

ỨNG XỬ NÉN LỆCH TÂM CỦA CỘT BÊ TÔNG CỐT THÉP BỊ ĂN MÒN ĐƯỢC GIA CƯỜNG BẰNG TẤM SỢI CÁC-BON

Huỳnh Xuân Tín^a, Đỗ Đại Thắng^b, Nguyễn Minh Long^{c,d,*}

^aPhân hiệu tại Thành phố 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

^bTrung tâm Giáo dục Quốc phòng và An ninh, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh,
01 đường Lê Quý Đôn, Khu đô thị Đại học Quốc gia TP. HCM, TP. Dĩ An, tỉnh Bình Dương, Việt Nam

^cKhoa 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

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

Nhận ngày 09/9/2022, Sửa xong 21/11/2022, Chấp nhận đăng 24/11/2022

Tóm tắt

Bài báo nghiên cứu thực nghiệm ứng xử nén lệch tâm của cột bê tông cốt thép (BTCT) gia cường bằng tấm sợi các-bon (CFRP). Chương trình thực nghiệm được tiến hành trên hai mươi bốn cột BTCT kích thước cỡ trung ($200 \times 200 \times 800$ mm) gia cường bó hông bằng tấm sợi các bon (CFRP). Thông số khảo sát bao gồm bốn mức độ ăn mòn cốt thép (cốt dọc và cốt đai không bị ăn mòn, cốt dọc không bị ăn mòn và cốt đai bị ăn mòn 15%, cốt dọc và cốt đai cùng bị ăn mòn 15%, và cốt dọc bị ăn mòn 30% và cốt đai bị ăn mòn 15%), độ lệch tâm tương đối (0,125 và 0,375) và số lớp CFRP gia cường (một và ba lớp). Kết quả thực nghiệm cho thấy tấm CFRP giúp ngăn chặn một cách hiệu quả sự suy giảm khả năng chịu nén lệch tâm của cột bởi tác động tiêu cực của việc ăn mòn cốt thép và cải thiện rõ rệt khả năng chịu nén lệch tâm của cột (lên đến 47%); hiệu quả gia cường của tấm CFRP có xu hướng tỉ lệ thuận với mức độ ăn mòn của cốt thép. Sự ăn mòn cốt thép làm giảm mạnh hiệu quả của tấm CFRP trong việc cải thiện mức độ hấp thụ năng lượng và độ dẻo dai của cột cũng như làm giảm đáng kể biến dạng cuối cùng của tấm CFRP. Hiệu quả gia cường bó hông của tấm CFRP bị suy giảm theo sự gia tăng của độ lệch tâm.

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

EXPERIMENTAL BEHAVIOR OF CORRODED REINFORCED CONCRETE COLUMNS STRENGTHENED BY CFRP SHEETS UNDER ECCENTRIC-COMPRESSIVE LOADS

Abstract

The paper deals with experimental behavior of corroded reinforced concrete (RC) columns strengthened by CFRP sheets under eccentric-compressive loads. The experiment program consists of twenty-four mid-scale rectangular RC columns ($200 \times 200 \times 800$ mm) strengthening by CFRP sheets. The investigated variables include four levels of reinforcement corrosion by mass (no corrosion, stirrup corrosion of 15%, both stirrup and longitudinal reinforcement corrosion of 15%, and stirrup corrosion of 15% and longitudinal reinforcement corrosion of 30%), relative eccentricity (0.125 and 0.375), and layer number of CFRP sheets (one and three layers). The results reveal that CFRP sheets effectively prevent reduction of eccentric-compressive capacity of the corroded RC columns and significantly improve their eccentric-compressive capacity (up to 47%) in comparison with those of control RC ones; the strengthening effectiveness of the CFRP sheets tends to be proportional with the level of reinforcement corrosion. Reinforcement corrosion also causes considerable reduction of energy absorption capacity and ductility of the columns as well as the decrease of CFRP rupture strain. The strengthening effectiveness of CFRP sheets decreases as relative eccentricity increases.

Keywords: RC columns; reinforcement corrosion; eccentric-compressive loading; strengthening effectiveness.

[https://doi.org/10.31814/stce.huice\(nuce\)2023-17\(1V\)-03](https://doi.org/10.31814/stce.huice(nuce)2023-17(1V)-03) © 2023 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

Tại Việt Nam, hầu hết các công trình bê tông cốt thép (BTCT) xây dựng trong môi trường biển đều bị xuống cấp nghiêm trọng sau thời gian sử dụng từ 10 đến 30 năm do sự ăn mòn của cốt thép bởi nồng độ muối lớn trong không khí và nước biển [1]. Trong kết cấu công trình, cột là một trong những dạng cấu kiện chịu lực rất nhạy cảm với vấn đề ăn mòn cốt thép do chúng thường tiếp xúc trực tiếp với các yếu tố có hại từ môi trường xung quanh như độ ẩm, nước, hay ion clo có trong nước mặn. Không giống như các nghiên cứu về hiệu quả gia cường của tấm CFRP đối với cột BTCT không bị ăn mòn, với số lượng nghiên cứu tương đối nhiều và sự hiểu biết về ứng xử cũng như hiệu quả gia cường của tấm CFRP bó hông đã được tương đối rõ [2–11], các nghiên cứu về cột BTCT có cốt thép bị ăn mòn gia cường bó hông bằng tấm FRP chịu nén lệch tâm có số lượng còn rất hạn chế; vì vậy, hiểu biết về các đặc tính kết cấu của cột bị ăn mòn gia cường bó hông bằng tấm CFRP chịu nén lệch tâm vẫn chưa được làm rõ và mang tính hệ thống. Cho đến thời điểm hiện tại, các nghiên cứu về ứng xử của cột BTCT bị ăn mòn được gia cường bó hông bằng tấm CFRP chịu nén lệch tâm, theo hình thức gia tải, có thể chia làm hai nhóm chính: (1) cột chịu nén đúng tâm kết hợp với tải trọng ngang theo chu kỳ như [12–14]; và (2) cột chịu nén lệch tâm tăng dần cho đến khi cột bị phá hoại như [15, 16].

Ở nhóm 1, các nghiên cứu của [12–14] sử dụng mức độ ăn mòn cốt thép dọc và/hoặc cốt thép đai từ 6 đến 19% tính theo khối lượng, tấm CFRP hoặc GFRP, cường độ bê tông từ 18 đến 38 MPa, và cột tiết diện vuông (300×300 mm) và chữ nhật (250×500 mm). Các nghiên cứu này cho thấy sự ăn mòn của cốt thép làm giảm hiệu quả bó hông của tấm FRP. Ở nhóm 2, [15] nghiên cứu trên 16 cột BTCT tiết diện vuông có kích thước mẫu $250 \times 250 \times 1200$ mm và cường độ chịu nén của bê tông bằng 28,5 MPa. Mức độ ăn mòn của lồng thép (bao gồm cốt dọc và cốt đai) là 4,25%. Cấu hình gia cường tấm CFRP của cột là một lớp bó hông liên tục và một lớp bó hông cách quãng. Tỷ số độ lệch tâm tương đối e/h lần lượt là 0,3, 0,43, 0,57, và 0,86. Kết quả cho thấy khả năng chịu lực của cột tỷ lệ nghịch với độ lệch tâm. Tương tự, [16] khảo sát thực nghiệm 12 cột BTCT tiết diện vuông có kích thước $125 \times 125 \times 1375$ mm và cường độ bê tông chịu nén của bê tông bằng 17,7 MPa. Mức độ ăn mòn của lồng thép lần lượt là 0%, 10% và 20%. Số lớp tấm CFRP gia cường là một lớp và hai lớp. Tất cả các mẫu được tiến hành nén với độ lệch tâm tương đối $e/h = 1$. Kết quả cho thấy ăn mòn cốt thép làm giảm hiệu quả bó hông của tấm CFRP.

Nhìn chung, các nghiên cứu này cho thấy hiệu quả bó hông của tấm FRP giảm theo sự gia tăng của mức độ ăn mòn cốt thép; tuy nhiên chưa có nghiên cứu nào lượng hóa mức độ giảm biến dạng có hiệu của tấm FRP, cũng như chưa làm rõ mức độ giảm hiệu quả của tấm FRP trong việc cải thiện mức độ hấp thụ năng lượng và độ dẻo dai của cột. Do đó cần có một nghiên cứu ghi nhận đầy đủ biến dạng tấm FRP gia cường cũng như chuyển vị của cột ứng với các mức độ ăn mòn cốt thép khác nhau của cột chịu nén lệch tâm để làm sáng tỏ vấn đề này. Bài báo này trình bày một nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép đến hiệu quả gia cường của tấm CFRP bó hông đối với cột BTCT chịu nén lệch tâm. Chương trình thực nghiệm được tiến hành trên hai mươi bốn cột BTCT kích thước $200 \times 200 \times 800$ mm. Thông số khảo sát bao gồm bốn mức độ ăn mòn cốt thép (nhóm A, B, C và D), độ lệch tâm tương đối ($e/h = 0,125$ và $0,375$) và số lớp gia cường bó hông (một và ba lớp).

