

## Nghiên cứu nút dầm-cột bê tông cốt thép bị cháy và chịu tải khác nhau có xét đến gia cường CFRP

### Study on reinforced concrete beam-column joints subjected to different fires and loadings considering CFRP retrofitting

Đoàn Văn Đệ<sup>1</sup>, Đinh Hoài Luân<sup>1</sup>, Võ Bá Huy<sup>1</sup>, Cao Văn Vui<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Xây dựng miền Tây, Vĩnh Long, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại Học Bách Khoa Thành phố Hồ Chí Minh, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

<sup>3</sup>Đại học Quốc Gia Thành Phố Hồ Chí Minh, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ, Email: cvvui@hcmut.edu.vn

#### THÔNG TIN

DOI:10.46223/HCMCOUJS.tech.vi.19.2.3293.2024

Ngày nhận: 07/03/2024

Ngày nhận lại: 16/04/2024

Duyệt đăng: 26/04/2024

*Từ khóa:*

CFRP; cháy; gia cường; khả năng chịu tải; nút dầm-cột

*Keywords:*

CFRP; fire; retrofitting; load-carrying capacity; beam-column joint

#### TÓM TẮT

Bài báo này nghiên cứu ứng xử và khả năng chịu lực của nút dầm-cột bê tông cốt thép sau cháy dưới tác dụng của tải trọng đơn và tải trọng lặp trong trường hợp có và không có gia cường bằng tấm sợi Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). Nghiên cứu thực nghiệm được tiến hành trên 09 mẫu nút dầm-cột bê tông cốt thép bị cháy với các thời gian cháy khác nhau. Một mẫu không cháy dùng để làm mẫu đối chứng. Tám mẫu còn lại được chia thành hai nhóm, mỗi nhóm gồm 04 nút bị cháy với các thời gian cháy 45 phút và 75 phút. Sau thí nghiệm cháy, hai mẫu trong mỗi nhóm được gia cường bằng tấm sợi CFRP, hai mẫu còn lại không gia cường. Một mẫu trong mỗi cặp được thí nghiệm tải trọng đơn, mẫu còn lại thí nghiệm tải trọng lặp. Kết quả thí nghiệm cháy cho thấy sau khi cháy bê tông chuyển từ màu xám sang màu hồng nhạt. Dưới tác dụng của tải trọng, các khớp dẻo hình thành trên vị trí dầm và các vết nứt chéo nhau xuất hiện tại vị trí giao nhau giữa dầm và cột. Kết quả thí nghiệm cũng cho thấy cháy làm suy giảm khả năng chịu tải của nút dầm-cột khoảng 11%. Nút sau cháy có gia cường có sức chịu tải lớn hơn 12.9 - 17.1% so với mẫu đối chứng.

#### ABSTRACT

This paper investigates the postfire performance of reinforced concrete beam-column joints under monotonic and cyclic loadings with and without Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) retrofitting. Experiments were conducted on nine beam-column joints. One of these was not exposed to fire to be used as a control specimen. The other eight specimens were separated into two groups, which were exposed to 45-min and 75-min fires. After exposure to fire, in each group, one pair of joints were retrofitted with CFRP, while the other pair were not retrofitted. Of each pair, one joint was subjected to monotonic loading, while the other joint was subjected to cyclic loading. The results of fire tests indicated that, after fire exposure, the concrete color changed from grey to light pink. Under loading, a plastic hinge appeared at the beam end

close to the column surface, and diagonal cracks appeared at the intersection of the beam and columns. The load-carrying capacity of joints was reduced by about 11% due to fire exposure. The ultimate load of CFRP-retrofitted joints was 12.9 - 17.1% higher than that of the control joint.

## 1. Giới thiệu

Khung Bê Tông Cốt Thép (BTCT) được sử dụng khá phổ biến trong các công trình xây dựng. Kết cấu này chịu sự tác dụng của nhiều loại tải trọng khác nhau trong quá trình sử dụng, trong đó có tải trọng nhiệt do hỏa hoạn gây ra. Khi bị cháy, cường độ của cốt thép và bê tông bị suy giảm (Arioz, 2007; Bingöl & Gül, 2009; Felicetti, Gambarova, & Meda, 2009; Topçu & Karakurt, 2008). Ngoài sự suy giảm tính chất cơ học, kết cấu BTCT khi bị cháy sẽ xảy ra sự suy giảm liên kết, bám dính giữa cốt thép và bê tông (Bingöl & Gül, 2009; Ergün, Kürklü, & Başpınar, 2016). Tùy theo thời gian cháy mà công trình bị hư hại ở các mức độ khác nhau, thậm chí bị sụp đổ. Sự sụp đổ thường xuất phát từ nút dầm-cột do nội lực và ứng suất tập trung ở đây. Vấn đề này được thể hiện qua sự phá hoại nút dầm-cột sau các trận động đất ở Izmit, Thổ Nhĩ Kỳ, tháng 09/1999 (Sezen, Whittaker, Elwood, & Mosalam, 2003); hay ở Chi Chi, Đài Loan năm 1999. Ngoài trừ trường hợp bị sụp đổ, công trình có thể được gia cường để tiếp tục sử dụng. Bên cạnh đó, công trình sau cháy có thể chịu tải trọng động đất. Do vậy, đối với các nút dầm cột bê tông cốt thép không chỉ nghiên cứu sức kháng còn lại sau cháy, việc nghiên cứu ứng xử của nút khi chịu tải trọng động đất trong trường hợp được gia cường và không được gia cường là rất cần thiết.

