

Tác động của hệ neo dạng U đến hiệu quả gia cường uốn của tấm CFRP trong dầm bê tông căng sau chịu ảnh hưởng bởi tải lặp

■ TS. ĐẶNG ĐĂNG TÙNG; THS. TRẦN THANH DƯƠNG; PGS. TS. NGUYỄN MINH LONG

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

TÓM TẮT: Bài báo khảo sát thực nghiệm ảnh hưởng của hệ neo dạng U đến hiệu quả gia cường uốn của tấm CFRP và ứng xử của dầm bê tông căng sau (UPC) được gia cường bằng tấm CFRP chịu ảnh hưởng bởi tải trọng lặp. Chương trình thực nghiệm bao gồm 4 dầm UPC tiết diện T kích thước lớn được gia cường bằng tấm CFRP không có hoặc có hệ neo dạng U làm từ tấm sợi CFRP với diện tích neo và vùng bố trí khác nhau. Kết quả thí nghiệm cho thấy, hệ neo hạn chế được sự bong tách sớm và giúp tăng mạnh biến dạng lớn nhất của tấm CFRP không uốn, do đó làm tăng khả năng chịu lực và tính dẻo dầm UPC gia cường. Việc tăng diện tích neo không ảnh hưởng đến khả năng chịu lực của dầm. Tuy nhiên, cách bố trí neo có ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử của dầm. Ngoài ra, chiều cao của dải neo U tối thiểu nên bằng 0.5 lần chiều cao của tiết diện dầm để đảm bảo sự làm việc hiệu quả của hệ neo.

TỪ KHÓA: Hệ neo dạng U, tấm CFRP, dầm bê tông căng sau, cáp không bám dính, ứng xử tĩnh sau khi chịu tải trọng lặp.

ABSTRACT: This paper investigates the effect of U-wrap anchorage made of CFRP sheets (U-wraps) on the flexural strengthening efficiency of longitudinal CFRP sheets and the monotonic behaviour of CFRP-strengthened unbonded post-tensioned concrete (UPC) beams after being subjected to repeated loading. Experimental program was composed of four large-scale UPC beams with T-section strengthened with the varied number of CFRP sheet layers and without/with U-wraps having various arrangement zones and anchorage areas. Experimental test results have shown that U-wraps evidently prevented premature debonding of CFRP sheets and significantly increased the maximum CFRP sheet strain, hence, raised the bearing capacity and the ductility of the beams. The increase of anchorage areas had a negligible effect on the bearing capacity of the

beams; however, the arrangement of U-wraps noticeably influenced the beam's behaviour. Furthermore, the height of U-wrap anchorage from the bottom of beams should be at least 0.5 times of the height of beams to ensure the successful effect of U-wraps.

KEYWORDS. U-wrap anchorage, CFRP sheets, post-tensioned concrete beams, unbonded tendons, post-repeated monotonic behaviour.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Rất nhiều nghiên cứu trên dầm bê tông ứng suất trước (Di Ludovico et al. 2010; Nguyen-Minh et al. 2018) chỉ ra rằng, hệ neo giúp hạn chế hiệu quả sự bóc tách sớm của tấm gia cường FRP, cải thiện đáng kể ứng xử dẻo của dầm gia cường bằng vật liệu này, tăng hiệu quả sử dụng của tấm từ đó làm tăng đáng kể khả năng chịu lực của dầm. Mặc dù vậy, sự làm việc của hệ neo như thế nào, sự phân bố biến dạng của từng neo (chẳng hạn neo dạng dải U) trong hệ neo ra sao vẫn chưa được trình bày tường minh và vì vậy chưa thể tối ưu hóa được việc thiết kế hệ neo. Đặc biệt cho đến nay, ảnh hưởng của hệ neo U đến ứng xử uốn của dầm bê tông căng sau dùng cáp không bám dính (UPC) vẫn chưa được làm rõ. Điều này cho thấy rất cần có các nghiên cứu về hệ neo U, cụ thể cho trường hợp dầm UPC, làm cơ sở cho việc đưa ra các chỉ dẫn thiết kế hệ neo phù hợp cho loại cấu kiện này.