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 1×2 (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 dọc trục, $f_{c,cube}$, và kéo chế, $f_{sp,cube}$, thực

Bảng 2. Cách đặt tên và mô tả các mẫu

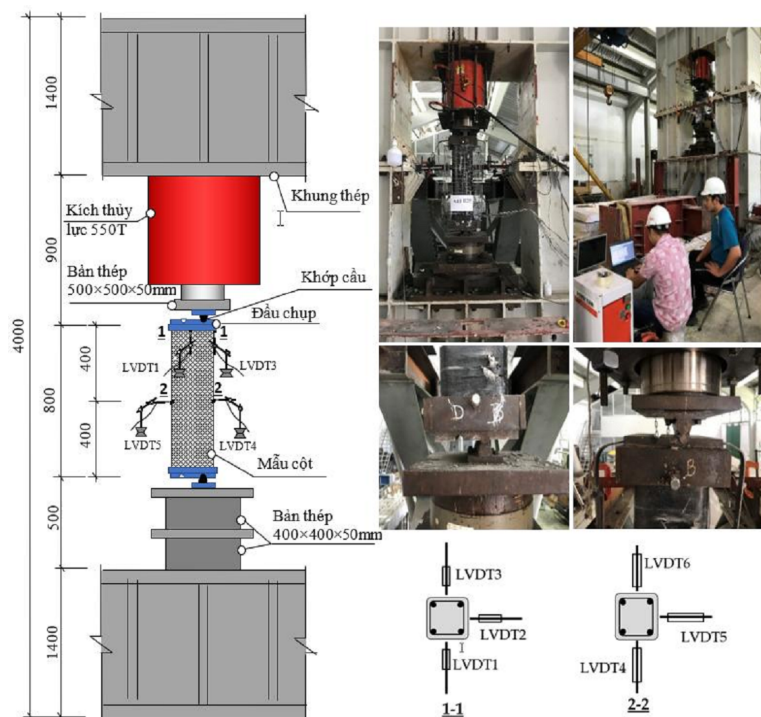
TT	Tên mẫu	Nhóm	Số lớp CFRP		Độ lệch tâm (mm)	TT	Tên mẫu	Nhóm	Số lớp CFRP		Độ lệch tâm (mm)
			Dán dọc	Bó hông					Dán dọc	Bó hông	
1	A00-25	A	0	0	25	11	C00-25	C	0	0	25
2	A11C25		1	1	25	12	C11C25		1	1	25
3	A13C25		1	3	25	13	C13C25		1	3	25
4	A00-75		0	0	75	14	C00-75		0	0	75
5	A11C75		1	1	75	15	C11C75		1	1	75
6	A13C75		1	3	75	16	C13C75		1	3	75
7	B00-25	B	0	0	25	17	D00-25	D	0	0	25
8	B11C25		1	1	25	18	D11C25		1	1	25
9	B13C25		1	3	25	19	D13C25		1	3	25
10	B00-75		0	0	75	20	D00-75		0	0	75
11	B11C75		1	1	75	21	D11C75		1	1	75
12	B13C75		1	3	75	22	D13C75		1	3	75

2.3. Quy trình tạo ăn mòn

Nghiên cứu này hướng đến việc khảo sát ứng xử của cột BTCT có cốt thép bị ăn mòn ở mức độ đồng đều nhất có thể và phương pháp tạo ăn mòn cốt thép và không tẩy gỉ trước khi đúc mẫu [20, 21] được sử dụng. Cốt chịu lực (cốt dọc và đai) được tạo ăn mòn bằng cách đặt vào một bồn chứa dung dịch axit sulfuric (H_2SO_4) nồng độ 45%. Mức độ ăn mòn của cốt thép được kiểm tra hàng tuần thông qua các mẫu thép đại 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 đại 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 đại 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.

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

Tất cả các cột được thí nghiệm nén lệch tâm thể hiện ở Hình 2. Chuyển vị của cột được xác định dựa trên sáu chuyển vị kế điện tử (LVDTs), trong đó ba LVDTs đo chuyển vị đứng và ba LVDTs đo chuyển vị ngang. Biến dạng của bê tông được xác định bằng ba cảm biến ở vị trí 1/2 và 1/4 chiều cao cột. Biến dạng của thép dọc được đo bằng ba cảm biến khác ở vị trí 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 CFRP được đo với bốn cảm biến tại hai mặt cắt cột. 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 đạc được thể hiện trên Hình 2 và 3.



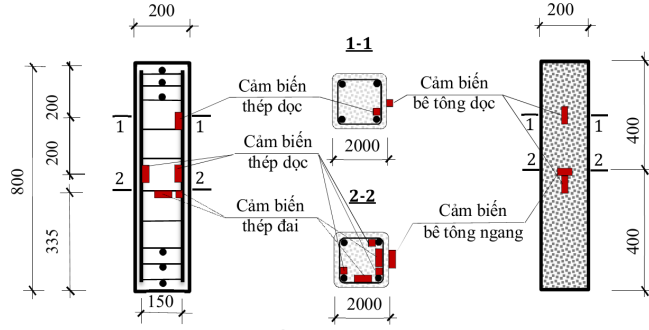
Hình 2. Sơ đồ thí nghiệm và chi tiết bố trí thiết bị đo đặc cho cột

3. Kết quả thí nghiệm và thảo luận

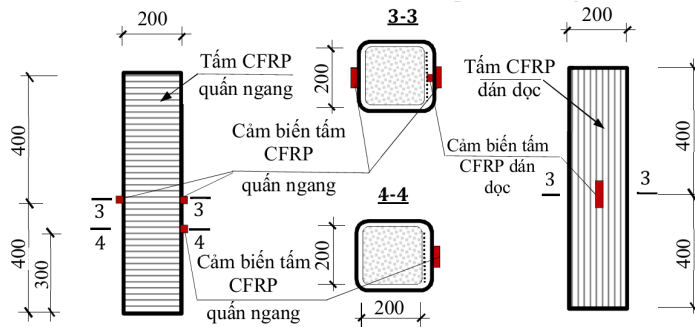
3.1. Kiểu phá hoại của cột thí nghiệm

Kết quả thí nghiệm được tổng hợp trong Bảng 3 và kiểu phá hoại của các cột điển hình được thể hiện trên Hình 4. Các mẫu cột không gia cường tấm FRP 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 4(a)); 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 $59\%P_u$ 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 đai hầu như còn nguyên vẹn, cho thấy chúng vẫn chưa làm việc nhiều. Vùng bê tông phá hoại ở giữa mặt nén của các mẫu có độ lệch tâm tương đối $e/h = 0,125$ có xu hướng lớn hơn so với của các mẫu có độ lệch tâm $e/h = 0,375$ (Hình 4(a)). Thực tế này phản ánh hợp lý ứng xử phá hoại của cột chịu nén có độ lệch tâm nhỏ; trường hợp mà phần lớn tiết diện cột đều chịu nén và khi đạt tới trạng thái phá hoại, bê tông bị nén vỡ đồng thời trên một vùng rộng. Mức độ ăn mòn và cấu hình ăn mòn ảnh hưởng không rõ ràng tới kiểu phá hoại của các mẫu không gia cường.

Đối với các mẫu cột được gia cường bằng một lớp CFRP dán dọc và một lớp bó hông, kiểu phá hoại của các cột này là cốt dọc vùng nén bị chảy, tấm CFRP bị bong và kéo đứt, bê tông mặt nén bị nén vỡ (Hình 4(b)). Trong các cột này, cốt dọc ở vùng nén bị chảy ở cấp tải bằng 62% đến $83\%P_u$. Tại cấp tải lớn nhất, P_u , tấm CFRP 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 CFRP dán dọc của các

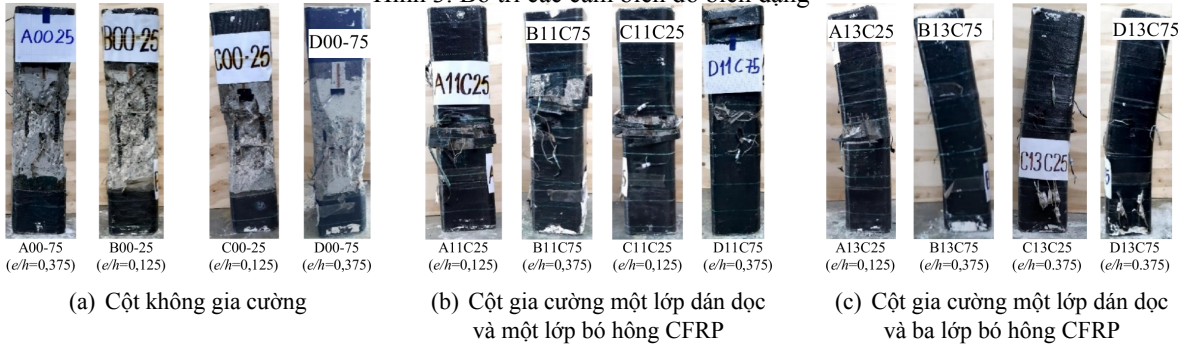


(a) Cảm biến cho thép và bê tông



(b) Cảm biến cho tấm CFRP

Hình 3. Bố trí các cảm biến đo biến dạng



(a) Cột không gia cường

(b) Cột gia cường một lớp dán dọc và một lớp bó hông CFRP

(c) Cột gia cường một lớp dán dọc và ba lớp bó hông CFRP

Hình 4. Kiểu phá hoại điển hình của các cột thí nghiệm

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 mà không bị đứt, gãy.

