

Nghiên cứu hiệu quả gia cường cột trong công trình cao tầng bê tông cốt thép bằng tấm CFRP

Effect of the strengthening of reinforced concrete column in high rise buildings by carbon fiber reinforced polymer (CFRP)

Ngày nhận bài: 09/8/2019

Ngày sửa bài: 16/9/2019

Ngày chấp nhận đăng: 01/10/2019

**Nguyễn Thị Thanh,
Nguyễn Quang Tùng**

TÓM TẮT

Việc sử dụng tấm CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) đã trở nên phổ biến trong việc gia cường các cấu kiện công trình cao tầng bê tông cốt thép bị hư hại, đặc biệt là cấu kiện cột bê tông cốt thép vì những ưu điểm của chúng mang lại như cường độ chịu kéo cao, mô đun đàn hồi lớn, trọng lượng nhẹ, khả năng chống mài mòn cao, cách điện, chịu nhiệt tốt, bền theo thời gian. Ngoài ra, hiệu quả gia cường từ phương pháp này còn đến từ việc thi công nhanh chóng, dễ dàng, không ảnh hưởng đến kiến trúc và phù hợp với mọi hình dạng cấu kiện. Trong nghiên cứu này, tác giả đã phân tích hiệu quả của việc gia cường bằng tấm CFRP cho cấu kiện cột bê tông cốt thép thông qua việc tính toán đánh giá khả năng chịu lực bằng phương pháp biểu đồ tương tác theo Hướng dẫn ACI 440.2R-08. Kết quả chỉ ra rằng, khả năng chịu lực dọc và mô men (nén - uốn) của cột được tăng lên đáng kể thông qua sự mở rộng phạm vi của biểu đồ tương tác tương ứng với số tấm (bề dày) CFRP gia cường. Bên cạnh đó, khi so sánh hiệu quả gia cường của phương pháp đối với hai trường hợp nén thuần túy và nén - uốn kết hợp thì nhận thấy rằng phương pháp gia cường CFRP hiệu quả hơn đối với trường hợp nén thuần túy.

Từ khóa: Gia cường, CFRP, nhà cao tầng, cột bê tông cốt thép, khả năng chịu lực, biểu đồ tương tác.

ABSTRACT

Using CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) has become popular in reinforcing damaged high-rise buildings, especially reinforcement of reinforced concrete column because of their advantages as high tensile strength, large modulus of elasticity, light weight, high abrasion resistance, electrical insulation, good heat resistance, durable over time. In addition, the strengthening effect from this method also comes from fast and easy construction, does not affect architecture, suitable for all shapes and structures. In this paper, the author analyzed the effect of reinforcing by CFRP for reinforced concrete column by calculating and evaluating of interactive diagram method by ACI 440.2R-08. The results show that axial strength and moment (compression - bending) of reinforced concrete column are increased significantly through the expansion of the scope of the interactive diagram corresponding to the number of reinforced CFRP ply (thickness). Besides, when comparing the reinforcing effect of the method for two cases of pure axial compression and combined axial compression and bending, it was found that the strengthening by CFRP method is more effective for pure axial compression.

Key words: Strengthening, CFRP, high-rise building, reinforced concrete column, axial strength and moment, interactive diagram.

Nguyễn Thị Thanh

Khoa Cơ khí - Công nghệ, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế

Nguyễn Quang Tùng

Khoa Xây dựng DD&CN, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng

1. Giới thiệu chung

Cùng với sự bùng nổ dân số và sự phát triển của kỹ thuật xây dựng, ngày càng nhiều nhà cao tầng được thiết kế và xây dựng. Với tầm quan trọng của loại công trình này, các phương pháp tính toán tải trọng cũng như phân tích ứng xử liên tục được thay đổi để phù hợp hơn với tính chất của công trình. Trong suốt thời gian kể từ khi các nhà cao tầng

được đưa vào tính toán và thiết kế, đã có nhiều sự thay đổi trong quan niệm tính toán và bố trí kết cấu cho loại công trình này. Nếu như trước đây, công trình cao tầng phải được xem là vật cứng tuyệt đối, không chịu hư hỏng khi có động đất để đảm bảo sinh mạng con người và tài sản thông qua việc bảo vệ công trình thì ngày nay, mục tiêu thiết kế được thay đổi, công trình có thể bị hư hại, nhưng không được sụp đổ để

đảm bảo an toàn cho tính mạng và tài sản của con người. Đây là bước chuyển biến quan trọng, bởi lúc này công trình được cho phép có hư hại. Sự hư hại của công trình được kể đến thông qua việc cho phép xuất hiện các vết nứt khi phân tích kết cấu. Tuy nhiên, các công trình này vẫn chưa hoàn toàn bị phá hoại, việc đánh sập và xây mới công trình sẽ rất tốn kém. Để đảm bảo điều kiện sử dụng bình thường của công trình, cần phải có các biện pháp gia cường kết cấu.

