. Phiến điện trở đo biến dạng



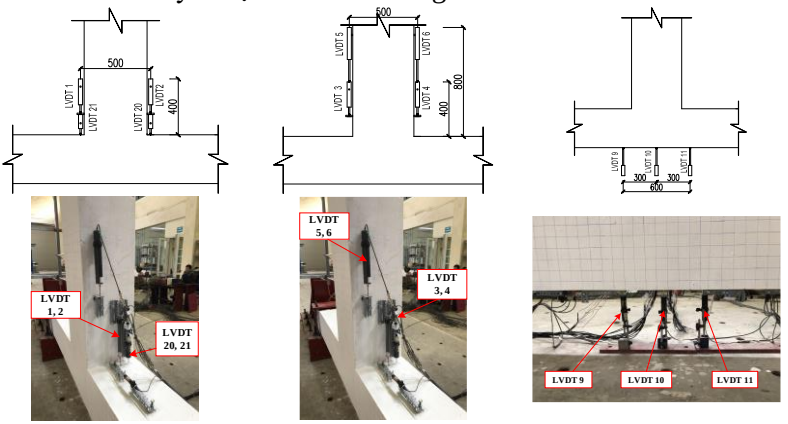
a) Mẫu S1 b) Mẫu S2 c) Mẫu S3

Hình 2.10 Bố trí phiến điện trở đo biến dạng (strain gage)

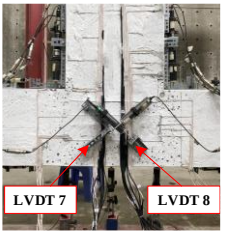
Có tất cả 117 phiến điện trở được sử dụng cho 3 mẫu thí nghiệm và chia làm 3 nhóm. Cách bố trí các phiến điện trở được thể hiện như trên Hình 2.10. Các phiến điện trở này được lắp đặt tại các vị trí quan trọng để đo sự phát triển biến dạng.

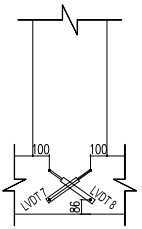
2.5.2. Đầu đo chuyển vị (LVDT)

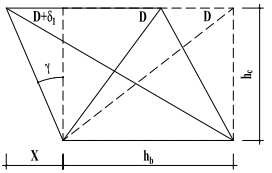
Thí nghiệm xác định các thông số sau: góc xoay dầm – cột, góc xoay khớp dẻo trong dầm, góc xoay cột và biến dạng cắt của nút. Trong quá trình thí nghiệm, mỗi mẫu thí nghiệm được bố trí 21 đầu đo chuyển vị LVDT đối xứng nhau.



a) Góc xoay dầm cột b) Góc xoay dầm c) Góc xoay cột





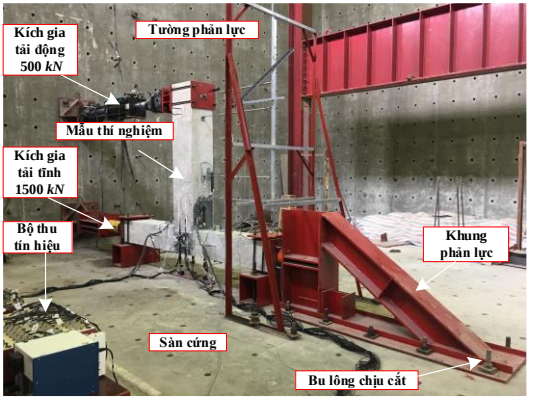


d) Biến dạng nút

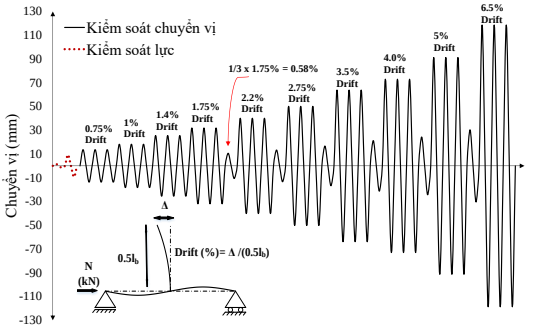
Hình 2.14 Bố trí đầu đo chuyển vị (LVDT)

2.6. Sơ đồ thí nghiệm và trình tự gia tải

Tất cả các mẫu thí nghiệm được xoay một góc 90^0 so với điều kiện thực tế. Điều này giúp cho việc gia tải lực dọc đầu cột được dễ dàng hơn. Ở vị trí đầu dầm bố trí thiết bị kích động có công suất 500 *kN* với hành trình ±500 *mm* đặt theo phương ngang song song với sàn cứng. Ngoài ra, kích



