HIỆU QUẢ GIA CƯỜNG KHÁNG UỐN CỦA TẤM CFRP TRONG DẦM CHỮ T ỨNG SUẤT TRƯỚC CÓ VÀ KHÔNG CÓ HỆ NEO CFRP DẠNG DẢI U

PHAN VŨ PHƯƠNG
Trường Đại học Mở Thành phố Hồ Chí Minh - phuong.pv@ou.edu.vn

TRƯƠNG THỊ PHƯƠNG QUỲNH
Trường Đại học Văn Lang - truongthiphuongquynh@vanlanguni.edu.vn

ĐẶNG ĐĂNG TÙNG
Trường Đại học Bách Khoa – Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh - ddtung@hcmut.edu.vn

NGUYỄN MINH LONG
Trường Đại học Bách Khoa - Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh - nguyenminhlong@hcmut.edu.vn

(Ngày nhận: 9/9/2016; Ngày nhận lại: 20/10/16; Ngày duyệt đăng: 14/11/2016)

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một nghiên cứu thực nghiệm về hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm CFRP trong dầm bê tông ứng suất trước (BTUST) tiết diện chữ T có và không có sử dụng neo CFRP dạng dải U. Chương trình thực nghiệm được tiến hành trên 9 dầm tiết diện chữ T ứng suất trước (căng sau) kích thước lớn. Các dầm được gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP với số lớp lần lượt là 0 (dầm đối chứng), 2, 4 và 6 lớp, và được bố trí neo bằng tấm CFRP dạng dải U theo kiểu truyền thống phân bố đều (AN2) và theo kiểu neo tập trung (AN1). Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ neo CFRP dạng U làm tăng đáng kể khả năng biến dạng của dầm gia cường so với dầm đối chứng (lên đến 65%), tăng tính dẻo dai cho dầm và sự gia tăng này tăng theo số lớp của tấm gia cường kháng uốn CFRP. Hệ neo CFRP dạng AN1 cải thiện khả năng biến dạng của dầm gia cường tốt hơn so với hệ neo CFRP dạng AN2, giúp cho biến dạng trong tấm CFRP phân bố được đều đặn hơn, kiểm soát tốt hơn quá trình bong tách tấm CFRP; ngoài ra hệ neo này còn giúp điều tiết ứng xử tương tác giữa tấm gia cường kháng uốn CFRP và cáp UST, giúp cáp làm việc hiệu quả hơn. Tấm CFRP làm tăng đáng kể khả năng kháng uốn của các dầm, giảm bề rộng của vết nứt trong dầm và mức độ chiết giảm này giảm dần theo số lớp gia cường. Biến dạng cuối cùng của tấm CFRP trong các dầm gia cường dao động từ 27% đến 66.6% biến dạng kéo đứt của tấm và chúng giảm theo số lớp CFRP gia cường.

Từ khóa: Dầm bê tông ứng suất trước; Gia cường kháng uốn; Hệ neo CFRP dạng dải U; Khả năng kháng uốn; Số lớp gia cường; Tấm CFRP; Ứng xử nứt.

Flexural-strengthening efficiency of CFRP sheets in post-tensioned concrete T-beams with and without U-strip CFRP anchorage system

ABSTRACT

This paper deals with flexural-strengthening efficiency of CFRP sheets for post-tensioned concrete T-beams with and without external U-strip CFRP anchorage systems. An experimental program was carried out on total nine post-tensioned concrete T-beams in practical sizes. The numbers of CFRP layers used to strengthen the beams are 0, 2, 4 and 6 layers, respectively. Two external U-strip CFRP anchorage systems were investigated in this study, including uniformly and non-uniformly distributed systems. The test results showed that the U-wrap CFRP anchorage improved significantly the deformation capacity and ductility of the beams as compared to that of the control beam (up to 65%). The U-wrap CFRP non-uniformly distributed anchorage, which is more effective than the uniformly distributed one in a sense of increasing deformation capacity of the beams, caused strain distribution in the flexural-strengthening CFRP sheets to be more uniformly, and prevented debonding of CFRP sheets more effectively. Furthermore, this anchorage system is proved to be able to adjust the interaction between the flexural-strengthening CFRP sheets and prestressed cables as well as improve working efficiency of the cables. Moreover, the CFRP sheets also increase considerably flexural capacity, reduce crack width in the beams. The average values of strains in the CFRP jackets measured at failure of beams is approximately 27% and 66.7% of the ultimate tensile strains of CFF epoxy composites.

Keywords: CFRP sheet; flexural strengthening; number of CFRP layer; U-strip CFRP anchorage; post-tensioned concrete T-beams; cracking behavior; flexural capacity.