Kiểu phá hoại của các mẫu cột được gia cường bằng một lớp CFRP dán dọc và ba lớp CFRP bó hông là do cốt dọc vùng nén chảy, tiếp theo là bê tông ở khu vực giữa mặt nén bị nén vỡ trước và sau đó tấm CFRP bị bong tách mà không bị kéo đứt; tấm CFRP dán dọc vẫn còn nguyên vẹn (Hình 4(c)), đây là điểm khác biệt so với mẫu cột gia cường một lớp CFRP dán dọc và một lớp CFRP bó hông. Cốt dọc vùng nén bị chảy ở cấp tải bằng 66% đến 86% P_u . Hiện tượng bong tách tấm CFRP cục bộ bắt đầu xảy ra ở cấp tải bằng 72% đến 88% P_u . Ở cấp tải xấp xỉ bằng 85% đến 95% P_u , các âm thanh phát ra rất rõ do sự nén vỡ của bê tông vùng nén cho thấy dấu hiệu bị phá hủy của bê tông tại vùng giữa cột; tải

trọng tác dụng vẫn tiếp tục tăng nhưng không đáng kể, và trong khoảng thời gian rất ngắn là sự bong tách của tấm CFRP dán dọc và tấm CFRP bó hông ở khu vực này làm cho cột bị mất khả năng chịu lực. Thời điểm bong tách tấm CFRP diễn ra nhanh hơn khi tăng độ lệch tâm và ít bị ảnh hưởng bởi cấu hình và mức độ ăn mòn của cốt thép. Cốt dọc trong vùng chịu kéo của các cột này không bị chảy.

3.2. Quan hệ lực – chuyển vị

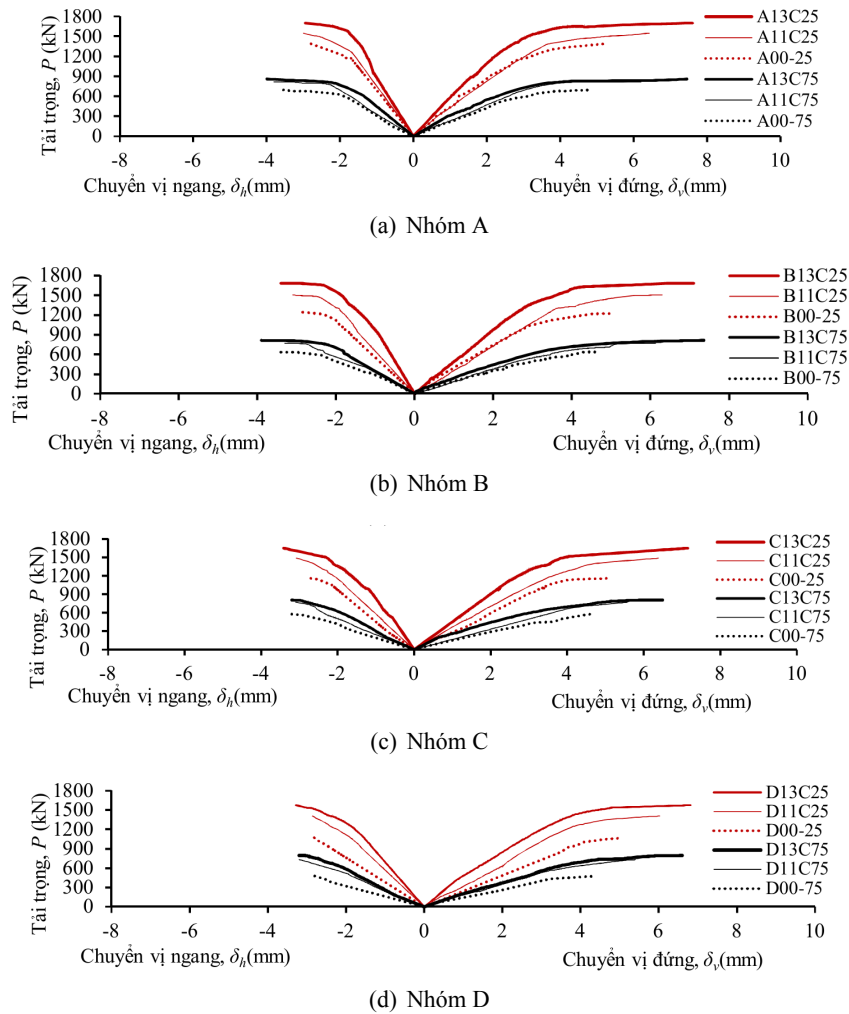
Quan hệ lực – chuyển vị đứng (δ_v) và chuyển vị ngang (δ_h) của các cột được tổng hợp trong Hình 5. Trong giai đoạn đầu, trước cấp tải chuyển tiếp, P_y (định nghĩa như Hình 6 theo [22]), quan hệ giữa lực và chuyển vị đứng và ngang của các cột gần như là tuyến tính. Cấp tải P_y của các cột dao động từ 0,71 đến 0,95 P_u (Bảng 3). Khi so sánh cùng cấp tải, chuyển vị (đứng và ngang) của các cột có $e/h = 0,375$ lớn hơn rõ rệt so với chuyển vị của cột có $e/h = 0,125$. Tương tự, tại cùng một cấp tải, chuyển vị của cột không gia cường lớn hơn so với chuyển vị của các cột gia cường (cột đối chứng); và chuyển

Bảng 3. Tổng hợp kết quả thí nghiệm

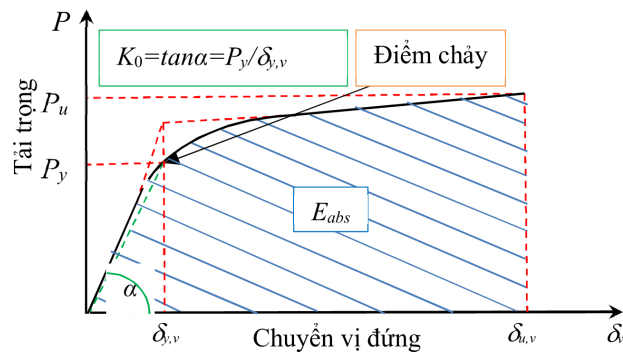
Mẫu	P_u kN	P_y kN	$\delta_{u,h}$ mm	$\delta_{u,v}$ mm	$\varepsilon_{su,t}$ ‰	$\varepsilon_{su,c}$ ‰	$\varepsilon_{swu,c}$ ‰	$\varepsilon_{swu,side}$ ‰	ε_{cu} ‰	$\varepsilon_{fcon,u,t}$ ‰	$\varepsilon_{fcon,u,c}$ ‰	$\varepsilon_{flex,u}$ ‰	K_0 kN/mm	ν -	E_{abs} KNmm
A00-25	1387	1170	2,8	5,2	-0,4	-3,3	0,6	0,2	-3,5	-	-	-	391	1,7	4794
A11C25	1548	1237	3,0	6,4	-0,7	-3,8	1,1	0,4	-3,9	4,5	9,1	0,2	399	2,1	6805
A13C25	1700	1410	3,0	7,6	-0,8	-4,9	0,8	0,4	-4,4	3,6	7,7	0,3	470	2,5	10013
A00-75	760	626	3,5	4,8	0,6	-3,8	0,3	0,1	-3,2	-	-	-	197	1,6	2198
A11C75	815	771	3,8	6,2	1,0	-4,6	0,7	0,2	-3,7	0,6	7,0	2,9	214	1,8	3597
A13C75	859	794	4,0	7,5	1,1	-5,3	0,5	0,2	-3,9	0,5	5,7	3,0	221	2,5	4897
B00-25	1241	1109	2,8	5,1	-0,4	-3,1	0,7	0,2	-3,1	-	-	-	327	1,4	4071
B11C25	1506	1300	3,1	6,3	-0,7	-3,7	1,0	0,4	-3,8	4,3	9,1	0,2	362	1,8	6180
B13C25	1685	1479	3,4	7,1	-0,7	-4,8	0,8	0,4	-4,3	3,5	7,1	0,3	423	2,3	8790
B00-75	656	495	3,4	4,6	0,6	-3,7	0,3	0,1	-3,0	-	-	-	165	1,2	1714
B11C75	790	616	3,3	6,1	0,9	-4,5	0,6	0,1	-3,6	0,4	6,7	2,8	176	1,6	2999
B13C75	814	620	3,9	7,4	1,0	-5,0	0,4	0,2	-3,8	0,3	5,3	2,9	204	2,2	4312
C00-25	1158	1070	2,7	5,0	-0,3	-2,9	0,7	0,2	-3,0	-	-	-	297	1,2	3563
C11C25	1488	1205	3,1	6,4	-0,5	-3,4	0,8	0,2	-3,7	3,9	8,0	0,2	331	1,8	6111
C13C25	1651	1350	3,4	7,2	-0,6	-4,5	0,8	0,4	-4,2	3,3	6,5	0,3	409	2,3	8405
C00-75	611	436	3,2	4,6	0,5	-3,4	0,3	0,1	-2,9	-	-	-	139	1,1	1448
C11C75	770	673	3,1	5,6	0,8	-4,3	0,4	0,1	-3,5	0,4	6,2	2,6	166	1,4	2463
C13C75	807	702	3,2	6,5	1,0	-4,7	0,4	0,2	-3,8	0,3	5,0	2,8	172	2,1	3601
D00-25	1071	907	2,8	5,1	-0,2	-2,8	0,7	0,2	-2,9	-	-	-	220	1,1	3057
D11C25	1407	1252	2,9	6,0	-0,4	-3,1	0,7	0,3	-3,5	3,8	7,8	0,2	326	1,6	5387
D13C25	1575	1400	3,3	6,8	-0,5	-4,2	0,6	0,3	-4,0	3,2	6,2	0,2	372	2,1	7615
D00-75	562	397	2,7	4,4	0,4	-2,7	0,3	0,1	-2,9	-	-	-	115	1,0	1291
D11C75	730	522	3,2	5,4	0,7	-3,9	0,4	0,2	-3,3	0,3	5,4	2,4	151	1,4	2347
D13C75	795	700	3,2	6,6	0,9	-4,4	0,3	0,1	-3,7	0,2	4,5	2,6	171	2,0	3456

