



NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VỀ GIA CƯỜNG CHỐNG ĐỘNG ĐẤT CHO CỘT BTCT BẰNG TẤM SỢI LIÊN TỤC FRP

Nguyễn Hùng Phong¹, Phạm Quang Đạo²

Tóm tắt: Bài báo này giới thiệu kết quả nghiên cứu thực nghiệm sử dụng vật liệu sợi liên tục cường độ cao như sợi cac-bon, sợi aramid, sợi thủy tinh... để gia cường tăng khả năng kháng chấn cho cột bê tông cốt thép. Đặc điểm của các tấm sợi liên tục này là có cường độ chịu kéo rất cao, trọng lượng nhẹ và không bị ăn mòn. Các tấm này rất mềm dẻo nên có thể phù hợp để gia cố nhiều loại hình dáng kết cấu khác nhau mà không làm ảnh hưởng đến kiến trúc công trình. Trong nghiên cứu này, mẫu thí nghiệm là các cột bê tông cốt thép (BTCT) được gia cường bằng cách dán các tấm sợi lên bề mặt bê tông với các loại sợi khác nhau và chiều dày khác nhau. Sau đó, các mẫu này được thí nghiệm dưới tác dụng của tải trọng lặp đổi chiều để xác định độ dẻo của cột. Kết quả thí nghiệm cho thấy tấm sợi gia cường làm tăng đáng kể độ dẻo của cột bê tông cốt thép. Độ dẻo của cột được gia cường phụ thuộc vào hàm lượng tấm sợi, khả năng biến dạng của tấm và phụ thuộc vào sự mất liên kết giữa tấm sợi và bề mặt bê tông trong quá trình gia tải.

Từ khóa: cột bê tông cốt thép; tấm sợi FRP; thiết kế kháng chấn; độ dẻo.

Abstract: This paper introduces an experimental research using continuous fiber materials such as carbon, aramid and glass fiber to strengthen reinforced concrete columns against earthquake. This continuous fiber sheets have very high tensile strength, lightweight and non-corrosive. These sheets are very flexible and can adapt to different shapes of structures without affecting the architecture. In this experimental research, specimens are reinforced concrete columns retrofitted with continuous fiber sheets bonding on concrete surface with different types and thickness of sheets. These specimens were then undergone a reversed cyclic loading test to determine the ductility of the columns. It was verified that FRP sheets can significantly increase the ductility of the retrofitted specimens. The ductility of the retrofitted columns depends on the ratio of continuous fiber sheets, the deformation capability of sheets and the debonding behavior between sheets and concrete surface during loading.

Keywords: reinforced concrete column; FRP sheets; seismic design; ductility.

Nhận ngày 04/9/2013, chỉnh sửa ngày 20/9/2013, chấp nhận đăng 30/9/2013



1. Giới thiệu

Hiện nay, việc thiết kế chống động đất cho công trình là một vấn đề quan trọng. Theo quan điểm thiết kế kháng chấn hiện đại, các công trình phải được thiết kế để đảm bảo độ cứng, độ bền và độ dẻo thích hợp, nhằm mục đích bảo vệ sinh mạng con người và hạn chế các hư hỏng của công trình trong trường hợp xảy ra động đất. Ở Việt Nam, có nhiều công trình bê tông cốt thép được thiết kế theo các tiêu chuẩn cũ, trong đó không đề cập nhiều đến vấn đề độ dẻo của kết cấu. Do đó, việc gia cường để tăng khả năng kháng chấn của một số công trình là cần thiết.

¹TS, Khoa Xây dựng Dân dụng & Công nghiệp. Trường Đại học Xây dựng. E-mail: hungphongxd@gmail.com

²ThS, Khoa Xây dựng Dân dụng & Công nghiệp. Trường Đại học Xây dựng

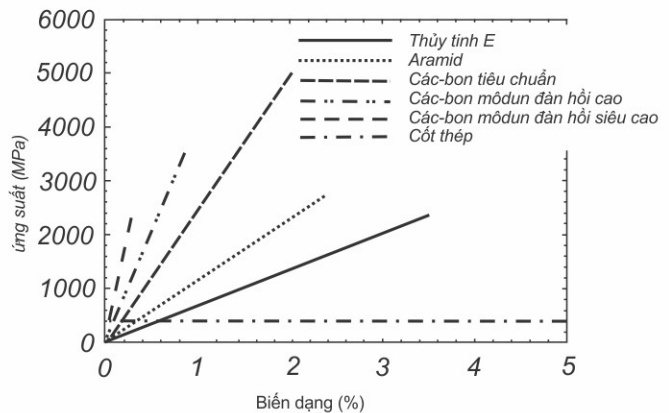
Bài báo này giới thiệu một phương pháp gia cường kháng chấn cho cột bê tông cốt thép bằng tấm sợi liên tục cường độ cao. Theo phương pháp này, các tấm composite polymer cường độ cao được dán hoặc bọc lên bề mặt cấu kiện BTCT làm tăng độ dẻo cho cấu kiện. Độ dẻo của cột BTCT được định nghĩa là tỷ số giữa biến dạng cực hạn của cột và biến dạng tại thời điểm cốt thép bị chảy dẻo dưới tác dụng của tải trọng ngang. Nội dung của nghiên cứu này là nhằm xác định độ dẻo và cơ chế phá hoại của các cột bê tông cốt thép được gia cường bằng các loại tấm sợi liên tục khác nhau là sợi các-bon và aramid.