1. Đặt vấn đề

Các nghiên cứu về khả năng kháng uốn của các dầm BTCT gia cường bằng vật liệu sợi các-bon (CFRP) hiện nay đều thống nhất rằng việc sử dụng tấm CFRP làm tăng đáng kể khả năng kháng uốn của các dầm, và mức độ tăng này giảm dần theo sự gia tăng của hàm lượng tấm gia cường do hiện tượng bong tách tấm ra khỏi bề mặt bê tông một khi ứng suất kéo vượt quá cường độ bám dính của tấm với bê tông (Meier và Kaiser, 1991; Ritchie và cộng sự, 1991; Sharif và cộng sự, 1994; Norris và cộng sự, 1997; Grace và cộng sự, 1999; Dai và cộng sự, 2005). Hiện tượng bóc tách tấm ở vị trí hai đầu tấm gia cường làm suy giảm một cách rõ rệt hiệu quả gia cường của tấm. Ngoài ra, tấm CFRP còn làm giòn hóa ứng xử của dầm và mức độ giòn hóa này gia tăng cùng với hàm lượng tấm CFRP sử dụng và làm dầm bị phá hoại đột ngột. Để khắc phục các vấn đề này, hệ neo tấm gia cường CFRP được thiết kế và bố trí thêm trong dầm gia cường. Một số kỹ thuật neo đã được sử dụng như dùng bu lông, dùng bản thép, neo bằng tấm CFRP dạng dải U, neo dạng chốt hình nan quạt. Kết quả của một số nghiên cứu (Garden và Holloway, 1998; Spadea và cộng sự, 1998; Bahn và Harichandran, 2008; Sobuz và cộng sự, 2011; Ali và cộng sự, 2014) cho thấy hệ neo đã giúp hạn chế một cách hiệu quả sự bóc tách tấm sớm tại vị trí hai đầu của tấm gia cường; cải thiện đáng kể ứng xử dẻo của dầm gia cường tấm CFRP và ngăn sự phá hoại đột ngột; tăng hiệu quả sử dụng của tấm gia cường từ đó làm tăng đáng kể khả năng chịu lực của dầm gia cường. Tuy nhiên, đối với dầm bê tông ứng suất trước (BTUST), các nghiên cứu về ảnh hưởng của hệ neo đến ứng xử và hiệu quả gia cường của tấm cũng như của dầm thật sự khan hiếm. Một vài nghiên cứu về ảnh hưởng của hệ neo như của Dung (2014) trên dầm BTUST theo phương pháp căng sau, tuy nhiên nghiên cứu này cũng chỉ dừng lại ở việc cung cấp một số thông tin cơ bản. Cơ chế làm việc của hệ neo, kiểu phá hoại, sự phân bố biến dạng trong tấm CFRP và hiệu quả thực sự của nó đối với dạng dầm BTUST vẫn còn chưa được làm sáng tỏ. Thực tế, dầm BTUST có ứng xử không hoàn toàn giống như dầm BTCT truyền thống. Lực căng trước trong cáp làm cho các dầm bê tông UST có ứng xử dòn hơn, đồng thời bề rộng của các vết nứt trong dầm UST cũng có xu hướng lớn hơn và số lượng vết nứt cũng ít hơn (do hiện tượng phân bố lại mô-men bị hạn chế) so với dầm BTCT. Điều này dẫn đến sự phân bố biến dạng trong tấm gia cường của dầm bê tông UST và BTCT có thể khác. Có điều đáng lưu ý rằng, sự bóc tách của tấm gia cường ở vị trí hai đầu dán là do sự tập trung của ứng suất gây trượt tại hai vị trí này (Colotti và Spadea, 2001); tuy nhiên, các phương pháp neo dùng các dải CFRP hiện nay trong các hướng dẫn tính toán, hầu như đều bỏ qua sự phân bố thực tế này của ứng suất gây trượt trong dầm. Có lẽ vì sự thuận tiện trong công tác thi công, chúng thường được bố trí đều trong nhịp cắt hoặc toàn nhịp dầm và vì vậy dẫn đến hiệu quả neo có thể chưa cao như mong đợi và gây lãng phí. Các vấn đề vừa nêu trên cho thấy các nghiên cứu liên quan đến việc sử dụng hệ neo thích hợp, đặc biệt cho các dạng cấu kiện BTUST là thật cần thiết.

Bài báo này trình bày một nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của hệ neo dùng dải CFRP dạng U đến ứng xử và khả năng kháng uốn của dầm BTUST gia cường tấm CFRP theo phương pháp dán ngoài. Chương trình thực nghiệm được tiến hành trên 9 dầm tiết diện chữ T ứng suất trước (căng sau) kích thước lớn. Các dầm có hàm lượng tấm gia cường CFRP kháng uốn lần lượt là 0 (dầm đối chứng), 2, 4 và 6 lớp, và được bố trí neo bằng lưới CFRP dạng dải U theo kiểu truyền thống phân bố đều (AN2) và theo kiểu neo tập trung (AN1) trong nhịp cắt. Mục tiêu chính của nghiên cứu là: (1) khảo sát ảnh hưởng của hệ neo đến ứng xử của dầm BTUST gia cường tấm CFRP kháng uốn; và (2) phân tích ảnh hưởng tương tác giữa hệ neo và hàm lượng tấm gia cường CFRP kháng uốn đến sự làm việc và hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm đối với dầm BTUST.

2. Chương trình thực nghiệm

2.1. Vật liệu

Các dầm thí nghiệm sử dụng bê tông thương phẩm với cấp phối như sau: xi măng PC40 (410 kg/m^3); đá 1x2 (22mm, 1028 kg/m^3); cát sông (0÷4 mm, 550 kg/m^3); cát nghiền (0÷2mm, 247 kg/m^3); và phụ gia dẻo (5.5 l/m^3). Cường độ chịu nén trung bình dọc trục $f_{c,cube}$ và kéo chẻ $f_{sp,cube}$ thực tế của bê tông được xác định thông qua kết quả nén 6 mẫu lập phương 150×150×150 mm, cụ thể $f_{c,cube}$ = 47.2 MPa và $f_{sp,cube}$ = 5.8 MPa. Độ sụt bê tông xấp xỉ 12±2cm. Giới hạn chảy f_y và giới hạn bền f_u trung bình của cốt thép dọc chịu kéo và cốt đai được xác định trên 3 mẫu, kết quả như sau: f_y = 430 MPa và f_u = 600 MPa; cốt đai có f_{yw} = 342 MPa và f_{uw} = 463 MPa. Mô-đun đàn hồi của cốt thép E_s = 200 GPa. Cáp sử dụng loại không bám dính loại 7 sợi, đường kính danh nghĩa của cáp = 12.7 mm, giới hạn chảy qui ước f_{py} và giới hạn bền f_{pu} lần lượt là 1675 MPa và 1860 MPa. Mô-đun đàn hồi của cáp E_p = 195 GPa. Tấm sợi các-bon trực hướng (CFF) dày 0.127 mm, có cường độ chịu kéo f_{fu} là 4900 MPa, mô-đun đàn hồi E_f là 240 GPa và biến dạng kéo đứt ε_{fu} là 2.1%.

