

HIỆU QUẢ GIA CƯỜNG CỦA TẤM BFRP CHO CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP BỊ ĂN MÒN CHỊU NÉN LỆCH TÂM

Huỳnh Xuân Tín^a, Ngô Hữu Cường^{b,c}, Nguyễn Minh Long^{b,c,*}

^aPhân hiệu tại TP. Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải, 450-451 đường Lê Văn Việt, TP. Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

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

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

Nhận ngày 16/9/2022, Sửa xong 08/11/2022, Chấp nhận đăng 11/11/2022

Tóm tắt

Bài báo khảo sát thực nghiệm hiệu quả gia cường bó hông của tấm sợi basalt (BFRP) đối với cột bê tông cốt thép (BTCT) bị ăn mòn chịu nén lệch tâm. Khảo sát thực nghiệm được tiến hành trên chín mẫu cột BTCT với kích thước cỡ trung (200×200×800 mm) bị ăn mòn chịu nén lệch tâm. Các thông số khảo sát bao gồm ba mức độ ăn mòn cốt thép tính theo khối lượng (không ăn mòn, cốt đai bị ăn mòn 15% và cốt dọc không bị ăn mòn, và cốt đai và cốt dọc cùng bị ăn mòn 15%) và số lớp tấm BFRP gia cường bó hông (một lớp và ba lớp). Kết quả cho thấy hiệu quả gia cường đáng kể của tấm BFRP trong việc cải thiện khả năng chịu nén lệch tâm của cột BTCT có cốt thép bị ăn mòn (lên đến 30%). Tấm BFRP ngăn chặn rất hiệu quả sự suy giảm khả năng chịu nén lệch tâm của cột gia cường gây nên bởi sự ăn mòn của cốt thép (lên đến 80%). Ăn mòn cốt thép làm giảm hiệu quả của tấm BFRP trong việc cải thiện mức độ hấp thụ năng lượng và độ dẻo dai của cột cũng như làm giảm biến dạng cuối cùng của tấm BFRP.

Từ khóa: cột bê tông cốt thép; cốt dọc và đai bị ăn mòn; tấm BFRP; nén lệch tâm; hiệu quả gia cường.

CONFINED-STRENGTHENING EFFICACY OF BFRP SHEETS FOR CORRODED REINFORCED CONCRETE COLUMNS UNDER ECCENTRIC-COMPRESSIVE LOADS

Abstract

The paper investigates the behavior of corroded reinforced concrete (RC) columns strengthened by BFRP sheets under eccentric-compression loads. The experiment program includes nine mid-scale square corroded RC columns (200×200×800 mm) under eccentric-compression loads. The studied variables include three levels of reinforcement corrosion by mass (no corrosion, stirrup corrosion of 15% and longitudinal reinforcement without corrosion, and both stirrup and longitudinal reinforcement corrosion of 15%), and number of BFRP-confinement layers (1 and 3). The results reveal that the BFRP sheets significantly improve their eccentric-compressive capacity (up to 30%). BFRP sheets also effectively prevent reduction of eccentric-compression capacity of the columns due to reinforcement corrosion (up to 80%). Reinforcement corrosion also causes considerable reduction of energy absorption capacity and ductility of the columns as well as the decrease of BFRP final strain.

Keywords: RC columns; reinforcement corrosion; BFRP sheets; eccentricity loading; strengthening effectiveness.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2022-16\(5V\)-02](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(5V)-02) © 2022 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: nguyenminhlong@hcmut.edu.vn (Long, N. M.)

1. Đặt vấn đề

Tính hiệu quả cao của phương pháp dùng vật liệu polymer sợi (FRP) gia cường cho cấu kiện cột bê tông cốt thép (BTCT) đã được khẳng định trong nhiều nghiên cứu liên quan đến nén đúng tâm [1–4] và cả nén lệch tâm [5–8]. Các nghiên cứu này phần lớn tập trung vào đánh giá hiệu quả gia cường của loại tấm sợi các-bon (CFRP) do các đặc tính cơ học tốt của loại tấm này như cường độ, mô-đun đàn hồi cao và ít bị ảnh hưởng bởi các yếu tố môi trường. Một vấn đề lớn của tấm CFRP là giá thành cao khiến cho tính kinh tế của phương án thiết kế gia cường dùng loại tấm này bị hạn chế trong một số trường hợp. Để giải quyết vấn đề giá thành cao của tấm CFRP, một số nghiên cứu liên quan đến gia cường cột BTCT chịu nén lệch tâm đã dùng tấm sợi thủy tinh (GFRP) [9, 10]; tuy vậy, tấm GFRP lại có nhược điểm là mô-đun đàn hồi thấp và dễ bị từ biến [11, 12]. Tấm sợi basalt (BFRP) được phát triển muộn hơn nhằm khắc phục những điểm yếu vừa nêu của tấm GFRP. Tấm BFRP với khả năng chịu lực tốt hơn tấm GFRP và có giá thành thấp hơn đáng kể so với tấm CFRP có thể là giải pháp gia cường khả thi; đặc biệt khi vấn đề gia cường không đòi hỏi sự gia tăng đáng kể về khả năng chịu lực hay khi chỉ dừng lại ở yêu cầu phục hồi khả năng chịu lực ban đầu của cột.

Trong một vài năm gần đây, một số ít nghiên cứu bắt đầu sử dụng tấm BFRP gia cường bó hông cho cột. Mote và Jadhav [13] khảo sát thực nghiệm trên mười bốn mẫu cột BTCT tròn (130×700 mm) được gia cường bằng hai lớp tấm BFRP chịu nén đúng tâm. Nghiên cứu cho thấy hai lớp tấm BFRP làm tăng khả năng chịu lực và độ dẻo dai của mẫu lên lần lượt là 1,7 và 2,0 lần. Jiang và cs. [14] và Yao và Wu [15] nghiên cứu kết hợp giữa thanh BFRP gia cường theo dạng xẻ rãnh (NSM) và tấm BFRP dán ngoài gia cường trụ cầu BTCT tiết diện tròn và vuông chịu tải trọng tải nén đúng tâm kết hợp với tải trọng ngang theo chu kỳ. Các tác giả nhận thấy rằng phương pháp kết hợp thanh BFRP xẻ rãnh và tấm BFRP dán ngoài làm tăng độ cứng, độ dẻo dai và khả năng chịu lực của cột. Ouyang và cs. [16] thực hiện nghiên cứu so sánh hiệu quả gia cường giữa tấm BFRP và CFRP trên cột vuông BTCT dưới tác động của tải động đất. Nghiên cứu chỉ ra rằng tấm sợi basalt (BFRP) rất tiềm năng cho công tác sửa chữa cột, đáp ứng các yêu cầu về kinh tế và kỹ thuật, và có khả năng thay thế tấm sợi FRP truyền thống trong công tác gia cường cột BTCT.

Trong thực tế, giải pháp gia cường dùng vật liệu FRP phần lớn được triển khai cho kết cấu đã bị xuống cấp hay hư hỏng nhất định, trong đó phần lớn là do cốt thép chịu lực của kết cấu bị ăn mòn. Trong kết cấu công trình BTCT, cột là một trong những cấu kiện chịu lực rất nhạy cảm với vấn đề xâm thực do chúng thường tiếp xúc trực tiếp với các yếu tố có hại từ môi trường xung quanh như độ ẩm, nước, các ion clo hay sunfat có trong nước mặn, thường gây nên hiện tượng ăn mòn cốt thép. Cốt thép chịu lực bị ăn mòn không những khiến cho diện tích tiết diện bị suy giảm mà còn cả cường độ của chúng và làm ảnh hưởng đến các đặc trưng kết cấu của cột [17]. Điều đáng nói là cho đến hiện nay, số lượng các nghiên cứu liên quan đến khảo sát hiệu quả làm việc của loại tấm BFRP tiềm năng trong việc gia cường cột BTCT có cốt chịu lực (cốt đai và cốt dọc) đã bị ăn mòn chịu nén lệch tâm là rất hạn chế. Một vài nghiên cứu liên quan đến ứng xử của cột BTCT bị ăn mòn được gia cường bằng tấm CFRP chịu nén lệch tâm có thể kể đến như [18] và gần đây là [19]. Các nghiên cứu này kết luận rằng sự ăn mòn cốt thép làm giảm hiệu quả gia cường của tấm CFRP. Gần đây nhất, Yuan và Shen [20] khảo sát thực nghiệm trên bốn cột BTCT ($250 \times 250 \times 1300$ mm) có cốt thép bị ăn mòn ở mức độ nhẹ (8% theo khối lượng). Các cột được gia cường bằng tấm BFRP chịu tải nén đúng tâm kết hợp với tải trọng ngang theo chu kỳ. Kết quả cho thấy tấm BFRP nâng cao được độ dẻo dai và khả năng chịu lực của cột.