Nghiên cứu này phân tích thực nghiệm tác động của hệ neo U đến hiệu quả gia cường kháng uốn của tấm CFRP và ứng xử tĩnh của dầm UPC tiết diện T được gia cường bằng tấm CFRP chịu ảnh hưởng bởi tải trọng lặp. Mục tiêu chính của của bài báo gồm: (1) Phân tích ảnh hưởng của hệ neo U với diện tích và vùng bố trí khác nhau đến ứng xử và khả năng kháng uốn của dầm UPC gia cường; (2) khảo sát sự phân bố biến dạng của hệ neo U với diện tích và vùng bố trí khác nhau; (3) phân tích ảnh hưởng của hệ neo U đến biến dạng của tấm CFRP gia cường uốn trong dầm UPC.

2. CHƯƠNG TRÌNH THÍ NGHIỆM

2.1. Thiết kế dầm thí nghiệm

Thông số vật liệu và tổng hợp các thông số thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 2.1 và 2.2. Bê tông thương phẩm được sử dụng trong nghiên cứu này với cường độ chịu nén mẫu lập phương là $f_{cu,bê} = 48.4\text{MPa}$. Chương trình thí nghiệm bao gồm 4 dầm UPC tiết diện T gia cường bốn lớp CFRP kháng uốn có tỷ lệ 1/2 theo kích thước thực (Hình 2.1), trong đó có một dầm không được xem là dầm đối chứng (dầm C4) và ba dầm có hệ neo U làm bằng vật liệu CFRP kiểu AN2, AN3r1 và AN5 (dầm C4-AN2, C4-AN3r1 và C4-AN5, Hình 2.2). Bong tách của tấm FRP có thể được phân thành hai dạng chính (Teng et al. 2003): Bong tách ở cuối tấm và bong tách do vết nứt xuất hiện trong nhịp dầm (bong tách do vết nứt). Để hạn chế bong tách, hệ neo U được sử dụng trong nghiên cứu này, trong đó hệ neo AN2 được bố trí trong nhịp cắt ở hai đầu dầm nhằm hạn chế bong tách ở cuối tấm và ngăn chặn sự lan truyền về phía hai đầu dầm của bong tách do vết nứt; hệ neo AN3r1 được bố trí tương tự như AN2, tuy nhiên được bố trí trong toàn nhịp cắt với hy vọng là hạn chế sự bong tách hiệu quả hơn. Hệ neo AN5 được bố trí trong toàn nhịp uốn và một phần ở nhịp cắt nhằm ngăn chặn cả hai dạng bong tách này (Hình 2.2). Hệ neo AN2, AN3r1 và AN5 có diện tích neo một bên dầm lần lượt là 199mm^2 , 332mm^2 và 332mm^2 , tương ứng 78%, 130% và 130% diện tích neo yêu cầu theo ACI 440.2R-17 (2017).

Bảng 2.1. Thông số cơ học của vật liệu thí nghiệm

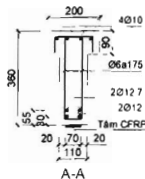
Cáp*			Tấm CFRP*			Cốt thép dọc		
f_u (MPa)	f_p (MPa)	E_p (GPa)	f_u (MPa)	E_p (GPa)	ϵ_{pu} (%)	f_u (MPa)	f_y (MPa)	E_s (GPa)
1860	1670	196	4900	240	2.1	600	430	200

Ghi chú: * Giá trị được cung cấp bởi nhà sản xuất; f_u , f_p , f_y và f_u - Cường độ chịu kéo của cáp, tấm CFRP và cốt thép; f_y và f_u - Giới hạn chảy của cáp và cốt thép; E_p , E_s và E_s - Mô-đun đàn hồi của cáp, tấm CFRP và cốt thép; ϵ_{pu} - Biến dạng kéo đứt của tấm CFRP.