2.2. Dầm thí nghiệm

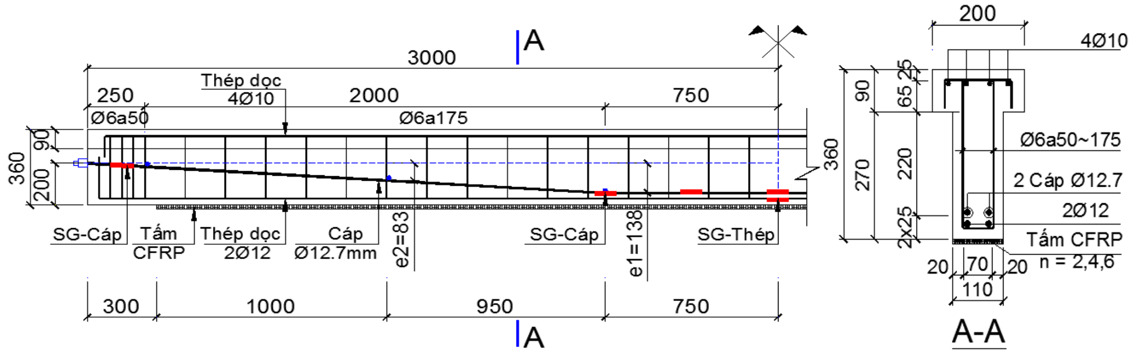
Bảng 1

Thông số kỹ thuật của mẫu dầm thí nghiệm

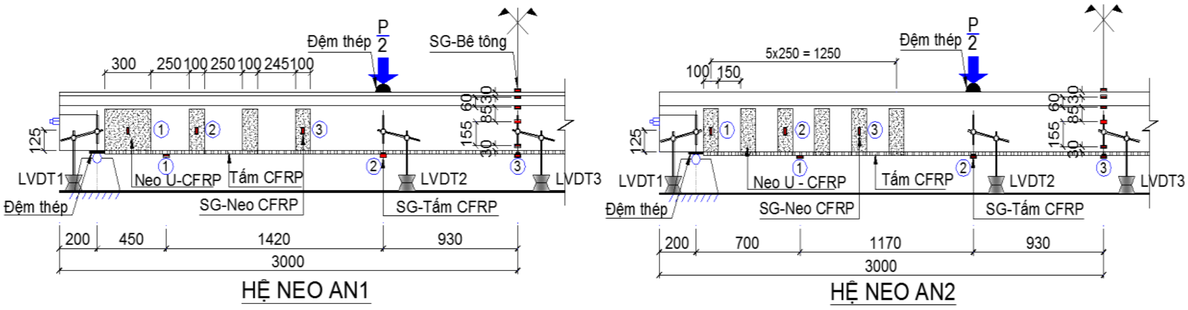
Ký hiệu	$f_{c,cube}$ MPa	$b \times h \times b_f \times h_f \times L$ mm	ρ_s %	ρ_w %	n	an	w_f mm	s_f mm	t_f mm	a_f mm
M-0	47.2	110 x 360 x 200 x 90 x 600	0.47	0.29	0	0	--	--	--	--
M-2-C-B					2	0	--	--	0.254	80
M-4-C-B					4	0	--	--	0.508	80
M-6-C-B					6	0	--	--	0.762	80
M-2-C-B-AN1					2	12	300;100	250	0.254	80
M-4-C-B-AN1					4	12	300;100	250	0.508	80
M-6-C-B-AN1					6	12	300;100	250	0.762	80
M-2-C-B-AN2					2	8	100	150	0.254	80
M-4-C-B-AN2					4	8	100	150	0.508	80

Ghi chú: *b* và b_f là bề rộng của sườn và cánh dầm, mm; $f_{c,cube}$: cường độ chịu nén mẫu lập phương, MPa; *h*, h_f và L lần lượt là chiều cao tiết diện, chiều dày cánh và chiều dài dầm, mm; *n* là số lớp CFRP gia cường; *an* là số lượng dải neo; a_f là bề rộng tấm gia cường CFRP kháng uốn, mm; s_f là bước dải gia cường, mm; t_f là chiều dày lớp tấm gia cường, mm; w_f là bề rộng dải gia cường, mm; ρ_f là hàm lượng tấm gia cường, mm; ρ_s là hàm lượng cốt thép dọc; ρ_w là hàm lượng cốt đai; B là gia cường kháng uốn; AN1 và AN2 là dạng neo tập trung và phân bố đều (Hình 2).

Chương trình thực nghiệm được tiến hành trên 9 mẫu dầm tiết diện chữ T, trong đó gồm 1 dầm không gia cường dùng để đối chứng (dầm M0CB) và 8 dầm gia cường kháng uốn bằng tấm CFRP với số lớp lần lượt là 2, 4 và 6 lớp, không bố trí neo (dầm M2CB, M4CB và M6CB); trong số 8 dầm gia cường có 3 dầm được bố trí hệ neo bằng tấm CFRP dạng dải U tập trung trong nhịp cắt (dầm M2CB-AN1, M4CB-AN1 và M6CB-AN1) và 2 dầm được bố trí hệ neo bằng tấm CFRP dạng dải U phân bố đều trong nhịp cắt của dầm (dầm M2CB-AN2, M4CB-AN2). Các dầm được bố trí hệ neo AN2 được gia cường kháng uốn lần lượt 2 và 4 lớp tấm CFRP. Dầm có kích thước 110x360x200x90x6000 mm, nhịp thử tải L_o = 5600 mm. Dầm sử dụng 2 cáp UST đường kính danh định 12.7mm căng sau dạng parabol. Mặt dưới dầm (thớ kéo) bố trí 2 thanh cốt dọc cấu tạo có đường kính 12mm, mặt trên dầm (thớ nén) bố trí 4 thanh đường kính 10mm. Cốt đai trong dầm sử dụng đường kính 6mm, bước cốt đai 175 mm. Các dầm có cùng hàm lượng cốt dọc cấu tạo chịu kéo ρ_s = 0.47%, cốt đai ρ_w = 0.29%. Thông số kỹ thuật của các dầm được tổng hợp trong Bảng 1. Kích thước hình học, cốt thép, cáp UST và tấm CFRP gia cường kháng uốn của các dầm thí nghiệm được thể hiện trên Hình 1 và Hình 2.