2. Vật liệu tấm sợi liên tục FRP

2.1 Thành phần cấu tạo

Vật liệu FRP (Fiber Reinforced Polymer) là một dạng vật liệu composite, chế tạo từ sợi cường độ cao, liên kết với nhau bằng chất dẻo cao phân tử. Cốt sợi có tác dụng tạo nên cường độ và độ cứng cho vật liệu FRP. Hầu hết các sợi sử dụng trong ngành xây dựng là sợi liên tục, được phân bố theo hướng xác định do đó vật liệu FRP có cường độ cao hơn và cứng hơn theo hướng phân bố sợi. Các loại sợi được sử dụng phổ biến hơn cả trong ngành xây dựng là sợi các-bon, sợi thủy tinh, sợi aramid và sợi vinylon. Hình 1 thể hiện biểu đồ ứng suất biến dạng của một số loại sợi điển hình và cốt thép thông thường.

Chất dẻo đóng vai trò chất kết dính liên kết các sợi với nhau. Ngoài ra, chất dẻo còn có tác dụng truyền lực giữa các sợi riêng lẻ, phân tán các sợi trong vật liệu composite và bảo vệ sợi khỏi các tác động của môi trường. Chất dẻo dùng trong ngành xây dựng thường là loại chất dẻo phản ứng nhiệt, trong đó sử dụng phổ biến nhất là polyetylen, vinyl ester và epoxy.

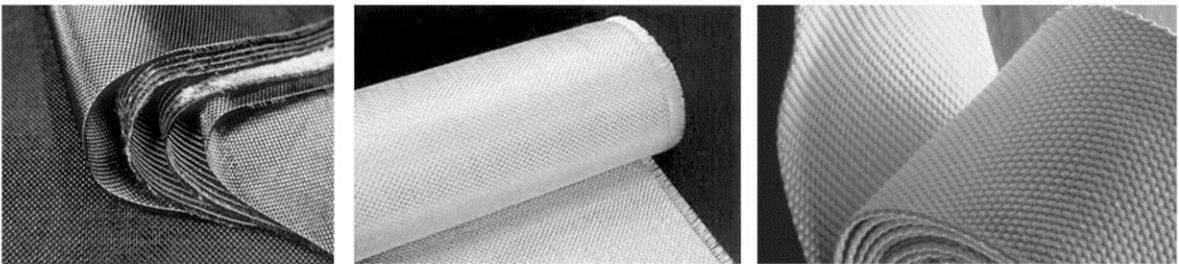


Hình 1. Biểu đồ ứng suất biến dạng của một số loại sợi thông thường [4]

2.2 Các đặc trưng của vật liệu FRP

Đặc điểm nổi bật của vật liệu FRP là có cường độ chịu kéo theo phương dọc lớn, không bị ăn mòn và nhẹ [1]. Chúng có trọng lượng riêng trong khoảng từ 1200 đến 2100 kg/m³, tức là nhỏ hơn trọng lượng riêng của thép từ 4 đến 6 lần. Tuy có cường độ cao nhưng vật liệu FRP không có thềm chảy trước khi bị phá hoại đột ngột. Phần lớn các loại sợi có mô-đun đàn hồi thấp hơn so với thép. Hơn nữa, cường độ chịu lực theo phương ngang sợi là thấp.

Dựa theo hình dáng, vật liệu FRP có thể chia thành các loại như thanh FRP, lưới FRP, tấm FRP, băng FRP... Vật liệu tấm (vải) FRP còn có đặc điểm là rất mềm dẻo (trước khi tẩm nhựa epoxy) và do đó rất phù hợp với việc gia cố các kết cấu có hình dáng đa dạng khác nhau. Tấm FRP được dệt theo một phương thành từng hàng và các hàng được liên kết với nhau. Khi gia cố kết cấu, phương chịu lực phải là phương dọc của sợi.



a) Tấm sợi các-bon (CFRP) b) Tấm sợi thủy tinh (GFRP) c) Tấm sợi aramid (AFRP)

Hình 2. Một số dạng tấm FRP thông thường sử dụng để gia cố kết cấu công trình [4]

2.3 Phương pháp gia cố kết cấu BTCT bằng tấm FRP

Do có cường độ cao, trọng lượng nhẹ, lại rất mềm dẻo nên vật liệu tấm (vải) FRP thường được sử dụng để gia cố cho kết cấu bê tông cốt thép như dán đầy dầm để tăng khả năng chịu uốn, dán xung quanh dầm để tăng khả năng chịu cắt, bó cột để tăng khả năng chịu nén và độ dẻo của cột... Ngoài ra, tấm FRP còn có thể sử dụng để gia cố cho kết cấu thép và kết cấu gạch đá cũng rất hiệu quả.