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 CFRP bó hông ở mặt kéo và mặt nén tại giữa cột; $\varepsilon_{flex,u}$ là biến dạng lớn nhất của tấm CFRP dán dọc ở mặt kéo tại giữa cột; K_0 là độ cứng trong giai đoạn đầu của cột, kN/mm; $\delta_{y,v}$ là chuyển vị đứng ứng với cấp tải P_y , mm; μ là độ dẻo của cột, $\mu = \delta_{u,v}/\delta_{y,v}$; E_{abs} là khả năng hấp thụ năng lượng của cột.

vị của các cột bị ăn mòn cốt thép lớn hơn so với của các cột không bị ăn mòn tương ứng (Hình 5). 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.

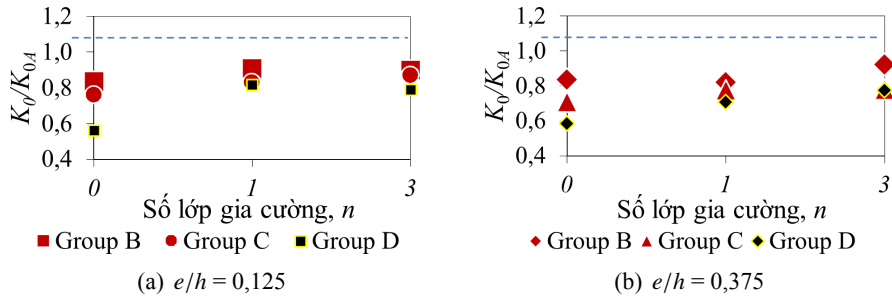


Hình 5. Quan hệ lực và chuyển vị của các cột thí nghiệm



Hình 6. Xác định cấp tải chuyển tiếp

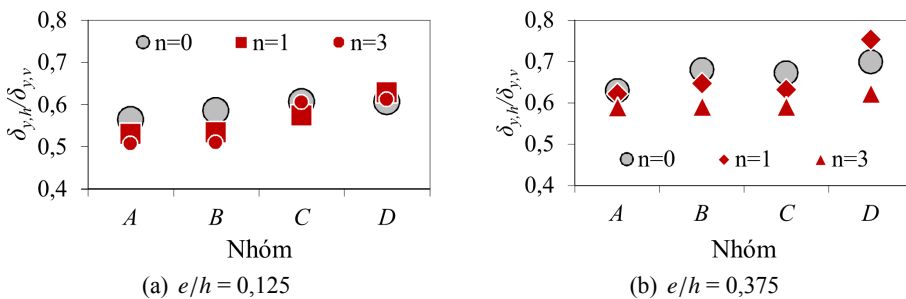
Hình 7 cho thấy độ cứng ban đầu (K_0) của cột không gia cường bị giảm mạnh theo sự ăn mòn của cốt thép trong cột từ 16 đến 44% so với của cột không bị ăn mòn; trong khi, độ cứng ban đầu (K_0) của cột gia cường cũng có xu hướng giảm tương tự theo sự ăn mòn của cốt thép nhưng với mức giảm nhỏ hơn đáng kể, lớn nhất là 29% so với của cột gia cường không bị ăn mòn. Điều này cho thấy tấm CFRP nhờ vào khả năng kiểm soát nứt (tấm dán dọc) và hiệu ứng bó hông (tấm bó hông) của chúng 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 gia cường so với của cột không gia cường như vừa đề cập ở trên.



Ghi chú: $K_{0,A}$ là độ cứng ban đầu của cột không bị ăn mòn (nhóm A); K_0 là độ cứng ban đầu của cột bị ăn mòn (nhóm B, C và D)

Hình 7. So sánh độ cứng ban đầu của cột nhóm B, C và D với độ cứng ban đầu của cột nhóm A tương ứng

Cũng trong giai đoạn đầu, tại cấp tải chuyển tiếp (P_y), tỉ số $\delta_{y,h}/\delta_{y,v}$ dao động từ 0,51 đến 0,75, và có xu hướng tăng theo mức độ ăn mòn của cốt thép (Hình 8). Nguyên nhân của xu hướng này có thể là do cốt dọc bị ăn mòn ở mức độ càng lớn khiến cho khả năng bám dính của chúng với bê tông và giới hạn chảy càng giảm, dẫn đến các vết nứt uốn tại vùng giữa cột phát triển nhiều hơn. Điều này làm cho độ cứng kháng uốn của cột có cốt dọc bị ăn mòn càng lớn bị suy giảm càng nhiều, làm cho chuyển vị ngang của cột tăng càng lớn và kết quả là tỉ số $\delta_{y,h}/\delta_{y,v}$ càng lớn.



Ghi chú: $\delta_{y,h}$ và δ_y lần lượt chuyển vị ngang và chuyển vị đứng tại cấp tải chuyển P_y ; n là lớp tấm CFRP bó hông

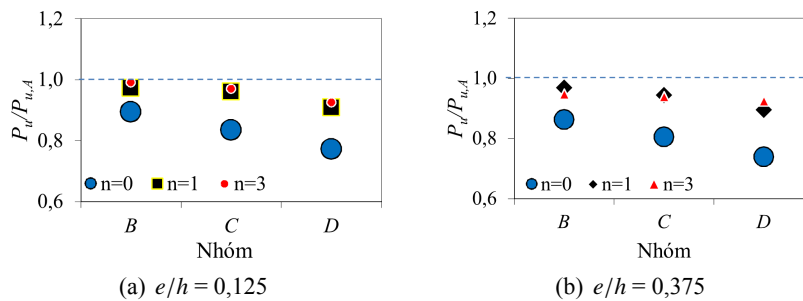
Hình 8. So sánh chuyển vị ngang và chuyển vị đứng tại cấp tải chuyển tiếp (P_y)

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 54% đến 74% chuyển vị đứng cuối cùng ($\delta_{u,v}$); trong khi $\delta_{u,h}$ của cột gia cường bằng 39 đến 62% $\delta_{u,v}$ (Bảng 3). Bảng 3 cho thấy tấm CFRP làm giảm tỉ số giữa chuyển vị ngang trên chuyển vị đứng cuối cùng ($\delta_{u,h}/\delta_{u,v}$) của cột; trong khi, tăng độ lệch tâm làm tăng tỉ số này. Ngoài ra, mức độ ăn mòn cốt thép ảnh hưởng không đáng kể đến tỉ số $\delta_{u,h}/\delta_{u,v}$. Ngoài ra, hiệu ứng bó hông của tấm CFRP đã làm gia tăng mạnh chuyển vị đứng cuối cùng ($\delta_{u,v}$) của cột (lên tới 60%) và sự gia tăng này tỉ lệ thuận với số lớp gia cường. Sự ăn mòn cốt thép (cốt dọc và đai) và độ lệch tâm ảnh hưởng không đáng kể đến chuyển vị đứng cuối cùng của cột. Tấm CFRP, mức độ ăn mòn của cốt thép và độ lệch tâm không có ảnh hưởng rõ ràng đến chuyển vị ngang cuối cùng của cột.

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, lên đến 31%. Trong khi, tấm CFRP nhờ vào khả năng kiểm soát nứt do 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, lớn nhất 10% (Hình 9). Kết quả này cho thấy, sự ăn mòn kết hợp giữa cốt đai và cốt dọc (nhóm D) gây nên sự suy giảm khả năng chịu lực đáng kể cho cột chịu nén lệch tâm.