Hình 1. Cấu tạo của dầm thí nghiệm



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

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

Dầm được thí nghiệm theo sơ đồ dầm đơn giản chịu uốn bốn điểm (Hình 3). Vị trí điểm đặt lực cách gối tựa gần nhất một khoảng $L_o/3$ = 1870 mm. Biến dạng của tấm CFRP kháng uốn dọc theo nhịp dầm được xác định dựa trên 4 cảm biến (SG) dán trên bề mặt của tấm tại các vị trí giữa nhịp, 2 điểm đặt lực và đầu tấm cách gối tựa gần nhất một đoạn 650 mm. Biến dạng cáp UST được xác định thông qua 4 SGs khác. Biến dạng cốt dọc trong thớ kéo được xác định qua 1 SG dán tại vị trí giữa nhịp. Biến dạng bê tông được đo trên 4 SGs khác dán ở thớ chịu nén và thớ chịu kéo của dầm ở vị trí giữa nhịp dọc theo chiều cao dầm. Chuyển vị dầm được xác định dựa trên 5 chuyển vị kế điện tử (LVDTs) bố trí tại giữa nhịp, điểm đặt tải, và tại 2 gối tựa. Các dầm được gia tải với cấp tải 15 kN trong giai đoạn trước khi vết nứt uốn xuất hiện, sau đó giá trị mỗi cấp tải được tăng lên 30 kN. Sau mỗi cấp tải, tải trọng được giữ trong thời gian khoảng 3 phút để tiến hành đo chuyển vị, biến dạng của bê tông, thép dọc, thép đai, tấm CFRP và bề rộng khe nứt. Tất cả các giá trị lực, chuyển vị và biến dạng đều được đo tự động qua thiết bị thu nhận số liệu. Sơ đồ và vị trí lắp đặt thiết bị đo đạc được thể hiện trên Hình 1 và Hình 2.

Hình 3. Sơ đồ thí nghiệm dầm

3. Kết quả thí nghiệm

3.1. Kiểu phá hoại

Kết quả thí nghiệm các dầm được tổng hợp trong Bảng 2. Các dầm thí nghiệm đều bị phá hoại do uốn. Dầm không gia cường bị phá hủy do uốn kết hợp với bê tông vùng nén bị vỡ vụn. Các dầm gia cường bị phá hoại do uốn kết hợp với hiện tượng bong tách tấm, bê tông vùng nén trong các dầm gia cường không neo không bị nén vỡ. Vết nứt uốn trong các dầm bắt đầu hình thành ở cấp tải xấp xỉ 35% tải phá hoại, $P_{u,\,exp}$, trong nhịp uốn, bắt đầu từ thớ chịu kéo, vuông góc với trục dầm và sau đó phát triển về phía bản cánh chịu nén. Tại các cấp tải tiếp theo, cùng với sự phát triển của vết nứt cũ, các vết nứt mới xuất hiện và phát triển một cách đều đặn dần về 2 gối tựa. Tại cấp tải khoảng 70% tải phá hoại, $P_{u,\,exp}$, một số vết nứt xiên bắt đầu xuất hiện trong nhịp cắt. Tại cấp tải xấp xỉ 90% $P_{u,\,exp}$, hiện tượng bong tách tấm gia cường xuất hiện. Cơ chế bong tách tấm trong các dầm gia cường không có nhiều khác biệt. Quá trình bong tách bắt đầu từ vị trí điểm đặt lực và lan dần ra hai gối tựa. Điều này là hợp lý do ứng suất kéo trong dầm tại các vị trí này là lớn nhất nên tấm sớm bị bong tách tại đây. Hiện tượng bong tách tấm trong các dầm gia cường không neo diễn ra rất nhanh, tấm CFRP khi bong tách kéo theo lớp bê tông bảo vệ dầm. Đối với các dầm gia cường có neo, hiện tượng bong tách diễn ra chậm hơn. Hệ neo CFRP dạng dải U phát huy tốt vai trò của chúng, làm chậm quá trình bong tách từ đó làm tăng khả năng chịu tải và biến dạng của các dầm gia cường. Vết nứt trong các dầm gia cường có neo phát triển chậm và nhỏ hơn hơn so với các dầm gia cường không sử dụng hệ neo. Bề rộng vết nứt đo được khi các dầm bị phá hoại xấp xỉ từ 1.5 đến 1.8 mm. Bề rộng vết nứt của các dầm gia cường đo được tại cấp tải phá hoại nhỏ hơn so với dầm đối chứng từ 1.3 đến 3.5 lần.

Bảng 2

Tổng hợp kết quả thí nghiệm

Mẫu dầm	$b \times h \times b_f \times h_f \times L$	$P_{cr,exp}$	$P_{u,exp}$	$\delta_{u,mid}$	ε_{cu}	$\varepsilon_{fu,end}$	$\varepsilon_{fu,L/3}$	$\varepsilon_{fu,mid}$	$\varepsilon_{ten,u,end}$	$\varepsilon_{ten,u,mid}$	ε_{su}
	(mm)	kN	kN	mm	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰
M0	110×360×200×90×6000	50	145	75	2.53	-	-	-	-	5.84	33.5
M2CB		50	156	82	2.86	0.21	9.22	9.45	3.79	2.61	11.6
M4CB		50	165	90	1.78	1.00	11.4	11.5	-	-	29.1
M6CB		68	190	105	3.02	0.33	8.13	5.78	3.82	4.44	32.0
M2CB-AN1		60	176	100	3.86	15.0	13.6	10.9	9.31	9.57	27.4
M4CB-AN1		60	189	116	2.74	8.20	8.05	5.50	5.87	3.98	24.2
M6CB-AN1		69	199	124	3.55	11.1	9.54	7.64	6.30	4.41	19.4
M2CB-AN2		60	169	90	3.24	13.9	11.5	7.54	-	5.00	27.6
M4CB-AN2		60	189	115	2.10	9.92	11.2	9.48	5.72	5.68	-

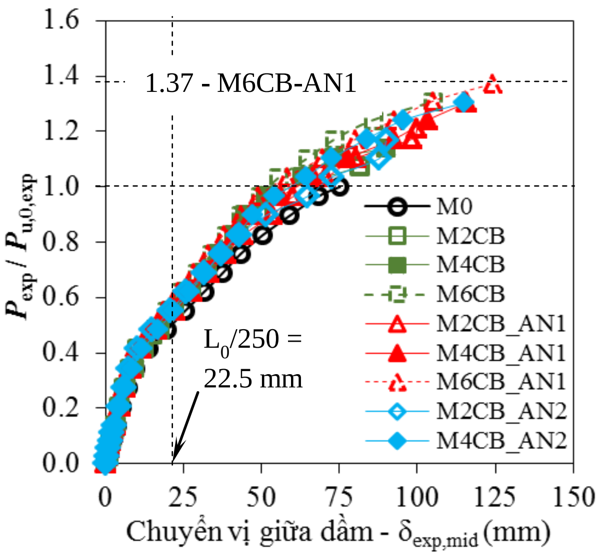
Ghi chú: $P_{cr,exp}$ (kN) là lực gây vết nứt uốn đầu tiên*;* $P_{u,exp}$ (kN) là lực gây phá hoại dầm*;* δ_u (mm) là chuyển vị giữa nhịp lớn nhất của dầm; ε_{cu} và ε_{su} là biến dạng nén lớn nhất của bê tông và biến dạng kéo lớn nhất của cốt dọc tại giữa nhịp*;* $\varepsilon_{fu,end}$, $\varepsilon_{fu,L/3}$, *và* $\varepsilon_{fu,mid}$ (‰) là biến dạng kéo lớn nhất của tấm gia cường kháng uốn CFRP tại các vị trí đầu mút, điểm đặt lực và giữa nhịp dầm*;* $\varepsilon_{ten,u,end}$ *và* $\varepsilon_{ten,u,mid}$ (‰) là biến dạng kéo lớn nhất của cáp UST tại các vị trí đầu neo và giữa nhịp dầm.