Nghiên cứu về ứng xử của nút bê tông cốt thép sau cháy cũng được một số tác giả thực hiện bằng thực nghiệm và mô phỏng. Fang và cộng sự (2012) thí nghiệm hai nút khung dầm-cột BTCT làm bằng bê tông thường và bê tông tự đầm bị cháy theo tiêu chuẩn ISO834 trong 03 giờ. Thí nghiệm cho thấy nút dầm-cột dầm bê tông tự đầm bị nổ, bong tách nặng hơn khi cháy. Cả hai mẫu bị phá hoại ở dạng uốn với cường độ uốn giảm khoảng 80% so với cường độ uốn ở nhiệt độ thường. Han, Tan, và Song (2013) nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng ứng xử của 02 nút dầm-cột bị cháy theo tiêu chuẩn ISO834. Kết quả nghiên cứu cho thấy nút có tỷ lệ độ cứng dầm/cột cao hơn sẽ có sức kháng cháy thấp hơn; đồng thời, độ cứng của nút bị suy giảm đáng kể khi bị cháy. Song, Han, và Tao (2015) nghiên cứu ứng xử của nút dầm-cột thép liên hợp bê tông cốt thép bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Kết quả nghiên cứu cho thấy phá hoại trong cột xảy ra khi tỷ số tải trọng lên cột  $\geq 0.8$ ; ngược lại, thì phá hoại sẽ xảy ra trên vị trí dầm. Trong khi đó Raouffard và Nishiyama (2017) nghiên cứu thực nghiệm nút dầm-cột BTCT tỷ lệ 1:3 bị cháy theo tiêu chuẩn ISO834. Nghiên cứu đã kết luận rằng sự suy giảm cường độ vật liệu ít ảnh hưởng đến cơ chế chịu tải của nút.

Gia cường kết cấu là một giải pháp nhằm phục hồi khả năng chịu lực của những công trình cũ đã xuống cấp theo thời gian, hay những công trình bị hư hỏng do chịu tác động của môi trường như hỏa hoạn, động đất. Pampanin, Christopoulos, và Chen (2006) nghiên cứu gia cường mở rộng nút khung bê tông cốt thép nhằm nâng cao khả năng kháng chấn bằng các thanh chống xiên liên kết giữa dầm và cột. Nghiên cứu chỉ ra rằng bằng cách gia cường này sẽ chuyển khớp dẻo ra xa trên vị trí dầm so với mẫu không được gia cường (mẫu đối chứng), từ đó bảo vệ vùng nút khung khỏi các vết nứt do ứng suất cắt. Shafaei, Hosseini, và Marefat (2014) nghiên cứu gia cường ngoài nút dầm-cột đối với những nút không được thiết kế kháng chấn bằng cách mở rộng nút khung bằng các bản thép góc kết hợp các thanh thép tròn dự ứng lực. Kết quả nghiên cứu cho thấy khớp dẻo được đưa ra xa khỏi vị trí giao nhau giữa dầm và cột. Campione, Cavaleri, và Papia (2015) nghiên cứu thực nghiệm và lý thuyết gia cường nút dầm-cột bằng các

khung thép quán quanh vị trí dầm và cột ở khu vực nút khung chịu tải đơn và lặp. Nghiên cứu cho thấy kỹ thuật gia cường này cải thiện đáng kể cường độ và độ dẻo của nút khung. Ngoài ra, kỹ thuật gia cường này cũng giúp hiệu chỉnh cơ chế phá hoại giòn của khung cột yếu-dầm mạnh về cơ chế đặc trưng cột mạnh-dầm yếu. Bansal, Kumar, và Dar (2016) nghiên cứu gia cường ngoài nút khung bê tông cốt thép bằng cách tăng cường lưới thép xung quanh nút và phủ bằng vữa cường độ cao. Kết quả nghiên cứu cho thấy sức chịu tải của nút khung được cải thiện đáng kể. Tuy nhiên, tính dẻo và sự thất bại năng lượng thì không được cải thiện so với mẫu đối chứng. Truong, Dinh, Kim, và Choi (2017) nghiên cứu gia cường ngoài nút dầm-cột BTCT với các giải pháp gia cường khác nhau, gồm: cốt thép dạng tán đỉnh kết hợp tấm CFRP, dùng thép hình tăng cường cánh dưới nút dầm-cột và thép góc gia cường nút dầm-cột. Kết quả nghiên cứu cho thấy trừ phương pháp tán đỉnh kết hợp CFRP, các giải pháp gia cường còn lại đều làm tăng sức chịu tải, độ cứng, và sự tiêu tán năng lượng trong nút. Dang và Dinh (2017) nghiên cứu thực nghiệm gia cường nút dầm-cột đối với công trình không có thiết kế kháng chấn. Các giải pháp gia cường gồm tăng cường bản thép trên cột với chiều dài khác nhau và mở rộng nút bằng các bản thép xiên kết hợp các bản thép gia cường trên dầm và cột. Kết quả nghiên cứu cho thấy các giải pháp gia cường trên cải thiện khả năng chịu động đất về cường độ, biến dạng, và mức độ tiêu tán năng lượng.