Trong quá trình khai thác và sử dụng công trình, các cấu kiện dầm, vách, cũng như kết cấu cột bê tông cốt thép (BTCT) trong nhà cao tầng chịu tác động của môi trường xung quanh dưới các hình thức khác nhau như các tác động cơ học, lý học, hóa học và những hư hỏng, sự cố do những sai sót trong các khâu khảo sát, thiết kế hoặc thi công. Những tác động này dẫn đến tình trạng không còn đáp ứng được công năng sử dụng công trình hoặc mất an toàn về phương diện chịu tải. Với những tác động đặc biệt như động đất, cháy nổ... có thể gây ra những sự cố nghiêm trọng, có khi dẫn đến tình trạng sụp đổ từng phần (Hình 1) hoặc toàn bộ công trình. Hoặc do nhu cầu thay đổi về sử dụng như cải tiến công nghệ, đổi mới thiết bị, thay đổi công năng như những công trình có nhu cầu mở rộng mặt bằng, nâng thêm chiều cao, thêm tầng dẫn đến thay đổi sơ đồ kết cấu, thay đổi tải trọng, khả năng chịu tải của kết cấu cũ không còn đáp ứng được sự tác động của tải trọng mới với sơ đồ tính toán tương ứng Để cải thiện về mặt chịu tải trọng cũng như công năng nhằm đảm bảo an toàn, tăng tuổi thọ hoặc tăng hiệu quả sử dụng của công trình cần phải gia cường, sửa chữa các bộ phận kết cấu công trình đó bằng các phương pháp khác nhau [1].



Hình 1. Kết cấu cột BTCT bị phá hoại [1]

Nhiều năm trước đây, người ta đã sử dụng phương pháp gia cường kết cấu cột truyền thống như: phương pháp tăng tiết diện, phương pháp ốp thép hình. Trong vòng 20 năm gần đây, việc sử dụng vật liệu gia cường cốt sợi tổng hợp (tấm composite) từ sợi các-bon CFRP đã thay thế dần các phương pháp truyền thống.

Các nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm trước đây về hiệu quả giải pháp gia cường kết cấu cột với các tấm composite đã được thực hiện. Lớp gia cường bằng vật liệu composite không chỉ được dùng cho phần chịu kéo của kết cấu mà còn có thể ứng dụng cho việc gia tăng sức chịu nén do hiệu ứng nén kiểm chế. Các kết cấu chịu nén lớn như cột bê tông cốt thép, việc hạn chế biến dạng nở hông có thể làm tăng sức chịu tải của kết cấu. Lớp gia cường lúc này đóng vai trò như là cốt đai ngăn cản biến dạng nở hông của cột [2]. T.C. Rousakis, A.I. Karabinis [2] đã khẳng định có sự tham gia của lớp vật liệu gia cường trong quá trình hình thành và phát triển hiệu ứng nén kiểm chế và mức độ gia tăng cường độ bê tông do nén kiểm chế tỷ lệ với mức độ gia cường. Ngoài ra, kích thước của mặt cắt cũng ảnh hưởng tới hiệu quả của việc gia cường [2].

Cũng theo nhóm nghiên cứu K.Pradeeba, Dr.A.Rajasekaran, Dr.P.Anupriya [3], phương pháp gia cường cột bọc CFRP giúp cải thiện khả năng chịu tải lên đến 80%, trì hoãn hình thành vết nứt và khả năng hấp thụ năng lượng của cột.

Tại Việt Nam, nhóm nghiên cứu Tạ Văn Phấn, Nguyễn Vinh Sáng [1] đã tổng hợp các phương pháp tính toán gia cường cột BTCT cho cột chịu nén lệch tâm trong đó có phương pháp dán tấm FRP cho các tác giả và Tiêu chuẩn - hướng dẫn khác nhau.

Trong thực tế, cột chịu nén lệch tâm là kết cấu phổ biến trong các tòa nhà cao tầng và các loại kết cấu khác. Các cột biên, đặc biệt là các cột góc thường phải chịu sự kết hợp của tải trọng nén dọc trục và mô

men uốn (nén - uốn kết hợp). Hầu hết các nghiên cứu được thực hiện trong việc tăng cường FRP cho các cột chịu nén thuần túy, ứng xử cứng như khả năng chịu lực của các cột được bọc FRP dưới ảnh hưởng của tải lệch tâm ít được biết đến so với các cột chịu tải đúng tâm.

Trong bài báo này, tác giả trình bày kết quả tính toán khả năng chịu lực cho cấu kiện cột bê tông cốt thép chịu tải nén-uốn kết hợp được bọc với số lớp (bề dày) CFRP khác nhau. Phạm vi nghiên cứu giới hạn với cột BTCT có tiết diện hình vuông trong nhà cao tầng có thay đổi công năng, sử dụng phương pháp biểu đồ tương tác theo Hướng dẫn ACI 440.2R-08. Từ đó rút ra các kết luận về hiệu quả của phương pháp gia cường CFRP.

2. Phương pháp gia cường cột bằng tấm FRP

2.1. Tổng quan về phương pháp gia cường cột bằng tấm FRP

Bê tông là vật liệu xây dựng được sử dụng rộng rãi nhất. Bởi vì những ưu điểm của nó. Tuy nhiên bê tông có khả năng chịu kéo và có độ dẻo hạn chế do vậy thường xảy ra vết nứt trong kết cấu. Các vết nứt nhỏ có trong bê tông và do độ bền kéo kém; các vết nứt mở rộng dưới tác dụng của tải trọng, dẫn đến phá hoại giòn của bê tông. Trong hai thập kỷ vừa qua, việc sử dụng vật liệu cốt sợi tổng hợp FRP gia cố cấu kiện như một lớp bọc bên ngoài đã trở nên phổ biến cho việc tăng cường và sửa chữa các kết cấu bê tông bị hư hại vì những ưu điểm của chúng như cường độ chịu kéo cao, trọng lượng nhẹ, độ bền cao, phù hợp với mọi hình dạng cấu kiện, thi công nhanh chóng, dễ dàng, không ảnh hưởng đến kiến trúc, chống ăn mòn tốt. Ý tưởng sử dụng vật liệu Polymer cốt sợi FRP gia cường cho kết cấu bê tông đã xuất hiện và phát triển từ cuối thập niên 1980 ở Châu Âu (đặc biệt là Thụy Sĩ) và Nhật Bản. Những sáng kiến này đã được theo dõi liên tục sau đó bằng hàng loạt các nghiên cứu và ứng dụng thử nghiệm ở Hoa Kỳ và Canada. Những năm đầu thập niên 1990, việc ứng dụng FRP vào tăng cường khả năng chịu cắt và chịu uốn cho kết cấu cũng được phát triển.