Bảng 2.2. Tổng hợp các thông số thí nghiệm

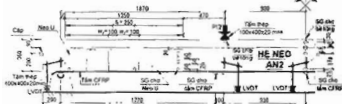
Dầm	ρ_s %	ρ_{sw} %	ρ_p %	n_s	t_s mm	a_s mm	A_s mm ²	w_s mm	t_s mm
C4				4	0.166	70	46	--	--
C4-AN2				4	0.166	70	46	100	250
C4-AN3r1	0.47	0.29	0.41	4	0.166	70	46	100	210
C4-AN5				4	0.166	70	46	100	235,195

Ghi chú: ρ_s , ρ_{sw} và ρ_p - Hàm lượng cốt thép, cốt đai và cáp; n_s , t_s , a_s và A_s - Số lớp, chiều dày, bề rộng và diện tích tấm CFRP kháng uốn; w_s và s_s - Bề rộng và bước neo U.

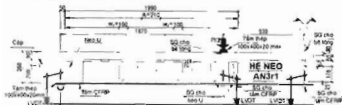


b) - Mặt cắt A-A

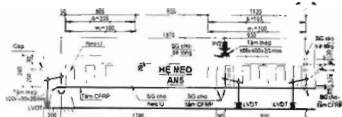
Hình 2.1: Chi tiết cấu tạo của dầm thí nghiệm



a) - Cấu hình gia cường và sơ đồ bố trí cảm biến cho neo AN2



b) - Cấu hình gia cường và sơ đồ bố trí cảm biến cho neo AN3r1



c) - Cấu hình gia cường và sơ đồ bố trí cảm biến cho neo AN5

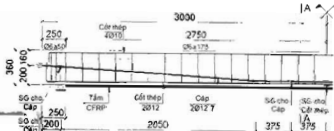
Hình 2.2: Sơ đồ thí nghiệm

2.2. Bố trí và quy trình thí nghiệm

Các dầm được thí nghiệm theo sơ đồ dầm đơn giản chịu uốn bốn điểm với biến dạng của cáp, tấm CFRP, cốt thép, bê tông và hệ neo U được ghi nhận bằng cảm biến điện trở (SG), trong khi chuyển vị dầm được xác định qua 5 chuyển vị kế điện tử (LVDT) (Hình 2.2). Thí nghiệm lần lượt được tiến hành thông qua ba pha liên tiếp như sau:

(i) Pha 1 - Các dầm chịu tải trong lắp dạng hình sin (tần số là 2 Hz) trong 500 ngàn chu kỳ có biên độ tải không đổi với tải trên của tải lập là 45 kN tương ứng 98% tải trọng gây nứt (P_{cr}) trong dầm không gia cường có cùng cấu hình trong thí nghiệm của Nguyen-Minh et al. (2018) và cận dưới của tải lập là 8 kN ứng với tình tải của các lớp ngoài thiện. Các dầm được thí nghiệm bằng hệ thống MTS dynamic testing system. Mục đích là khảo sát ứng xử lặp của dầm trong điều kiện làm việc bình thường.

(ii) Pha 2 - Sau Pha 1, các dầm tiếp tục chịu tải trọng lặp qua 128 ngàn chu kỳ, tuy nhiên với tải trên của tải lập lớn hơn, 76 kN, tương ứng 1.65 P_{cr} và bằng với cáp tải gây ra độ võng giới hạn ($L/250 = 22.4\text{mm}$) theo EC 2 (2004)



a) - Mặt cắt dọc dầm và vị trí bố trí cảm biến (SG)

trong dầm không gia cường có cùng cấu hình trong thí nghiệm của Nguyen-Minh et al. (2018). Cận dưới của tải lập trong pha này được giữ nguyên (8 KN). Mục tiêu của pha này là khảo sát ảnh hưởng của hệ neo U trong trường hợp dầm làm việc trong điều kiện chịu tải trọng lập có giá trị cận trên của tải lập đã vượt qua đáng kể tải gây nứt và bằng với tải trọng giới hạn sử dụng.