Một giải pháp gia cường khác là sử dụng tấm sợi Fiber Reinforced Polymer (FRP). Kỹ thuật gia cường này được nghiên cứu thực nghiệm đầu tiên bởi Ghobarah và Said (2001) nhằm gia cường cho các nút khung bê tông cốt thép đã được thiết kế không có chức năng kháng chấn, chịu được tải trọng động đất. Nghiên cứu đã kết luận rằng gia cường bằng các tấm sợi FRP cải thiện khả năng chống cắt của nút khung, ngăn hiện tượng phá hoại giòn trong nút và chuyển khớp dẻo vào vị trí dầm. Trong khi đó kết quả nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng của Mahini và Ronagh (2010, 2011), về gia cường nút dầm-cột BTCT không có thiết kế kháng chấn bằng tấm sợi FRP cho thấy gia cường làm tăng khả năng chịu lực của nút khung. Ngoài ra nghiên cứu còn cho thấy khi được gia cường bằng tấm CFRP sẽ làm cho khớp dẻo xuất hiện ở xa mặt cột hơn. Kết quả nghiên cứu tương tự của Del Vecchio và cộng sự (2014) cho thấy khi có gia cường ở vùng giao nhau giữa dầm và cột sẽ làm giảm đáng kể biến dạng cắt trong vùng này. Ngoài ra, gia cường chữ U xung quanh chu vi dầm làm giảm sự bong tách liên kết giữa FRP và bê tông. Attari, Youce, và Amziane (2019) nghiên cứu thực nghiệm ứng xử của nút dầm-cột được gia cường bằng các tấm FRP khác nhau gồm GFRP, CFRP, và kết hợp giữa 02 loại trên. Kết quả nghiên cứu cho thấy giải pháp gia cường kết hợp giữa GFRP và CFRP cải thiện tính dẻo và khả năng tiêu tán năng lượng của nút dầm-cột chịu tải trọng lặp.

Ứng xử sau cháy của nút khung bê tông cốt thép không có và có gia cường FRP vẫn còn nhiều vấn đề cần được nghiên cứu. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm nút dầm-cột BTCT bị cháy không có và có gia cường FRP khi chịu tải đơn và tải lặp. Ảnh hưởng của lửa, tải đơn, tải lặp, và gia cường FRP đến sức chịu tải của nút được phân tích và đánh giá.

## **2. Chương trình thí nghiệm**

### **2.1. Vật liệu chế tạo mẫu**

Các nút dầm-cột được chế tạo bằng bê tông thương phẩm với thành phần cấp phối bê tông như Bảng 1. Phụ gia HSRD 888 được thêm vào cấp phối có tác dụng làm tăng tính linh động cho bê tông, giảm nước và tăng thời gian ninh kết. Trong quá trình đúc các nút thí nghiệm, ba mẫu bê tông hình trụ có đường kính  $D = 150\text{mm}$ , chiều cao  $H = 300\text{mm}$  được lấy để thí nghiệm cường độ chịu nén 28 ngày. Cường độ chịu nén trung bình của ba mẫu ở thời điểm 28 ngày là 26.02MPa. Cốt thép dọc chịu lực được sử dụng là loại thép Việt Nhật, đường kính  $\phi 14$ , có giới hạn chảy trung bình 328.8MPa và giới hạn bền trung bình là 492.4MPa.

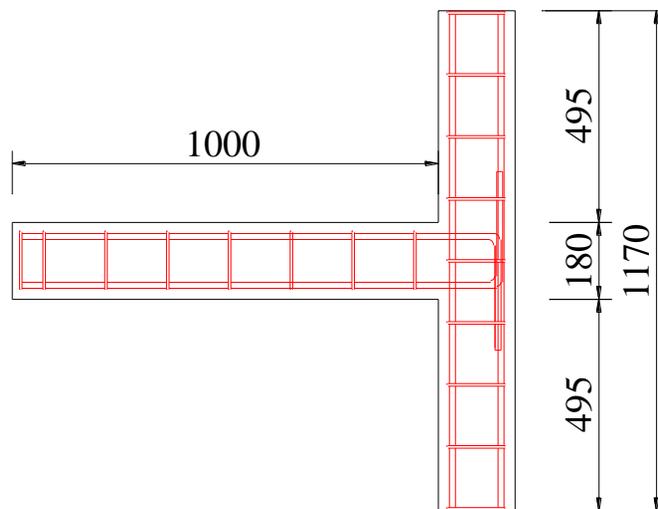
**Bảng 1**

Thành phần cấp phối bê tông sử dụng chế tạo nút dầm-cột

Vật liệu sử dụng	Đơn vị tính	Lượng vật liệu cho 1m <sup>3</sup> bê tông
Xi măng	kg	340
Đá 1x2	kg	1,130
Cát	kg	847
Nước	lít	131
Phụ gia HSRD 888	lít	2.72

### 2.2. Cấu tạo nút dầm-cột BTCT

Hình 1 trình bày cấu tạo nút dầm-cột. Cột vuông cạnh 180mm, chiều cao 1.17m, cốt thép dọc gồm 4Φ14, cốt đai có đường kính 6mm, khoảng cách cốt đai 145mm, khoảng cách từ bề mặt bê tông cột đến bề mặt cốt đai là 20mm. Dầm có tiết diện  $b \times h = 180 \times 180$ mm, cốt thép dọc gồm 4Φ14, cốt thép đai có đường kính 6mm, khoảng cách cốt đai 160mm, khoảng cách từ bề mặt bê tông dầm đến bề mặt cốt đai là 20mm. Dầm có chiều dài 1.0m tính từ mép cột.