Tại Việt Nam, FRP mới được biết đến trong khoảng 10 năm gần đây. Tấm sợi Carbon gia cường kết cấu (CFRP) được áp dụng đặc biệt trong việc sửa chữa và gia cường các công trình bằng bê tông, khi mà các giải pháp truyền thống tỏ ra không hiệu quả về tính khả thi và chi phí. CFRP được sử dụng để gia cố, tăng khả năng chịu lực của hệ thống cầu giao thông, bản sàn, dầm, cột và vách cứng. Hiệu quả của việc sử dụng CFRP còn đến từ khả năng áp dụng dễ dàng, không tác dụng khoan đục vào kết cấu hiện hữu, đặc biệt không ảnh hưởng đến các hoạt động của công trình trong quá trình sửa chữa.

Các cột bê tông được gia cường bằng cách dán vật liệu composite FRP xung quanh nó. Kỹ thuật gia cường này rất hiệu quả với cột tròn. Khi cột bê tông bọc FRP chịu tải trọng nén dọc trục, nó sẽ có xu hướng nở hông (mở rộng tiết diện). Sự mở rộng này bị chống lại bởi tấm FRP. Ở trạng thái này, hiệu suất của lõi bê tông bị ảnh hưởng đáng kể bởi áp lực gia cường. Việc sử dụng các tấm vật liệu tổng hợp FRP giúp tăng cường khả năng chịu lực và kiểm chế sự nở hông trong cột BTCT [2].

Kết quả nghiên cứu của M.N.S. Hadi (2006) [5] cho thấy phương pháp bọc FRP với số lớp phù hợp sẽ tăng độ bền, độ dẻo và khả năng hấp thụ năng lượng cao hơn so với cột BTCT không được gia cường trong trường hợp chịu tải lệch tâm. K. Olivová, J. Bilčík [3] cho thấy phương pháp gia cường FRP làm tăng khả năng chịu lực của cột BTCT chịu tải lệch tâm lên 10%.

2.2. Tính chất cơ lý của vật liệu FRP

Vật liệu FRP - Fiber Reinforced Polymer là một dạng vật liệu Composite được chế tạo từ các vật liệu sợi, trong đó có ba loại vật liệu sợi thường được sử dụng là sợi carbon CFRP, sợi thủy tinh GFRP và sợi aramid AFRP. Đặc tính của các loại sợi này là có cường độ chịu kéo rất cao, mô đun đàn hồi rất lớn, trọng lượng nhỏ, khả năng chống mài mòn cao, cách điện, chịu nhiệt tốt, bền theo thời gian. Các dạng FRP dùng trong xây dựng thường có các dạng như: FRP dạng tấm; FRP dạng thanh, FRP dạng cáp, FRP dạng vải, dạng cuộn... Trong sửa chữa và gia cố công trình xây dựng thường dùng các loại FRP dạng tấm và dạng

vải. Trong số các vật liệu composite dùng để gia cường kết cấu bằng bê tông cốt thép thì vật liệu tấm sợi các bon (viết tắt CFRP) được sử dụng rộng rãi. Do vật liệu sợi các bon (CFRP) có các đặc tính tốt hơn so với các vật liệu cốt sợi khác như thủy tinh (GFRP) và polymer aramid (AFRP).

2.2.1. Cấu trúc vật liệu FRP

Thành phần cấu tạo cơ bản của vật liệu FRP gồm nhựa nền, cốt sợi, lớp áo bảo vệ. Độ bền, mức tăng khả năng chịu lực cũng như hiệu quả gia cường phụ thuộc vào các thành phần cấu tạo và cách gia cố, bố trí vật liệu.

a. Khối lượng riêng

Vật liệu FRP có khối lượng riêng trong khoảng từ 1,2 tới 2,1 g/cm³, theo đó nhỏ hơn thép từ 4 đến 6 lần tùy thuộc vào loại cốt sợi hoặc chất độn (xem Bảng 1). Việc giảm khối lượng riêng giúp giảm giá thành vận chuyển, giảm phần tĩnh tải gia tăng của kết cấu và có thể dễ dàng xử lý vật liệu ở công trường.

Bảng 1. Khối lượng riêng của các loại vật liệu composite, (g/cm³) [6]

Thép	Cốt sợi thủy tinh	Cốt sợi các bon	Cốt sợi aramid
7,9	1,2 ÷ 2,1	1,5 ÷ 1,6	1,2 ÷ 1,5

b. Hệ số dẫn nhiệt

Hệ số dẫn nhiệt của vật liệu FRP chịu lực mỗi chiều khác nhau theo phương dọc và ngang tùy thuộc vào kiểu loại cốt sợi, cách dệt, loại nhựa nền và tỷ lệ cốt sợi (xem Bảng 2).