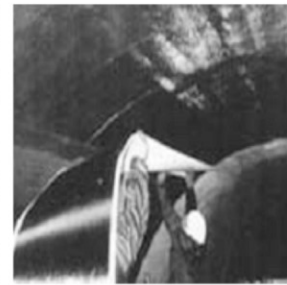
a) Gia cố lỗ silo



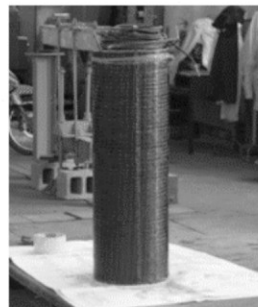
b) Gia cố tường chắn



c) Gia cố ống khói



d) Gia cố đường hầm



e) Nghiên cứu thực nghiệm gia cố cột bằng tấm FRP [7]

Hình 3. Gia cố kết cấu BTCT bằng tấm FRP

Đặc điểm của phương pháp gia cố kết cấu bằng tấm FRP là có thể thi công nhanh, tốn ít nhân công và không cần máy móc đặc biệt. Phương pháp này có thể thi công trong khu vực chật hẹp, thi công đồng thời với các quá trình xây lắp khác mà không làm ảnh hưởng tới quá trình khai thác sử dụng công trình. Ngoài ra, do tấm FRP có chiều dày rất nhỏ nên kết cấu sau khi gia cố không thay đổi nhiều về kiến trúc, công trình sau sửa chữa có tính thẩm mỹ cao, đồng thời không gây gia tăng tải trọng cho kết cấu hiện có.

Ở Việt Nam, việc sử dụng tấm FRP để gia cường cấu kiện cột đã được nghiên cứu [7]. Kết quả nghiên cứu cho thấy khả năng chịu nén của bê tông trong cột được gia cường bằng tấm FRP tăng đáng kể, tăng thêm khoảng 50% đến 200% tùy thuộc vào hàm lượng FRP gia cố. Thí nghiệm đo được khả năng chịu lực nén của cấu kiện cột khá phù hợp với giá trị tính toán theo tiêu chuẩn ACI 440-2R 08. Ngoài ra, biến dạng cực hạn khi bê tông bị ép vỡ đối với cột được gia cường bằng tấm FRP cũng lớn hơn so với cột thông thường [7].

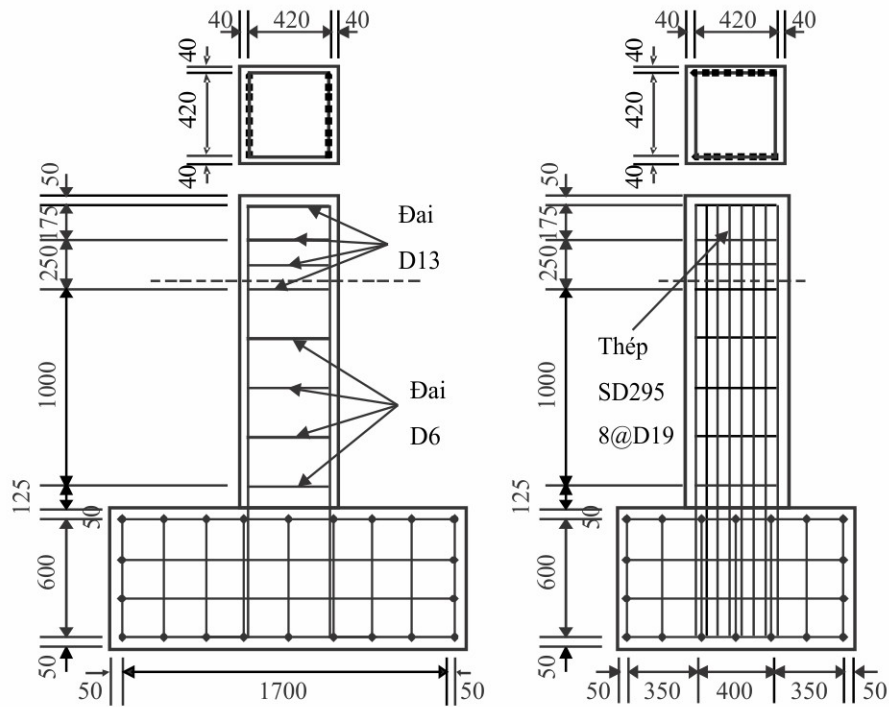
Tuy nhiên, ở Việt Nam, các nghiên cứu thực nghiệm về gia cường để tăng độ dẻo cho cột BTCT bằng tấm FRP chưa được tiến hành nhiều. Mặc dù đây cũng là một vấn đề tương đối cấp thiết, do nhiều kết cấu cột được thiết kế theo quan niệm cũ chưa xét đến vấn đề kháng chấn nên cần gia cường để tăng độ dẻo và khả năng hấp thụ năng lượng. Nội dung chính của bài báo sẽ đề cập đến một nghiên cứu thực nghiệm về chủ đề này.