**Hình 1.** Cấu tạo nút dầm-cột thí nghiệm

## 3. Thí nghiệm và thí nghiệm gia tải

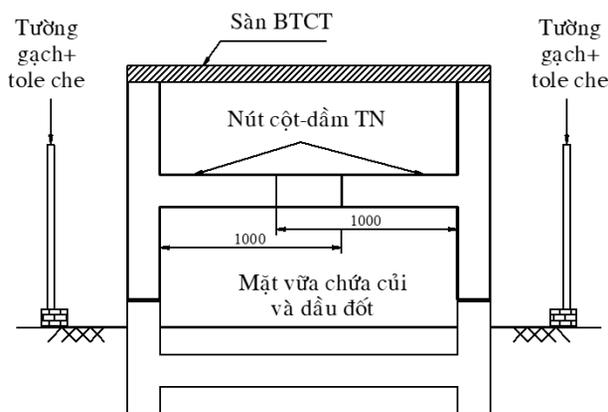
### 3.1. Thí nghiệm cháy

Nút thí nghiệm dầm-cột gồm có 09 mẫu được đúc sẵn được chia thành ba nhóm, ký hiệu A, B và C. Trong đó nhóm A gồm một mẫu không thí nghiệm cháy, không gia cường được dùng làm mẫu đối chứng, ký hiệu J0. Nhóm B gồm có bốn mẫu được thí nghiệm cháy ở thời gian 45 phút, có các ký hiệu lần lượt là J45-1, J45-2, J45-3 và J45-4. Nhóm C gồm bốn mẫu dùng để thí nghiệm cháy ở thời gian 75 phút, được ký hiệu lần lượt là J75-1, J75-2, J75-3, và J75-4. Tên các nhóm và thời gian thí nghiệm cháy được tổng hợp như Bảng 2. Dầu và củi được dùng làm nguyên liệu thí nghiệm cháy.

**Bảng 2**

Phân nhóm mẫu thí nghiệm theo thời gian cháy

STT	Nhóm	Ký hiệu/tên mẫu	Thời gian cháy (phút)
1	A	J0	0
2	B	J45-1	45
3		J45-2	
4		J45-3	
5		J45-4	
6	C	J75-1	75
7		J75-2	
8		J75-3	
9		J75-4	



a) Sơ đồ lắp đặt các nút trong buồng đốt



b) Các nút được lắp đặt trong buồng đốt

**Hình 2. Buồng đốt thí nghiệm cháy**

Quá trình cháy bắt đầu bằng dầu, rồi sau đó đến củi. Khi quá trình cháy của củi vào giai đoạn yếu dần, các túi dầu khoảng 0.5 lít/túi được ném vào đám cháy. Đối với buồng đốt 45 phút, nhiệt độ lớn nhất thu thập được là 984.8°C, đối với buồng đốt 75 phút, nhiệt độ lớn nhất quan sát được là 982.0°C. Sau khi thí nghiệm cháy theo thời gian đã dự kiến, các mẫu được làm nguội bằng cách tưới nước vào buồng đốt, sau đó để nguội đến nhiệt độ môi trường, công tác đánh giá sự hư hỏng của các nút dầm-cột sau cháy như sự bong tách và thay đổi màu sắc của bề mặt bê tông được thực hiện. Các nút dầm-cột sau đó được tháo ra và vận chuyển đến phòng thí nghiệm để tiến hành gia cường và thí nghiệm gia tải. Hình 3 diễn tả quá trình đốt các mẫu thí nghiệm và sau khi thí nghiệm cháy kết thúc.



a) Thí nghiệm cháy

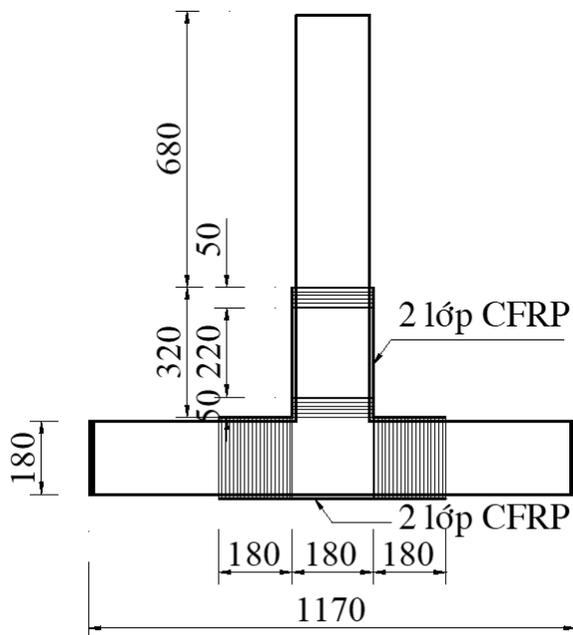


b) Mẫu thí nghiệm sau cháy

**Hình 3. Thí nghiệm cháy và các mẫu thí nghiệm sau khi bị cháy**

### 3.2. Gia cường mẫu sau khi cháy

Hai mẫu trong mỗi nhóm B (mẫu J45-3 và J45-4) và nhóm C (mẫu J75-3 và J75-4) được gia cường CFRP. Cấu hình gia cường CFRP được thể hiện như Hình 4, trong đó, tại góc tiếp giáp giữa dầm và cột được gia cường bởi 02 lớp CFRP, với chiều dài gia cường trên kết cấu dầm là 320mm, trên cột là 180mm, bề rộng tấm gia cường là 180mm. Mặt ngoài của cột được gia cường bởi 02 lớp CFRP có bề rộng 180mm và chiều dài 540mm. Các tấm có bề rộng 50mm và 180mm lần lượt được quấn quanh trong phạm vi chu vi của dầm và cột tương ứng. Công tác gia cường được thực hiện như sau: Mặt bê tông trong phạm vi gia cường được mài phẳng bằng máy mài, bụi bám dính trên bề mặt bê tông được vệ sinh bằng máy nén khí. Các tấm CFRP được cắt theo thiết kế gia cường và keo 02 thành phần A và B được trộn theo hướng dẫn sử dụng của nhà sản xuất; sau đó, keo được quét lên bề mặt bê tông và trên 02 mặt tấm CFRP. Các tấm CFRP sau đó được dán lên bề mặt kết cấu cần gia cường theo các vị trí đã định sẵn, dùng tay ép các tấm CFRP lên bề mặt bê tông nhằm loại bỏ các khe hở giữa tấm CFRP và bề mặt bê tông.