Để cung cấp thêm các thông tin nhằm làm sáng tỏ, tường minh và đầy đủ hơn về hiệu quả gia cường của loại tấm BFRP tiềm năng cho cột BTCT bị ăn mòn, bài báo này trình bày một nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của ăn mòn cốt đai và cốt dọc đến hiệu quả gia cường của tấm BFRP bó

hông đối với cột BTCT chịu nén lệch tâm. Chương trình thực nghiệm được tiến hành trên chín cột BTCT có kích thước $200 \times 200 \times 800$ mm có cốt đai và cốt dọc không bị ăn mòn hoặc bị ăn mòn 15% (theo khối lượng), được gia cường bởi một lớp dán dọc ở mặt kéo; và một hoặc ba lớp tấm BFRP bó hông. Độ lệch tâm tương đối $e/h = 0,375$ (tương ứng với lệch tâm lớn) với e là độ lệch tâm tuyệt đối ($e = 75$ mm) và h là chiều cao tiết diện cột. Mục tiêu của bài báo là làm rõ ảnh hưởng của sự ăn mòn cốt đai và cốt dọc đến các đặc trưng kết cấu của cột BTCT gia cường tấm BFRP chịu nén lệch tâm như khả năng chịu lực, chuyển vị, độ dẻo dai và hấp thụ năng lượng cũng như hiệu quả gia cường của tấm BFRP.

2. Chương trình thực nghiệm

2.1. Vật liệu

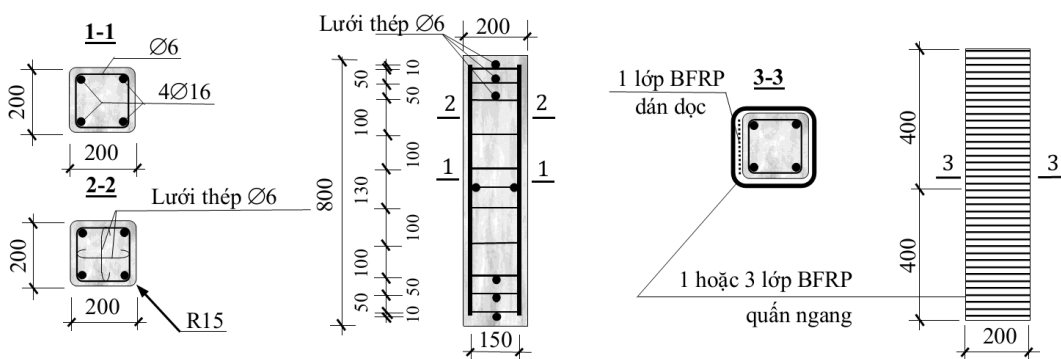
Các cột thí nghiệm sử dụng bê tông với cấp phối như sau: xi măng PC40 (405 kg/m^3); đá 1x2 (22 mm , 931 kg/m^3); cát sông (04 mm , 527 kg/m^3); cát nghiền (02 mm , 358 kg/m^3); và phụ gia dẻo (4 l/m^3). Độ sụt bê tông xấp xỉ 12 ± 2 cm. Cường độ chịu nén trung bình dọc trục $f_{c,cube}$ và kéo chế $f_{sp,cube}$ thực tế của bê tông được xác định trên kết quả nén sáu mẫu lập phương $150 \times 150 \times 150$ mm theo tiêu chuẩn [21, 22] (Bảng 1). Giới hạn chảy f_y và giới hạn bền f_u trung bình của cốt thép dọc chịu kéo và cốt thép được xác định trên ba mẫu theo tiêu chuẩn [23] (Bảng 1). Tấm sợi basalt đơn hướng (BFRP) được sử dụng dày $0,11$ mm của hãng Changzhou Utek Composite Co., Ltd. (Trung Quốc), với các đặc trưng cơ học như Bảng 1. Keo epoxy hai thành phần được sử dụng của hãng Toray Industries, Inc. (Nhật Bản) có các thông số cơ học $f_{imp,u}$ và E_{imp} lần lượt là $41,2 \text{ MPa}$ và $2,3 \text{ MPa}$.

Bảng 1. Tính chất cơ học của tấm BFRP, cốt thép và bê tông

	BFRP				Cốt thép dọc			Cốt thép đai			Bê tông	
	t_f^* mm	f_{ffu} MPa	E_f GPa	ε_{fu} %	f_u MPa	f_y MPa	E_s GPa	f_{uw} MPa	f_{yw} MPa	E_{sw} GPa	$f_{c,cube}$ MPa	$f_{sp,cube}$ MPa
Mean	0,1	2131	105	2,3	530	350	200	470	390	200	59,0	5,8
COV	-	0,07	0,1	0,1	0,03	0,01	-	0,02	0,01	-	0,06	0,05

Ghi chú: * Giá trị được cung cấp bởi nhà sản xuất; Mean là giá trị trung bình và COV là độ lệch tương đối.

2.2. Cột thí nghiệm



Hình 1. Cấu tạo của cột thí nghiệm

Chương trình thực nghiệm được tiến hành trên chín mẫu cột BTCT kích thước 200×200×800 mm (Hình 1 và Bảng 2). Mỗi cột được bố trí bốn thanh thép dọc đường kính 16 mm; và cốt đai đường kính 6 mm được đặt với khoảng cách 100 mm. Ở đầu cột, cốt đai bố trí khoảng cách 50 mm nhằm tránh phá hoại cục bộ ở đầu khi thí nghiệm. Các cột được chia thành ba nhóm A, B và C. Nhóm A có cốt thép đai và cốt dọc không ăn mòn; nhóm B có cốt thép đai ăn mòn 15% (tính theo khối lượng) và cốt dọc không ăn mòn; và nhóm C có cốt thép đai và cốt dọc cùng ăn mòn 15%. Mỗi nhóm gồm ba cột; trong đó, có một cột không được gia cường, một cột gia cường một lớp dán dọc ở mặt kéo và một lớp tấm BFRP bó hông, và một cột gia cường một lớp dán dọc ở mặt kéo và ba lớp tấm BFRP bó hông. Nghiên cứu này hướng đến việc mô phỏng gần đúng nhất trường hợp sửa chữa gia cường cột bằng tấm FRP trong thực tế và phương pháp tạo ăn mòn cốt thép và không tẩy gỉ trước khi đúc mẫu [24, 25] được sử dụng. Cốt thép trong các mẫu cột được ngâm trong dung dịch axit H₂SO₄, nồng độ 40%, để tạo ăn mòn ở mức độ đồng đều nhất có thể. Mức độ ăn mòn của cốt thép được kiểm tra hàng tuần thông qua các mẫu thép đai diện dài 200 mm có cùng đường kính và được ngâm cùng lúc như cốt thép chịu lực trong cột. Tại từng thời điểm kiểm tra, hai mẫu thép đai diện cho cốt dọc và cốt đai như vừa nêu được lấy ra, làm sạch và cân. Dựa trên khối lượng bị mất đi do ăn mòn của các mẫu thép đai diện này, mức độ ăn mòn của cốt thép được xác định. Các thanh thép được ngâm cho đến khi đạt đến mức độ ăn mòn đã đặt ra. Sau đó, các thanh thép được dùng để tạo các mẫu cột mà không được làm sạch gỉ sét đã được tạo ra do quá trình ăn mòn xung quanh bề mặt cốt thép với mục đích phản ánh sao cho xác thực nhất sự suy giảm bám dính giữa bề mặt cốt thép bị ăn mòn với bê tông xung quanh.

Ba cột đối chứng được bảo dưỡng trong phòng với nhiệt độ 26°C - 30°C và độ ẩm 60% - 80% trong 28 ngày và sau đó tiến hành thí nghiệm. Sáu cột gia cường tấm BFRP, sau 28 ngày bảo dưỡng, được tiến hành gia cường bó hông bằng tấm BFRP.

Bảng 2. Tổng hợp cấu tạo của các mẫu thí nghiệm

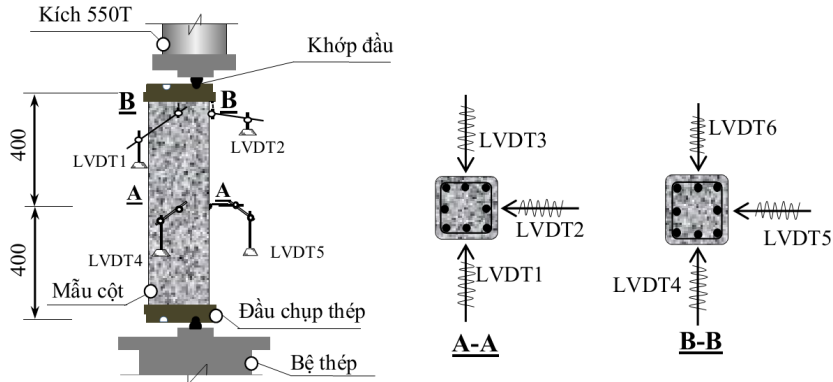
Nhóm	Tên mẫu	Số lớp tấm BFRP		Mức độ ăn mòn (%)		Độ lệch tâm, e (mm)
		Dán dọc*	Quấn ngang	Cốt thép đai	Cốt thép dọc	
A	A00	0	0	0	0	75
	A11	1	1	0	0	75
	A13	1	3	0	0	75
B	B00	0	0	15	0	75
	B11	1	1	15	0	75
	B13	1	3	15	0	75
C	C00	0	0	15	15	75
	C11	1	1	15	15	75
	C13	1	3	15	15	75

Ghi chú: * Tấm BFRP chỉ dán dọc trên mặt kéo lớn nhất.