Bảng 2. Hệ số dẫn nhiệt của các loại vật liệu composite [6]

Chiều	Hệ số dẫn nhiệt (×10 ⁻⁶ /°C)		
	GFRP	CFRP	AFRP
Theo chiều dọc α _L	6 ÷ 10	-1 ÷ 0	-6 ÷ -2
Theo chiều ngang α _T	19 ÷ 23	22 ÷ 50	60 ÷ 80

Ghi chú: đây là các giá trị điển hình đối với hàm lượng thể tích cốt sợi thay đổi trong phạm vi 0,5 tới 0,7 [6].

c. Đặc tính cơ học

Vật liệu tổng hợp FRP là vật liệu dị hướng, có nghĩa là tính chất của chúng thay đổi theo hướng sợi. Các tính chất cơ học phụ thuộc vào các thông số thiết kế hỗn hợp như định hướng cốt sợi và khối lượng, cũng như độ dày và số lượng các lớp sợi gia cố.

+ Cường độ chịu kéo: Ứng xử kéo của vật liệu này được biểu diễn bằng quan hệ ứng suất - biến dạng đàn hồi tuyến tính đến khi bị phá hoại, và trong trường hợp này sự phá hoại là đột ngột và giòn. Cường độ chịu kéo của vật liệu cốt sợi composite phụ thuộc vào nhiều tham số như: kiểu cốt sợi, chiều sắp xếp của cốt sợi, lượng cốt sợi và phương pháp cũng như điều kiện chế tạo cốt sợi ảnh hưởng tới đặc tính chịu kéo của vật liệu này.

+ Mô đun đàn hồi: Các mô đun đàn hồi của vật liệu FRP cốt sợi thủy tinh trong các cấu kiện xây dựng thường thấp hơn so với thép hoặc nhôm. Tuy nhiên, vật liệu FRP sợi carbon nếu cần có thể được thiết kế để cung cấp các đặc tính mô đun đàn hồi tương đương với thép hoặc nhôm. Mô đun sợi riêng, hướng sợi trong các lớp, khối lượng sợi (so với nhựa) và độ dày các lớp sẽ ảnh hưởng đến giá trị mô đun đàn hồi và trở nên quan trọng trong việc lựa chọn vật liệu cho các thiết kế.

Các đặc tính kỹ thuật của tấm CFRP có trên thị trường và so sánh các đặc tính với các loại vật liệu truyền thống được tổng hợp ở Bảng 3 và Bảng 4.

Bảng 3. Đặc tính kỹ thuật của tấm CFRP có trên thị trường [7]

Mật độ sợi (g/m ²)	Độ dày (mm)	Cường độ chịu kéo (MPa)	Mô đun đàn hồi (GPa)	Độ giãn dài (%)	Khổ tấm (cm)
200	0,111	3200 ÷ 3400	220 ÷ 240	1,6 ÷ 1,8	10,15,20,25,30,33, 50,60
230	0,127	3200 ÷ 3400	220 ÷ 240	1,6 ÷ 1,8	
300	0,167	3200 ÷ 3400	220 ÷ 240	1,6 ÷ 1,8	
400	0,222	3200 ÷ 3400	220 ÷ 240	1,6 ÷ 1,8	
450	0,250	3200 ÷ 3400	220 ÷ 240	1,6 ÷ 1,8	
530	0,294	3200 ÷ 3400	220 ÷ 240	1,6 ÷ 1,8	

600	0,333	3200 ÷ 3400	220 ÷ 240	1,6 ÷ 1,8
-----	-------	-------------	-----------	-----------

Ghi chú: Thông số ở bảng 3 cho vật liệu CFRP nhập khẩu từ Nhật Bản hoặc Trung Quốc

Bảng 4. So sánh một số đặc trưng của CFRP với các vật liệu khác [7]

Thông số kỹ thuật	Thép XD CB400-V	Thép hình XCT38	Cáp dự ứng lực	CFRP
Trọng lượng riêng (kg/m ³)	7850	7850	7850	1800
Độ dày lớp gia cố (mm)	-	-	-	0,5
Cường độ chịu kéo (MPa)	400 ÷ 500	260 ÷ 300	~1950	~3400
Độ giãn dài khi đứt (%)	≥14	≥19	~5,7	~1,6
Mô đun đàn hồi (GPa)	210	210	198	240

2.3. Khả năng chịu lực cột bê tông cốt thép gia cường bằng FRP theo hướng dẫn ACI 440.2R-08

Phạm vi áp dụng của hướng dẫn ACI 440.2R-08: Các cột BTCT được gia cường bằng cách bọc vật liệu composite FRP xung quanh nó (bao gồm cả nén đúng tâm và lệch tâm). Các quy định trong hướng dẫn này không đề xuất cho các cấu kiện có tỷ lệ h/b > 2 hoặc kích thước mặt b hoặc h vượt quá 36 in. (900 mm), trừ khi có thử nghiệm chứng minh tính hiệu quả của chúng. Với những bê tông có cường độ từ 75 MPa trở lên cần có thực nghiệm chứng minh.

2.3.1. Cột chịu nén đúng tâm

Khả năng chịu lực dọc của cột khi cột sử dụng cốt đai theo dạng xoắn ốc được tính:

$$\phi P_n = 0.85\phi [0.85f'_{cc}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (1)$$

Khả năng chịu lực dọc của cột khi cột sử dụng cốt đai đơn hình vuông, chữ nhật được tính:

$$\phi P_n = 0.8\phi [0.85f'_{cc}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (2)$$

Trong đó, cường độ nén bê tông gia cố bằng FRP f'_{cc} và áp lực ngang do FRP (chống nở hông) f_i được tính theo công thức đã đưa vào hệ số suy giảm cường độ FRP $\psi_i = 0,95$ như sau:

$$f'_{cc} = f'_c + \psi_i 3,3\kappa_o f_i \quad (3)$$

$$f_i = \frac{2E_f n t_f \epsilon_{fe}}{D} \quad (4)$$

Đối với tiết diện cột hình vuông hoặc hình chữ nhật:

$$D = \sqrt{b^2 + h^2} \quad (5)$$

Biến dạng nén tối đa trong bê tông gia cố FRP ϵ_{ccu} :

$$\epsilon_{ccu} = \epsilon'_c \left(1.50 + 12\kappa_b \frac{f_i}{f'_c} \left(\frac{\epsilon_{fe}}{\epsilon'_c} \right)^{0.45} \right) \quad (6)$$