a) Cấu hình gia cường CFRP

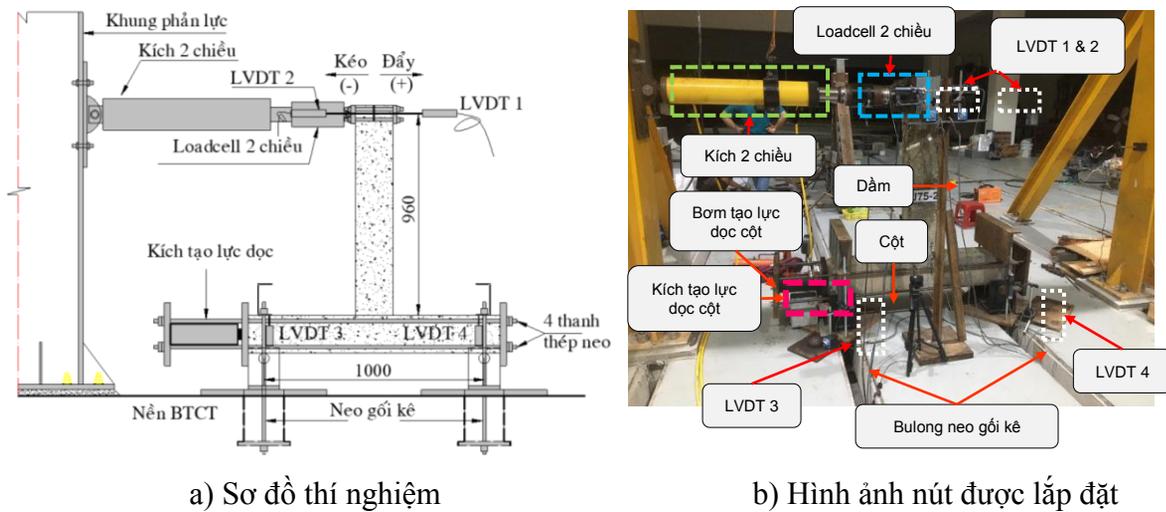


b) Ví dụ mẫu sau gia cường

**Hình 4.** Gia cường nút thí nghiệm sau cháy

### 3.3. Thí nghiệm gia tải nút BTCT bị cháy

Lực nén dọc trục trong cột được tạo ra bằng kích thủy lực 30 tấn đặt ở đầu cột và được giữ không đổi trong quá trình thí nghiệm. Tải trọng tác dụng lên dầm được tạo ra bằng kích thủy lực 02 chiều 50 tấn, hành trình pitong kéo/nén  $\pm 250$ mm. Hệ khung gia tải được cấu tạo như Hình 5, gồm hai bộ phận: hệ thống gia tải tạo lực đứng trong cột và hệ thống tạo lực ngang (uốn) trong dầm thí nghiệm. Hệ thống gia tải đứng tác dụng lên cột thông qua kích thủy lực 30 tấn đặt ở tâm của tiết diện cột nhằm tạo ra lực dọc trục không đổi trong quá trình thí nghiệm kéo và đẩy dầm. Kích gia tải ngang có một đầu được liên kết khớp với khung thép hình, đầu còn lại được liên kết với một lực kế điện tử và liên kết khớp với điểm đặt lực trên dầm thí nghiệm.



**Hình 5.** Hệ khung gia tải thí nghiệm nút dầm-cột

**3.4. Tải trọng thí nghiệm**

Tải trọng thí nghiệm gồm có tải trọng dọc trục tác dụng lên cột và tải trọng ngang (tạo mô men uốn trong dầm) tác dụng lên dầm. Trước khi tác dụng tải trọng ngang, cột được tác dụng một lực dọc trục có giá trị 15.2 tấn và được giữ không đổi trong quá trình thí nghiệm. Tải trọng ngang được chia thành hai loại: tải trọng đơn (monotonic loading) và tải trọng lặp (cyclic loading). Tải trọng đơn được thực hiện trên mẫu đối chứng J0 và các mẫu J45-1, J75-1 (các mẫu không gia cường), J45-3, J75-3 (các mẫu được gia cường) nhằm xác định khả năng chịu tải của nút dầm-cột sau khi cháy và khả năng phục hồi khả năng chịu tải sau khi được gia cường bằng tấm sợi CFRP. Trong khi đó các mẫu J45-2, J75-2 (các mẫu không gia cường) và J45-4, J75-4 (các mẫu được gia cường) được thí nghiệm tải trọng lặp. Tải trọng đơn được thực hiện bằng cách gia tăng giá trị chuyển vị cưỡng bức một cách từ từ cho đến khi mẫu bị phá hoại. Trong khi đó, tải trọng lặp được thực hiện theo đề xuất trong tiêu chuẩn FEMA 461 (Applied Technology Council, 2007). Theo đó, tỷ số giữa giá trị chuyển vị cưỡng bức trong chu kỳ thứ i và giá trị chuyển vị ở chu kỳ tới hạn là: 0.048, 0.068, 0.095, 0.133, 0.186, 0.260, 0.364, 0.510, 0.714, và 1.00. Sau các vòng lặp trên, biên độ các vòng tiếp theo tăng 30% cho đến khi phá hoại. Mặt khác, theo FEMA 356 (ASCE, 2000), chuyển vị ở chu kỳ tới hạn có độ lệch là 4%. Mỗi bước gia tải gồm 02 chu kỳ có chuyển vị giống nhau. Bảng 3 tổng hợp các trường hợp gia cường và loại tải trọng tác dụng lên các mẫu thí nghiệm.