3. Nghiên cứu thực nghiệm gia cường kháng chấn cho cột BTCT bằng tấm sợi liên tục

3.1 Mẫu thí nghiệm

Mẫu thí nghiệm là các cột ngắn có kích thước và cốt thép như trên Hình 4. Các thông số kết cấu khác của cột được thể hiện trên Bảng 1. Các cột BTCT này được thiết kế để khống chế trạng thái phá hoại xảy ra do phá hoại cắt xuất hiện trước.



Hình 4. Chi tiết mẫu cột

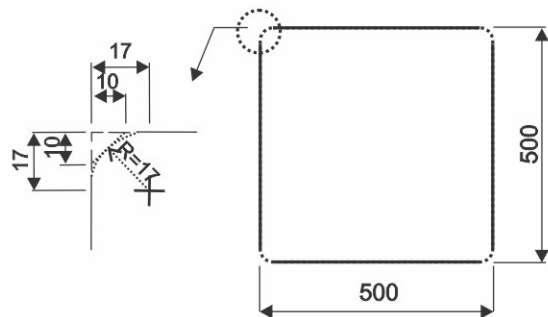
Bảng 1. Thông số kết cấu của mẫu cột

Kích thước cột (mm)	500	Khả năng chịu cắt của bê tông V_c (kN)	200
Chiều cao làm việc d (mm)	460	Khả năng chịu cắt của cột $V_c + V_s$ (kN)	241
Nhịp cắt a (mm)	1250	Tải trọng làm thép chảy P_y (kN)	257
Tỷ số a/d	2.72	Khả năng chịu uốn $P_u = M_u/a$ (kN)	268
Hàm lượng cốt thép dọc (một phía) (%)	0.87	Tỷ lệ khả năng chịu cắt/ chịu uốn	0.90

Trước khi gia cường, các mẫu cột được mài góc, lượn tròn để tránh tập trung ứng suất tại góc, đồng thời tăng hiệu ứng bó của tấm FRP cho cột. Sau đó, bề mặt cột cũng được mài nhẵn để lộ cốt liệu nhằm tăng lực dính bán giữa bề mặt bê tông và tấm FRP (Hình 5).



a) Ảnh chụp mẫu sau khi mài bề mặt



b) Qui cách gia công mài góc cạnh cột

Hình 5. Chuẩn bị bề mặt và góc cột trước khi gia cố tấm FRP

Quá trình gia cố mẫu được tiến hành như sau: Dùng chổi lăn epoxy lên bề mặt của mẫu cho kín toàn bề mặt. Dán tấm FRP lên bề mặt cột bằng cách quấn tấm này vào một ống nhựa, sau đó vừa tháo tấm và quấn lên bề mặt cột. Khi quấn phải đảm bảo tấm sợi phẳng và căng. Tiếp tục dùng chổi lăn epoxy lên bề mặt tấm một lần nữa để cho epoxy thấm đẫm vào trong sợi. Khi lăn chổi phải lăn theo phương của sợi, không được lăn theo phương vuông góc với phương sợi, sẽ làm ảnh hưởng đến cấu trúc của tấm sợi. Việc lăn epoxy lần thứ hai này cũng có tác dụng làm cho tấm được phẳng và loại bỏ các bọt khí bên trong, đảm bảo tiếp xúc tốt với bề mặt bê tông.

Thí nghiệm phải tiến hành sau thời gian gia cố mẫu ít nhất là 72 tiếng để đảm bảo epoxy khô cứng và đạt cường độ tối đa.



a) Lăn epoxy lên bề mặt cột b) Bó tấm FRP lên cột c) Sau khi bó xong

Hình 6. Quá trình gia cố cột bằng tấm FRP

Số lượng mẫu cột được chế tạo là 07 mẫu, trong đó mẫu đầu tiên (n0) là mẫu chuẩn không gia cường, còn 6 mẫu kia gia cường bằng tấm FRP. Trước khi gia cường, các cột này có kích thước và bố trí cốt thép giống hệt nhau. Thông số khác nhau duy nhất là thông số về tấm FRP sử dụng để gia cường cho từng mẫu cột. Tính chất của các tấm FRP được tóm tắt trong Bảng 2.