Biến dạng nén tối đa được giới hạn bởi điều kiện:

$$\epsilon_{ccu} \leq 0.01 \quad (7)$$

Các yếu tố hình dạng: $\kappa_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h} \right)^2$

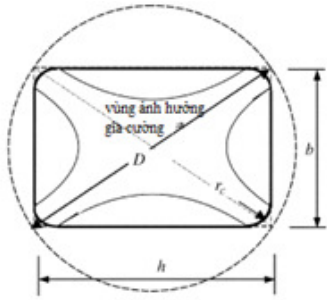
$$\kappa_b = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h} \right)^{0.5} \quad (8)$$

$$\kappa_b = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h} \right)^{0.5} \quad (9)$$

Vùng làm việc hiệu quả của tiết diện gia cường được thể hiện như hình 2 và được tính:

Vùng làm việc hiệu quả của tiết diện gia cường được thể hiện như hình 2 và được tính:

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[\left(\frac{b}{h} \right) (h - 2r_c)^2 + \left(\frac{h}{b} \right) (b - 2r_c)^2 \right] - \rho_g}{2A_g (1 - \rho_g)} \quad (10)$$



Hình 2. Vùng làm việc của tiết diện cột gia cường [8]

Điều kiện về tỷ lệ gia cố tối thiểu: $\frac{f_l}{f_c} > 0,08$ (11)

Yếu tố môi trường làm giảm các đặc tính của FRP, các thuộc tính thiết kế phải được xác định bằng cách kể đến hệ số triết giảm do yếu tố môi trường được đưa ra trong Bảng 5 cho loại sợi thích hợp và điều kiện làm việc với môi trường.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (12)$$

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^* \quad (13)$$

Các mô đun đàn hồi được đưa ra trong phương trình này sẽ giống như giá trị ban đầu được báo cáo bởi nhà sản xuất.

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\epsilon_{fu}} \quad (14)$$

Bảng 5. Hệ số triết giảm do yếu tố môi trường cho các hệ thống FRP khác nhau [6]

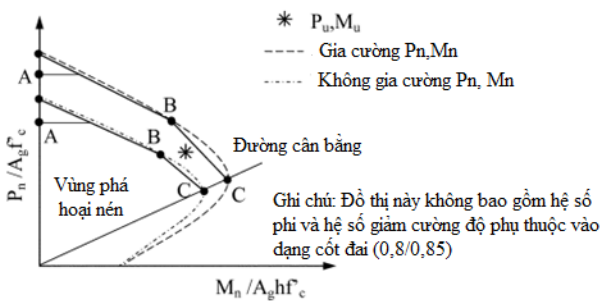
Điều kiện tiếp xúc	Dạng sợi	Hệ số triết giảm do yếu tố môi trường C_E
Tiếp xúc trong	CFRP	0,95
	GFRP	0,75
	AFRP	0,85
Cấu kiện làm việc bên ngoài môi trường (cầu, cầu tàu, và nhà để xe không có cửa)	CFRP	0,85
	GFRP	0,65
	AFRP	0,75
Cấu kiện làm việc ở môi trường xâm thực (nhà máy hóa học và nhà máy xử lý nước thải)	CFRP	0,85
	GFRP	0,50
	AFRP	0,70

Cần hạn chế sự biến dạng của tấm FRP để đảm bảo tính nguyên vẹn của cấu kiện:

$$\epsilon_{fe} = 0.004 \leq K_c \epsilon_{fu} \quad (15)$$

2.3.2. Trường hợp cột chịu nén - uốn dọc trục kết hợp

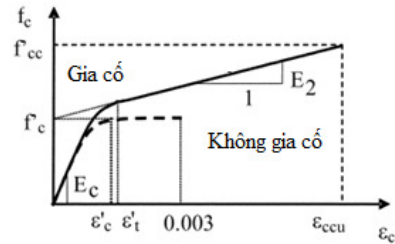
Phạm vi chịu lực của cột chịu nén - uốn kết hợp được xác định bằng phương pháp biểu đồ tương tác (BĐTT) lực dọc - mô men (P-M) (xem Hình 3) đi qua ba điểm đặc biệt A, B, C.



Hình 3. Biểu đồ tương tác P-M [6]

Biểu đồ tương tác P-M có thể được phát triển bằng cách thỏa mãn

biến dạng tương ứng và cân bằng lực dùng mô hình của mỗi quan hệ ứng suất-biến dạng cho bê tông gia cường FRP (xem Hình 4).

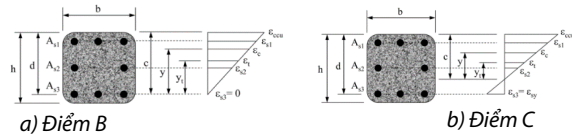


Hình 4. Đồ thị biểu diễn mối quan hệ giữa ứng suất - biến dạng cho cấu kiện bê tông cốt thép gia cố bằng tấm FRP của tác giả Lam và Teng [8]

Mô đun đàn hồi của bê tông được gia cường FRP được

tính: $E_2 = \frac{f_{cc} - f_c}{\epsilon_{ccu}}$ (16)

Biến dạng chuyển tiếp được tính: $\epsilon'_t = \frac{2f'_c}{E_c - E_2}$ (17)



Hình 5. Phân phối biến dạng cho điểm B và C để đơn giản hóa biểu đồ tương tác [6]

+ Điểm A (nén thuần túy) tương ứng tại biến dạng nén dọc trục của bê tông gia cường ϵ_{ccu} .