**Bảng 3**

Phân nhóm tải trọng thí nghiệm

STT	Ký hiệu mẫu	Thời gian cháy (phút)	Loại mẫu	Loại tải trọng thí nghiệm
1	J0	0	Đối chứng	Đơn
2	J45-1	45	Không gia cường	Đơn
3	J45-2	45	Không gia cường	Lặp
4	J45-3	45	Gia cường CFRP	Đơn
5	J45-4	45	Gia cường CFRP	Lặp

STT	Ký hiệu mẫu	Thời gian cháy (phút)	Loại mẫu	Loại tải trọng thí nghiệm
6	J75-1	75	Không gia cường	Đơn
7	J75-2	75	Không gia cường	Lặp
8	J75-3	75	Gia cường CFRP	Đơn
9	J75-4	75	Gia cường CFRP	Lặp

Lực tác dụng được đo bằng lực kế (load cell). Chuyển vị được đo bằng các đầu đo chuyển vị LVDTs (Linear Variable Differential Transformers). Bốn LVDT được sử dụng, trong đó LVDT 1 và LVDT 2 được đặt tại đỉnh dầm để đo chuyển vị đỉnh, hai cái còn lại, LVDT 3 và LVDT 4, được đặt ở hai đầu cột nhằm kiểm tra chuyển vị đứng của gối tựa.

#### 4. Thảo luận và phân tích kết quả

##### 4.1. Sự thay đổi màu sắc bê tông sau cháy

Hình 6 thể hiện sự thay đổi màu sắc các nút dầm-cột bị cháy. Theo đó các nút dầm-cột bị cháy có màu sắc thay đổi so với nút dầm-cột không bị cháy tùy theo thời gian cháy. Nút không bị cháy có màu xám của bê tông, trong khi đó các nút bị cháy chuyển từ màu xám sang màu hồng nhạt. Thời gian cháy càng lâu thì màu hồng nhạt càng đậm hơn.



a) Trước khi cháy



b) Cháy 45 phút



c) Cháy 75 phút

**Hình 6.** Sự thay đổi màu sắc của bê tông sau khi cháy

Ngoài ra, các nút dầm-cột sau khi bị cháy xuất hiện những vết nứt li ti trên bề mặt bê tông. Bên cạnh sự xuất hiện các vết nứt sau khi bị cháy, bề mặt bê tông có sự bong tróc sau khi cháy (Hình 7).



a) Vết nứt bê tông sau cháy



b) Các vết bong tróc li ti trên bề mặt bê tông

**Hình 7.** Các vết nứt và sự bong tróc bề mặt bê tông sau cháy

#### 4.2. Các dạng cơ chế phá hoại

Các mẫu không gia cường có cơ chế phá hoại chủ yếu là dạng bê tông bị vỡ và cốt thép đạt ngưỡng dẻo. Khi chịu tải trọng lặp, các khớp dẻo xuất hiện trên dầm và ngay tại vị trí tiếp giáp với cột, đồng thời tại vị trí giao nhau giữa nút dầm-cột cũng xuất hiện vết nứt hình chéo nhau (Hình 8). Trong khi chịu tải trọng đơn, các khớp dẻo hình thành sâu trong dầm và không xuất hiện vết nứt tại vị trí giao nhau tại nút dầm-cột (Hình 9).

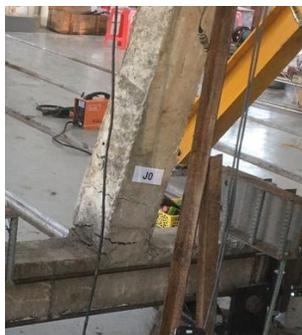


a) Mẫu J45-2



b) Mẫu J75-2

**Hình 8.** Cơ chế phá hoại của các nút dầm-cột không gia cường chịu tải trọng lặp



a) Mẫu không bị cháy



b) Mẫu bị cháy 75 phút

**Hình 9.** Cơ chế phá hoại của các nút dầm-cột không gia cường chịu tải trọng đơn

Đối với các mẫu được gia cường bằng tấm CFRP có cơ chế phá hoại là dạng bê tông bị vỡ, cốt thép đạt giới hạn chảy và sau đó các tấm CFRP (tại vị trí liên kết dầm và cột) bị đứt. Khi chịu tải trọng đơn, các khớp dẻo hình thành và phát triển trên dầm nhưng gần sát với vị trí giao nhau giữa dầm và cột (Hình 10). Khi chịu tải trọng lặp, các khớp dẻo cũng hình thành và phát triển trên dầm nhưng có thêm các vết nứt hình chéo xuất hiện tại vị trí giao nhau giữa dầm và cột (Hình 11).



a) Mẫu J45-3



b) Mẫu J75-3

**Hình 10.** Cơ chế phá hoại các nút gia cường chịu tải trọng đơn



a) Mẫu J45-4



b) Mẫu J75-4

**Hình 11.** Cơ chế phá hoại của các nút gia cường chịu tải trọng lặp

### 4.3. Sự suy giảm sức chịu tải sau cháy

Kết quả thí nghiệm được tổng hợp ở Bảng 4.