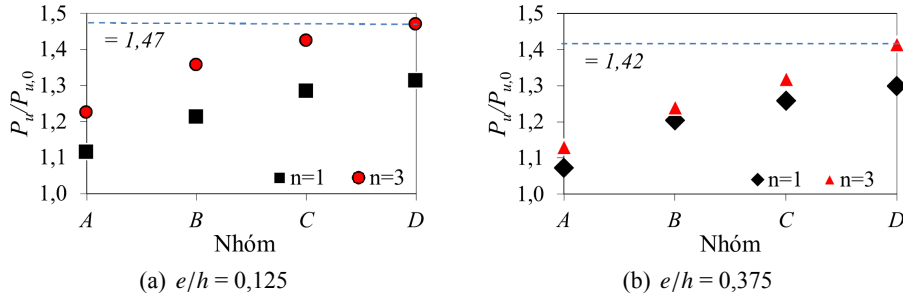


Ghi chú: $P_{u,A}$ là tải trọng cực hạn của cột không bị ăn mòn (nhóm A); P_u là tải trọng cực hạn của cột bị ăn mòn (nhóm B, C và D)

Hình 9. 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 so với của cột đối chứng và hiệu quả cao của tấm CFRP 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 có xu hướng tăng mạnh theo mức độ ăn mòn của cốt thép trong cột (Hình 10). Đối với các cột nhóm A, tấm CFRP làm tăng khả năng chịu nén lệch tâm của cột lần lượt là 7% và 23% so với của cột không gia cường. Mức độ gia tăng này rõ ràng là nhỏ hơn rất nhiều so với mức gia tăng 24% và 71,9% theo nghiên cứu của [10]; cho thấy có sự suy giảm rõ rệt về hiệu quả gia cường của tấm CFRP cho trường hợp cột chịu nén lệch tâm. Tuy nhiên, đối với các cột bị ăn mòn cốt thép với các cấp độ khác nhau (nhóm B, C và D), hiệu quả gia cường của tấm CFRP có sự gia tăng mạnh. Khả năng chịu nén lệch tâm của các cột bị ăn mòn cốt thép gia cường tấm CFRP lớn hơn từ 31% đến 47% so với của cột không bị ăn mòn cốt thép gia cường tương ứng (Hình 10). Kết quả này cho thấy có sự gia tăng đáng kể của hiệu quả gia cường tấm CFRP 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

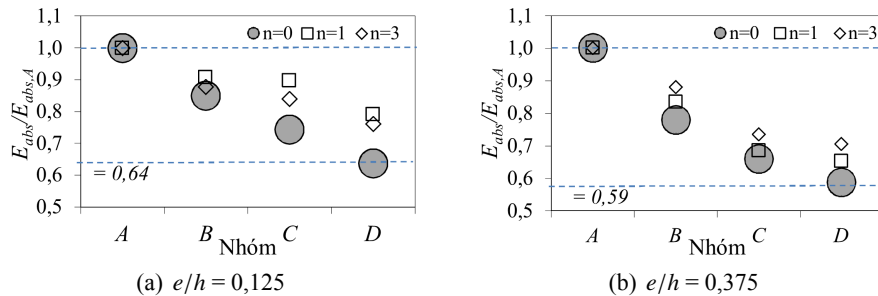
độ ăn mòn cốt thép; trong khi, khả năng chịu lực của cột gia cường cũng giảm theo sự ăn mòn của cốt thép trong cột nhưng chậm hơn (Hình 9) do phần đóng góp của tấm CFRP ít bị ảnh hưởng bởi sự ăn mòn của cốt thép và tấm CFRP còn góp phần làm giảm tốc độ suy giảm khả năng chịu lực của lõi bê tông cốt thép. 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 CFRP cho cột tăng theo mức độ ăn mòn của cốt thép.



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

Hình 10. Ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép đến hiệu quả gia cường của tấm CFRP trong việc cải thiện khả năng nén lệch tâm của cột

Độ lệch tâm ảnh hưởng rất lớn đến khả năng chịu lực của cột. Bảng 3 cho thấy việc tăng độ lệch tâm tương đối (e/h) từ 0,125 lên 0,375 làm giảm khả năng chịu lực của cột không gia cường từ 45% đến 48% và của cột gia cường từ 47% đến 52%. Hình 10 cũng cho thấy rằng hiệu quả gia cường khả năng nén lệch tâm của tấm CFRP cho cột có xu hướng giảm theo sự gia tăng của độ lệch tâm của cột.

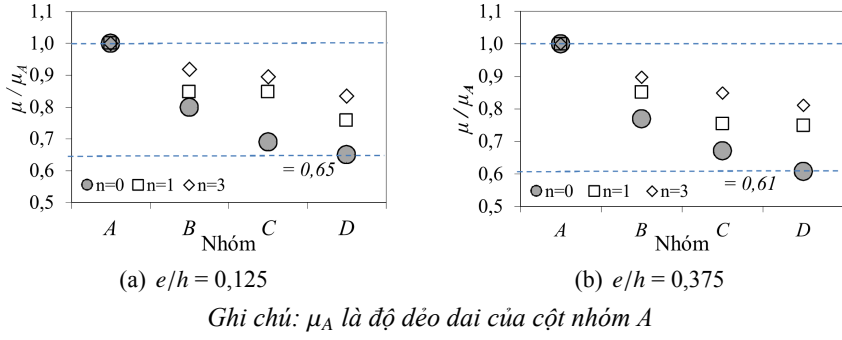


Ghi chú: $E_{abs,A}$ là khả năng hấp thụ năng lượng của cột nhóm A

Hình 11. Ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép đến khả năng hấp thụ năng lượng của cột

Cốt thép bị ăn mòn làm suy giảm mạnh khả năng hấp thụ năng lượng của cột không gia cường lên đến 41%; trong khi cột gia cường suy giảm lớn nhất chỉ 35%. Nguyên nhân là do tấm CFRP 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 một cách hiệu quả sự suy giảm này (Hình 11). Hình 11 cho thấy sự suy giảm khả năng hấp thụ của cột tỷ lệ thuận với ăn mòn cốt thép, tỷ lệ thuận với độ lệch tâm tương đối, 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 bị ăn mòn lớn (nhóm D) so với khi chỉ có cốt đai ăn mòn (nhóm B).

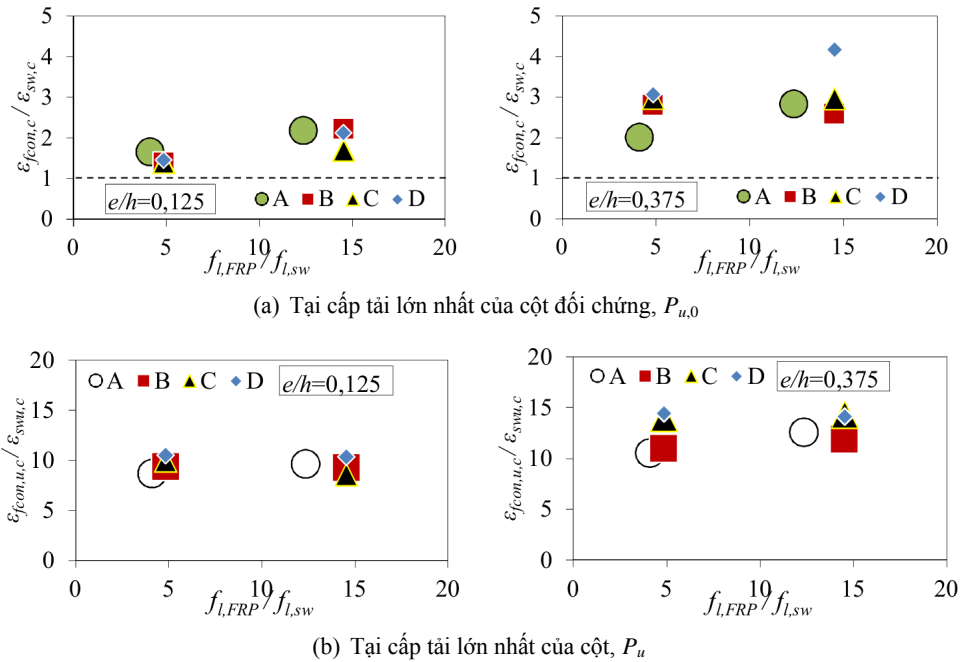
Cốt thép bị ăn mòn làm suy giảm mạnh độ dẻo dai của cột không gia cường lên đến 39%; trong



Hình 12. Ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép đến độ dẻo dai của cột

khi cột gia cường suy giảm lớn nhất chỉ 25%. Nguyên nhân, một lần nữa là do tấm CFRP 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 một cách hiệu quả sự suy giảm này (Hình 12). Hình 12 cho thấy sự suy giảm độ dẻo dai của cột tỷ lệ thuận với ăn mòn cốt thép, tỷ lệ thuận với độ lệch tâm tương đối, và tỷ lệ nghịch với số lớp gia cường.