+ Điểm B tương ứng với đường phân bố biến dạng bằng 0 ở lớp cốt thép dọc bố trí gần mặt kéo nhất và biến dạng nén ϵ_{ccu} trên mặt nén (xem Hình 5).

+ Điểm C tương ứng với đường phân bố biến dạng nén tối đa ϵ_{ccu} và một biến dạng kéo ϵ_{sy} ở lớp cốt thép dọc gia cường gần mặt kéo nhất (xem Hình 5).

Điểm A : Khả năng chịu lực dọc được tính theo công thức (1) hoặc (2).

Khả năng chịu lực dọc và mô men tại điểm B và C thuộc biểu đồ tương tác được tính:

$$\phi P_{n(B,C)} = \phi \left[(A(y_t)^3 + B(y_t)^2 + C(y_t) + D) + \sum A_{si} f_{si} \right] \quad (18)$$

$$\phi M_{n(B,C)} = \phi \left[(E(y_t)^4 + F(y_t)^3 + G(y_t)^2 + H(y_t) + I) + \sum A_{si} f_{si} d_i \right] \quad (19)$$

Trong đó:

$$A = \frac{-b(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right)^2 \quad (20)$$

$$B = \frac{b(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right) \quad (21)$$

$$C = -bf'_c \quad (22)$$

$$D = bcf'_c + \frac{bcE_2}{2} (\epsilon_{ccu}) \quad (23)$$

$$E = \frac{-b(E_c - E_2)^2}{16f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right)^2 \quad (24)$$

$$F = b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_c - E_2)^2}{12f'_c} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right)^2 + \frac{b(E_c - E_2)}{3} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right) \quad (25)$$

$$G = - \left(\frac{b}{2} f'_c + b \left(c - \frac{h}{2} \right) \frac{(E_c - E_2)}{2} \left(\frac{\epsilon_{ccu}}{c} \right) \right) \quad (26)$$

$$H = bf_c' \left(c - \frac{h}{2} \right) \quad (27)$$

$$I = \frac{bc^2}{2} f_c' - bcf_c' \left(c - \frac{h}{2} \right) + \frac{bc^2 E_z}{3} (\epsilon_{ccu}) - \frac{bc E_z}{2} \left(c - \frac{h}{2} \right) (\epsilon_{ccu}) \quad (28)$$

Trong đó c là khoảng cách từ sợi nén ngoài cùng đến trục trung hòa và được đưa ra bởi biểu thức (29) hoặc (30)

$$c = d, \text{ cho điểm B} \quad (29)$$

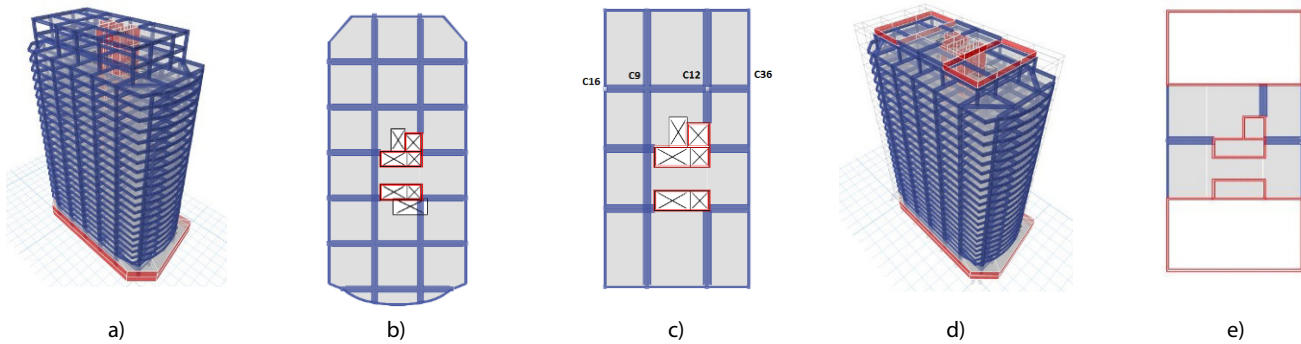
$$c = d \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{sy}}, \text{ cho điểm C} \quad (30)$$

d: Khoảng cách từ trọng tâm của lớp thép dọc thứ i đến trọng tâm hình học của mặt cắt ngang.

f_{si} là ứng suất trong lớp thứ i của thép dọc gia cố. Các giá trị được tính bằng các hình tam giác tương tự từ phân bố biến dạng tương ứng với điểm B và C.

Tham số y_t đại diện cho tọa độ hàng dọc trong vùng nén được đo từ vị trí trục trung hòa tương ứng với biến dạng chuyển tiếp ϵ_t ở biểu thức (31).

$$y_t = c \frac{\epsilon_t}{\epsilon_{ccu}} \quad (31)$$



Hình 6. Mô hình công trình bằng phần mềm phân tích kết cấu Etabs v.17

3.2. Thông số cột được gia cường CFRP

Các thông số cột tính toán gia cường và vật liệu CFRP sử dụng được thể hiện ở Bảng 5, Bảng 6 và Hình 7.