**Bảng 4**

Tổng hợp kết quả thí nghiệm

Tên mẫu	Tải	Mẫu	Tải tới hạn, kN
J-0	Đơn	Đối chứng	19.86
J45-1	Đơn	Không gia cường	17.64
J45-2	Lặp	Không gia cường	15.38
J45-3	Đơn	Gia cường FRP	22.43
J45-4	Lặp	Gia cường FRP	17.72
J75-1	Đơn	Không gia cường	17.58
J75-2	Lặp	Không gia cường	15.88
J75-3	Đơn	Gia cường FRP	23.25
J75-4	Lặp	Gia cường FRP	17.74

Sự suy giảm sức chịu tải của nút dầm-cột sau khi cháy phụ thuộc vào thời gian cháy và loại tải trọng tác dụng. Trong trường hợp chịu tải trọng đơn, khả năng chịu tải của nút dầm-cột bị suy giảm theo thời gian cháy. Sức chịu tải ban đầu (mẫu không bị cháy, J0) là 19.86kN. Khi bị cháy 45 phút và 75 phút, sức chịu tải còn lại tương ứng lần lượt là 17.64kN (mẫu J45-1) và 17.58kN (mẫu J75-1). So với mẫu không bị cháy, sức chịu tải giảm khoảng 11.18% và 11.48% tương ứng với thời gian bị cháy 45 phút và 75 phút. Tuy nhiên, sự suy giảm khả năng chịu tải trong khoảng thời gian cháy từ 45 phút đến 75 phút không đáng kể, chỉ khoảng 0.34%.

Trong trường hợp chịu tải trọng lặp, sức chịu tải của nút nhỏ hơn so với trường hợp nút chịu tải trọng đơn. Sau khi cháy 45 phút, sức kháng còn lại của mẫu chịu tác dụng của tải trọng lặp là 15.38kN (mẫu J45-2) so với 17.64kN (mẫu J45-1) khi chịu tải trọng đơn, tức giảm khoảng 12.81% so với trường hợp mẫu chỉ chịu tải trọng đơn. Tương tự như vậy, khi mẫu bị cháy 75 phút và chịu tải trọng lặp thì sức chịu tải còn lại là 15.88kN (mẫu J75-2) so với 17.58kN (mẫu J75-1) khi chịu tải trọng đơn, giảm 9.67% so với mẫu chịu tải trọng đơn. Giống như trường hợp mẫu chịu tải trọng đơn, trong khoảng thời gian cháy từ 45 phút đến 75 phút, mẫu chịu tải trọng lặp không có sự thay đổi đáng kể về sức chịu tải.

#### **4.4. Khả năng phục hồi sức chịu tải sau gia cường CFRP**

Khi được gia cường bằng tấm sợi CFRP khả năng chịu tải của các nút thí nghiệm đều tăng. Trong trường hợp mẫu chịu tải trọng đơn, sau khi được gia cường, sức chịu tải của nút J45-3 và J75-3 lần lượt là 22.43 kN và 23.25 kN, trong khi mẫu không bị cháy (mẫu J0) có khả năng chịu tải là 19.86kN. Như vậy, khả năng chịu tải sau gia cường tăng tương ứng 12.94% và 17.07% so với mẫu không gia cường, không cháy. Ngoài ra, so với sức chịu tải còn lại của mẫu sau khi cháy ở 45 phút và 75 phút tương ứng là 17.64kN (mẫu J45-1) và 17.58kN (mẫu J75-1), khả năng chịu tải nút sau khi được gia cường tăng đáng kể, tương ứng là 27.15% và 32.25%.

Trong trường hợp mẫu chịu tải trọng lặp, nhìn chung sức chịu tải của các nút sau khi được gia cường đều tăng so với các mẫu không được gia cường. Sau khi bị cháy 45 phút, khi mẫu không được gia cường chịu tải trọng lặp (J45-2) có sức chịu tải còn lại là 15.38kN. Khi được gia cường, khả năng chịu tải tăng lên 17.72kN (mẫu J45-4), tăng 15.21%. Tương tự, đối với mẫu bị cháy 75 phút (mẫu J75-2) có sức chịu tải còn lại khi chịu tải trọng lặp là 15.88kN, khi được gia cường sức chịu tải là 17.74kN (mẫu J75-4), tăng tương ứng 11.71%.

#### **5. Kết luận**

Một số kết luận được rút ra như sau:

Khi bị cháy bê tông chuyển từ màu xám sang màu hồng nhạt, thời gian cháy càng lâu thì bê tông có màu hồng càng đậm. Các vết nứt li ti và sự bong tróc xuất hiện trên bề mặt bê tông sau cháy.

Đối với các mẫu không gia cường có cơ chế phá hoại chung là bê tông bị vỡ, cốt thép đạt trạng thái dẻo, các khớp dẻo hình thành sâu hơn trên vị trí dầm khi chịu tải trọng đơn. Khi chịu tải trọng lặp, vị trí khớp dẻo xuất hiện trên dầm ngay tại vị trí tiếp giáp với cột, đồng thời xuất hiện các vết nứt chéo tại nút dầm-cột. Đối với các mẫu gia cường, cơ chế phá hoại là bê tông bị nứt và cốt thép đạt ngưỡng dẻo sau đó các tấm CFRP bị đứt. Tuy nhiên, các khớp dẻo hình thành sâu hơn phía trong của nút dầm-cột, đồng thời xuất hiện các vết nứt chéo tại vị trí giao nhau giữa nút dầm-cột.

Khi bị cháy khả năng chịu tải của nút dầm-cột bị suy giảm. So với mẫu không bị cháy, sức chịu tải của nút bị cháy 45 phút và 75 phút giảm khoảng 11% so với mẫu không bị cháy. Ngoài ra sức chịu tải còn lại sau cháy của mẫu chịu tải trọng lặp nhỏ hơn khả năng chịu tải còn lại của mẫu chịu tải trọng đơn.

Khi được gia cường bằng các tấm CFRP, khả năng chịu tải của nút khi chịu tải trọng đơn cao hơn từ 12.9 - 17.1% so với mẫu không gia cường, không cháy. Trong khi đó, nút sau cháy có gia cường CFRP có sức chịu tải lớn hơn 27.1 - 32.25% so với mẫu bị cháy.