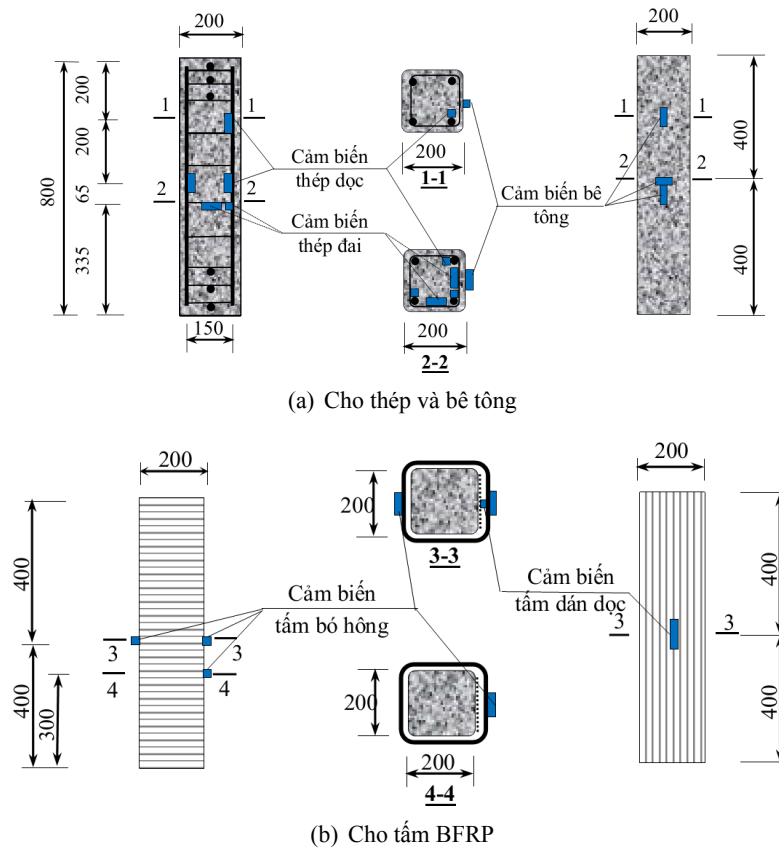
2.3. Quy trình thí nghiệm và bố trí thiết bị đo

Tất cả các cột được thí nghiệm nén với độ lệch tâm tương đối là $e/h = 0,375$ (Hình 2), trong đó e là độ lệch tâm tuyệt đối và h là chiều cao tiết diện cột. Chuyển vị của cột được xác định dựa trên sáu chuyển vị kế điện từ (LVDTs), trong đó ba LVDTs đo chuyển vị đứng và ba LVDTs đo chuyển vị ngang. Biến dạng của bê tông được đo trên ba cảm biến dán ở 1/2 và 1/4 chiều cao cột. Biến dạng của

thép dọc đo trên ba cảm biến dán ở 1/2 và 1/4 chiều cao cột; trong khi biến dạng của cốt đai được xác định thông qua ba cảm biến trên cốt đai ở giữa cột. Biến dạng của tấm BFRP được đo với bốn cảm biến tại hai mặt cắt (Hình 3(b)). Tất cả các giá trị lực, chuyển vị và biến dạng đều được đo tự động thông qua thiết bị thu nhận số liệu. Sơ đồ và vị trí lắp đặt thiết bị đo đặc được thể hiện trên Hình 2 và 3. Hình 4 thể hiện một số hình ảnh thực tế triển khai cho các công tác tạo ăn mòn cốt thép, đúc mẫu, dán tấm BFRP và nén mẫu.



Hình 2. Sơ đồ thí nghiệm và chi tiết bố trí thiết bị đo đặc cho cột



Hình 3. Bố trí các cảm biến đo đặc



Hình 4. Hình ảnh thực tế khi thí nghiệm

3. Kết quả thí nghiệm và thảo luận

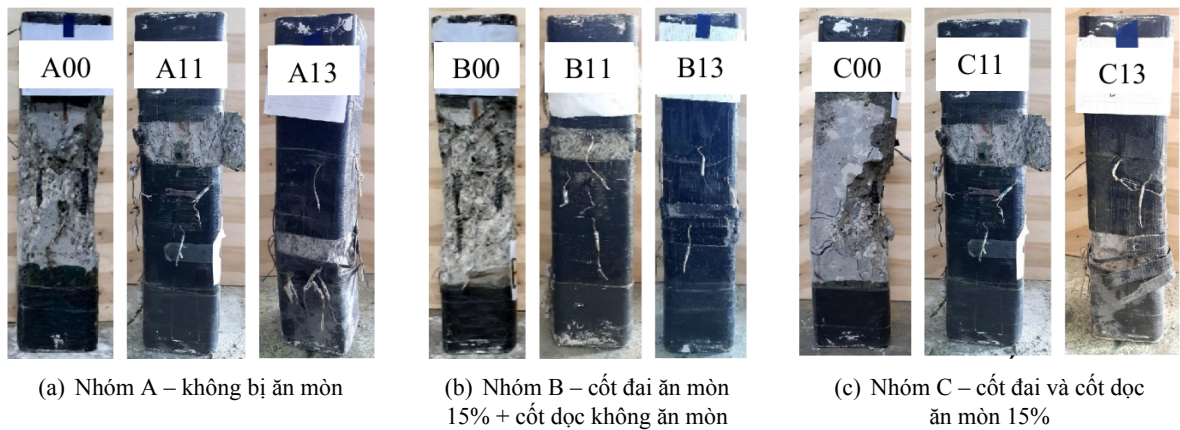
3.1. Kiểu phá hoại của cột thí nghiệm

Kết quả thí nghiệm được trình bày trong Bảng 3 và kiểu phá hoại của các cột được thể hiện trên Hình 5. Các mẫu cột không gia cường tấm BFRP bị phá hoại do cốt dọc vùng nén bị chảy và sau đó bê tông vùng này bị nén vỡ ở khu vực giữa cột (Hình 5 – mẫu A00, B00 và C00); tại thời điểm cột bị phá hoại, cốt dọc trong vùng chịu kéo của cột không chảy. Cốt thép dọc chịu nén bắt đầu bị chảy ở cấp tải bằng $67\%P_u$ đến $88\%P_u$; trong khi, cốt thép chịu kéo có xu hướng ít làm việc hơn và không bị chảy, đặc trưng cho ứng xử của cột ngắn. Ở các cấp tải tiệm cận P_u , biến dạng nén bê tông tăng nhanh và làm cho cột bị phá hủy ở vùng chịu nén. Quan sát tại vị trí nén vỡ, thép dọc chịu nén bị cong vênh nhưng cốt thép đai hầu như còn nguyên vẹn, cho thấy chúng vẫn chưa làm việc nhiều. Mức độ ăn mòn và cấu hình ăn mòn ảnh hưởng không rõ ràng tới kiểu phá hoại của các mẫu không gia cường.