Bảng 2. Tính chất của các loại tấm FRP sử dụng để gia cường cho cột

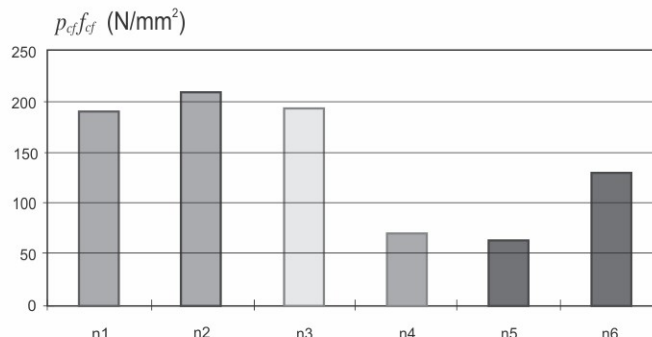
Tên cột	n0	n1	n2	n3	n4	n5	n6
Loại sợi	No FRP	carbon	aramid I	aramid II	aramid I	aramid II	aramid II
Chiều dày tấm (mm)	-	0.111	0.193	0.169	0.064	0.056	0.113
Cường độ kéo (Mpa)	-	4290	2720	2850	2720	2850	2850
Mô đun đàn hồi (Mpa)	-	261000	131000	83000	131000	83000	83000
Biến dạng cực hạn (%)	-	1.6	2.1	3.4	2.1	3.4	3.4

Đối với các mẫu cột này, tấm FRP được quấn liên tục suốt chiều cao cột. Hàm lượng của tấm FRP được xác định bằng:

$$\rho_{cf} = 2 t_{cf} / b \quad (1)$$

trong đó: ρ_{cf} : hàm lượng tấm FRP; t_{cf} : chiều dày tấm FRP (mm); b: kích thước cạnh tiết diện cột vuông (mm).

Hình 7 thể hiện hàm lượng tấm FRP nhân với cường độ của tấm ($\rho_{cf} f_{cf}$) cho 6 mẫu được gia cường bằng tấm FRP.

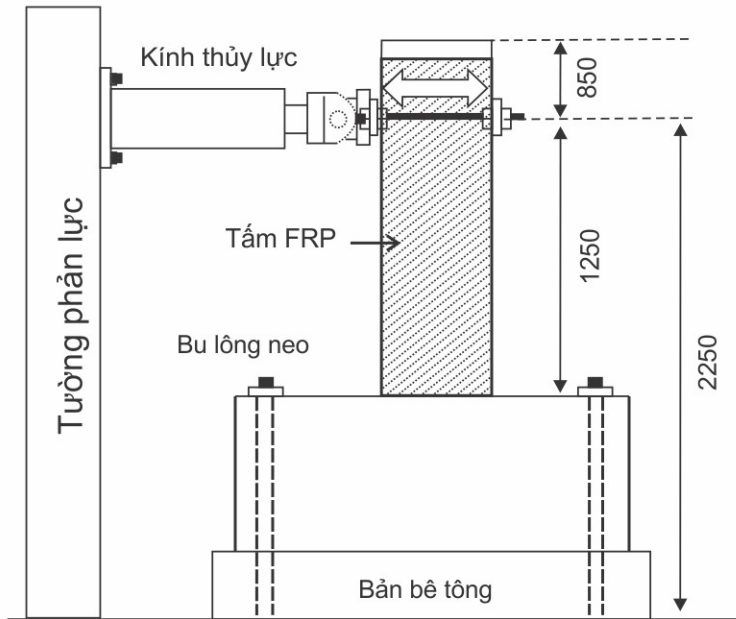


Hình 7. Tích số hàm lượng và cường độ của tấm FRP gia cường trong các cột BTCT [6]

3.2 Quy trình thí nghiệm

Các mẫu được thí nghiệm chịu tải trọng lặp đổi chiều, mô phỏng tải trọng động đất. Sơ đồ thí nghiệm thể hiện trên Hình 8. Trước tiên, gia tải đến khi cốt thép chảy (P_y), ứng với biến dạng chảy (δ_y). Sau đó, tác dụng tải trọng lặp đổi chiều tăng dần, kiểm soát theo biến dạng $+1\delta_y, -1\delta_y, +2\delta_y, -2\delta_y, +3\delta_y, -3\delta_y, \dots$. Tại mỗi bước gia tải, lặp lại chu kỳ tải trọng 3 lần. Trạng thái phá hoại được xác định là thời điểm mà khả năng chịu tải giảm xuống còn 80% giá trị tải trọng lớn nhất. Ứng với trạng thái này, ta có giá trị biến dạng cực hạn δ_u .

Độ dẻo của cấu kiện (μ) được định nghĩa là tỷ số δ_u/δ_y . Trong thí nghiệm này, có thể thấy rằng độ dẻo có giá trị chính bằng số lượng chu kỳ lặp của tải trọng.