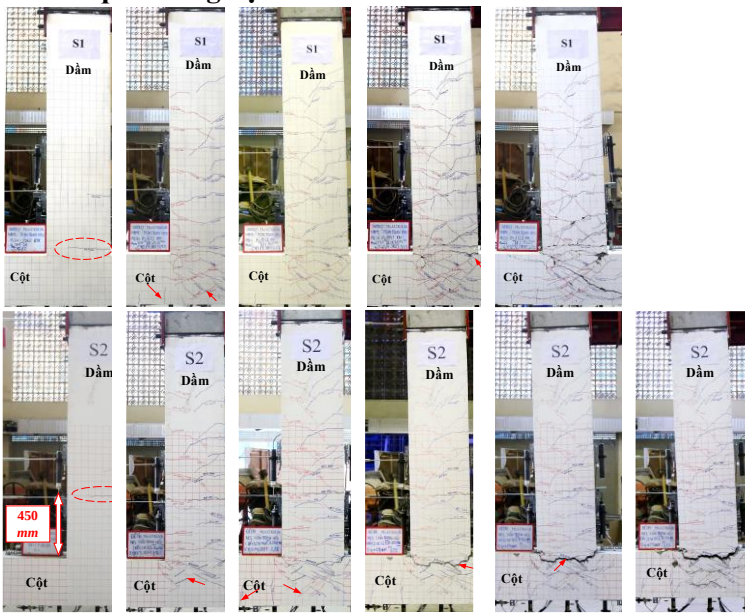
Hình 2.16 Thiết lập mẫu thí nghiệm

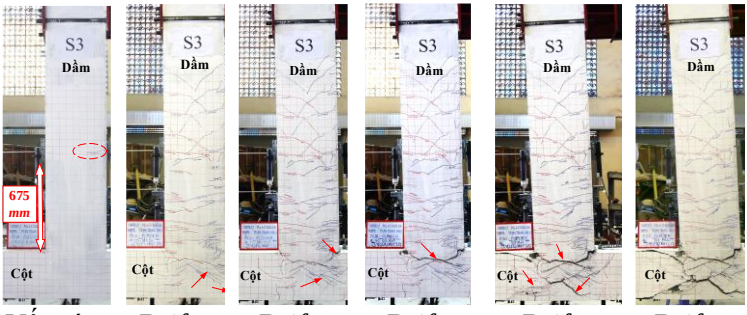


Hình 2.18 Lịch sử gia tải

gia tải tĩnh với công suất 1500 *kN* cũng được đặt theo phương ngang tác dụng vào đầu cột với một giá trị lực dọc không đổi 650 *kN* trong suốt quá trình thí nghiệm. Khung thép cường độ cao có tác dụng như khung phản lực được bắt chặt trên sàn cứng bằng 10 bu lông chịu cắt với đường kính 33 *mm* ở đầu đối diện. Hệ thống thu thập dữ liệu được theo dõi bởi máy tính đã được lập trình để ghi lại giá trị của tất cả các thiết bị đo biến dạng LVDT và các phiến điện trở trong suốt quá trình gia tải. Ở vị trí đầu dầm, kích gia tải động sẽ được kiểm soát theo hai giai đoạn. Giai đoạn đầu là giai đoạn kiểm soát lực nhằm xác định tải trọng gây nứt đầu tiên, giai đoạn 2 là giai đoạn kiểm soát bằng chuyển vị dựa vào biến dạng dẻo của cốt thép. Tỷ lệ chuyển vị đầu dầm được xác định như Hình 2.18.

2.7. Kết quả thí nghiệm





Vết nứt đầu tiên	Drift 1.4%	Drift 2.2%	Drift 3.5%	Drift 5.0%	Drift 6.5%

Hình 2.21 Hình dạng vết nứt của các mẫu thí nghiệm

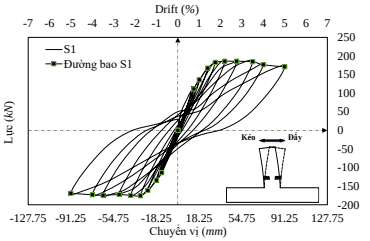
2.8. Kết luận Chương 2

Kết quả thí nghiệm thấy rằng các vết nứt ở dầm xuất hiện tương đối đồng đều trong các mẫu ở giai đoạn đầu thí nghiệm. Tuy nhiên, có sự khác biệt về vị trí xuất hiện vết nứt đầu tiên và dạng phá hoại cuối cùng ở các mẫu. Điều này cho thấy khoảng cách tăng cường UHPSFRC ảnh hưởng đến dạng phá hoại nút.

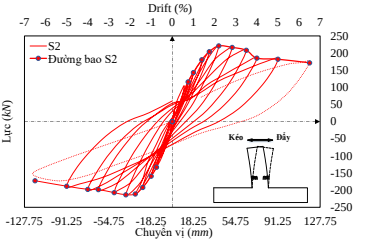
Chương 3. Phân tích kết quả thí nghiệm

3.1. Mối quan hệ lực và chuyển vị

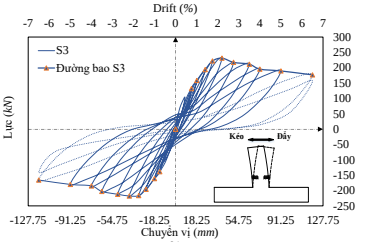
Hình 3.1 thể hiện mối quan hệ giữa lực – chuyển vị của các mẫu thí nghiệm. Giai đoạn đầu, đường cong bao này tương đối tuyến tính, sự suy giảm độ cứng xuất hiện sau thời điểm drift đạt giá trị 1%. Khả năng chịu lực lớn nhất của mẫu S3 lớn hơn so với mẫu S1 là 20% và mẫu S2 là 5% (cùng một thời điểm drift 2.2%). Điều này có thể lý giải do khoảng cách tăng cường UHPSFRC tăng lên từ 450 *mm* lên 675 *mm* trong dầm của mẫu thí nghiệm này đã tác động đến khả năng chịu lực của mẫu.