Bảng 3. Tổng hợp kết quả thí nghiệm

Mẫu	P_u kN	$P_{u,st}$ kN	P_y kN	$\delta_{u,h}$ mm	$\delta_{u,v}$ mm	$\delta_{y,v}$ mm	$\varepsilon_{su,t}$ ‰	$\varepsilon_{su,c}$ ‰	$\varepsilon_{swu,c}$ ‰	$\varepsilon_{swu,side}$ ‰	ε_{cu} ‰	$\varepsilon_{fcon,u,t}$ ‰	$\varepsilon_{fcon,u,c}$ ‰	$\varepsilon_{fflex,u}$ ‰	K_0 kN/mm	μ -	E_{abs} kNmm
A00	760	593	626	3,5	4,8	3,2	0,6	-3,8	0,3	0,11	-3,2	-	-	-	197	1,5	2198
A11	790	664	744	3,8	6,5	3,7	0,9	-4,5	1,2	0,10	-3,6	1,1	10,0	2,8	199	1,7	3619
A13	826	720	697	3,9	6,6	3,3	1,0	-4,8	1,2	0,11	-3,7	0,8	10,1	3,0	214	2,0	3786
B00	656	580	495	3,4	4,6	3,0	0,6	-3,7	0,3	0,08	-3,0	-	-	-	165	1,5	1714
B11	768	644	656	3,4	6,2	3,8	0,7	-4,3	0,9	0,11	-3,5	0,8	9,9	2,7	172	1,6	2996
B13	803	648	622	4,0	6,4	3,2	0,9	-4,6	0,9	0,25	-3,6	0,6	9,5	2,8	194	2,0	3443
C00	611	410	437	3,2	4,6	3,1	0,5	-3,4	0,3	0,08	-2,9	-	-	-	139	1,5	1448
C11	745	552	600	3,2	5,5	3,9	0,6	-4,2	0,8	0,15	-3,4	0,7	9,0	2,5	152	1,4	2404
C13	794	638	647	3,1	5,9	4,0	0,9	-4,5	0,7	0,21	-3,6	0,5	8,4	2,8	161	1,5	2840

Ghi chú: P_u là tải trọng lớn nhất của mẫu, kN; P_y là cấp tải chuyển tiếp, mô tả sự chuyển tiếp rõ ràng từ ứng xử đàn hồi qua phi tuyến của cột, kN; $P_{y,st}$ là cấp tải chảy dẻo của cốt thép dọc, kN; $\delta_{u,v}$ và $\delta_{u,h}$ lần lượt chuyển vị đứng và chuyển vị ngang lớn nhất của cột; $\varepsilon_{su,t}$ và $\varepsilon_{su,c}$ lần lượt là biến dạng lớn nhất của cốt thép dọc ở mặt kéo và mặt nén tại giữa cột; $\varepsilon_{swu,c}$ và $\varepsilon_{swu,side}$ lần lượt là biến dạng lớn nhất của cốt đai ở mặt nén và mặt bên (nằm giữa mặt kéo và mặt nén) tại giữa cột; ε_{cu} là biến dạng nén lớn nhất của bê tông ở mặt nén tại giữa cột; $\varepsilon_{fcon,u,t}$ và $\varepsilon_{fcon,u,c}$ lần lượt là biến dạng lớn nhất của tấm BFRP bó hông ở mặt kéo và mặt nén tại giữa cột; $\varepsilon_{fflex,u}$ là biến dạng lớn nhất của tấm BFRP dán dọc ở mặt kéo tại giữa cột; K_0 là độ cứng trong giai đoạn đầu của cột, $= P_y/\delta_{y,v}$, kN/mm; $\delta_{y,v}$ là chuyển vị đứng của cột tại cấp tải P_y , mm; μ là độ dẻo của cột, $= \delta_{u,v}/\delta_{y,v}$; E_{abs} là khả năng hấp thụ năng lượng của cột.

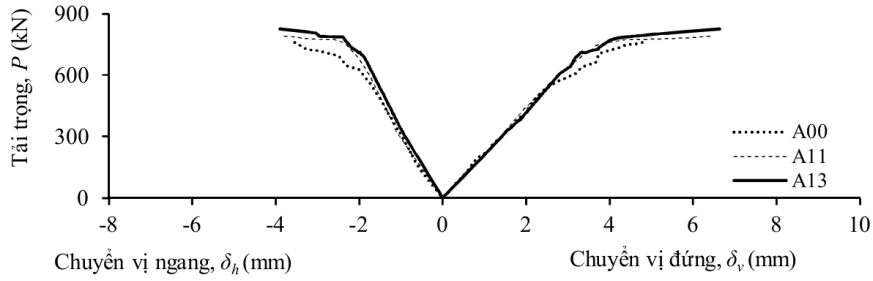


Hình 5. Kiểu phá hoại của các cột thí nghiệm

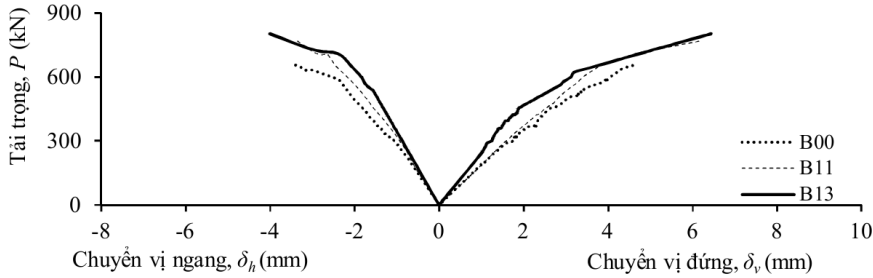
Đối với các mẫu cột được gia cường, kiểu phá hoại của các cột này là cốt dọc vùng nén bị chảy, tấm BFRP bị bong và kéo đứt, bê tông mặt nén bị nén vỡ (Hình 5 – mẫu A11, A13, B11, B13, C11 và C13). Trong các cột này, cốt dọc ở vùng nén bị chảy ở cấp tải bằng 74% đến 87% P_u . Tại cấp tải lớn nhất, P_u , tấm BFRP bó hông bị bong và kéo đứt gần như cùng lúc và liền sau đó là sự phá hoại của bê tông vùng nén khiến cho cột mất khả năng chịu lực. Tại thời điểm các cột này bị phá hoại, cốt dọc trong vùng kéo cũng không bị chảy và không quan sát thấy hiện tượng cong vênh của cốt dọc trong vùng bê tông bị nén vỡ như trong các cột không gia cường. Tấm BFRP dán dọc của các cột này tại mặt kéo vẫn còn nguyên, chỉ bị bong tách cục bộ tại vùng bê tông bị nén vỡ kéo theo lớp bê tông bảo vệ và không bị đứt, gãy.

3.2. Quan hệ lực – chuyển vị

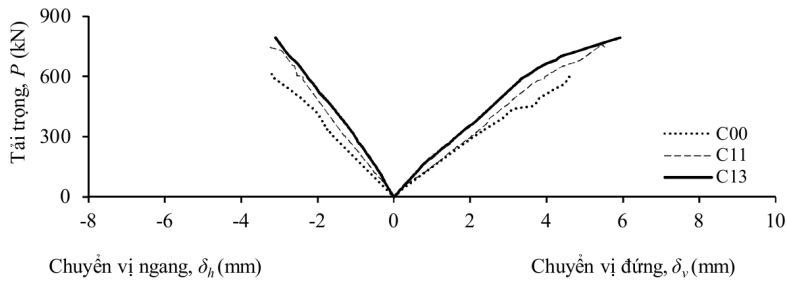
Quan hệ lực – chuyển vị đứng (δ_v) và chuyển vị ngang (δ_h) của các cột được tổng hợp trong Hình 6. Trong giai đoạn đầu, trước cấp tải chuyển tiếp, P_y (định nghĩa như Hình 7 theo [26]), quan hệ giữa lực và chuyển vị đứng và ngang của các cột gần như là tuyến tính. Cấp tải P_y của các cột không gia cường (đối chứng) và của các cột gia cường dao động lần lượt từ 0,71 đến 0,82 P_u và từ 0,78 đến 0,94 P_u (Bảng 3). Chuyển vị (đứng và ngang) của cột gia cường tăng chậm hơn so với của các cột không gia cường (cột đối chứng) và tốc độ gia tăng chuyển vị của các cột bị ăn mòn nhanh hơn so với của các cột không bị ăn mòn tương ứng. Chuyển vị của các cột, đặc biệt là chuyển vị đứng, có sự liên quan mật thiết đến độ cứng ban đầu (K_0) của cột. Hình 8 cho thấy độ cứng ban đầu (K_0) của cột không gia cường bị giảm mạnh theo sự ăn mòn của cốt thép lên đến 29% so với của cột không bị ăn mòn; độ



(a) Nhóm A

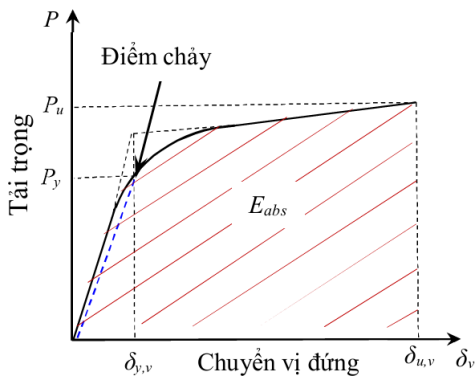


(b) Nhóm B

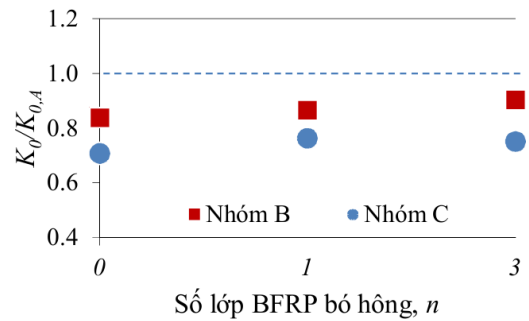


(c) Nhóm C

Hình 6. Quan hệ lực và chuyển vị của các cột thí nghiệm



Hình 7. Xác định cấp tải chuyển tiếp (điểm chảy)



Hình 8. So sánh độ cứng ban đầu của cột nhóm B, C (K_0) với độ cứng ban đầu của cột nhóm A ($K_{0,A}$) tương ứng

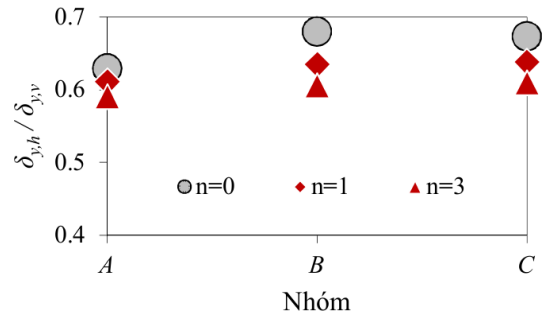
cứng ban đầu (K_0) của cột gia cường cũng có xu hướng giảm nhưng ít hơn so với của cột không gia cường tương ứng. Điều này cho thấy tấm BFRP bó hông nhờ vào khả năng kiểm soát nứt đã ngăn chặn hiệu quả sự suy giảm độ cứng của cột gây nên bởi sự ăn mòn cốt thép, và từ đó giúp hạn chế đáng kể tốc độ gia tăng chuyển vị của các cột.