(iii) Pha 3 - Sau Pha 2, các dầm được gia tải tĩnh cho đến khi phá hoại. Mục tiêu là khảo sát ảnh hưởng của hệ neo U đến ứng xử tĩnh sau lập của các dầm UPC gia cường.

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ BÌNH LUẬN

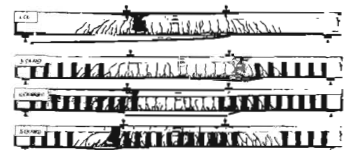
3.1. Giai đoạn chịu tải trọng lập

Từ các kết quả ghi nhận trong suốt quá trình chịu tải trọng lập của các dầm thí nghiệm cho thấy hệ neo U hầu như không ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử của các dầm UPC được gia cường bằng tấm CFRP trong suốt quá trình chịu tải lập.

Bảng 3.1. Tổng hợp kết quả thí nghiệm

Dầm	P_u	$\delta_{u,md}$	$e_{u,max}$	$e_{u,min}$	$e_{u,av}$	$e_{u,md}$	Kiểu phá hoại
	KN	mm	%	%	%	%	
C4	174	96	--	--	11.2	7.95	Bong tách tấm CFRP
C4-AN2	186	142	3.28	1.35	14.1	9.65	Cáp chằng + Nén vỡ bê tông + Bong tách tấm cục bộ
C4-AN3r1	187	151	2.59	0.88	18.6	10.59	Cáp chằng + Nén vỡ bê tông + Bong tách và đứt tấm
C4-AN5	174	136	2.51	1.16	12.0	8.81	Cáp chằng + Nén vỡ bê tông + Bong tách tấm cục bộ

Ghi chú: P_u và $\delta_{u,md}$ lần lượt là tải trọng và chuyển vị giữa nhịp lớn nhất của các dầm; $e_{u,max}$ và $e_{u,min}$ lần lượt là biến dạng lớn nhất trong các dải neo và biến dạng trung bình của các dải neo U trong hệ neo tại thời điểm phá hoại; $e_{u,av}$ là biến dạng lớn nhất của tấm CFRP kháng uốn ở điểm đặt lực; $e_{u,md}$ là biến dạng lớn nhất của cáp.



Hình 3.1. Dạng phá hoại của các dầm ở giai đoạn thí nghiệm tĩnh sau lập

3.2. Ảnh hưởng của hệ neo U đến ứng xử tĩnh của dầm UPC gia cường chịu ảnh hưởng bởi tải trọng lập

3.2.1. Ảnh hưởng đến dạng phá hoại của dầm

Sau giai đoạn lập, các dầm được cho thử tải đơn điệu cho đến khi phá hoại với dạng phá hoại được thể hiện ở Hình 3.1. Dầm gia cường không neo (dầm C4) bị phá hoại do uốn với tấm CFRP bị bong tách, sự bong tách này bắt đầu tại vị trí gần điểm đặt lực do sự mở rộng quá mức của vết nứt uốn tải đây và sau đó lan truyền hướng về hai gối tựa của dầm.

Các dầm có neo có hình thái vết nứt, kiểu phá hoại phức tạp hơn và bị chi phối mạnh bởi kiểu neo. Trong đó, hai dầm C4-AN2 và C4-AN5 bị phá hoại do vết nứt