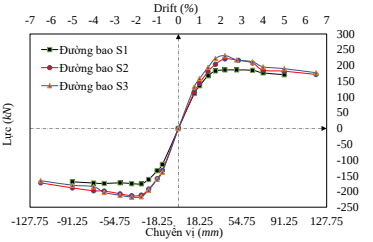
a) Mẫu S1



b) Mẫu S2



c) Mẫu S3



d) Đường cong bao

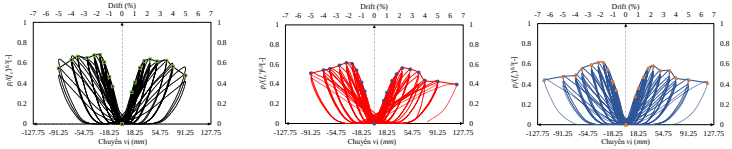
Hình 3.1 Đường cong lực – chuyển vị của các mẫu

3.2. Hệ số độ dẻo chuyển vị

Hệ số độ dẻo chuyển vị của mẫu S2 tương đương với mẫu S1 theo cả 2 hướng, nhưng mẫu S3 không đạt được như dự kiến khi hướng kéo tăng 3.4%, hướng đẩy giảm 4.6%. Như vậy, có thể thấy rằng chiều dài vùng tăng cường UHPSFRC không ảnh hưởng đến hệ số độ dẻo chuyển vị.

3.3. Thành phần ứng suất kéo chính trong nút

Tại thời điểm drift 2.2% (tải trọng lớn nhất), ứng suất kéo chính được chuẩn hóa của các mẫu tăng cường S2 và S3 thấp hơn lần lượt 11.6% và 8.1% về hướng đẩy so với mẫu S1. Điều này có thể được lý giải vì cường độ bê tông UHPSFRC trong vùng nút cao hơn rất nhiều so với bê tông thông thường.

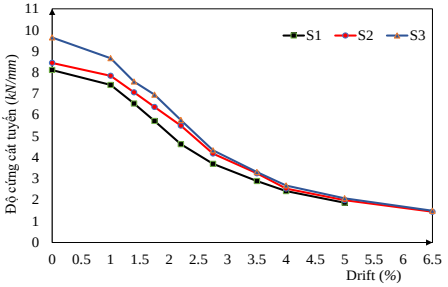


a) Mẫu S1 b) Mẫu S2 c) Mẫu S3

Hình 3.6 Ứng suất kéo chính được chuẩn hóa – chuyển vị

3.4. Sự suy giảm độ cứng

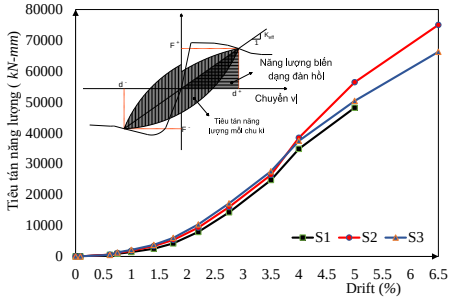
Hình 3.7 cho thấy các mẫu thí nghiệm được tăng cường đạt được độ cứng cao hơn so với mẫu đối chứng S1 tại cùng thời điểm drift 1.0%. Khi drift đạt giá trị 2.2%, độ cứng của mẫu S2 và S3 có giá trị gần bằng nhau và lớn hơn khoảng 16% so với mẫu đối chứng S1. Như vậy, có thể thấy rằng việc tăng cường bằng UHPSFRC trong các mẫu S2 và S3 có ảnh hưởng đáng kể tới độ cứng của chúng trong quá trình gia tải.



Hình 3.7 So sánh độ cứng cát tuyến

3.5. Đặc trưng khả năng tiêu tán năng lượng

Hình 3.8 cho thấy năng lượng được hấp thụ bởi các mẫu S2 và S3 tăng tương ứng 6.5% và 14.67% so với mẫu đối chứng S1. Hơn nữa, mức độ tiêu

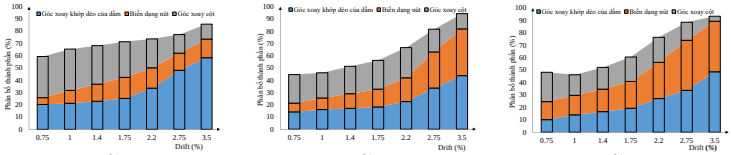


Hình 3.8 Tiêu tán năng lượng

tán năng lượng của các mẫu S2 và S3 được duy trì khi drift đạt giá trị 6.5%, trong khi mẫu S1 chỉ dừng ở mức 5.0%.