(a) *(b)*

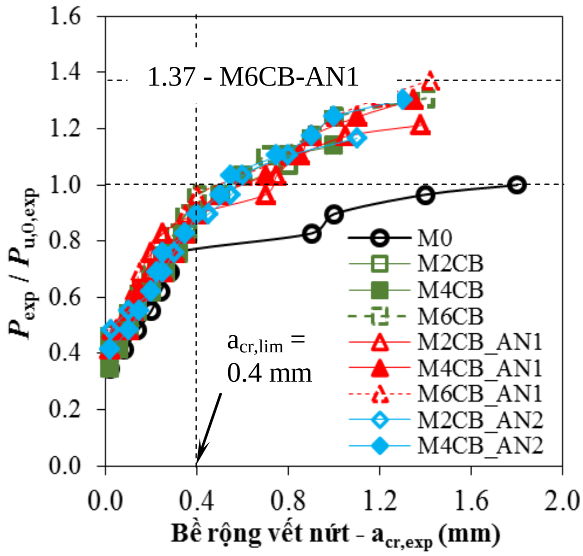
Hình 4. Hình thái vết nứt và kiểu phá hoại điển hình của dầm
(a) dầm không gia cường; **(b)** dầm gia cường

Có sự khác biệt giữa ứng xử của hệ neo của dầm neo tập trung (AN1) và neo phân bố đều (AN2). Các dải neo kiểu AN2 có xu hướng không bị đứt khi dầm bị phá hoại, tấm gia cường kháng uốn CFRP bị bong tách trong nhịp uốn và sự bong tách này dừng lại tại dải neo đầu tiên gần với điểm tác dụng lực; trong khi các dải neo kiểu AN1 trong các dầm có số lớp gia cường kháng uốn CFRP lớn (4 và 6 lớp) đều bị đứt đồng loạt tại vị trí góc dầm do hiện tượng tập trung ứng suất lớn tại các vị trí này; ngoài ra hiện tương bong tách tấm ở các dầm được gia cường với số lớp CFRP lớn cũng có xu hướng diễn ra rõ ràng và nhanh chóng hơn. Hình thái vết nứt và kiểu phá hoại của một số dầm điển hình được thể hiện trên Hình 4.

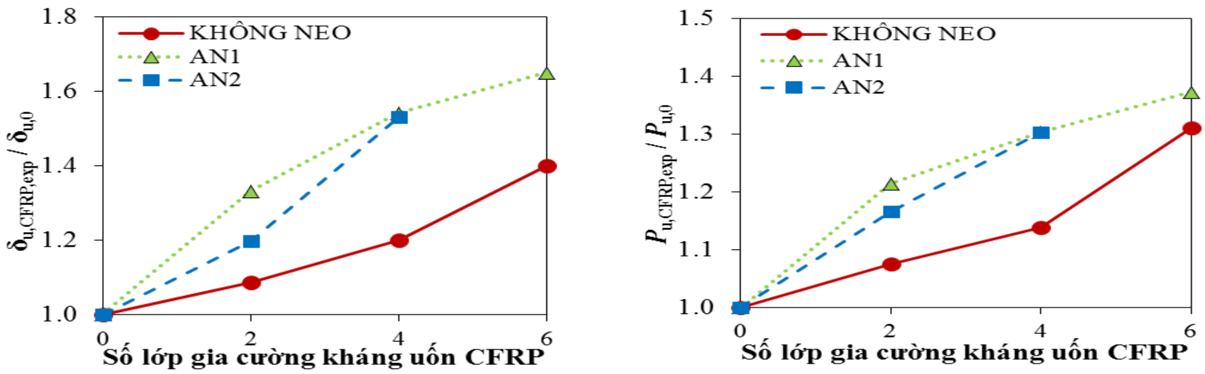
3.2. Quan hệ lực - chuyển vị



Hình 5. Quan hệ lực – chuyển vị các dầm thí nghiệm



Hình 7. Quan hệ lực – bề rộng vết nứt các dầm thí nghiệm

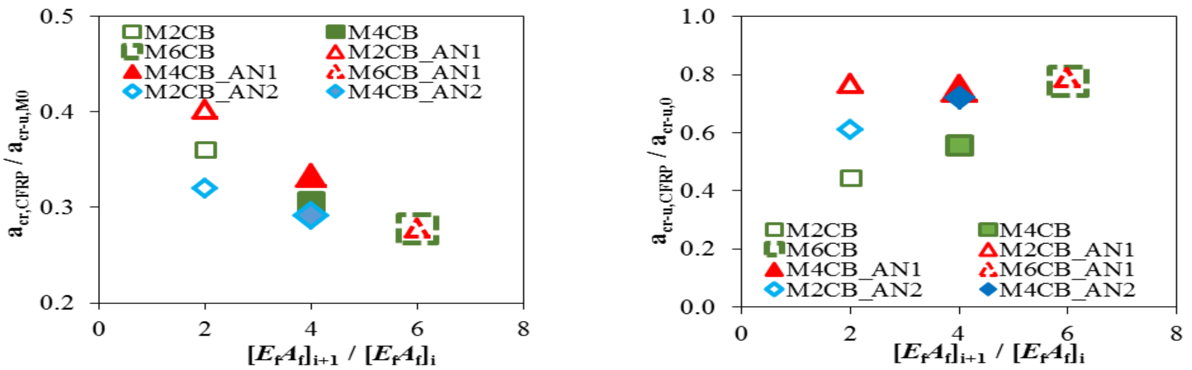


(a) *(b)*

Hình 6. Sự gia tăng chuyển vị cuối cùng và khả năng kháng uốn của dầm gia cường tấm CFRP so với dầm đối chứng tương ứng theo số lớp gia cường: (a) sự gia tăng chuyển vị cuối cùng; (b) sự gia tăng khả năng chịu uốn