Bảng 5. Thông số cột C12 tính toán gia cường CFRP

	f_c	22,1 MPa
	f_y	401,5 MPa
	r_c	25 mm
	Thép cột	12 ϕ 32
	A_g	360000 mm ²
	A_{st}	9646 mm ²
	ρ_{gr} , %	2,68 %

Bảng 7. Khả năng chịu lực tại các điểm đại diện A, B, C thuộc biểu đồ tương ứng với số lớp CFRP

Điểm	Không gia cường		n = 1 lớp		n = 2 lớp		n = 3 lớp		n = 4 lớp	
	ϕP_n , kN	ϕM_n , kNm	ϕP_n , kN	ϕM_n , kNm	ϕP_n , kN	ϕM_n , kNm	ϕP_n , kN	ϕM_n , kNm	ϕP_n , kN	ϕM_n , kNm
A	5436	0	5811	0	6185	0	6559	0	6934	0
B	4790	442	5115	812	5307	794	5485	777	5655	761
C	2071	677	2453	801	2836	813	3124	824	3189	829

3. Đánh giá hiệu quả gia cường cột trong nhà cao tầng bằng tấm CFRP

3.1. Mô hình bài toán

Xét công trình bê tông cốt thép có quy mô 22 tầng nổi và 02 tầng hầm, chiều cao tầng điển hình 3,3 m, chiều cao tầng kỹ thuật 4.6m khoảng cách giữa các cột $l = 9m$. Tải trọng tác dụng lên công trình bao gồm trọng lượng bản thân g , hoạt tải sử dụng $q=300 \text{ daN/m}^2$, tải trọng gió $W_o=95 \text{ daN/m}^2$ và tải trọng động đất. Công trình có cấp dèo trung DCM, hệ số tầm quan trọng $\gamma_1=1,25$, chịu gia tốc nền $a_{gr}=0,9869 \text{ m/s}^2$. Vật liệu sử dụng là bê tông B30, cốt thép dọc CIII. Kích thước tiết diện dầm, cột và vách được xác định theo giá trị tải trọng tác dụng và thay đổi theo chiều cao công trình.

Tòa nhà trên được phân tích theo hai trường hợp khác nhau:

+Trường hợp thứ nhất: Tòa nhà bê tông cốt thép, cấu kiện cột bê tông cốt thép được tính toán thiết kế đủ điều kiện chịu lực.

+Trường hợp thứ hai: Tòa nhà với tải trọng được tăng cường (có thêm bể nước mái) lúc này cấu kiện cột được thiết kế trong trường hợp một không còn đủ khả năng chịu lực. Sử dụng phương pháp gia cường tấm CFRP cho cấu kiện cột BTCT.

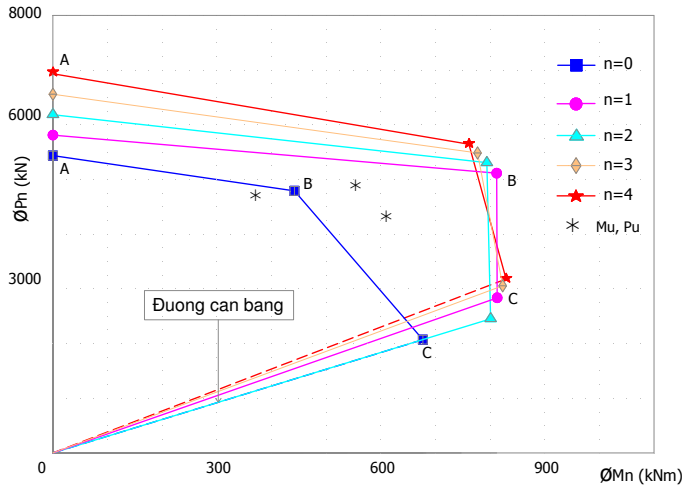
Hình 7. Chi tiết mặt cắt ngang cột	Ghi chú: Cấu kiện cột sử dụng đai vuông
------------------------------------	---

Bảng 6. Đặc tính vật liệu CFRP do nhà sản xuất cung cấp [12]

Chiều dày mỗi lớp	0,33 mm
Cường độ kéo giới hạn f^*_{fu}	3792 MPa
Biến dạng phá hoại ϵ^*_{fu}	0,0167 mm/mm
Mô đun đàn hồi E_r	227527 MPa

3.3. Kết quả tính toán gia cường

Kết quả tính toán gia cường cột C12 với số tấm CFRP khác nhau được trình bày ở Bảng 7 và BĐTT được thể hiện ở Hình 8.



Hình 8. BĐTT tương ứng với số lớp gia cường khác nhau

Nhận xét: Các điểm nội lực P_u và M_u đều nằm trên đường cân bằng và thuộc phạm vi đường cong tương tác và với số lớp gia cường $n=4$ thỏa mãn điều kiện về tỷ lệ gia cố tối thiểu nên cần 4 lớp CFRP để cột C12 đủ chịu lực.

Nhìn vào BĐTT hình 8 và kết quả bảng 7 nhận thấy việc gia cường bằng cách dán tấm CFRP làm tăng khả năng chịu lực của cấu kiện một cách đáng kể thông qua việc mở rộng phạm vi của BĐTT tương ứng với số tấm (bề dày) CFRP gia cường.

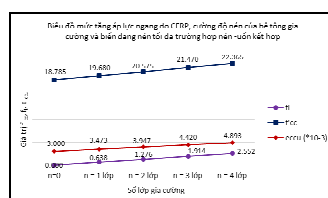
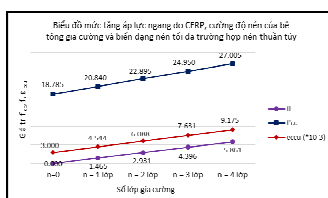
So sánh áp lực ngang do CFRP (f_i), cường độ nén của bê tông được gia cường (f_{cc}) và biến dạng nén tối đa của bê tông gia cường (ϵ_{ccu}) từ kết quả tính toán theo hướng dẫn ACI 440.2R-08 được thể hiện như Bảng 8, bảng 9 và biểu đồ Hình 9 và Hình 10.