3.6. Các thông số ảnh hưởng tới drift

Ảnh hưởng của các thông số tới giá trị tổng drift như sau: của góc xoay do việc hình thành khớp dẻo trong dầm tăng từ 22% đến 43%, góc xoay biến dạng cắt của nút tăng từ 16% đến 30%, góc xoay cột ảnh hưởng không quá 25% tới tổng drift. Từ đó thấy rằng góc xoay khớp dẻo trong dầm ảnh hưởng nhiều nhất. Còn số % còn lại của tổng drift có thể bị ảnh hưởng bởi các thông số khác mà không được đo lường như: các vết nứt của dầm bên ngoài vùng khớp dẻo và chuyển vị của dầm.



a) Mẫu S1 b) Mẫu S2 c) Mẫu S3

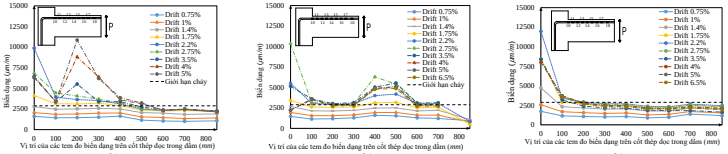
Hình 3.9 Các thành phần ảnh hưởng tới tổng drift

3.7. Mối quan hệ giữa drift và biến dạng cốt thép

3.7.1. Sự phát triển biến dạng của cốt thép dọc trong dầm

Đối với mẫu S1, biến dạng lớn nhất đạt được ở vị trí cách mặt cột 200 *mm*, điều này chứng tỏ rằng khớp dẻo xuất hiện ngoài khu vực nút (nằm trong vùng D - không liên tục). Hai mẫu tăng cường S2 và S3 thể hiện ứng xử tương đối khác nhau. Vị trí xuất hiện chảy dẻo cốt thép của mẫu S2 cách mặt cột 400 – 500 *mm*, nằm ở cuối vùng D, khớp dẻo đã bắt đầu dịch chuyển ra xa mặt cột khoảng 400 *mm*. Ứng xử mẫu S3 có sự khác biệt, mặc dù được tăng cường khoảng cách UHPSFRC lớn hơn nhưng vị trí hình thành khớp dẻo không dịch chuyển sang dầm. Mẫu S3 có

các giá trị biến dạng bị sụt giảm trong các lần gia tải tiếp theo như thể hiện trong Hình 3.11c. Nguyên nhân của sự sụt giảm giá trị biến dạng có thể là do hàm lượng của cốt thép ngang bị loại bỏ trong mẫu S3 lớn hơn so với 2 mẫu còn lại.

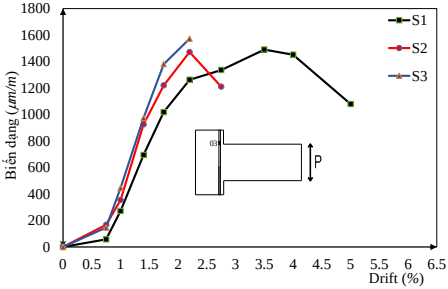


a) Mẫu S1 b) Mẫu S2 c) Mẫu S3

Hình 3.11 Mối quan hệ drift – biến dạng của cốt thép dầm

3.7.2. Sự phát triển biến dạng của cốt thép dọc trong cột

Hình 3.12 cho thấy các giá trị biến dạng tại thời điểm tải trọng lớn nhất (drift 2.2%) trong các mẫu là tương đồng. Mẫu S3 có biến dạng cao nhất, điều này có thể là do các vết nứt cắt chéo đầu tiên xuất hiện trong nút tại vị trí mép trong cột và dầm nơi có bố trí phiến điện trở đo biến dạng. Khi ứng suất cắt trong nút tăng, bề rộng vết nứt chéo tăng lên, làm tăng biến dạng kéo tại vị trí đó.

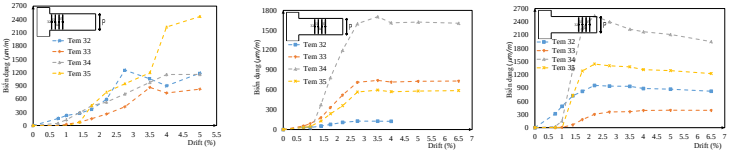


Hình 3.12 Biến dạng cốt thép cột

3.7.3. Sự phát triển biến dạng của cốt thép đai trong dầm

Sự phát triển biến dạng của cốt thép đai trong tất cả các mẫu thí nghiệm đều dưới mức chảy dẻo. Mẫu S3 có biến dạng tăng nhanh khi drift đạt đến giá trị 2.2% sau đó giảm xuống, điều này không giống như mẫu S1 và S2 khi mà biến dạng vẫn tiếp

tục phát triển. Không có mẫu thí nghiệm nào đạt đến giới hạn biến dạng cho phép của cốt đai được quy định bởi CSA S806-12.

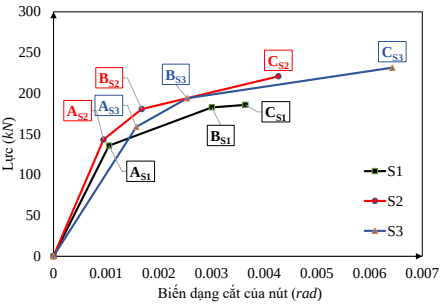


a) Mẫu S1 b) Mẫu S2 c) Mẫu S3

Hình 3.2 Sự phát triển biến dạng của cốt thép đai

3.8. Đánh giá sự làm việc nút khung được tăng cường

Tiêu chuẩn FEMA 273 quy định các giới hạn đối với biến dạng cắt như sau: đối với kết cấu BTCT, biến dạng cắt ở mức độ sụp đổ là "e" dự kiến là 0.01 và biến dạng ở cấp độ cực hạn "d" không được vượt quá 0.005. Hình 3.14 cho thấy, các mẫu S2 và S3 đều đáp ứng được khả năng kháng cắt của nút. Mẫu S2 có biến dạng cắt thấp hơn mức "d" khoảng 14% và mẫu S3 có biến dạng cắt vượt quá mức "d" là 22% tuy nhiên vẫn nằm trong giới hạn cho phép mức độ "e".