Trong giai đoạn này, tại cấp tải chuyển tiếp (P_y), chuyển vị đứng của cột ($\delta_{y,v}$) có xu hướng tăng nhanh hơn so với chuyển vị ngang ($\delta_{y,h}$), thể hiện qua tỉ số $\delta_{y,h}/\delta_{y,v}$ của cột đối chứng và cột gia cường lần lượt dao động từ 0,63 đến 0,68 và từ 0,59 đến 0,64, và có xu hướng tăng theo mức độ ăn mòn của cốt thép (Hình 9). Nguyên nhân của xu hướng này có thể là do cốt thép bị ăn mòn ở mức độ lớn khiến cho ứng suất bó hông giảm; các vết nứt xuất hiện sớm hơn, từ đó dẫn tới độ cứng kháng uốn của cột bị suy giảm nhanh hơn so với của các cột đối chứng.

Ở giai đoạn hai, từ cấp tải chuyển tiếp (P_y) đến khi cột bị phá hoại (cấp tải P_u), quan hệ giữa lực và chuyển vị đứng và ngang của các cột trở nên phi tuyến rõ; độ cứng của cột suy giảm nhanh kéo theo sự gia tăng nhanh chóng của chuyển vị dọc trục và chuyển vị ngang. Trong giai đoạn này, tốc độ gia tăng chuyển vị ngang của cột bắt đầu tăng nhanh hơn so với giai đoạn đầu. Mặc dù vậy, ở cấp tải phá hoại, chuyển vị ngang cuối cùng ($\delta_{u,h}$) của cột không gia cường vẫn nhỏ hơn và bằng 69% đến 74% chuyển vị đứng cuối cùng ($\delta_{u,v}$); trong khi $\delta_{u,h}$ của cột gia cường bằng 52% đến 62% $\delta_{u,v}$ (Bảng 3). Kết quả này cho thấy tấm BFRP làm giảm tỉ số giữa chuyển vị ngang trên chuyển vị đứng cuối cùng ($\delta_{u,h}/\delta_{u,v}$) của cột. Ngoài ra, mức độ ăn mòn cốt thép ảnh hưởng không đáng kể đến tỉ số $\delta_{u,h}/\delta_{u,v}$. Bảng 3 cũng cho thấy tấm BFRP bằng hiệu ứng bó hông đã làm gia tăng mạnh chuyển vị đứng cuối cùng ($\delta_{u,v}$) của cột (lên tới 40%) và sự gia tăng này tỉ lệ thuận với số lớp gia cường.

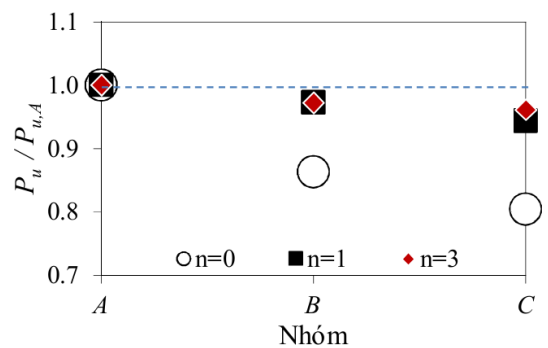
3.3. Hiệu quả gia cường

Cốt thép bị ăn mòn làm suy giảm mạnh khả năng chịu nén lệch tâm của cột không gia cường. Trong khi, tấm BFRP nhờ vào khả năng kiểm soát nứt uốn (của tấm dán dọc) và ứng suất bó hông (được tạo ra bởi tấm bó hông) đã góp phần ngăn chặn hiệu quả sự suy giảm khả năng chịu nén lệch tâm của cột gia cường gây nên bởi sự ăn mòn của cốt thép và giúp cho khả năng chịu lực của cột gia cường chỉ bị suy giảm nhẹ (Hình 10). Đối với cột không gia cường, khả năng chịu lực cột bị ăn mòn cốt thép suy giảm 20% so với của cột không bị ăn mòn. Trong khi, đối với cột gia cường tấm BFRP, sự suy giảm này nằm trong khoảng 3% đến 6%. Kết quả này cho thấy, tấm BFRP góp phần làm giảm mạnh đến 80% ảnh hưởng tiêu cực của ăn mòn cốt thép đến khả năng chịu nén lệch tâm của cột.



Ghi chú: $\delta_{y,h}$ và δ_y lần lượt chuyển vị ngang và chuyển vị đứng tại cấp tải chuyển tiếp P_y

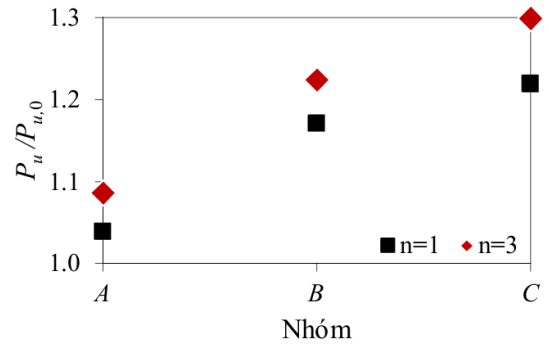
Hình 9. So sánh chuyển vị ngang và chuyển vị đứng tại cấp tải chuyển tiếp (P_y)



Ghi chú: $P_{u,A}$ là tải trọng cực hạn của cột không bị ăn mòn (nhóm A)

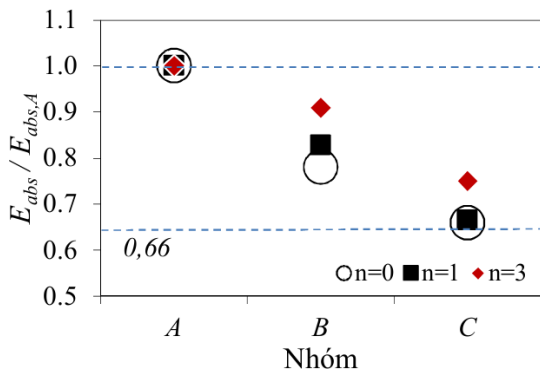
Hình 10. Ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép đến khả năng nén lệch tâm của cột

Kết quả thực nghiệm cũng cho thấy có sự gia tăng đáng kể của khả năng chịu nén lệch tâm của cột gia cường và hiệu quả cao của tấm BFRP trong việc cải thiện khả năng chịu nén lệch tâm của cột có cốt thép chịu lực bị ăn mòn; đặc biệt rất thú vị rằng, hiệu quả gia cường của tấm tăng khi cốt đai bị ăn mòn (Hình 11). Đối với các cột không bị ăn mòn (nhóm A), việc sử dụng một lớp tấm BFRP dán dọc kết hợp với một hoặc ba tấm BFRP bó hông làm tăng khả năng chịu nén lệch tâm của cột là 4% và 9% so với của cột không gia cường. Tuy nhiên, đối với các cột bị ăn mòn cốt thép, hiệu quả gia cường của tấm BFRP có sự gia tăng mạnh hơn so với của cột không bị ăn mòn cốt thép gia cường tương ứng, từ 17% đến 30% (Hình 11). Kết quả này cho thấy có sự gia tăng đáng kể của hiệu quả gia cường tấm BFRP trong việc cải thiện khả năng chịu nén lệch tâm của cột theo sự gia tăng mức độ ăn mòn của cốt thép cột. Thực tế thú vị này có thể được giải thích là do khả năng chịu lực của cột không gia cường (lõi bê tông cốt thép) bị giảm rất nhanh theo sự gia tăng của mức độ ăn mòn cốt thép; trong khi, khả năng chịu lực của cột gia cường cũng giảm theo sự ăn mòn của cốt thép trong cột nhưng chậm hơn (Hình 10) do phần đóng góp của tấm BFRP gần như không bị ảnh hưởng bởi sự ăn mòn của cốt thép và tấm BFRP còn góp phần làm giảm tốc độ suy giảm khả năng chịu lực của lõi bê tông cốt thép. Điều này khiến cho tỉ số giữa khả năng chịu lực của cột gia cường và của cột không gia cường tương ứng ($P_u/P_{u,0}$) tăng theo mức độ ăn mòn của cốt thép; nói cách khác, hiệu quả cải thiện khả năng kháng nén – lệch tâm của tấm BFRP cho cột tăng theo mức độ ăn mòn của cốt thép như đã nêu trên.