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



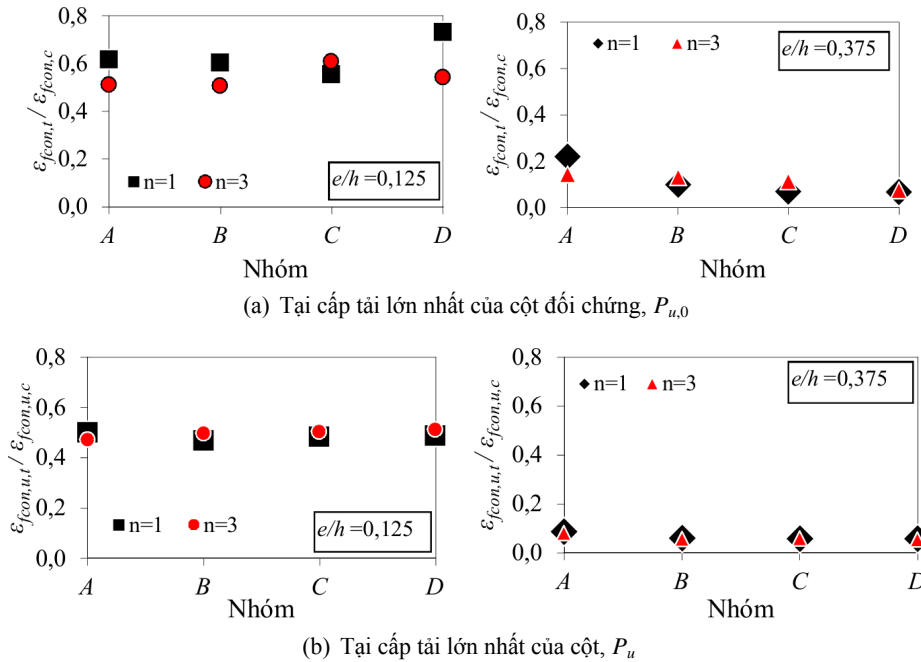
Ghi chú: $\varepsilon_{fcon,c}$ và $\varepsilon_{sw,c}$ lần lượt biến dạng của tấm bó hông và cốt đai tại mặt nén lớn ở cấp tải lớn nhất của cột đối chứng, $P_{u,0}$; $f_{l,FRP}$ và $f_{l,sw}$ lần lượt ứng suất bó hông của tấm CFRP và cốt đai

Hình 13. So sánh biến dạng lớn nhất của tấm bó hông và cốt đai

Theo Bảng 3, biến dạng của cốt đai nhỏ và chưa đạt tới giá trị chảy ($\varepsilon_{yw} = 1,95\%$); trong khi, Hình 13 biến dạng của tấm CFRP bó hông vượt trội rất rõ cả về tốc độ gia tăng và giá trị so với biến

dạng của cốt đai. Kết quả thực nghiệm cho thấy biến dạng của cả cốt đai và tấm CFRP bó hông ở các mặt khác nhau của cột rất không đều và có sự chênh lệch lớn. Mức độ ăn mòn cốt thép, độ lệch tâm tương đối (e/h) và ứng suất bó hông tương đối của tấm CFRP (f_l/f_c) ảnh hưởng đáng kể đến biến dạng của tấm.

Ở giai đoạn đầu (từ cấp tải 0 đến cấp tải P_y), biến dạng của cả cốt đai và của tấm CFRP gia cường bó hông đều tăng chậm. Tuy nhiên, nhờ có ứng suất bó hông lớn hơn [$f_{l,FRP} = (4,8 \sim 14,5)f_{l,sw}$, với $f_{l,FRP}$ và $f_{l,sw}$ lần lượt là ứng suất bó hông của tấm CFRP và của cốt đai], tấm CFRP có xu hướng tiếp nhận tải trọng nên lệch tâm sớm và đáng kể hơn so với cốt đai, làm cho tốc độ biến dạng của tấm nhanh hơn so với cốt đai. Hình 13(a) cho thấy cốt thép trong cột càng bị ăn mòn nhiều và độ lệch tâm càng tăng, sự chênh lệch biến dạng giữa tấm CFRP bó hông và cốt đai càng lớn.



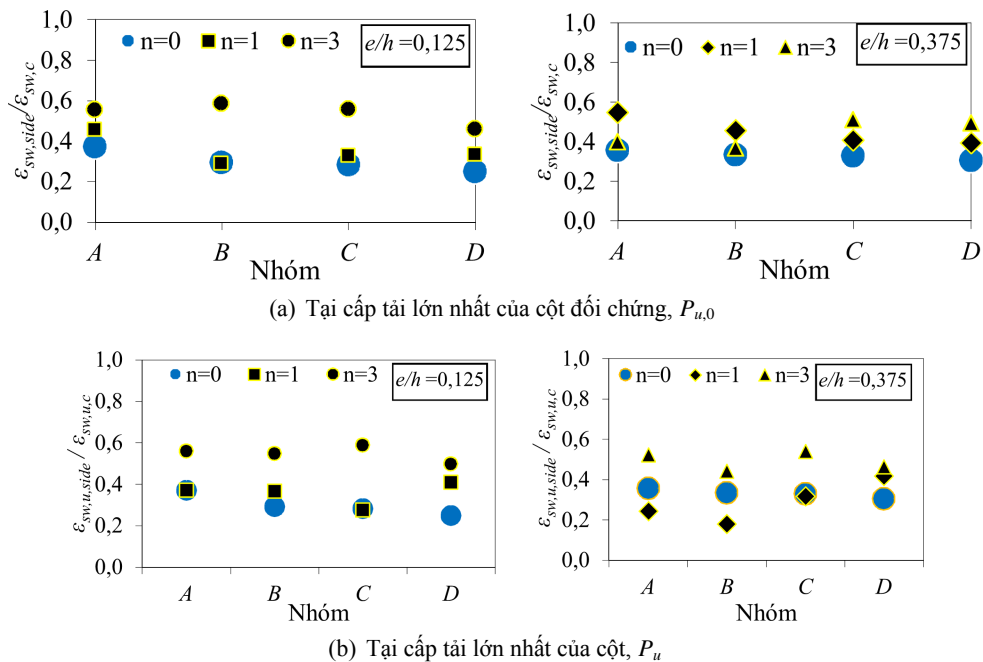
Ghi chú: $\varepsilon_{fcon,t}$ và $\varepsilon_{fcon,c}$ lần lượt biến dạng của tấm bó hông ở mặt nén bé và mặt nén lớn tại cấp tải lớn nhất của cột đối chứng, $P_{u,0}$

Hình 14. So sánh biến dạng của tấm bó hông tại mặt nén ít (hoặc kéo) và tại mặt nén lớn của cột

Cũng trong giai đoạn đầu, sự biến dạng không đều của tấm CFRP bó hông và cả cốt đai đã bắt đầu xuất hiện. Biến dạng của tấm (Hình 14(a)) và của cốt đai (Hình 15(a)) 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); độ lệch tâm càng lớn, sự chênh lệch giữa biến dạng ở mặt nén lớn so với các mặt khác của cột càng lớn. Nguyên nhân là do lực nén lệch tâm khiến ứng suất nén phân bố không đều trên mặt cột; độ lệch tâm càng lớn, sự phân bố ứng suất nén trên mặt cột càng không đều do sự gia tăng độ lớn của mô-men uốn tác dụng lên cột. Mặt chịu nén lớn bị phình nhiều hơn so với các mặt chịu nén ít hơn, làm cho tấm và cốt đai ở khu vực này biến dạng nhiều hơn. Mức độ ăn mòn của cốt thép trong cột ảnh hưởng không rõ ràng đến sự phân bố biến dạng của tấm và cốt đai.