Hình 3.14 Biến dạng cắt của nút

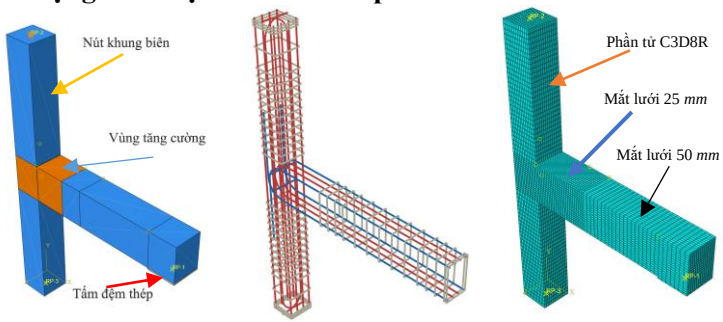
3.9. Kết luận Chương 3

Qua phân tích kết quả thí nghiệm cho thấy: khoảng cách tăng cường UHPSFRC ảnh hưởng đáng kể tới khả năng chịu lực của nút khung và không ảnh hưởng nhiều tới giá trị hệ số độ dẻo chuyển vị; khả năng kháng cắt, khả năng tiêu tán năng lượng được tăng lên rõ rệt. Hơn nữa, việc đánh giá hiệu quả sự làm việc

của mẫu S2 được tăng cường đều thỏa mãn tất cả các tiêu chí "d" và "e" của FEMA 273. Tuy nhiên, việc ứng dụng vật liệu bê tông tính năng siêu cao (UHPSFRC) cần phải được nghiên cứu thêm và cần thêm những minh chứng thực nghiệm trước khi sử dụng thực tế vật liệu này trong vùng nút khung.

Chương 4. Nghiên cứu ứng xử nút khung biên bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao bằng phân tích PTHH

4.1. Dạng hình học và chia lưới phần tử



a) Bê tông b) Cốt thép c) Lưới phần tử

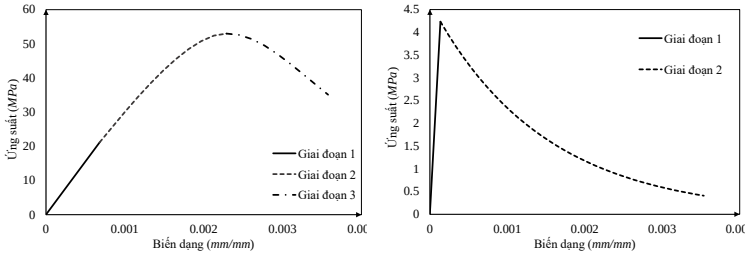
Hình 4.1 Mô hình mẫu thí nghiệm

Hình 4.1a, b thể hiện dạng hình học của nút khung biên. Trong đó, bê tông được mô phỏng hóa bằng các phần tử khối C3D8R (solid) và cốt thép được mô phẳng bằng phần tử thanh T3D2 (frame element). Việc chia lưới phần tử được thể hiện ở Hình 4.1c cho thấy, ở ngoài vùng tăng cường sử dụng mắt lưới với kích thước 50 mm, trong vùng tăng cường là 25 mm. Kích thước mắt lưới này đều áp dụng cho tất cả các mẫu thí nghiệm.

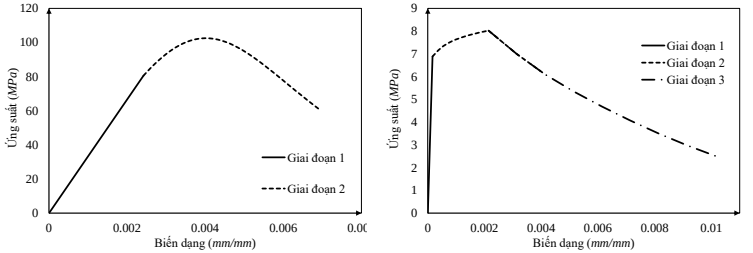
4.2. Mô hình và ứng xử của vật liệu

Ứng xử của vật liệu bê tông thông thường và bê tông UHPSFRC được thông qua mối quan hệ ứng suất – biến dạng

như Hình 4.5. Cốt thép được được giả thiết là đường song tuyến để mô phỏng các giai đoạn đàn hồi – dẻo.



a) Bê tông thông thường



b) Bê tông UHPSFRC

Hình 4.5 Ứng xử vật liệu

Nghiên cứu này sử dụng mô hình phá hoại dẻo (Concrete damage plasticity) được gọi tắt là CDP để mô phỏng tính toán. Trong mô hình này, sự phát triển vết nứt có thể được thể hiện thông qua các hệ số phá hoại DAMAGET (d_t) và DAMAGE (d_c). Các tham số đầu vào cho mô hình phá hoại dẻo CDP như sau:

Bảng 4.1 Các hệ số đầu vào cho mô hình CDP

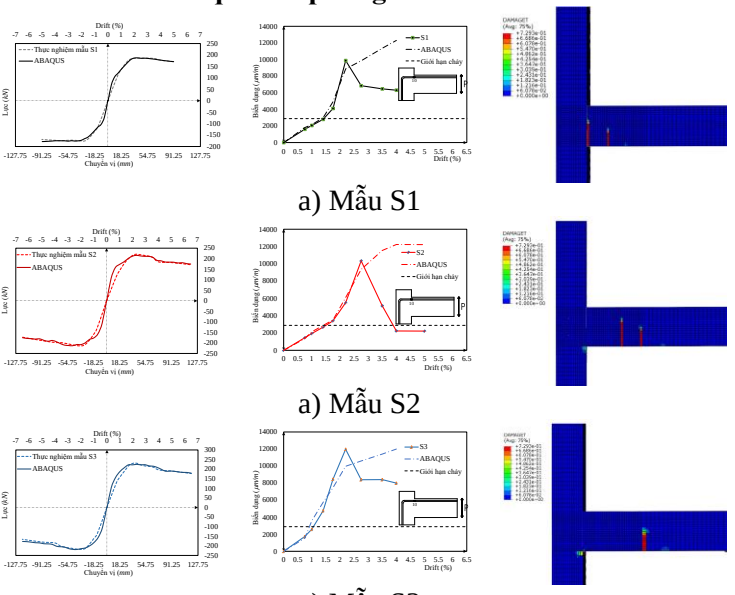
Hệ số mô hình CDP	Kí hiệu	Giá trị của hệ số trong mô hình	
		Bê tông thường	UHPSFRC
Góc lệch	ψ	30	36
Tỷ số ứng suất lệch bất biến	K_c	0.667	0.667
Tỷ số ứng suất	f_{b0}/f_{c0}	1.16	1.16
Độ lệch tâm	ϵ	0.1	0.1

4.3. Tương tác, điều kiện biên và tải trọng

Tương tác "Tie", "Coupling" và "Embedded element technique" là những kỹ thuật liên kết phần tử được sử dụng trong nghiên cứu này.

Việc mô phỏng các điều kiện biên trong thí nghiệm tại các vị trí tiết diện đầu và chân cột được thông qua các điểm tham chiếu được gọi là *RP* (Reference point). Ngoài ra, sự kết hợp giữa phân tích động theo thời gian và tốc độ gia tải chậm được gọi là ABAQUS/ Explicit sẽ giúp cho kết quả phân tích PTHH và thí nghiệm trong các mẫu thí nghiệm được chính xác hơn.

4.4. Phân tích kết quả mô phỏng



Hình 4.13 So sánh kết quả phân tích PTHH và thí nghiệm

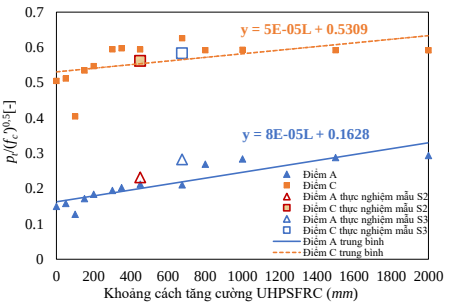
Nghiên cứu tiến hành khảo sát ảnh hưởng của việc chia lưới phần tử tới sự chính xác của kết quả phân tích bằng PTHH

so với kết quả thu được từ thí nghiệm. Các kích thước phần tử lần lượt là 25 *mm*, 50 *mm* và 100 *mm* được lựa chọn để khảo sát. Kết quả cho thấy rằng, kích thước phần tử là 25 *mm* sẽ cho kết quả phân tích tính toán phù hợp nhất với kết quả thu được bằng thực nghiệm. Sự phát triển biến dạng của thanh cốt thép dầm thu được bằng mô phỏng số ABAQUS tương đối trùng khớp với kết quả thí nghiệm trước thời điểm drift đạt giá trị 2.2%. Sau đó, các biến dạng này tiếp tục tăng cho đến khi mô hình bị phá hoại. Kết quả thu được bằng mô phỏng số ABAQUS được so sánh với kết quả thu được từ thí nghiệm khá tương đồng nhau về sự xuất hiện vết nứt đầu tiên và cơ chế phá hoại.

4.5. Nghiên cứu các tham số ảnh hưởng đến ứng xử nút

4.5.1. Ảnh hưởng khoảng cách tăng cường UHPSFRC

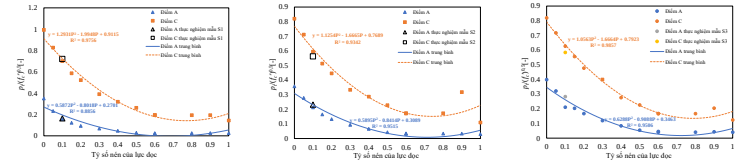
Sự thay đổi của khoảng cách vùng tăng cường (L) được lựa chọn trong khoảng từ 0 đến 2000 (toàn bộ dầm). Hơn nữa, Hình 4.21 cũng cho thấy, thành phần ứng suất kéo chính được chuẩn hóa tại thời điểm xuất hiện vết nứt đầu tiên (điểm A) và ứng suất lớn nhất (điểm C) bị ảnh hưởng rất nhiều bởi sự thay đổi khoảng cách tăng cường UHPSFRC. Các giá trị này tăng theo quy luật lần lượt là $5E^{-0.5}L+0.5309$ và $8E^{-0.5}L+0.1628$ với L là khoảng cách tăng cường.