Quan hệ lực-chuyển vị của các dầm gia cường có neo, không neo và dầm đối chứng tương ứng không có nhiều khác biệt (Hình 5). Quan hệ này có thể chia làm 2 giai đoạn. Giai đoạn từ cấp tải 0 đến khoảng 35-40% tải phá hoại của dầm đối chứng, các dầm làm việc gần như giống nhau và tuyến tính. Điều này cho thấy sự khác biệt về mặt độ cứng giữa các dầm được hay không được gia cường là rất nhỏ. Sau giai đoạn này trở đi, sự xuất hiện và mở rộng của các vết nứt uốn làm cho độ cứng của dầm giảm và chuyển vị bắt đầu tăng nhanh theo độ lớn của tải trọng. Ở giai đoạn này, tấm CFRP ảnh hưởng đến chuyển vị của dầm thông qua việc hạn chế sự mở rộng của các vết nứt uốn từ đó làm cho chuyển vị của các dầm gia cường nhỏ hơn so với dầm đối chứng tương ứng xét tại cùng một cấp tải; và đồng thời làm tăng khả năng biến dạng (chuyển vị cuối cùng) của dầm gia cường so với dầm đối chứng tương ứng từ 9% đến 40% đối với các dầm gia cường không neo; từ 20 đến 53% với dầm gia cường có neo kiểu phân bố đều AN2; và từ 33 đến 65% với dầm gia cường có neo kiểu tập trung AN1. Có thể thấy sự gia tăng này tăng theo số lớp gia cường kháng uốn CFRP và hệ neo AN1 cải thiện khả năng biến dạng của dầm gia cường tốt hơn so với hệ neo AN2 truyền thống (Hình 6a). Tấm CFRP làm gia tăng đáng kể khả năng kháng uốn của các dầm. Mức độ gia tăng khả năng kháng uốn của dầm gia cường tăng theo số lớp tấm gia cường, theo đó mức độ gia tăng dao động từ 8 đến 31% đối với dầm gia cường không neo và từ 21 đến 37% đối với dầm gia cường có neo (Hình 6b). Cùng hàm lượng gia cường, khả năng kháng uốn của dầm gia cường có neo theo kiểu AN1 lớn hơn không đáng kể so với dầm sử dụng dạng neo AN2 (khoảng 4%).

3.3. Ứng xử nứt của dầm thí nghiệm

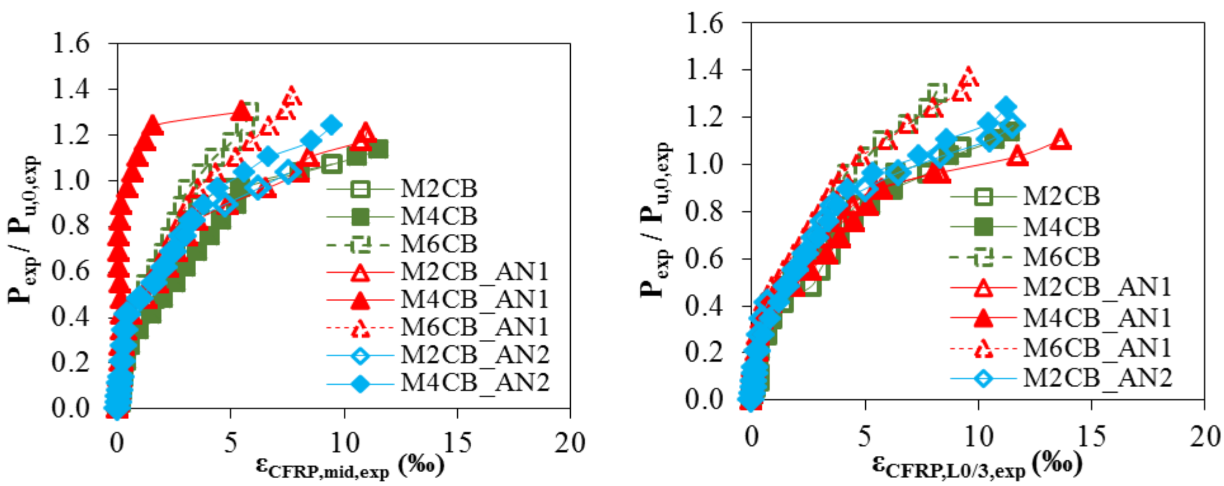


(a) *(b)*

Hình 8. Sự chiết giảm của bề rộng vết nứt của các dầm gia cường so với dầm đối chứng theo sự gia tăng độ cứng của tấm gia cường: (a) tại cấp tải phá hoại của dầm đối chứng - $P_{u,0,exp}$; (b) tại cấp tải phá hoại của các dầm - $P_{u,exp}$

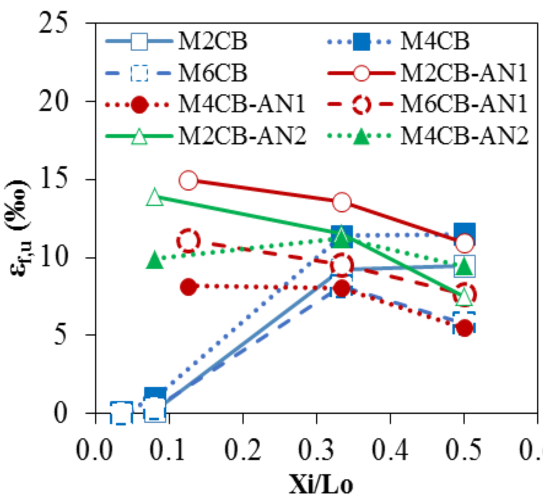
Tấm gia cường CFRP cho thấy sự hiệu quả của nó trong việc kiểm soát nứt và làm giảm bề rộng của vết nứt trong dầm (Hình 7). Ứng xử nứt của các dầm gia cường tương tự nhau. Vết nứt uốn trong các dầm gia cường xuất hiện trễ hơn so với trong dầm đối chứng. Lực gây nứt uốn $P_{cr,exp}$ của dầm gia cường lớn hơn so với của dầm không gia cường từ 20 đến 38% (Bảng 2). Tại cấp tải phá hoại của dầm đối chứng $P_{u,0,exp}$, bề rộng vết nứt của các dầm gia cường nhỏ hơn so với của dầm đối chứng từ 2.5 đến 3.5 lần. Bề rộng vết nứt giảm dần theo sự gia tăng độ cứng dọc trục (E_fA_f) của tấm (A_f là diện tích tiết diện tấm CFRP) (Hình 8a). Tương tự, tại cấp tải phá hoại của từng dầm, bề rộng vết nứt trong các dầm gia cường cũng nhỏ hơn rõ rệt so với của dầm đối chứng từ 1.3 đến 3.5 (Hình 8b).