Trong giai đoạn hai, từ cấp tải P_y đến P_u , sự suy yếu nhanh của độ cứng của cột khiến cho biến dạng của cốt đai và tấm CFRP bó hông đều tăng rất nhanh (Bảng 3); trong đó, biến dạng của tấm tăng nhanh hơn rất nhiều so với của cốt đai, đặc biệt là ở mặt nén lớn (Hình 13). Sự chênh lệch giữa cấp

tải P_u và P_y là không quá lớn, chỉ từ 5 đến 19% (Bảng 3); nhưng, biến dạng của tấm tại cấp tải P_u lớn hơn rất nhiều so với tại cấp tải P_y , từ 5 đến 11 lần. Tốc độ gia tăng biến dạng vượt trội của tấm so với của cốt đai trong giai đoạn này thể hiện ở Hình 13(b); theo đó, ở cấp tải phá hoại, P_u , của cột, biến dạng của tấm CFRP bó hông lớn hơn so với của cốt đai từ 9 đến 14 lần. Sự chênh lệch này có xu hướng tăng theo độ lớn của ứng suất bó hông của tấm. Như đã thảo luận ở trên, sự vượt trội rõ rệt của độ cứng dọc trục hay ứng suất bó hông của tấm CFRP so với của cốt đai, có thể là nguyên nhân đã giúp cho tấm tiếp nhận phần lớn ứng suất nở hông của tiết diện cột và khiến cho cốt đai chỉ đóng vai trò thứ yếu trong việc tiếp nhận ứng suất nở hông của tiết diện cột khi chịu nén lệch tâm. Sự ăn mòn của cốt đai ở mức 15% có xu hướng làm tăng nhẹ sự chênh lệch (tỉ số) giữa biến dạng của tấm hông và của cốt đai đến 8% (cột nhóm B); nhưng đáng nói là, sự ăn mòn của cốt đai kết hợp với cốt dọc lại làm tăng đáng kể tỉ số này, đến 33% (cột nhóm C) và đến 37% (cột nhóm D). Xu hướng này cũng tương tự như ở giai đoạn đầu, nơi mà sự gia tăng của mức độ ăn mòn cốt thép trong cột và độ lệch tâm dẫn đến sự gia tăng tỉ số giữa biến dạng của tấm hông và của cốt đai. Nguyên nhân có thể được giải thích là do sự ăn mòn của cốt đai làm cho độ cứng dọc trục của nó, vốn đã bé hơn đáng kể so với của tấm CFRP bó hông, nay lại càng bé hơn; làm cho phần đóng góp của nó vào kháng nở hông của cột, vì vậy, càng giảm so với của tấm CFRP. Trong khi, sự ăn mòn của cốt dọc, mặc dù, không ảnh hưởng trực tiếp đến biến dạng của cốt đai, nhưng góp phần làm giảm mạnh khả năng chịu nén lệch tâm của lõi BTCT như đã trình bày ở Hình 9, do sự suy giảm khả năng bám dính của cốt dọc với lõi bê tông. Sự suy giảm khả năng chịu lực của lõi kéo theo sự suy giảm biến dạng của cốt đai so với khi không bị ăn mòn (Bảng 3).



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

Hình 15. So sánh biến dạng của cốt đai tại mặt bên với biến dạng của cốt đai tại mặt nén

Trong giai đoạn hai, sự phân bố không đều của biến dạng nở hông của tấm CFRP và của cốt đai ở mặt nén lớn và mặt nén bé cũng rất rõ nét. Cụ thể, ở cấp tải phá hoại, P_u , tỉ số giữa biến dạng của

tấm CFRP bó hông ở mặt nén bé và ở mặt nén lớn có giá trị dưới 50% (Hình 14(b)). Sự ăn mòn của cốt thép trong cột ảnh hưởng không rõ ràng đến sự phân bố biến dạng cuối cùng của tấm CFRP bó hông theo chu vi của cột nhưng làm giảm đáng kể đến biến dạng cuối cùng của chúng. Theo Bảng 3, cốt đai bị ăn mòn 15% (nhóm B) làm giảm biến dạng của tấm bó hông tối đa 8%; trong khi, cốt đai bị ăn mòn 15% kết hợp với cốt dọc ăn mòn 30% (nhóm D) làm tăng biến dạng của tấm bó hông lên đến 23%. Nguyên nhân có thể là do sự ăn mòn của cốt đai làm suy yếu khả năng bó hông của chúng; 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 tấm FRP nhỏ hơn.

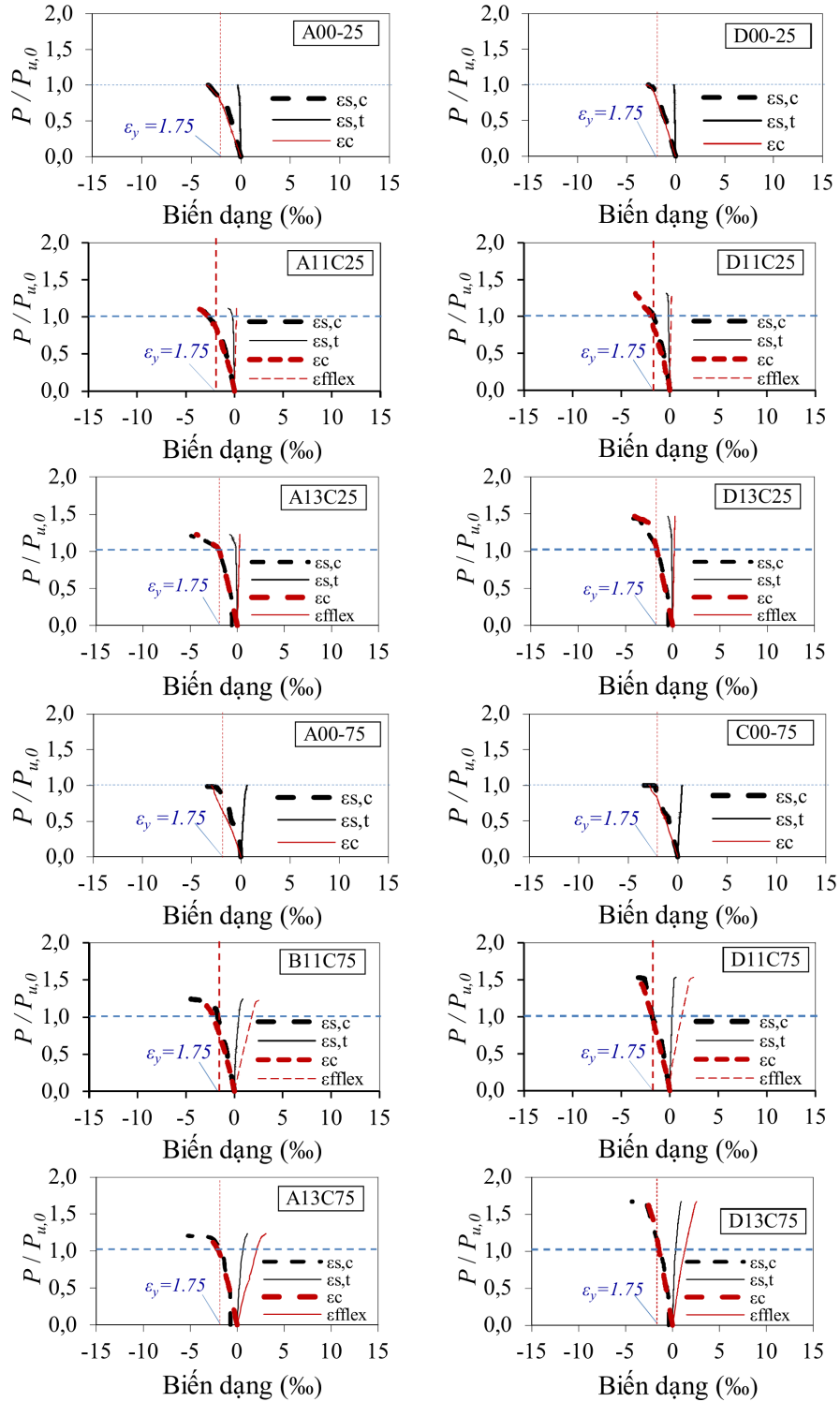
Biến dạng lớn nhất của tấm CFRP bó hông của cột có $e/h = 0,125$ và $e/h = 0,375$ dao động lần lượt từ 6,2 đến 9,1‰ (tương ứng với 31 đến 45% biến dạng kéo đứt của tấm) và từ 4,5 đến 7,0‰ (tương ứng với 22 đến 32% biến dạng kéo đứt của tấm) (Bảng 3). Kết quả này cho thấy biến dạng cuối cùng của tấm CFRP bó hông có xu hướng giảm nhẹ theo sự gia tăng của độ lệch tâm tương đối, e/h .

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

Quan hệ giữa lực – biến dạng của cốt thép dọc và tấm dán dọc của các mẫu điển hình thể hiện trên Hình 16. Đối với cột có độ lệch tâm tương đối $e/h = 0,125$, do ứng xử chủ đạo của cột là nén nên biến dạng kéo của tấm CFRP dán dọc ở mặt chịu kéo của cột là không đáng kể, dao động từ 0,18‰ đến 0,27‰. Trong khi, đối với cột có độ lệch tâm lớn ($e/h = 0,375$), ứng xử kéo của cột trở nên rõ nét hơn, làm cho tấm CFRP 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 2,43‰ đến 3,04‰, tương ứng từ 12% đến 15% biến dạng kéo đứt của tấm (Bảng 3). Sự ăn mòn của cốt thép dọc ảnh hưởng không đáng kể đến biến dạng cuối cùng của tấm CFRP dán dọc.