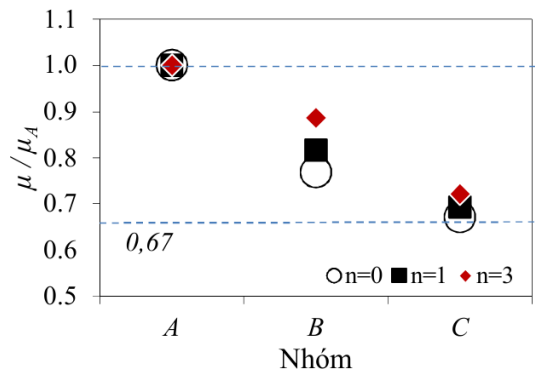
Ghi chú: $P_{u,0}$ và P_u lần lượt là tải trọng cực hạn của cột không gia cường và của cột gia cường

Hình 11. Ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép đến hiệu quả gia cường của tấm BFRP trong việc cải thiện khả năng chịu nén lệch tâm của cột



Ghi chú: $E_{abs,A}$ là khả năng hấp thụ năng lượng của cột nhóm A

Hình 12. Ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép đến khả năng hấp thụ năng lượng của cột



Ghi chú: μ_A là độ dẻo dai của cột nhóm A

Hình 13. Ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép đến độ dẻo dai của cột

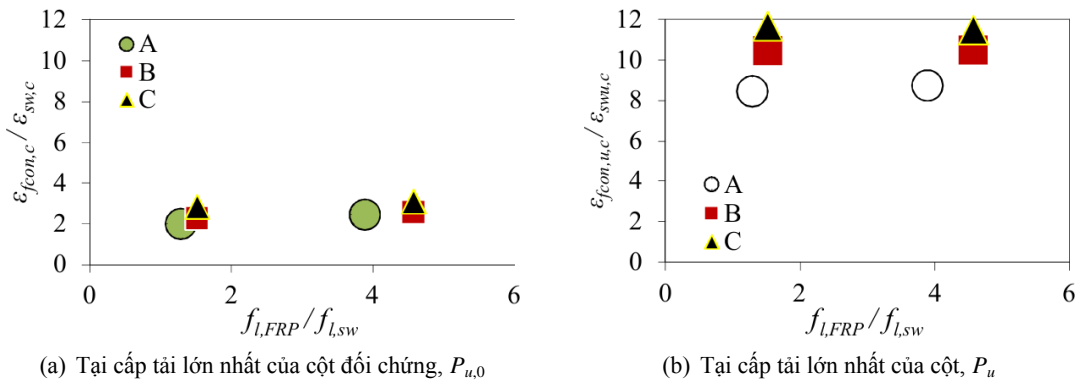
Cốt thép bị ăn mòn làm suy giảm mạnh khả năng hấp thụ năng lượng của cột không gia cường lên đến 34%; và cột gia cường một lớp BFRP cũng suy giảm khả năng này xấp xỉ 34%; trong khi cột gia cường ba lớp BFRP chỉ suy giảm tối đa 25%. Nguyên nhân là do ba lớp tấm BFRP có ứng suất

bó hông (f_l) lớn hơn ứng suất bó hông của cốt thép đai ($f_{l,sw}$) đến 3,9 lần, nên đã góp phần ngăn chặn hiệu quả sự suy giảm này (Hình 12). Hình 12 cho thấy sự suy giảm khả năng hấp thụ năng lượng của cột tỷ lệ thuận với ăn mòn cốt thép, và tỷ lệ nghịch với số lớp gia cường. Kết quả này còn cho thấy, sự ăn mòn kết hợp giữa cốt đai và cốt dọc gây nên sự suy giảm khả năng hấp thụ năng lượng đáng kể hơn cho cột chịu nén lệch tâm, đặc biệt với trường hợp cốt dọc kết hợp cốt đai bị ăn mòn (nhóm C) so với khi chỉ có cốt đai ăn mòn (nhóm B).

Cốt thép bị ăn mòn làm suy giảm mạnh độ dẻo dai của cột không gia cường lên đến 33%; và cột gia cường một lớp BFRP cũng suy giảm khả năng này xấp xỉ 31%; trong khi cột gia cường ba lớp BFRP chỉ suy giảm tối đa 28%. Nguyên nhân, một lần nữa là do ba lớp tấm BFRP có ứng suất bó hông lớn, nên đã góp phần ngăn chặn hiệu quả sự suy giảm này (Hình 13). Hình 13 cho thấy sự suy giảm độ dẻo dai của cột tỷ lệ thuận với ăn mòn cốt thép và tỷ lệ nghịch với số lớp gia cường. Kết quả này còn cho thấy, sự ăn mòn kết hợp giữa cốt đai và cốt dọc gây nên sự suy giảm độ dẻo dai đáng kể hơn cho cột chịu nén lệch tâm, đặc biệt với trường hợp cốt dọc kết hợp cốt đai bị ăn mòn (nhóm C) so với khi chỉ có cốt đai ăn mòn (nhóm B).

3.4. Biến dạng của tấm BFRP bó hông và cốt đai

Theo Bảng 3, biến dạng của cốt thép nhỏ và chưa đạt tới giá trị chảy ($\epsilon_{yw} = 1,95‰$); trong khi, Hình 14 biến dạng của tấm BFRP bó hông vượt trội rất rõ cả về tốc độ gia tăng và giá trị so với biến dạng của cốt thép. Kết quả thực nghiệm cho thấy biến dạng của cả cốt thép và tấm BFRP bó hông ở các mặt khác nhau của cột rất không đều và có sự chênh lệch lớn. Ăn mòn cốt thép và ứng suất bó hông tương đối của tấm BFRP ($f_{l,FRP}/f_{l,sw}$) ảnh hưởng đáng kể đến biến dạng của tấm. Nhìn chung, quan hệ lực – biến dạng của tấm BFRP có thể chia thành hai giai đoạn tương tự quan hệ lực – chuyển vị của cột.

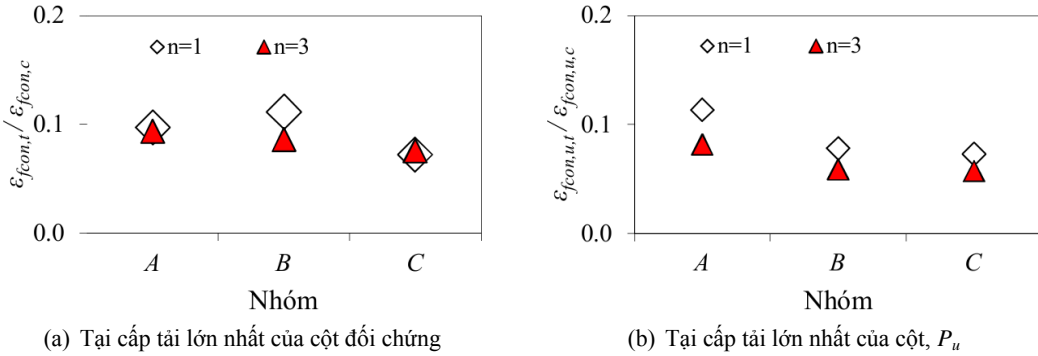


Ghi chú: $\epsilon_{fcon,c}$ và $\epsilon_{sw,c}$ lần lượt biến dạng của tấm bó hông và cốt đai tại mặt nén lớn ở cấp tải lớn nhất của cột đối chứng, $P_{u,0}$; $\epsilon_{fcon,u,c}$ và $\epsilon_{sw,u,c}$ lần lượt biến dạng của tấm bó hông và cốt đai tại mặt nén lớn ở cấp tải lớn nhất của cột, P_u ; $f_{l,FRP}$ và $f_{l,sw}$ lần lượt ứng suất bó hông của tấm BFRP và cốt đai