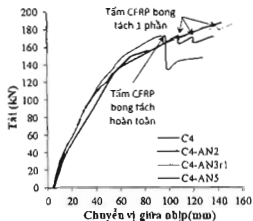
uốn-cắt kết hợp (Hình 3.1b và d) và dầm C4-AN3r1 bị phá hoại uốn (Hình 3.1c). Tại thời điểm phá hoại, cáp trong các dầm bị chằng theo sau là bê tông bị nén vỡ và tấm CFRP hoặc bị bong tách gây ra đứt/bong tách neo (dầm C4-AN2 và C4-AN5), hoặc bị bong tách/đứt neo cho hai dải neo đầu tiên ở mỗi bên dầm gần với điểm đặt lực bị đứt (dầm C4-AN3r1). Ở dầm C4-AN2 và C4-AN5, bên cạnh các vết nứt uốn đã hình thành trong giai đoạn lập trước đây, vết nứt xiên 45° (so với trục dầm) hình thành gần điểm đặt tải trong nhịp cắt kết hợp với vết nứt uốn lớn đã có sẵn gắn với điểm đặt tải làm các dầm bị phá hoại. Kiểu phá hoại của hai dầm này có tính giòn cao và đột ngột. Dạng bong tách của tấm CFRP trong hai dầm này khác với dầm không neo, tấm CFRP chỉ bị bong tách một phần do hệ neo đã ngăn chặn và làm dừng lại quá trình bong tách (Hình 3.1). Khác với neo AN2, hệ neo AN3r1 được bố trí trên toàn nhịp cắt nên giúp tăng khả năng kháng cắt cho vùng gần điểm đặt tải, giúp dầm tránh được kiểu phá hoại uốn-cắt như ở dầm C4-AN2 và chuyển qua phá hoại uốn. Dạng phá hoại này ít giòn hơn và ít gây hư hỏng cho tiết diện bê tông hơn (Hình 3.1). Phát hiện này cho thấy, việc bố trí hệ neo đầu đủ trong suốt nhịp cắt một mặt giúp hạn chế hiệu quả sự bong tách sớm của tấm CFRP, mặt khác còn giúp ngăn chặn các vết nứt xiên, làm cho ứng xử của dầm trở nên mềm dẻo hơn và có thể đạt được dạng phá hoại mong muốn (kiểu phá hoại đứt tấm).

3.2.2. Ảnh hưởng đến khả năng chịu lực và biến dạng của dầm

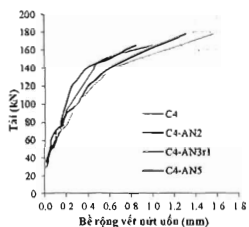
Ứng xử của các dầm gia cường có thể được chia ra làm hai giai đoạn chính (Hình 3.2): Giai đoạn (a) - trước cấp tải làm làm ứng xử phi tuyến của dầm trở nên rõ ràng, $\approx 0.6P_u$ với P_u là cấp tải lớn nhất của dầm thí nghiệm và giai đoạn (b) - từ cấp tải $0.6P_u$ đến cấp tải lớn nhất của dầm. Trong giai đoạn (a), các dầm có và không neo ứng xử tương đối giống nhau, điều này cho thấy là hệ neo U chưa làm việc nhiều trong giai đoạn này. Giai đoạn (b), khi ứng xử phi tuyến trong dầm trở nên rõ ràng, ứng suất kéo trong tấm CFRP kháng uốn lúc này rất lớn và vết nứt trong dầm cũng phát triển đáng kể về số lượng, bề rộng và chiều cao, điều này làm cho tấm CFRP bong tách như ở trường hợp dầm gia cường không neo (C4). Ở giai đoạn này, hệ neo bắt đầu phát huy tác dụng, làm chậm và hạn chế sự bong tách của tấm CFRP và do đó làm tăng khả năng chịu lực của các dầm gia cường với hệ neo được bố trí ở hai đầu dầm (C4-AN2 và C4-AN3r1) lên khoảng 8% so với dầm không neo (Bảng 3.1). Việc tăng diện tích của hệ neo (diện tích của hệ neo AN3r1 lớn hơn 67% so với AN2) không ảnh đến khả năng kháng uốn của dầm. Hệ neo AN5 hầu như không làm tăng hiệu quả gia cường của tấm CFRP so với trường hợp dầm không neo (Bảng 3.1), mặc dù là tổng diện tích bố trí của hệ neo này lớn hơn 67% so với hệ neo AN2. Như đã bình luận trong phần trước, hệ neo này làm dầm xuất hiện sớm vết nứt xiên trong nhịp cắt ở vùng gần với điểm đặt lực. Hình thái phá hoại do vết nứt uốn-cắt kết hợp đã làm dầm yếu đi (Hình 3.2) và làm giảm khả năng chịu uốn của dầm. Do đó, dạng bố trí hệ neo một cách liên tục và đặc biệt ở trong nhịp cắt gần điểm đặt tải là một hệ neo nên được lựa chọn do

giúp ngăn chặn các vết nứt xiên hình thành sớm và giúp tăng khả năng kháng uốn của dầm được tốt hơn.