Toàn bộ cốt dọc trong cột có độ lệch tâm tương đối $e/h = 0,125$ hầu như đều bị biến dạng nén. Biến dạng nén của cốt dọc ở mặt chịu nén lớn tăng nhanh và đều vượt xa giới hạn chảy của chúng ($\varepsilon_{sy} = 1,75‰$), nhưng biến dạng của cốt dọc ở mặt chịu nén bé hầu như không đáng kể và chưa chảy. Ở cột không gia cường, tỷ số ‘biến dạng nén của cốt dọc ở mặt nén lớn’ và ‘biến dạng nén của cốt dọc ở mặt nén bé’ xấp xỉ từ 7 đến 13 lần; tỷ số này có xu hướng tăng dần theo mức độ ăn mòn của cốt dọc trong cột; trong khi, ở cột gia cường tấm CFRP bó hông, tỷ số này xấp xỉ từ 6 đến 9 lần (Bảng 3). Tỷ số này giảm là do CFRP bó hông góp phần phân bố đều hơn biến dạng trên mặt cắt ngang. Sự suy giảm độ cứng của tiết diện (như đã bàn luận ở Mục 3.2) và sự ăn mòn của cốt thép dọc làm giảm khả năng chịu lực của cột và biến dạng cuối cùng của cốt dọc ở mặt chịu nén lớn. Theo đó, cốt dọc bị ăn mòn 30% làm giảm biến dạng cuối cùng của nó tối đa 16% cho cột không gia cường và 17% cho cột gia cường (Bảng 3). Tấm CFRP gia cường nhờ vào hiệu ứng bó hông làm tăng đáng kể biến dạng cuối cùng của cốt dọc, từ 12% đến 57%, và sự gia tăng này tăng theo số lớp gia cường.

Lực nén lệch tâm làm cho tiết diện cột có độ lệch tâm lớn ($e/h = 0,375$) được chia thành hai vùng nén và kéo rõ hơn so với cột chịu nén có độ lệch tâm nhỏ, 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). Sự ăn mòn của cốt thép dọc làm giảm biến dạng cuối cùng của cốt dọc chịu nén tối đa 28% cho cột không gia cường và 17% cho cột gia cường (Bảng 3). Tấm CFRP làm gia tăng biến dạng cuối cùng của cốt dọc chịu nén của các cột từ 21% đến 59% và sự gia tăng này có xu hướng tăng theo mức độ ăn mòn của cốt dọc và số lớp gia cường.



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

Hình 16. Quan hệ lực – biến dạng của cốt thép dọc, bê tông và tấm dãn dọc

3.6. Biến dạng của bê tông

Quan hệ giữa lực – biến dạng của bê tông của các mẫu điển hình thể hiện ở Hình 16. Biến dạng của bê tông trong tất cả các mẫu nằm trong khoảng 2,9‰ đến 4,4‰. Biến dạng của bê tông có xu hướng tăng khi tăng số lớp gia cường hay ứng suất bó hông tăng. Cụ thể, khi tăng từ một lên ba lớp CFRP bó hông, biến dạng của bê tông tăng từ 4 đến 14% (Bảng 3). Khi tăng từ độ lệch tâm nhỏ ($e/h = 0,125$) đến độ lệch tâm lớn ($e/h = 0,375$), biến dạng của bê tông của cột không gia cường và của cột gia cường giảm lần lượt đến 9% và 13%. Khi tăng mức độ ăn mòn cốt thép, biến dạng của bê tông có xu hướng giảm, lên đến 16% đối với cột không gia cường và lên đến 10% đối với cột gia cường. Nguyên nhân, một lần nữa có thể là do sự ăn mòn của cốt đai làm suy yếu khả năng bó hông của chúng; 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.

4. Kết luận

Bài báo này khảo sát thực nghiệm về ảnh hưởng của mức độ ăn mòn cốt thép đến hiệu quả gia cường của tấm CFRP bó hông đối với cột BTCT. Chương trình thực nghiệm được tiến hành trên hai mươi bốn cột BTCT với kích thước $200 \times 200 \times 800$ mm. Thông số khảo sát bao gồm bốn mức độ ăn mòn cốt thép tương đương với bốn nhóm (cốt dọc và cốt đai không bị ăn mòn, cốt dọc không bị ăn mòn và cốt đai bị ăn mòn 15%, cốt dọc bị ăn mòn 15% và cốt đai bị ăn mòn 15%, và cốt dọc bị ăn mòn 30% và cốt đai bị ăn mòn 15%), hai độ lệch tâm tương đối ($e/h = 0,125$ và $0,375$), và số lớp tấm CFRP gia cường (một và ba lớp bó hông). Căn cứ 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 CFRP trong việc cải thiện khả năng chịu nén lệch tâm của cột có xu hướng tỷ lệ thuận với mức độ ăn mòn của cốt thép cột và thật sự ấn tượng (lên đến 47% cho cột có cốt thép bị ăn mòn và 23% cho cột có cốt thép không bị ăn mòn);
- Ăn mòn cốt thép làm suy giảm đáng kể khả năng chịu nén lệch tâm của cột không gia cường (lên đến 26%) nhưng chỉ làm suy giảm nhẹ khả năng chịu lực của cột gia cường (tối đa 10%) nhờ vào sự làm việc hiệu quả của tấm CFRP; đồng thời, nó cũng làm giảm mạnh hiệu quả của tấm CFRP trong việc cải thiện mức độ hấp thụ năng lượng (lên đến 35%) và độ dẻo dai (lên đến 25%) của cột;
- Sự gia tăng của độ lệch tâm làm giảm 9% hiệu quả gia cường của tấm CFRP cho cột bị ăn mòn chịu nén lệch do sự suy giảm của biến dạng cuối cùng của tấm CFRP bó hông. Biến dạng lớn nhất của tấm CFRP bó hông của cột dao động từ 22 đến 45% biến dạng kéo đứt của tấm CFRP;
- Ăn mòn của cốt thép làm giảm mạnh độ cứng dọc trục ban đầu của cột (lên đến 44% cho cột không gia cường và 29% cho cột gia cường). Trong khi, tấm CFRP làm tăng mạnh độ cứng dọc trục ban đầu của cột (lên đến 48%); và sự gia tăng này có xu hướng tỷ lệ thuận với số lớp gia cường và mức độ ăn mòn của cốt thép trong cột nhưng tỷ lệ nghịch với độ lệch tâm.

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] Cao, D. T., Pham, V. K., Le, Q. H. *Final report for technology and economical project of corrosion protection of marine structure*. Hanoi, Viet Nam: Viet Nam Institute for Building Science and Technology.
- [2] Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R., Li, M. W. (1994). [Strength and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced With Fiber Composite Straps](#). *ACI Structural Journal*, 91(4):434–447.
- [3] Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M., Echary, H. E., Mastrapa, J. C., Pico, O. (1998). [Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete](#). *Journal of Composites for Construction*, 2(4):175–185.
- [4] Pantazopoulou, S. J., Bonacci, J. F., Sheikh, S., Thomas, M. D. A., Hearn, N. (2001). [Repair of Corrosion-Damaged Columns with FRP Wraps](#). *Journal of Composites for Construction*, 5(1):3–11.
- [5] Tastani, S. P., Pantazopoulou, S. J. (2004). [Experimental evaluation of FRP jackets in upgrading RC corroded columns with substandard detailing](#). *Engineering Structures*, 26(6):817–829.
- [6] Belarbi, A., Bae, S.-W. (2007). [An experimental study on the effect of environmental exposures and corrosion on RC columns with FRP composite jackets](#). *Composites Part B: Engineering*, 38(5-6):674–684.
- [7] Bae, S.-W., Belarbi, A. (2009). [Effects of Corrosion of Steel Reinforcement on RC Columns Wrapped with FRP Sheets](#). *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 23(1):20–31.
- [8] Pham, T. M., Hadi, M. N. S. (2013). [Strain Estimation of CFRP-Confined Concrete Columns Using Energy Approach](#). *Journal of Composites for Construction*, 17(6).
- [9] Hadi, M. N. S., Widiarsa, I. B. R. (2012). [Axial and Flexural Performance of Square RC Columns Wrapped with CFRP under Eccentric Loading](#). *Journal of Composites for Construction*, 16(6):640–649.
- [10] Huynh-Xuan, T., Do-Dai, T., Ngo-Thanh, T., Pham, T. M., Nguyen-Minh, L. (2021). [Effect of Sulfate Attack on Reinforced Concrete Columns Confined with CFRP Sheets under Axial Compression](#). *Journal of Composites for Construction*, 25(6).
- [11] 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.
- [12] Bousias, S. N., Triantafillou, T. C., Fardis, M. N., Spathis, L., O'Regan, B. A. (2004). [Fiber-Reinforced Polymer Retrofitting of Rectangular Reinforced Concrete Columns with or without Corrosion](#). *ACI Structural Journal*, 101(4):512–520.
- [13] Li, J., Gong, J., Wang, L. (2009). [Seismic behavior of corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened using combined carbon fiber-reinforced polymer and steel jacket](#). *Construction and Building Materials*, 23(7):2653–2663.
- [14] Xu, Y.-Y., Huang, J.-Q. (2020). [Cyclic performance of corroded reinforced concrete short columns strengthened using carbon fiber-reinforced polymer](#). *Construction and Building Materials*, 247:118548.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] TCVN 10303:2014. *Bê tông - kiểm tra và đánh giá cường độ chịu nén*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Ali, T. K. M. (2014). Flexural behavior of reinforced beams reinforced with corrosive rebar. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 5(1):64.
- [22] 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.