3.4. Biến dạng của tấm gia cường kháng uốn CFRP

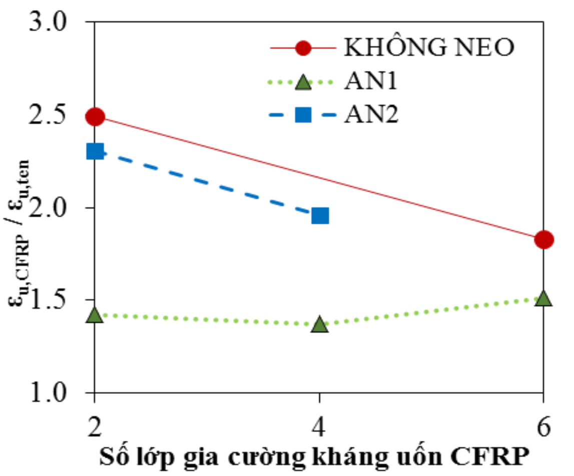


(a) *(b)*

Hình 9. Quan hệ lực – biến dạng tấm gia cường kháng uốn CFRP
(a) biến dạng giữa nhịp; **(b)** biến dạng tại điểm tác dụng lực



Hình 10. Biến dạng trong tấm gia cường kháng uốn CFRP



Hình 11. Tương tác giữa biến dạng lớn nhất của tấm gia cường kháng uốn CFRP và cáp trong các dầm thí nghiệm theo số lớp CFRP

Quan hệ lực và biến dạng tấm CFRP và cốt đai của các dầm được thể hiện ở Hình 9. Giai đoạn đầu tiên (≤ 40% tải phá hoại của dầm đối chứng, $P_{u,0,exp}$), tấm CFRP biến dạng bé và hầu như không phụ thuộc số lớp gia cường và kiểu neo. Từ cấp tải từ 40% $P_{u,0,exp}$ trở đi, tấm bắt đầu làm việc nhiều hơn, biến dạng của tấm tăng nhanh. Trong giai đoạn này, tấm CFRP của dầm không neo bị biến dạng nhiều hơn so với tấm CFRP của các dầm có neo. Biến dạng của tấm CFRP tại vị trí điểm tác dụng lực có xu hướng lớn hơn vị trí giữa nhịp dầm. Đối với các dầm gia cường không neo, biến dạng cuối cùng của tấm CFRP tại vị trí giữa nhịp và điểm tác dụng lực lần lượt là 5.78 đến 8.45‰ và 8.13 đến 9.22‰ (bằng 28.3% đến 45% cường độ chịu kéo lớn nhất của tấm CFRP). Trong khi đó, biến dạng lớn nhất của tấm CFRP ở dầm gia cường neo dạng AN1 lần lượt là 5.5 đến 10.9‰ và 8.05 đến 13.6‰ (bằng 27% đến 66.6% cường độ chịu kéo lớn nhất của tấm CFRP). Đối với nhóm dầm gia cường neo dạng AN2, biến dạng lớn nhất của tấm CFRP lần lượt là 7.54 đến 9.48‰ và 11.2 đến 11.5‰ (bằng 36,9% đến 56.3% cường độ chịu kéo lớn nhất của tấm CFRP). Biến dạng cuối cùng của tấm CFRP giảm theo số lớp gia cường.

Sự phân bố biến dạng trong tấm gia cường kháng uốn CFRP trong các dầm gia cường có neo và không neo có sự khác biệt đáng kể (Hình 10). Ở cấp tải phá hoại, biến dạng tấm CFRP của các dầm không neo phân bố không đều; chúng khá lớn ở giữa nhịp, trong khi ở vị trí đầu mút hầu như không đáng kể. Thực tế, ứng suất kéo ở thớ dưới của dầm trong vùng gần gối dầm là rất bé theo biểu đồ phân bố nội lực trong dầm đơn giản; điều này kết hợp với sự bong tách của tấm CFRP quá nhanh như trong các dầm không neo như đã đề cập, làm cho biến dạng của tấm tại vùng hai đầu mút hầu như rất bé. Đối với các dầm gia cường có neo, sự phân bố biến dạng trong tấm CFRP ở cấp tải phá hoại đều đặn hơn. Sự làm việc hiệu quả của hệ neo làm cho biến dạng của tấm ở vùng hai đầu mút lớn. Sự phân bố biến dạng trong tấm CFRP không bị ảnh hưởng bởi dạng neo AN1 hoặc AN2.

3.5. Biến dạng của cáp và bê tông

Biến dạng lớn nhất của cáp đo được tại vị trí giữa nhịp và đầu neo không có sự chênh lệch lớn (Bảng 2). Biến dạng của cáp trong dầm không gia cường xấp xỉ 5.8‰ (tương ứng với 67.5% giới hạn chảy quy ước của cáp f_{py}); trong các dầm gia cường không neo dao động từ 3.79 đến 4.44‰ (tương ứng với 44 đến 51.7% f_{py}); trong các dầm gia cường neo loại AN1 từ 5.87 đến 9.57‰ (tương ứng với 68.3 đến 111% f_{py}), và trong các dầm gia cường neo loại AN2 thay đổi từ 5.0 đến 5.72‰ (tương ứng với 58.2 đến 66.6% f_{py}) (Bảng 2). Đối với các dầm không neo và có neo theo kiểu truyền thống AN2, sự gia tăng biến dạng trong cáp trở nên nhanh hơn so với sự gia tăng biến dạng của tấm CFRP (cáp có xu hướng làm việc nhiều hơn) khi số lớp gia cường tăng (Hình 11); trong khi, tốc độ gia tăng biến dạng của cáp và tấm CFRP trong các dầm gia cường dạng neo AN1 có xu hướng đều hơn và không phụ thuộc vào số lớp gia cường.