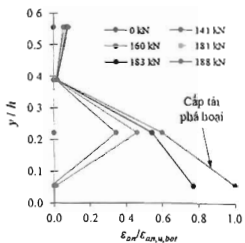
Hệ neo hạn chế sự bong tách sớm và đột ngột của tấm CFRP và do đó giúp tăng khả năng biến dạng của dầm gia cường cũng như giúp cho dầm có neo ứng xử dẻo hơn so với dầm không neo. Cụ thể, chuyển vị cuối cùng của các dầm gia cường có neo (C4-AN2, C4-AN3r1 và C4-ANS) tăng lần lượt 48%, 58% và 42% so với khi không dùng hệ neo (Bảng 3.1).



Hình 3.2: Quan hệ lực - chuyển vị giữa nhịp của dầm

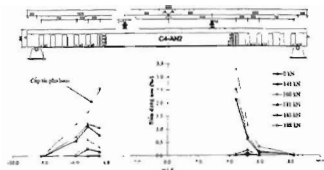


Hình 3.3: Quan hệ lực - bề rộng vết nứt uốn của dầm

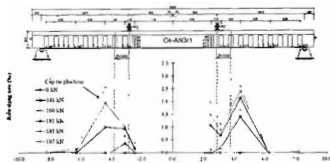


ϵ_{01} - Biến dạng của neo U; ϵ_{02} - Biến dạng của neo ở vị trí gần với đáy dầm nhất tại thời điểm dầm phá hoại; y và h - Khoảng cách từ đáy dầm và chiều cao dầm

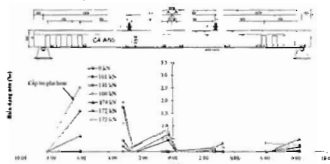
Hình 3.4: Phân bố biến dạng của neo U dọc theo chiều cao dầm điển hình



a) - Hệ neo AN2 của dầm C4-AN2



b) - Hệ neo AN3r1 của dầm C4-AN3r1



c) - Hệ neo AN5 của dầm C4-ANS

Hình 3.5: Phân bố biến dạng điển hình trong hệ neo U (thể hiện ở 1/2 dầm)

Ghi chú: x - Vị trí của cảm biến neo U tính từ trục đối xứng của dầm; d - Chiều cao làm việc của tiết diện dầm, = 330mm.

3.2.3. Ảnh hưởng đến ứng xử nứt của dầm

Ở các cấp tải trọng nhỏ ($<0.45P_u$), ứng xử nứt trong các dầm tương đối giống nhau (Hình 3.3). Sau cấp tải này, hệ neo bắt đầu có sự ảnh hưởng rõ đến ứng xử nứt của các dầm. Bề rộng vết nứt trong dầm C4-AN2 và C4-AN3r1 lớn hơn so với dầm không neo ở cùng một cấp tải, trong khi ở dầm C4-ANS thì ngược lại. Cụ thể, ở cấp tải bằng $95\%P_u$ của dầm C4, bề rộng vết nứt uốn của dầm này là 1.0mm; giá trị này trong dầm C4-AN2, C4-AN3r2 và C4-ANS lần lượt tăng 5%, tăng 25% và giảm 15% so với dầm C4. Hiện tượng này có thể được giải thích là do hệ neo AN2 và AN3r1 được bố trí trong nhịp cắt do đó giúp tăng độ cứng của dầm và hạn chế vết nứt phát triển trong vùng này, tuy nhiên điều này lại làm cho vết nứt tập trung phát triển cục bộ ở những vùng không neo ở giữa nhịp dầm, làm cho vết nứt ở đây trong dầm có neo lớn hơn so với dầm không neo. Ở dầm C4-ANS, hiện tượng này được thể hiện rõ nét với bề rộng vết nứt uốn ở vùng giữa nhịp nhỏ hơn so với dầm C4 do hệ neo được bố trí trong vùng này. Tuy nhiên, điều này đã gây nên sự phân phối lại ứng suất