#### **LỜI CẢM ƠN**

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Xây Dựng Miền Tây và Trường Đại học Bách Khoa - Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

---

#### **Tài liệu tham khảo**

Applied Technology Council. (2007). *FEMA 461 interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components*. Redwood City, CA: Applied Technology Council.

- Arioz, O. (2007). Effects of elevated temperatures on properties of concrete. *Fire Safety Journal*, 42(8), 516-522. doi:10.1016/j.firesaf.2007.01.003
- ASCE. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Paper presented for Federal Emergency Management Agency, FEMA Publication No. 356, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Attari, N., Youcef, Y. S., & Amziane, S. (2019). Seismic performance of reinforced concrete beam-column joint strengthening by frp sheets. *Structures*, 20(April), 353-364. doi:10.1016/j.istruc.2019.04.007
- Bansal, P. P., Kumar, M., & Dar, M. A. (2016). Retrofitting of exterior RC beam-column joints using ferrocement jackets. *Earthquake and Structures*, 10(2), 313-328. doi:10.12989/eas.2016.10.2.313
- Bingöl, A. F., & Gül, R. (2009). Residual bond strength between steel bars and concrete after elevated temperatures. *Fire Safety Journal*, 44(6), 854-859. doi:10.1016/j.firesaf.2009.04.001
- Campione, G., Cavaleri, L., & Papia, M. (2015). Flexural response of external R.C. beam-column joints externally strengthened with steel cages. *Engineering Structures*, 104, 51-64. doi:10.1016/j.engstruct.2015.09.009
- Dang, T. C., & Dinh, H. N. (2017). Experimental study on structural performance of RC exterior beam-column joints retrofitted by steel jacketing and haunch element under cyclic loading simulating earthquake excitation. *Advances in Civil Engineering*, 2017(i), 1-12. doi:10.1155/2017/9263460
- Del Vecchio, C., Di Ludovico, M., Balsamo, A., Prota, A., Manfredi, G., & Dolce, M. (2014). Experimental investigation of exterior rc beam-column joints retrofitted with FRP systems. *Journal of Composites for Construction*, 18(4), 1-13. doi:10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000459
- Ergün, A., Kürklü, G., & Başpınar, M. S. (2016). The effects of material properties on bond strength between reinforcing bar and concrete exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 112(2016), 691-698. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.213
- Fang, K., Sullivan, P. J. E., Lee, C.-C., Fang, I.-C., Yeh, T.-Y., & Wu, M.-Y. (2012). Fire resistance of beam-column subassembly. *ACI Structural Journal*, 109(1), 31-40 .
- Felicetti, R., Gambarova, P. G., & Meda, A. (2009). Residual behavior of steel rebars and R/C sections after a fire. *Construction and Building Materials*, 23(12), 3546-3555. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.06.050
- Ghobarah, A., & Said, A. (2001). Seismic rehabilitation of beam-column joints using FRP laminates. *Journal of Earthquake Engineering*, 5(1), 113-129. doi:10.1080/13632460109350388
- Han, L., Tan, Q., & Song, T. (2013). Fire performance of Steel Reinforced Concrete (SRC) structures. *Procedia Engineering*, 62(2013), 46-55. doi:10.1016/j.proeng.2013.08.043
- Mahini, S. S., & Ronagh, H. R. (2010). Strength and ductility of FRP web-bonded RC beams for the assessment of retrofitted beam-column joints. *Composite Structures*, 92(6), 1325-1332. doi:10.1016/j.compstruct.2009.09.006

- Mahini, S. S., & Ronagh, H. R. (2011). Web-bonded frps for relocation of plastic hinges away from the column face in exterior RC joints. *Composite Structures*, 93(10), 2460-2472. doi:10.1016/j.compstruct.2011.04.002
- Pampanin, S., Christopoulos, C., & Chen, T. H. (2006). Development and validation of a metallic haunch seismic retrofit solution for existing under-designed RC frame buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35(14), 1739-1766.
- Raouffard, M. M., & Nishiyama, M. (2017). Fire response of exterior reinforced concrete beam-column subassemblages. *Fire Safety Journal*, 91(February), 498-505. doi:10.1016/j.firesaf.2017.03.054
- Sezen, H., Whittaker, A. S., Elwood, K. J., & Mosalam, K. M. (2003). Performance of reinforced concrete buildings during the August 17, 1999 Kocaeli, Turkey earthquake, and seismic design and construction practise in Turkey. *Engineering Structures*, 25(1), 103-114. doi:10.1016/S0141-0296(02)00121-9
- Shafaei, J., Hosseini, A., & Marefat, M. S. (2014). Seismic retrofit of external RC beam-column joints by joint enlargement using prestressed steel angles. *Engineering Structures*, 81, 265-288. doi:10.1016/j.engstruct.2014.10.006
- Song, T.-Y., Han, L.-H., & Tao, Z. (2015). Structural behavior of SRC beam-to-column joints subjected to simulated fire including cooling phase. *Journal of Structural Engineering*, 141(9), 1-12. doi:10.1061/(asce)st.1943-541x.0001211
- Topçu, I. B., & Karakurt, C. (2008). Properties of reinforced concrete steel rebars exposed to high temperatures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2008, 1-5. doi:10.1155/2008/814137
- Truong, T. G., Dinh, H. N., Kim, J.-C., & Choi, K. K. (2017). Seismic performance of exterior RC beam - column joints retrofitted using various retrofit solutions. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(3), 415-433. doi:10.1007/s40069-017-0203-x