Hình 14. So sánh biến dạng lớn nhất của tấm bó hông và cốt đai

Ở giai đoạn đầu (từ cấp tải 0 đến cấp tải P_y), biến dạng của cả cốt thép và của tấm BFRP gia cường bó hông đều tăng chậm. Tuy nhiên, nhờ có ứng suất bó hông lớn hơn [$f_{l,FRP} = (1,3 \sim 3,9)f_{l,sw}$, với $f_{l,FRP}$ và $f_{l,sw}$ lần lượt là ứng suất bó hông của tấm BFRP và của cốt thép], tấm BFRP có xu hướng tiếp nhận tải trọng nén lệch tâm sớm và đáng kể hơn so với cốt thép, làm cho tốc độ biến dạng của tấm nhanh hơn so với cốt thép. Cụ thể, tại cấp tải phá hoại của cột đối chứng ($P_{u,0}$), biến dạng tấm

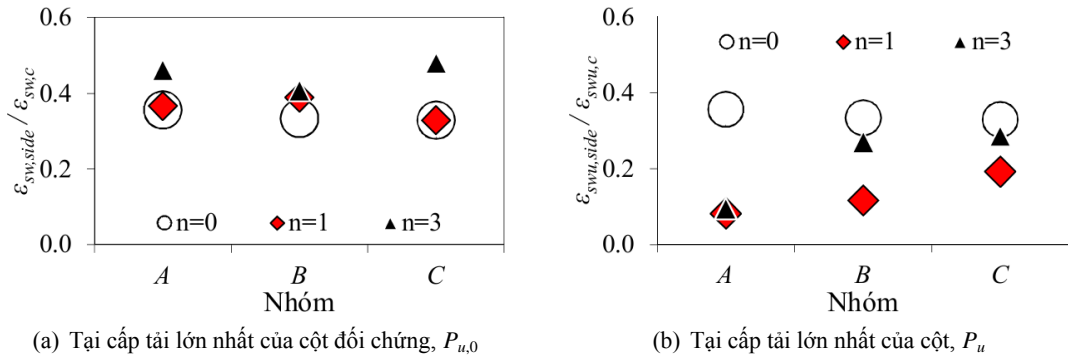
lớn hơn so với của cốt thép từ 2,0 đến 2,5 lần cho cột không ăn mòn (cột nhóm A), từ 2,3 đến 3,1 lần cho cột bị ăn mòn cốt thép (nhóm B, C) (Hình 14(a)). Kết quả này cho thấy cốt thép bị ăn mòn làm sự chênh lệch biến dạng giữa tấm BFRP bó hông và cốt thép càng lớn.



Ghi chú: $\epsilon_{fcon,t}$ và $\epsilon_{fcon,c}$ lần lượt biến dạng của tấm bó hông ở mặt nén bé và mặt nén lớn tại cấp tải lớn nhất của cột đối chứng, $P_{u,0}$; $\epsilon_{fcon,u,t}$ và $\epsilon_{fcon,u,c}$ lần lượt biến dạng lớn nhất của tấm bó hông tại mặt nén bé và mặt nén lớn của cột

Hình 15. So sánh biến dạng của tấm bó hông tại mặt nén ít (hoặc kéo) và tại mặt nén lớn của cột

Trong giai đoạn này, sự biến dạng không đều của tấm BFRP bó hông và cả cốt thép đã bắt đầu xuất hiện. Biến dạng của tấm và của cốt thép ở mặt nén lớn của cột lớn hơn đáng kể so với của các mặt khác của cột (mặt nén bé hoặc mặt kéo và mặt bên). Nguyên nhân là do lực nén lệch tâm làm gia tăng độ lớn của mô-men uốn tác dụng lên cột khiến ứng suất nén phân bố không đều trên mặt cột. Mặt chịu nén lớn bị phình nhiều hơn so với các mặt chịu nén ít hơn, làm cho tấm và cốt thép ở khu vực này biến dạng nhiều hơn. Cụ thể, tại cấp tải phá hoại của cột đối chứng ($P_{u,0}$), biến dạng tấm BFRP bó hông ở mặt kéo từ 0,07 đến 0,11 lần so với biến dạng tấm ở mặt nén của cột (Hình 15(a)). Đối với cốt thép, cũng tại cấp tải phá hoại của cột đối chứng ($P_{u,0}$), biến dạng cốt thép ở mặt kéo của cột nhỏ hơn từ 0,33 đến 0,48 lần so với biến dạng tấm ở mặt nén của cột (Hình 16(a)). Ăn mòn của cốt thép trong cột ảnh hưởng không rõ ràng đến sự phân bố biến dạng của tấm và cốt thép.

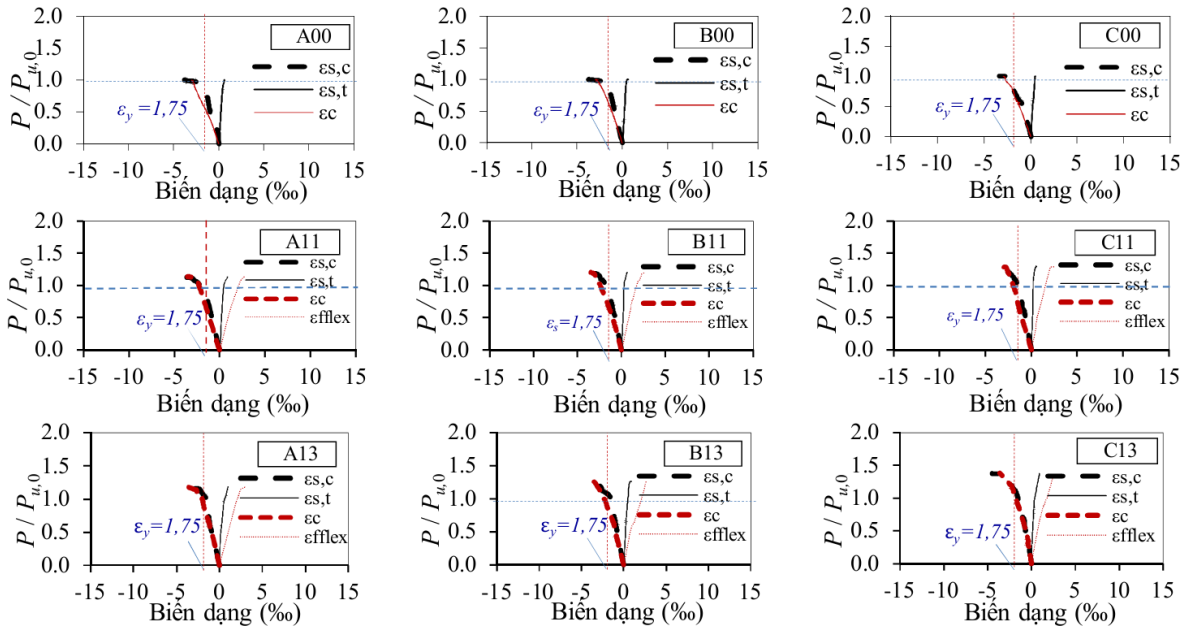


Ghi chú: $\epsilon_{sw,side}$ và $\epsilon_{sw,c}$ lần lượt biến dạng của cốt đai tại mặt bên và mặt nén của cột tại cấp tải lớn nhất của cột đối chứng; $\epsilon_{swu,side}$ và $\epsilon_{swu,c}$ lần lượt biến dạng lớn nhất của cốt đai tại mặt bên và mặt nén của cột

Hình 16. So sánh biến dạng của cốt đai tại mặt bên với biến dạng của cốt đai tại mặt nén

3.5. Biến dạng của tấm BFRP dán dọc và cốt dọc

Quan hệ lực – biến dạng của cốt dọc và tấm dán dọc ở mặt chịu kéo, và của bê tông ở mặt chịu nén lớn được thể hiện trên Hình 17. Lực nén lệch tâm làm cho tiết diện cột được chia thành hai vùng nén và kéo rõ rệt, tuy nhiên ứng xử nén vẫn là chủ đạo. Tại cấp tải lớn nhất, biến dạng của cốt dọc chịu kéo chưa chảy nhưng biến dạng của cốt dọc chịu nén đã chảy ở mức độ lớn (Bảng 3). Ăn mòn của cốt thép ít ảnh hưởng đến biến dạng cuối cùng của cốt dọc chịu nén, chỉ giảm 11% cho cột không gia cường và 6% cho cột gia cường (Bảng 3). Tấm BFRP làm gia tăng biến dạng cuối cùng của cốt dọc chịu nén từ 17% đến 33% (Bảng 3).



Ghi chú: $\varepsilon_{s,c}$ và $\varepsilon_{s,t}$ lần lượt là biến dạng của cốt thép dọc ở mặt chịu nén lớn và chịu kéo; ε_c và ε_{flex} lần lượt là biến dạng nén của bê tông và biến dạng kéo của tấm dán dọc

Hình 17. Quan hệ lực – biến dạng của cốt thép dọc, bê tông và tấm dán dọc của các cột

Quan hệ giữa lực – biến dạng kéo của tấm BFRP dán dọc được thể hiện ở Hình 17. Ứng xử kéo của cột thể hiện rõ nét và tấm BFRP dán dọc ở mặt kéo làm việc nhiều hơn; biến dạng cuối cùng của chúng tăng mạnh, đặc biệt ở các cấp tải cận với tải phá hủy cột do sự suy giảm độ cứng đột ngột của cột, dao động từ 2,8‰ đến 3,0‰, tương ứng từ 13% đến 13% biến dạng kéo đứt của tấm BFRP (Bảng 3).