Hình 8. Mô hình thí nghiệm tải trọng lặp đổi chiều cho cột BTCT gia cường bằng tấm FRP

3.3 Kết quả thí nghiệm

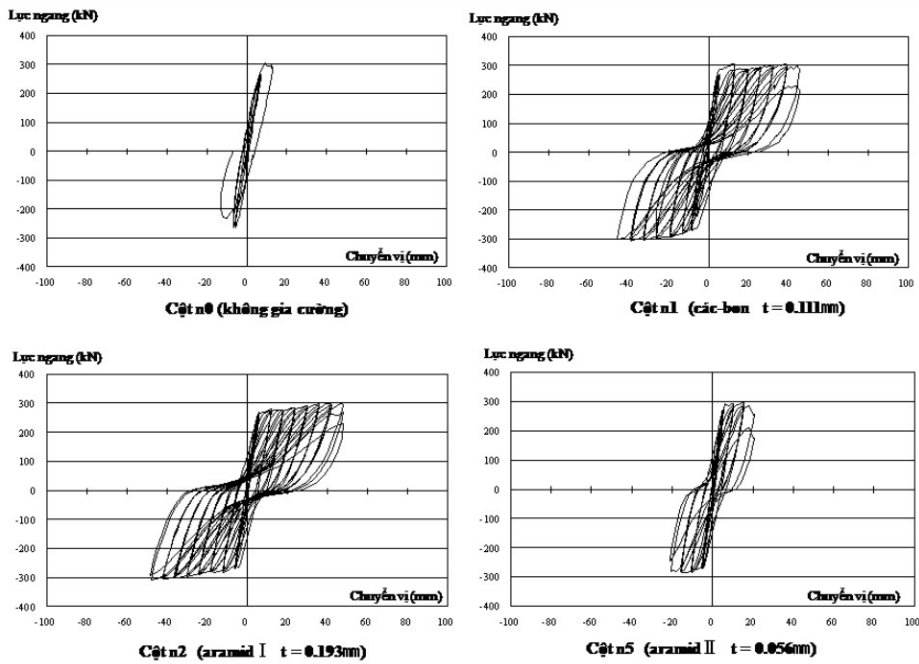
3.3.1. Tải trọng, chuyển vị cực đại và độ dẻo của cột

Bảng 3 thể hiện kết quả thí nghiệm các mẫu cột gia cường bằng tấm FRP. Có thể thấy rằng tải trọng cực đại của các mẫu là xấp xỉ nhau, chứng tỏ rằng việc gia cố các cột bằng tấm sợi không làm tăng đáng kể khả năng chịu tải trọng ngang của các cột. Tuy nhiên, biến dạng cực hạn và do đó độ dẻo của các mẫu tăng lên đáng kể so với mẫu không được gia cường và có sự chênh lệch khá nhiều giữa các mẫu được gia cường khác nhau. Các cột được gia cường với hàm lượng tấm FRP cao hơn cho kết quả thí nghiệm có độ dẻo lớn hơn.

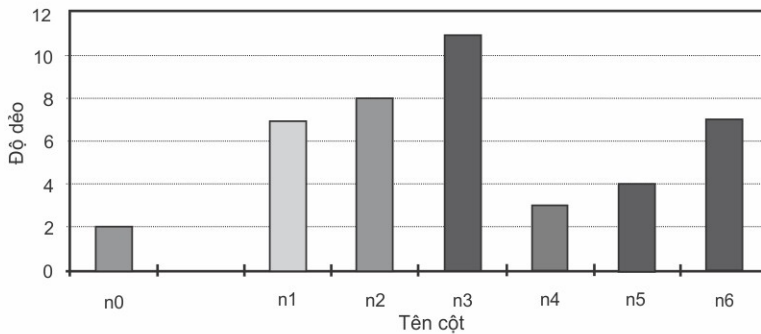
Bảng 3. Kết quả thí nghiệm cột BTCT gia cường bằng tấm FRP [6]

Tên mẫu	n0	n1	n2	n3	n4	n5	n6
Loại sợi	-	carbon	aramid	aramid	aramid	aramid	aramid
Chiều dày tấm sợi (mm)	-	0.111	0.193	0.169	0.064	0.056	0.113
Tải trọng cực đại (kN)	304	306	298	300	294	297	294
	-263	-307	-310	-315	-290	-287	-303
Chuyển vị cực đại (mm)	13.0	45.7	48.1	73.7	15.4	20.7	44.0
	-13.3	-45.7	-48.2	-176.0	-16.3	-21.2	-38.5
Độ dẻo	2	7	8	11	3	4	7

Hình 9 thể hiện biểu đồ quan hệ lực và chuyển vị ngang của cột dưới tác dụng của tải trọng lặp đổi chiều của một số mẫu cột. Số chu kỳ tải trọng lặp mà cột có thể chịu được có giá trị chính bằng giá trị độ dẻo (μ) của cột. Hình 10 thể hiện Biểu đồ độ dẻo của các cột được gia cường tấm FRP và cột không gia cường.