trong dầm, làm vết nứt tập trung phát triển ở vùng yếu hơn, vùng không có neo gần điểm đặt tải ở nhịp cắt của dầm, dẫn đến sự hình thành sớm vết nứt xiên (ở cấp tải = 44% P_u) hơn so với dầm C4-AN2 và C4 (lần lượt ở cấp tải = 64% P_u và = 69% P_u).

3.2.4. Phân bố biến dạng trong hệ neo U

Phân bố biến dạng của neo U dọc theo chiều cao dầm điển hình được thể hiện trong Hình 3.1. Biến dạng neo U lớn nhất tại vị trí gần đáy dầm và giảm dần khi xa vị trí này và từ vị trí cách đáy dầm khoảng 0.4 - 0.5h (h là chiều cao dầm) trở đi hầu như rất nhỏ. Nói cách khác, nên bố trí neo U cách đáy dầm một khoảng tối thiểu 0.4 - 0.5h để đảm bảo sự làm việc hiệu quả của hệ neo.

Phân bố biến dạng trong các hệ neo AN2, AN3r1 và AN5 theo từng cấp tải được thể hiện trong Hình 3.5. Giai đoạn trước khi ứng xử phi tuyến của dầm trở nên rõ nét (cấp tải < 0.6 P_u), biến dạng trong các dải neo đều rất nhỏ (< 0.05‰), cho thấy hệ neo chưa thực sự làm việc. Sau giai đoạn này, hệ neo bắt đầu làm việc với biến dạng trong các dải neo tăng đều theo cấp tải (Hình 3.5). Nhìn chung, phân bố biến dạng trong hệ neo đều theo quy luật biến dạng lớn nhất ở dải neo gần điểm đặt tải nơi có ứng suất kéo trong tấm CFRP kháng uốn lớn và giảm dần khi xa điểm này tương ứng với ứng suất kéo trong tấm giảm dần. Ngoài ra, hiện tượng vết nứt tập trung phát triển cục bộ ở khu vực không neo ở hệ neo AN5 làm cho dải neo ở gần khu vực này làm việc nhiều hơn các dải neo khác (Hình 3.5c). Một điều đáng lưu ý là biến dạng của neo U ở trong khoảng Z tính từ trong tâm vị trí điểm đặt lực theo phương dọc dầm (Hình 3.5b), với Z là khoảng cách giữa trọng tâm của cốt thép chịu kéo và chịu nén trong dầm (ở nghiên cứu này Z = 300mm), nhỏ hơn so với biến dạng dải neo liên kết ngoài vùng này ở dầm C4-AN3r1 (Hình 3.5b). Dải neo gần gối tựa nhất trong hệ neo gần như không làm việc trong suốt quá trình thí nghiệm với giá trị biến dạng rất nhỏ (Hình 3.5). Ngoài ra, giá trị biến dạng lớn nhất trong các hệ neo đều nhỏ hơn nhiều so với biến dạng kéo đứt của tấm CFRP ($\approx 12\epsilon_{cu}$). Khi diện tích hệ neo tăng, biến dạng lớn nhất trong hệ neo giảm (biến dạng lớn nhất trong hệ neo AN2 lớn hơn 27% so với trong hệ neo AN3r1).