Hình 4.21 Ảnh hưởng của khoảng cách tăng cường UHPSFRC

4.5.2. Ảnh hưởng lực dọc cột

Lực dọc tác dụng lên cột ảnh hưởng đáng kể tới cường độ cắt của nút (cường độ cắt của nút được đặc trưng bởi ứng suất kéo chính được chuẩn hóa lớn nhất, điểm C). Đối với trường hợp với lực dọc trục là 975 kN ($0.15f_cA_g$) thì ứng suất kéo chính lớn nhất của mẫu S2 và S3 lần lượt là $0.165\sqrt{f_c}$ và $0.2\sqrt{f_c}$. Đây là mức tăng trung bình khoảng 35% (cùng một mức lực dọc) so với mẫu đối chứng S1. Ứng suất kéo chính được chuẩn hóa cho từng trường hợp điểm A (xuất hiện vết nứt đầu tiên) và C (ứng suất đạt giá trị lớn nhất) tỉ lệ nghịch với giá trị lực dọc dưới dạng hàm phi tuyến.

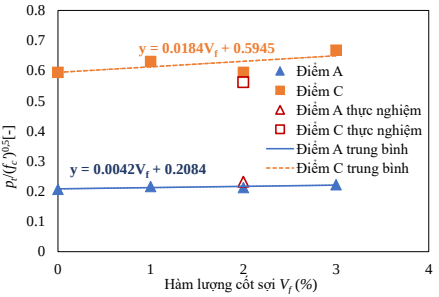


a) Mẫu S1 b) Mẫu S2 c) Mẫu S3

Hình 4.22 Ảnh hưởng của lực dọc đến thành phần ứng suất kéo chính của vùng nút được chuẩn hóa

4.5.3. Ảnh hưởng hàm lượng cốt sợi thép

Hình 4.23 cho thấy ứng suất kéo chính được chuẩn hóa $\left(p_t / \sqrt{f_c}\right)$ tại thời điểm xuất hiện vết nứt đầu tiên (điểm A) đối với các hàm lượng cốt sợi thép khác nhau gần như tương đương nhau.



Hình 4.23 Ảnh hưởng của hàm lượng cốt sợi

Đối với điểm C, ứng suất kéo chính được chuẩn hóa tỉ lệ thuận với hàm lượng cốt sợi của nút được tăng cường nhưng tương đối nhỏ so với quan sát tại điểm A. Dựa trên kết quả này, ứng suất kéo chính được chuẩn hóa tại thời điểm xuất hiện vết nứt do cắt đầu tiên có thể được xác định bởi biểu thức $k_a\sqrt{f_c}$ (trong đó k_a là hằng số). Ngoài ra, ứng suất kéo chính được chuẩn hóa tại thời điểm ứng suất cắt đạt giá trị lớn nhất (điểm C) cũng chịu ảnh hưởng bởi sự thay đổi hàm lượng cốt sợi thép V_f. Giá trị này tăng tuyến tính theo quy luật $k_c = 0.0184V_f + 0.5945$.

4.6. Kết luận Chương 4

Qua việc phân tích PTHH bằng phần mềm mô phỏng số ABAQUS cho thấy, kích thước mắt lưới phần tử 25 *mm* cho kết quả chính xác hơn với kết quả thu được bằng thực nghiệm. Ứng xử vật liệu được thể hiện qua đường cong ứng suất – biến dạng kết hợp với mô hình phá hoại dẻo (CDP) giúp quan sát được dạng phá hoại, ứng xử của toàn bộ nút trong suốt quá trình gia tải.

Ảnh hưởng của ba thông số chính đến ứng xử của của các nút khung nghiên cứu thấy rằng: cường độ của nút (được biểu thị bằng ứng suất kéo chính chuẩn hóa lớn nhất, Điểm C) tỷ lệ thuận với khoảng cách tăng cường UHPSFRC dưới dạng là một hàm tuyến tính; lực dọc tác dụng lên cột có ảnh hưởng đáng kể tới cường độ cắt của nút khung theo hàm số phi tuyến; thành phần ứng suất kéo chính tại điểm A, C không thay đổi nhiều nếu thay đổi hàm lượng cốt sợi thép. Thời điểm xuất hiện vết nứt đầu tiên, ứng suất kéo chính được chuẩn hóa có thể được xác định đơn giản bằng hàm của một thông số k_a không đổi.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

I. Những đóng góp mới của luận án

1. Luận án đã xây dựng cơ sở khoa học nghiên cứu ứng xử của nút khung biên sử dụng vật liệu bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao bằng thực nghiệm và bằng mô phỏng số sử dụng phân tích PTHH. Các kết quả tính toán theo 2 phương pháp là tương đối phù hợp. Từ kết quả nghiên cứu thấy rằng việc sử dụng bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao cho nút khung biên BTCT là một giải pháp tăng cường tương đối hiệu quả. Ứng xử của nút khung được tăng cường thể hiện nhiều ưu điểm vượt trội hơn: làm tăng đáng kể khả năng chịu cắt, hạn chế tương đối sự phá hoại xảy ra trong vùng nút khung, đơn giản hóa trong công tác thi công trong những nút khung có hàm lượng cốt thép lớn.

2. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm cho thấy đối với các nút khung được tăng cường thì khả năng chịu tải trọng lặp tăng lên đáng kể. Sự tiêu tán năng lượng cũng được tăng lên, cụ thể là các mẫu tăng cường S2 và S3 tăng lần lượt là 6.5% và 14.7% so với mẫu BTCT thông thường S1, kết quả này còn cao hơn so với kết quả thu được của các mẫu thiết kế theo mô hình độ dẻo cao (DCH). Ngoài ra, các mẫu tăng cường hoàn toàn đáp ứng được các tiêu chí về hệ số độ dẻo chuyển vị của kết cấu.

3. Qua kết quả phân tích PTHH cho thấy rằng kích thước lưới phần tử ảnh hưởng đáng kể đến tính chính xác của kết quả tính toán, lưới phần tử 25 *mm* là phù hợp nhất đối với các trường hợp nút khung sử dụng trong phân tích tính toán. Bên cạnh đó, việc sử dụng mô hình phá hoại dẻo CDP trong phần mềm

ABAQUS giúp quan sát được dạng phá hoại và ứng xử của toàn bộ nút trong suốt quá trình gia tải.

4. Luận án đã nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số tới sự hiệu quả làm việc của nút khung biên tăng cường như: khoảng cách tăng cường bằng vật liệu UHPSFRC, giá trị lực dọc tác dụng lên cột và hàm lượng cốt sợi thép. Cụ thể là:

- Khoảng cách tăng cường: Việc tăng cường nút khung biên bằng vật liệu UHPSFRC nên nằm trong vùng không liên tục (D-region) mới mang lại hiệu quả tích cực. Quan hệ giữa khoảng cách tăng cường với ứng suất cắt của nút là quan hệ tuyến tính. Khoảng cách tăng cường ảnh hưởng đáng kể tới khả năng chịu lực của nút khung nhưng chưa thể hiện được tính hiệu quả trong việc dịch chuyển vị trí hình thành khớp dẻo;

- Giá trị lực dọc tác dụng lên cột: Quan hệ giữa lực dọc tác dụng lên cột và ứng suất kéo chính trong nút là quan hệ nghịch biến theo hàm số phi tuyến.

- Hàm lượng cốt sợi thép: Việc thay đổi hàm lượng cốt sợi thép không ảnh hưởng tới ứng suất kéo chính tại thời điểm xảy ra vết nứt đầu tiên nhưng có ảnh hưởng tới giá trị ứng suất lớn nhất (quan hệ giữa chúng là tuyến tính k_c, nhưng sự gia tăng không đáng kể).

II. Kiến nghị

Việc ứng dụng vật liệu bê tông tính năng siêu cao (UHPSFRC) cần phải được nghiên cứu kỹ lưỡng và chuyên sâu hơn nữa trước khi áp dụng thực tế vật liệu này trong vùng nút khung. Các kết quả thu được từ nghiên cứu của luận án có thể

xem là những thông tin và tài liệu tham khảo cho các nghiên cứu thí nghiệm tiếp theo về vấn đề này.

III. Hướng phát triển của đề tài

Dựa trên những nội dung được thực hiện trong luận án này, có thể đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo như sau:

Nghiên cứu thực nghiệm để đánh giá sự hiệu quả của việc tăng cường bằng vật liệu UHPSFRC trong các nút khung giữa và góc nhằm kiểm chứng sự làm việc tổng thể của toàn bộ công trình. Ngoài ra, có thể phát triển nghiên cứu về liên kết giữa nút khung và sàn bằng vật liệu UHPSFRC.

Cần phát triển thêm nghiên cứu thực nghiệm về các đặc tính của vật liệu bê tông tính năng siêu cao UHPC tại một số đơn vị khác, nhằm tạo ra một loại bê tông có cường độ chịu kéo cao hơn nữa.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ

1. Trần Trung Hiếu (2019), "Khảo sát thực nghiệm khả năng kháng cắt của nút khung biên sử dụng bê tông cốt sợ thép tính năng siêu cao (UHPSFRC) chịu tải trọng lặp theo chu kì", *Tạp chí Xây dựng*. 9, 87-91.

2. Trần Trung Hiếu, Đặng Vũ Hiệp, Vũ Quốc Anh, Lê Anh Tuấn (2018), "Khảo sát ứng xử của dầm bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao (UHPFRC)", *Tạp chí Xây dựng*. 9, 289-293.

3. Trần Trung Hiếu, Lê Anh Tuấn, Lê Thanh Tuấn, Đặng Vũ Hiệp (2017), "Khảo sát quan hệ M-φ trên tiết diện dầm bê tông cốt thép khi sử dụng các mô hình vật liệu khác nhau", *Tạp chí Khoa học Kiến trúc và Xây dựng*. 28, 44-48.

4. Trần Trung Hiếu, Lê Anh Tuấn, Vũ Quốc Anh, Đặng Vũ Hiệp (2019), "Nghiên cứu thực nghiệm nút khung biên sử dụng bê tông cốt sợi thép tính năng siêu cao (UHPSFRC)", *Tạp chí Khoa học & Kỹ thuật*. 02, 54-64.

5. Van, Tran Thi Thuy, Trung, Hieu Tran (2019), Evaluation of shear resistance for beam-column connections using ultra high performance steel fibre reinforced concrete (UHPSFRC) under cyclic loading by experimental research, *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 012049.

6. T.H. Tran, A.T.Le, A.Q.Vu (2016), A research on M-φ relationships for section of reinforced concrete beam by fiber method, *The 7Th International conference of Asian concrete Federation "Sustainable Concrete for Now and the Future"*, HaNoi, VietNam.