Hình 9. Quan hệ lực - chuyển vị của các cột gia cường bằng tấm FRP dưới tác dụng của tải trọng lặp đổi chiều

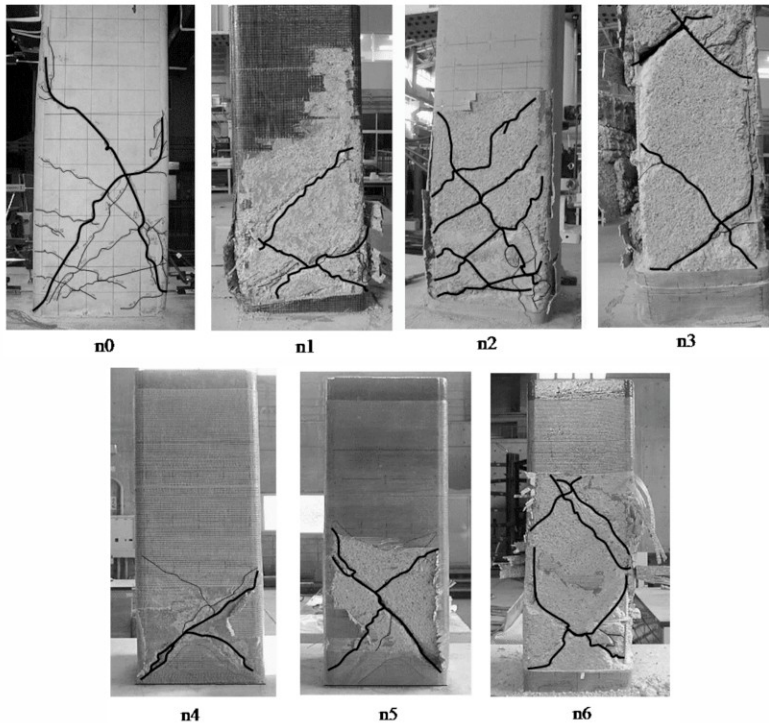


Hình 10. Độ dẻo của các cột BTCT được gia cường bằng tấm FRP

So sánh biểu đồ này với biểu đồ tích số hàm lượng và cường độ tấm FRP gia cường các cột BTCT (Hình 7) ta thấy có sự tương đồng. Về cơ bản, cột có hàm lượng ($\rho_{cf} \times f_{cf}$) lớn thì sẽ có độ dẻo lớn. Tuy nhiên, cũng có thể thấy rằng, với các cột có hàm lượng ($\rho_{cf} \times f_{cf}$) xấp xỉ nhau như cột n1 và n3 hay n4 và n5 thì cột nào được gia cố bằng loại sợi có biến dạng cực hạn cao hơn (aramid II với $\epsilon_{ch} = 3,4\%$) sẽ có khả năng biến dạng nhiều hơn tức là có độ dẻo cao hơn. Vì tất cả các cấu kiện cột đều bị phá hoại ở trạng thái cực hạn do tấm FRP bị đứt; FRP bị đứt sớm thì độ dẻo thấp và ngược lại.

3.3.2. Hình thức phá hoại của cột

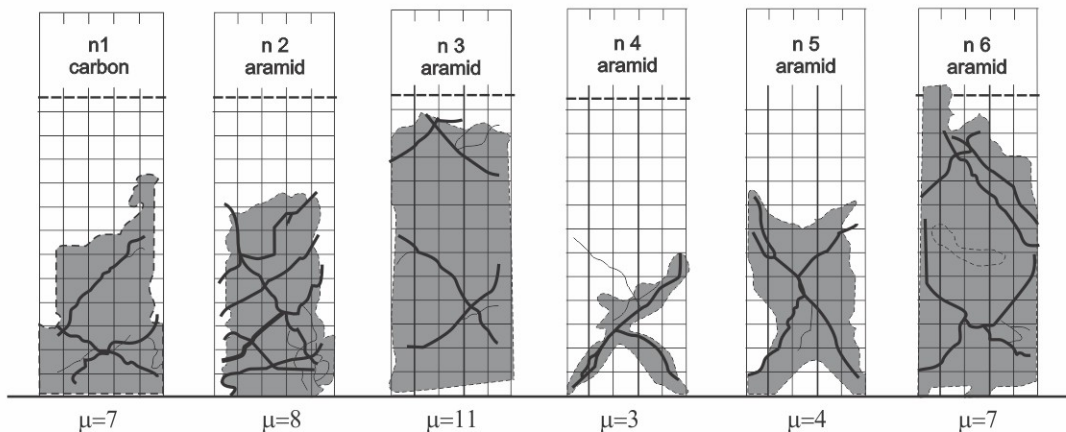
Hình 11 thể hiện dạng phân bố vết nứt ở trạng thái phá hoại của các cấu kiện cột được gia cường bằng tấm FRP. Khi tải trọng tăng dần, các vết nứt xiên bắt đầu xuất hiện và lan rộng. Do có lực dính giữa epoxy và bê tông nên ứng suất cục bộ của tấm FRP tại vị trí có vết nứt tăng nhanh chóng. Nếu lượng FRP ít như trong trường hợp cột n4, thì tấm FRP nhanh chóng bị đứt tại vị trí khe nứt và cột bị phá hoại khi độ dẻo còn khá nhỏ. Đối với các cột có hàm lượng tấm FRP cao hơn, khi tải trọng tiếp tục tăng, lực dính giữa bê tông và epoxy trong tấm FRP mất dần. Khi biến dạng lớn, ứng suất trong tấm FRP đạt trạng thái cực hạn, tấm bị đứt và sau đó cột bị phá hoại nhanh chóng.