3.2.5. Ảnh hưởng đến biến dạng của tấm CFRP kháng uốn

Hệ neo làm chậm sự bong tách nên biến dạng của tấm CFRP trong các dầm có neo lớn hơn đáng kể so với dầm không neo. Cụ thể, biến dạng lớn nhất của tấm CFRP trong dầm C4 tương ứng với 53% biến dạng kéo đứt của tấm CFRP ($\epsilon_{cu} = 21\text{‰}$) (Bảng 3.1). Giá trị này ở các dầm C4-AN2, C4-AN3r1 và C4-AN5 lần lượt là 67%, 89% và 57%. Như vậy, việc sử dụng hệ neo bố trí ở hai đầu dầm (AN2 và AN3r1) đã làm tăng biến dạng cuối cùng của tấm CFRP trung bình khoảng 45% so với không sử dụng neo. Khi tăng diện tích neo lên 67%, hệ neo AN3r1 làm tăng biến dạng này lên 32% so với hệ neo AN2. Hệ neo AN5 (bố trí trong toàn nhịp uốn và một phần nhịp cắt) ảnh hưởng không đáng kể đến biến dạng cuối cùng của tấm CFRP (chỉ tăng 7% so với dầm không neo) do sự phá hoại sớm hơn mong đợi và do đó biến dạng này chưa đạt giá trị kỳ vọng.

4. KẾT LUẬN

Dựa vào kết quả trên, có thể được rút ra một số kết luận sau:

- Hệ neo CFRP dạng U hạn chế được sự bong tách sớm của tấm CFRP; chỉ giúp tăng nhẹ hiệu quả gia cường uốn của tấm CFRP nhưng cải thiện đáng kể khả năng biến dạng của dầm gia cường (lên tới 58%) so với dầm gia cường không neo;
- Việc tăng diện tích neo có ảnh hưởng không rõ rệt đến khả năng chịu lực của dầm. Do đó về phương diện này, diện tích neo bằng khoảng 80% diện tích neo yêu cầu theo ACI 440.2R-17 (2017) là một giá trị hợp lý đối với dầm neo U tập trung ở hai đầu dầm;
- Cách bố trí neo ảnh hưởng đáng kể đến biến dạng của tấm CFRP và kiểu phá hoại của dầm. Hệ neo phân bố đều và đầy đủ ở nhịp cắt dầm (AN3r1) giúp dầm tránh được kiểu phá hoại uốn - cắt giòn cục bộ ở vùng gần điểm đặt lực, làm tăng đáng kể biến dạng lớn nhất của tấm CFRP (26%). Trong khi, hệ neo bố trí kết hợp trong toàn nhịp uốn và một phần ở hai đầu dầm (AN5) dẫn đến sự phát triển sớm vết nứt xiên tại khu vực không neo gần điểm đặt lực, làm cho dầm chuyển sang dạng phá hoại uốn - cắt dẫn đến khả năng biến dạng của tấm và kháng uốn của dầm không được cải thiện rõ;
- Sự phân bố biến dạng trong các dải neo đều theo quy luật biến dạng lớn nhất ở dải neo gần điểm đặt tải nơi có ứng suất kéo trong tấm CFRP kháng uốn lớn và giảm dần khi xa điểm này. Ngoài ra, chiều cao của dải neo U tối thiểu nên bằng 0.5 lần chiều cao của tiết diện dầm để đảm bảo sự làm việc hiệu quả của hệ neo.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Sở Khoa học và Công nghệ tỉnh Cà Mau, Đề tài mã số 07/2016/HĐ-SKH-CN.

Tài liệu tham khảo

- [1]. ACI 440.2R-17 (2017), *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*, Farmington Hills, MI.
- [2]. European Committee for Standardization (2004), *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings (BS EN 1992-1-1:2004)*.
- [3]. Di Ludovico, M. et al. (2010), *FRP Strengthening of Full-Scale PC Girders*, Journal of Composites for Construction, 14(5), pp.510-520.
- [4]. Nguyen-Minh, L. et al. (2018), *Flexural-strengthening efficiency of CFRP sheets for unbonded post-tensioned concrete T-beams*, Engineering Structures, 166, pp.1-15.
- [5]. Teng, J.G. et al. (2003), *Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs*, Construction and Building Materials, 17(6), pp.447-462.

Ngày nhận bài: 28/02/2019

Ngày chấp nhận đăng: 30/3/2019

Người phản biện: TS. Nguyễn Cảnh Tuấn

TS. Huỳnh Ngọc Thi