Bảng 8. So sánh áp lực ngang do CFRP, cường độ nén của bê tông và biến dạng nén tối đa trường hợp nén thuần túy tương ứng số lớp gia cường khác nhau

Trường hợp nén thuần túy	f_i (MPa)	f_{cc} (MPa)	ϵ_{ccu} ($\times 10^{-3}$)
Không gia cường	0.000	18.785	3.000
n = 1 lớp	1.465	20.840	4.544
n = 2 lớp	2.931	22.895	6.088
n = 3 lớp	4.396	24.950	7.631
n = 4 lớp	5.861	27.005	9.175

Bảng 9. So sánh áp lực ngang do CFRP, cường độ nén của bê tông và biến dạng nén tối đa trường hợp nén thuần túy tương ứng số lớp gia cường khác nhau

Trường hợp nén-uốn	f_i (MPa)	f_{cc} (MPa)	ϵ_{ccu} ($\times 10^{-3}$)
Không gia cường	0.000	18.785	3.000
n = 1 lớp	0.638	19.680	3.473
n = 2 lớp	1.276	20.575	3.947
n = 3 lớp	1.914	21.470	4.420
n = 4 lớp	2.552	22.365	4.893



a) Trường hợp nén thuần túy

b) Trường hợp nén -uốn kết hợp

Hình 9. Biểu đồ mức tăng áp lực ngang do CFRP, cường độ nén của bê tông gia cường và biến dạng nén tối đa

Bảng 10. So sánh mức tăng cường độ nén bê tông gia cường và biến dạng nén tối đa tương ứng số lớp gia cường khác nhau

Trường hợp nén thuần túy	Mức tăng f_{cc} (%)	Mức tăng ϵ_{ccu} ($\times 10^{-3}$) (%)	Trường hợp nén-uốn	Mức tăng f_{cc} (%)	Mức tăng ϵ_{ccu} ($\times 10^{-3}$) (%)
n = 1 lớp	11	51	n = 1 lớp	5	16
n = 2 lớp	22	103	n = 2 lớp	10	32
n = 3 lớp	33	154	n = 3 lớp	14	47
n = 4 lớp	44	206	n = 4 lớp	19	63

Từ kết quả Bảng 8, Bảng 9, Bảng 10 và Hình 9 cho thấy rằng áp lực chống nở hông do CFRP, cường độ nén của bê tông được gia cường và biến dạng nén tối đa tăng lên theo số lớp (bề dày) CFRP gia cường. Đối với trường hợp nén-uốn kết hợp, mức tăng tối thiểu của cường độ nén của bê tông được gia cường là 5% và biến dạng nén tối đa là 16%. Đối với trường hợp nén thuần túy, tỷ lệ tăng này là lớn hơn. Điều này đồng nghĩa hiệu quả gia cường CFRP trong việc tăng khả năng chịu lực và hiệu ứng hạn chế nở hông trường hợp nén thuần túy là tốt hơn so với trường hợp nén - uốn kết hợp.

4. Kết luận

Căn cứ kết quả đạt được từ nghiên cứu này, một số kết luận được rút ra như sau:

Phương pháp gia cường bằng cách dán tấm CFRP làm tăng khả năng chịu lực của cột BTCT một cách đáng kể thông qua việc mở rộng phạm vi của BĐTT tương ứng với số tấm (bề dày) CFRP gia cường.

Mặt khác, nhận thấy rằng áp lực chống nở hông do CFRP, cường độ nén của bê tông được gia cường và biến dạng nén tối đa tăng lên theo số lớp gia cường. Đối với trường hợp nén thuần túy, tỷ lệ tăng này là lớn hơn. Điều này đồng nghĩa hiệu quả gia cường CFRP trong việc tăng khả năng chịu lực và hiệu ứng hạn chế nở hông trường hợp nén thuần túy là tốt hơn so với trường hợp nén - uốn kết hợp.

TAI LIỆU THAM KHẢO

- Tạ Văn Phấn, Nguyễn Vinh Sáng, Một số phương pháp gia cường kết cấu cột bê tông cốt thép, tạp chí khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường - số 57 (6/2017).
- T.C. Rousakis, A.I. Karabinis, *Substandard reinforced concrete members subjected to compression: FRP confining effects*, Materials Science, RILEM, 2008.
- K.Pradeeba, Dr.A.Rajasekaran, Dr.P.Anupriya, *Strengthening Of RC Circular Column Wrapped With Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (April, 2018).
- M.N.S. Hadi (2006), *Behavior of FRP wrapped normal strength concrete columns under eccentric loading*, ACI structural Journal vol 72, PP 503-511.
- K. Olivová, j. Bilčík, *Strengthening of concrete columns with CFRP*, Slovak Journal of civil engineering (2009/1 pages 1 – 9 received 10. 4. 2008 accepted 4. 11. 2008).
- ACI 440.2R-08, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*.
- Gia cố kết cấu bằng tấm sợi carbon fiber - CFRP, Công ty Tư vấn Xây dựng VNT Việt Nam, Website: www.giacoketcau.com
- Lam, L., and Teng, J., 2003a, *Design-Oriented Stress-Strain Model for FRP-Confined Concrete*, Construction and Building Materials, V. 17, pp. 471-489.