Hình 11. Vết nứt ở trạng thái phá hoại của các mẫu cột được gia cường

Hình 12 tập hợp lại các dạng vết nứt của các cột được gia cường đối chiếu với độ dẻo của cột. Phần diện tích tô màu chính là khu vực mà bê tông bị mất liên kết với tấm FRP do epoxy bị bong ra khi cột ở trạng thái phá hoại, kết thúc quá trình gia tải. Có thể quan sát thấy rằng, cột có nhiều vết nứt phân bố (cột n1, n2, n3, n6) có khả năng hấp thụ năng lượng cao hơn, do đó có khả năng biến dạng, tức độ dẻo cao hơn. Các cột n4 và n5 chỉ có 1 tầng vết nứt nghiêng, sau đó do lượng tấm FRP không đủ chịu lực nên tấm bị đứt tại vị trí vết nứt này. Giá trị độ dẻo của các cột này là không cao. Đối với các cột còn lại, sau khi tầng vết nứt nghiêng đầu tiên xuất hiện, do hàm lượng tấm FRP đủ lớn nên tấm FRP chưa đứt ngay. Sau đó, khi tiếp tục gia tải ở các chu kỳ tiếp theo có thể quan sát thấy tiếp tục có một tầng vết nứt thứ hai xuất hiện (quan sát thấy rõ nhất ở cột n3 và n6). Tầng vết nứt thứ hai này cho phép cột tiếp tục biến dạng theo phương ngang và do đó cột có độ dẻo rất cao.

Tương tự, các cột có diện tích mất liên kết giữa tấm FRP với bê tông càng lớn (cột n3, n6) cũng có độ dẻo cao hơn. Đó là do khi epoxy bị bong ra, tấm FRP và bê tông mất liên kết sẽ làm tăng chiều dài biến dạng của tấm FRP và tránh được sự phá hoại cục bộ của tấm dọc theo các vết nứt có bề rộng lớn. Các tấm FRP không bị đứt sớm giúp duy trì khả năng biến dạng của cột và do đó làm tăng khả năng hấp thụ năng lượng và độ dẻo của cột.



Hình 12. Dạng vết nứt, khu vực mất lực dính giữa bê tông và tấm FRP và độ dẻo của cột



4. Kết luận và kiến nghị

- Nghiên cứu thực nghiệm về gia cường để tăng độ dẻo cho cột bê tông cốt thép bằng tấm sợi liên tục cường độ cao FRP cho thấy giải pháp gia cường này thực hiện đơn giản và có hiệu quả cao, làm tăng đáng kể độ dẻo của cột và do đó tăng khả năng phân tán năng lượng cho kết cấu.

- Độ dẻo của cột BTCT được gia cường bằng tấm sợi FRP phụ thuộc vào hàm lượng, cường độ và khả năng biến dạng của tấm FRP cũng như lực dính giữa tấm FRP và bề mặt bê tông của cột. Độ dẻo của cột liên quan mật thiết đến dạng vết nứt của cột khi phá hoại.

- Hướng nghiên cứu tiếp theo là xây dựng quan hệ định lượng giữa các yếu tố như hàm lượng, đặc tính cơ học (cường độ và mức độ biến dạng) của vật liệu FRP với độ dẻo của cột BTCT được gia cường bằng tấm này. Ngoài ra, hướng nghiên cứu có thể phát triển nữa là sử dụng vật liệu sợi liên tục không dùng epoxy để gia cường cho kết cấu BTCT nhằm khắc phục các hạn chế của việc sử dụng epoxy.

Tài liệu tham khảo

1. Nguyễn Xuân Bích (2005), *Sửa chữa và gia cố kết cấu bê tông cốt thép*, NXB Khoa học kỹ thuật, Hà Nội.
2. Ngô Quang Tường (2007), "Sửa chữa và gia cố công trình BTCT bằng phương pháp dán nhờ sử dụng vật liệu FRP", *Tạp chí Phát triển KH&CN, Tập 10, số 10 - 2007*, Thành phố Hồ Chí Minh.
3. ACI 440.2R-08 (2008), *Guide for the design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, American Concrete Institute.
4. SSI Education Module 2 (2006), *An Introduction to FRP - Composite for construction*. Queen's University, Canada.
5. ISSI Education Module 4 (2006), *An Introduction to FRP - Strengthening of concrete structures*. Queen's University, Canada.
6. N. H. Phong (2006), *Structural performance of concrete members reinforced with Continuous Fiber Rope*, Doctor thesis, Nagaoka University of Technology, Japan.
7. Nguyễn Hùng Phong (2013), *Nghiên cứu giải pháp gia cố cột BTCT bằng tấm sợi liên tục cường độ cao FRP*, Đề tài nghiên cứu cấp Trường trọng điểm, Đại học Xây dựng, Hà Nội.
8. K. Maruyama et al.(2003), "Ductility Improvement Mechanism of Concrete Columns by Wrapping of FRP Sheets", *Proceedings of the International Conference on Advances in Structures (ASSCCA '03)*, Sydney, Australia.