3.6. Biến dạng bê tông

Quan hệ giữa lực – biến dạng của bê tông được thể hiện ở Hình 17. Biến dạng của bê tông trong tất cả các mẫu nằm trong khoảng 2,9‰ đến 3,7‰. Biến dạng của bê tông tăng nhẹ khi tăng số lớp gia cường hay ứng suất bó hông tăng. Cụ thể, khi tăng từ 1 lên 3 lớp BFRP bó hông, biến dạng của bê tông tăng từ 4 đến 6% (Bảng 3). Ăn mòn cốt thép làm cho biến dạng của bê tông giảm nhẹ từ 2 đến 8%. Nguyên nhân, một lần nữa có thể là do sự ăn mòn của cốt thép làm suy yếu khả năng bó hông của tấm BFRP; trong khi, sự ăn mòn của cốt dọc làm giảm khả năng bám dính, có thể dẫn đến sự bong tách sớm hơn của lớp bê tông bảo vệ cột; từ đó dẫn đến cột mất khả năng chịu lực ở biến dạng cuối cùng của bê tông nhỏ hơn.

Kết luận

Bài báo trình bày nghiên cứu thực nghiệm trên chín mẫu cột BTCT kích thước 200×200×800 (mm) về ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép đến hiệu quả gia cường của tấm BFRP bó hông đối với cột chịu nén lệch tâm. Thông số khảo sát bao gồm ba mức độ ăn mòn cốt thép tương đương với ba nhóm (nhóm A – cốt thép và cốt dọc không bị ăn mòn; nhóm B – cốt thép bị ăn mòn 15% và cốt dọc không bị ăn mòn; và nhóm C – cốt thép và cốt dọc cùng bị ăn mòn 15%), và số lớp tấm BFRP gia cường bó hông (một lớp và ba lớp bó hông). Dựa trên kết quả đạt được từ nghiên cứu này, một số kết luận có thể được rút ra như sau:

- Hiệu quả gia cường tấm BFRP trong việc cải thiện khả năng chịu nén lệch tâm của cột có cốt thép bị ăn mòn là rất đáng kể (lên đến 30%) cho cột có cốt thép bị ăn mòn;
- Cốt thép bị ăn mòn làm suy giảm khả năng chịu nén lệch tâm của cột không gia cường đến 20%; trong khi, tấm BFRP nhờ vào khả năng kiểm soát nứt uốn của tấm dán dọc và ứng suất bó hông được tạo ra bởi tấm quấn ngang đã góp phần ngăn chặn đến 80% sự suy giảm khả năng chịu nén lệch tâm của cột gia cường gây nên bởi sự ăn mòn của cốt thép. Đồng thời tấm BFRP giúp gia tăng mạnh khả năng biến dạng (chuyển vị cuối cùng) của cột (lên tới 40%);
- Ăn mòn của cốt thép làm giảm hiệu quả của tấm BFRP trong việc cải thiện mức độ hấp thụ năng lượng (lên đến 34%) và độ dẻo dai của cột (đến 31%) cũng như làm giảm biến dạng cuối cùng của tấm BFRP (16% cho cột bị ăn mòn).

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số B2020-20-02.

Tài liệu tham khảo

- [1] Ilki, A., Peker, O., Karamuk, E., Demir, C., Kumbasar, N. (2008). [FRP Retrofit of Low and Medium Strength Circular and Rectangular Reinforced Concrete Columns](#). *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(2):169–188.
- [2] Lee, J.-Y., Yi, C.-K., Jeong, H.-S., Kim, S.-W., Kim, J.-K. (2009). [Compressive Response of Concrete Confined with Steel Spirals and FRP Composites](#). *Journal of Composite Materials*, 44(4):481–504.
- [3] Abdelrahman, K., El-Hacha, R. (2012). [Behavior of Large-Scale Concrete Columns Wrapped with CFRP and SFRP Sheets](#). *Journal of Composites for Construction*, 16(4):430–439.
- [4] Nanni, A., Bradford, N. M. (1995). [FRP jacketed concrete under uniaxial compression](#). *Construction and Building Materials*, 9(2):115–124.
- [5] Khuong, L. (2017). Modelling of CFRP strengthening on the behavior of RC slender columns. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 11(6):70–76.
- [6] Chaallal, O., Shahawy, M. (2000). [Performance of Fiber-Reinforced Polymer-Wrapped Reinforced Concrete Column under Combined Axial-Flexural Loading](#). *ACI Structural Journal*, 97(4):659–668.
- [7] Sause, R., Harries, K. A., Walkup, S. L., Pessiki, S., Ricles, J. M. (2004). [Flexural Behavior of Concrete Columns Retrofitted with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Jackets](#). *ACI Structural Journal*, 101(5): 708–716.
- [8] Nguyen, T. H., Pham, X. D., Tran, K. D. (2021). [Experimental study on the behavior of eccentrically compressed reinforced concrete columns strengthened with CFRP composite sheets](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 15(4):172–181.
- [9] Sun, L., Wei, M., Zhang, N. (2017). [Experimental study on the behavior of GFRP reinforced concrete columns under eccentric axial load](#). *Construction and Building Materials*, 152:214–225.

- [10] Jaya, K. P., Mathai, J. (2012). *Strengthening of RC Column using GFRP and CFRP*. 15 WCEE Lisboa 2012.
- [11] Balakrishnan, P., John, M. J., Pothan, L., Sreekala, M. S., Thomas, S. (2016). [Natural fibre and polymer matrix composites and their applications in aerospace engineering](#). *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*, Elsevier, 365–383.
- [12] Verma, D., Goh, K. L. (2019). [Natural fiber-reinforced polymer composites](#). *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy*, Elsevier, 51–73.
- [13] Mote, A. P., Jadhav, H. S. (2014). Experimental Study of Axially Loaded RC Short Columns Strengthened With Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP) Sheets. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4(7):89–92.
- [14] Jiang, S.-F., Zeng, X., Shen, S., Xu, X. (2016). [Experimental studies on the seismic behavior of earthquake-damaged circular bridge columns repaired by using combination of near-surface-mounted BFRP bars with external BFRP sheets jacketing](#). *Engineering Structures*, 106:317–331.
- [15] Yao, L.-Z., Wu, G. (2016). [Fiber-Element Modeling for Seismic Performance of Square RC Bridge Columns Retrofitted with NSM BFRP Bars and/or BFRP Sheet Confinement](#). *Journal of Composites for Construction*, 20(4).
- [16] Ouyang, L.-J., Gao, W.-Y., Zhen, B., Lu, Z.-D. (2017). [Seismic retrofit of square reinforced concrete columns using basalt and carbon fiber-reinforced polymer sheets: A comparative study](#). *Composite Structures*, 162:294–307.
- [17] Andisheh, K. (2017). *Seismic performance of corroded reinforced concrete bridge piers*. Doctoral Dissertations. Department of Civil and Natural Resources Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- [18] Maaddawy, T. E. (2008). [Behavior of corrosion-damaged RC columns wrapped with FRP under combined flexural and axial loading](#). *Cement and Concrete Composites*, 30(6):524–534.
- [19] Chotickai, P., Tongya, P., Jantharaksa, S. (2021). [Performance of corroded rectangular RC columns strengthened with CFRP composite under eccentric loading](#). *Construction and Building Materials*, 268: 121134.
- [20] Yuan, J., Shen, D. (2022). [Seismic Performance of Corroded Reinforced Concrete Columns Strengthened with Basalt Fiber Sheets](#). *Applied Sciences*, 12(11):5611.
- [21] TCVN 10303:2014. *Bê tông - kiểm tra và đánh giá cường độ chịu nén*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [22] TCVN 8862:2011. *Quy trình thí nghiệm xác định cường độ kéo khi ép chế của vật liệu hạt liên kết bằng các chất kết dính*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [23] TCVN 197-1:2014. *Vật liệu kim loại - Thử kéo - Phần 1: Phương pháp thử ở nhiệt độ phòng*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [24] Chung, L., Kim, J.-H. J., Yi, S.-T. (2008). [Bond strength prediction for reinforced concrete members with highly corroded reinforcing bars](#). *Cement and Concrete Composites*, 30(7):603–611.
- [25] Ali, T. K. M. (2014). Flexural behavior of reinforced beams reinforced with corrosive rebar. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 5(1):64.
- [26] Ngo, T. T., Pham, T. M., Hao, H. (2020). [Effects of steel fibres and prestress levels on behaviour of newly proposed exterior dry joints using SFRC and CFRP bolts](#). *Engineering Structures*, 205:110083.