Biến dạng của bê tông của các dầm tại thời điểm dầm bị phá hoại đa phần đều vượt qua giá trị 2‰. Điều này hàm ý rằng, bê tông vùng nén của các dầm thí nghiệm đều đã làm việc trong giai đoạn phi tuyến và tiệm cận với giá trị biến dạng nén vỡ bê tông. Số lớp CFRP gia cường và dạng neo không có ảnh hưởng rõ ràng đến biến dạng nén của bê tông.

4. Kết luận

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

Hệ neo CFRP dạng U làm tăng đáng kể khả năng biến dạng (chuyển vị cuối cùng) của dầm gia cường so với dầm đối chứng tương ứng (lên đến 65%), từ đó làm tăng tính dẻo dai cho dầm; sự gia tăng này tăng theo số lớp gia cường kháng uốn CFRP;

Hệ neo CFRP dạng U tập trung (AN1) giúp cải thiện khả năng biến dạng của dầm gia cường tốt hơn so với hệ neo CFRP dạng phân bố đều (AN2), giúp cho biến dạng trong tấm gia cường kháng uốn CFRP phân bố được đều đặn hơn, từ đó giúp kiểm soát tốt hơn quá trình bong tách tấm CFRP và khai thác tối đa hiệu quả gia cường của tấm CFRP; ngoài ra hệ neo này còn giúp điều tiết ứng xử tương tác giữa tấm gia cường kháng uốn CFRP và cáp UST, giúp cáp UST làm việc hiệu quả hơn.

Tấm CFRP làm gia tăng đáng kể khả năng kháng uốn của các dầm. Mức độ gia tăng khả năng kháng uốn của dầm gia cường tăng theo số lớp tấm gia cường, theo đó mức độ gia tăng dao động từ 8 đến 31% đối với dầm gia cường không neo và từ 21 đến 37% đối với dầm gia cường có neo. Kiểu neo không ảnh hưởng đáng kể đến khả năng kháng uốn của dầm gia cường;

Tấm gia cường CFRP giúp kiểm soát hiệu quả ứng xử nứt và làm giảm bề rộng của vết nứt trong dầm. Bề rộng vết nứt của các dầm gia cường nhỏ hơn so với của dầm đối chứng từ 2.5 đến 3.5 lần tại cấp tải phá hoại của dầm đối chứng và tỉ lệ theo sự gia tăng số lớp CFRP gia cường;

Biến dạng cuối cùng của tấm CFRP trong các dầm gia cường không neo nằm trong khoảng từ 8.13 đến 9.22‰ (bằng 28.3% đến 45% cường độ chịu kéo của tấm CFRP); trong các dầm gia cường có neo dao động từ 5.5 đến 13.6‰ (bằng 27% đến 66.6% cường độ chịu kéo của tấm CFRP) và chúng giảm theo số lớp gia cường■

Tài liệu tham khảo

ACI 440.2R-08 (2008). Guide For the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening of Concrete Structures. *Reported by ACI Committee 440*.

ACI 318-11 (2011). Building Code Requirements for Structural Soncrete and Commentary. *ACI Manual of Concrete Practice*, Farmington Hills, Michigan.

Alagusundaramoorthy, P., Harik, I. E., and Choo, C. C. (2003). Flexural behavior of R/C beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets or fabric. *Journal of Composites for Construction*, *7*(4), 292-301.

Ali, A., Abdalla, J., Hawileh, R., and Galal, K. (2014). CFRP mechanical anchorage for externally strengthened RC beams under flexure. *Eighth International Conference on Material Sciences* (CSM8-ISM5).

Bahn, B. Y. and Harichandran, R. S. (2008). Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets and epoxy mortar. *Journal of Composites for Construction, ASCE*, *12*(4), 387-395.

Bonacci, J. F., and Maalej, M. (2001). Behavioral trends of RC beams strengthened with externally bonded FRP. *Journal of Composites for Construction*, *5*(2), 102-113.

Brena, S. F., and Marci, B. M. (2004). Effect of carbon-fiber-reinforced polymer laminate configuration on the behavior of strengthened reinforced concrete beams. *Journal of Composites for Construction*, *8*(3), 229-240.

Colotti, V., and Spadea, G. (2001). Shear strength of RC beams strengthened with bonded steel or FRP plates. *Journal of Structural Engineering*, *127*(4), 367-373.

Dung, N. T. T. (2014). Effects of externally bonded CFRP sheets on flexural strengthening of pretensioned Prestressed Concrete beams having ruptured strands. *Journal of JSCE*, *2*, 25-38.

Garden, H. N., and Hollaway, L. C. (1998). An experimental study of the influence of plate end anchorage of carbon fiber composite plates used to strengthen reinforced concrete beams. *Composite Structures*, *42*(2), 175-188.

Kasan, J. L., and Harries, K. A. (2009). Repair of impact-damaged prestressed concrete bridge girders with carbon fiber reinforced polymers. *The Proceedings of the 2nd Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS 2009)*, 157-162.

Meier, U., and Deuring, M. (1991). The application of fiber composites in bridge repair. *Strasse WId Verkehr*, *77*(9), 775-777.

Meier, U., Deuring, M., Meier, H., and Schuregler, G. (1992). Strengthening of structures with CFRP laminates: research and applications in Switzerland. *Proc. 1st International Conference on Advanced Composite Materials In Bridges and Structures, The Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Canada*, 243-251.

Reed, C. E., and Peterman, R. J. (2004). Evaluation of prestressed concrete girders strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets. *Journal of Bridge Engineering*, *9*(2), 185-192.

Sobuz, H. R., Ahmed, E., Uddin, M. A., and Hasan, N. M. S. (2011). Structural strengthening of RC beams externally bonded with different CFRP laminates configurations. *Journal of Civil Engineering*, *39*(1), 33-47.

Spadea, G., Bencardino, F., and Swamy, R. N. (1998). Structural behavior of composite RC beams with externally bonded CFRP. *Journal of Composites for Construction*, *2*(3), 132–137.

Teng, J. G., Smith, S. T., Yao, J., and Chen, J. F. (2003). Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs. *Construction and Building Materials*, *17*, 447-62.